تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال نوزدهم، شماره ۴، پاییز ۱۴۰۲
Volume 19, No. 4, Fall 2023 (IR-WRR)
۴۸-۶۱

توسعه شاخص خشکسالی در حوضه‌های طبیعی و مهندسی (مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود)

مهرداد خشوعی[۱*] و حمیدرضا صفوی[۲]

چکیده

امروزه با توجه به تغییر اقلیم شاهد پدیده‌های حدی منابع آب مانند خشکسالی و سیلاب در سراسر نقاط دنیا هستیم. از گذشته تا اکنون به منظور ذخیره آب، تولید انرژی برق، مصارف کشاورزی شرب و صنعت از سدها استفاده شده است، که در کنار مزیت‌های خود البته باعث اثرات مخرب محیط زیستی خواهد شد. احداث سدها موجب تقسیم‌بندی حوضه‌ها به حوضه‌های مهندسی و طبیعی خواهد شد و یکی از رویکردهای این تحقیق تبیین تفاوت‌ها وعملکرد این دونوع از حوضه‌ها از لحاظ شاخص‌های منابع آب و خشکسالی است. هدف از این تحقیق بررسی و ارزیابی شاخص‌های موجود و ارائه یک شاخص یکپارچه دربرگیرنده عوامل تأثیرگذار خشکسالی است که به دلیل موقعیت حساس حوضه آبریز زاینده‌رود در فلات مرکزی ایران، این حوضه به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. عدم تعادل بین منابع و مصارف به خصوص در سال‌های اخیر به عنوان عامل اصلی تشدید کننده خشکسالی محسوب می‌شود. شاخص یکپارچه خشکسالی دربرگیرنده عوامل مختلف مانند عوامل هواشناسی و هیدرولوژیکی است و با استفاده از عوامل و متغیرهای کشاورزی این شاخص صحت‌سنجی می‌شود. نتایج نشان داد در حوضه‌های طبیعی با تقریب خوبی می‌توان با استفاده از تغییرات بارندگی و یا تغییرات تبخیر برآورد جامع از وضعیت خشکسالی بدست آورد، گرچه برآورد خشکسالی با استفاده از شاخص دومتغیره نتایج و عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. در حوضه طبیعی مورد مطالعه مقدار همبستگی شاخص برپایه بارندگی و تبخیر و شاخص صحت سنجی به ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۵۳ درحالیکه همبستگی شاخص دومتغیره و شاخص صحت‌سنجی ۰/۶۶ است. در حوضه‌های مهندسی شاخص دومتغیره عملکرد بهتری نسبت به شاخص‌های صرفا بر پایه بارندگی و یا تبخیر در زیرحوضه‌های دارد و همبستگی بیشتری با شاخص صحت‌سنجی بر پایه شاخص خشکسالی کشاورزی ایجاد می‌کند. در حوضه مهندسی مورد مطالعه تفاوت همبستگی بسیار محسوس است و از مقدار ۰/۲۶ و ۰/۴۱ به ترتیب برای شاخص‌های برپایه بارندگی و تبخیر تا ۰/۹۱ برای شاخص دومتغیره متفاوت است.

کلمات کلیدی: خشکسالی، توسعه شاخص، حوضه‌های طبیعی و مهندسی، آنتروپی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۴/۶

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۲ امکانپذیر است.

Developing the Drought Index in Natural and Engineering Sub-basins (Case Study: Zayandehrood Basin)

M. Khoshoei [1] and H.R. Safavi [2]*

Abstract

Due to the climate change, we nowadays are witnessing extreme water resources events such as droughts and floods in all parts of the world. Historically, dams are used for water storage, electricity production, and agricultural and industrial uses, which, along their advantages, causes environmental damage. Dams divide basins into engineering and natural basins, and so one of the goals of this research is to explain the differences and performance of these two types of basins in terms of water resources and drought indicators. To this end, this research reviewed and evaluated the existing indicators and provide an integrated index including the influencing factors of drought. Due to the strategic location of the Zayanderood basin in the central plateau of Iran, this basin is selected for the case study. The imbalance between resources and consumption, especially in recent years, is considered as the main factor aggravating drought. Integrated drought index includes various factors in terms of meteorological and hydrological factors, and the index is validated using agricultural factors and variables. The results showed that in natural watersheds, a comprehensive estimate of the drought situation can be obtained by using changes in rainfall or evaporation, although drought estimation using the bivariate index shows better results and performance. In the engineering basins, the bivariate index has a better performance than the indices based solely on rainfall or evaporation and creates a greater correlation with the validation index based on the agricultural drought index.

Keywords: Drought, Index, Natural and Engineering Basins, Entropy.

Received: January 18, 2023
Accepted: June 27, 2023

1- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran. Email: m.khoshoei@kashanu.ac.ir
2- Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Email: hasafavi@cc.iut.ac.ir
*- Corresponding Author
Doi: 10.22034/IWRR.2023.173579

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- مقدمه

امروزه اکثر کشورها فشار بی‌سابقه‌ای روی منابع آب خود وارد می‌کنند. جمعیت جهان به سرعت در حال رشد است و تخمین‌ها نشان می‌دهد که با ادامه شیوه‌های مصرف فعلی تا سال ۲۰۳۰، جهان با کاهش ۴۰ درصدی بین تقاضای پیش‌بینی شده و منابع موجود آب مواجه خواهد شد. علاوه بر این، کمبود آب مزمن، عدم قطعیت هیدرولوژیکی و وقایع حدی آب و هوا (سیل و خشکسالی) به عنوان برخی از بزرگترین تهدیدات برای رونق و ثبات جهانی درنظر گرفته می‌شود. نقشی که کمبود آب و خشکسالی در تشدید شکنندگی و درگیری بازی می‌کنند، در حال افزایش است. تغذیه ۹ میلیارد انسان تا سال ۲۰۵۰، نیازمند افزایش ۶۰ درصدی تولیدات کشاورزی (که ۷۰ درصد از منابع امروز را مصرف می‌کند) و ۱۵ درصد افزایش برداشت آب است (Khoshoei et al., 2016). در کنار این تقاضای روزافزون، منابع آب در حال حاضر در بسیاری از نقاط جهان کمیاب است. برآوردها نشان می‌دهد که ۴۰ درصد از جمعیت جهان در مناطق کم آب زندگی می‌کنند و تقریباً ۲۵ درصد تولید ناخالص داخلی جهان در معرض این چالش است. تا سال ۲۰۲۵، حدود ۱/۸ میلیارد نفر در مناطق یا کشورهایی با کمبود آب مطلوب زندگی خواهند کرد (Khoshoei et al., 2016).

تنش آبی یک اصطلاح است برای توصیف زمانی که نیاز آب بیشتر از مقدار آب دردسترس در یک دوره معین زمانی باشد و همچنین زمانی که کیفیت آب کم است و این امر استفاده از آن را محدود می‌کند. تنش آبی به معنی زوال در دو جنبه مقدار آب دردسترس و کیفیت آب دردسترس در اثر عوامل مؤثر بر آب دردسترس است. نمونه‌هایی از تنش آبی که بر کمیت آب دردسترس تأثیر می‌گذارند، شامل استفاده بیش از حد از منابع آب زیرزمینی یا آبخوان‌ها و رودخانه‌های خشک است. نمونه‌هایی از تنش آبی که بر کیفیت آب دردسترس تأثیر می‌گذارند عبارتند از افزایش بیش از حد مواد مغذی در یک منبع آب، که اغلب ناشی از رواناب سطحی است و باعث رشد بیش از حد گیاه، یا آلودگی از مواد معدنی یا آلی می‌شود که به سلامت، نفوذ شوری از آب نمک و غیره آسیب می‌رساند. تنش آبی براساس نسبت بین برداشت آب و منابع آب بصورت سطحی یا زیرزمینی مشخص می‌شود (Khoshoei et al., 2016).

هواشناسان، خشکسالی را بارش کمتر از حد معمول که منجر به تغییر الگوی آب وهوایی می‌گردد، تعریف می‌کنند. بنابراین خشکسالی از نظر هواشناسی اساساً به حالتی از خشکی ناشی از کمبود بارندگی اطلاق می‌شود. از دیدگاه اقلیم شناختی هرگاه بارش یک محل در یک دوره زمانی معین کمتر از میانگین بارش آن محل در همان دوره زمانی باشد با خشکسالی مواجه است زیرا موجودات (گیاهان، جانوران و انسانها) مطابق با میانگین بارش دریافتی آن محل سازگاری یافته‌اند و هرگاه بارش دریافتی از حد میانگین کمتر شود در حیات آنان اختلال ایجاد می‌شود (Abedi-Koupai, 2011). خشکسالی اقلیمی وابسته به میزان بارش در یک منطقه است. به عنوان یک سطح مبنا (سطح برش برای تفکیک سری بارش به دو بخش پدیده‌های خشک و غیرخشک) بطور معمول از میانگین بلندمدت استفاده می‌شود. بدین مفهوم که اگر میزان بارش در یک دوره زمانی معین (بطور مثال ماه یا سال) کمتر از میزان متوسط درازمدت متناظر (یا میانه) باشد، آنگاه یک خشکسالی از نوع اقلیمی رخ داده است (Karamouz and Araghinejad, 2011). از دیدگاه هیدرولوژیست‌ها خشکسالی زمانی اتفاق می‌افتد که سطح تراز ذخایر آب‌های سطحی و زیرزمینی از حد معمول خود کمتر باشد. خشکسالی هیدرولوژیک اغلب در عرض‌های میانی بر اثر کمبود و فقدان بارش زمستانی اتفاق می‌افتد. علاوه بر بارش، عوامل اقلیمی دیگر مانند دمای بالا، بادهای قوی و رطوبت نسبی کم نیز به طور قابل ملاحظه‌ای بر خشکسالی هیدرولوژیک تأثیر دارند. از دیدگاه هیدرولوژیکی، اندازه‌گیری نوسانات میزان آب‌های جاری (رودخانه‌ها) دریاچه‌ها و آب‌های زیرزمینی معیار خشکسالی است و یک زمان تأخیر، بین فقدان بارندگی و کم شدن آب‌های جاری رودخانه‌ها و آب دریاچه‌ها و آب‌های زیرزمینی وجود دارد. بنابراین معیار هیدرولوژیک نمی‌تواند اولین نشانگر خشکسالی باشد، زیرا زمانی که کمبود بارش اتفاق افتد بعد از مدتی این کاهش در آب‌های سطحی و زیرزمینی منعکس خواهد شد (Abedi-Koupai, 2011). از جمله مشخصات پدیده خشکسالی که آنرا از بسیاری از پدیده‌های طبیعی دیگر مجزا می‌سازد، زمان شروع و خاتمه آن است که با دقت زیادی قابل پیش‌بینی نیست. بنابراین تشخیص واقع شدن در یک دوره خشک پیش‌نیازی برای اعمال تمهیدات مدیریتی در مقابله با این پدیده است که نشانگر ضرورت انجام مطالعات خشکسالی در قالب بررسی‌های جامع مدیریت خشکسالی است (Karamouz and Araghinejad, 2011). بر پایه معیارهای خشکسالی مورد نظر، شدت، مدت و فراوانی خشکسالی با یک شاخص بیان می‌شود. یک شاخص پارامترهای مختلف هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیک مانند بارندگی، دما، تبخیر- تعرق، رطوبت خاک، رواناب، حجم ذخایر آب سطحی و زیرزمینی و دیگر شاخصه‌های تأمین آب را در یک قالب یا فرمول جمع‌آوری می‌کند و یک تصویر جامع برای تصمیم‌گیری ارائه می‌دهد. این شاخص‌ها به منظور استفاده بیشتر از داده‌های خام و قابل فهم بودن آنها و همچنین ایجاد قدرت تصمیم‌گیری برای طراحان و برنامه‌ریزان معمولاً تنها به صورت یک عدد بیان می‌شوند. مسئولان و کمیته‌های دولتی یا خصوصی با استفاده از چنین شاخص‌هایی به ارزیابی خشکسالی و واکنش به آن می‌پردازند. سازمان هواشناسی

جهانی (WMO[1]) در سال ۱۹۹۲ شاخص خشکسالی را به صورت شاخص مربوط به بعضی اثرات تجمعی طولانی مدت و غیرطبیعی کاهش رطوبت تعریف کرد. شاخص‌های متعددی وجود دارد که گویای وضعیت خشکسالی می‌باشند، هر چند که هیچکدام به طور ذاتی نسبت به دیگری برتری ندارند، ولی بعضی از آنها در شرایطی بهتر عمل می‌کنند (Abedi-Koupai, 2011). شاخص‌های خشکسالی در نگاه اول به سه گروه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی تقسیم خواهد شد.

شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI[2]) توسط Mckee et al. (1993) به منظور پایش خشکسالی اقلیمی ابداع گردید. توزیع احتمال بارش در یک ایستگاه اندازه‌گیری بارش غالباً از تابع توزیع احتمال گاما پیروی می‌کند. برای محاسبه شاخص SPI ابتدا یک توزیع گاما با پارامترهای محاسبه شده به اطلاعات بارش هر ایستگاه برازش داده و سپس احتمال تجمعی توزیع گاما محاسبه خواهد شد. گام بعدی در محاسبه SPI، انتقال احتمال تجمعی از توزیع گامای بدست آمده به توزیع نرمال استاندارد تجمعی با میانگین صفر و انحراف از میانگین یک است. در واقع SPI، عبارت است از متغیری از تابع توزیع استاندارد نرمال که مقدار احتمال تجمعی آن با مقدار احتمال تجمعی متغیر مورد نظر از تابع توزیع احتمال گاما مساوی باشد.

شاخص‌های خشکسالی کشاورزی علاوه بر پارامترهای اقلیمی و هواشناسی، از پارامترهای مربوط به خاک منطقه و یا پوشش گیاهی منطقه به عنوان ورودی استفاده می‌نمایند. مهمترین و جامع‌ترین شاخص خشکسالی کشاورزی، شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI[3]) است که توسط Palmer (1965) ارائه شد. شاخص پالمر که براساس مطالعات انجام گرفته در کانزاس غربی و آیوای مرکزی آمریکا ارائه شد، به عنوان اولین شاخص جامع خشکسالی شناخته شد. این شاخص براساس مفهوم خشکسالی در نیاز و منابع آب به ازای بارندگی خلاف قاعده با تأکید بر کاهش رطوبت است. ورودی‌های شاخص پالمر شامل بارش، دما و محتوی آب در دسترس خاک است و با استفاده از این ورودی‌ها، ۴ مؤلفه معادله تعادل آب شامل تبخیر تعرق، رواناب، تغذیه خاک و رطوبت را از طریق معادلات بیلان آب، محاسبه می‌کند. همچنین، رطوبت خاک با تقسیم آن به دو لایه در محاسبات مدنظر قرار می‌گیرد.

متداول‌ترین و پرکاربردترین شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی شاخص شدت خشکسالی آب‌های سطحی (SWSI[4]) است که توسط Shafer and Dezman (1982) جهت تکمیل پایش خشکسالی در ایالت کلرادو در آمریکا که ذخیره برف، منبع عمده تأمین آب در منطقه است، پیشنهاد گردید. شاخص شدت خشکسالی آبهای سطحی براساس چهار پارامتر بودجه برفی، جریان رودخانه‌ای، بارش و حجم مخازن سطحی آب محاسبه خواهد شد. براساس الگوریتم ارائه شده، با توجه به فصلی بودن شاخص SWSI، از میان چهار پارامتر فوق، در هر زمان تنها از سه پارامتر در معادلات استفاده می‌گردد. هدف از تدوین شاخص SWSI، بدست آوردن معیاری برای تعیین مقدار آب موجود در مناطق کوهستانی (که منبع تأمین آب آنها بودجه برفی است) و ایجاد امکان مقایسه مناطق مختلف با هم است.

شاخص اختلاف نرمال‌شده پوشش گیاهی یکی از شاخص‌های سنجش از راه دور است که توسط Rouse et al. (1974) معرفی شد و شرایط پوشش گیاهی را بررسی می‌کند. شاخص NDVI[5] از رادیومترهای پیشرفته با دقت بسیار بالا (AVHRR[6]) که منعکس کننده اشعه مادون قرمز و کانال‌های وابسته به آن، برای محاسبه سالم یا ناسالم بودن یا کم‌پشت بودن پوشش گیاهی، استفاده می‌کند. معادله NDVI بصورت زیر است:

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{R}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{R}} \qquad (۱)$$

که در این رابطه NIR انعکاس طیفی نزدیک به مادون قرمز و R انعکاس طیفی نور قرمز مرئی است. تحت شرایط سالم،کلروفیل (ماده‌ای سبز که کربوهیدرات گیاه را تأمین می‌کند) نور را جذب کرده و R کمی را منعکس می‌کند. مقدار کم R، مقدار بالای NDVI را نتیجه می‌دهد. گیاهان ناسالم R بالاتری را منعکس کرده و در نتیجه مقدار کم NDVI را گزارش می‌کنند. شاخص NDVI براساس سنجنده‌های ماهواره‌ای با استفاده از مقادیر عددی NIR و R محاسبه می‌شود. در بعضی از ماهواره‌های جهانی مقدار این شاخص به عنوان یکی از محصولات این ماهواره‌ها ارائه می‌شود. مقدار عددی این شاخص معمولا بین ۱- و ۱ است. شاخص NDVI در مقایسه با دیگر شاخص‌های سنجش از راه دور که شرایط گیاه را بررسی می‌کنند، کاربرد وسیعی دارد.

شاخص‌های خشکسالی یکپارچه توانایی مدلسازی وضعیت منطقه یا حوضه آبریز مورد بررسی را از لحاظ خشکسالی با توجه به انواع خشکسالی‌های هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و همچنین اجتماعی اقتصادی، دارا هستند. با استفاده از شاخص‌های یکپارچه خشکسالی می‌توان مدیریت خشکسالی، پیش‌بینی خشکسالی، پایش خشکسالی و همچنین بررسی پایداری حوضه‌آبریز یا منطقه مورد بررسی را انجام داد. با توجه به اهداف مورد نظر در این تحقیق، پیشینه تاریخی شاخص‌های یکپارچه خشکسالی در این قسمت مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. Smith and Maidment (2008) سیستم

اطلاعات یکپارچه خشکسالی در آمریکا را معرفی کردند، که این سیستم با یکپارچه‌سازی اطلاعات مربوط به خشکسالی‌های مختلف قادر به ایجاد یک تصویر کامل از خشکسالی است. سیستم اطلاعات یکپارچه توانایی ترکیب کردن داده‌ها از منابع متعدد را دارد و به علت پیچیدگی منابع خشکسالی، داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی برای پایش جامع خشکسالی، ترکیب شوند. Karamouz et al. (2009) سه شاخص SPI، PDSI و SWSI را به ترتیب به عنوان شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی، از طریق آنالیز خسارات خشکسالی به‌عنوان یک رویکرد جدید برای کمی کردن میزان اثرات خشکسالی، در حوضه آبریز زاینده‌رود ترکیب نمودند. برای کمی کردن اثرات خشکسالی خسارات خشکسالی انتخاب شده است، چون در واقع نتیجه تمامی جنبه‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی، خشکسالی است. Pandey et al. (2010) شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی (DVI[7]) که شامل هفت پارامتر بود را ارائه نمودند. این پارامترها شامل شیب حوضه، کاربری اراضی، نوع خاک، آب زیرزمینی دردسترس، آب سطحی دردسترس، نیاز/ مصرف آب و انحراف بارش هستند. در ادامه نقشه‌های مکانی و زمانی از حوضه مورد مطالعه را ارائه نمودند. برای تولید یک نقشه آسیب‌پذیری یکپارچه خشکسالی، لایه‌های مختلف که نشان دهنده نقشه‌های مختلف از عوامل متفاوت است با استفاده از نرم‌افزار GIS تهیه می‌شوند. Pandey et al. (2012) یک روش ژئوانفورماتیک مکانی برای ارزیابی خطرات خشکسالی کشاورزی، هواشناسی و هیدرولوژیکی در منطقه پالامو ارائه کردند. در این مطالعه فرض شده است که عوامل کلیدی آب و هوایی، بیوفیزیکی و اجتماعی که خطر خشکسالی کشاورزی را مشخص می‌کنند، عبارتند از خاک، ژئومورفولوژی، تراکم زهکشی، کاربری اراضی و توپوگرافی، درحالیکه برای خطر خشکسالی هواشناسی این عوامل شامل بارش و ضریب تغییرات بارش و برای خشکسالی هیدرولوژیکی این عوامل شامل سنگ‌شناسی، عمق آب زیرزمینی، بازده آبخوان و منابع آب سطحی است. Liu et al. (2012) وقایع خشکسالی تاریخی را بازسازی و ریسک خشکسالی آینده را در حوضه مستعد خشکسالی اوکلاهما تحت تغییر اقلیم با استفاده از سه شاخص بارش استاندارد (SPI)، شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI) و شاخص رواناب استاندارد (SRI[8]) ارزیابی کردند. Hao and Aghakouchak (2013) رویکرد شاخص خشکسالی چند متغیره با استفاده از مفهوم کوپلا را ارائه کردند. مدل ارائه شده، به نام شاخص خشکسالی استاندارد چند متغیره (MSDI[9])، به‌صورت احتمالاتی شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص رطوبت خاک استاندارد (SSI[10]) را برای توصیف خشکسالی ترکیب می‌نماید. Rahsekhar et al. (2014) به منظور ارائه یک تصویر جامع از خشکسالی با استفاده از متغیرهایی که منجر به فرم‌های فیزیکی مختلف خشکسالی، مانند خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی می‌شود، شاخص خشکسالی چندمتغیره (MDI [11]) را ارائه نمودند. در این شاخص از داده‌های متغیرهای هیدرواقلیمی از جمله بارش، رواناب، تبخیر و تعرق و رطوبت خاک به عنوان متغیرهای شاخص، به منظور محاسبه همه اشکال فیزیکی خشکسالی استفاده کردند. Safavi et al. (2014) یک شاخص یکپارچه در برگیرنده عوامل اصلی خشکسالی را ارائه نمودند، که به دلیل موقعیت حساس حوضه آبریز زاینده‌رود در فلات مرکزی ایران، این حوضه به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شد. شاخص یکپارچه دربرگیرنده عوامل مختلف خشکسالی مانند هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی، اجتماعی– اقتصادی و زیست–محیطی است. Huang et al. (2015) شاخص یکپارچه خشکسالی (IDI[12]) که ترکیبی از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی است را در حوضه رودخانه Yellow معرفی کردند. در این شاخص به دلیل ماهیت عدم قطعیت در محاسبه شدت خشکسالی از سیستم فازی استفاده شد. Waseem et al. (2015) شاخص خشکسالی مرکب (CDI[13]) را توسعه دادند که همه متغیرهای مربوط به انواع خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی را نظر می‌گیرد. شاخص CDI براساس اندازه‌گیری شباهت وزن (آنتروپی فاصله اقلیدسی وزن) و ناهنجاری مرطوب‌ترین و خشک‌ترین شرایط ممکن از منطقه مورد مطالعه انتخاب شده (زیرحوضه رودخانه Han، کره جنوبی) است. Safavi et al. (2018) چارچوب جدید پایش ترکیبی خشکسالی براساس معرف‌های استاندارد شده غیر پارامتری را ارائه نمودند. شاخص خشکسالی ترکیبی (HDI [14]) به عنوان یک شاخص ترکیبی غیر پارامتری برای پایش مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژیکی ارائه شد. مزایای شاخص HDI شامل موارد زیر است: ۱) این شاخص، خشکسالی را براساس ناهنجاری‌های پارامترهای اقلیمی و آب دردسترس توصیف می‌نماید؛ ۲) این شاخص شروع خشکسالی را به عنوان کاهش پارامترهای اقلیمی و نیز شرایط خشکسالی پایدار را تا زمان کسری منابع آب نشان می‌دهد؛ ۳) شاخص خشکسالی ترکیبی وضعیت شدید خشکسالی را تا زمان کاهش تعادل پارامترهای اقلیمی و همچنین آب دردسترس، نشان می‌دهد. شاخص HDI بر اساس مقررات بودجه آب و هوای بالقوه هواشناسی و آب دردسترس به‌صورت سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز زاینده‌رود تعریف شد.

در تحقیقات گذشته شاخص‌های تک معرف یا تک پارامتر و همچنین شاخص‌های ترکیبی یا جامع بسیاری ارائه شده است. در این تحقیق به عنوان یک رویکرد جدید از شاخص‌های تعریف شده برای صحت‌سنجی شاخص دومتغیره استفاده خواهد شد. همچنین، روش وزن‌دهی آنتروپی اصلاحی معرفی خواهد شد. یکی از مفاهیم جدید در

تبیین خشکسالی، نحوه رفتار شاخص‌ها در حوضه‌های طبیعی و مهندسی است، که مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این تحقیق شاخص دو متغیره خشکسالی براساس پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی ارائه می‌شود. یکی از متغیرها مقدار بارندگی است که از معرف‌های اصلی هواشناسی است. همانطور که ذکر گردید معرف بارندگی اصلی ترین معرف برای تشخیص خشکسالی هواشناسی است. شاخص‌های شناخته شده و پرکاربرد مانند SPI از این معرف استفاده می‌کنند. یکی دیگر از معرف‌های استفاده شده در این تحقیق به منظور برآورد شدت خشکسالی میزان آب سطحی دردسترس است که البته مفهوم آن در حوضه‌های مهندسی و طبیعی متفاوت است. همچنین، صحت‌سنجی شاخص از موضوعات مهم در برآورد خشکسالی است که شاخص خشکسالی کشاورزی به منظور صحت‌سنجی شاخص چند متغیره خشکسالی استفاده می‌شود.

۲- روش انجام کار

۲-۱- روش وزن‌دهی آنتروپی

در تئوری اطلاعات، آنتروپی معیاری از مقدار متوسط اطلاعات مورد نیاز برای بیان توزیع متغیر تصادفی است. همچنین، آنتروپی وسیله‌ای برای اندازه‌گیری درجه عدم قطعیت در فرآیندهای اتفاقی است. مهمترین مزیت آنتروپی این است که قابلیت سیستم برای تولید اطلاعات یا داده‌ها را با اندازه‌گیری میزان عدم قطعیت بیان می‌کند. بسیاری از سیستم‌ها یا کاملاً اتفاقی هستند یا قسمتی از آنها اتفاقی و قسمتی قطعی است و یا اینکه تماما دارای قطعیت هستند. در نتیجه توصیف رفتار اتفاقی سیستم‌ها ضروری بوده و تئوری آنتروپی توانایی توصیف چنین سیستم‌هایی را داراست. تصمیم‌های مهندسی اغلب بر مبنای تجربه، قضاوت‌های حرفه‌ای، قواعد عملی و اجرایی، آنالیزهای ناپخته، ضرایب اطمینان یا بر پایه روش‌های احتمالاتی هستند. معمولاً در تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت، تمایل به تصمیم‌های محافظه‌کارانه وجود دارد. تقریباً در تمامی موارد، اطلاعات کافی جهت توصیف رفتار اتفاقی چنین سیستم‌هایی در دسترس نیست. اگرچه با استفاده از روش‌های احتمالاتی می‌توان عدم قطعیت را به‌صورت کمی و دقیق برآورد نمود، مشکل اصلی روش‌های احتمالاتی ناشی از اطلاعات محدود و ناقص است. به عبارت دیگر برآورد عدم قطعیت با استفاده از روش‌های احتمالاتی نیازمند پایگاه داده قوی است. آنتروپی در اصل به معنای بی‌نظمی است. یعنی هر چقدر میزان بی‌نظمی یک سیستم بیشتر باشد آنتروپی آن سیستم بیشتر است. به طور کلی فرآیندهای طبیعی به سمت شرایط با بی‌نظمی بیشتر و آنتروپی بالاتر پیش می‌روند. در ادامه روند محاسبه وزن‌های آنتروپی که شامل نرمال‌سازی ماتریس ارزیابی اصلی، تعیین آنتروپی و تعیین وزن آنتروپی است، بیان می‌شود (Karamouz et al., 2012).

۲-۲- نرمال‌سازی ماتریس ارزیابی

آنتروپی داده‌ها، اندازه‌گیری میزان بی‌نظمی یک سیستم خاص است و می‌تواند برای تعیین اطلاعات در میان داده‌های موجود مورد استفاده قرار گیرد (Meng, 1989). زمانی که تغییرات در مقادیر موضوع ارزیابی آشکار باشد آنگاه مقدار بی‌نظمی یا آنتروپی کم است و نشان می‌دهد که این داده‌ها از اطلاعات مفید متعدد فراهم شده و موضوع ارزیابی وزن بالایی را کسب خواهد کرد. بالعکس هنگامی که تغییرات از موضوع ارزیابی کم باشد، موضوع ارزیابی وزن کمی کسب می‌کند (Qiu, 2002). بنابراین، روش وزن‌دهی آنتروپی یک رویکرد عینی برای تعیین وزن است و روش وزن‌دهی آنتروپی در داده کاوی (Jing et al., 2007)، غیر فازی‌سازی پارامترها (Liu, 2007)، ارزیابی کیفیت آب (Zou et al., 2006) استفاده شده است.

فرض کنید تعداد m شاخص ارزیابی (معرف) و n موضوع ارزیابی وجود دارد. بنابراین فرم ماتریس مقدار شاخص اصلی بصورت زیر است:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \qquad (۲)$$

با نرمال‌سازی این ماتریس، ماتریس R بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$R = (r_{ij})_{m\times n} \qquad (۳)$$

در این رابطه r_{ij} داده j امین موضوع ارزیابی در i امین شاخص است و $r_{ij} \in [0,1]$ است. در میان شاخص‌ها اگر مقدار بزرگتر بهتر باشد r_{ij} به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\limits_{j} x_{ij}}{\max\limits_{j} x_{ij} - \min\limits_{j} x_{ij}} \qquad (۴)$$

و هنگامی که مقدار کوچکتر بهتر باشد r_{ij} به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$r_{ij} = \frac{\max\limits_{j} x_{ij} - x_{ij}}{\max\limits_{j} x_{ij} - \min\limits_{j} x_{ij}} \qquad (۵)$$

۲-۳- تعیین آنتروپی

با داشتن m شاخص ارزیابی و n موضوع ارزیابی در یک مسئله آنتروپی m امین شاخص ارزیابی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$H_i = -k\sum_{j=1}^{n} f_{ij}\ln(f_{ij}) \qquad i = 1,2,\dots,m \qquad (۶)$$

که در آن f_{ij} فراوانی j امین موضوع ارزیابی در i امین شاخص ارزیابی است و $f_{ij} = r_{ij}/\sum_{j=1}^{n} r_{ij}$ و $k = 1/\ln n$. همچنین فرض می‌شود که وقتی $f_{ij} = 0$ باشد آنگاه $\ln(f_{ij}) = 0$.

۲-۴- تعیین وزن آنتروپی

وزن i امین شاخص بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$w_i = \frac{1 - H_i}{(m - \sum_{i=1}^{m} H_i)} \qquad (۷)$$

که در آن $0 \le w_i \le 1$ و $\sum_{i=1}^{m} w_i = 1$.

با استفاده از رابطه (۷) می‌توان وزن ورودی‌ها و یا معرف‌های شاخص خشکسالی را بدست آورد. بطور مثال اگر شاخص یکپارچه خشکسالی دارای m متغیر ورودی یا معرف باشد، m وزن مختلف بدست خواهد آمد که هر کدام از این وزن‌ها عددی بین صفر و یک است و همچنین مجموع وزن‌ها برابر با یک است.

۲-۵- برآورد وزن اصلاحی آنتروپی

وزن هریک از ورودی‌های شاخص یکپارچه خشکسالی براساس روابط آنتروپی محاسبه خواهد شد. ذکر این نکته ضروری است که هرکدام از ورودی‌ها یا معرف‌های شاخص یکپارچه خشکسالی دارای واحدهای محاسباتی مختلفی هستند. بطور مثال بارندگی براساس میلی متر و حجم آب سطحی دردسترس و همچنین حجم آب زیرزمینی دردسترس براساس میلیون متر مکعب بیان خواهد شد. در ابتدا کلیه معرف‌ها یا ورودی‌های شاخص براساس واحد اندازه‌گیری یکسان بطور مثال برحسب متر بیان می‌شود. در ادامه ضریب اصلاحی وزن آنتروپی بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\overline{w_i} = \frac{Ave(X_i)}{\sum_{i=1}^{m} Ave\,(X_i)} \qquad i = 1,2,\dots,m \qquad (۸)$$

که در آن $Ave(X_i)$ میانگین هر یک از ورودی‌ها یا معرف‌ها در دوره زمانی مورد نظر است. در ادامه با ضرب نمودن دو وزن محاسبه شده (w_i و $\overline{w_i}$) داریم:

$$k_i = w_i \times \overline{w_i} \qquad i = 1,2,\dots,m \qquad (۹)$$

وزن نهایی هریک از ورودی‌ها و یا معرف‌ها براساس رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$w_i^* = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^{m} k_i} \qquad (۱۰)$$

که در آن $0 \le w_i^* \le 1$ و $\sum_{i=1}^{m} w_i^* = 1$.

۲-۶- شاخص یکپارچه خشکسالی

روند برآورد وزن‌های آنتروپی شاخص یکپارچه خشکسالی در قسمت گذشته ارائه شد. در ادامه لازم به ذکر است که با ضرب نمودن هریک از وزن‌های آنتروپی در ماتریس داده‌های ورودی، مقدار شاخص یکپارچه خشکسالی محاسبه خواهد شد. ورودی‌های شاخص یکپارچه خشکسالی شامل همه متغیرهای موثر در برآورد شاخص خشکسالی مانند متغیرهای هواشناسی (بارندگی، دما، تبخیر و غیره) یا متغیرهای هیدرولوژیکی (حجم آب سطحی، دبی رودخانه‌ها، سطح پیزومتریک یا حجم آب زیرزمینی) و یا حتی متغیرهای اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی باشد. وزن آنتروپی مربوط به هرکدام از ورودی‌ها یا معرف‌ها بین صفر و یک است. با توجه به بازه داده‌های ورودی می‌توان سری زمانی شاخص یکپارچه خشکسالی را بدست آورد. مقدار شاخص یکپارچه خشکسالی از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$WSI_j = \sum_{i=1}^{m} r_{ij} \times w_i^* \qquad j = 1,2,\dots,n \qquad (۱۱)$$

در این رابطه اندیس j معرف گام‌های زمانی شاخص یکپارچه خشکسالی است، n تعداد کل گام‌های زمانی و WSI_j مقدار شاخص خشکسالی در زمان j ام است. با ترسیم نمودن WSI_j ها براساس زمان می‌توان سری زمانی شاخص یکپارچه را بدست آورد.

۲-۷- صحت‌سنجی شاخص یکپارچه خشکسالی

در این شاخص از معرف‌های مختلف استفاده می‌شود که هرکدام مربوط به یکی از انواع خشکسالی است و با توجه به موقعیت منطقه و داده‌های دردسترس انتخاب خواهد شد. براساس رابطه (۱۱) می‌توان مقدار شاخص چند متغیره خشکسالی را محاسبه نمود. به منظور صحت‌سنجی این شاخص چندگانه توسعه داده شده می‌توان از شاخص‌هایی که قبلاً توسعه داده شده‌اند، استفاده نمود. در این تحقیق دو معرف درنظر گرفته شده است. این معرف‌ها شامل بارندگی و حجم آب سطحی دردسترس است. با توجه به اینکه خشکسالی هواشناسی که به عنوان شروعی برای دیگر خشکسالی‌های ذکر شده است، مهمترین عامل برای این خشکسالی بارندگی است و در برآورد شاخص‌های خشکسالی مهم در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین این معرف به عنوان اولین معرف در نظر گرفته خواهد شد. خشکسالی هیدرولوژیکی همانطور که ذکر گردید ناشی از کمبود منابع آب اعم از سطحی و زیرزمینی است. به این منظور از معرف حجم آب سطحی دردسترس استفاده خواهد شد. به منظور صحت‌سنجی شاخص چند متغیره خشکسالی از شاخص NDVI استفاده می‌شود. این شاخص یک شاخص سنجش از راه دور برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی است. به عبارت دیگر در این تحقیق از معرف‌های هواشناسی

و هیدرولوژیکی با استفاده از روش وزن‌دهی مقدار شاخص برای بازه مورد نظر محاسبه خواهد شد و سپس با استفاده از شاخص ارزیابی کشاورزی، شاخص چند متغیره، صحت‌سنجی خواهد شد.

داده‌ها و اطلاعات مربوط به دو معرف ذکر شده و شاخص صحت‌سنجی که نماینده سه نوع خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی هستند، بصورت مکانی و زمانی در منطقه یا حوضه مورد نظر موجود هستند. این داده‌ها به‌صورت نقشه‌های پهنه‌بندی در مقیاس روزانه، ماهانه، فصلی یا سالانه هستند. نقشه‌های پهنه‌بندی هر یک از پارامترهادر بازه زمانی مورد نظر براساس مقدار نرمال شده با توجه به میانگین دراز مدت داده‌ها محاسبه خواهد شد. با توجه به وزن هر یک از معرف‌ها که از روش وزن‌دهی آنتروپی بدست می‌آید، می‌توان نقشه‌های پهنه‌بندی را ترکیب نمود و نقشه پهنه‌بندی خشکسالی را بدست آورد. در واقع نقشه پهنه بندی حاصل شده از ترکیب همه معرف‌ها در بازه زمانی خاص، همان شاخص یکپارچه خشکسالی یا شاخص چند متغیره خشکسالی است.

۳- مطالعه موردی

بطور کلی حوضه‌های موجود را می‌توان به دودسته طبیعی و مصنوعی تقسیم بندی نمود. حوضه‌های طبیعی یا غیر مهندسی شامل حوضه-هایی می‌شوند که انسان نقشی در تخصیص آن حوضه‌ها چه به صورت سطحی و یا زیرزمینی نداشته باشد. به عبارت دیگر حوضه‌های بالادست سدها را می‌توان در این طبقه‌بندی قرار داد. در این حوضه‌ها روند طبیعی تبدیل بارش به رواناب بدون دخالت انسان و یا مدیران آب طی می‌شود. حوضه‌های مصنوعی یا مهندسی شامل حوضه‌هایی می‌شوند که بهره‌برداری از منابع سطحی و زیرزمینی آنها در کنترل ذینفعان است. منابع آب سطحی در این حوضه‌ها توسط انواع سدها و یا بندها کنترل می‌شود و همچنین با استفاده از چاه‌های برداشت، کنترل حجم آبهای زیرزمینی در اختیار مدیران بخش آب است. در این تحقیق دو زیرحوضه در حوضه آبریز زاینده‌رود به عنوان حوضه‌های طبیعی و مصنوعی برای بیان شاخص و بحث در مورد شاخص دومتغیره خشکسالی استفاده شده است. زیرحوضه‌های بوئین میاندشت به عنوان زیرحوضه طبیعی با مساحت تقریبی ۹۸۲ کیلومتر مربع و زیرحوضه نجف آباد به عنوان زیرحوضه مصنوعی و یا مهندسی با مساحت تقریبی ۱۷۵۴ کیلومتر مربع انتخاب شده است.

بازه داده‌های بارندگی و حجم ذخیره آب سطحی در این تحقیق از سال آبی ۱۳۶۴ تا سال آبی ۱۳۹۹ است. مقدار بارندگی ماهانه در این دو زیرحوضه براساس ایستگاههای اندازه‌گیری بارش اداره کل هواشناسی و شرکت آب منطقه‌ای اصفهان بدست آمد. با درون‌یابی داده‌های نقطه‌ای بارندگی در نرم‌افزار GIS مقدار متوسط ماهانه بارندگی در دو زیرحوضه بوئین میاندشت و نجف آباد بدست خواهد آمد. برای محاسبه حجم آب سطحی دردسترس از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری شرکت آب منطقه‌ای اصفهان در این دو زیرحوضه استفاده گردید. ایستگاه هیدرومتری اسکندری با توجه به داده‌های دراز مدت دبی رودخانه زاینده‌رود در بالادست سد زاینده‌رود برای برآورد حجم آب سطحی دردسترس زیرحوضه بوئین میاندشت انتخاب شد. ایستگاه هیدرومتری لنج در قسمت ورودی رودخانه زاینده‌رود به زیرحوضه نجف آباد برای برآورد حجم آب سطحی دردسترس زیرحوضه نجف آباد انتخاب شد. موقعیت دو زیر حوضه بوئین میاندشت و نجف آباد به عنوان زیرحوضه‌های طبیعی و مهندسی، مسیر رودخانه در بالادست و پائین‌دست سد زاینده‌رود و همچنین موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری اسکندری در زیرحوضه بوئین میاندشت و لنج در زیرحوضه نجف آباد در شکل ۱ نمایش داده شده است. همچنین، در جدول ۱ مشخصات آماری بارندگی در ایستگاه بیان شده است.

۴- نتایج

داده‌های ورودی شاخص دومتغیره خشکسالی شامل بارندگی و حجم آب سطحی دردسترس است که بااستفاده از ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش و ایستگاه‌های هیدرومتری و همچنین درنظر گرفتن مقادیر برداشت آب در سطح حوضه‌ها قابل استخراج است. این داده‌ها بصورت ماهانه توسط ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری گزارش می‌شوند. اولین گام برای محاسبه شاخص دومتغیره خشکسالی، برآورد سری زمانی ۱۲ ماهه پیوسته بارندگی و حجم آب سطحی دردسترس است. بازه زمانی مورد بررسی در این تحقیق از سال آبی ۱۳۶۴ تا سال آبی ۱۳۹۹ است. برای محاسبه سری زمانی ۱۲ ماهه بارندگی و حجم آب سطحی دردسترس ابتدا حجم آب سطحی دردسترس ماهانه با استفاده از داده‌های بارانسنجی و دبی روزانه ایستگاه‌های هیدرومتری بدست خواهد آمد. سری زمانی ۱۲ ماهه پیوسته برابر با مجموع سالانه مقدار حجم آب سطحی دردسترس است. به عنوان مثال اولین سری زمانی ۱۲ ماهه بارندگی یا حجم آب سطحی دردسترس عبارت است از مجموع مقادیر ماهانه بارندگی یا حجم آب سطحی دردسترس از ابتدای مهرماه ۱۳۶۳ تا انتهای شهریورماه ۱۳۶۴ به مدت ۱۲ ماه و همچنین دومین سری زمانی ۱۲ ماهه بارندگی یا حجم آب سطحی دردسترس، مجموع مقادیر ماهانه بارندگی یا حجم آب سطحی دردسترس از ابتدای آبان‌ماه ۱۳۶۳ تا انتهای مهرماه ۱۳۶۴ به مدت ۱۲ ماه است.

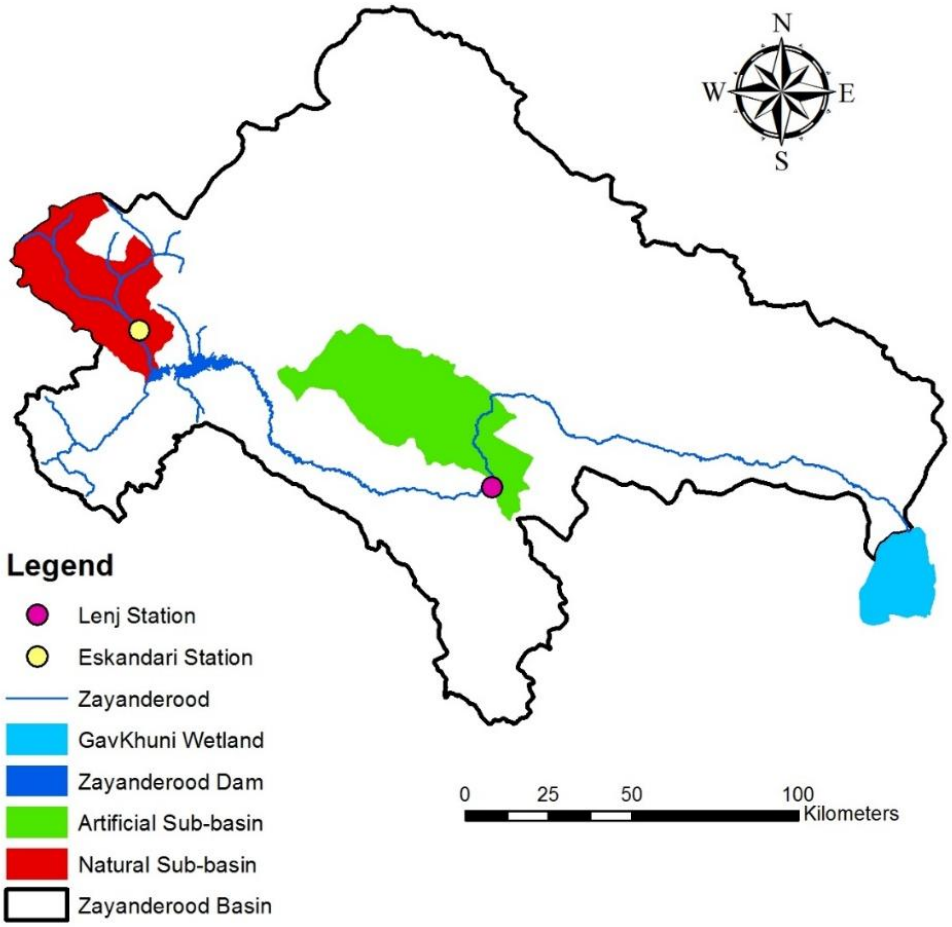

Fig. 1- The location of the Eskandari Station, Lenj Station, natural and artificial sub-basins in the Zayandehrood catchment area, Zayandehrood river, Zayanderood Dam, and GavKhuni Wetland

شکل ۱- موقعیت ایستگاه هیدرومتری اسکندری و لنج، زیرحوضه‌های طبیعی و مصنوعی در حوضه زاینده‌رود، سد زاینده‌رود و تالاب گاوخونی

Table 1- Statistical characteristics of Natural and Artificial sub-basins

جدول ۱- پارامترهای آماری در زیرحوضه‌های طبیعی و مصنوعی

Sub-Basin	Mean Precipitation (MM)	Maximum Precipitation (MM)	Minimum Precipitation (MM)	Standard Deviation (MM)	Coefficient of Variation (MM)
Natural (Upstream)	462.6	758.8	296.3	104.3	22.9
Artificial (Downstream)	138.2	228.1	42.9	47.1	31.4

چنانچه برای ۳۱ سال آبی از سال آبی ۱۳۶۳ تا سال آبی ۱۳۹۹ همین روند را ادامه یابد آنگاه ۳۶۰ داده بارندگی سالانه و ۳۶۰ داده حجم آب سطحی دردسترس موجود خواهد بود که باعث تولید سری زمانی ۱۲ ماهه یا سالانه بارندگی و حجم آب سطحی دردسترس با ۳۶۰ گام زمانی خواهد شد. درواقع به دلیل کم بودن تعداد سالهایی که در حوضه آبریز زاینده‌رود داده‌های بارندگی و حجم آب سطحی دردسترس توسط ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری جمع‌آوری می‌شود، از روش سری زمانی ۱۲ ماهه پیوسته در این تحقیق استفاده شد. گام بعد برای بدست آوردن شاخص دومتغیره خشکسالی، محاسبه ضرایب وزنی مربوط به ورودی‌ها یا معرف‌های شاخص است. با استفاده از روابط ارائه شده ضرایب وزنی مربوط به شاخص دومتغیره خشکسالی شامل وزن آنتروپی (رابطه ۷)، وزن مقیاسی (رابطه ۸) و وزن اصلاح شده

آنتروپی (رابطه ۱۰) است. همانطور که ذکر گردید، به منظور نمایش هرچه بهتر شاخص دومتغیره خشکسالی از دو زیرحوضه بوئین میاندشت و نجف آباد به ترتیب به عنوان حوضه‌های طبیعی و مصنوعی در حوضه آبریز زاینده‌رود برای محاسبه این شاخص استفاده گردید. جدول ۲ مقدار عددی وزن آنتروپی (w_i)، وزن مقیاسی ($\overline{w_i}$) و وزن اصلاح شده آنتروپی (w_i^*) در زیرحوضه‌های بوئین میاندشت و نجف آباد را ارائه می‌دهد. متغیرها یا معرف‌های شاخص دومتغیره خشکسالی شامل بارندگی و حجم آب سطحی دردسترس است.

گام بعد در محاسبه شاخص دومتغیره خشکسالی برآورد مقدار شاخص یکپارچه براساس رابطه (۱۱) در گام‌های زمانی مورد نظر است. همانگونه که ذکر شد ۳۶۰ گام زمانی برای داده‌های بارندگی و حجم آب سطحی دردسترس وجود دارد. بنابراین براساس رابطه (۱۱) تعداد ۳۶۰ گام زمانی برای WSI محاسبه خواهد شد. ماتریس X دارای ۲ ستون و ۳۶۰ سطر است و در نتیجه ماتریس R نیز دارای ۲ ستون و ۳۶۰ سطر است. درایه‌های ماتریس R با نرمال‌سازی درایه‌های ماتریس X بدست می‌آید. با اعمال رابطه (۱۱) و استفاده از ضرایب وزنی اصلاحی آنتروپی که در بالا ذکر گردید، ماتریس WSI با یک ستون و ۳۶۰ سطر بدست می‌آید. تعداد سطرها در این ماتریس نمایانگر تعداد WSIهای محاسبه شده یا همان مقدار شاخص دومتغیره خشکسالی است. مقدار هرکدام از درایه‌های ماتریس R عددی بین صفر و یک است. بنابراین با اعمال وزن اصلاح شده آنتروپی مقدار شاخص دومتغیره خشکسالی (WSI) نیز عددی بین صفر و یک است. در این تحقیق برای محاسبه ماتریس R از رابطه (۳) استفاده شد، بنابراین هرچه عدد اختصاص داده شده به هریک از درایه‌های ماتریس R بیشتر باشد نشان‌دهنده مقدار بارندگی بیشتر و همچنین مقدار حجم آب سطحی دردسترس بیشتر در حوضه مورد مطالعه است. از اینرو مقدار بیشتر شاخص دومتغیره خشکسالی نشان‌دهنده وضعیت بهتر از لحاظ خشکسالی است. به عبارت دیگر هرچه به عدد صفر نزدیک شویم به سمت خشکسالی بیشتر پیش می‌رویم و هرچه به عدد یک نزدیک شویم ترسالی بیشتری در حوضه مورد بررسی حادث می‌شود. شکل ۲ و ۳ سری زمانی ۱۲ ماه پیوسته شاخص دو متغیره و شاخص بارندگی را برای دو زیرحوضه بوئین میاندشت و نجف آباد به عنوان حوضه‌های طبیعی و مهندسی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر کمتر معرف خشکسالی و مقادیر بیشتر معرف ترسالی در حوضه مورد بررسی است.

Table 2- Value of the weights for upstream and downstream sub-basins

جدول ۲- مقدار عددی وزن آنتروپی، وزن مقیاسی و وزن اصلاح شده آنتروپی در زیرحوضه‌های بالادست و پایین دست

Weight	Upstream Sub-Basin		Downstream Sub-Basin		Sum
	P	Q	P	Q	P+Q
Entropy Weight [w_i]	0.44	0.56	0.41	0.59	1
Scailing Weight [$\overline{w_i}$]	0.77	0.23	0.29	0.71	1
Final Weight [w_i^*]	0.75	0.25	0.21	0.79	1

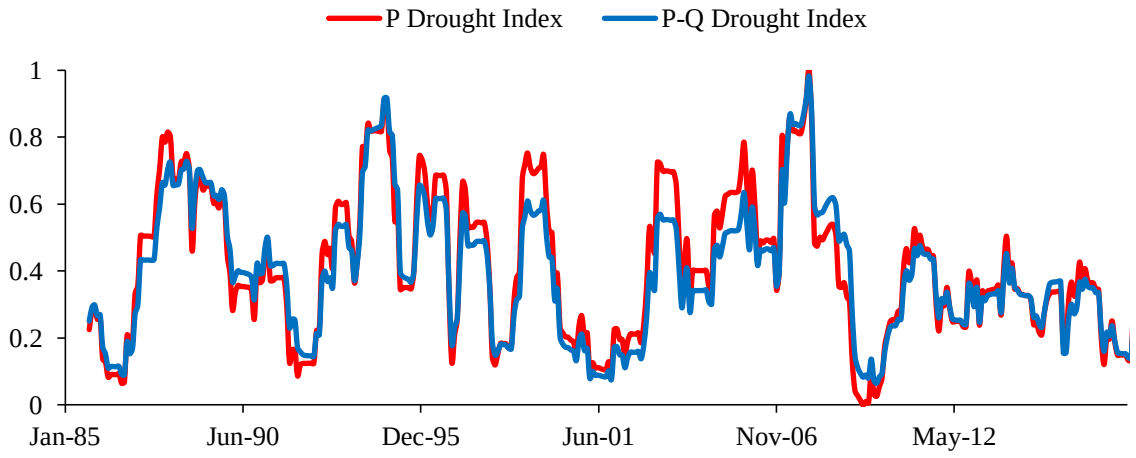

Fig. 2- P drought index and P-Q drought index time series (1985-2020) for the upstream sub-basin

شکل ۲- سری زمانی شاخص بارندگی و شاخص بارندگی رواناب در زیرحوضه بالادست (سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰)

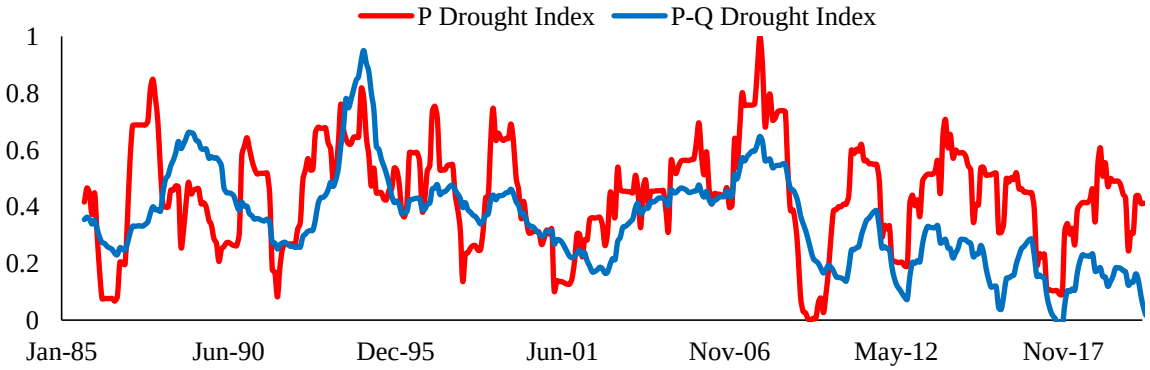

Fig. 3- P drought index and P-Q drought index time series (1985-2020) for the downstream sub-basin

شکل ۳- سری زمانی شاخص بارندگی و شاخص بارندگی رواناب در زیرحوضه پایین دست (سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰)

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، شاخص بارندگی و شاخص دومتغیره در زیرحوضه طبیعی (بوئین میاندشت) از لحاظ عددی تفاوت زیادی ندارند. دلیل این امر این است که در حوضه‌های طبیعی روند تبدیل بارش به رواناب سطحی به‌صورت طبیعی انجام می‌شود. به عبارت دیگر حجم آب سطحی دردسترس براساس مقدار رواناب طبیعی حوضه بدست می‌آید و رواناب موجود در حوضه‌های طبیعی درصدی از بارش در این حوضه‌ها است. شکل ۳ شاخص بارندگی و شاخص دومتغیره را در زیرحوضه مهندسی (نجف آباد) نشان می‌دهد که در این نوع حوضه‌ها تفاوت چشمگیری بین شاخص بارندگی و شاخص دومتغیره مشاهده می‌شود. دلیل این پدیده این است که در این حوضه‌ها حجم آب سطحی دردسترس براساس کنترل توسط سدها است. حجم آب سطحی دردسترس در زیرحوضه نجف آباد براساس حجم آب خروجی از سد زاینده‌رود است و به همین خاطر مؤلفه یا معرف دوم شاخص دومتغیره خشکسالی از مؤلفه اول آن که بارندگی حوضه است پیروی نمی‌کند.

گام نهایی در محاسبه شاخص دومتغیره خشکسالی صحت سنجی شاخص است. شاخص اختلاف نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) به عنوان یک شاخص سنجنده پوشش گیاهی به منظور صحت‌سنجی شاخص دومتغیره خشکسالی استفاده شد. این شاخص که می‌توان از آن به عنوان یک شاخص خشکسالی کشاورزی و یا یک شاخص سنجش از راه دور نام برد، دارای محدوده عددی بین ۱- و ۱+ است. سنجنده‌های ماهواره‌ای بسیاری مؤلفه‌های شاخص NDVI را اندازه‌گیری می‌کنند، اما از میان آنها ماهواره MODIS وابسته به سازمان ملی هوانوردی و فضانوردی آمریکا (NASA[15])، دارای اعتبار و دقت بالاتری است. ماهواره MODIS[16] مقدار عددی شاخص NDVI به عنوان یکی از محصولات این ماهواره براساس طول و عرض جغرافیایی به مدت هر ۱۶ روز یکبار یا ماهانه ارائه می‌دهد. در این تحقیق از مقادیر ماهانه شاخص NDVI که یکی از محصولات ماهواره MODIS است، استفاده گردید. روند محاسبه سری زمانی شاخص NDVI همانند شاخص دومتغیره خشکسالی بصورت برآورد سری زمانی ۱۲ ماهه پیوسته شاخص NDVI است. ابتدا مقادیر ماهانه شاخص NDVI براساس موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز زاینده‌رود از سایت ماهواره MODIS استخراج گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزار GIS، مقدار متوسط ماهانه شاخص NDVI در دو زیرحوضه طبیعی و مهندسی حوضه آبریز زاینده‌رود (بوئین میاندشت و نجف آباد) بدست خواهد آمد. نهایتاً به منظور برآورد سری زمانی ۱۲ ماهه پیوسته شاخص NDVI، میانگین سالانه مقدار شاخص NDVI در یک حوضه بطور پیوسته محاسبه شده است. در شکل ۴ سری زمانی مقادیر شاخص NDVI در زیرحوضه‌های بالادست و پائین‌دست سد نشان داده شده است.

در گام بعد به منظور مقایسه شاخص دومتغیره خشکسالی توسعه داده شده توسط تئوری آنتروپی وزن‌ها با شاخص‌های پرکاربرد SPI و SPEI است. به دلیل شباهت بازه زمانی شاخص دومتغیره خشکسالی و شاخص‌های ۱۲ ماهه SPI و SPEI و همچنین شاخص NDVI از بازه زمانی ۱۲ ماهه استفاده شده است. در ادامه نمودار مقایسه شاخص دومتغیره پیشنهادی در این تحقیق و شاخص‌های SPI و SPEI با بازه زمانی ۱۲ ماهه ارائه خواهد شد. نکته قابل توجه در مقایسه این سه شاخص این است که شاخص‌های SPI و SPEI در بازه ۳- و ۳+ تعریف می‌شود، اما شاخص دومتغیره خشکسالی در بازه عددی ۰ و ۱ تعریف خواهد شد. بدین منظور با یک عملیات تغییر متغیر ریاضی بازه شاخص‌های SPI و SPEI به بازه ۰ و ۱ تغییر خواهد یافت. شکل ۵ و ۶ سری زمانی پیوسته شاخص دو متغیره خشکسالی و شاخص‌های

SPI (نرمال شده) و SPEI (نرمال شده) را برای دو زیرحوضه بوئین میاندشت و نجف آباد به عنوان حوضه‌های طبیعی و مهندسی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر کمتر معرف خشکسالی و مقادیر بیشتر معرف ترسالی در حوضه مورد بررسی است.

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ و درنظر گفتن آستانه خشکسالی (Khoshoei et al., 2016) می‌توان بیان نمود که در حوضه بالادست (بوئین میاندشت) ۷ سال خشکسالی شدید و ۲ سال ترسالی شدید خواهیم داشت. در حوضه پائین دست (نجف آباد) ۴ سال خشکسالی شدید و ۱ سال ترسالی شدید خواهیم داشت. لازم به ذکر است آستانه خشکسالی شدید ۰/۲ و آستانه ترسالی شدید ۰/۸ است.

شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد که در زیرحوضه بالادست روند شاخص‌های بارندگی استاندارد نرمال شده (NSPI)، بارندگی تبخیر استاندارد نرمال شده (NSPEI) و شاخص چند متغیره خشکسالی (MDI) تقریباً یکسان است.

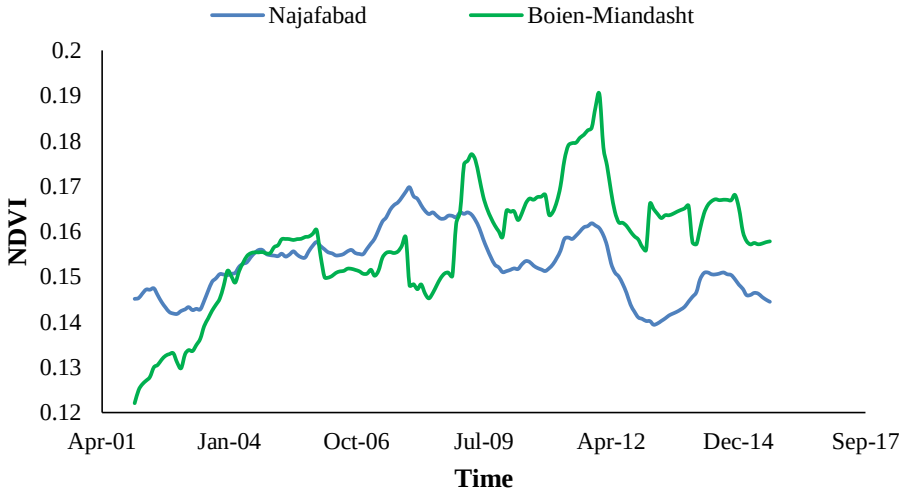

Fig. 4- NDVI time series for the upstream and downstream sub-basins

شکل ۴- سری زمانی شاخص NDVI در زیرحوضه‌های بالادست و پایین دست

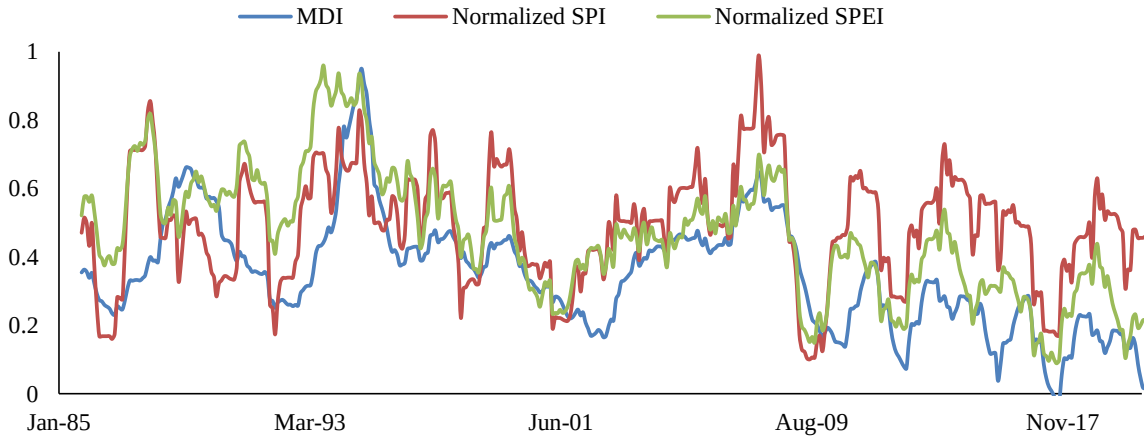

Fig. 5- Multivariate drought index, SPI and SPEI time series (1985-2020) for the upstream sub-basin

شکل ۵- سری زمانی شاخص خشکسالی چند متغیره، شاخص بارندگی استاندارد شده و شاخص بارندگی تبخیر استاندارد شده در زیرحوضه بالادست (سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰)

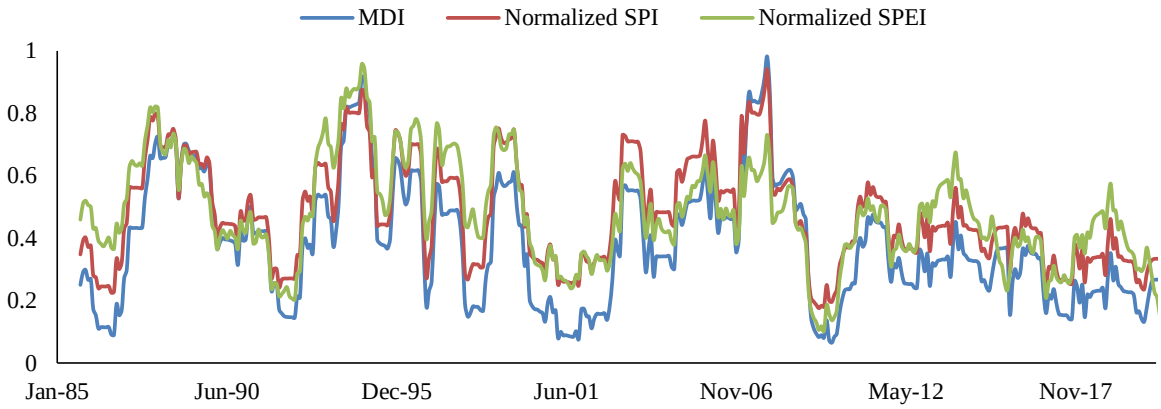

Fig. 6- Multivariate drought index, SPI and SPEI time series (1985-2020) for the downstream sub-basin

شکل ۶- سری زمانی شاخص خشکسالی چند متغیره، شاخص بارندگی استاندارد شده و شاخص بارندگی تبخیر استاندارد شده در زیرحوضه پایین دست (سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰)

در زیرحوضه پایین دست روند شاخص‌های بارندگی استاندارد نرمال شده، بارندگی تبخیر استاندارد نرمال شده و شاخص چند متغیره خشکسالی تفاوت معناداری دارند. به منظور بررسی این تفاوت در ادامه روند صحت‌سنجی شاخص‌های ذکر شده بیان خواهد شد. در این تحقیق همانطور که بیان شد از شاخص NDVI که توسط سنجنده MODIS اندازه گیری شده، استفاده خواهد شد. جدول ۳ مقادیر ضریب همبستگی (R^2) بین شاخص‌های NSPI، NSPEI و MDI و شاخص صحت‌سنجی NDVI را نشان می‌دهد.

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، در زیرحوضه بالادست مقدار ضریب همبستگی شاخص NSPI و شاخص NDVI برابر ۰/۵۲ که تفاوت زیادی با ضریب همبستگی شاخص NSPEI و NDVI (۰/۵۳) ندارد. اما ضریب همبستگی شاخص MDI و شاخص NDVI که در این تحقیق توسعه داده شد برابر با ۰/۶۶ است که افزایش حدود ۲۰ درصد را دارد. دلیل این افزایش استفاده از پارامتر آب سطحی دردسترس در محاسبه شاخص MDI است. در زیرحوضه پایین دست مقدار ضریب همبستگی شاخص NSPI و شاخص NDVI برابر ۰/۲۷ است که نشان می‌دهد در حوضه‌های مصنوعی یا مهندسی اصلا نمی‌توان برای برآورد خشکسالی به پارامتر بارندگی اکتفا نمود. همچنین همبستگی شاخص NSPEI و NDVI برابر ۰/۴۱ است که باز هم پارامترهای بارش و تبخیر قدرت برآورد خشکسالی به خصوص خشکسالی کشاورزی را دارا نیستند. کاربرد شاخص MDI در حوضه‌های مهندسی بسیار چشمگیر است و همانطور که در جدول ۳ مشخص شده است ضریب همبستگی این شاخص و شاخص NDVI که شاخصی برای برآورد عینی خشکسالی است برابر ۰/۹۱ است که این مقدار از لحاظ آماری قابل قبول است. در این تحقیق به منظور صحت سنجی شاخص MDI یا همان شاخص چند متغیره خشکسالی از شاخص NDVI استفاده گردید. شاخص NDVI شاخص برای برآورد پوشش سبزینگی زمین است که وابسته به بارندگی و حجم آب دردسترس است. با توجه به جدول ۲ شاخص NDVI همبستگی بالایی با MDI در حوضه پایین‌دست دارد و همبستگی شاخص NDVI با بقیه شاخص‌ها بسیار پایین است. اما تفاوت همبستگی در حوضه بالادست پایین است و همین قضیه تفاوت روش‌های برآورد خشکسالی را در حوضه‌های طبیعی و مهندسی بیان می‌کند.

Table 3- Value of the weights for upstream and downstream sub-basins

جدول ۳- مقادیر ضریب همبستگی بین شاخص‌های نرمال بارندگی استاندارد شده، نرمال بارندگی تبخیر استاندارد شده، شاخص خشکسالی چند متغیره با شاخص صحت‌سنجی نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی

Correlation of NDVI and Index	Upstream Sub-basin	Downstream Sub-basin
NSPI and NDVI	0.52	0.27
NSPEI and NDVI	0.53	0.41
MDI and NDVI	0.66	0.91

۵- جمع‌بندی

هدف از این تحقیق ارائه و بررسی شاخص یکپارچه خشکسالی در حوضه‌های طبیعی و مهندسی است. این شاخص از انواع جنبه‌های خشکسالی اعم از هواشناسی و هیدرولوژیکی استفاده می‌کند. در شاخص پیشنهادی از معرف‌هایی استفاده شده، که با توجه به موقعیت منطقه و داده‌های دردسترس انتخاب شده است. در ادامه ضریب وزنی هریک از معرف‌ها با توجه به روش وزن‌دهی آنتروپی که محاسبه شده است. با تلفیق معرف‌ها با استفاده از وزن‌های بدست آمده می‌توان مقدار شاخص یکپارچه را محاسبه نمود. براساس رابطه (۱۱) می‌توان مقدار شاخص چند متغیره خشکسالی را محاسبه نمود. به منظور صحت‌سنجی این شاخص چندگانه توسعه داده شده می‌توان از شاخص‌هایی که قبلا توسعه داده شده‌اند، استفاده نمود. مهمترین عامل برای شروع خشکسالی بارندگی است و در برآورد شاخص‌های خشکسالی مهم در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین این معرف به عنوان اولین معرف درنظر گرفته شد. خشکسالی هیدرولوژیکی همانطور که ذکر گردید ناشی از کمبود منابع آب اعم از سطحی و زیرزمینی است. به این منظور از معرف حجم آب سطحی دردسترس و حجم آب زیرزمینی دردسترس استفاده می‌شود. در این تحقیق از تئوری آنتروپی یا بی نظمی به منظور وزن‌دهی معرف‌های تأثیرگذار بر خشکسالی استفاده شده است. سه نوع وزن مقدار عددی وزن آنتروپی (w_i)، وزن مقیاسی ($\overline{w_i}$) و وزن اصلاح شده آنتروپی (w_i^*) در این تحقیق توسعه داده شد و نهایتاً می‌توان توسط این روش هریک از عوامل دخیل در خشکسالی را وزن‌دهی انجام داد. به منظور صحت‌سنجی شاخص چند متغیره خشکسالی از شاخص NDVI استفاده می‌شود. این شاخص همانطور که اشاره شد، یک شاخص سنجش از راه دور برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی است. به عبارت دیگر در این تحقیق از معرف‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی با استفاده از روش وزن‌دهی مقدار شاخص برای بازه مورد نظر محاسبه شده و سپس با استفاده از شاخص ارزیابی کشاورزی، شاخص دو متغیره، صحت‌سنجی شد. به منظور برآورد عملکرد شاخص توسعه داده شده مقایسه‌ای بین شاخص دومتغیره، شاخص نرمال شده بارندگی استاندارد و شاخص نرمال شده بارندگی تبخیر استاندارد انجام گردید. نتایج نشان داد همبستگی بسیار خوبی بین شاخص دومتغیره توسعه داده شده و شاخص NDVI به خصوص در حوضه‌های مهندسی برقرار است.

پی‌نوشت‌ها

1- World Meteorological Organization (WMO)
2- Standardized Precipitation Index (SPI)
3- Palmer Drought Severity Index (PDSI)
4- Surface Water Supply Index (SWSI)
5- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
6- Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)
7- Difference Vegetation Index (DVI)
8- Standardized Runoff Index (SPI)
9- Multivariate Standardized Drought Index (MSDI)
10- Standardized Soil Index (SSI)
11- Multivariate Drought Index (MDI)
12- Integrated Drought Index (IDI)
13- Composite Drought Index (CDI)
14- Hybrid Drought Index (HDI)
15- National Aeronautics and Space Administration (NASA)
16- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

۶- مراجع

Abedi-Koupai J (2011) Zoning of drought in Isfahan province and strategies to reduce the effect of water scarcity. Drought, Zayandehrood, solutions and challenges. Isfahan Governorate Crisis Management Department (In Persian)

Hao Z, AghaKouchak, A (2013) Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model. Advances in Water Resources 57:12–18

Huang S, Chang J, Leng G, Huang Q (2015) Integrated index for drought assessment based on variable fuzzy set theory: A case study in the Yellow River basin, China. Journal of Hydrology 527:608–618

Jing LP, Michael LN, Huang JZ (2007) An entropy weighting k-means algorithm for subspace clustering of high-dimensional sparse data. IEEE Trans. Knowledge Data Eng 19(8):1026–1040

Karamouz M, Rasouli K, Nazif S (2009) Development of a hybrid index for drought prediction. Journal of Hydrologic Engineering 14:617-627

Karamouz M, Araghinejad Sh (2011) Advanced hydrology. Amirkabir University Press, 464p (In Persian)

Karamouz M, Ahmadi A, Fallahi M (2012) System engineering. Amirkabir University Press, 544p (In Persian)

Khoshoei Esfahani M, Safavi HR, Zamani AR (2016) Design of drought monitoring system based on integrated index in Zayanderood River Basin -Iran. Journal of Water and Soil Science, Isfahan University of Technology, 10.18869/acadpub.jstnar.20.75.27 (In Persian)

Liu XW (2007) Parameterized defuzzification with maximum entropy weighting function another view of the weighting function expectation method. Math Computer Modell 45(1–2):177–188

Liu L, Hong Y, Bednarczyk CN, Yong B, Shafer MA, Riley R, Hocker JE (2012) Hydro-climatological drought analyses and projections using meteorological and hydrological drought indices: A case study in Blue River Basin, Oklahoma. Journal of Water Resources Management 26:2761–2779

Mckee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints 8th Conference on Applied Climatology, 179-184

Meng QS (1989) Information theory [M]. Xi'An Jiaotong University Press, Xi'An, pp. 19–36

Palmer WC (1965) Meteorological drought. U. S. Weather Bureau, Washington D.C, Research Paper, 45

Pandey RP, Pandey A, Galkate RV, Byun RH, Mal BC (2010) Integrating hydro-meteorological and physiographic factors for assessment of vulnerability to drought. Journal of Water Resources Management 24:4199-4217

Pandey S, Pandey AC, Nathawat MS, Kumar M, Mahanti NC (2012) Drought hazard assessment using geoinformatics over parts of Chotanagpur plateau region, Jharkhand, India. Natural Hazards 63:279–303

Qiu WH (2002) Management decision and applied entropy. China Machine Press, Beijing, pp. 193–196

Rajsekhar D, Singh VP, Mishra AK (2014) Multivariate drought index: An information theory based approach for integrated drought assessment. Journal of Hydrology 526:164-182

Rouse JW, Hass RH, Deering DW, Shehell JA (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation. Final Rep, Rsc: 1978-4, Remote Sensing Center, Texas A & M University, College Station

Safavi HR, Khoshoei Esfahani M, Zamani AR (2014) Integrated index for assessment of vulnerability to drought, case study: Zayandehrood River Basin, Iran. Journal of Water Resources Management 28:1671–1688

Safavi HR, Raghibi V, Mazdiyasni O, Mortazavi-Naeini M (2018) A new hybrid drought-monitoring framework based on nonparametric standardized indicators. Hydrology Research 49(1):222–236

Shafer BA, Dezman LE (1982) Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. Proceeding of the Western Snow Conference, 164-175

Smith VA, Maidment DR (2008) Texas integrated drought information system. A Prototype of the Trinity River Basin. University of Texas at Austin

Waseem M, Ajmal M, Kim TW (2015) Development of a new composite drought index for multivariate drought assessment. Journal of Hydrology 527:30–37

Zou ZH, Yun Y, Sun JN (2006) Entropy method for determination of weight of evaluating in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment indicators. Journal of Environmental Science 18(5):1020–1023