2025, Vol.11, No.4, Pages 173 to 182
Journal of Water and Sustainable Development

سال یازدهم، شماره ۴، ۱۴۰۳، صفحات ۱۷۳ تا ۱۸۲
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Case Study

نوع مقاله: مطالعه موردی

Production of Biosorbents from Citrus Wastes for Adsorption of Pollutants and Salt from Wastewaters

F. Papoli Yazdi[1], S. R. Khodashenas[2*], M. Tal'ati[3*]

1, 2, 3- M.Sc. Student, Professor, and Ph.D. Student in Water Structures, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*(Corresponding Author Email: khodashenas@um.ac.ir)

Received: 30-06-2024 Revised: 09-11-2024

Accepted: 11-11-2024 Available Online: 19-02-2025

تدوین الگو افزایش تاب‌آوری اقلیمی سامانه‌های تأمین آب شهری با استفاده از تجارب EPA: ایالت یوتا،آمریکا

فربد پاپلی یزدی[۱]،سعیدرضا خداشناس[۲*]، محمد طلعتی[۳]

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی‌ارشد سازه‌های آبی، استاد و دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

*(رایانامه نویسنده مسئول، E-Mail: khodashenas@um.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱

Abstract

Water and wastewater companies must conduct risk assessments and develop management plans to mitigate risks and enhance resilience. This process involves identifying vulnerable assets, associated threats, and the potential consequences for the company and society. Financially justified countermeasures are then proposed to reduce risk and increase resilience. The result of the risk assessment is the development of a risk management plan model. Climate change has significantly impacted water supply systems, particularly in countries like Iran. By monetizing risk impacts, and comparing costs of current risks with those under managed adaptation programs, the operational resilience of a water supply system can be determined. This research examines the current resilience of the JVWCD facility, which serves 220,000 people, using the US Environmental Protection Agency's Climate Resilience Assessment Tool (CREAT). Climate projections for the region were made for 2060 and 2070. Assets and threats were identified, and their financial risks were assessed. Feasible long-term adaptation scenarios were extracted from the CREAT library, and two models, GWM and AIMD-P, were evaluated as adaptation plans until 2060. The evaluations indicated that implementing the GWM model would increase resilience by 68 percent compared to the current situation. If both models are implemented, resilience will increase to 92 percent of the current level, resulting in a financial optimization of 93 million dollars.

Keywords: Resilience, Climate Change, Sustainability, EPA, Water Supply.

چکیده

شرکت‌های آب و فاضلاب باید ارزیابی‌های ریسک را انجام دهند و برنامه‌های مدیریتی را برای کاهش خطرات و افزایش انعطاف‌پذیری توسعه دهند. این فرآیند شامل شناسایی دارایی‌های آسیب‌پذیر، تهدیدات مرتبط و پیامدهای بالقوه برای شرکت و جامعه است. سپس اقدامات متقابل توجیه شده مالی برای کاهش ریسک و افزایش انعطاف‌پذیری پیشنهاد می‌شود. نتیجه ارزیابی ریسک، توسعه یک مدل طرح مدیریت ریسک است. تغییرات اقلیمی به طور قابل توجهی بر سیستم‌های تأمین آب به‌ویژه در کشورهایی مانند ایران تأثیر گذاشته است. با پولی‌سازی اثرات ریسک، مقایسه هزینه‌های ریسک‌های فعلی با ریسک‌های تحت برنامه‌های سازگاری مدیریت شده، انعطاف‌پذیری عملیاتی یک سیستم تأمین آب را می‌توان تعیین کرد. این پژوهش انعطاف‌پذیری فعلی ناحیه تأسیساتی جُردَن وَلی را که به ۲۲۰۰۰۰ نفر خدمات رسانی می‌کند، با استفاده از ابزار بررسی تاب‌آوری اقلیمی آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا (CREAT) بررسی می‌کند. پیش‌بینی‌های اقلیمی برای این منطقه برای سال‌های ۲۰۶۰ و ۲۰۷۰ انجام شد. دارایی‌ها و تهدیدها شناسایی شدند و ریسک‌های مالی آنها ارزیابی شد. سناریوهای سازگاری بلندمدت امکان‌پذیر از کتابخانه CREAT استخراج شد و دو مدل GWM و AIMD-P به عنوان برنامه‌های انطباق تا سال ۲۰۶۰ ارزیابی شدند. ارزیابی‌ها نشان داد اجرای مدل GWM تاب آوری را تا ۶۸ درصد در مقایسه با وضعیت فعلی افزایش می‌دهد. اگر هر دو مدل پیاده‌سازی شوند، انعطاف‌پذیری به ۹۲ درصد سطح فعلی افزایش می‌یابد که منجر به بهینه‌سازی مالی ۹۳ میلیون دلار می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تاب‌آوری، تغییر اقلیم، پایداری، EPA، تأمین و توزیع آب.

HomePage: https://jwsd.um.ac.ir

How to cite this article: F. Papoli Yazdi,1 S. R. Khodashenas2*, M. Tal'ati (2025). Developing a Model for Enhancing Climate Resilience of Urban Water Supply Systems Using EPA Experiences: Utah State, USA. Journal of Water and Sustainable Development, 11(4), 173-182. doi: http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v11i4.2406-1341

مقدمه

با افزایش ناپایداری‌های محیطی و شدت یافتن تغییرات اقلیمی، سامانه‌های تأمین آب شهری در بسیاری از نقاط جهان با چالش‌های بزرگی روبه‌رو شده است. تاب‌آوری این سیستم‌ها در برابر حوادث طبیعی و انسان ساخت، از جمله خشکسالی‌ها، سیل‌ها و آلودگی‌های صنعتی، به یکی از دغدغه‌های اصلی مدیریت شهری تبدیل شده است (Li و همکاران، ۲۰۲۲).

در پرتو تغییرات اقلیمی و افزایش مخاطرات محیطی، سامانه‌های تأمین آب با چالش‌های بی‌سابقه‌ای مواجه هستند که نیازمند رویکردهای نوآورانه در مدیریت ریسک می‌باشند. تغییرات اقلیمی به طور خاص، با تشدید خشکسالی‌ها و تغییر الگوهای بارش، دینامیک منابع آب را مختل کرده و برنامه‌ریزی‌های مبتنی بر فرضیات گذشته را نامعتبر ساخته است. تجارب اخیر از بلایای طبیعی و مرتبط با آب ناشی از دخالت‌های انسانی نشان می‌دهد که سامانه‌ها و زیرساخت‌های فعلی تأمین آب نمی‌توانند از همه رویدادهای مخرب محافظت و جلوگیری کنند و ممکن است به دلیل عدم قطعیت بالای اختلالات، وابستگی متقابل پیچیده سامانه‌های زیرساختی و خرابی‌های تصادفی ناشی از غیرقابل پیش‌بینی بودن رخدادها، عملکرد غیرقابل‌اعتمادی داشته باشند (Richard، ۲۰۰۲). در چند سال گذشته، توجه بیشتر به سمت ابزارها و استراتژی‌های مبتنی بر تاب‌آوری مانند گزینه‌های تسکین و بازیابی معطوف شده است که سامانه‌های زیرساختی حیاتی (از جمله سامانه‌های آب) را به طور سازگارانه قابل اعتمادتر می‌سازد (Hosseini و همکاران، ۲۰۱۶). یکی از این ابزارها، ابزار ارزیابی تاب‌آوری و آگاهی از تغییرات اقلیمی (CREAT)[1] توسعه یافته توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا است که به سامانه‌های آبی کمک می‌کند تا پتانسیل تأثیرات تغییرات اقلیمی بر زیرساخت‌های خود را شناسایی و به مدیریت ریسک‌های مرتبط بپردازند (U.S.E.P.A، ۲۰۱۸). Cimellaro و همکارانش (۲۰۱۶) یک شاخص تاب‌آوری برای سامانه‌های تأمین و توزیع آب ارائه کردند که از ترکیب سه شاخص اصلی، شامل تعداد مشترکین آب دائمی، سطح آب در مخزن و کیفیت آب تشکیل شده است. این شاخص تاب‌آوری که در مطالعه آنان محاسبه شده است، مناسب برای برنامه‌ریزان و مهندسان سامانه‌های توزیع آب به شمار می‌رود. علاوه‌برآن اطمینان‌پذیری همراه با مدیریت ریسک به‌عنوان معیار اصلی در مهندسی و مدیریت سامانه‌های زیرساختی آب مورد تأکید قرار گرفته است (Gheisi و همکاران، ۲۰۱۶).

برنامه‌های موفق حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی، نیازمند ارزیابی ریسک مؤثر است. برای این منظور، شناسایی تهدیدات، ارزیابی آسیب‌پذیری‌ها و تأثیرات آن‌ها بر دارایی‌ها، زیرساخت‌ها یا سامانه‌ها با در نظر گرفتن احتمال وقوع یک تهدید، اهمیت زیادی دارد. تعداد زیادی از روش‌های ارزیابی ریسک برای زیرساخت‌های حیاتی، شامل مراحلی مانند شناسایی و طبقه‌بندی تهدیدات، شناسایی آسیب‌پذیری‌ها و ارزیابی تأثیر آن‌ها وجود دارد (Rodrigues و همکاران، ۲۰۲۰).

در پژوهشی با عنوان «انتخاب شاخص‌های قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری برای ارزیابی ریسک سامانه‌های منابع آب»، Kjeldsen و Rosbjerg (۲۰۰۴) رفتار غیریکنواخت شاخص‌ها را بررسی کردند که منجر به بررسی دوره بازگشت مورد نیاز شده است. براساس بررسی‌های آنان، طول سری‌های زمانی مورد استفاده برای تخمین تاب‌آوری و آسیب‌پذیری باید حداقل ۱۰۰۰ سال باشد. Liu و همکارانش (۲۰۱۲) در مقاله‌ای با عنوان «ارزیابی تاب‌آوری سامانه منابع آب» به چرخه تطبیقی سامانه‌های منابع آب پرداخته‌اند که چارچوبی را برای توصیف روابط بین اجزای یک سامانه منابع آب و مدیریت تطبیقی و پایدار منابع آب فراهم کرده است. این مطالعه یک روش عملی برای برآورد تاب‌آوری سامانه منابع آب را توسعه داده و در نهایت، کاربرد تخمین‌های تاب‌آوری سامانه‌های تأمین آب هر شهر در استان ژجیانگ کشور چین را بررسی کرده‌اند. در پژوهشی با نام «تجزیه و تحلیل شبکه و تصویرسازی زیرساخت منابع آب در کالیفرنیا: پیوند اتصال و تاب‌آوری» Porse و Lund (۲۰۱۶) از آنالیز شبکه برای توصیف اتصال در شبکه زیرساخت آب ایالت کالیفرنیا استفاده کردند. این پژوهش، سامانه زیرساخت‌های محلی، ایالتی و فدرال را برای اتصال منابع آب در بخش‌های شمالی و شرقی ایالت کالیفرنیا با مصرف‌کنندگان نهایی در مناطق مرکزی، جنوبی و ساحلی بررسی کرده است. Mehran و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی با عنوان «چارچوب دوگانه ارزیابی خشکسالی اجتماعی - اقتصادی: پیوند تنوع آب‌وهوا، تاب‌آوری محلی و تقاضا» انجام دادند. آن‌ها در این مطالعه از یک رویکرد چند متغیره برای ارزیابی خشکسالی اقتصادی - اجتماعی استفاده کردند که به دو شاخص یگانه (تک‌متغیره) وابسته است. ابتدا، یک چارچوب زمانی بر اساس نوع سامانه مخزن (در سال یا بیش از یک سال) تعریف کرده و سپس دو شاخص جدید را، شاخص تاب‌آوری ذخیره‌سازی آب و شاخص قابلیت اطمینان ورودی - تقاضا، معرفی کردند.

در پژوهشی با عنوان «تغییرات تاب‌آوری در سامانه‌های حوضه آبریز: دیدگاهی جدید برای تعیین کمیت تغییرات هیدرولوژیکی بلندمدت تحت اختلالات» که توسط Qi و همکاران (۲۰۱۶) انجام شده، بررسی شده است که در سامانه‌های آبی، متغیرهای نشانگر وضعیت سامانه به آرامی از اغتشاشات کوچک در نزدیکی انتقال بین دو حوزه مجاور بازیابی می‌شوند. این پژوهش نشان می‌دهد که در یک سامانه تاب‌آوری پایین، داده‌های میانی بیشتری که در حالت تاب‌آوری بالا نادیده گرفته می‌شوند، می‌توانند ثبت شوند. این رویکرد می‌تواند برای پیش‌بینی انتقال‌های بحرانی در یک سامانه پیچیده در حوزه استفاده شود.

Amarasinghe و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی با عنوان «ارزیابی کمی تاب‌آوری یک سامانه آبرسانی تحت کاهش بارندگی ناشی از تغییرات آب‌وهوایی»، سه شاخص برای ارزیابی تاب‌آوری یک سامانه تأمین آب معرفی کردند. این پژوهش نوآورانه بوده و رویکرد استفاده شده برای ارزیابی تاب‌آوری، نوعی ارزیابی کمی از آن را ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد کاربرد مفهوم تاب‌آوری می‌تواند شرایط بحرانی مانند کاهش بارندگی را شناسایی کرده و در طول عملیات سامانه تأمین آب به حفظ عملکرد آن کمک کند. Watts و همکاران (۲۰۱۲) در مقاله‌ای با عنوان «آزمایش تاب‌آوری سامانه‌های تأمین آب در برابر خشکسالی‌های طولانی»، رویکردی جدید برای آزمایش طرح‌های مدیریت خشکسالی را مطرح کردند که از دیدگاه مهندسی سنتی فراتر می‌رود و مدیران تأمین آب و قانون‌گذاران در این فرآیند مشارکت می‌کند (افرادی که در طول یک دوره خشکسالی مسئول تصمیم‌گیری هستند). این رویکرد سامانه تأمین آب را که شامل محیط طبیعی، زیرساخت‌های فیزیکی، مؤسسات و مدیران، و همچنین مصرف‌کنندگان آب است، در کنار یکدیگر ارزیابی می‌کند. این چارچوب گسترده، امکان توسعه درک گسترده‌تری از نقاط قوت چارچوب برنامه‌ریزی خشکسالی را فراهم می‌کند و مناطقی را که ممکن است بهبود تاب‌آوری داشته باشند، برجسته می‌کند. Diao و همکاران (۲۰۱۶) در یک مقاله، یک روش جدید برای ارزیابی تاب‌آوری جهانی (GRA)[۲] را معرفی کردند و آن را در سیستم‌های توزیع آب استفاده کردند. در این پژوهش، GRA استفاده شده، تاب‌آوری سیستم‌ها را در سه حالت مختلف خرابی، از جمله خرابی لوله، تقاضای اضافی (مانند حوادث آتش‌نشانی) و نفوذ مواد، ارزیابی می‌کند. حالت خرابی در اینجا شامل تمام سناریوهایی است که سیستم تحت استرس یک خرابی خاص قرار می‌گیرد؛ نتایج ارزیابی GRA در قالب نمودارهایی ارائه شدند که ارتباط بین میزان تنش و شاخص‌های چندگانه کرنش را نشان می‌دهند

Li و همکاران (۲۰۲۲) در مقاله‌ای با عنوان «ارزیابی و راهبرد ارتقای تاب‌آوری سیستم آبرسانی شهری در برابر بلایای سیل و خشکسالی»، یک روش تحلیل همبستگی و یک روش تحلیل عاملی را برای ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های تأمین آب شهری با ترکیب هر زیرسیستم و به‌کارگیری نظریه سیستم خاکستری (که در آن بخشی از اطلاعات شناخته شده و بخشی از اطلاعات ناشناخته است) پیشنهاد دادند. این روش چهار بعد فرآیند تأمین آب (منبع آب، نیروگاه آب، شبکه تأمین و توزیع و استفاده‌کنندگان) و پنج بعد سیستم مدیریت شهری (جامعه، محیط طبیعی، اقتصاد، فیزیک و سازمان) را انعکاس داده است.

Crozier و همکاران (۲۰۲۴) پژوهشی با عنوان «چارچوب تاب‌آوری برای برنامه‌ریزی سیستم‌های تأمین آب شهری» منتشر کردند که یک چارچوب انعطاف‌پذیر را برای برنامه‌ریزی سیستم‌های تأمین آب شهری در مدت گذار به سمت مدیریت یکپارچه منابع آب ارائه می‌کند. بر اساس ترکیبی از ادبیات در سراسر علوم مهندسی، اکولوژیکی و اجتماعی، عملکرد سیستم تاب‌آور با استفاده از عبور از آستانه‌های ایمن شکست و شکست ایمن به‌عنوان شاخص‌های کلیدی تعریف می‌شود.

باتوجه‌به اهمیت موضوع تاب‌آوری در سیستم‌های تأمین و توزیع آب هدف از این پژوهش، تدوین الگویی مناسب جهت افزایش تاب‌آوری سامانه‌های تأمین آب است که از تجارب آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA) بهره می‌گیرد. آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا با توسعه ابزار CREAT یک چارچوب عملیاتی را برای ارزیابی ریسک‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی و توسعه برنامه‌های مدیریتی پیشنهاد داده است (U.S.E.P.A، ۲۰۱۸). .

این پژوهش به دنبال آن است که با ارزیابی مقدار تاب‌آوری از طریق رویکردهای پایدار و بررسی سناریوهای مختلف سازگاری، افزایش تاب‌آوری در سامانه‌های تأمین آب شهری را ممکن سازد. مدل‌های پیشنهادی و استراتژی‌های جایگزین که در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرند، می‌توانند به بهبود قابلیت انطباق و کاهش آسیب‌پذیری سیستم‌ها در برابر مخاطرات طبیعی کمک کنند. ایالت یوتا در آمریکا، باتوجه‌به موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی خود، مستعد تجربه خشکسالی‌ها و نوسانات منابع آبی است.هدف از این پژوهش بررسی ادغام داده‌های محلی با ابزارهای تحلیلی مدرن است که چگونه می‌تواند به افزایش تاب‌آوری سامانه‌های تأمین آب در برابر تغییرات اقلیمی کمک کند.

روش تحقیق

این پژوهش با تمرکز بر مطالعه موردی ایالت یوتا، ایالات متحده، با استفاده از تجربیات و روش‌های آژانس حفاظت از محیط‌زیست (EPA)، از یک رویکرد سیستماتیک برای ارزیابی انعطاف‌پذیری سیستم‌های تأمین آب استفاده می‌کند.

• معرفی ابزار CREAT

در این پژوهش وضعیت انعطاف‌پذیری فعلی ایالت یوتا با استفاده از ابزار ارزیابی و آگاهی تاب‌آوری آب‌وهوا (CREAT) توسعه یافته توسط EPA ارزیابی شد. این ابزار به‌عنوان ابزاری محوری برای ارزیابی انعطاف‌پذیری سیستم‌های تأمین آب عمل می‌کند. CREAT یک پلت فرم جامع و کاربرپسند است که برای کمک به سهام‌داران در ارزیابی اثرات تغییرات آب‌وهوا و افزایش انعطاف‌پذیری در بخش‌های مختلف از جمله مدیریت منابع آب طراحی شده است. این ابزار با استفاده از ماژول‌های مختلف به موارد زیر می‌پردازد:

آگاهی از اقلیم (ماژول ۱): پیش بینی‌های آب و هوا برای ایالت یوتا با استفاده از تکنیک‌های مدل سازی آب و هوا، گسترش پیش‌بینی‌ها تا دهه‌های ۲۰۶۰ و ۲۰۷۰ به دست آمد. این تجزیه و تحلیل به پیش‌بینی شرایط اقلیمی آینده و ارزیابی تأثیر آنها بر انعطاف پذیری

سیستم تأمین آب کمک می‌کند.

توسعه سناریو (ماژول ۲): این ماژول به کاربران اجازه می‌دهد تا از طریق توسعه و ارزیابی سناریوهای مختلف، پیش‌بینی تغییرات آتی در شرایط اقلیمی را انجام دهند و برنامه‌های سازگاری متناسب را طراحی کنند. داده‌های دریافت شده توسط CREAT در این پژوهش عبارتند از: اقلیم منطقه مورد مطالعه، ویژگی‌های هیدرولیکی، تغییرات مشاهده شده و پیش‌بینی شده در میانگین دما، تغییرات برف، رواناب و رطوبت خاک، میانگین سالانه موج گرمایی و موج سرمایی برای جنوب غربی ایالات متحده و پیش‌بینی کاهش میانگین بارندگی سالانه در سراسر ایالت‌های جنوب غرب آمریکا.

پیامدها و دارایی‌ها (ماژول ۳): این ماژول اثرات تغییرات اقلیمی بر دارایی‌ها و عملکردهای سازمانی را تحلیل می‌کند و از کاربران خواسته می‌شود که پیامدهای احتمالی را شناسایی و ارزیابی کنند. دارایی‌های کلیدی ایالت یوتا از جمله زیرساخت‌ها، منابع طبیعی و عناصر اجتماعی-اقتصادی، شناسایی شده‌اند. تهدیدهای بالقوه برای این دارایی‌ها، مانند خطرات مربوط به تغییرات آب و هوایی، نیز از طریق مشاوره با سهامداران و نظرات کارشناسان تعیین شد.

برنامه‌ریزی سازگاری (ماژول ۴): این ماژول به کاربران امکان می‌دهد تا بر اساس اطلاعات به دست آمده از ماژول‌های قبلی، برنامه‌های سازگاری را برای مواجهه با تهدیدات اقلیمی و کاهش آثار آنها طراحی و اجرا کنند.

ارزیابی ریسک (ماژول ۵): ریسک‌های مالی مرتبط با هر دارایی و تهدید شناسایی شده و به صورت کمی ارزیابی شده‌اند. این شامل برآورد هزینه‌های بالقوه وقوع ریسک در شرایط فعلی و مقایسه آنها با سناریوهایی بود که در آن استراتژی‌های انطباق و مدیریت اجرا می‌شوند. کاهش ریسک پولی [۳](MRR) تغییر در ریسک ارزیابی شده بر اساس افزایش قابلیت دارایی‌ها برای مقاومت در برابر اثرات تهدیدات، پس از اجرای یک طرح سازگاری است (طلعتی و همکاران، ۱۴۰۲) (رابطه ۱):

$$MRR=(\text{Max Impact}_{(PL,Category)}-\text{Min Impact}_{(CM,Category)}) \text{ to } (\text{Max Impact}_{(CM,Category)}-\text{Min Impact}_{(PL,Category)}) \quad (۱)$$

• مشخصات محدوده مورد مطالعه

ایالت یوتا در میان رشته‌کوه‌های راکی واقع شده است. این ایالت از سوی شرق به رشته‌کوه‌های پوشیده از برف راکی و از سوی غرب به نمک‌زار و دریاچه‌های خشکیده نمک می‌رسد. شهر سالت‌لیک‌سیتی مرکز این ایالت دارای آب‌وهوای گرم و خشک در تابستان و سرد و برفی در زمستان و بارش‌های فصلی متوسط تا کم است. تغییرات آب‌وهوایی این منطقه شامل افزایش دما، کاهش بارش زمستانی و احتمال افزایش خطر سیل در نواحی کمتر برفی می‌باشد. این تغییرات می‌توانند منجر به خشکسالی‌های گرم‌تر و شدیدتری نسبت به گذشته شوند (Cayan و همکاران، ۲۰۱۲).

بر اساس تحلیل‌های شورای اقلیم ایالات متحده، کاهش قابل توجه در میزان آب برفی، جریانات آب و رطوبت خاک در منطقه قابل مشاهده است. این تغییرات می‌توانند تأثیرات جدی روی سامانه‌های تأمین آب داشته باشند، از جمله تلفات عمده در مقدار آب حاصل از برفی که رودخانه‌های غربی را پر می‌کند، کاهش رواناب در مناطق مختلف از جمله کالیفرنیا، آریزونا و کوه‌های راکی مرکزی و کاهش رطوبت خاک در سراسر منطقه. این شرایط نشان‌دهنده افزایش خطر کمبود آب در آینده در سامانه‌های تأمینی است؛ بنابراین اقداماتی جهت مدیریت منابع آب و تطبیق با این تغییرات اساسی می‌تواند حیاتی باشد (National Science Council، ۲۰۱۵).

تناوب امواج گرمایی به‌طورکلی در دهه‌های اخیر افزایش یافته است و از نظر آماری روند صعودی قابل توجهی دارد. پیش‌بینی می‌شود که وقایع امواج گرمایی شدیدتر و طولانی‌تر در قرن حاضر رخ دهد. یک روند نزولی کلی در وقوع امواج سرمایی نیز وجود دارد که از نظر آماری معنادار است (Kenneth و همکاران، ۲۰۱۳). تغییرات پیش‌بینی شده در بارش سالانه برای سال ۲۰۶۰ با استفاده از داده‌های الگو EPA (CREAT) نشان می‌دهد که شرایط برای کل منطقه جنوب غربی ایالات متحده خشک‌تر باشد و در برخی از بخش‌های جنوب غربی، میانگین بارندگی سالانه بین ۲۵ تا ۳۰ درصد نسبت به شرایط فعلی کاهش یابد. افزایش حداکثر تعداد روزهای خشک متوالی سالانه، تا ۲۶ روز بالاتر از مقادیر کنونی، برای بخش‌هایی از کالیفرنیای جنوبی و آریزونا نیز انتظار می‌رود. این پیش‌بینی‌های بارش، احتمال افزایش خشکسالی‌های شدیدتر برای اقلیم منطقه را منجر خواهند شد (جدول ۱).

جدول ۱- نگرانی‌های فعلی مرتبط با محدوده مطالعاتی

نگرانی‌های فعلی	بخش مرتبط
خشکسالی ذخیره برف/ مخازن طبیعی	مدیریت و تأمین آب
ورود رواناب به مخازن طبیعی نقص در تصفیه نفوذ آب شور ایجاد کدورت در مخازن آب شکوفه‌های جلبکی	چالش‌های کیفیت آب
آتش‌سوزی سیل گردبادها طوفان‌های یخی و یخ‌بندان	بلایا و سوانح طبیعی
تراکم مصرف‌کنندگان کاربری زمین‌ها در دسترس بودن نیروی کار	تغییرات جمعیتی

نتایج و بحث

ماتریس پیامدهای اقتصادی برای افزایش تاب‌آوری سامانه تأمین آب با استفاده از الگو CREAT و اطلاعاتی از جمعیت مشترکین، وضعیت مالی، نوع سامانه تأمین آب و جریان کلی، تهیه شد. در تدوین الگوی افزایش تاب‌آوری سامانه تأمین آب، ارزیابی پیامدهای اقتصادی منطقه‌ای ناشی از قطع خدمات سامانه تأمین آب شرکت مورد نظر انجام شد. برای این ارزیابی، از رویکرد کارآمد "ابزار تحلیل اقتصادی و سلامت آب سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده (WHEAT)" استفاده شد. با در نظر گرفتن اطلاعات مربوط به شرکت، از جمله گستره خدماتی آن (water only, Wastewater only, water and Wastewater utility) و وضعیت مالی، «تعداد روزهای عدم سرویس‌دهی» و «درصد مشترکین تحت تأثیر» مشخص شدند. سپس با استفاده از مقادیر شاخص پولی، تهدیدات مرتبط با سناریوهای شرایط اقلیمی به ماتریس پیامدهای اقتصادی اضافه شدند. دارایی‌های متأثر از تهدیدات به دو دسته دارایی‌های حیاتی و غیرحیاتی تقسیم شدند. باتوجه‌به اینکه منابع تأمین آب یوتا از سه بخش اصلی دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و چاه‌ها می‌باشد، سه دسته اصلی از دارایی‌های غیرحیاتی باتوجه‌به خصوصیات مورد نیاز تعریف شدند. این دسته‌ها شامل رودخانه‌ها و آبراهه‌ها (با مثال رودخانه کلرادو)، مخازن و دریاچه‌ها (مثال دریاچه Great Salt) و سفره‌های آب زیرزمینی (مانند فلات کلرادو و حوضه آبریز و رشته‌کوه‌های مرکزی کلرادو) هستند. پس از اجرای الگو CREAT و ورود داده‌های دریافتی از ایستگاه‌های Jordan river، در نهایت نتایج سناریو پایه به شرح جدول (۲) گزارش شد.

جدول ۲- داده‌های الگو CREAT در سناریو پایه

شاخص	مقدار در سناریوپایه
میانگین دمای سالانه (سانتیگراد)	۷/۳۹
تغییر درجه حرارت سالانه (سانتیگراد)	--
تعداد روزهای گرم سالانه بیش از ۳۲ درجه (سانتیگراد)	۱۸
تعداد روزهای گرم سالانه بیش از ۳۵ درجه (سانتیگراد)	۲
تعداد سالانه روزهای گرم بیش از ۳۷/۸درجه (سانتیگراد)	۰
کل بارندگی سالانه (میلی‌متر)	۷۰۸
تغییرات سالانه بارندگی (درصد)	--
شدت بارندگی ۱۰۰ ساله (میلی‌متر/۲۴ ساعت)	۸۰۱
شدت بارندگی ۱۰۰ ساله (میلی‌متر/۷۲ ساعت)	۱۰۸
شدت بارندگی ۵۰ ساله (میلی‌متر/۲۴ ساعت)	۷۳
شدت بارندگی ۵۰ ساله (میلی‌متر/۷۲ ساعت)	۹۸
جریان میانگین متوسط سالانه (مترمکعب/ثانیه)	۳/۹۴
جریان کمینه متوسط سالانه (مترمکعب/ثانیه)	۱/۳۷
جریان بیشینه متوسط سالانه (مترمکعب/ثانیه)	۶/۲۴

با توجه به پیامدهای پیش بینی شده سناریو تغییر اقلیم در سال ۲۰۶۰ (جدول ۳) برای افزایش تاب‌آوری، اقدامات سازگاری به شرح زیر و به‌صورت گسترده مورد توجه قرار گرفت:

۱. انعطاف‌پذیری عملیاتی گسترش یافته شرکت‌های تامین‌کننده آب در مواجهه با تهدیدات تغییر اقلیمی

۲. ظرفیت از پیش افزایش یافته سامانه‌های تامین آب

۳. استراتژی‌های جایگزین برای افزایش انعطاف‌پذیری و سرمایه‌گذاری‌های بیشتر برای گسترش ظرفیت سامانه برای مقابله با اثرات اقلیمی

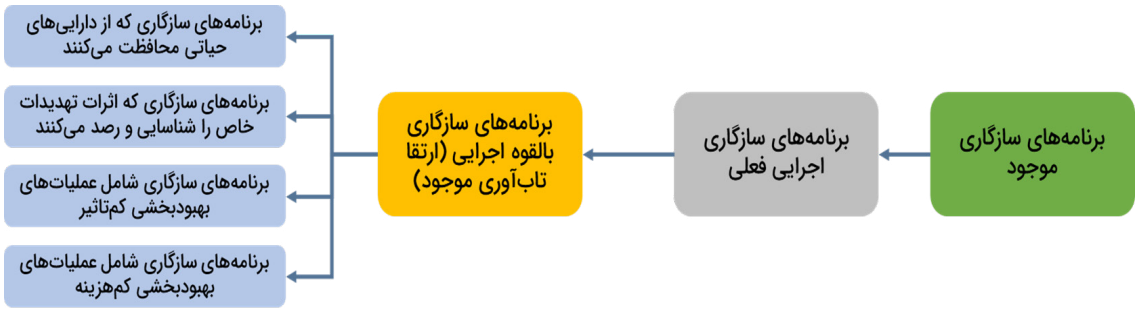
جدول۳- پیامدهای پیش‌بینی شده سناریو تغییر اقلیم در سال ۲۰۶۰ میلادی

شاخص	مقدار در سناریوپایه
میانگین دمای سالانه (سانتیگراد)	--
تغییر درجه حرارت سالانه (سانتیگراد)	-۱۴/۱
تعداد روزهای گرم سالانه بیش از ۳۲ درجه (سانتیگراد)	۶۶
تعداد روزهای گرم سالانه بیش از ۳۵ درجه (سانتیگراد)	۳۱
تعداد سالانه روزهای گرم بیش از ۳۷/۸درجه (سانتیگراد)	۶
کل بارندگی سالانه (میلی‌متر)	--
تغییرات سالانه بارندگی (درصد)	-۱/۷۱
شدت بارندگی ۱۰۰ ساله (میلی‌متر/۲۴ ساعت)	۸۰/۵
شدت بارندگی ۱۰۰ ساله (میلی‌متر/۷۲ ساعت)	۱۰۸/۵
شدت بارندگی ۵۰ ساله (میلی‌متر/۲۴ ساعت)	۷۲/۶
شدت بارندگی ۵۰ ساله (میلی‌متر/۷۲ ساعت)	۹۷/۸
جریان میانگین متوسط سالانه (مترمکعب/ثانیه)	۳/۳۴
جریان کمینه متوسط سالانه (مترمکعب/ثانیه)	۱/۳
جریان بیشینه متوسط سالانه (مترمکعب/ثانیه)	۵

تفاوت اصلی بین اقدامات موجود و اقدامات بالقوه:

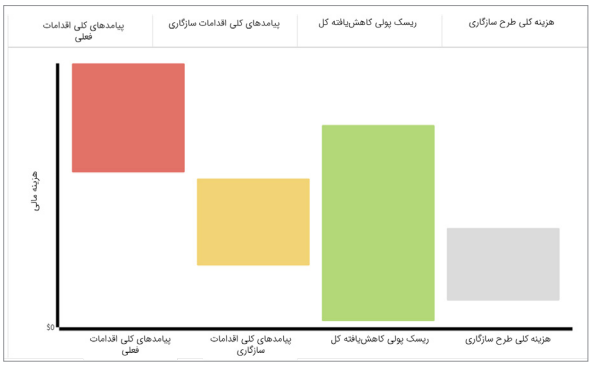
اقدامات موجود، اقداماتی هستند که یک شرکت از قبل طراحی کرده و سطحی از محافظت در برابر تهدیدات اقلیمی را فراهم می‌کنند اقدامات بالقوه، اقداماتی هستند که ممکن است بهبود اقدامات موجود را فراهم کنند یا به طور کامل نوآوری شوند. هر یک از این اقدامات بالقوه می‌تواند به‌عنوان بخشی از برنامه‌های سازگاری در طول ارزیابی ریسک در نظر گرفته شود که در نهایت منجر به افزایش تاب‌آوری خواهد شد. شکل (۱) بیانگر موضوع فوق می‌باشد.

در مرحله بعدی افزایش تاب‌آوری سامانه تأمین آب، گزینه‌های مختلفی در چارچوب مشخصی تعریف شدند. این گزینه‌ها شامل نام و توضیح اقدامات براساس شرایط، هزینه اجرای آنها، ارتباط با تهدیدات مورد ارزیابی و سایر جزئیات بودند. سپس اقدامات سازگاری موجود و پیش‌بینی شده بر اساس الگو CREAT شناسایی شدند.



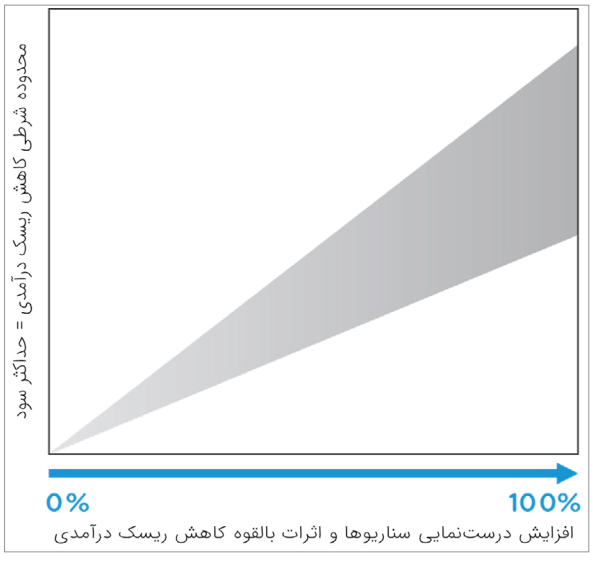
شکل ۱- تفاوت اقدامات فعلی موجود و اقدامات بالقوه و تأثیر آن در ارتقا میزان تاب‌آوری

خروجی‌ها نشان دادند هر اقدام چگونه با تهدیدات مختلف ارتباط دارد و هزینه اجرایی آن چقدر است. ارزیابی پیامدها توسط الگو CREAT در ماژول پیامدها و دارایی‌ها باعث کاهش ریسک تخمینی پولی شد. هدف این مرحله، شناسایی و برنامه‌ریزی برای اجرای اقدامات سازگاری بود که به کاهش ریسک کمک می‌کرد. نتایج ارزیابی ریسک برای اطلاع از فرآیندهای تصمیم‌گیری یا کمک به توجیه بودجه مالی برای انتخاب گزینه‌های سازگاری مورد استفاده قرار گرفت. پس از ارزیابی توانایی‌های فعلی و شرایط مشابه، CREAT ارزش ریسک پولی را برای هر ارزیابی محاسبه کرد و تفاوت بین کل ریسک پولی برای هر طرح سازگاری و ریسک فعلی را به‌عنوان کاهش ریسک پولی گزارش داد. نتایج این ارزیابی نشان داد انجام اقدامات سازگاری می‌تواند به کاهش پیامدهای تهدیدات مربوط به تغییرات اقلیمی و تاب‌آوری کمک کند (شکل ۲).

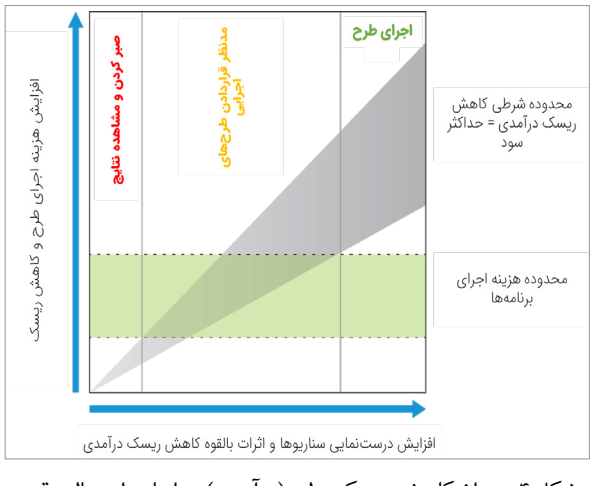


شکل ۲- نمای نهایی پلان اجرای اقدامات افزایش تاب‌آوری

درست‌نمایی سناریو برای نتایج اعمال شد، در نتیجه ارزیابی‌ها، ریسک برای آن سناریو کاهش یافت و پتانسیل کمتری برای وقوع تهدید گزارش شد. مقایسه هزینه‌های طرح سازگاری با کاهش ریسک پولی برای درست‌نمایی همه سناریوها، از ۰ تا ۱۰۰٪ نمایش داده شد (شکل ۳). انتخاب هر ترکیبی از طرح و سناریو سازگاری و میزان کاهش هزینه و ریسک به‌عنوان تابعی از احتمال مقایسه شد. در شکل (۴) چندین محل تقاطع وجود داشت که آستانه‌هایی را نشان می‌دادند که مقادیر درست‌نمایی بالاتر یا پایین‌تر از آن‌ها می‌توانست تصمیمات اجرایی متفاوتی را ارزیابی کند. در صورتی که هزینه از کاهش ریسک بیشتر شد، اگر سناریو واقعی یک شرایط نادر با درست‌نمایی کمتر باشد، طرح به‌عنوان یک سرمایه‌گذاری غیرعاقلانه در نظر گرفته شد. اما زمانی که کاهش ریسک از هزینه بیشتر شد، در مواردی که احتمال وقوع سناریو وجود داشت، طرح به‌عنوان یک سرمایه‌گذاری محتاطانه در نظر گرفته شد.



شکل ۳- میزان کاهش ریسک پولی (درآمدی) بر اساس احتمال وقوع سناریوها



شکل ۴- میزان کاهش ریسک پولی (درآمدی) بر اساس احتمال وقوع سناریوها در بازه‌های محدوده شرطی

در مطالعه موردی، دو طرح اصلی برای افزایش تاب‌آوری بررسی شدند. طرح اول مربوط به اجرای الگو AIDM-P[۴] بود و نتایج آن به شرح زیر است:

- پیامدهای اقتصادی: اقدام فعلی بیش از ۹,۷۰۰,۰۱۶ دلار بوده است، درحالی‌که اقدام برنامه‌ریزی شده بین ۶,۴۵۶,۴۰۹ تا ۲۳,۱۷۵,۸۲۳ دلار تغییر کرده است.
- پیامدهای اقتصادی منطقه‌ای: میزان پیامد اقدام موجود حدود ۸۴,۸۹۸,۸۹۲ دلار بوده است که با اجرای طرح برنامه‌ریزی شده به حدود ۱۶۹,۷۹۷,۷۸۴ دلار افزایش می‌یابد.
- اثرات اقتصادی منطقه‌ای: با اقدام موجود ۳۰ روز بدون خدمت و ۱۵ درصد مشترکین دچار قطعی آب بوده‌اند، درحالی‌که با اجرای طرح برنامه‌ریزی شده به ۱۵ روز بدون خدمت و ۱۰ درصد مشترکین دچار قطعی آب، کاهش می‌یابد.
- پیامدهای سلامت عمومی و اثرات بهداشت عمومی: هر دو طرح برابر بوده و هیچ تلفات جانی یا مصدومیتی گزارش نشده است.

در سناریو فعلی سازگاری در ایالت سالت‌لیک‌سیتی، در شرایط شدیدترین حالت، با تأثیرات تغییرات اقلیم مواجه شده و اقدامات برنامه‌ریزی شده به نظر می‌رسد قصد داشته قطع خدمات را به مقدار ۵ درصد کاهش دهد. ارزیابی پیامدهای سلامت و بهداشت عمومی برای این سناریو به مقدار صفر دلار و بدون تلفات جانی و مصدومیت در نظر گرفته شده است.

نتایج ارزیابی‌های مختلف مرتبط با الگوی افزایش تاب‌آوری با اجرای طرح AIDM-P به شرح زیر بوده است:

- پیامدهای اقتصادی: میزان اقدام فعلی بین ۲,۶۲۱,۳۱۲ تا ۱۶,۲۰۵,۵۱۱ دلار و میزان اقدام برنامه‌ریزی شده بین ۱,۰۴۲,۶۵۶ تا ۱۴,۲۵۲,۵۶۱ دلار تغییر کرده است.
- پیامدهای اقتصادی منطقه‌ای: میزان پیامد اقدام فعلی حدود ۳۹,۶۱۹,۴۸۳ دلار بوده و با اجرای طرح برنامه‌ریزی شده به حدود ۵۶,۵۹۹,۲۶۱ دلار افزایش می‌یابد.
- اثرات اقتصادی منطقه‌ای: با اقدام فعلی ۱۰ روز بدون خدمت و ۱۰ درصد مشترکین دچار قطعی آب بوده و با اجرای طرح برنامه‌ریزی شده به ۷ روز بدون خدمت و ۱۰ درصد مشترکین دچار قطعی آب کاهش می‌یابد.
- پیامدهای سلامت عمومی و اثرات بهداشت عمومی: هر دو طرح برابر بوده و هیچ تلفات جانی یا مصدومیتی گزارش نشده است.

در سناریو افزایش تاب‌آوری و سازگاری در ایالت سالت‌لیک‌سیتی، ارزیابی‌هایی برای دو طرح مختلف انجام شد. برای طرح اول که از الگو AIDM-P استفاده می‌کند، در شرایط شدیدترین حالت، قطعی خدمات به میزان ۳ درصد کاهش پیدا می‌کند. اما ارزیابی پیامدهای سلامت و بهداشت عمومی برای این سناریو صفر دلار و بدون تلفات جانی و مصدومیت نشان می‌دهد.

طرح دوم که از الگو GWM[۵] استفاده می‌کند، در شرایط سخت‌تر، آسیب‌پذیری کمتری دارد و قطعی خدمات به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین، ارزیابی پیامدهای سلامت و بهداشت عمومی نیز برای این طرح به صفر دلار و بدون تلفات جانی و مصدومیت می‌رسد. اجرای طرح GWM در شرایط سخت‌تر به یک سامانه تأمین آب پایدار منجر می‌شود و قطع خدمات به مشترکین را به صفر کاهش می‌دهد. همچنین، ارزیابی پیامدهای سلامت و بهداشت عمومی نیز بدون هزینه و بدون تلفات جانی و مصدومیت انجام شده است. چارچوب نهایی الگو بر اساس گزارش‌های IPCC بر اساس شکل (۵) ارائه گردید.

جدول (۴) نشان می‌دهد اجرای طرح‌های AIDM-P و GWM برای افزایش تاب‌آوری سامانه‌های تأمین آب سالت‌لیک‌سیتی، از نظر هزینه نهایی و کاهش ریسک پولی بسیار مؤثر بوده است. باتوجه‌به اطلاعات موجود، اولویت اجرایی طرح AIDM-P در وضعیت "صبر کردن و مشاهده نتایج" با احتمال وقوع ۱۰۰ درصد قرار دارد، درحالی‌که در وضعیت "مدنظر قراردادن طرح‌های اجرایی" احتمال وقوع ریسک مالی تا ۷/۳۹ درصد می‌باشد. اما برای طرح GWM، اولویت اجرایی در ورود به فاز "مدنظر قراردادن طرح‌های اجرایی" تا ۱۶/۰۵درصد و در نهایت "اجرای طرح" است. درحالی‌که این طرح در وضعیت "صبر کردن و مشاهده نتایج" با احتمال وقوع ریسک پیش‌بینی شده تا ۲/۳۶ درصد می‌باشد.

شکل ۵- چارچوب نهایی الگو بر اساس گزارش‌های IPCC ۲۰۱۴

جدول ۴- مقایسه کاهش ریسک پولی در سناریوهای الگو CREAT پس از اجرای دو طرح AIDM-P و GWM

نام طرح	هزینه نهایی	سناریو پایه	سناریو افزایش تاب‌آوری
AIDM-P	$40,000,000 - $1,000,000	> $1,688,950	$3,267,606 - $264,000
GWM	$6,400,000 - $1,000,000	> $86,587,842	$42,351,089 - $39,883,483

• نتایج ارزیابی تاب‌آوری و ارزیابی سناریو شهرستان سالت لیک، یوتا

ارزیابی تاب‌آوری و ارزیابی سناریو در شهرستان سالت لیک ناحیه تأسیساتی آبرسانی دره جردن[۶] انجام شد. این ناحیه به حدود ۲۲۰ هزار نفر که عمدتاً در شهرها و مناطقی در شهرستان سالت لیک یوتا واقع شده‌اند، آب آشامیدنی و خدمات خرده‌فروشی آب را ارائه می‌دهد. دره جردن تقریباً ۹۰ درصد از آب ناحیه خود را به‌صورت عمده فروشی به شهرها و ۱۰ درصد دیگر را به مناطق صنعتی تحویل می‌دهد.

از چالش‌های عمده‌ای که این منطقه با آن روبه‌روست تأثیرات شرایط خشکسالی و کاهش کیفیت آب است که بر عرضه و تقاضای آب تأثیرگذار است. خشکسالی و کاهش مقدار برف در منطقه بر تأمین آب دره جردن تأثیرگذار است؛ زیرا بیش از نیمی از آب آن در یک بازه زمانی سه ماهه تحویل داده می‌شود. همچنین تأثیر بالقوه شکوفه‌های جلبکی می‌تواند بر کیفیت آب منابع دره تأثیر منفی بگذارد.

• استراتژی‌ها و اولویت‌های تاب‌آوری

با استفاده از نتایج ارزیابی CREAT، عملکرد و هزینه‌های چندین استراتژی بالقوه مدیریت خشکسالی و کاهش کیفیت آب ارزیابی شد که در صورت اجرا، می‌تواند انعطاف‌پذیری عملیاتی سیستم را بیشتر تقویت کند (جدول ۵).

این پژوهش به مسئله اصلی تأثیر تغییرات اقلیمی بر سامانه‌های تأمین آب و راهکارهای افزایش تاب‌آوری پرداخته است. ازآنجاکه تغییر اقلیم می‌تواند عواقب جدی بر سامانه‌های تأمین آب داشته باشد، ارزیابی و محاسبه تاب‌آوری این سامانه‌ها در برابر ریسک و تهدیدات اقلیمی امری حیاتی است. در این پژوهش، از ابزار CREAT آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا بهره گرفته شد تا تأثیرات تغییرات اقلیمی را بر سامانه‌های تأمین آب در ایالت یوتا بررسی کند. باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه موردی، مشخص شد افزایش تاب‌آوری سامانه‌های تأمین آب از طریق اجرای طرح‌های سازگاری و مدیریت ریسک اقتصادی و مالی می‌تواند تأثیر مثبتی بر عملکرد و پایداری این سامانه‌ها داشته باشد.

اثرات نامطلوب تغییرات آب‌وهوایی فقط محدود به جنبه‌های عملیاتی سیستم‌های آب نیست، بلکه به شاخص‌های هیدرولیکی مانند تغییرات نرخ جریان، فشار و ظرفیت ذخیره‌سازی آب نیز بستگی دارد. یکی از اهداف این پژوهش ارزیابی تأثیر سناریوهای پیش‌بینی شده اقلیمی تا سال ۲۰۶۰ با استفاده از مدل CREAT بود. نتایج نشان داد تحت تأثیر این سناریوها، انتظار می‌رود میانگین بارندگی سالانه تقریباً ۱,۷۱ درصد کاهش یابد، در حالی که میانگین دمای سالانه ممکن است حدود ۶,۶۲ درجه فارنهایت افزایش یابد.

جدول ۵- نتایج ارزیابی CREAT، برای تقویت تاب‌آوری عملیاتی سیستم در دره جردن (U.S.E.P.A، ۲۰۱۸)

نوع	استراتژی‌های تاب‌آوری
اقدامات جاری	-پیاده‌سازی ارتقای AMI شامل بازخورد مشتریان -اجرای ارتقای AMI شامل بازخورد مشتری -ارتقای سیستم اسکادا (SCADA) -ساخت مخزن تصفیه‌خانه آب دره جردن -تدوین طرح مدیریت تغییر اقلیم -اجرای طرح‌های حفاظت از آب (۱۹۹۷-۲۰۱۰ و ۲۰۱۰-۲۰۱۷)
اقدامات تطبیقی بالقوه	-تنظیم دقیق زمان حقابه‌ها -بهبود وضعیت چشمه‌های کاستو و درای کریک برای تأمین آب اضافی -تنوع بخشیدن به سبد تأمین آب -اجرای اقدامات حفاظتی برای کاهش ۲۵ درصد تقاضا تا سال ۲۰۲۵ -ایجاد طرح آمادگی برای خشکسالی -افزایش بهره‌برداری از منابع آب رودخانه‌ای -استفاده مجدد از آب‌های خاکستری -افزایش صرفه‌جویی در مصرف آب تا ۵ درصد -حمایت از تلاش‌ها برای حفظ دریاچه یوتا به‌عنوان منبع ثانویه آب شهری و صنعتی -توسعه پروژه تأمین آب رودخانه بیبر برای دستیابی به منابع آب سطحی

این مطالعه همچنین شامل تجزیه و تحلیل دارایی کامل از سیستم تأمین آب دره جردن در سالت‌لیک‌سیتی، یوتا، برای تعیین پیامدهای مالی تغییرات آب‌وهوایی بر روی هر دارایی بود. ارزش مالی هر دارایی و زیان‌های پولی خاص برای نتایج پیش‌بینی شده به دقت فهرست‌بندی شد و در نهایت نسبت پوشش بدهی (DCR) را برای سناریوهای جاری و پیش‌بینی شده تعریف کرد. یافته‌ها بر افزایش قابل توجه تاب‌آوری که می‌توان با ادغام استراتژی‌های سازگاری با اقدامات موجود به دست آورد، تأکید می‌کنند.

استفاده از مدل سازگاری GWM در این پژوهش نشان داد که تاب‌آوری می‌تواند به طور قابل‌ملاحظه‌ای بهبود یابد. به طور خاص، این مدل تأخیر اقدام فوری را تسهیل می‌کند و امکان افزایش ۲,۳۶

درصدی انعطاف‌پذیری را در سناریوهای پایه فعلی و تا ۱۶،۰۵ درصد افزایش در سناریوهایی را فراهم می‌کند که برنامه‌ریزی فعال قبل از وقوع خطر را در نظر می‌گیرند. علاوه‌براین، هزینه‌های اقتصادی به دو گروه اصلی: هزینه‌های اجرای طرح‌های انطباق و نتایج مالی ناشی از این طرح‌ها طبقه‌بندی شدند. این مبلغ برای اولی بین ۱ تا ۶،۴ میلیون دلار و برای دومی بین ۷،۵ تا ۳۷،۴ میلیون دلار تخمین زده شد. پیامدهای مالی بالقوه تهدیدات آب‌وهوایی حدود ۱۳۶،۸ میلیون دلار است.

با به‌کارگیری الگوهای سازگاری مانند GWM، توانایی سامانه‌های تأمین آب در مقابل تهدیدات اقلیمی به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد و همچنین بهینه‌سازی اقتصادی و مالی اجرای طرح‌های سازگاری می‌تواند به مقدار قابل توجهی هزینه‌های اقتصادی را کاهش دهد. این نتایج با نتایج به‌دست آمده توسط Amarasingh و همکاران (۲۰۱۶) همخوانی دارد.

با درنظرگرفتن تمام سازگاری‌های برنامه‌ریزی شده و اثرات مالی آنها، بهینه‌سازی اقتصادی می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در هزینه از ۱۲۶،۴ میلیون دلار در شرایط حداقل هزینه تا ۹۳ میلیون دلار در شرایط حداکثر هزینه شود که نشان دهنده افزایش انعطاف پذیری سیستم به میزان ۶۸-۹۲٪ است. این مطالعه نقش حیاتی اقدامات انطباق استراتژیک را در افزایش قابل توجه انعطاف پذیری سیستم‌های تأمین آب در برابر پس زمینه شرایط آب و هوایی در حال تحول برجسته می‌کند.

باتوجه‌به یافته‌های حاصل از این مقاله، می‌توان به تحلیل تطبیقی نتایج با سایر مطالعات و مدل‌ها پرداخت. در مطالعات گذشته نیز، الگوهای مختلفی برای افزایش تاب‌آوری سامانه‌های توزیع و تأمین آب پیشنهاد شده است. باتوجه‌به نتایج این پژوهش، مشخص شد طرح‌های AIDM-P و GWM به طور مؤثری می‌توانند بهبود تاب‌آوری سامانه‌های توزیع و تأمین آب را فراهم کنند. این الگوها نه تنها منجر به کاهش خسارات اقتصادی و مالی در صورت وقوع حوادث و تهدیدات اقلیمی می‌شوند، بلکه باعث کاهش ریسک‌های مرتبط با این تهدیدات می‌شوند. نتایج به‌دست‌آمده توسط Cimellaro و همکاران (۲۰۱۶) نیز این مسئله را نشان می‌دهد.

در تفسیر نتایج، مشخص شد اجرای طرح AIDM-P باعث کاهش قابل توجهی در میزان قطع خدمات و پیامدهای اقتصادی و منطقه‌ای مرتبط با آن می‌شود. همچنین، طرح GWM نشان داد در شرایط سخت‌تر، به‌عنوان یک سامانه تأمین آب پایدار عمل می‌کند و اثرات مثبتی بر ریسک‌های مرتبط با تهدیدات اقلیمی دارد.

در این مقاله، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد که می‌تواند بر تفسیر و کلیت نتایج تأثیر بگذارد. به‌عنوان‌مثال، محدودیت‌های مربوط به داده‌ها، مدل‌های استفاده شده و شرایط محیطی خاص منطقه مورد بررسی قابل ذکر است. برای پژوهش‌های آینده، توصیه می‌شود که به این محدودیت‌ها توجه بیشتری شود و از روش‌های بهبودی برای حل آن‌ها استفاده شود. همچنین، اجرای آزمایش‌های بیشتر و اعمال مدل‌های دیگر نیز می‌تواند به توسعه دانش در این حوزه کمک کند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان می‌دهد که تحلیل و ارزیابی دقیق تأثیرات تغییرات اقلیمی و اجرای طرح‌های سازگاری می‌تواند ابزار مؤثری برای افزایش تاب‌آوری سامانه‌های تأمین آب باشد و به مدیران و تصمیم‌گیران در این زمینه کمک کند. این روش یک رویکرد سیستماتیک و دقیق را برای ارزیابی انعطاف‌پذیری سیستم آب، باتکیه‌بر تخصص و ابزارهای ارائه شده توسط EPA و تطبیق آنها با زمینه خاص در یوتا، ایالات متحده تضمین می‌کند و می‌تواند الگویی برای مناطق با شرایط مشابه باشد.

عمده‌ترین محدودیت پژوهش، به‌خصوص در ایران عدم وجود و یا دستیابی به داده های معتبر و به روز است. از طرفی نیاز است تا فعالیت گسترده‌ای برای آشنا کردن مدیران و کارشناسان با استانداردهای جدید تاب آوری و همچنین بومی‌سازی آنها انجام شود.

پی‌نوشت‌ها

1-Climate Resilience Evaluation and Awareness Tool

2-Global Resilience Analysis

3-Monetized Risk Reduction

4-Agricultural and Irrigation Demand Management (Partners)

5-Groundwater Models For Drought, Service Demand And Use

6-JVWCD

منابع

طلعتی، محمد، خداشناس، سعیدرضا، و پاپلی یزدی، فربد. (۱۴۰۲). ارزیابی سناریوها و آگاهی از تاب‌آوری اقلیمی با استفاده از مدل CREAT. مطالعه موردی کالیفرنیا. سومین همایش ملی راهبردهای مدیریت منابع آب و چالش‌های زیست محیطی. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.

Amarasinghe, P., Liu, A., Egodawatta, P., Barnes, P., McGree, J., & Goonetilleke. (2016). Quantitative assessment of resilience of a water supply system under rainfall reduction due to climate change. Journal of Hydrology, 540, 1043-1052. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.021

Li, Z., Zhao, H., Liu, J. Zhang, J. (2022). Evaluation and promotion strategy of resilience of urban water supply system under flood and drought disasters. Scientific Reports, 12, 7404. https://doi.org/10.1038/s41598-022-11436-w

Liu, D., Chen, X., & Nakato, T. (2012). Resilience assessment of water resources system. springer, 2, 3743–3755. https://doi.org/10.1007/s11269-012-0100-7

Mehran, A., Mazdiyasni, O., & AghaKouchak, A. (2015). A hybrid framework for assessing socioeconomic drought:Linking climate variability, local resilience, and demand. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120(15), 7520-7533. https://doi.org/10.1002/2015JD023147

Porse, E., & Lund, J.R. (2016). Network Analysis and Visualizations of Water Resources Infrastructure in California: Linking Connectivity and Resilience. Journal of Water Resources Planning and Management, 142. 04015041. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000556

Qi, M., Feng, M., Sun, T., & Yang, W. (2016). Resilience changes in watershed systems: A new perspective to quantify long-term hydrological shifts under perturbations. Journal of Hydrology, 539, 281-289. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.039

Richard, G. L. (2002). Controlling Cascading Failure: Understanding the Vulnerabilities of Interconnected Infrastructures. Journal of Urban Technology, 9(1), 109-123. https://doi.org/10.1080/106307302317379855

Rodrigues, F., Borges, M., & Rodrigues., H. (2020). Risk management in water supply networks: Aveiro case study. springer, 27(7), 4598–4611. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05797-5

U.S. Environmental Protection Agency. Office of Water (USEPA). (2018). Case study: Water and wastewater utilities planning for resilience: Jordan Valley Water Conservancy District (JVWCD), Salt Lake County, Utah, (EPA 800-F-18-002).

Watts, G., Christierson, B. v., Hannaford, J., & Lonsdale, K. (2012). Testing the resilience of water supply systems to long droughts. Journal of Hydrology, 414-415(January), 255-267. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.038

Cayan, D., Tyree, M., Pierce, D., & Das, T. (2012). Climate Change and Sea Level Rise Scenarios for California Vulnerability and Adaptation Assessment. California Energy Commission, 1-28. http://www.energy.ca.gov/2012publications/CEC-500-2012-008/CEC-500-2012-008.pdf

Cimellaro, G. P., Tinebra, A., Renschler, C., & Fragiadakis, M. (2016). New Resilience Index for Urban Water Distribution Networks. Journal of Structural Engineering, 142(8), 4015014-4015011. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001433

National Science Council. (2015). Our Changing Planet: The U. S. Global Change Research Program for Fiscal Year 2015 CreateSpace Independent Publishing Platform. https://www.globalchange.gov/reports/our-changing-planet-us-global-change-research-program-fiscal-year-2015

Crozier, A., Lence, B. J., & Weijs, S. V. (2024). Resilience framework for urban water supply systems planning. Sustainable and Resilient Infrastructure, 9(4), 386–406. https://doi.org/10.1080/23789689.2024.2340378

Diao, K., Sweetapple, C., Farmani, R., Fu, G., Ward, S., & Butler., D. (2016). Global resilience analysis of water distribution systems. IWA Water Research,106(12), 383-393. https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.10.011

Gheisi, A., Forsyth, M., & Naser., G. (2016). Water Distribution Systems Reliability: A Review of Research Literature. American Society of Civil Engineers, 142(11), 04016047. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000690

Hosseini, S., KashBarke, & E.Ramirez-Marquez, J. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. Reliability Engineering & System Safety, 145, 47-61. https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.08.006

Kenneth E, K., Thomas R, K., David R, E., Kelly, R., John, Y., Xungang, Y., & Paula, H. (2013). Probable maximum precipitation and climate change. Geophysical Research Letters, 40(7), 1402-1408. https://doi.org/10.1002/grl.50334

Kjeldsen,T., Rosbjerg, D. (2004). Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems. Hydrological Sciences Journal, 49(5), 755-767 https://doi.org/10.1623/hysj.49.5.755.55136