2022, Vol.8, No.4, Pages 99 to 110
Journal of Water and Sustainable Development

سال هشتم، شماره ٤، ١٤٠٠، صفحات ٩٩ تا ١١٠
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Technical paper

نوع مقاله: فنی و ترویجی

Concept, Application, and Approaches of Watershed Hydrological Resilience Assessment

V. Amanjahani[1], Z. Hazbavi[2*], R. Mostafazadeh[3], A. EsmaliOuri[3], B. Moezzipour[4]

1,4- MSc Student of Watershed Management and Assistant Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. 2,3- Assistant Professor and Associate Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

*(Corresponding Author Email: z.hazbavi@uma.ac.ir)

Received: 16-06-2021 Revised: 30-09-2021
Accepted: 02-10-2021 Available Online: 19-03-2022

مفهوم، کاربست و رویکردهای ارزیابی تاب‌آوری هیدرولوژیک آبخیز

ویدا امان جهانی[1]، زینب حزباوی[2*]، رئوف مصطفی‌زاده[3]، اباذر اسمعلی‌عوری[3]، بیتا معزی‌پور[4]

۱و٤- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری و استادیار گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. ۲ و ۳- به‌ترتیب استادیار و دانشیار گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: z.hazbavi@uma.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲٦ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۱۲/۲۸

Abstract

Today, watersheds are severely affected by natural and man-made stresses, and their ability to recover and adapt to altered conditions depends on the resilience of watersheds. Therefore, due to the importance of this issue and the necessity to explain management models in order to promote resilience in the country's watersheds, the present paper aims to analyze the concept, application, and methods of hydrological resilience assessment as one of the resilience dimensions in comprehensive watershed management. Studies in this field are very limited worldwide but have an upward trend. Accordingly, the methods used to evaluate hydrological resilience have so far been limited to the use of simple compilation methods such as determining the arithmetic mean of some important hydrological indicators, using the Budyko curve and the Convex model. Budyko's curve analysis was mostly based on rainfall, evapotranspiration, and runoff production. But the convex model is used by considering the failure thresholds of hydrological indicators and establishing a relation between the process of long-term changes and the failure thresholds of indicators. The indicators used are multitude and have different applications depending on the hydrological conditions of each watershed. Among the most important of them can be the ratio of drought index to runoff, temporal trend and frequency of low and high water flow, change in annual water yield, groundwater level, surface runoff intensity, river enrichment from nutrients, and heavy metals, forest degradation percentage, soil erosion, sediment yield, and saline water levels are all the result of the interaction of other influential environmental factors, such as climatic, ecological, economic, biophysical and social.

Keywords: Watershed Sustainability, Land Degradation, Nature-Based Approaches, Index-Based Models, Resource Management.

چکیده

امروزه، حوزه‌های آبخیز به‌شدت تحت تأثیر تنش‌های طبیعی و انسانی قرار گرفته‌اند و توانایی آن‌ها برای بازیابی و سازگاری با شرایط تغییر یافته به تاب‌آوری حوزه‌ها بستگی دارد. ازاین‌رو، به‌سبب اهمیت موضوع و ضرورت تبیین الگوهای مدیریتی در راستای ارتقا تاب‌آوری حوزه‌های آبخیز کشور، نوشتار حاضر با هدف ترویج مفهوم، کاربست و روش‌های ارزیابی تاب‌آوری هیدرولوژیک به‌عنوان یکی از ابعاد تاب‌آوری در مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز تدوین شده است. مطالعات انجام شده در این زمینه در سطح جهان بسیار محدود است اما روند افزایشی دارد. براین‌اساس، روش‌های مورد استفاده برای ارزیابی تاب‌آوری هیدرولوژیک تاکنون محدود به استفاده از روش‌های تلفیق ساده مثل تعیین میانگین حسابی از برخی شاخص‌های هیدرولوژیک مهم، استفاده از منحنی Budyko و مدل Convex بوده است. تحلیل منحنی Budyko بیشتر بر اساس مقدار بارش، تبخیر و تعرق و میزان تولید رواناب استوار بوده است. اما مدل Convex با در نظر گرفتن آستانه‌های شکست شاخص‌های هیدرولوژیک و برقراری ارتباط بین روند تغییرات طولانی‌مدت و آستانه شکست شاخص‌ها به‌کار برده می‌شود. شاخص‌های مورد استفاده متعدد بوده و متناسب با شرایط هیدرولوژیک هر حوزه آبخیز کاربرد متفاوت دارند. از جمله مهمترین آن‌ها می‌توان به نسبت شاخص خشکی به رواناب، روند زمانی و فراوانی جریان‌های کم‌آبی و پرآبی، تغییر در تولید آب، سطح آب زیرزمینی، شدت رواناب سطحی، غنی‌شدگی رودخانه‌ها از مواد مغذی و فلزات سنگین، درصد تخریب جنگل، فرسایش خاک، تولید رسوب و سطح آب شور اشاره کرد که در واقع برآیند کنش و اندرکنش سایر عوامل محیطی تأثیرگذار همانند اقلیمی، بوم‌شناختی، اقتصادی، زیست‌فیزیکی و اجتماعی هستند.

واژه‌های کلیدی: پایداری آبخیز، تخریب زمین، رویکردهای طبیعت‌محور، مدل‌های شاخص‌محور، مدیریت منابع.

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

How to cite this article: Amanjahani V., Hazbavi Z., Mostafazadeh R., EsmaliOuri A. and Moezzipour B. 2022. Concept, Application, and Approaches of Watershed Hydrological Resilience Assessment. Journal of Water and Sustainable Development, 8(4): 99-110. doi: http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v8i4.2106.1056

مقدمه

فشارهای محیطی مختلف مثل تغییر کاربری زمین، تغییر اقلیم، حمله حشرات و گیاهان مهاجم و شیوع بیماری‌های همه‌گیر به‌سرعت مبناهای بوم‌شناختی کنونی را تغییر می‌دهند. غلظت دی‌اکسید کربن در اتمسفر اکنون خارج از محدوده ثبت‌شده طی ۸۰۰ هزار سال گذشته است و زمینه را برای تغییر اقلیم برای چندین قرن فراهم می‌کند (IPCC، ۲۰۱۴؛ ۲۰۱۸؛ Zhu و همکاران، ۲۰۲۱). در بسیاری از مناطق، شاخص‌های اصلی اقلیمی مانند بارندگی سالانه و فصلی، دما و رطوبت به‌سرعت در حال خارج شدن از محدوده قبلی تغییرپذیری هستند (de Carvalho و همکاران، ۲۰۲۱؛ Van Rooyen، ۲۰۲۱). از بین رفتن ظرفیت سازگاری[1] بوم‌سازگان در اثر تغییرات محیطی شدید ممکن است منجر به کاهش گسترده تاب‌آوری[2] بوم‌سازگان در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و ملی شود (Liu و همکاران، ۲۰۲۰).

حوزه‌های آبخیز سامانه‌های پیچیده متشکل از ابعاد فیزیکی، اجتماعی، اقتصادی و اکولوژیکی در تعامل با هم و تأثیرگذاری بر یک‌دیگر هستند. غالباً درک دقیق از تعامل بین ابعاد مختلف در یک حوزه آبخیز دشوار بوده و بی‌شک دارای عدم قطعیت زیادی است (Krievins و همکاران، ۲۰۱۵). گزارش‌های جهانی بیان‌گر افزایش روز افزون اثرات تغییر اقلیم بر افزایش وقایع حدی آب و هوا از جمله سیل و خشک‌سالی هستند (IPCC، ۲۰۲۱). از آنجایی‌که تغییر اقلیم می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر سامانه‌های حوزه آبخیز داشته باشد لذا در چند دهه گذشته گرمایش جهانی به گفتار بسیار مهمی در زمینه هیدرولوژی تبدیل شده است (Pan و همکاران، ۲۰۱۵؛ Xue و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات نشان داده است که تشدید چرخه جهانی آب در اثر گرم شدن زمین (گرمایش ناشی از فعالیت‌های انسانی) به‌دلیل افزودن گازهای گلخانه‌ای است (IPCC، ۲۰۱۸) که در نهایت به تبخیر بیشتر و وقایع شدید بارشی خواهد انجامید. علاوه‌بر این، این امر با الگوهای مکانی و زمانی بارندگی تداخل دارد و توزیع نابرابر بارندگی به‌وجود خواهد آمد که ممکن است در پاسخ به آن اختلال در شدت بارندگی به‌وجود آید (Creed و همکاران، ۲۰۱۴؛ Liu و همکاران، ۲۰۲۰). این تأثیرات به‌صورت اختلال در منابع آب، افزایش بلایای طبیعی، افزایش قرار گرفتن در معرض آلاینده‌های آبی، مسائل مربوط به کیفیت آب، انقراض گونه‌ها، از بین‌رفتن تنوع زیستی، خسارات اقتصادی و بهره‌برداری سریع از منابع بروز پیدا می‌کنند. میزان تأثیر باتوجه به موقعیت جغرافیایی و وضعیت حوزه آبخیز متفاوت است و تغییرات مختلفی در سامانه‌های اجتماعی و بوم‌شناختی حوزه آبخیز خواهد داشت و تغییرات گذرا یا دائمی در سامانه‌های حوزه آبخیز ایجاد می‌شود (Ostrom، ۲۰۰۹؛ MacDonald و همکاران، ۲۰۱۹).

پیش‌بینی شده است تغییرات اقلیمی جهانی در قرن بیست و یکم تأثیر به‌سزایی در رژیم هیدرولوژیک بسیاری از بوم‌سازگان سراسر جهان خواهند داشت (Pan و همکاران، ۲۰۱۵؛ Zhou و همکاران، ۲۰۱۵؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۶). فشار وارده بر چرخه هیدرولوژیک ناشی از تغییر اقلیم افزایش شدت خشک‌سالی؛ سیلاب و تغییر در سایر فرآیندهای هیدرولوژیک بوم‌سازگان حوزه آبخیز را در پی داشته است (Randhir، ۲۰۱۴). یکنواخت نبودن تولید رواناب به‌دلیل تغییر اقلیم مشکلاتی را در پیش‌بینی آن به همراه دارد. به‌همین دلیل، یک نگرانی جهانی در مورد مسئله تولید رواناب در مقیاس حوزه آبخیز وجود دارد. هرگونه واکنش پایدار هیدرولوژیک حوزه آبخیز به گرمایش اقلیمی، تاب‌آوری آن را برجسته‌تر می‌کند. ماهیت غیرقابل پیش‌بینی بودن واکنش هیدرولوژیک می‌تواند باعث ایجاد اختلال در طراحی و توسعه زیرساخت‌ها با هدف مدیریت خطر شود (Sinha و همکاران، ۲۰۱۸). مطالعات متعددی تنش‌های وارده بر سامانه‌های جهانی آب، افت آب‌های زیرزمینی، افزایش خطر سیل، و محدودیت در دسترسی به منابع آب شیرین را گزارش کرده‌اند و بر همین اساس توجه به تاب‌آوری هیدرولوژیک ضرورت دارد (Gerten و همکاران، ۲۰۰۵؛ Ebel و Mirus، ۲۰۱۴؛ de Carvalho و همکاران، ۲۰۲۱؛ Van Rooyen، ۲۰۲۱).

در میان بوم‌سازگان دارای پوشش گیاهی، جنگل‌ها از طریق تبخیر و تعرق، یعنی از دست دادن بخار آب به جو از طریق تعرق گیاه و تبخیر مستقیم سطحی، بر تعادل آب تأثیر می‌گذارند. جنگل‌ها از طریق تبخیر و تعرق به‌طور مستقیم بر تولید آب (به‌عنوان مثال، مقدار آب باران باقی‌مانده پس از پدیده تبخیر و تعرق) و قابلیت دسترسی آب در پایین‌دست و تنظیم رژیم هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارند (Muñoz-Villers و همکاران، ۲۰۱۲). به‌همین دلیل، سامانه‌های رودخانه‌ای در پهنه‌ها و بوم‌سازگان طبیعی پرتنش، به‌عنوان یکی از چالش‌برانگیزترین مسائل جهانی مربوط به مدیریت منابع طبیعی مطرح شده‌اند. اغلب مدیران منابع طبیعی در رفع این چالش‌ها تا حد زیادی از تاب‌آوری یا ظرفیت سامانه هیدرولوژیک برای جذب و پاسخ به یک آشفتگی همراه با حفظ ساختار و عملکردهای اساسی آن استفاده می‌کنند (Holling، ۱۹۷۳؛ Folke و همکاران، ۲۰۰۲).

ظرفیت هیدرولوژیک حوزه آبخیز در واکنش به فشارهای طبیعی، تحمیلی یا ضربه‌های ناگهانی مانند تغییر اقلیم، آتش‌سوزی و فعالیت‌های انسانی مثل چرا بیان‌گر سطح تاب‌آوری هیدرولوژیک آن حوزه آبخیز است. به‌عبارت دیگر، قابلیت حوزه آبخیز برای ترمیم یا نگه‌داری عملکرد و ساختار هیدرولوژیک خود در طول وقوع بی‌نظمی‌های کوتاه یا طولانی‌مدت، تاب‌آوری هیدرولوژیک گفته می‌شود. در حال حاضر کاربرد مفهوم تاب‌آوری هیدرولوژیک باید پایه اصلی بسیاری از برنامه‌ریزی‌ها

باشد. اگر بشر به‌دنبال ایجاد یک هدف واحد برای سازگاری با تغییر اقلیم و کاهش خطرات است، باید در تلاش دستیابی به یک سطح مناسب از ظرفیت هیدرولوژیک محیط‌زیست‌های مختلف انسان و سایر موجودات برای تحمل آشفتگی‌ها و احیاء سریع از آن‌ها باشد (Javadinejad و همکاران، ۲۰۲۰).

حوزه‌های آبخیز تاب‌آور ویژگی‌های مشخصی از دیدگاه هیدرولوژی دارند. برای نمونه، حوزه آبخیزی تاب‌آور است که نسبت به تغییرات طبیعی و مصنوعی حساسیت کمی داشته و الگوی رفتار هیدرولوژیک آن از حالت طبیعی خود به‌طور معناداری خارج نشود یا در صورت انحراف از حالت اولیه، بتواند سریع خود را بازیابی نماید. از یک دیدگاه مشخص می‌توان بیان کرد حوزه آبخیز تاب‌آور هیدرولوژیک، دامنه و الگوی تولید رواناب در محدوده قابل پیش‌بینی تحت شرایط تغییریافته محیط زیستی داشته باشد.

درک مطلوب از حد و مرزهای تاب‌آوری هیدرولوژیک (آستانه‌هایی که یک حالت سامانه را از حالت‌های جایگزین و احتمالاً نامطلوب متمایز می‌کنند) به مدیران منابع کمک می‌کند تا از تغییر رژیم جلوگیری کرده و یا وقوع طبیعی رژیم را تسهیل کنند تا خدمات بوم‌سازگان رودخانه به‌طور مطلوب حفظ یا بازیابی شود. لذا توجه به تاب‌آوری هیدرولوژیکی بوم‌سازگان‌های مختلف به‌ویژه در مقیاس حوزه آبخیز می‌تواند در تبیین خط‌مشی مناسب مدیریتی و الگوی حکمرانی ارزشمند باشد. بر همین اساس، مقاله حاضر با هدف ترویج مفهوم نوین تاب‌آوری هیدرولوژیکی و مروری بر شاخص‌ها و روش‌های ارزیابی آن تدوین شده است. یافته‌های تحقیق حاضر در راستای تحقق اهداف حفاظت و توسعه پایدار منابع آب و خاک و نیز تدوین الگوی مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز کشور مفید واقع خواهد شد.

تاب‌آوری

پیچیدگی‌های موجود بین عوامل محیطی مختلف موجود در یک حوزه آبخیز باعث شده است تا سیاست مسئولین بین‌المللی از اتخاذ رویکردهای صرفاً مبتنی بر بهره‌وری و بهینه‌سازی به سمت رویکردهای افزایش تاب‌آوری نسبت به تغییرات و سازگاری برای خودتنظیمی روی آورند (Javadinejad و همکاران، ۲۰۲۰؛ de Carvalho و همکاران، ۲۰۲۱). بر همین اساس، ملاحظات تاب‌آوری باید به‌عنوان یک جنبه سیاسی و تاریخی در برنامه‌ریزی و تعیین راهبردهای تاب‌آوری در نظر گرفته شوند. علاوه‌بر این، تاب‌آوری یکی از مهمترین مباحث تحقیقاتی در زمینه دستیابی به پایداری معرفی شده است. این مفهوم برای اولین بار به‌عنوان یک اصطلاح بوم‌شناختی توصیفی مطرح شده (Holling، ۱۹۷۳) و سپس توسط ابعاد تجربی، مجازی یا اصولی تعریف و گسترش یافته است (به‌عنوان مثال Holling، ۲۰۰۱؛ Ebel و Mirus، ۲۰۱۴؛ de Carvalho و همکاران، ۲۰۲۱؛ Van Rooyen، ۲۰۲۱). نوع استفاده از این مفهوم توسط دانشمندان حوزه‌های تحقیقاتی متفاوت به ارائه انواع تاب‌آوری از جمله تاب‌آوری مهندسی، تاب‌آوری بوم‌شناختی و تاب‌آوری اجتماعی رسیده است. از میان تمام سامانه‌های طبیعی، پیکره منابع آبی به‌طور قابل توجهی از تغییرات جهانی محیط‌زیست تأثیر پذیرفته‌اند (Xue و همکاران، ۲۰۲۱). فشارهای انسانی به‌طور قابل‌توجهی سامانه‌های رودخانه‌ای را تغییر داده و بر ارائه خدمات بوم‌سازگان آن تأثیر گذاشته‌اند. از آن‌جایی‌که جوامع بشری غالباً بر پایه تولید آب توسعه یافته‌اند، بنابراین تغییرات قابل توجه در میزان آن، حیات جوامع را در معرض خطر قرار می‌دهد. لذا، تاب‌آوری هیدرولوژیکی به تازگی به‌عنوان نوع جدیدی از تاب‌آوری در مدیریت اثربخش و برنامه‌ریزی سازگار با بلایای طبیعی مطرح شده است.

جدول ۱- مروری کوتاه بر تعریف‌های مختلف تاب‌آوری

نویسنده		تعریف
Pimm (۱۹۹۱)	تاب‌آوری مهندسی	زمان مورد نیاز برای بازگشت یک سامانه به شرایط پیش از تغییر یا وقوع یک حادثه است.
Holling و همکاران (۱۹۹۵)	تاب‌آوری بوم‌شناختی	ظرفیت یا توانایی بازمانده یک سامانه برای جذب آشفتگی است. همچنین روشنگر میزان اختلالی است که می‌تواند قبل از تغییر ساختار سامانه با تغییر شاخص‌ها رفع شود.
Adger (۲۰۰۰)	تاب‌آوری اجتماعی	ظرفیت سامانه‌های اجتماعی مانند جوامع برای مقاومت و سازگاری در برابر آشفتگی‌های ناشی از تغییرات اجتماعی، سیاسی یا محیط زیستی است.
Gerten و همکاران (۲۰۰۵)	تاب‌آوری هیدرولوژیک	توانایی یک سامانه یا حوزه آبخیز در جذب تغییرات و آشفتگی‌ها و حفظ یا بازیابی سریع عملکرد هیدرولوژیک است.

تاب‌آوری هیدرولوژیک

مفهوم تاب‌آوری هیدرولوژیک به‌عنوان توانایی یک حوزه آبخیز برای حفظ ثبات در برابر اختلالات هیدرولوژیک و یا قابلیت برگشت سریع آن به وضعیت قبل از تحمیل آشفتگی‌ها توصیف شده است. آشفتگی و اختلال هیدرولوژیک شامل یک واقعه یا رویداد ناگهانی است که عملکرد هیدرولوژیک مطلوب حوزه آبخیز را تغییر و تحت تأثیر قرار می‌دهد (Ebel و Mirus، ۲۰۱۴). از جمله این آشفتگی‌ها می‌توان به فشار وارده ناشی از افزایش تقاضای جمعیت در حال رشد روزافزون، توسعه شهرنشینی و برنامه‌ریزی شهری ضعیف، تخریب پوشش گیاهی، تغییر نظام اقتصادی و سبک زندگی اجتماعی، انقراض زیستگاه‌های بوم‌شناختی، وقوع سیل‌های ناگهانی، تحلیل رفتن خدمات بوم‌سازگان، ناپیوستگی بوم‌شناختی و هیدرولوژیک و فشارهای ناشی از تغییر اقلیم و گرمایش جهانی اشاره نمود. هم‌چنین ساختار هیدرولوژیک شامل بخش فیزیکی حوزه‌های آبخیز و به‌ویژه پیکره پهنه‌های آبی موجود در آن است که در طولانی‌مدت قابل تغییر هستند و عملکرد هیدرولوژیک اشاره به فرآیندهای توزیع، ذخیره و رهاسازی آب از حوزه‌های آبخیز دارد (Black، ۱۹۹۷؛ Wagener و همکاران، ۲۰۰۷).

در پژوهشی، Gerten و همکاران (۲۰۰۵) مفهوم تاب‌آوری هیدرولوژیک را توانایی یک حوزه آبخیز در جذب تغییرات و آشفتگی‌ها و حفظ یا بازیابی سریع عملکرد هیدرولوژیک بیان کرده‌اند. حوزه‌های آبخیز تاب‌آور از لحاظ هیدرولوژیک حوزه‌های آبخیزی محسوب می‌شوند که در محدوده تغییرات طبیعی پایدار و یا قابل انعطاف در برابر تغییرات شرایط محیطی باشند (Poff و همکاران، ۱۹۹۷). حوزه‌های آبخیز با مناطق غیرقابل نفوذ کم، سطوح نفوذپذیر زیاد، پوشش گیاهی متنوع و غنی، مواد مغذی در حد مطلوب، استانداردهای مطلوب کیفیت و کمیت آب به‌عنوان حوزه‌های آبخیز دارای تاب‌آوری بالا محسوب می‌شوند. حساسیت هیدرولوژیک کم یک حوزه آبخیز به تنش‌های وارد شده ناشی از تغییرات اقلیمی یا انسانی نیز از ویژگی‌های یک حوزه آبخیز تاب‌آور به‌شمار می‌رود. قابل ذکر است که در این زمینه مطالعات محدودی انجام شده اما در حال گسترش است و انتظار می‌رود که نتایج حاصل از این نوع مطالعات در تبیین سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی منطقه‌ای منابع طبیعی به‌طور مؤثر مورد استفاده قرار گیرند.

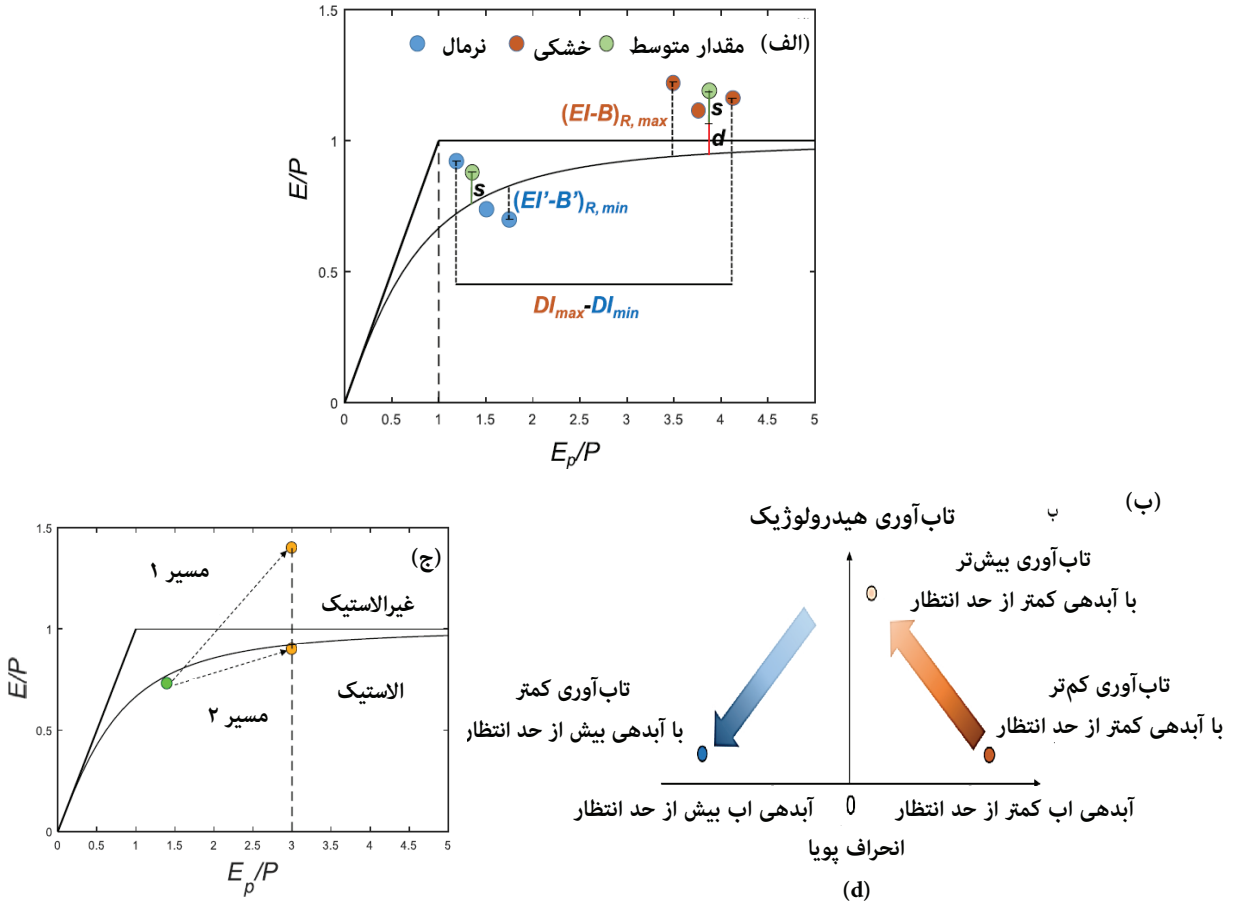
ارزیابی تاب‌آوری هیدرولوژیک

نتایج حاصل از مفهوم‌سازی و محاسبه تاب‌آوری هیدرولوژیک در بخش مدیریت پایدار منابع آب در مقیاس‌های مختلف محلی، ملی و بین‌المللی از جمله مدیریت رواناب در حوزه‌های آبخیز شهری کاربرد دارد. شاخص‌های تاب‌آوری هیدرولوژیکی حوزه، ابزاری برای ارزیابی ساختار و عملکرد آبخیز و ارائه یک ارزیابی عینی از چگونگی تأثیر سناریوهای مختلف بر سطح تاب‌آوری حوزه آبخیز در نظر گرفته شده‌اند (MacDonald و همکاران، ۲۰۱۹) که می‌توان آن‌ها را به دو دسته تقسیم‌بندی کرد. دسته اول شامل آن‌هایی است که به‌طور مستقیم به بوم‌سازگان‌های آبی از جمله رودخانه‌ها و تالاب‌ها مرتبط هستند. در این زمینه می‌توان به مقدار رواناب، دبی متوسط، دبی اوج، کیفیت منابع آبی، سطح آب رودخانه یا تالاب و سطح آب زیرزمینی اشاره نمود. دسته دوم شامل شاخص‌های ترکیبی هستند. برای نمونه می‌توان به ترکیب شاخص‌های دسته اول با شاخص‌های اقلیمی (مثل نسبت شاخص خشکی به رواناب، یا نسبت میانگین مقادیر بین وقایع بارندگی تولیدکننده رواناب و میانگین زمان پاسخ‌گویی حوزه آبخیز)، شاخص‌های مربوط به کاربری اراضی (مثل نسبت درصد تخریب جنگل به دبی رودخانه، یا نسبت وسعت مناطق شهری به رواناب شهری) یا شاخص‌های خاک‌شناسی (نسبت بارندگی به شوری خاک، درصد نفوذپذیری خاک) اشاره کرد. نمونه‌ای از کاربرد شاخص‌های مختلف در جدول (۲) ارائه شده است.

همانگونه که از این جدول بر می‌آید ارزیابی تاب‌آوری تاکنون محدود به استفاده از روش‌های تلفیق ساده مثل تعیین میانگین حسابی از برخی شاخص‌های هیدرولوژیک مهم، استفاده از منحنی Budyko و مدل Convex بوده است. تحلیل منحنی Budyko غالباً بر اساس مقدار بارش، تبخیر و تعرق و میزان تولید رواناب استوار بوده است. اما مدل Convex با در نظر گرفتن آستانه‌های شکست شاخص‌های هیدرولوژیک و برقراری ارتباط بین روند تغییرات طولانی‌مدت و آستانه شکست شاخص‌ها به‌کار برده می‌شود. همچنین شکل (۱) نمایی کلی از کاربرد منحنی Budyko (B) برای ارزیابی تاب‌آوری هیدرولوژیک را نشان می‌دهد. این منحنی، بارش (P) را به دو بخش تبخیر و تعرق (E) و آبدهی (WY) تقسیم می‌کند. خط انحنای B از طریق برقراری رابطه بین نسبت تبخیر و تعرق واقعی به بارش یا به‌عبارتی شاخص تبخیر (EI) و نسبت تبخیر و تعرق پتانسیل (Ep) به بارش (Ep/P) به‌عنوان شاخص خشکی (DI)، سطح تاب‌آوری را توصیف می‌کند. یکی از فرض‌های این رابطه وجود شرایط پایداری است که در آن تغییرات ذخیره آبدهی حوزه آبخیز ناچیز است. همچنین، فرض بر این است که بوم‌سازگان دست‌نخورده در شرایط پایدار طولانی‌مدت، از یک تا چند سال در وضعیت مطلوبی قرار دارند. با این‌حال، از آنجایی‌که یک حوزه آبخیز

مختل‌شده ممکن است از شرایط پایدار منحرف شده باشد، چنین انحرافی باید از طریق انحراف ذاتی حوزه آبخیز یا انحراف ایستا (s) محاسبه شود (Xue و همکاران، ۲۰۲۱).

حوزه‌های آبخیز یا بوم‌سازگانی که از نظر هیدرولوژیک تاب‌آور هستند، عملکرد هیدرولوژیک خود را در برابر تغییر شرایط محیطی که توسط منحنی B پیش‌بینی شده است، حفظ کرده یا به‌سرعت بازیابی می‌کنند (Creed و همکاران، ۲۰۱۴). اکثر حوزه‌های آبخیز که در حالت تعادل هیدرولوژیک قرار دارند، طبق منحنی B رفتار می‌کنند (Budyko، ۱۹۷۴). دو شاخص Budyko برای تعیین میزان تاب‌آوری هیدرولوژیک حوزه آبخیز پیشنهاد شده است: انحراف پویا (d)، جابجایی عمودی از منحنی B و الاستیسیته (e)، جابجایی از منحنی B در امتداد هر دو محور شاخص خشکی (DI) و شاخص تبخیر (EI) (شکل ۱). حوزه آبخیز زمانی الاستیک در نظر گرفته می‌شود که e آن بیش‌تر از یک باشد (Creed و همکاران، ۲۰۱۴) و هرچه e بزرگ‌تر باشد، حوزه آبخیز قابلیت کشش بیشتر دارد. باتوجه‌به Creed و همکاران (۲۰۱۴) یک حوزه آبخیز تاب‌آور که دارای d کوچک (نزدیک به صفر) و e بزرگ باشد، به این معنی است که سامانه با تغییرات اقلیمی قابل تنظیم‌تر است.

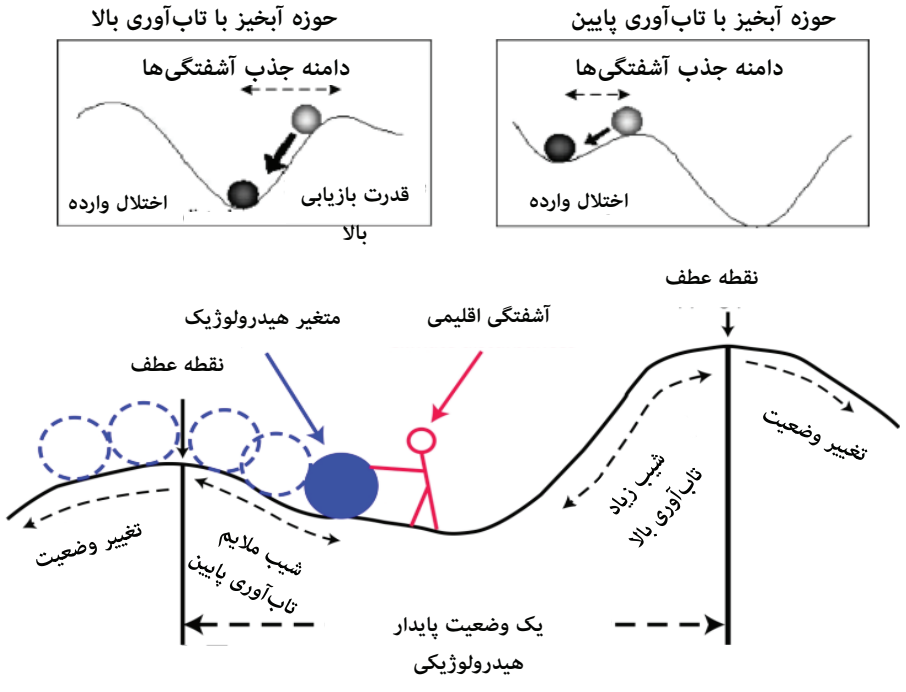


شکل ۱- (الف) چارچوب نظری Budyko که شاخص‌های انحراف ایستا (s)، انحراف پویا (d) و الاستیسیته (e) را نشان می‌دهد. تبخیر و تعرق (E) و آبدهی (WY- آب باران باقی‌مانده در سامانه پس از هدررفت از طریق تبخیر و تعرق) از طریق منحنی Budyko (B) براساس تبخیر و تعرق پتانسیل (Ep) و بارش (P) برآورد می‌شود. با فرض این‌که تغییرات ذخیره آب ناچیز است (یعنی شرایط پایدار حاکم است)، انحراف ایستا، انحراف ذاتی عرصه یا حوزه آبخیز از منحنی B تحت شرایط اقلیمی نرمال است. انحراف پویا به‌عنوان اختلاف بین میانگین نسبت E/P (شاخص تبخیر- EI) برای سال‌های خشک‌سالی و B پس از در نظر گرفتن [s] s - (EI - B) = d آن محاسبه می‌شود. الاستیسیته به‌عنوان نسبت دامنه Ep/P (شاخص خشکی-DI) به محدوده باقیمانده EI محاسبه می‌شود که شامل همه سال‌های نرمال و خشک‌سالی است [R, max –(EI, - B,) R, min]/(DImax – DImin) = e. (ب) تفسیر مفهوم d از نظر تاب‌آوری هیدرولوژیک برای سه مورد فرضی مثبت (منفی) d نشان‌دهنده آبدهی کم‌تر (بیش‌تر) در حوزه آبخیز ناشی از خشک‌سالی است. (ج) تفسیر پاسخ‌های الاستیک و غیرالاستیک است. در هر دو مورد تغییر DI یکسان است؛ اما تغییر در EI در حوزه‌های آبخیز غیر الاستیک در مقایسه با حوزه‌های آبخیز الاستیک بیش‌تر است. طبق تعریف، بوم‌سازگان یا حوزه‌های آبخیز دارای e بزرگ‌تر از یک، از نظر هیدرولوژیک الاستیک محسوب می‌شوند (Xue و همکاران، ۲۰۲۱).

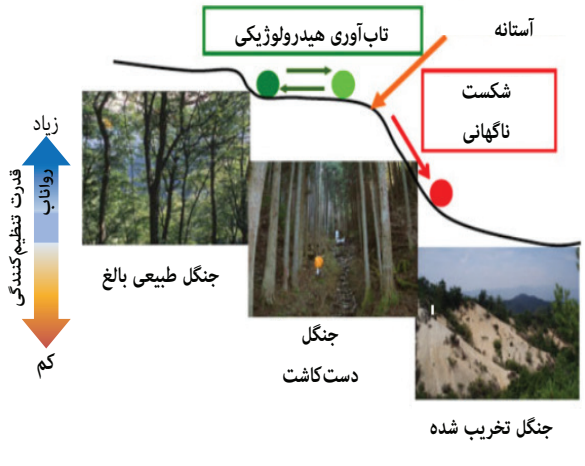
جدول ۲- مطالعات انجام‌شده در زمینه ارزیابی تاب‌آوری هیدرولوژیک

نویسنده	هدف	عوامل و شاخص‌های مورد استفاده	نتایج
Creed و همکاران (۲۰۱۴)	ارزیابی تاب‌آوری ۱۲ حوزه آبخیز در سراسر آمریکای شمالی در برابر تغییر اقلیم	چارچوب Budyko و سه پارامتر انحراف ایستا[۳]، انحراف پویا[۴] و الاستیسیته[۵]	گرمایش اقلیمی باعث تغییر در رواناب بوم‌سازگان جنگلی می‌شود و نتیجه گرفتند که نوع جنگل عمده‌ترین عامل مؤثر در الاستیسیته یک حوزه آبخیز است.
Helman و همکاران (۲۰۱۷)	مطالعه تغییرات آب تولیدی آبخیزهای جنگلی پس از خشک‌سالی اقلیمی (۲۰۱۰-۲۰۰۶) در جنگل‌های کاج مدیترانه شرقی	چارچوب Budyko و دو پارامتر انحراف پویا و الاستیسیته	جنگل‌هایی که در شرایط خشک دائمی رشد می‌کنند، ممکن است طیف وسیعی از سازگاری‌های هیدرولوژیک و اکوفیزیولوژیکی را در برابر خشک‌سالی ایجاد کنند که منجر به تاب‌آوری بالای هیدرولوژیک می‌شود.
Pelorosso و همکاران (۲۰۱۸)	ارزیابی تاب‌آوری و مدیریت پایدار رواناب ناشی از بارندگی و ارائه یک چارچوب روش‌شناختی مبتنی بر مدل‌سازی	(۱) حجم سیل، (۲) اوج سیل، (۳) حجم رواناب زیرحوزه، (۴) اوج رواناب زیرحوزه و (۵) حجم کل رواناب سامانه‌های زهکشی	یک شاخص تاب‌آوری هیدرولوژیک به‌عنوان مجموع پنج عامل استاندارد استخراج شد. مقدار شاخص تاب‌آوری نشان‌دهنده تاب‌آوری ذاتی سامانه شهری متشکل از تعاملات زیرساخت‌های خاکستری و سبز است.
Sinha و همکاران (۲۰۱۸)	درک نقش تنش انسانی و تغییرپذیری اقلیمی در توزیع بارندگی و ارتباط آن‌ها با تاب‌آوری هیدرولوژیک در برابر تغییرات گرمایش در ۵۵ حوزه واقع در شبه جزیره هند	چارچوب Budyko و دو پارامتر انحراف پویا و الاستیسیته	۲۳ حوزه آبخیز در برابر تغییرات گرمایش اقلیمی، تاب‌آوری هیدرولوژیک خوبی (انحراف کم و الاستیسیته بالا) از خود نشان دادند. تعامل‌های گسترده انسانی تمایل دارد که عملکرد هیدرولوژیک حوزه آبخیز را تحت شرایط اقلیمی بحرانی تغییر دهد که منجر به کاهش تاب‌آوری هیدرولوژیک می‌شود.
MacDonald و همکاران (۲۰۱۹)	ارزیابی مزایای بالقوه اجرای راهبردهای مختلف حفاظت و احیا در حوزه آبخیز رودخانه ورمیلیون	تغییر در جریان اوج[۶]، شاخص جریان کم‌آبی[۷]، شاخص Flashiness، فراوانی و زمان‌بندی شرایط جریان کم‌آبی[۸]، فراوانی و زمان‌بندی رویدادهای جریان اوج[۹] و تغییر در تولید سالانه آب[۱۰]	شاخص‌های ارزیابی تاب‌آوری حوزه آبخیز اشاره‌شده به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی عملکرد و ارائه یک ارزیابی عینی از چگونگی تأثیر سناریوهای مختلف بر تاب‌آوری حوزه آبخیز مورد نظر در نظر گرفته شده‌اند.
Zhang و همکاران (۲۰۱۹)	تعیین میزان تاب‌آوری هیدرولوژیک تالاب‌ها در برابر تغییر اقلیم	سطح آب زیرزمینی، شدت رواناب سطحی و سطح آب شور	تغییرات این شاخص‌ها، منعکس‌کننده تغییرات عملکردهای هیدرولوژیک تالاب به‌ویژه قابلیت ذخیره‌سازی و آزادسازی آب است. هیدرولوژی تالاب عمدتاً از طریق تغییر سطح آب زیرزمینی، شدت رواناب سطحی و سطح آب شور بر عملکردهای بیوشیمیایی و ریخت‌شناسی تالاب تأثیر می‌گذارد
Xue و همکاران (۲۰۲۰)	ارزیابی تاب‌آوری هیدرولوژیک سطح حوضه آبخیز در برابر خشک‌سالی	چارچوب Budyko و دو پارامتر انحراف پویا و الاستیسیته	تاب‌آوری هیدرولوژیک در مناطق خشک‌تر، مقدار بیشتر را نسبت به مناطق مرطوب دارد که عمدتاً مربوط به توزیع بارندگی در طول سال می‌باشد که توسط ضریب تغییرات بارندگی اندازه‌گیری می‌شود.
Liu و همکاران (۲۰۲۰)	ارزیابی تغییرات تعادل آب (۲۰۱۱-۱۹۸۱) در بالادست حوزه آبخیز هایلار در فلات مغولستان	چارچوب Budyko و دو پارامتر انحراف پویا و الاستیسیته	اصلاح تعادل هیدرولوژیک در طول دوره مطالعه موجب یک روند کاهشی در میزان رواناب و نسبت رواناب به بارش شد.
Xue و همکاران (۲۰۲۱)	ارزیابی تاب‌آوری هیدرولوژیک ۱۶ حوضه براساس چارچوب Budyko در برابر تغییر اقلیم	چارچوب Budyko و دو شاخص مقاومت[۱۱] و پلاستیسیته[۱۲]	یک حوضه زمانی از نظر هیدرولوژیک تاب‌آور در نظر گرفته می‌شود که دو شاخص مقاومت و پلاستیسیته هر دو بزرگ‌تر از یک باشند یا پلاستیسیته منفی و مقاومت بزرگ‌تر از یک باشد.

یکی دیگر از روش‌های ارزیابی تاب‌آوری هیدرولوژیک استفاده از مدل Convex یا مدل فنجان و توپ[۱۳] است. همان‌طور که در شکل‌های (۲ و ۳) نشان داده شده است، قرارگیری وضعیت کنونی حوزه آبخیز با در نظر گرفتن آستانه مطلوب یک شاخص هیدرولوژیک نشان‌دهنده میزان تاب‌آوری آن حوزه است. استفاده از مجموعه‌های Convex برای توصیف عدم قطعیت شاخص‌های هیدرولوژیک در مواقعی که اطلاعات نمونه ناکافی باشد، مورد تأیید قرار گرفته است. در مدل Convex، شاخص‌های هیدرولوژیکی می‌تواند در هر بازه زمانی بیان شوند و مبتنی بر تابع اتوکوواریانس و تابع ضریب همبستگی است تا همبستگی بین شاخص‌ها در زمان‌های مختلف نشان داده شود. برای فرایندهای یک‌بعدی و دوبعدی مدل Convex چندین معیار ارزیابی مهم از جمله تابع مقدار میانگین، تابع واریانس، تابع اتوکوواریانس و تابع کواریانس متقابل تعریف می‌شود (Jiang و همکاران، ۲۰۱۴). برای مثال در شکل (۳) حوزه آبخیزی تاب‌آور است که بتواند فقط درصدی از بارندگی را به رواناب تبدیل کند و بخش اعظم آن را به‌صورت آب زیرزمینی ذخیره نماید. شکست در آستانه‌های هیدرولوژیک منجر به تبدیل حوزه‌های آبخیز با تاب‌آوری بالا به حوزه‌های آبخیز با تاب‌آوری پایین می‌شود.



شکل ۲- نمایی از آستانه‌ها و تحلیل تاب‌آوری هیدرولوژیک بر اساس مدل Convex (Zhang و همکاران، ۲۰۱۹)



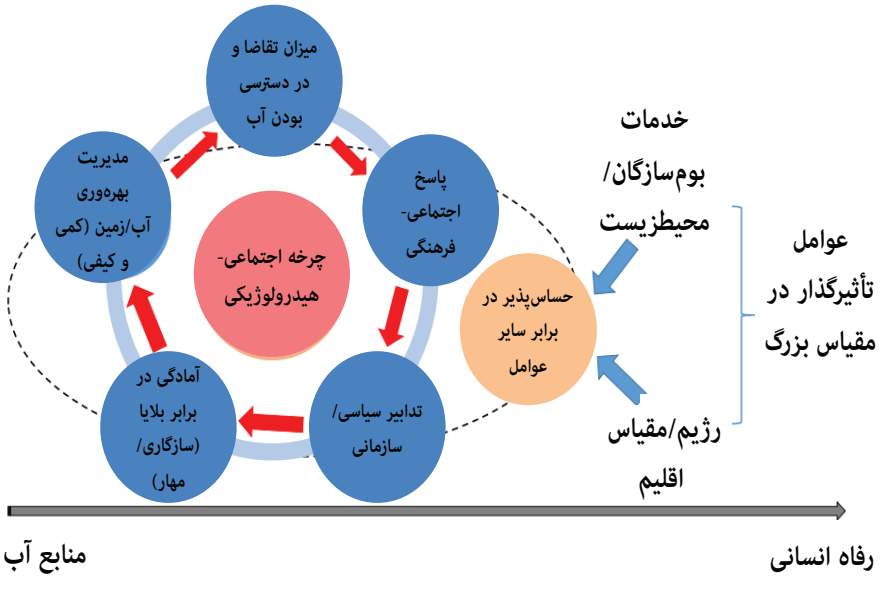
شکل ۳- مدل مفهومی Convex در ارزیابی تاب‌آوری هیدرولوژیک یک حوزه آبخیز جنگلی (Green و همکاران، ۲۰۱۴)

نقش جوامع و نهادها در برقراری تاب‌آوری هیدرولوژیک

اعتقاد بر این است که بشریت وارد دوره جدیدی از زمین‌شناسی به نام آنتروپوسن شده است که در آن انسان بزرگ‌ترین تأثیر را بر تغییرات محیطی در مقیاس سیاره زمین دارد. این تأثیر شامل فشار انسان بر چرخه هیدرولوژیک نیز می‌شود که در تمام مقیاس‌ها از حوزه آبخیز کوچک (مقیاس محلی) تا حوزه‌های آبخیز و سامانه‌های اقلیمی منطقه‌ای به وقوع می‌افتد. شواهد متعددی در خصوص شدت یافتن تخریب‌های ناشی از انسان در ابعاد مختلف سامانه‌های هیدرولوژیک (کمیت و کیفیت) در قرن گذشته به‌ویژه از زمان شتاب گرفتن جوامع مدرن صنعتی در اواسط دهه ۱۹۵۰ وجود دارد. طبق تحقیقات جهانی، در حال حاضر به‌طور ماهانه چهار میلیون نفر با کمبود آب مواجه

می‌شوند و چشم‌اندازهای آینده آب مطلوب نیست. به‌همین دلیل، پرداختن به ابعاد اجتماعی و اثرات انسانی در کنار ارزیابی تاب‌آوری هیدرولوژیک ضروری تلقی شده و به تازگی به توسعه تاب‌آوری هیدرواجتماعی[۱۴] توسط دانشمندان رسیده است (Kumar و همکاران، ۲۰۲۰؛ Mao و همکاران، ۲۰۱۷).

سیاست‌های جهانی بر اتخاذ تاب‌آوری هیدرولوژیک در سامانه حکمرانی تأکید دارند. به‌دلیل عدم وجود تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی و تأثیرات آن بر چرخه هیدرولوژیک همراه با افزایش شهرنشینی و نیز اختلافات حکومتی، برخی مناطق از جمله ایالات متحده (US) با مشکلات قابل توجهی در سامانه‌های مدیریت منابع آب مواجه شده‌اند. لذا سیاست جهانی نشان می‌دهد که در تمام کشورها و به‌ویژه مناطق دارای مشکلات جدی، انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری در سامانه‌های مدیریت آب گنجانده شود. این گونه مدیریت مبتنی بر تاب‌آوری نیازمند در نظر گرفتن ابعاد اجتماعی بوده و شیوه‌های نوآورانه و دگرگون‌کننده است (Javadinejad و همکاران، ۲۰۲۰؛ Kumar و همکاران، ۲۰۲۰). در شکل (۴) دیاگرامی از نحوه اتخاذ رویکرد هیدرواجتماعی در پر کردن شکاف بین سلامت منابع آب و رفاه انسانی است.



شکل ۴- نمایی از مفهوم ارزیابی تاب‌آوری هیدرو-اجتماعی (Kumar و همکاران، ۲۰۲۰)

راهبردهای سازگاری با تغییرات قابل پیش‌بینی و غیرمنتظره با در نظر گرفتن بعد اجتماعی، انسجام سازمانی و حکمرانی خوب قابل استفاده برای بهبود وضعیت تاب‌آوری هیدرولوژیک است. در این راستا، می‌توان با شناخت عواملی که امکان تقویت تاب‌آوری از طریق اقدامات مختلف مدیریتی را فراهم می‌کنند، در برابر سیلاب، خشک‌سالی و تغییر اقلیم می‌توان به‌طور مؤثری مقاومت کرد. برای مثال می‌توان در محیط‌های شهری، از زیرساخت‌های سبز با تلفیق فرآیندهای طبیعی به‌هم پیوسته، تاب‌آورتر و سازگارتر استفاده نمود. علاوه‌بر ایجاد مناظر طبیعی برای ذخیره، نفوذ و تبخیر رواناب و تقویت خدمات بوم‌سازگان، می‌توان آلاینده‌های ورودی به پیکره‌های آبی را نیز کاهش داد. نمونه‌هایی از این اقدامات در محیط‌های شهری می‌توان باغچه‌های جذب باران، چاله‌ها، تالاب‌های مصنوعی و سنگفرش‌های قابل نفوذ را نام برد. زیرساخت‌ها و راهبردهای مقابله با نوسانات و تغییرات اقلیمی به‌طور فزاینده‌ای برای افزایش تاب‌آوری در محیط‌های طبیعی و شهری، بهبود ظرفیت‌های مقابله و سازگاری استفاده می‌شوند (Pelorosso و همکاران، ۲۰۱۸؛ MacDonald و همکاران، ۲۰۱۹).

نتیجه‌گیری

اکثر مناطق جهان شاهد گرمایش اقلیمی و تخریب ناشی از فعالیت‌های انسانی هستند و انتظار می‌رود که در آینده این روند تشدید یابد. علاوه‌بر این تعامل‌های انسان و تغییرات اقلیمی بر تعادل آب حوزه آبخیز تأثیر می‌گذارد. باتوجه‌به تغییر اقلیم و اثرات آن بر سامانه‌های هیدرولوژی در محیط‌های طبیعی و انسان‌ساخت، رویکردهای مبتنی بر سازگاری با تغییر شرایط باید در تصمیمات مدیریتی به‌طور جدی دنبال شوند. در این راستا، پایش داده‌های ثبت

شده مرتبط با شاخص‌های هیدرولوژی، تعیین شاخص‌های تاب‌آوری هیدرولوژی و زمان‌بندی وقایع هیدرواقلیمی در پیش‌بینی واکنش آبخیزها نقش مهمی دارند. در این زمینه، پژوهش در زمینه چگونگی محاسبه میزان تاب‌آوری مؤلفه‌های هیدرواقلیمی، شاخص‌های تاب‌آوری و کاربرد آن‌ها در تبیین اقدامات مدیریتی از جمله مواردی است که کمتر مورد توجه قرار گرفته و نیازمند پژوهش‌های بیشتر است.

اولین گام مهم در مدیریت جامع حوزه آبخیز، شناسایی منابع تنش در حوزه آبخیز و عوامل مؤثر بر تاب‌آوری است که مباحث اصلی و محرک‌های سامانه را مشخص و سطح تاب‌آوری گذشته و فعلی را ارزیابی می‌کند. در این زمینه شاخص‌های چندکارکردی ارائه شدند که می‌توانند به‌طور مؤثر تاب‌آوری هیدرولوژیک بوم‌سازگان‌های مختلف را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف منعکس کنند. مرور مطالعات نشان می‌دهد که مفهوم‌سازی و محاسبه تاب‌آوری هیدرولوژیک در مدیریت پایدار منابع آب به‌ویژه در آبخیزهای شهری، برنامه‌ریزی منطقه‌ای سازگار با اقلیم، مدل‌سازی، تبیین سناریوهای مدیریتی با تأکید بر مهندسی سبز ارتقاء سطح خدمات بوم‌سازگان، حفظ و ارتقاء پایداری سامانه‌های اجتماعی-بوم‌شناختی، طراحی و توسعه مناسب زیرساخت‌های زهکشی و تحلیل عملکرد ساختاری و عملکردی حوزه‌های آبخیز کاربرد دارد.

مدیران منابع و دانشمندان می‌توانند با ارزیابی تاب‌آوری هیدرولوژیک، راهبردهایی برای سازگاری با تغییرات مشخص و غیرمنتظره ارائه دهند. تقویت تاب‌آوری جوامع در برابر سیلاب، خشک‌سالی و تغییر اقلیم نیازمند شناخت عواملی است که امکان تقویت آن از طریق اقدامات مختلف مدیریتی را فراهم کنند. زیرساخت‌ها و راهبردهای مقابله با نوسانات و تغییرات اقلیمی به‌طور فزاینده‌ای برای افزایش تاب‌آوری در محیط‌های طبیعی و شهری، بهبود ظرفیت‌های مقابله و سازگاری استفاده می‌شوند. در محیط‌های شهری، زیرساخت‌های سبز با تلفیق فرآیندهای طبیعی به‌هم پیوسته، تاب‌آورتر و سازگارتر هستند. در این راستا، علاوه‌بر ایجاد مناظر طبیعی برای ذخیره، نفوذ و تبخیر رواناب و تقویت خدمات بوم‌سازگان، می‌توان آلاینده‌های ورودی به پیکره‌های آبی را نیز کاهش داد. نمونه‌هایی از این اقدامات در محیط‌های شهری شامل باغ‌های جذب باران، چاله‌ها، تالاب‌های مصنوعی و سنگ‌فرش‌های قابل نفوذ است. استفاده از نتایج حاصل از رویکردهای مبتنی بر منحنی Budyko و مدل Convex می‌تواند در دستیابی سریع و در عین حال منطقی از وضعیت تاب‌آوری هیدرولوژیک و در نتیجه برنامه‌ریزی منطقه‌ای نقش داشته باشند.

قابل ذکر است که در حال حاضر، هیچ‌گونه مطالعه‌ای بر تاب‌آوری هیدرولوژیک در ایران انجام نشده است اما باتوجه‌به وجود اطلاعات پایه در سایر مطالعات می‌توان این رویکرد را برای حوزه‌های آبخیز کشور پیاده‌سازی کرد. بر همین اساس، تحقیق حاضر تأکید بر ارزیابی تاب‌آوری هیدرولوژیک حوزه‌های آبخیز در کنار سایر رویکردهای ارزیابی تاب‌آوری به‌منظور تکمیل دیدگاه‌های یکپارچه مدیریتی و برنامه‌ریزی منابع حیاتی کشور دارد. برای ارزیابی تاب‌آوری هیدرولوژیک در شرایط ایران، می‌توان از مجموعه شاخص‌هایی استفاده کرد که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر ایجاد آشفتگی در حوزه‌های آبخیز تأثیرگذار هستند. بومی‌سازی الگوی تفکری تاب‌آوری در ایران نیازمند در نظر گرفتن شرایط زیست‌فیزیکی، اجتماعی-اقتصادی و سیاسی حاکم بر حوزه‌های آبخیز مختلف خواهد بود. هنچنینانتظار می‌رود در ایران و برخی دیگر از کشورهای آسیایی، شکاف زیادی بین اهداف سیاسی و دیدگاه‌های علمی ارائه شده توسط دانشمندان و پژوهش‌گران در توسعه حوزه‌های آبخیز تاب‌آور به‌وجود آید. دلیل این امر را می‌توان به نبود دانش کافی در زمینه سازگاری هیدرولوژیک، فن‌آوری‌های هیدرولوژیک و درک حکمرانی آبخیر و به‌طور کلی تغییرات ساختاری در حوزه آبخیز و نیز درک اهمیت آن‌ها توسط سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان نسبت داد.

پی‌نوشت

1-Adaptive capacity
2-Resilience
3-Static deviation
4-Dynamic deviation
5-Modified Elasticity
6-Change in peak stream flow
7-Low flow index
8-Frequency and timing of low flow conditions
9-Frequency of peak flow events
10-Change in annual water yield
11-Tolerance
12-Plasticity
13-Ball and cup
14-Socio-hydrological resilience

منابع

Adger W.N. 2000. Social and ecological resilience: are they related? Progress in Human Geography, 24: 347-364.

Black P.E. 1997. Watershed functions. Journal of the American Water Resources Association, 33(10):1-11.

Budyko M. I. 1974. Climate and life. ed. Miller, D.H. Academic Press: New York, NY, USA.

Creed I.F., Spargo A.T., Jones J.A., Buttle J.M., Adams M.B., Beall F.D., Booth E., Campbell J., Clow D., Elder K., Green M.B., Grimm N.B., Miniat C., Ramlal P., Saha A., Sebestyen S., Spittlehouse D., Sterling S., Williams M.W., Winkler R. and Yao H. 2014. Changing forest water yields in response to climate warming: results from long-term experimental watershed sites across North America. Global Change Biology, 20: 3191–3208.

De Carvalho J.W.L.T., Iensen I.R.R. and dos Santos I. 2021. Resilience of hydrologic similarity areas to extreme climate change scenarios in an urban watershed. Urban Water Journal, 1–12.

Ebel B.A. and Mirus B.B. 2014. Disturbance hydrology: Challenges and opportunities. Hydrological Processes, 28(19): 5140-5148.

Folke C., Carpenter S., Elmqvist T., Gunderson L., Holling C.S., Walker B., Bengtsson J., Berkes F., Colding J., Danell K., Falkenmark M., Gordon L., Kasperson R., Kautsky N., Kinzig A., Levin S., Maler K.G., Moberg F., Ohlsson L., Olsson P., Ostrom E., Reid W., Rockstrom J., Savenije H. and Svedin U. 2002. Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations. Journal of the Human Environment, 31(5): 437-440.

Gerten D., Lucht W., Schaphoff S., Cramer W., Hickler T. and Wagner W. 2005. Hydrologic resilience of the terrestrial biosphere. Geophysical Research Letters, 32: L21408.

Green M. 2014. The Hydrological resilience of temperate forests. Resources-Resilience-Renewal-Res-

toration. 94th Annual Winter Meeting, New England, Society of American Foresters.

Helman D., Lensky I.M., Yakir D. and Osem Y. 2017. Forests growing under dry conditions have higher hydrological resilience to drought than do more humid forests. Global Change Biology, 23: 2801–2817.

Holling C.S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics, 4: 1-23.

Holling C.S., Schindler D.W., Walker B.W. and Roughgarden J. 1995. Biodiversity in the functioning of ecosystems: an ecological synthesis. Biodiversity Loss: Economic and Ecological Issues. First Edition. Cambridge University Press, Cambridge, England.

Holling C.S. 2001, Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. Ecosystems, 4: 390-405.

IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report, in Contribution of Working Groups, I., II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, eds R.K. Pachauri, and L.A. Meyer (Geneva).

IPCC. 2018. Global Warming of 1.5°C, an IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 C Above pre-Industrial levels (SR1.5). Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, England.

Javadinejad S., Hannah D., Krause S., Naseri M., Dara R. and Jafary F. 2020. Building socio-hydrological

Ostrom E. 2009. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. Science, 325(5939): 419-422.

Pan S., Tian H., Dangal S.R.S., Yang Q., Yang J., Lu C., Tao B., Ren W. and Ouyang Z. 2015. Responses of global terrestrial evapotranspiration to climate change and increasing atmospheric CO2 in the 21st century, Earth's Future, 3: 15–35.

Pelorosso R., Gobattoni F. and Leone, A. 2018. Increasing hydrological resilience employing nature-based solutions: a modelling approach to support spatial planning. Chapter, In: Papa R., Fistola R., Gargiulo C. (eds) Smart Planning: Sustainability and Mobility in the Age of Change, Green Energy and Technology. Springer, Cham.

Pimm S.L. 1991. Balance of nature? The University of Chicago Press. Chicago. First Edition. Illinois, USA.

Poff N.L., Allan J.D., Bain M.B., Karr J.R., Prestegaard K.L., Richter B.D., Sparks R.E., and Stromberg J. 1997. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. BioScience, 47: 769–784.

Randhir T.O. 2014. Resilience of watershed systems to climate change. Journal of Earth Science and Climatic Change, 5: 6.

Sinha J., Sharma A., Khan M. and Goyal M.K. 2018. Assessment of the impacts of climatic variability and anthropogenic stress on hydrologic resilience to warming shifts in Peninsular India. Scientific Reports, 8(1): 13833.

Van Rooyen J.D. 2021. Investigating regional recharge dynamics through the use of tritium and radiocarbon isotopes to assess the hydrological resilience of groundwater in southern Africa. Stellenbosch University, PhD thesis.

Wagener T., Sivapalan M., Troch P. and Woods R. 2007. Catchment classification and hydrologic similarity. Geography Compass, 1(4): 901-931.

Xue B., Wang G., Xiao J., Helman D., Sun W., Wang J. and Liu T. 2020. Global convergence but regional disparity in the hydrological resilience of ecosys-

resilience "improving capacity for building a socio hydrological system resilience." Safety in Extreme Environments, 2: 205–218.

Jiang C., Ni B., Han X. and Tao Y. 2014. Non-probabilistic convex model process: a new method of time-variant uncertainty analysis and its application to structural dynamic reliability problems. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 268: 656–676.

Krievins K., Baird J., Plummer R., Brandes O., Curry A., Imhof J., Mitchell S., Moore M.L., Gerger Swartling A. 2015. Resilience in a Watershed Governance Context: A Primer. Environmental Sustainability Research Centre. Project report.

Kumar P., Avtar R., Dasgupta R., Johnson B.A., Mukherjee A., Ahsan M.N., Nguyen D.C.H., Nguyen H.Q., Shaw R. and Mishra, B.K., 2020. Socio-hydrology: A key approach for adaptation to water scarcity and achieving human well-being in large riverine islands. Progress in Disaster Science, 8:100134.

Liu J., Xue B.A.Y., Sun W. and Guo Q., 2020. Water balance changes in response to climate change in the upper Hailar River Basin, China. Hydrology Research, 51(5): 1023–1035.

MacDonald R., Marcotte D., Chernos M., Carlson M. and Adrain C. 2019. Strategic priorities for conservation and restoration to improve watershed resiliency in the Vermilion River Watershed. Prepared for the North Saskatchewan Watershed Alliance, Project report.

Mao F., Clark J., Karpouzoglou T., Dewulf A., Buytaert W. and Hannah, D. 2017. HESS Opinions: A conceptual framework for assessing socio-hydrological resilience under change. Hydrology and Earth System Sciences, 21: 3655–3670.

Muñoz-Villers L.E., Holwerda F., Gomez-Cardenas M., Equihua M., Asbjornsen H., Bruijnzeel L.A., Marin-Castro B.E., and Tobon C. 2012. Water balances of old growth and regenerating Montane cloud forests in central Veracruz, Mexico, Journal of Hydrology, 462–463: 53–66.

wetland resilience to climate variability: A hydrologic perspective. Journal of Hydrology, 568: 275-284.

Zhou Y., Zhang L., Fensholt R., Wang K., Vitkovskaya I. and Tian F. 2015. Climate contributions to vegetation variations in Central Asian Drylands: pre- and post-USSR Collapse. Remote Sensing, 7: 2449–2470.

Zhu S., Li D., Huang G., Chhipi-Shrestha G., Nahiduzzaman K.M., Hewage K. and Sadiq R. 2021. Enhancing urban flood resilience: A holistic framework incorporating historic worst flood to Yangtze River Delta, China. International Journal of Disaster Risk Reduction, 61: 102355.

tems and watersheds to drought. Journal of Hydrology, 591: 125589.

Xue B., Helman D., Wang G., Xu C.Y., Xiao J., Liu T. and Lei H. 2021. The low hydrologic resilience of Asian Water Tower basins to adverse climatic changes. Advances in Water Resources, 155: 103996.

Zhang Y., Peña-Arancibia J.L., McVicar T.R., Chiew F.H., Vaze J., Liu C., Lu X., Zheng H., Wang Y., Liu Y.Y., Miralles D.G. and Pan, M. 2016. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. Scientific Reports, 6: 19124.

Zhang Y., Li W., Sun G. and King J.S. 2019. Coastal