

Estimation of Water Stress Multivariable Index (Case Study: Kashan City)

Mehrdad Khoshoei^{1*} 

(Received: December 10-2024 ; Revised: January 6-2025 ; Accepted: March 1-2025)

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

*: Corresponding author Email: m.khoshoei@kashanu.ac.ir

Abstract

The issue of water scarcity or the limited availability of water resources, including concepts such as water stress, water shortage, and water crisis, is investigated in this study. Water stress refers to problems related to access to freshwater resources, particularly due to the excessive withdrawal of surface and groundwater. A water crisis describes a situation where the available clean and safe drinking water in a specific region is insufficient to meet demand. Factors like drought, reduced rainfall, and pollution can exacerbate water stress. Water shortage arises from reasons such as the inability to meet demand, economic competition over water quality and quantity, conflicts among users, the irreversible depletion of groundwater resources, and negative environmental impacts. This study provides an index to assess water stress for spatial analysis in the study area and analyzes relevant data by collecting information from various sources. This index utilizes both static and dynamic parameters to estimate drought and better depict water stress conditions. Static parameters include land use, slope, and soil type. Dynamic parameters include precipitation, temperature, and groundwater level. Kashan County was selected as the case study due to the continuous reduction in water resources. The results showed that in the water years 2005, 2014, 2020, and 2021, Kashan experienced the highest level of water stress, while in the water years 2002, 2004, 2010, 2012, 2013, and 2015, it experienced the lowest level of water stress.

Keywords: Water stress, Multivariate index, Surface and groundwater resources, Ranking, Kashan City

How to cite this article: Khoshoei, M. 2025. Estimation of Water Stress Multivariable Index (Case Study: Kashan City). *J. Water and Soil Sci.* 29(2):33-55. DOI: [10.47176/jwss.29.2.28583](https://doi.org/10.47176/jwss.29.2.28583)

Copyright © 2025 Khoshoei. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

برآورد شاخص چندمتغیره تنش آبی (مطالعه موردی: شهرستان کاشان)

مهرداد خشوعی^{۱*} 

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱)

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m.khoshoei@kashanu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، موضوع کمبود آب یا کمیابی منابع آبی بررسی می‌شود که شامل مفاهیم تنش آبی، کم‌آبی و بحران آب است. تنش آبی به مشکلات دسترسی به منابع آب شیرین اطلاق می‌شود و به‌ویژه به‌علت برداشت بیش از حد از منابع آب سطحی و زیرزمینی ایجاد می‌شود. بحران آب به وضعیتی گفته می‌شود که در آن منابع آب شرب و غیرآلوده در یک منطقه خاص به اندازه نیاز موجود نیست. عواملی مانند خشکسالی، کاهش بارش‌ها و آلودگی می‌توانند باعث تشدید تنش آبی شوند. کم‌آبی نیز به دلایلی چون ناتوانی در برآورده ساختن نیازها، رقابت‌های اقتصادی در خصوص کیفیت و کمیت آب، اختلافات میان کاربران، کاهش غیرقابل بازگشت منابع آب زیرزمینی و آثار منفی زیست‌محیطی به وجود می‌آید. این پژوهش شاخصی برای ارزیابی تنش آبی ارائه می‌دهد که قابلیت پهنه‌بندی در منطقه مطالعه‌شده را دارد و با جمع‌آوری اطلاعات از منابع مختلف، داده‌های مرتبط را تحلیل می‌کند. در این شاخص از پارامترهای استاتیکی و دینامیکی برای برآورد خشکسالی استفاده شد؛ به‌طوری‌که شرایط تنش آبی را بهتر نشان دهد. پارامترهای استاتیکی شامل کاربری اراضی، شیب زمین و نوع خاک است. همچنین پارامترهای دینامیکی شامل بارش، دما و سطح آب زیرزمینی است. شهرستان کاشان به دلیل کاهش مستمر منابع آبی، به‌عنوان نمونه مطالعه انتخاب شده است. نتایج نشان داد که در سال‌های آبی ۱۳۸۲، ۱۳۹۳، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ شهرستان کاشان بیشترین میزان تنش آبی و در سال‌های آبی ۱۳۸۱، ۱۳۸۳، ۱۳۸۹، ۱۳۹۱، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۴ کمترین میزان تنش آبی را تجربه کرده است.

واژه‌های کلیدی: تنش آبی، شاخص چندمتغیره، منابع سطحی و زیر زمینی آب، رتبه‌دهی، شهرستان کاشان

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

کمبود آب به یکی از جدی‌ترین چالش‌های جهانی بدل شده است. پیش‌بینی می‌شود این معضل در دهه‌های آینده به دلیل رشد جمعیت، افزایش مصرف سرانه و تشدید تأثیرات تغییرات اقلیمی گسترش یابد. با توجه به اینکه توزیع نامتوازن منابع آبی و نیازهای فزاینده انسانی دسترسی به آب را محدودتر می‌کند، مدیریت پایدار منابع آبی بیش از پیش اهمیت می‌یابد. تقریباً ۰/۱۴ درصد از کل آب روی زمین، شیرین و قابل‌دسترس است. ۹۷ درصد آب باقیمانده، شور است و دسترسی به کمتر از ۳ درصد آن دشوار است (۱۵). به‌طور کلی، مقدار کافی شیرین در سطح جهان وجود دارد. اما به دلیل توزیع ناهمگن آب که با تغییرات اقلیمی تشدید یافته، بعضی مناطق بسیار مرطوب و بعضی دیگر بسیار خشک شده‌اند. همچنین، افزایش شدید در تقاضای آب برای صنعت در دهه‌های اخیر، منجر به بحران آب برای بشر شده است. با ادامه روند فعلی، می‌توان پیش‌بینی کرد که تا سال ۲۰۵۰، نسبت تقاضا به منابع بیش از ۱/۴ برابر افزایش خواهد یافت (۱۶). عدم همسانی مکانی و زمانی بین تقاضا و دسترسی به آب شیرین، یکی از دلایل اصلی کمبود آب جهانی است. افزایش جمعیت جهان، بهبود استانداردهای زندگی، تغییر در الگوهای مصرف و توسعه آبیاری کشاورزی، اصلی‌ترین عوامل افزایش تقاضای جهانی برای آب هستند. اهمیت این موضوع در تأثیرات گسترده کمبود آب بر امنیت غذایی، توسعه اقتصادی، سلامت عمومی و پایداری زیست‌محیطی نهفته است؛ به‌گونه‌ای که مقابله با این بحران به یکی از اولویت‌های اساسی جوامع انسانی تبدیل شده است (۲۴).

عوامل گوناگونی مانند تغییرات آب‌وهوایی، خشکسالی، سیل، قطع درختان، افزایش آلودگی، بیابان‌زایی و استفاده نادرست از منابع آب می‌توانند به کمبود آب منجر شوند. با وجود اینکه هر ساله آب شیرین کافی برای تأمین نیاز جهانی وجود دارد، اما نوسانات مکانی و زمانی تقاضا و تفاوت‌های دسترسی به آب باعث می‌شود که در برخی مناطق و زمان‌های خاص، کمبود آب به وجود آید. این کمبود به‌طور طبیعی

تحت‌تأثیر تغییرات هیدرولوژیک است، اما سیاست‌های اقتصادی و روش‌های مدیریتی نیز نقش مهمی در آن دارند. پیش‌بینی می‌شود که با توسعه اقتصادی، این مشکل شدت یابد؛ با این حال در صورت مدیریت صحیح، بسیاری از پیامدهای آن قابل‌پیش‌بینی، پیشگیری و یا کاهش خواهد بود (۱۴).

مقدار کل آب شیرین موجود روی زمین، به‌صورت آب سطحی یا آب زیرزمینی که به‌آسانی در دسترس است، حدوداً ۱۴۰۰۰ کیلومتر مکعب است. از این مقدار کل، تنها حدود ۵۰۰۰ کیلومتر مکعب برای مصرف و استفاده مجدد انسان‌ها قرار می‌گیرد؛ بنابراین برای تأمین نیازهای جمعیت فعلی جهان که بیش از ۸ میلیارد نفر است، مقدار آب شیرین به اندازه کافی وجود دارد و حتی می‌تواند رشد جمعیت به بیش از ۹ میلیارد نفر را پشتیبانی کند. با این حال، به دلیل توزیع نامتناسب جغرافیایی و مصرف نامتوازن آب، برخی مناطق جهان و برای بعضی از جمعیت‌ها، آب به‌عنوان منبعی کمیاب تلقی می‌شود. کمبود آب به‌عنوان پیامد اولیه، از استفاده گسترده آب در کشاورزی، دامپروری و صنعت ناشی می‌شود. به‌طور عمومی، مردم کشورهای توسعه‌یافته روزانه حدود ۱۰ درصد آب بیشتری نسبت به مردم کشورهای در حال توسعه مصرف می‌کنند. بخش عمده‌ای از این مصرف، به‌صورت غیرمستقیم است و مربوط به فرایندهای تولید صنعتی و کشاورزی مصرف بیشتر (آب) می‌شود، مانند تولید میوه، دانه‌های روغنی و پنبه. به دلیل اینکه بسیاری از این زنجیره‌های تولید به‌صورت جهانی ایجاد شده‌اند، مقدار زیادی آب برای تولید کالاها در کشورهای در حال توسعه استفاده و آلوده می‌شود، بیشتر از آنچه که برای مصرف در کشورهای در حال توسعه در نظر گرفته شده است (۱۶ و ۱۷).

خشکسالی را می‌توان به‌طور کلی به‌عنوان کمبود شدید منابع آب در مقایسه با شرایط معمول یک منطقه در زمان مشخص تعریف کرد. در این تعریف، واژه "شدید" به معنای طولانی‌مدت بودن و گستردگی این کمبود در منطقه‌ای وسیع است. هرچند کاهش بارندگی عامل اصلی این پدیده به شمار می‌آید، اما کمبود جدی منابع آب هیدرولوژیک یا تأمین آب برای کشاورزی

می‌شود. با این حال، باید توجه داشت که بین کاهش بارندگی و افت سطح آب در این منابع، یک زمان تأخیر وجود دارد. به همین دلیل، معیار هیدرولوژیک نمی‌تواند به عنوان اولین نشانگر خشکسالی در نظر گرفته شود؛ چرا که کمبود بارش ابتدا در منابع آب سطحی و زیرزمینی بعد از مدتی نمایان می‌شود (۱ و ۲۹). از دیدگاه کشاورزی، خشکسالی زمانی رخ می‌دهد که رطوبت خاک کمتر از نیاز واقعی گیاهان باشد و این کمبود رطوبت به آسیب به محصولات منجر شود. نیاز آبی گیاهان بسته به نوع آن‌ها متفاوت است؛ بنابراین مفهوم خشکسالی در کشاورزی برای محصولات مختلف متفاوت خواهد بود. این نوع خشکسالی زمانی نمایان می‌شود که مقدار رطوبت خاک به حدی کاهش یابد که نتواند نیاز تبخیر - تعرق گیاهان را تأمین کند. در این صورت، رطوبت خاک برای جوانه‌زنی و رشد گیاهان زراعی، باغی و مرتعی کافی نخواهد بود و این مسئله در نهایت به کاهش عملکرد محصولات کشاورزی منجر می‌شود (۱). خشکسالی اجتماعی - اقتصادی به فرایندهای زمانی و مکانی عرضه و تقاضا وابسته است و زمانی بروز می‌کند که تقاضا برای یک کالای اقتصادی از عرضه آن بیشتر شود. این وضعیت به‌ویژه در نتیجه کاهش منابع آب ناشی از کمبود بارش اتفاق می‌افتد. عرضه بسیاری از کالاها از جمله آب، غلات، ماهی و انرژی برقابی به شرایط آب‌وهوایی بستگی دارد. خشکسالی اجتماعی - اقتصادی ارتباط نزدیکی با خشکسالی‌های هواشناسی، هیدرولوژیک و کشاورزی دارد و تفاوت آن با انواع دیگر خشکسالی در وابستگی آن به زمان و فرایندهای مکانی عرضه و تقاضا برای شناسایی و طبقه‌بندی خشکسالی است (۱).

شاخص‌های متعددی برای برآورد تنش آبی و یا خشکسالی در سراسر جهان توسعه داده شده است. این شاخص‌ها بر اساس معرف‌های گوناگون و یا اصطلاحاً ورودی‌های متفاوت به دسته‌های متفاوتی تقسیم خواهند شد. شاخص‌های خشکسالی هواشناسی بیشتر بر اساس تحلیل داده‌های بارندگی طراحی شده‌اند. برخی از مهم‌ترین این شاخص‌ها شامل شاخص پالمر، درصد از نرمال، دهک، بارندگی استاندارد شده (SPI)،

همیشه به‌طور مستقیم با کاهش بارش همخوانی ندارد. این ناهم‌آهنگی ناشی از پیچیدگی فرایندهایی است که بارش را به منابع آب قابل استفاده برای مصارف انتقال و کشاورزی تبدیل می‌کنند (۱۱). خشکی به عنوان یک ویژگی دائمی آب‌وهوایی در یک منطقه تعریف می‌شود که ناشی از عدم کافی بارندگی برای رشد حیات در آن ناحیه است. در مقابل، خشکسالی به معنای کاهش غیرمنتظره بارندگی در یک بازه زمانی معین در مناطقی است که لزوماً خشک نیستند. این کاهش بارش به اندازه‌ای است که می‌تواند روند عادی رشد را تحت تأثیر قرار دهد. به همین دلیل، خشکسالی به عنوان یک ویژگی دائمی شناخته نمی‌شود و می‌تواند در هر نوع آب‌وهوایی رخ دهد (۱۳). در صورتی که این پدیده به‌طور مکرر اتفاق بیفتد، می‌تواند به تدریج به یک ویژگی مشخص منطقه تبدیل شود و شرایط خشکی را ایجاد کند (۱۵). تأثیر خشکسالی بر بخش‌های مختلف جامعه و محیط زیست متفاوت است. هنگامی که یک منطقه با کاهش چشمگیر بارش مواجه می‌شود، تأثیرات آن بر منابع آب ممکن است به‌طور واضح مشخص نباشد و به همین دلیل کاهش آب‌های سطحی ممکن است تأثیری بر تولیدات کشاورزی نگذارد. این وضعیت سبب می‌شود که هر بخش تعریف خاص خود را از خشکسالی ارائه دهد. بیش از ۱۵۰ تعریف متفاوت از خشکسالی وجود دارد و می‌توان این تعاریف را به‌طور کلی در چهار دسته اصلی طبقه‌بندی کرد: خشکسالی هواشناسی یا اقلیمی، خشکسالی هیدرولوژیک، خشکسالی کشاورزی یا زراعی و خشکسالی اقتصادی - اجتماعی. خشکسالی اقلیمی به میزان بارش در یک منطقه بستگی دارد. به عنوان یک معیار (که برای تفکیک دوره‌های خشک و بارشی استفاده می‌شود)، معمولاً از میانگین بلندمدت استفاده می‌شود. به این معنی که اگر بارش در یک دوره زمانی خاص (مثلاً ماه یا سال) کمتر از میانگین درازمدت متناظر (یا میانه) باشد، آن دوره به عنوان خشکسالی اقلیمی شناخته می‌شود. از منظر هیدرولوژیک، نوسانات در میزان آب‌های جاری، شامل رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و آب‌های زیرزمینی به عنوان معیاری برای تعیین خشکسالی در نظر گرفته

خشکسالی مؤثر (PN) و بارندگی تبخیر استاندارد شده (SPEI) هستند. از سوی دیگر، شاخص شدت خشکسالی آب‌های سطحی (SWSI) به‌عنوان متداول‌ترین شاخص خشکسالی هیدرولوژیک شناخته می‌شود که مجموعه‌ای از شاخص‌های منفرد مؤثر را در محاسبات خود به کار می‌گیرد. این شاخص به‌ویژه در مناطق برف‌گیر که منبع جریان‌ات سطحی به آب حاصل از ذوب برف بستگی دارد، ابزاری مناسب برای بررسی وضعیت جریان و همچنین محاسبه شدت تنش آبی محسوب می‌شود. استفاده از SWSI، نخستین‌بار توسط شافر و دزمان به‌منظور تکمیل پایش خشکسالی در ایالت کلرادو آمریکا پیشنهاد شد؛ جایی که ذخیره برف منبع اصلی تأمین آب منطقه به شمار می‌رود (۲۵). پالمر در سال ۱۹۶۵ شاخص اولیه‌ای را برای ایالات متحده ارائه کرد که پس از انجام اصلاحات، به‌عنوان شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI) شناخته شد. این شاخص که بر اساس مطالعاتی در کانزاس غربی و آیوای مرکزی ایالات متحده توسعه یافت، به‌عنوان اولین شاخص جامع خشکسالی به شمار می‌رود. PDSI بر اساس مفهوم نیاز و منابع آب به‌ازای بارندگی غیرمعمول و با تأکید بر کاهش رطوبت طراحی شده است. این شاخص با استفاده از بارش، دما و محتوای آب در دسترس خاک، چهار مؤلفه معادله تعادل آب شامل تبخیر و تعرق، رواناب، تغذیه خاک و رطوبت را محاسبه می‌کند. (۲۲).

شاخص‌های طراحی شده برای ارزیابی خشکسالی، هر یک دارای مزایا و معایب خاص خود هستند و این موضوع در پژوهش‌های مختلف به‌دقت بررسی شده است. ایالات متحده و استرالیا به‌عنوان دو کشور توسعه‌یافته، با چالش‌های جدی ناشی از خشکسالی مواجه هستند. با این حال، سوابق مربوط به این پژوهش که در مراجع بین‌المللی منتشر شده، بیشتر بر اساس داده‌ها و تحلیل‌های ایالات متحده است. در این میان، شاخص PDSI به‌عنوان اولین شاخص توسعه‌یافته، بیشترین توجه را به خود جلب کرده است (۱۲). در یک پژوهش دیگر در سال ۲۰۰۰، شاخص درصد از نرمال (PN) بررسی و ارزیابی شد و مزایا و معایب این شاخص برشمرده شد (۸). در سال ۱۹۹۹ نقدی جامع

بر شاخص‌های خشکسالی ارائه شد و برجسته‌ترین انتقادات آن شامل عدم دقت در تعیین شروع و پایان خشکسالی، عدم درک تأثیر تجمعی بارش در پایش خشکسالی و ناتوانی در پوشش زمانی پیوسته برای پایش خشکسالی بود که همین انتقادات انگیزه ارائه شاخص EDI را فراهم کرد (۴). در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۰۱، سه شاخص خشکسالی SPI، CZI و ZSI در ۴ نقطه کشور چین که شرایط خشک تا مرطوب داشتند، برای ارزیابی خشکسالی از ۴۸ سال آمار بارندگی بین سال‌های ۱۹۵۱ تا ۱۹۹۸ در دوره‌های ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه استفاده شد (۹). همچنین در سال ۲۰۰۰ در پژوهشی به مزایای شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI) پرداخته و بر این نکته تأکید شد که این شاخص برای دوره‌های زمانی مختلف (با تعداد ماه‌های متفاوت) قابل محاسبه است (۲). همچنین در همان سال وضعیت خشکسالی استان زنجان را با استفاده از چندین شاخص آماری بررسی کردند (۷). در سال ۲۰۰۰، شاخص جدید EDI برای تحلیل کمی و دوبعدی (شدت و تداوم) خشکسالی در چند ایستگاه حوضه کسلیان در سال آبی ۱۹۸۶-۱۹۸۷ به کار گرفته شد تا شروع و خاتمه خشکسالی را در این حوضه تعیین کند و نتایج نشان‌دهنده قابلیت این شاخص بود (۳). در سال ۲۰۰۰ خشکسالی در شهر زابل را با استفاده از شاخص SPI تحلیل و بررسی کردند و همچنین با بهره‌گیری از الگوهای سری زمانی، پیش‌بینی‌هایی برای چهار سال آینده این شهر ارائه دادند (۲۳). در سال ۲۰۰۱ با استفاده از آمار طولانی‌مدت بارندگی سالانه چندین ایستگاه که هر یک معرف اقلیم و منطقه خاصی از ایران بودند، سال‌های بسیار خشک تا بسیار مرطوب را شناسایی کردند (۲۶). در پژوهشی دیگر سه روش مختلف را برای تعیین شاخص خشکسالی در استان سیستان و بلوچستان ارزیابی و محاسبه کردند. این روش‌ها شامل شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، شاخص دهک‌ها و درصد نرمال بودند (۱۹).

تلاش‌هایی برای ترکیب معرف‌ها با سطوح خشکسالی انجام شده که منجر به ایجاد شاخص‌های چند معرفه شده است. یکی

استفاده کرد. برای نمونه، می‌توان بازه‌های زمانی دوماهه را در نظر گرفت و مقدار بیشینه یا کمینه معرف را برای هر دو ماه پیاپی (مانند ماه اول و دوم، سپس دوم و سوم و ...) مبنا قرار داد. در سال ۲۰۰۶ با ترکیب معرف‌های مربوط به ماه جاری و ماه‌های گذشته، مطالعه‌ای برای ایالت جورجیا انجام شد و از روش‌های واژه‌نگاری ویژه‌ای استفاده کردند. این رویکرد باعث کاهش نوسانات معرف‌ها با توجه به اهداف اجرایی طرح می‌شود و در نتیجه احتمال بروز هشدارهای نادرست، به‌ویژه در دوره‌های بینابینی خشکسالی کاهش می‌یابد (۲۸).

سطح نهایی خشکسالی باید بر اساس هر معرف و دوره زمانی مشخص تعیین شود. باین‌حال، برای ارائه یک ارزیابی کامل، ضروری است که این سطوح با هم ترکیب شوند تا سطح کلی خشکسالی مشخص شود. برای این کار، سه روش قابل‌بررسی است: (۱) انتخاب بیشترین سطح خشکسالی، (۲) تصمیم‌گیری بر اساس اکثریت سطوح، و (۳) استفاده از روش محرک ورودی و خروجی. روش سوم یعنی محرک ورودی و خروجی، پیچیدگی بیشتری نسبت به دو روش دیگر دارد؛ اما این مزیت را دارد که می‌تواند به‌خوبی با شرایط منطقه و نوع خشکسالی هماهنگ شود. در این روش، از محرک‌های ورودی برای انتقال از "سطحی کمتر به سطح شدیدتر" و از محرک‌های خروجی برای کاهش از "سطح شدیدتر به سطح کمتر" استفاده می‌شود (۱۰ و ۱۸).

هدف از این مطالعه شامل شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر کمبود آب، بررسی نقش تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت و الگوهای مصرف در تشدید این بحران و ارزیابی شاخص‌های مرتبط با مدیریت و پایش خشکسالی است. شاخص‌های معرفی شده برای برآورد خشکسالی شامل یک یا دو معرف بوده و یکی از وجوه تمایز شاخص معرفی شده استفاده توأمان چند متغیر برای برآورد خشکسالی یا تنش آبی است. همچنین، این پژوهش تلاش می‌کند تا با ارائه راهکارهای جامع و مبتنی بر شاخص‌های هواشناسی، هیدرولوژیک و کشاورزی، به بهبود مدیریت منابع آبی و کاهش آثار منفی کمبود آب کمک کند. دستیابی به این اهداف می‌تواند در ارتقای سیاست‌های پایدار و

از معروف‌ترین این شاخص‌ها SWSI است (۶). این شاخص دارای چندین نقطه ضعف است، از جمله عدم وجود یک روش مشخص برای بهینه‌سازی پارامترهای آن و وابستگی به تجربه در برآورد این پارامترها. همچنین، عدم یکنواختی در نحوه محاسبه و عملکرد آن در مناطق مختلف یک چالش اساسی به شمار می‌آید. علاوه بر این، شاخص‌های SWSI در حوضه‌های مختلف ممکن است معانی متفاوتی داشته باشند. برای نمونه، روش چانگ نمونه‌ای دیگر است که شامل ترکیبی از معرف‌ها است. این معرف‌ها شامل جریان رودخانه، بارندگی، دما، سطح آب زیرزمینی و سطح آب در مخازن هستند که می‌توانند به‌طور همزمان برای ارزیابی شرایط هیدرولوژیک استفاده شوند (۵).

پژوهش‌های محدودی برای مقایسه عملکرد شاخص‌های تک‌معرفه و چندمعرفه در پایش خشکسالی انجام شده است. در پژوهشی که برای ارزیابی وضعیت خشکسالی استان تهران انجام شد، از شاخص EDI (تک‌معرف) و روش چانگ (چندمعرف) استفاده شد. واکنش‌های متفاوت هر یک از این روش‌ها در مقابل تغییرات متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژی در این دوره مطالعاتی کاملاً مشهود بود. همچنین اختلافات زیادی در اعلام طبقات خشکسالی مانند "خشکسالی شدید" دیده شد (۲۱).

فرایند ترکیب معرف‌ها و محرک‌ها می‌تواند با استفاده از دو روش متفاوت انجام شود. روش اول شامل تبدیل چندین معرف به یک شاخص واحد است، مانند شاخص SWSI که اطلاعات مربوط به معرف‌ها را در یک مقدار واحد تجمیع می‌کند. روش دوم به تعریف سطوح خشکسالی و انتقال تمامی معرف‌ها به یک مقیاس درصدی بر اساس سطوح تعیین شده مربوط می‌شود. این روش می‌تواند به مقایسه و تحلیل بهتری از شرایط خشکسالی کمک کند و قابلیت درک بهتری از شدت و مدت آن ارائه دهد (۲۸).

یکی از مشکلات مرتبط با معرف‌های کوتاه‌مدت، وجود نوسانات در تعیین وضعیت خشکسالی است که می‌تواند مانع از اجرای مؤثر اقدامات مدیریتی شود (۲۰). برای کاهش این نوسانات، می‌توان از مقیاس‌های زمانی بلندتر و چندمدته

خواهد بود. این رویکرد جامع می‌تواند به ایجاد دیدگاهی کامل از وضعیت خشکسالی و ارائه راهکارهای مؤثر برای مدیریت آن یاری رساند.

مواد و روش‌ها

مطالعه موردی

با توجه به پیش‌بینی‌های مربوط به ادامه خشکسالی در جهان و ایران در سال‌های آینده که ناشی از گرمایش زمین و تغییرات در سیستم‌های رطوبتی است، برنامه‌ریزی کلان برای مقابله با شرایط بحرانی اهمیت زیادی دارد (۱۸). ایران همواره با خشکسالی مواجه بوده و در دهه‌های اخیر خسارات اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی سنگینی را تجربه کرده است. یکی از شدیدترین خشکسالی‌ها در سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰ رخ داد که در سی سال گذشته بی‌نظیر بود و کل کشور را تحت تأثیر قرار داد. این خشکسالی با کاهش بارندگی بیش از ۵۰ درصد و افزایش دمای متوسط سالانه به میزان حدود ۴ درجه سانتی‌گراد همراه بود. چالش‌های کمبود آب و اقلیم خشک و نیمه‌خشک در استان اصفهان، به‌ویژه در شهرستان کاشان، یکی از مسائل عمده توسعه در این منطقه به شمار می‌آید. این شرایط اقلیمی به‌طور مداوم موجب تشدید خشکسالی در مناطق مختلف شده است. بررسی آمار خشکسالی‌ها در شهرستان کاشان حاکی از این است که اقلیم منطقه به سمت خشکی بیشتر پیش می‌رود. شهرستان کاشان با مساحت ۴۳۹۸ کیلومتر مربع و جمعیت تقریباً ۳۷۰ هزار نفر در ارتفاع ۹۷۰ متری از سطح دریا واقع شده است (۱۸). این شهرستان از شمال و شمال غربی با شهرستان کهک در استان قم، از شرق و شمال شرقی با شهرستان آران و بیدگل در استان اصفهان، از جنوب با شهرستان نطنز و از غرب با شهرستان دلیجان در استان مرکزی همسایه است. آب‌وهوای شهرستان کاشان، مشابه سایر شهرستان‌های مرکزی کشور، با توجه به پستی و بلندی‌های منطقه، متغیر است. مناطق مرتفع در غرب و جنوب کاشان دارای آب‌وهوای سرد هستند؛ درحالی‌که دامنه‌های معتدل و جلگه‌های حاشیه کویر در

برنامه‌ریزی‌های کارآمد برای مدیریت منابع آبی نقش به‌سزایی داشته باشد.

همان‌طور که اشاره شد، برای ارزیابی آسیب‌پذیری و تخمین شدت، مدت و طول دوره‌های خشکسالی، شاخص‌های متنوعی وجود دارند. این شاخص‌ها به دسته‌های مختلفی مانند خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیک، کشاورزی و غیره تقسیم می‌شوند. به‌طور کلی، استفاده از یک شاخص جامع که تمام این عوامل را در نظر بگیرد، می‌تواند به ارزیابی دقیق تنش آبی در منطقه مورد مطالعه و همچنین دستیابی به اهداف مدیریت و پایش مستمر خشکسالی کمک کند. شاخص چندمتغیره پیشنهادی با ادغام عوامل مختلف از جمله پارامترهای هواشناسی (مانند بارش و دما)، هیدرولوژیک (مانند جریان‌های سطحی و سطح آب‌های زیرزمینی)، کشاورزی (مانند رطوبت خاک و نیاز آبی محصولات) و اقتصادی - اجتماعی (مانند میزان تقاضا و تأثیرات اقتصادی کمبود آب)، تصویری جامع و چندبعدی از تنش آبی ارائه می‌دهد. این شاخص با در نظر گرفتن تأثیرات همزمان و تعاملات میان این عوامل، امکان تحلیل دقیق‌تر و عمیق‌تری را در مقایسه با شاخص‌های تک‌متغیره یا ساده فراهم می‌کند. در مقایسه با رویکردهای پیشین که بیشتر به یک یا دو عامل محدود می‌شدند و توانایی پایش پیچیدگی‌های ناشی از تعاملات بین متغیرها را نداشتند، روش پیشنهادی از طریق ترکیب داده‌های چندمنبعی و تحلیل یکپارچه آن‌ها، نواقص موجود را برطرف می‌کند. این شاخص به‌ویژه در شرایطی که تغییرات اقلیمی و توزیع نامتوازن منابع آب پیچیدگی مدیریت تنش آبی را افزایش داده‌اند، می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تر در مدیریت منابع آبی و پیش‌بینی دقیق‌تر پیامدهای احتمالی کمک کند. باین‌حال کمبود داده‌های دخیل در خشکسالی و یا تنش آبی از محدودیت‌های این پژوهش است. برای نمونه داده‌های مربوط به نوع کشت و یا سطح زیرکشت در منطقه کاشان یا وجود ندارند و یا دارای طول بازه کافی برای برآورد تنش آبی نیستند. در این پژوهش، شاخص انتخاب‌شده ترکیبی از عوامل هواشناسی، هیدرولوژیک، کشاورزی، زیست‌محیطی و اقتصادی - اجتماعی

جریان رودخانه: جریان رودخانه به‌طور مستقیم تابعی از رطوبت خاک، سطح آب زیرزمینی، رواناب و بارندگی است. یکی از مزایای این معرف، توانایی آن در ارائه تصویری جامع از وضعیت رطوبت کلی حوضه آبخیز است که می‌تواند در ارزیابی شرایط هیدرولوژیک منطقه کمک شایانی کند (۱۴ و ۲۴).

ذخیره مخزن: این معرف دارای ویژگی‌های کاربردی قابل توجهی است؛ زیرا به‌طور نسبی تعیین آن آسان بوده و می‌تواند جوانب مهمی همچون مدیریت منابع و تقاضا را در نظر بگیرد. به همین دلیل، ذخیره مخزن به‌عنوان یک ابزار مفید در تحلیل وضعیت آبی منطقه محسوب می‌شود و به تصمیم‌گیری‌های بهینه در زمینه مصرف و توزیع آب کمک می‌کند (۱۴ و ۱۷).

آب زیرزمینی: در بسیاری از نواحی، آب زیرزمینی به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب شناخته می‌شود و میزان تغییرات ارتفاع یا افت آن می‌تواند به‌عنوان یک معرف مهم استفاده شود. با این حال، این منبع ممکن است با چالش‌هایی مانند برداشت بی‌رویه مواجه شود که می‌تواند منجر به کاهش کیفیت و کمیت این منابع آبی شود؛ بنابراین پایش و مدیریت صحیح این منبع برای حفظ آن و تأمین نیازهای آبی ضروری است (۱۴ و ۲۴).

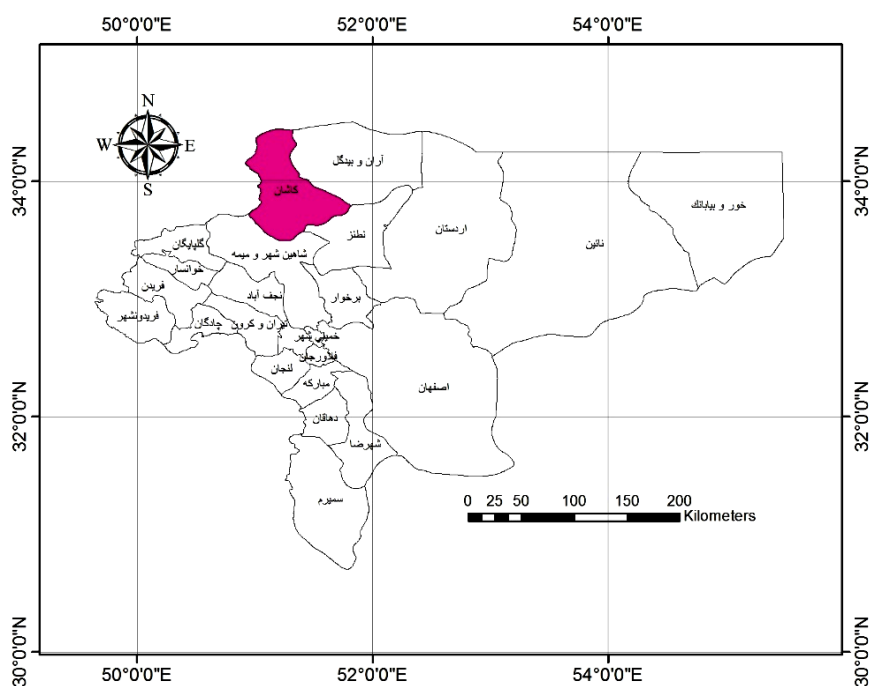
در این پژوهش از پارامترهای استاتیک و دینامیک استفاده شده است. پارامترهای استاتیک در طول زمان تغییری نخواهند داشت، حال آنکه پارامترهای دینامیک وابسته به زمان هستند و به‌صورت روزانه، ماهانه و یا سالانه تغییر می‌کنند. پارامترهای استاتیک مؤثر بر تنش آبی شامل کاربری اراضی، شیب زمین و نوع خاک هستند. پارامترهای دینامیک مؤثر بر تنش آبی شامل بارش، دمای میانگین، آب سطحی در دسترس، آب زیرزمینی در دسترس، کیفیت آب زیرزمینی و سطح زیرکشت است. هر کدام از لایه‌های استاتیک و دینامیک در شاخص یکپارچه نمایانگر یکی از انواع خشکسالی‌ها است. لایه‌های بارش و دمای میانگین در گروه خشکسالی‌های هواشناسی هستند. لایه آب زیرزمینی در دسترس در گروه خشکسالی‌های هیدرولوژیک طبقه‌بندی می‌شوند. شیب زمین و نوع خاک منطقه در دسته‌های مربوط به خشکسالی‌های کشاورزی

شرق و شمال کاشان گرمسیر هستند. آب روستاهای کوهستانی از چشمه‌ها و قنات‌ها تأمین می‌شود و آب روستاهای جلگه‌ای نیز از قنات تأمین می‌شود. آب مناطق اطراف کویر نیز کمی شور است. در شکل ۱ موقعیت شهرستان کاشان در استان اصفهان نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۲ موقعیت آبخوان‌های فعال در محدوده شهرستان کاشان نمایش داده شده است.

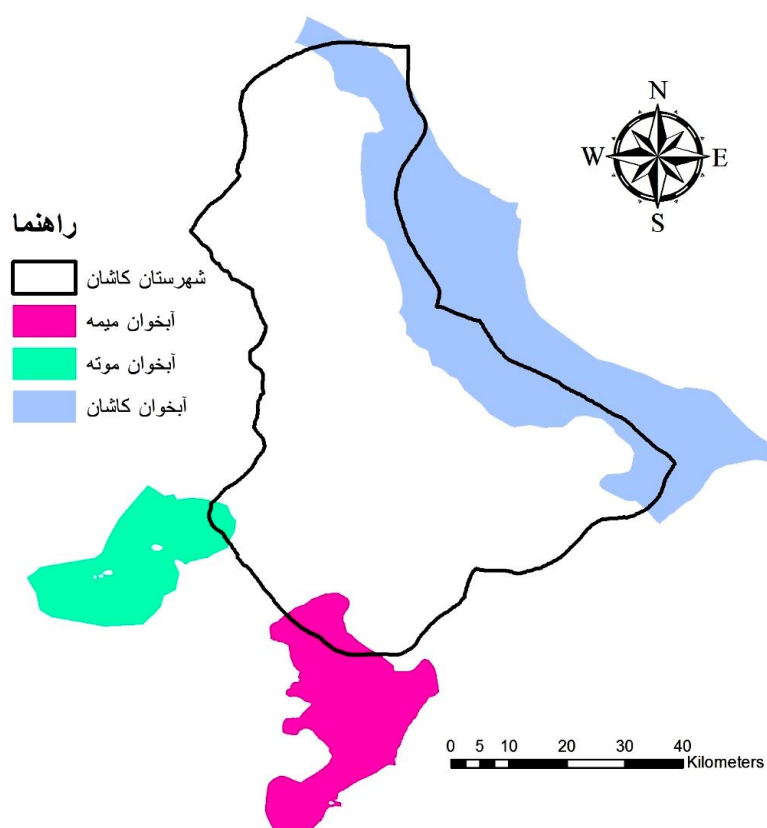
شاخص چندمتغیره

برای ایجاد یک شاخص تنش آبی که شامل جنبه‌های هواشناسی، هیدرولوژیک، کشاورزی، زیست‌محیطی و اقتصادی - اجتماعی باشد، ضروری است که به معرفی معرف‌ها پرداخته شود. این معرف‌ها به‌عنوان متغیرهایی عمل می‌کنند که می‌توانند به‌طور کمی مدت، شدت و وسعت مکانی خشکسالی را توصیف کنند. در بیشتر موارد، این متغیرها بر مبنای داده‌های مربوط به وضعیت آب‌وهوایی یا هیدرولوژیک و یا کشاورزی تعریف می‌شوند. محرک‌ها به مقادیر حدی مرتبط با هر معرف اطلاق می‌شوند که تعیین‌کننده شدت خشکسالی، زمان شروع و پایان خشکسالی و اقدامات مدیریتی متقابل هستند. در توسعه و طراحی این معرف‌ها و محرک‌ها، عواملی همچون سازگاری مکانی و زمانی، ویژگی‌های خاص منطقه‌ای، یکنواختی آماری میان محرک‌ها و طبقات مختلف و همچنین زمان‌های آغاز و پایان خشکسالی باید مد نظر قرار گیرند (۲۷ و ۲۸).

بارندگی: کمبود بارندگی به‌عنوان نقطه آغاز خشکسالی هواشناسی شناخته می‌شود و به‌عنوان یک معرف در این زمینه کاربرد فراوانی دارد. یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از این متغیر، نوسانات قابل توجه آن در بازه‌های زمانی کوتاه است. با این حال، بارندگی همچنان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معیارها در پایش خشکسالی استفاده می‌شود و شاخص‌های مختلفی مانند SPI، EDI، CZI، MCZI و نرم‌افزارهای مرتبط با خشکسالی بر اساس این متغیر طراحی شده‌اند. همچنین، رفتار غیریکنواخت این شاخص‌ها در منابع مختلف به‌طور جامع بررسی شده است (۱۴ و ۲۱).



شکل ۱. موقعیت شهرستان کاشان در استان اصفهان



شکل ۲. موقعیت آبخوان‌های اطراف شهرستان کاشان

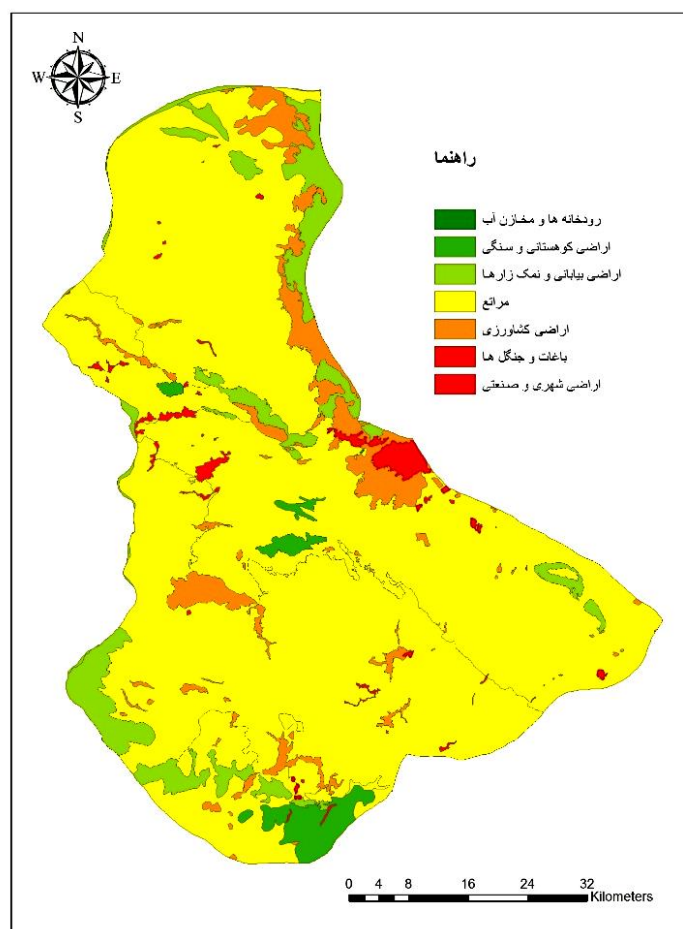
آن‌ها رتبه یا عدد زیرکلاس بیشتری اختصاص می‌یابد. در مقابل، زمین‌های بایر، نمکزارها و سطوح آبی از آسیب‌پذیری کمتری برخوردار بوده و با رتبه‌های کمتری نشان داده می‌شوند. رتبه‌بندی این لایه بین ۲ تا ۱۰ و بر اساس آسیب‌پذیری زیرکلاس‌ها انجام می‌شود. در جدول ۱، زیرکلاس‌های لایه کاربری اراضی و رتبه هر یک مشخص شده است.

لایه نوع خاک نیز جزء لایه‌های استاتیک است. با توجه به نقشه خاک شهرستان کاشان، شش نوع خاک در حوضه وجود دارد. این شش نوع عبارت‌اند از: ۱- خاک سنگین و خیلی سنگین، ۲- خاک سنگین، ۳- خاک متوسط و سنگین، ۴- خاک متوسط و ۵- خاک متوسط و سبک. در شکل ۴ تصویر این لایه استخراج شده توسط ArcGIS در شهرستان کاشان نمایش داده شده است. برای رتبه‌بندی زیرکلاس‌های جنس خاک باید به این نکته توجه داشت که هرچه خاک سبک‌تر باشد، به دلیل وجود مواد آلی و معدنی بیشتر، این خاک برای مصارف کشاورزی مناسب‌تر است. بر این اساس خاک‌های سبک آسیب‌پذیری بیشتری در مقابل تنش آبی دارند. هرچه خاک سنگین‌تر شود، آسیب‌پذیری خاک در مقابل تنش آبی یا خشکسالی کمتر می‌شود. رتبه‌بندی این لایه بین ۱ تا ۱۰ بر اساس آسیب‌پذیری زیرکلاس‌ها است. در جدول ۲ زیرکلاس‌های لایه جنس خاک و رتبه هر کدام نمایش داده شده است.

لایه شیب زمین که در دسته لایه‌های استاتیک قرار دارد، با استفاده از dem90 شهرستان کاشان در نرم‌افزار ArcGIS به دست می‌آید. در شکل ۵ نقشه شیب شهرستان کاشان برحسب درصد نشان داده شده است. جغرافیای شهرستان کاشان به سه زیرکلاس مناطق مرتفع، مناطق میانی و مناطق پست از لحاظ ارتفاعی تقسیم‌بندی شد. تحلیل مناطق مختلف یک حوضه آبریز بر اساس ویژگی‌های توپوگرافی، شیب و ویژگی‌های جریان می‌تواند به درک بهتر پدیده‌های مرتبط با آب و مدیریت منابع آبی کمک کند. در اینجا،

طبقه‌بندی می‌شوند. کاربری اراضی در گروه خشکسالی‌های اقتصادی - اجتماعی است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در درون شاخص یکپارچه خشکسالی، انواع خشکسالی‌های هواشناسی، هیدرولوژیک، کشاورزی، اقتصادی اجتماعی موجود است. هر یک از عوامل یادشده به زیرکلاس‌های مختلفی تقسیم شده‌اند تا میزان حساسیت آن‌ها به خشکسالی و کمبود آب تعیین شود. طرح وزنی عددی برای ارزیابی آسیب‌پذیری در برابر خشکسالی پیشنهاد شده است. هر زیرکلاس از عوامل آسیب‌پذیر با یک وزن عددی بین ۰ تا ۱۰ مشخص شده است. مقدار وزنی به روابط خاص بین زیرکلاس‌های مختلف در زمینه تشدید کمبود ذخایر آب و آسیب‌پذیری به خشکسالی وابسته است. این روابط به تعیین چگونگی تأثیر هر زیرکلاس بر یکدیگر و بر وضعیت کلی آب در یک منطقه کمک می‌کند؛ بنابراین، بررسی و تحلیل این زیرکلاس‌ها می‌تواند در شناخت بهتر وضعیت منابع آب و همچنین ارزیابی دقیق‌تر آسیب‌پذیری در برابر خشکسالی مؤثر باشد. مقدار وزنی ۰ نشان می‌دهد که زیرکلاس یک عامل معین کمترین آسیب‌پذیری را در برابر خشکسالی دارد؛ درحالی‌که مقدار وزنی ۱۰ نشان‌دهنده بیشترین آسیب‌پذیری خشکسالی است. به عبارت دیگر، وزن بیشتر برای تشخیص کلاس آسیب‌پذیرتر استفاده می‌شود. در ادامه، ۶ لایه‌ای که برای شهرستان کاشان در نظر گرفته شده‌اند، توضیح داده می‌شوند.

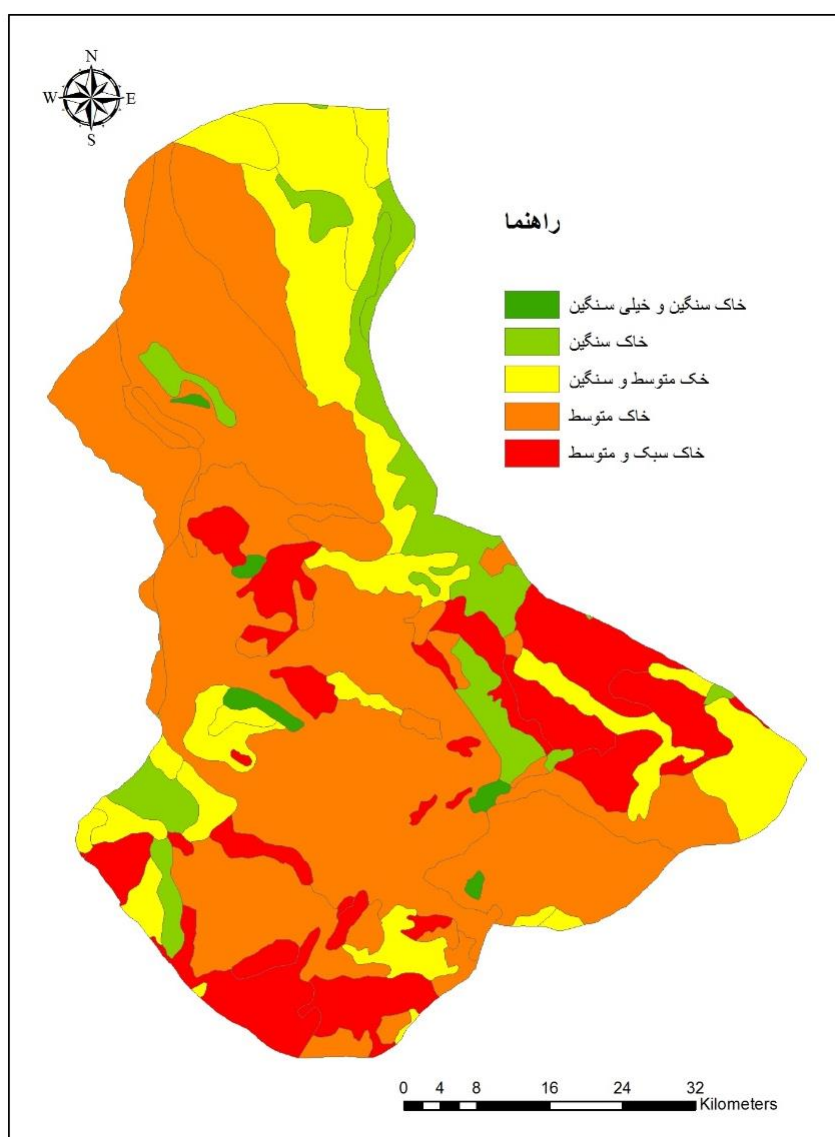
همان‌طور که بیان شد در این پژوهش از پارامترهای استاتیک و دینامیک برای برآورد تنش آبی یا خشکسالی در شهرستان کاشان استفاده شده است. لایه کاربری اراضی به عنوان اولین لایه استاتیک است و در سطح شهرستان کاشان کاربری‌های متفاوتی مانند شهری، کشاورزی، باغات، زمین‌های بایر و غیره وجود دارند. در شکل ۳ تصویر این لایه با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS در شهرستان کاشان نمایش داده شده است. با توجه به اینکه مناطق مسکونی و زمین‌های کشاورزی و باغات به آب بیشتری نیاز دارند، این مناطق در برابر خشکسالی آسیب‌پذیری بیشتری دارند و به



شکل ۳. لایه کاربری اراضی در شهرستان کاشان

جدول ۱. رتبه‌بندی زیرکلاس‌های لایه کاربری اراضی

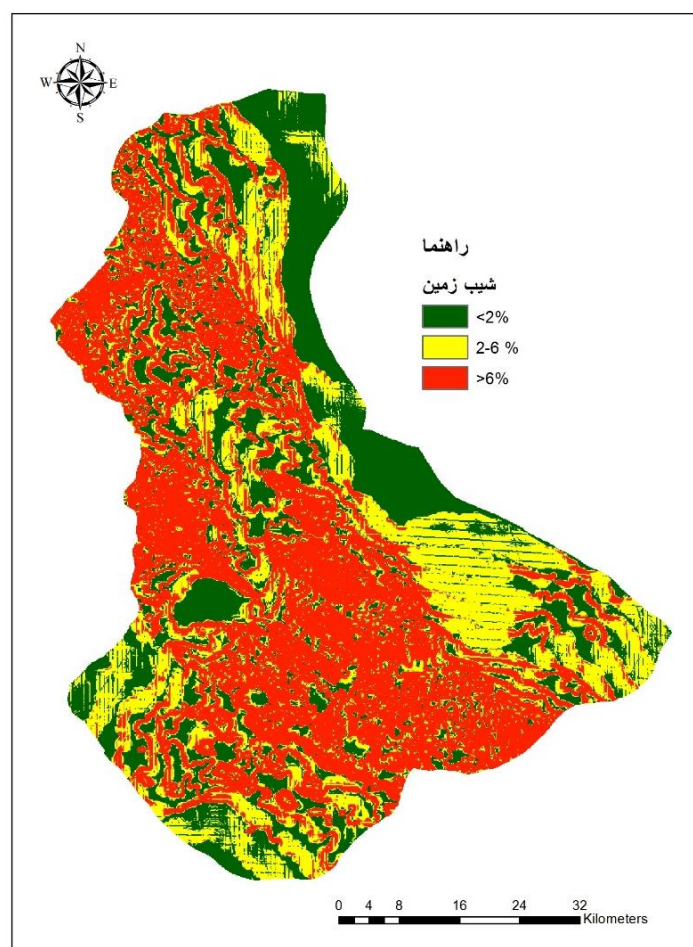
رتبه	زیرکلاس‌ها
۱۰	اراضی شهری و صنعتی
۹	باغات و جنگل‌ها
۸	اراضی کشت دیم
۷	اراضی کشاورزی
۶	مراتع
۵	تالاب‌ها
۴	اراضی بیابانی و نمکزارها
۳	اراضی کوهستانی و سنگی
۲	رودخانه‌ها و مخازن آب



شکل ۴. لایه جنس خاک در شهرستان کاشان

جدول ۲. رتبه‌بندی زیر کلاس‌های لایه جنس خاک

رتبه	زیر کلاس‌ها
۱۰	ترکیب خاک سبک و متوسط (Light – Moderate)
۸	خاک متوسط (Moderate)
۶	ترکیب خاک متوسط و سنگین (Moderate – Heavy)
۴	خاک سنگین (Heavy)
۲	ترکیب خاک سنگین و خیلی سنگین (Heavy - Very Heavy)
۰	خاک خیلی سنگین (بستر سنگی)



شکل ۵. لایه شیب زمین در شهرستان کاشان

می‌شود که مناطق میانه حوضه دارای نوسانات بیشتری در جریان آب باشند و زمان نگهداری آب در این نواحی کمتر از مناطق پایین‌دست باشد. این مناطق ممکن است به‌عنوان نواحی انتقالی بین بالادست و پایین‌دست عمل کنند. (۳) مناطق پایین‌دست حوضه: مناطق پایین‌دست حوضه، به زمین‌هایی با شیب متوسط کمتر از ۲ درصد و درجه آبراهه بیشتر از ۴ اشاره دارد. در این مناطق، جریان آب به‌صورت متناوب و همیشگی است؛ به این معنا که آب به‌طور پیوسته و با سرعت کمتری جریان دارد. این مناطق به‌دلیل شیب ملایم‌تر و ویژگی‌های توپوگرافیکی، زمان بیشتری را برای حفظ آب نسبت به قسمت‌های بالادست و میانی حوضه دارند. در جدول ۳ زیرکلاس‌های لایه شیب زمین و رتبه هرکدام نمایش داده شده است.

سه بازه اصلی (بالادست، میانه و پایین‌دست) به تفصیل بررسی می‌شود: (۱) مناطق بالادست حوضه: مناطق بالادست حوضه شامل توپوگرافی کوهستانی و موج‌دار است که دارای شیب متوسط بیشتر از ۶ درصد و درجه آبراهه ۱ و ۲ هستند. ویژگی‌های جریان در این مناطق به‌صورت بی‌دوام و ناپایدار است؛ به این معنی که آب به‌طور متناوب و به‌سرعت از این نواحی خارج می‌شود. این مناطق به‌دلیل شیب تند، قادر به حفظ آب کمتری هستند و بیشتر به جریان‌های سریع و سیلابی متکی‌اند. (۲) مناطق میانه حوضه: مناطق میانه حوضه دربرگیرنده مناطقی با شیب متوسط بین ۲ تا ۶ درصد و درجه آبراهه ۳ و ۴ است. در این مناطق، جریان آب به‌صورت متناوب و بدون دوام است. این ویژگی باعث

جدول ۳. رتبه‌بندی زیرکلاس‌های لایه شیب زمین

رتبه	زیرکلاس‌ها
۱۰	شیب بیش از ۶ درصد
۵	شیب بین ۲ تا ۶ درصد
۱	شیب کمتر از ۲ درصد

بارش است. در جدول ۴ زیرکلاس‌های لایه بارش و رتبه هرکدام نمایش داده شده است.

طبق جدول ۴، برای مقادیر بارش بیشتر از بارش نرمال و بارش با انحراف کمتر از ۱۰ درصد از بارش نرمال، رتبه تنش آبی صفر است و برای بارش با انحراف بین ۱۰ تا ۱۵ درصد، ۱۵ تا ۲۵ درصد، ۲۵ تا ۳۵ درصد، ۳۵ تا ۵۰ درصد و بیشتر از ۵۰ درصد، کمتر از بارش نرمال به ترتیب رتبه‌های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ برای بیان تنش آبی اختصاص داده شده است.

لایه دمای میانگین، یکی دیگر از لایه‌های دینامیک در طراحی شاخص چندمتغیره تنش آبی است. داده‌های دمای میانگین به صورت روزانه از شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان و سازمان هواشناسی استان جمع‌آوری شده است. بازه داده‌های دمای میانگین از سال آبی ۱۳۷۶ تا ۱۴۰۰ است. در شکل ۸ نقشه درون‌یابی لایه دمای میانگین شهرستان کاشان در سال‌های آبی ۱۳۸۵، ۱۳۹۰، ۱۳۹۵ و ۱۴۰۰ نشان داده شده است. در شکل ۹ روند تغییر متوسط دمای میانگین در شهرستان کاشان از سال آبی ۱۳۷۶ تا ۱۴۰۰ نشان داده شده است. برای لایه دمای میانگین بر اساس داده‌های نقطه‌ای سنجش دما پهنه‌بندی با استفاده از روش Kriging در نرم‌افزار ArcGIS در شهرستان کاشان انجام و سپس توسط آنالیز Zonal در این نرم‌افزار مقدار دمای میانگین در سال‌های مورد بررسی محاسبه شد.

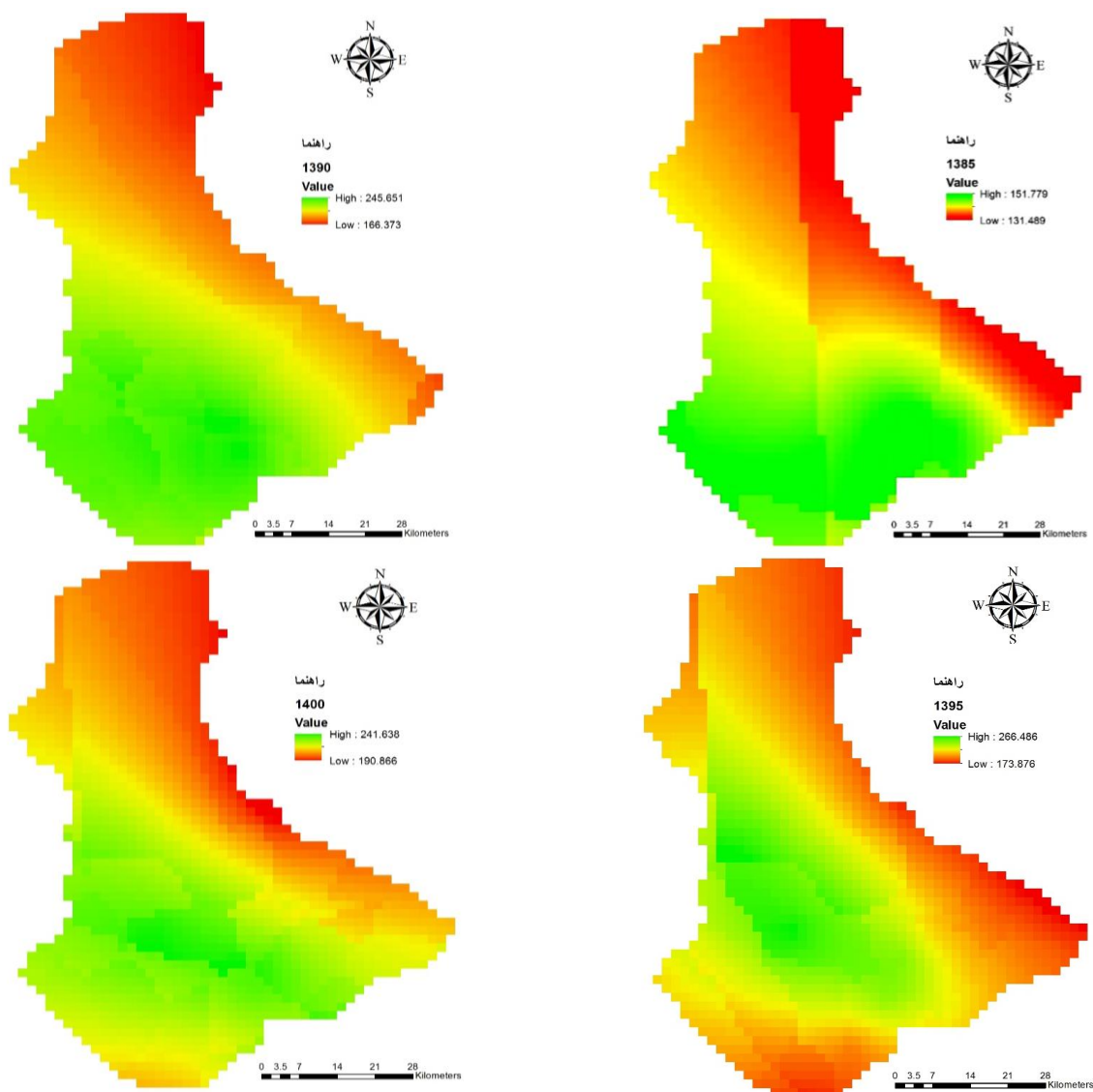
رتبه‌بندی این شاخص بر اساس درصد انحراف میزان دمای میانگین از متوسط طولانی مدت دمای میانگین سالانه بر اساس بازه‌بندی شاخص یعنی سال آبی ۱۳۷۶ تا ۱۴۰۰ است. هرچه این درصد مثبت بیشتر شود، آسیب‌پذیری خشکسالی هم بیشتر

لایه بارندگی، یکی از لایه‌های دینامیک در طراحی شاخص چندمتغیره تنش آبی است. داده‌های ایستگاه‌های بارندگی به صورت روزانه از شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان و سازمان هواشناسی استان اصفهان (ایستگاه‌های سینوپتیک) جمع‌آوری شده است. بازه داده‌های بارندگی از سال آبی ۱۳۷۶ تا ۱۴۰۰ است. سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS درون‌یابی داده‌ها انجام و سپس برای شهرستان کاشان متوسط‌گیری انجام شد. در شکل ۶ نقشه درون‌یابی لایه بارندگی شهرستان کاشان در سال‌های آبی ۱۳۸۵، ۱۳۹۰، ۱۳۹۵ و ۱۴۰۰ نشان داده شده است. در شکل ۷ روند تغییر بارندگی متوسط در شهرستان کاشان از سال آبی ۱۳۷۶ تا ۱۴۰۰ نشان داده شده است. برای لایه بارندگی بر اساس داده‌های نقطه‌ای سنجش بارش پهنه‌بندی با استفاده از روش Kriging در نرم‌افزار ArcGIS در شهرستان کاشان انجام و سپس توسط آنالیز Zonal در این نرم‌افزار، مقدار متوسط بارندگی در سال‌های مورد بررسی محاسبه شد.

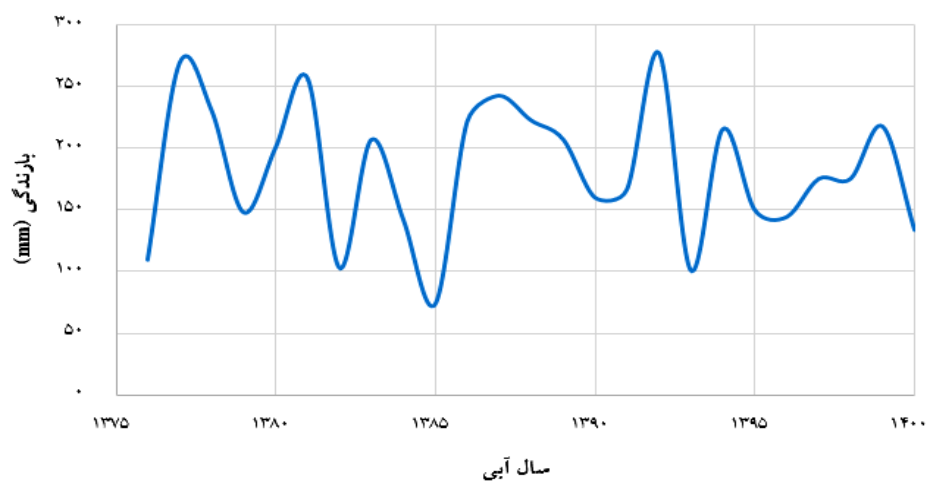
هرچه بارندگی کمتر شود، آسیب‌پذیری خشکسالی بیشتر می‌شود. رتبه‌بندی این شاخص بر اساس درصد انحراف میزان بارش از متوسط طولانی مدت بارش از سال آبی ۱۳۷۶ تا ۱۴۰۰ است. هرچه این درصد منفی بیشتر شود، آسیب‌پذیری خشکسالی هم بیشتر می‌شود. طبق معادله (۱) می‌توان درصد انحراف از متوسط بارش را به دست آورد.

$$R_p = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100 \quad (1)$$

که در این معادله، P مقدار متوسط بارش در یک سال آبی مد نظر برای شهرستان کاشان، $\bar{P}$ میانگین مقادیر متوسط بارش در سال‌های آبی ۱۳۷۶ تا ۱۴۰۰ در شهرستان کاشان است و R_p درصد انحراف بارش در هر سال آبی از مقدار متوسط بلندمدت



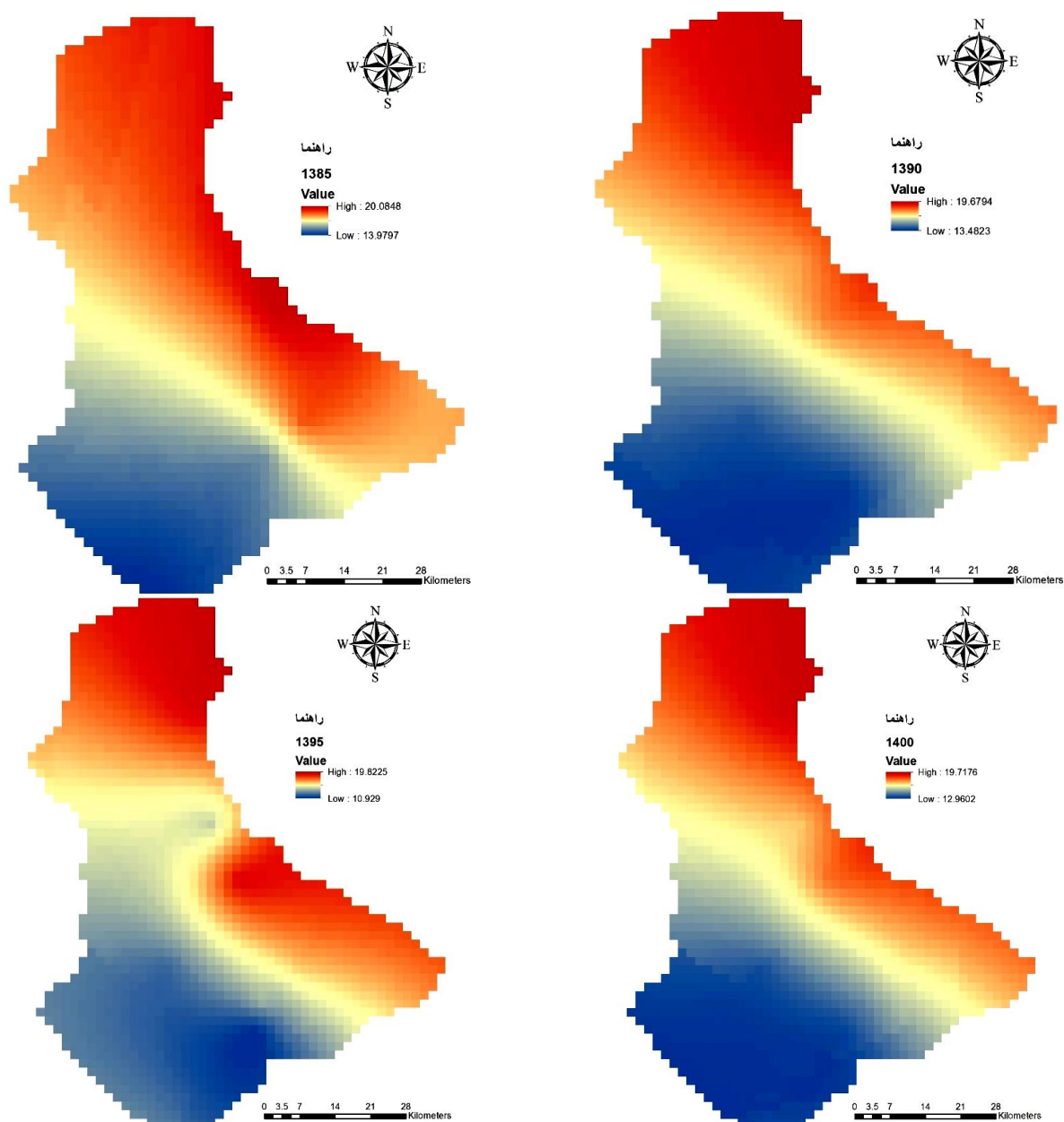
شکل ۶. نقشه درونیابی لایه بارندگی شهرستان کاشان در سال‌های آبی ۱۳۸۵، ۱۳۹۰، ۱۳۹۵ و ۱۴۰۰



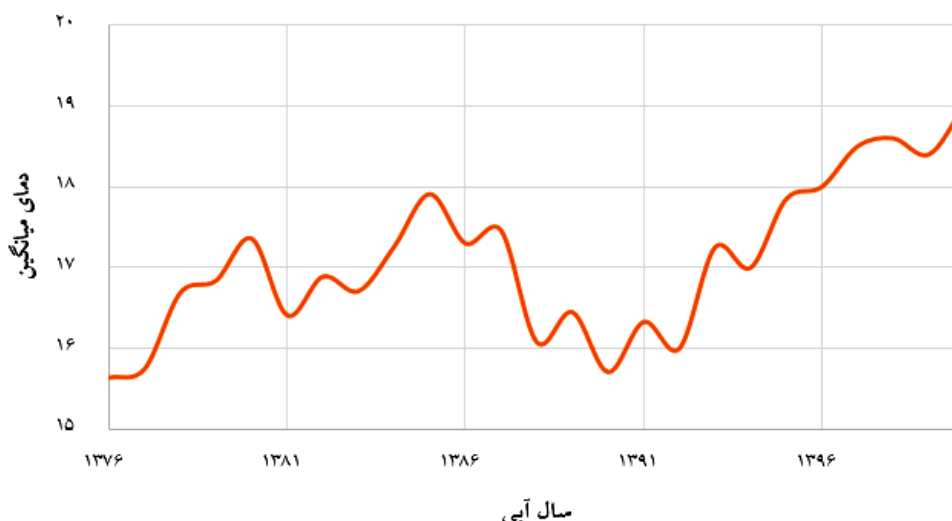
شکل ۷. روند تغییرات بارندگی متوسط در شهرستان کاشان

جدول ۴. رتبه‌بندی زیرکلاس‌های لایه بارش

رتبه	زیرکلاس‌ها (مقادیر R_p)
۰	کمتر از ۱۰- درصد
۲	بین ۱۰- و ۱۵- درصد
۴	بین ۱۵- و ۲۵- درصد
۶	بین ۲۵- و ۳۵- درصد
۸	بین ۳۵- و ۵۰- درصد
۱۰	بیشتر از ۵۰- درصد



شکل ۸: نقشه درونیابی لایه دمای میانگین شهرستان کاشان در سال‌های آبی ۱۳۸۵، ۱۳۹۰، ۱۳۹۵ و ۱۴۰۰



شکل ۹. روند تغییرات متوسط دمای میانگین در شهرستان کاشان

سال آبی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ است. همچنین داده‌های کمی آب زیرزمینی شامل پارامتر هدایت هیدرولیکی برای آبخوان کاشان که عمده آب زیرزمینی در دسترس برای شهرستان کاشان است، جمع آوری شد. در شکل ۱۰ نمودار هیدروگراف افت سطح آب دراز مدت آبخوان کاشان نشان داده شده است. هرچه میزان کاهش حجم آب زیرزمینی بیشتر باشد، آسیب‌پذیری خشکسالی بیشتر می‌شود. رتبه‌بندی این شاخص بر اساس کاهش حجم آب زیرزمینی است. در جدول ۶ زیرکلاس‌های لایه افت حجم آب زیرزمینی (R_g) و رتبه هرکدام نمایش داده شده است. برای لایه افت سطح آب زیرزمینی بر اساس داده‌های نقطه‌ای سنجش بارش پهنه‌بندی با استفاده از روش Kriging در نرم‌افزار ArcGIS در شهرستان کاشان انجام و سپس توسط آنالیز Zonal در این نرم‌افزار مقدار افت متوسط سالانه در سال‌های مورد بررسی محاسبه شد.

همان‌طور که در جدول ۶ دیده می‌شود، برای مقادیر افزایش سطح آب زیرزمینی و افت کمتر از ۵ میلیون مترمکعب آب زیرزمینی رتبه تنش آبی صفر است و برای افت آب زیرزمینی به میزان بین ۵ تا ۱۵ میلیون مترمکعب، ۱۵ تا ۲۵ میلیون مترمکعب، ۲۵ تا ۳۵ میلیون مترمکعب، ۳۵ تا ۴۵ میلیون مترمکعب و بیشتر از ۴۵ میلیون مترمکعب به ترتیب رتبه‌های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ برای بیان تنش آبی اختصاص داده شده است.

می‌شود. طبق معادله (۲) می‌توان درصد انحراف از متوسط میانگین دما را به دست آورد.

$$R_t = \frac{T - \bar{T}}{\bar{T}} \times 100 \quad (2)$$

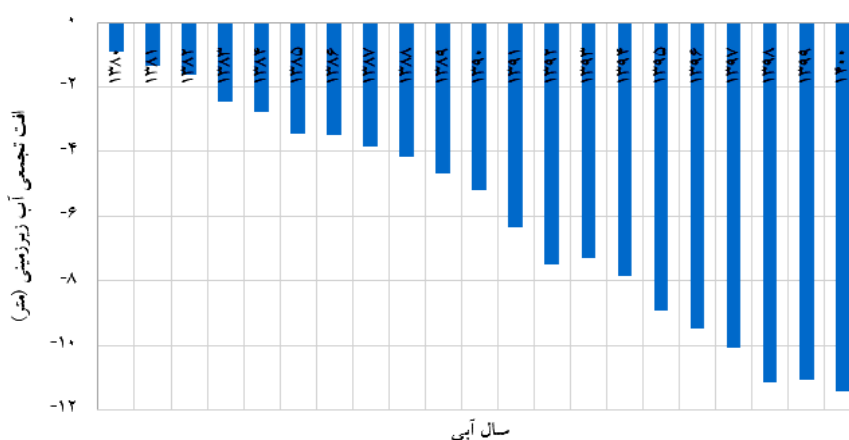
در معادله (۲)، T مقدار متوسط دمای میانگین در یک سال آبی مد نظر برای شهرستان کاشان، $\bar{T}$ میانگین مقادیر متوسط دمای میانگین در سال‌های آبی ۱۳۷۶ تا ۱۴۰۰ در شهرستان کاشان و R_t درصد انحراف دمای میانگین در هر سال آبی از مقدار متوسط بلندمدت دمای میانگین است. در جدول ۵ زیرکلاس‌های لایه دمای میانگین و رتبه هرکدام نمایش داده شده است.

طبق جدول ۵، برای مقادیر دمای میانگین کمتر از دمای میانگین متوسط و دمای میانگین با انحراف کمتر از ۲ درصد از دمای میانگین متوسط رتبه تنش آبی صفر است و برای دمای میانگین با انحراف بین ۲ تا ۴ درصد، ۴ تا ۶ درصد، ۶ تا ۸ درصد، ۸ تا ۱۰ درصد و بیشتر از ۱۰ درصد، بیشتر از دمای میانگین متوسط به ترتیب رتبه‌های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ برای بیان تنش آبی اختصاص داده شده است.

لایه آب زیرزمینی در دسترس، یکی دیگر از لایه‌های دینامیک در طراحی شاخص چندمتغیره تنش آبی است. داده‌های مربوط به افت سالانه سطح آب زیرزمینی در آبخوان کاشان از شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان دریافت شد. بازه داده‌های موجود از

جدول ۵. رتبه‌بندی زیرکلاس‌های لایه دمای میانگین

رتبه	زیرکلاس‌ها (مقادیر R_T)
۰	کمتر از ۲ درصد
۲	بین ۲ تا ۴ درصد
۴	بین ۴ تا ۶ درصد
۶	بین ۶ تا ۸ درصد
۸	بین ۸ تا ۱۰ درصد
۱۰	بیشتر از ۱۰ درصد



شکل ۱۰. روند تغییرات متوسط دمای میانگین در شهرستان کاشان

جدول ۶. رتبه‌بندی زیرکلاس‌های لایه آب زیرزمینی در دسترس

رتبه	زیرکلاس‌ها (مقادیر R_G)
۰	کمتر از ۵ میلیون مترمکعب
۲	بین ۵ و ۱۵ میلیون مترمکعب
۴	بین ۱۵ و ۲۵ میلیون مترمکعب
۶	بین ۲۵ و ۳۵ میلیون مترمکعب
۸	بین ۳۵ و ۴۵ میلیون مترمکعب
۱۰	بیشتر از ۴۵ میلیون مترمکعب

یک است، به عبارت دیگر همه لایه‌های ورودی در شاخص تنش آبی تأثیر یکسان خواهند داشت؛ بنابراین با جمع کردن این اعداد برای کل شهرستان کاشان یک عدد در بازه ۰ تا ۶۰ به وجود می‌آید. هرچقدر عدد به دست آمده در شاخص به ۶۰ نزدیک‌تر

همان‌طور که بیان شد، معرف‌های خشکسالی یا لایه‌های آن اعم از استاتیکی و دینامیکی و حدود آن‌ها به همراه رتبه آن‌ها بیان شد. در کل ۶ معرف یا لایه وجود دارند و هرکدام از این لایه‌ها دارای رتبه از ۰ تا ۱۰ هستند. ضریب همه این لایه‌ها برابر با

شامل بارندگی (R_p)، دمای میانگین (R_t) و افت سالانه سطح آب زیرزمینی (R_g) برای سال‌های مورد مطالعه به‌دست خواهد آمد. در شکل ۱۱ روند تغییرات متغیر R را در شهرستان کاشان ارائه شده است.

در شکل ۱۲ روند تغییرات شاخص چندمتغیره تنش آبی نشان داده شده است. این شاخص عددی بین ۰ تا ۶۰ دارد که هرچه شاخص به عدد ۰ نزدیک شود، تنش آبی کمتر و هرچه مقدار شاخص به ۶۰ میل کند، تنش آبی بیشتر خواهد شد.

طبق شکل ۱۲، بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که در سال‌های آبی ۱۳۸۲، ۱۳۹۳، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ شهرستان کاشان بیشترین میزان تنش آبی را تجربه کرده است. این موضوع ممکن است به عواملی مانند کاهش شدید بارندگی، افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی یا تغییرات اقلیمی مرتبط باشد. از سوی دیگر، در سال‌های آبی ۱۳۸۱، ۱۳۸۳، ۱۳۸۹، ۱۳۹۱، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۴ کمترین میزان تنش آبی ثبت شده است که احتمالاً به دلیل مدیریت بهینه منابع آب، بارش‌های مناسب و یا کاهش مصرف آب در بخش‌های مختلف بوده است. این تغییرات نشان‌دهنده اهمیت بررسی دوره‌ای وضعیت منابع آبی و اتخاذ سیاست‌های پایدار برای مدیریت منابع آب در این منطقه است.

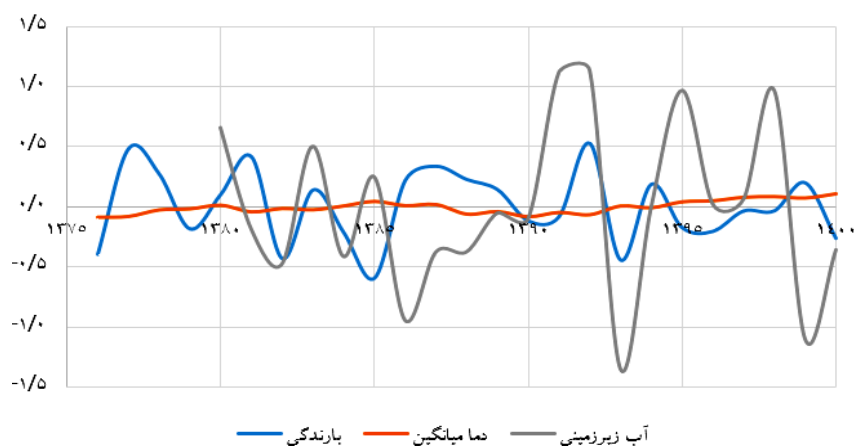
در ادامه به منظور صحت‌سنجی شاخص تنش آبی پیشنهادی و همچنین مقایسه عملکرد شاخص، از شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI) استفاده خواهد شد. به این منظور مقدار نرمال شده برای شاخص تنش آبی و همچنین شاخص بارندگی استاندارد محاسبه شد. شکل ۱۳ روند تغییرات شاخص نرمال شده بارندگی استاندارد و همچنین شاخص نرمال شده تنش آبی در شهرستان کاشان در بازه سال آبی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ ارائه شده است. مقدار هر دو شاخص نرمال شده بین ۰ و ۱ است. هرچقدر شاخص نرمال شده به سمت صفر میل کند، نشان‌دهنده ترسالی بیشتر و هرچقدر شاخص نرمال شده به سمت یک میل کند، نشان‌دهنده خشکسالی بیشتر است.

شود، منطقه به سمت خشکسالی می‌رود و برعکس هرچقدر عدد شاخص به صفر نزدیک شود، منطقه به سمت ترسالی خواهد رفت.

نتایج

این پژوهش با استفاده از تحلیل لایه‌های استاتیک و دینامیک مختلف، رویکردی جامع و چندبعدی برای ارزیابی تنش آبی و خشکسالی در شهرستان کاشان ارائه کرده است. لایه‌های استاتیک شامل کاربری اراضی، جنس خاک و شیب زمین، و لایه‌های دینامیک شامل بارندگی، دمای میانگین و منابع آب زیرزمینی، هرکدام از جنبه‌های متفاوتی به ارزیابی آسیب‌پذیری در برابر خشکسالی کمک کرده‌اند. با تلفیق این لایه‌ها و رتبه‌بندی زیرکلاس‌های آن‌ها بر اساس معیارهای مشخص، تصویری دقیق و علمی از وضعیت تنش آبی در منطقه به‌دست آمد که می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی قرار گیرد. روش پیشنهادی در این پژوهش، برخلاف رویکردهای تک‌بعدی پیشین، تأثیر همزمان عوامل مختلف را در نظر گرفته است. به‌ویژه، استفاده از نرم‌افزار ArcGIS برای تهیه و تحلیل لایه‌های مکانی، امکان شناسایی مناطق با آسیب‌پذیری بیشتر مانند اراضی شهری، باغات و زمین‌های کشاورزی را فراهم کرده است. علاوه بر این، تحلیل داده‌های دمایی و بارشی در بازه زمانی ۱۳۷۶ تا ۱۴۰۰ و بررسی افت منابع آب زیرزمینی به درک بهتر پویایی منابع آب و تغییرات اقلیمی در این شهرستان منجر شد.

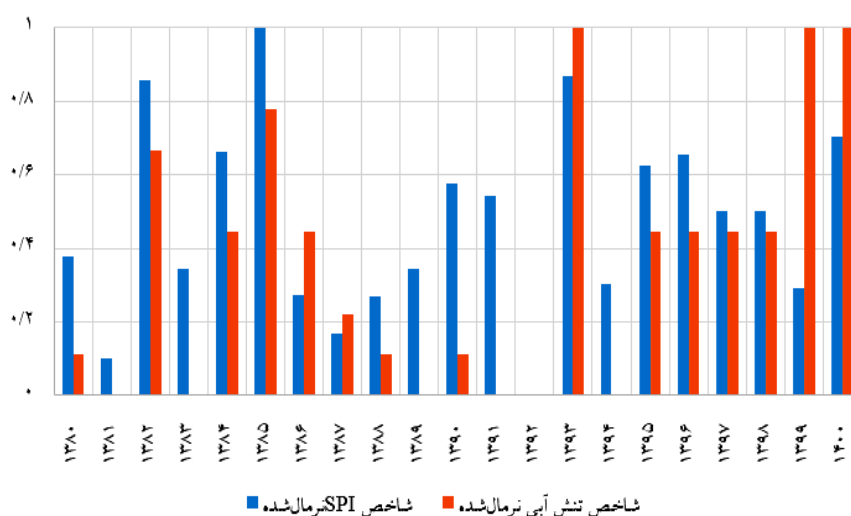
در بخش‌های پیشین این پژوهش، معرف‌های شاخص چندمتغیره تنش آبی یا لایه‌های مختلف آن، چه استاتیک و چه دینامیک، به همراه حدود و رتبه‌هایشان بررسی شد. به‌طورکلی، ۶ معرف یا لایه وجود دارد که هرکدام از این لایه‌ها رتبه‌ای بین ۰ تا ۱۰ دارند. ضرایب این لایه‌ها یکسان و برابر با یک هستند؛ بنابراین، با جمع‌بندی این اعداد برای شهرستان کاشان، عددی در بازه ۰ تا ۶۰ به‌دست می‌آید. سری زمانی مقادیر R با توجه به معادله (۱) برای سه متغیر تنش آبی



شکل ۱۱. روند تغییرات درصد انحراف برای متغیرهای بارندگی، دمای میانگین و افت سطح آب زیرزمینی.



شکل ۱۲. روند تغییرات شاخص چندمتغیره تنش آبی در طول دوره مورد بررسی



شکل ۱۳. روند تغییرات شاخص تنش آبی نرمال شده و شاخص SPI نرمال شده در طول دوره مورد بررسی

بیشتر این شاخص‌ها تنها به یک یا دو نوع خشکسالی توجه دارند. برای نمونه، شاخص SPI صرفاً عامل بارش را در تحلیل خود لحاظ کرده و بیشتر به جنبه‌های هواشناسی مرتبط است. اما نکته‌ای که در اینجا مطرح می‌شود این است که در یک دوره زمانی مشخص، ممکن است یک منطقه یا حوضه آبریز از نظر بارندگی شرایط نرمالی داشته باشد، اما کاهش حجم آب پشت سدها، مخازن ذخیره یا افت سطح آب زیرزمینی و وضعیت واقعی منابع آبی را به درستی منعکس نکند. در چنین شرایطی، شاخص‌هایی که تنها بر یک عامل مانند بارش، تبخیر یا دما تمرکز می‌کنند، نمی‌توانند تصویری دقیق و جامع از وضعیت خشکسالی ارائه دهند؛ بنابراین، توسعه یک شاخص جامع که تأثیرات ترکیبی عوامل مختلف خشکسالی را در نظر بگیرد، ضرورت دارد. چنین شاخصی می‌تواند ابزار تحلیلی دقیق‌تری برای ارزیابی وضعیت خشکسالی و اتخاذ تصمیمات مدیریتی مؤثر ارائه دهد.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تنش آبی و خشکسالی در شهرستان کاشان تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل استاتیک و دینامیک قرار دارد که هرکدام به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر آسیب‌پذیری مناطق مختلف تأثیر می‌گذارند. در میان لایه‌های استاتیک، کاربری اراضی نشان داد که مناطق شهری و کشاورزی بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر تنش آبی دارند؛ درحالی‌که زمین‌های بایر و نمکزارها کمترین آسیب‌پذیری را از خود نشان دادند. لایه جنس خاک نیز نشان داد که خاک‌های سبک به دلیل توانایی کمتر در حفظ رطوبت، بیشترین آسیب‌پذیری را دارند؛ درحالی‌که خاک‌های سنگین و بسترهای سنگی مقاوم‌تر هستند. همچنین تحلیل لایه شیب زمین مشخص کرد که مناطق با شیب بیشتر، به دلیل سرعت زیاد جریان آب، ظرفیت کمتری برای ذخیره آب دارند و مناطق پایین‌دست با شیب کمتر از آسیب‌پذیری کمتری برخوردارند. در لایه‌های دینامیک، بارندگی و دمای میانگین به عنوان عوامل کلیدی تغییرپذیر، نوسانات قابل توجهی را نشان دادند. داده‌ها حاکی از آن بودند که کاهش بارندگی و افزایش دما به‌طور

طبق شکل ۱۳ و روند شاخص‌ها در سال‌های آبی اولیه (۱۳۸۰ تا ۱۳۸۵)، هر دو شاخص دارای نوسانات شدیدی هستند، اما شاخص تنش آبی در مقایسه با SPI مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد. در میانه بازه (۱۳۸۶ تا ۱۳۹۲)، شاخص‌ها نوسانات کمتری دارند و به‌طور کلی مقادیر کمتری را نشان می‌دهند. از سال ۱۳۹۳ به بعد، هر دو شاخص روند افزایشی را نشان می‌دهند و در برخی سال‌ها، به‌ویژه ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰، مقادیر آن‌ها نزدیک به هم شده است. در سال آبی ۱۳۸۴ شاخص SPI بیشترین مقدار را در این بازه ثبت کرده است. سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۳ افزایش شدید در شاخص تنش آبی دیده می‌شود. سال ۱۴۰۰ هر دو شاخص به مقادیر نزدیک به ۱ رسیده‌اند که نشان‌دهنده شرایط بحرانی یا شدید است. تفاوت‌ها و همگرایی‌ها در سال‌های پایانی (۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰) نشان می‌دهد، شاخص‌ها همگرایی بیشتری پیدا کرده و تقریباً مشابه هستند.

این مطالعه نه تنها به شناسایی عوامل مؤثر بر خشکسالی و تنش آبی کمک کرده، بلکه چارچوبی برای مدیریت منابع آب در مناطق مشابه ارائه داده است. رتبه‌بندی مناطق بر اساس آسیب‌پذیری و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی، می‌تواند به کاهش آثار منفی خشکسالی و بهبود پایداری منابع آبی کمک کند. این رویکرد، الگویی قابل تعمیم برای مناطق دیگر است که با مسائل مشابهی در مدیریت منابع آب مواجه هستند.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، هدف ارائه یک شاخص جامع برای ارزیابی و تحلیل تنش آبی بوده است که به‌صورت موردی در شهرستان کاشان به کار گرفته شده است. مبنای این پژوهش بر استفاده از روش وزن‌دهی برای ترکیب مؤلفه‌های مختلف خشکسالی استوار است. شاخص جامع خشکسالی ترکیبی از انواع مختلف خشکسالی از جمله خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیک، کشاورزی و اجتماعی - اقتصادی است.

در حال حاضر، شاخص‌های متعددی برای ارزیابی و تحلیل خشکسالی و میزان حساسیت به آن وجود دارد. با این حال،

کاربردی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در زمینه کاهش آثار خشکسالی و بهینه‌سازی مدیریت منابع آب استفاده شوند.

سیاسگزاری

این پژوهش تحت حمایت مادی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه کاشان برگرفته‌شده از طرح شماره ۲۲۵۵۲۳۹ انجام شده است.

مستقیم منجر به افزایش آسیب‌پذیری خشکسالی شده است. همچنین، تحلیل لایه آب زیرزمینی نشان داد که افت منابع آبی زیرزمینی به‌ویژه در مناطقی با کاهش حجم زیاد، تهدیدی جدی برای پایداری منابع آب منطقه است. درمجموع، نتایج این پژوهش تأیید می‌کند که با تحلیل جامع و یکپارچه لایه‌های مختلف، می‌توان الگوی آسیب‌پذیری خشکسالی را به‌طور دقیق شناسایی کرد و مناطقی را که نیاز به توجه و مدیریت فوری دارند، مشخص کرد. این یافته‌ها می‌توانند به‌عنوان یک ابزار

References

منابع مورد استفاده

1. Abedi Kopaei, J. 2011. Drought zoning in Isfahan Province and solutions to reduce the effect of water scarcity. Drought, Zayandeh-Rood, Solutions and Challenges, General Directorate of Crisis Management of Isfahan Governorate.
2. Amin, S. 2000. Examination of drought profiles, case study: Bajgah Shiraz., Proceedings of the first educational and specialized workshop on drought issues in Fars province, 1-14.
3. Bazarafshan, C. 2000. Effective rainfall, a new perspective on the trend of severity and continuity of droughts. The first national conference on solutions to deal with water shortage and drought, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
4. Byun, T. R. and D. A. Wilhite. 1999. Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate* 12(9): 2747-2756.
5. Chang, T. J. and X. Kleopa. 1991. A proposed method for drought monitoring. *Water Resources Research* 27(2): 275-281.
6. Doesken, N. J., T. B. McKee. 1991. Drought monitoring in the western United States using a surface water supply index. In: 7th Conference on Applied Climatology, Salt Lake City, U.S.A.
7. Hasniha, H. and Z. Salehi. 2000. Investigation of the drought situation based on a number of statistical indicators in Zanjan province. The first national conference on dealing with water shortage and drought, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
8. Hayes, M. J., 2000. What is drought? National Drought Mitigation Center, URL: www.drought.unl.edu/whatis/indices.htm.
9. Hong, W. U., M. J. Hayes, A. Welss. and Q. Hu. 2001. An evaluation of the standardized precipitation index, the China-z index and the statistical z-score. *International Journal of Climatology* 21(6):745-758.
10. Karamouz, M., K. Rasouli and S. Nazif. 2009. Development of a hybrid index for drought prediction. *Journal of Hydrologic Engineering* 14(6): 617-627.
11. Karamouz, M. and S. H. Araghinejad. 2010. Advanced Hydrology. Amir Kabir University of Technology Publications, Tehran, Iran.
12. Karl, T. H. R. and R. W. Knight. 1985. Atlas of monthly Palmer hydrological drought indices (1895-1930) for the contiguous United States. National Climate Data Center, Asheville.
13. Kaviani, M. and B. Alijani. 2003. Fundamentals of Hydrology and Meteorology, Samt Publications, Tehran (in Farsi).
14. Khoshoei, M., H. R. Safavi and A. R. Zamani. 2016. Design of Drought Monitoring System Based on Integrated Index in Zayanderood River Basin -Iran. *Journal of Water and Soil Science* 20 (75): 27-43.
15. Khoshoei, M., H. R. Safavi and A. Sharma. 2019. Relationship of drought and engineered water supply: Multivariate index for quantifying sustained water stress in anthropogenically affected subbasins. *Journal of Hydrologic Engineering* 24 (5): 1-9.
16. Khoshoei, M., H. R. Safavi and A. Sharma. 2023. Water Supply Sustainability Revisited: Assessment Methodology for Multiple Water Resources. *Journal of Water Resources Planning and Management* 149(12): 1-11.
17. Khoshoei, M. and H. R. Safavi. 2023. Developing the Drought Index in Natural and Engineering Sub-basins (Case Study: Zayandehrood Basin). *Iran-Water Resources Research* 19(4): 48-61.

18. Khoshoei, M., H. R. Safavi and A. Kazemi. 2023. Integrated Index for Drought Assessment in Isfahan Province. *Journal of Water and Soil Science* 27(1): 113-136.
19. Moghadam, H., J. Jamali, S. Javanmard, A. Mahdovian. and L. Khazandari. 2001. Drought monitoring based on SPI index, deciles and normal in Sistan and Baluchistan province. The First National Conference on Water Crisis Solutions, Zabul University, Zabul, Iran.
20. Moghaddasi, M., S. Morid, H. Byun, H. Ghaemi and J. M. V. Samani. 2004. Drought monitoring using Deciles Index, Standardized Precipitation Index and Effective Drought Index in Tehran Province, Iran. *Journal of Agricultural Research* 23(1): 95-110.
21. Morid, S., V. Smakhtin and M. Moghaddasi. 2005. Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International Journal of Climatology* 26(7): 971-985.
22. Palmer, W. C. 1965. Meteorological drought., Office of Climatology, U. S. Weather Bureau, Washington D.C.
23. Rezaei Pazhand, H. and M. Mahdipour. 2000. Drought analysis and rainfall forecast for the next four years in the city of Zabul. The First National Conference on Water Crisis Solutions, Zabul University, Zabul, Iran.
24. Safavi, H. R., M. Khoshoei and A. R. Zamani. 2014. Integrated index for assessment of vulnerability to drought, case study: Zayandehrood River Basin, Iran. *Journal of Water Resources Management* 28: 1671-1688.
25. Shafer, B. A. and L. E. Dezman. 1982. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to Assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. *In: Proceeding of the western snow conference*, USDA, Soil Conservation Service, Denver.
26. Shahmohammadi, Z., J. P. Hakit, and P. Afrasiab. 2000. Determining drought and drought based on long-term statistics of annual rainfall in Iran. The First National Conference on Water Crisis Solutions, Zabul University, Zabul, Iran.
27. Steinemann, A. 2003. Drought indicators and triggers: A stochastic approach to evaluation. *Journal of American Water Resource Association* 39(5): 1217-1234.
28. Steinemann, A. and L. Cavalcanti. 2006. Developing multiple indicators and triggers for drought plans. *Journal of Water Resources Planning and Management* 132(3): 71-92.
29. Wilhite, D. A. and M. H. Glantz. 1985. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International* 10(3): 111-120.