

Investigating the ability of R software to determine drought - case study: South Khorasan province

Izadi, N.¹  | Khozaymehnezhad, H.^{2✉}  | Yaghoobzadeh, M.³  | Fouladi Nasrabad, M.⁴ 

1,4. PhD student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand , Birjand, Iran. E-mail: nafise.izadi1375@gmail.com, mohamadfouladi-nsrbd@birjand.ac.ir

2. **Corresponding Author**, Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand , Birjand, Iran. E-mail: hkhoyemeh@birjand.ac.ir

3. Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand , Birjand, Iran. E-mail: m.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir

(Received: 20 Mar 2023, Revised: 25 Nov 2023, Accepted: 3 Dec 2023, Published online: 3 Dec 2023)

Abstract

Drought is one of the main hazards related to weather that can affect all aspects of life. In order to monitor and manage droughts using relevant indicators, six synoptic stations were selected in South Khorasan province, corresponding to the cities of Birjand, Qain, Nehbandan, Ferdous, Tabas and Beshravieh. Then the required data was collected and analyzed. According to the review of the available data, the statistical period of 31 years (1990-2020 AD) was chosen as the statistical period of the research. R software is one of the software that is very useful for statistical analysis and has libraries for calculations in different basins. In this research, SDI and RunDS drought indices were calculated using the Drought library for each of the stations. Also, in order to calculate RAI and PNPI drought indices for each station, coding was done. The results showed that according to the SDI index, the driest month and year during the statistical period are October and 2008, respectively. Also, according to the SPI index, Tabas city is in the extreme drought category and has experienced the most drought compared to other cities. In the case of RunDS, Ferdous city had the longest duration of drought and Tabas had the highest intensity of drought. Based on all indicators, Tabas city was recognized as the driest city due to 53 months of drought. Also, based on the results obtained from the R software, the SDI index estimates results closer to reality than other indices in long-term time scales.

Keywords: Drought library, drought indicators, drought severity, precipitation.

Cite this article: Izadi, N., Khozaymehnezhad, H., yaghoobzadeh, M., & Fouladi Nasrabad, M. (2023). Investigating the ability of R software to determine drought - case study: South Khorasan province. Journal of the Nivar, 47(122-123), 142-158. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2023.390437.1242>



بررسی قابلیت نرم‌افزار R در تعیین خشکسالی - مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی

نقیسه ایزدی^۱ | حسین خزیمه نژاد^۲ | مصطفی یعقوب زاده^۳ | محمد فولادی نصرآباد^۴

۱. دانشجوی دکترا، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: nafise.izadi1375@gmail.com و

mohamadfouladi-nsrbd@birjand.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: hkhozeymeh@birjand.ac.ir

۳. دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: m.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۹، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲)

چکیده

خشکسالی یکی از مخاطرات اصلی مرتبط با هواشناسی است که می‌تواند تمام جوانب زندگی را تحت تاثیر قرار دهد. به منظور پایش و مدیریت خشکسالی‌ها با استفاده از شاخص‌های مربوطه، شش ایستگاه سینوپتیک در استان خراسان جنوبی مربوط به شهرستان‌های بیرجند، قائن، نهبندان، فردوس، طبس و بشرویه انتخاب گردید. سپس داده‌های مورد نیاز جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل شد. با توجه به بررسی داده‌های در دسترس طول دوره آماری ۳۱ سال (۱۹۹۰-۲۰۲۰ میلادی) به عنوان دوره آماری تحقیق انتخاب گردید. نرم‌افزار R یکی از نرم‌افزارهایی است که برای تحلیل‌های آماری بسیار مفید بوده و دارای کتابخانه‌هایی برای محاسبات در حوضه‌های مختلف می‌باشد. در این پژوهش شاخص‌های خشکسالی SDI و RunDS با استفاده از کتابخانه Drought برای هر یک از ایستگاه‌ها محاسبه شدند. همچنین جهت محاسبه شاخص‌های خشکسالی RAI و PNPI برای هر ایستگاه، کد نویسی گردید. نتایج نشان داد، براساس شاخص SDI خشک‌ترین ماه و سال در طول دوره آماری به ترتیب، اکتبر و سال ۲۰۰۸ می‌باشد. همچنین با توجه به شاخص SPI شهرستان طبس در طبقه فراخشک قرار گرفته است و بیشترین خشکسالی را نسبت به سایر شهرستان‌ها تجربه کرده است. در مورد RunDS شهرستان فردوس بیشترین تداوم خشکسالی و طبس بیشترین شدت خشکسالی را داشته است. بر اساس همه شاخص‌ها، شهرستان طبس را به علت تداوم ۵۳ ماه خشکسالی، خشک‌ترین شهرستان تشخیص دادند. همچنین براساس نتایج بدست آمده از نرم‌افزار R، شاخص SDI نسبت به بقیه شاخص‌ها در مقیاس‌های زمانی بلندمدت، نتایج نزدیک‌تری به واقعیت را برآورد می‌کند.

کلمات کلیدی: کتابخانه Drought، شاخص‌های خشکسالی، شدت خشکسالی، بارش.

۱. مقدمه

عملکرد گیاهان اثر می‌گذارد (خشکسالی کشاورزی). اثرات کمبود در درازمدت بر روی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی دیده می‌شود (خشکسالی هیدرولوژیکی). در نهایت بسته به منابع آبی مورد استفاده اثرات اقتصادی-اجتماعی متفاوت خواهد بود (خشکسالی اجتماعی-اقتصادی) (رهنما و همکاران، ۱۴۰۰). جدا از انواع خشکسالی و دسته‌بندی‌های

از گذشته تاکنون پدیده خشکسالی مورد توجه بوده و در سال‌های اخیر روش‌های گوناگونی جهت مطالعه و بررسی به ویژه کمی کردن شدت و وسعت آن گسترش یافته است. پدیده خشکسالی ابتدا با کمبود بارش آغاز شده (خشکسالی هواشناسی) سپس، این کمبود رطوبت موجود در خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد که تداوم این کمبود بر رشد و

استناد: ایزدی، نقیسه؛ خزیمه نژاد، حسین؛ یعقوب زاده، مصطفی و فولادی نصرآباد، محمد. (۱۴۰۲). بررسی قابلیت نرم‌افزار R در تعیین خشکسالی - مطالعه موردی: استان خراسان

جنوبی، مجله نویار، ۴۷(۱۲۲-۱۲۳)، ۱۴۲-۱۵۸. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2023.390437.1242>



شاخص‌های SPI و SPEI در ارزیابی خشکسالی هواشناسی با استفاده از نرم‌افزار R در استان کردستان پرداختند، نتایج پژوهش آنها نشان داد ضمن وجود تفاوت در الگوی وقوع دوره‌های ترسالی و خشکسالی SPI و SPEI، شاخص SPEI دوره‌های طولانی‌تر خشکی را در اکثر ایستگاه‌ها مشخص کرده است. براساس نتایج، ضریب‌های همبستگی بین ۰/۱۹ در ایستگاه سقر و ۰/۵۲ در ایستگاه سنندج و معنی‌دار از نظر آماری (در سطح ۹۹ درصد)، متغیر هستند. به نظر می‌رسد که همبستگی ضعیف (۰/۱۹) میان شاخص‌های SPI و SPEI در ایستگاه سقر ناشی از افزایش تبخیر و تعرق در فصل‌های بهار و تابستان محاسبه شده با شاخص SPEI است.

پارسامهر و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از تئوری RUN به تحلیل شدت، مدت و دوره بازگشت خشکسالی در استان فارس پرداختند. آنها طی دوره آماری ۲۰ ساله با استفاده از روش تئوری RUN به انتخاب بهترین شاخص برای تعیین خشکسالی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شاخص SPI به عنوان بهترین شاخص توانسته تفسیر مناسبی از خشکسالی در منطقه را داشته باشد. همچنین طی دهه اخیر شدت خشکسالی نسبت به دهه قبل روند افزایشی داشته است.

جوان و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی و ارزیابی خشکسالی هواشناسی حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص‌های خشکسالی و روش‌های احتمالی پرداختند. آنها یک دوره ۴۰ ساله (۱۳۴۵-۱۳۸۴) را با استفاده از شاخص‌های درصد شاخص بارش نرمال (PNPI)، شاخص استاندارد بارندگی سالانه (SIAP)، شاخص ناهنجاری بارش (RAI) و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که، در بین شاخص‌های خشکسالی، PNPI شاخص مناسبی در برآوردهای سالانه نیست و SPI و RAI بهتر از سایر شاخص‌ها هستند و نتایج آنها به واقعیت نزدیک‌تر است.

ارائه شده، شاخص‌های کمی مبتنی بر داده‌های بارش از اقبال بیشتری برخوردار بوده و روند بسط و نوآوری آن نیز بیش از دیگر موارد است. پژوهشگران متعددی به سنجش و ارزیابی انواع شاخصها در مناطق مختلف اقدام و با توجه به ویژگی‌های جغرافیایی، اقلیمی و در بعضی ملاحظات، شاخص مناسبتر را معرفی کرده‌اند (کریمی و اکبری نودهی، ۱۳۹۸).

خشکسالی می‌تواند بر روی کاهش سطح آب زیرزمینی و از بین رفتن آن نقش داشته باشد؛ همچنین می‌تواند سبب هجوم بیماری‌ها و آفت‌ها به درختان و گیاهان شود و به کشاورزی آسیب‌های جدی وارد کند، به همین سبب بررسی آن ضروری است. بارش از جمله عواملی است که خشکسالی بیشتر از هر پارامتر دیگری به آن وابسته است. بنابراین لازم است، بر اساس شاخص‌های مرتبط، میزان خشکسالی‌ها بر اساس این پارامتر تعیین گردد تا مدیران ارشد به کمک آن بتوانند برای مقابله با خشکسالی‌های پیش‌رو تمهیدات لازم را در نظر بگیرند. علت این امر دسترسی راحت‌تر و آسان‌تر به انواع داده‌های بارندگی در بخش‌های گوناگون یک منطقه است. از این دیدگاه، شاخص‌های گوناگونی برای مطالعه خشکسالی ابداع و ارائه شده‌اند که می‌توان به شاخص بارش استاندارد (SPI) (Standardized Precipitation Index)، شاخص معیار بارندگی سالانه (SIAP) (Standard Index of Annual Precipitation) شاخص درصد بهنجار بارندگی (PNPI) (Percent of Normal Precipitation Index) و شاخص ناهنجاری بارندگی (RAI) (Rainfall Anomaly Index) اشاره کرد (موغلی، ۱۳۹۴).

نرم‌افزار R یک محیط برنامه‌نویسی جهت محاسبات آماری و تحلیل داده است. از این نرم‌افزار می‌توان در زمینه‌های مدل‌های پیش‌بینی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تمامی عملیات‌های آماری استفاده نمود. کتابخانه‌های موجود در R عملیات محاسبات پیچیده را به سادگی و با سرعت بالا انجام می‌دهند. مصطفی‌زاده و ذبیحی (۱۳۹۵) به تحلیل و مقایسه

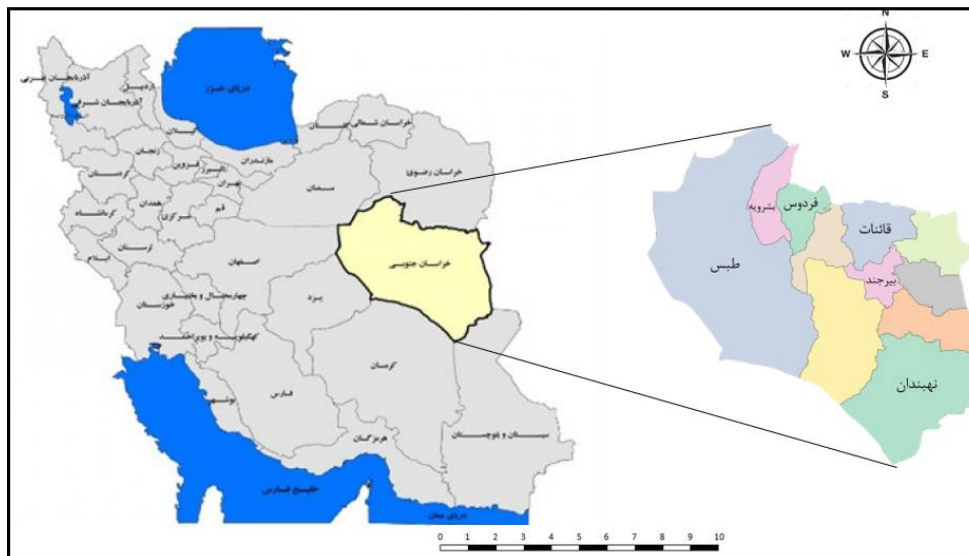
بررسی شاخص‌های (Standardized Drought Index) SDI و RunDS با استفاده از کتابخانه Drought در R و شاخص‌های RAI و PNPI از طریق برنامه‌نویسی، جهت تعیین خشکسالی شش شهرستان خراسان جنوبی (بیرجند، قائن، نهبندان، فردوس، طبس و بشرویه) پرداخته می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر با هدف بررسی شاخص‌های خشکسالی SDI، RunDS، RAI و PNPI در شش شهرستان استان خراسان جنوبی واقع در شرق کشور انجام می‌گیرد. بدین منظور داده‌های بارندگی روزانه شش شهرستان بیرجند، قائن، نهبندان، فردوس، طبس و بشرویه مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک در طول دوره آماری ۳۱ سال (۱۹۹۰-۲۰۲۰) جمع‌آوری گردید (شکل ۱). موقعیت ایستگاه‌ها در جدول ۱ آمده است. با توجه به اینکه در بین داده‌ها، گپ خالی وجود دارد، این گپ‌ها با استفاده از میانگین‌گیری در روزهای اطراف آن پر شد. از آنجایی که شاخص‌های خشکسالی مورد نظر بر اساس داده ماهانه محاسبه می‌شوند، از داده‌های روزانه میانگین‌گیری شد و برای هر ماه در طول دوره آماری یک عدد متوسط بدست آمد.

سایفیژیل و دملی (۲۰۲۰) به بررسی تغییرات الگوهای بارندگی و شناسایی مناطق مرطوب در استان کوازولو-ناتال در آفریقای جنوبی در یک دوره آماری ۴۸ ساله (۱۹۷۰-۲۰۱۷) با استفاده از شاخص‌های RAI و PNPI پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد؛ سال‌های ۱۹۹۲، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ خشک‌ترین سال‌ها در طول دوره مطالعاتی بوده است که ناشی از پدیده ال‌نینو بود. دوره‌های بسیار مرطوب سال‌های ۱۹۸۷، ۱۹۹۶ و ۲۰۰۰ بودند که با رویدادهای گردباد همراه بوده است. همچنین نتایج مطالعه آنها نشان داد؛ خشکسالی‌های پی در پی به وقوع پیوسته و به مراتب شدیدتر شده، در حالی که شرایط رطوبتی کم شده است. این شرایط خشکسالی مربوط به یک منطقه نبوده و در طول دوره آماری تغییر کرده است. تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای مطالعه آنها نیز نشان داد، RAI از PNPI در درک شرایط خشکسالی قوی‌تر عمل می‌کند. این پژوهش، با هدف تعیین شاخص‌های خشکسالی با استفاده از نرم‌افزار R انجام شده است.

کتابخانه Drought در نرم‌افزار R در سال ۲۰۱۷ معرفی گردیده است. با توجه به جدید بودن این کتابخانه، تا به امروز خشکسالی استان خراسان جنوبی با استفاده از این کتابخانه مورد بررسی قرار نگرفته است. بدین منظور، در این مطالعه به



شکل ۱- نقشه محدوده مطالعاتی

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه

station	نام ایستگاه	UTM X	UTM Y	ارتفاع از سطح دریا
سینوپتیک	بیرجند	۵۹/۲۵	۳۲/۹۰	۱۵۰۴
سینوپتیک	قاین	۵۹/۱۸	۳۳/۷۳	۱۴۳۲
سینوپتیک	نهبندان	۶۰/۰۳	۳۱/۵۳	۱۱۸۸
سینوپتیک	فردوس	۵۸/۱۸	۳۴/۰۳	۱۲۹۳
سینوپتیک	طبس	۵۶/۹۵	۳۳/۶۰	۷۱۱
سینوپتیک تکمیلی	بشرویه	۵۷/۲۶	۳۳/۵۲	۸۷۹

۱-۲. معرفی نرم‌افزار R

R، یک زبان برنامه‌نویسی و محیط نرم‌افزاری برای محاسبات آماری و علم داده‌ها است؛ که براساس زبان‌های اس و اسکیم پیاده‌سازی شده است. نرم‌افزار R اکثر زمینه‌های آمار کاربردی مانند تحلیل سری‌های زمانی، رگرسیون خطی و غیرخطی، آزمون فرض‌های کلاسیک، کدگذاری، خوشه‌بندی و غیره را پوشش داده و همچنین نرم‌افزار قدرتمندی برای ایجاد اشکال گرافیکی و نمودارها است. این نرم‌افزار کتابخانه‌های مختلفی برای انجام عملیات تحلیلی در زمینه‌های مختلف علمی دارد. نرم‌افزار R برای رشته‌های مختلف کتابخانه‌های متفاوتی را ارائه کرده است. به عنوان مثال برای هیدرولوژی و اقلیم شناسی کتابخانه‌های مختلفی مانند cm، EcoHydRology، hydroGOF و غیره را دارد. همچنین برای تعیین خشکسالی کتابخانه Drought معرفی شده است. کتابخانه Drought در سال ۲۰۱۷ در نرم‌افزار R تعریف شده و شاخص‌هایی را برای پایش خشکسالی براساس شاخص‌های تک‌متغیره و چندمتغیره ارائه کرده است. همچنین پیش‌بینی آماری خشکسالی را بر اساس پیش‌بینی جریان (شاخص ESP) انجام می‌دهد. این کتابخانه نیز به ارزیابی خطر خشکسالی و انتشار خشکسالی می‌پردازد (هاو و همکاران، ۲۰۱۷).

۲-۳. شاخص بارش استاندارد (SDI یا SPI)

شاخص بارش استاندارد شده برای هر مکانی که داده طولانی مدت بارش داشته باشد، قابل محاسبه است. این شاخص اولین بار توسط مک کی و همکاران (۱۹۹۳) مورد استفاده قرار گرفت (مصطفی‌زاده و ذبیحی ۱۳۹۵). شاخص SDI به علت استفاده از داده‌های قابل دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی دلخواه و قابلیت بسیار زیاد در مقایسه مکانی نتایج، به عنوان یکی از مناسب‌ترین شاخص‌ها برای تحلیل خشکسالی شناخته می‌شود (موغلی ۱۳۹۴). این شاخص، داده‌های بارش ثبت شده در بلند مدت را به یک توزیع احتمالاتی برازش داده و سپس به یک توزیع نرمال، تغییر شکل می‌دهد. به طوری که میانگین SDI در مکان و دوره زمانی مورد نظر صفر است (میشرا و سینگ، ۲۰۱۰، بنی‌مهد و همکاران، ۱۳۹۳، مصطفی‌زاده و ذبیحی ۱۳۹۵). Drought، مقدار شاخص SDI را با ۴ توزیع احتمالاتی گرینگورتن (EmpGrin)، ویبال (EmpWeib)، گاما (Gamma) و لوگ‌نرمال (Lognormal) محاسبه می‌کند. نتایج پژوهش‌های بسیاری از دانشمندان نشان می‌دهد که مناسب‌ترین تابع احتمال برای برازش داده‌های بارندگی تابع توزیع گاما می‌باشد (موغلی ۱۳۹۴، مصطفی‌زاده و ذبیحی ۱۳۹۵). تابع چگالی احتمال این توزیع به صورت رابطه ۱ است:

$$f(x) = \frac{1}{\beta\alpha\rho(\alpha)} X^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (1)$$

۲-۲. معرفی شاخص‌های خشکسالی

$$\beta = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (۴)$$

که در آن A با رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$A = \ln \left(\bar{X} - \frac{\sum \ln(X)}{n} \right) \quad (۵)$$

که n در آن، تعداد بارش‌ها است (مصطفی‌زاده و ذیحی ۱۳۹۵).

لازم به توضیح است که به دلیل وقوع چولگی داده‌های بارش، می‌بایست قبل از محاسبه SDI، داده‌ها نرمال شوند. طبقه‌بندی شاخص SDI طبق جدول ۲ انجام می‌شود:

در رابطه فوق، X مقدار متغیر، α و β به ترتیب پارامتر شکل و مقیاس توزیع هستند. $\rho(\alpha)$ نیز تابع ضریب گاما است و براساس رابطه ۲ بدست می‌آید:

$$\rho(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (۲)$$

استفاده از روش بیشینه درست‌نمایی برای برآورد پارامترهای توزیع گاما مناسب است که نیاز به رایانه و الگوریتم‌های تکراری دارد. روش تام (۱۹۵۸) یکی از روش‌های محاسبه پارامترها است و بر اساس این روش ضریب‌های α و β به صورت رابطه‌های ۳ و ۴ محاسبه می‌شوند:

$$\alpha = \frac{\bar{X}}{\beta} \quad (۳)$$

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص SDI (میرعقوب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸)

وضعیت	فرا مرطوب	بسیار مرطوب	نسبتاً مرطوب	نزدیک نرمال	نسبتاً خشک	بسیار خشک	فرا خشک
SDI	≥ 2	۱/۹۹ تا ۱/۵	۱ تا ۱/۴۹	-۰/۹۹ تا ۰/۹۹	-۱ تا -۱/۴۹	-۱/۵ تا -۱/۹۹	≤ -2

۲-۴. شاخص شدت - مدت بارندگی (RunDS)

یکی از روش‌های تحلیل و بررسی خشکسالی تئوری ران (RUN Theory (RT)) است که در سال ۱۹۶۷ توسط یجوچ^۱ استفاده شد. تئوری RUN روی متغیرهای گسسته، استوار است؛ اگرچه برای متغیرهای پیوسته نیز به کار برده می‌شود. در هنگام استفاده از تئوری RUN در بررسی خشکسالی این تئوری به صورت کمی بیان می‌دارد که چگونه فرایند هیدرولوژیکی از بالا و پایین از یک آستانه بحرانی عبور می‌کند. مقدار آستانه انتخابی سطح مبنا (Level Truncation) یا سطح بحرانی (Level Critical) نامیده می‌شود. برای تحلیل در تئوری RUN فقط باقیمانده‌های منفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر باقیمانده منفی که به شکل $(x - x_0 < 0)$ معرفی می‌شود بیانگر یک رخداد خشکسالی است. سطح بحرانی می‌تواند به هر شکل و هر

اندازه دلخواه تنظیم و در نظر گرفته شود هر چه سطح بحرانی پایین تر انتخاب شود از تعداد خشکسالی‌ها کم و بر شدت آنها افزوده می‌شود. اگر سطح بحرانی نزدیک به میانگین باشد، مقدار x_0 نرمال است و اگر با فاصله زیاد از میانگین انتخاب شود، از تعداد خشکسالی و ترسالی‌ها کاسته می‌شود. همچنین می‌توان سطح بحرانی را براساس شاخص SPI تعیین نمود. عبور از سطح بحرانی زمانی رخ می‌دهد که در زمان $(t - \Delta t)$ (ماه قبل)، $x - x_0 > 0$ و در زمان t (ماه بعد)، $x - x_0 < 0$ گردد. این کاهش در مقدار X شروع یک خشکسالی را نشان می‌دهد که بر اساس سطح بحرانی مشخص شده است. طول توالی منفی، تداوم یک دور خشکسالی را تعیین می‌نماید. شدت خشکسالی (Severity) مقدار میانگین کسری بارش را در یک دوره ویژه از خشکسالی بیان می‌کند. در کتابخانه Drought، تئوری RUN با عنوان RunDS آمده است (سیاسر، ۱۳۹۴).

¹ Yejevich

۲-۵. شاخص ناهنجاری‌های بارش (RAI)

می‌آید:

$$RAI = 3 * \left(\frac{p - \bar{p}}{\bar{m} - \bar{p}} \right) \quad (۶)$$

$$RA = ((-3) * \left(\frac{p - \bar{p}}{\bar{x} - \bar{p}} \right)) \quad (۷)$$

که در رابطه‌های ۶ و ۷، p مقدار بارندگی ماهانه، \bar{p} میانگین دراز مدت بارندگی ماهانه در ایستگاه مورد نظر، \bar{m} میانگین ۱۰ مورد از بزرگترین بارندگی‌ها در طول دوره مطالعاتی و \bar{x} میانگین ۱۰ مورد از کوچکترین بارندگی‌ها در طول دوره مطالعاتی می‌باشد. طبقه‌بندی شاخص ناهنجاری‌های بارش در جدول ۳ آمده است:

شاخص ناهنجاری‌های بارش را برای اولین بار Rooy and Van(1965) ارائه کردند و اساس آن محاسبه انحراف میزان بارندگی از مقدار نرمال می‌باشد (میریعقوب زاده و همکاران، ۱۳۹۸). برای محاسبه شاخص RAI، ابتدا باید میانگین دراز مدت بارندگی ماهانه در ایستگاه مورد نظر (\bar{p}) محاسبه شود، سپس لازم است، میانگین ۱۰ مورد از بزرگترین بارندگی (\bar{m}) و میانگین ۱۰ مورد از کوچکترین بارندگی (\bar{x}) که در دوره مطالعاتی اتفاق افتاده است، استخراج گردد. در نهایت، چنانچه ناهنجاری مثبت باشد ($p > \bar{p}$)، RAI از رابطه ۶ و چنانچه ناهنجاری منفی باشد ($p < \bar{p}$)، RAI از رابطه ۷ بدست

جدول ۳- طبقه‌بندی شاخص RAI (میریعقوب زاده و همکاران، ۱۳۹۸)

وضعیت	نزدیک نرمال	خشکسالی ضعیف	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	خشکسالی بسیار شدید
RAI	۰/۳ تا ۰/۳-	۰/۳- تا ۱/۲-	۱/۲- تا ۲/۱-	۲/۱- تا ۳-	۳- ≤

۲-۶. شاخص نرمال بارندگی (PNPI)

یکی از مهم‌ترین شاخص‌هایی که برای ارزیابی خشکسالی استفاده می‌شود، شاخص PNPI است که از تقسیم میزان بارندگی رخ داده بر مقدار بارندگی نرمال به دست می‌آید و مقدار آن بر حسب درصد بیان می‌شود. یکی از مزیت‌های این شاخص درصد طبیعی خشکسالی در یک منطقه یا فصل مؤثر است. در این شاخص درصد نرمال نمی‌تواند فرکانس خروج از حالت طبیعی یا با مکان‌های مختلف را مقایسه کند. همچنین این شاخص نمی‌تواند تأثیرات خاصی از خشکسالی، عامل مهار یا برنامه‌ریزی کاهش خطر خشکسالی را تعیین کند (میریعقوب زاده و همکاران، ۱۳۹۸). این شاخص برای

بازه‌های مختلف زمانی بارش (ماهانه، فصلی، سالانه و روزانه) محاسبه می‌شود. محاسبه این شاخص نیازمند داشتن مجموع بارندگی‌های ماه مورد نظر و میانگین بارش ماهانه بلند مدت برای دوره‌های مورد مطالعه است (جهانگیر و سارانی راد، ۱۳۹۸). شاخص درصد بهنجار بارندگی به صورت رابطه ۸ محاسبه می‌شود:

$$PNPI = \frac{p_i}{\bar{p}} \times 100 \quad (۸)$$

که در آن p_i مقدار بارش و \bar{p} میانگین دراز مدت بارندگی می‌باشد. طبقه‌بندی شدت خشکسالی و ترسالی توسط شاخص PNPI در جدول ۴ آمده است:

جدول ۴- طبقه‌بندی شاخص PNPI (جهانگیر و سارانی راد، ۱۳۹۸)

طبقه	درصد PNPI	طبقه	درصد PNPI
بسیار مرطوب	≥ 160	خشکسالی ضعیف	۷۰ تا ۸۰
نسبتاً مرطوب	۱۶۰ تا ۱۴۵	خشکسالی متوسط	۷۰ تا ۵۵
مرطوب	۱۴۵ تا ۱۳۰	خشکسالی شدید	۴۰ تا ۵۵
نیمه مرطوب	۱۳۰ تا ۱۲۰	خشکسالی بسیار شدید	≤ 40
نرمال	۱۲۰ تا ۸۰		

۳. نتایج و بحث

۳-۱. شاخص بارش استاندارد (SPI):

پس از آماده‌سازی داده‌های روزانه شش ایستگاه مورد نظر و تبدیل آنها به میانگین ماهانه، شاخص SDI توسط کتابخانه Drought در نرم‌افزار R محاسبه شد. SDI قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی دلخواه را دارد. SDI یک ماهه شرایط رطوبتی کوتاه مدت را منعکس می‌کند که به علت استفاده از مقادیر بارندگی ماهانه معمولاً این مقیاس، جواب‌های قابل قبولی نمی‌دهد. محاسبه SDI برای مقیاس‌های زمانی کوتاه مدت (یک ماهه) با مشکل و گاهی با خطا مواجه می‌شود. اما SDI سه ماهه و شش ماهه شرایط رطوبتی کوتاه مدت را منعکس می‌کنند و برای پایش خشکسالی هواشناسی کوتاه‌مدت استفاده می‌شوند. SDI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، الگوهای بلندمدت سالانه را منعکس می‌کند. بدیهی است هرچه مقیاس زمانی مورد مطالعه بزرگتر در نظر گرفته شود؛ توزیع داده‌ها به سوی توزیع نرمال گرایش بیشتری پیدا می‌کند. از این رو محاسبه SDI برای مقیاس‌های زمانی بزرگتر قابل اعتمادتر می‌باشد. به همین دلیل، در این مطالعه مقیاس زمانی

۱۲ ماهه برای ساخت SDI در شش ایستگاه مورد نظر استفاده گردید. سری زمانی SDI ۱۲ ماهه مقدار بارندگی یک دوره ۱۲ ماهه را نسبت به میانگین همان دوره در دوره آماری مورد مطالعه مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌دهد. به عنوان مثال، برای ساده‌تر کردن توضیح می‌توان یک سری زمانی سه‌ماهه را در نظر گرفت. در مقیاس زمانی سه‌ماهه برای محاسبه مقدار خشکسالی هواشناسی ماه اسفند، میانگین بارندگی دی، بهمن و اسفند مدنظر قرار داده می‌شود و برای ماه‌های بعدی به صورت میانگین متحرک محاسبات انجام می‌شود. برای مقیاس زمانی ۱۲ ماهه نیز محاسبات به همین طریق انجام می‌شود. پس از کدنویسی در کتابخانه Drought، خروجی ماهانه با مقیاس ۱۲ ماهه با استفاده از توزیع احتمالاتی گاما استخراج شد. برای درک بهتر این موضوع که چه سالی خشکسالی بیشتری داشته، نمودارهای سالانه هر شهرستان به طور مجزا ترسیم شدند. نمودار شاخص SDI هر شهرستان در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲- نمودار شاخص SDI به تفکیک شهرستان

توجه به شکل ۲، سال ۲۰۰۸ بیشترین خشکسالی را داشته که چهار شهرستان، ماه‌های نسبتاً خشکی را در این سال تجربه کرده‌اند و دو شهرستان دیگر در محدوده نرمال قرار داشتند. علاوه بر این، شهرستان طبس با شدت خشکسالی ۲/۴۵۷- (سال ۲۰۰۶) بیشترین شدت خشکسالی را در بین شش شهرستان مورد مطالعه داشته و در طبقه فراخشک قرار گرفته است. جدول ۵، تعداد ماه‌های هر طبقه را براساس شاخص بارش استاندارد نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۲، پدیده خشکسالی در همه شهرستان‌ها اتفاق افتاده و از شدت و فراوانی وقوع زیادی برخوردار است که در مجموع ۸۰ ماه در محدوده فراخشک قرار گرفته است. براساس محاسبات صورت گرفته، ماه اکتبر در مجموع ۳۱ سال مورد مطالعه، شاهد بیشترین خشکسالی و کمترین میزان بارندگی بوده است. در این مورد باید گفت احتمالاً چون در ماه‌های قبل میزان بارندگی کم بوده و خشکسالی ایجاد شده و بارندگی مطلوبی برای جبران خشکسالی ماه‌های گذشته صورت نگرفته، سبب خشکسالی در این ماه شده است. همچنین با

جدول ۵- تعداد ماه‌های طبقه‌بندی شده هر شهرستان بر اساس SDI

شهرستان	مرطوب	نرمال	نسبتاً خشک	بسیار خشک	فرا خشک
بیرجند	۵۸	۲۴۱	۲۷	۱۷	۱۳
قائن	۵۹	۲۳۸	۳۰	۲۰	۱۱
نهبندان	۵۹	۲۴۱	۳۳	۱۱	۱۶
فردوس	۶۴	۲۲۸	۳۵	۲۴	۷
طبس	۶۷	۲۴۰	۲۹	۹	۱۵
بشرویه	۵۷	۲۴۶	۲۸	۱۰	۱۸

۲-۳. شاخص شدت - مدت بارندگی (RunDS)

ورودی شاخص RunDS در کتابخانه Drought، خروجی ماهانه شاخص SDI می‌باشد. در این مطالعه عدد ۱- برای حد آستانه، معین شده است؛ زیرا طبق طبقه‌بندی شاخص SDI محدوده کمتر از ۱- شروع خشکسالی است. تداوم‌های خشکسالی برای مقیاس ۱۲ ماهه شش شهرستان با استفاده از تئوری RUN از کتابخانه Drought استخراج شد که نتایج آن به تفکیک شهرستان در جداول ۶-۱۱ آمده است. نکته مهم این است که رویدادهای بلندمدت‌تر الزاماً شدیدترین رویدادها نمی‌باشند. برای شناخت اهمیت دوره‌های مختلف خشکسالی و پی بردن به میزان تأثیراتی که این دوره‌ها می‌توانند بر محیط برجای گذارند بررسی حداکثر شدت خشکسالی در یک دوره خشکسالی اهمیت بسیار زیادی دارد.

همان طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، شاخص SDI تعداد ماه‌های نرمال را نسبت به تعداد ماه‌های طبقات دیگر بیشتر نشان می‌دهد و ماه‌های فراخشک و بسیار خشک کمتر از سایر طبقه‌ها می‌باشند. با توجه به اینکه، شاخص بارش استاندارد ۱۲ ماهه، میانگین بارندگی ۱۲ ماه قبل را در نظر می‌گیرد و بارندگی ماه‌های گذشته در مجموع در حد نرمال بوده، خشکسالی را به سمت طبقه نرمال شیفت داده است. بنابراین، وضعیت ایستگاه‌های استان نزدیک به نرمال بوده است. نتیجه مطالعه قوام سعیدی نوقایی و همکاران (۱۳۹۹) نشان داد، مقادیر شاخص SDI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه نسبت به ۳ و ۶ ماهه شدت خشکسالی را بیشتر نشان می‌دهد. همچنین نتیجه پژوهش خسروی و اکبری (۱۳۸۸) در بررسی ویژگی خشکسالی خراسان جنوبی، نتیجه مطالعه حاضر را تایید می‌کند.

جدول ۶- ویژگی رویدادهای خشکسالی شهرستان بیرجند

شدت	تداوم(ماه)	ردیف	شدت	تداوم(ماه)	ردیف
-۰/۱۵۶۰۸۶	۱	۸	-۱۱/۱۳۷۰۷	۱۲	۱
-۸/۲۲۲۴۹۵	۹	۹	-۰/۲۸۶۰۵۵	۱	۲
-۰/۱۸۳۹۶۲	۱	۱۰	-۷/۹۸۶۷۹۶	۱۳	۳
-۰/۰۲۸۹۹۳	۱	۱۱	-۰/۱۳۷۶۶۶	۱	۴
-۰/۵۴۳۱۸۸	۴	۱۲	-۱/۸۶۰۰۴۲	۵	۵
-۴/۴۷۴۵۵۲	۷	۱۳	-۱/۶۸۳۹۹۸	۴	۶
	۶۰	مجموع	-۰/۳۱۲۹۵۵	۱	۷

جدول ۷- ویژگی‌های رویدادهای خشکسالی شهرستان قائن

ردیف	تداوم (ماه)	شدت	ردیف	تداوم (ماه)	شدت
۱	۳	-۰/۸۷۹۲۸۲	۹	۱۲	-۹/۴۲۸۴۹۲
۲	۱۶	-۱۲/۱۷۰۹۸	۱۰	۱	-۰/۰۰۹۶۱۲
۳	۳	-۰/۲۷۷۷۲۷	۱۱	۱	-۰/۰۰۷۰۰۴
۴	۹	-۳/۹۹۲۵۴۸	۱۲	۱	-۰/۱۵۲۹۹۵
۵	۱	-۰/۰۲۴۱۸۸	۱۳	۱	-۰/۲۱۴۸۴۹
۶	۲	-۰/۱۸۲۱۲۸	۱۴	۱۰	-۸/۲۴۲۴۰۸
۷	۱	-۰/۲۸۷۶۱۳			
۸	۱	-۰/۰۸۰۸۴۵	مجموع	۶۲	

جدول ۸- ویژگی‌های رویدادهای خشکسالی شهرستان نهبندان

ردیف	تداوم (ماه)	شدت	ردیف	تداوم (ماه)	شدت
۱	۴	-۱/۳۱۹۲۴۱	۷	۲	-۰/۶۷۱۲۸۳
۲	۱	-۰/۱۳۱۳۰۴	۸	۱۲	-۱۲/۱۲۴۰۹
۳	۱	-۰/۰۷۱۸۷۷	۹	۲	-۰/۳۶۴۸۷۳
۴	۱۲	-۱۰/۱۱۹۱۸	۱۰	۱	-۰/۰۰۹۵۵۱
۵	۶	-۱/۷۵۶۴۴۱	۱۱	۱۲	-۶/۹۶۰۴۷۸
۶	۷	-۳/۶۰۵۹۳۹	مجموع	۶۰	

جدول ۹- ویژگی‌های رویدادهای خشکسالی شهرستان فردوس

ردیف	تداوم (ماه)	شدت	ردیف	تداوم (ماه)	شدت
۱	۱	-۰/۰۶۸۵۶۷	۱۰	۱	-۰/۰۸۷۱۹۸
۲	۱۳	-۷/۱۹۹۲۹۷	۱۱	۳	-۱/۴۱۷۹۴۱
۳	۸	-۵/۰۳۰۹۹	۱۲	۱	-۰/۱۸۶۲۰۵
۴	۱۲	-۶/۴۳۸۸۳۲	۱۳	۱	-۰/۳۰۵۵۰۸
۵	۱۲	-۹/۰۱۵۳۸۸	۱۴	۱	-۰/۱۹۸۴۲۴
۶	۱	-۰/۱۰۰۸۶۱	۱۵	۵	-۲/۲۹۳۸۷۹
۷	۲	-۰/۹۱۳۴۳۳	۱۶	۱	-۰/۴۷۸۸۲۳
۸	۴	-۱/۰۳۶۹۰۹	۱۷	۱	-۰/۱۰۸۵۳۹
۹	۱	-۰/۵۵۴۶۱۹	مجموع	۶۸	

جدول ۱۰- ویژگی‌های رویدادهای خشکسالی شهرستان طبس

شدت	تداوم(ماه)	ردیف	شدت	تداوم(ماه)	ردیف
-۰/۷۵۶۵۲۱	۵	۷	-۰/۲۸۷۵۹۱	۱	۱
-۰/۳۹۲۶۱۷	۲	۸	-۱/۰۹۷۴۶۴	۶	۲
-۰/۲۴۱۰۳۴	۲	۹	-۰/۱۲۰۴۲۲	۱	۳
-۰/۹۸۹۰۶	۲	۱۰	-۰/۵۰۰۸۱۲	۲	۴
-۰/۳۰۴۶۷۸	۱	۱۱	-۲۵/۴۲۱۲۶	۲۵	۵
	۵۳	مجموع	-۴/۱۹۱۹۷	۶	۶

جدول ۱۱- ویژگی‌های رویدادهای خشکسالی شهرستان بشرویه

شدت	تداوم(ماه)	ردیف	شدت	تداوم(ماه)	ردیف
-۱/۹۴۸۴۴۹	۵	۸	-۱/۳۲۵۶۲۱	۶	۱
-۲/۵۳۱۹۶۱	۷	۹	-۴/۱۱۵۳۷۵	۵	۲
-۰/۰۴۳۴۹۵	۱	۱۰	-۰/۰۲۲۹۹۶	۱	۳
-۱۴/۷۵۹۲۴	۱۴	۱۱	-۱۱/۵۸۷۹	۱۳	۴
-۰/۰۳۳۸۵۵	۱	۱۲	-۰/۳۵۲۵۳۱	۱	۵
			-۰/۱۳۵۲۱۷	۱	۶
	۵۶	مجموع	-۰/۰۶۸۷۱۹	۱	۷

۳-۳. شاخص ناهنجاری‌های بارش (RAI)

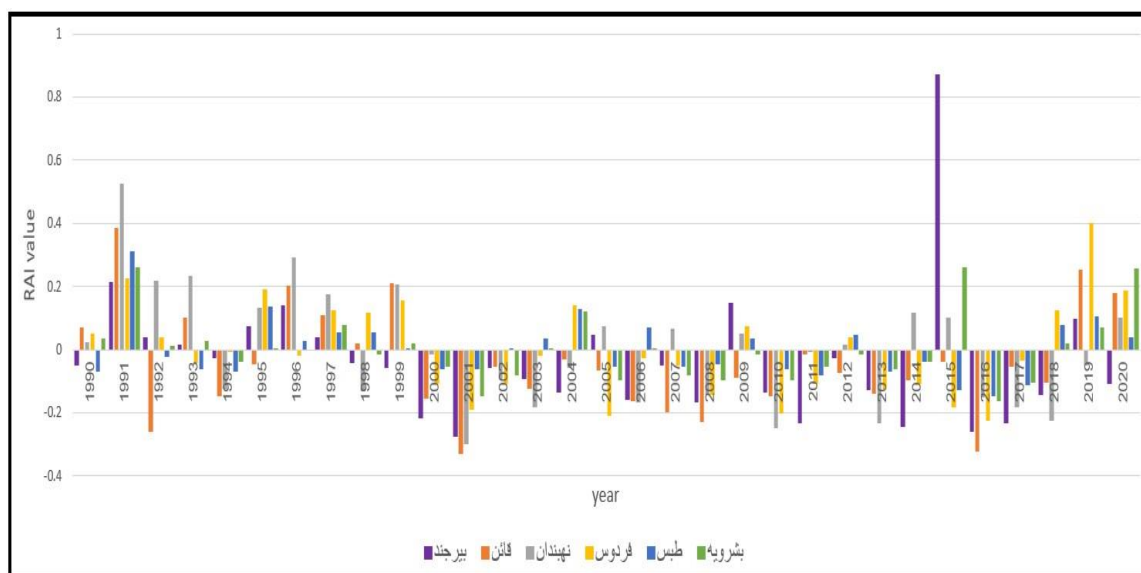
با توجه به نتایج خروجی از R، ماه‌های مورد مطالعه طبقه‌بندی شدند. همانطور که در جدول ۱۲ مشخص است، براساس شاخص RAI طبس و بشرویه بیشترین ماه‌های خشکسالی بسیار شدید را داشتند. همچنین بیشتر ماه‌های مرطوب مربوط به شهرستان بشرویه بوده است که نشان می‌دهد بارندگی در این منطقه دارای نوسان است. بیشترین ماه‌های خشکسالی شدید مربوط به نهبندان است. بیرجند بیشترین ماه‌های خشکسالی متوسط و نزدیک به نرمال را داشته است. با توجه به شکل ۳ و محاسبات صورت گرفته، شاخص درصد ناهنجاری‌های بارندگی سال ۲۰۰۱ را خشک‌ترین سال در طول دوره آماری ۳۱ ساله معین کرده است. خسروی و اکبری (۱۳۸۸)، ویژگی

با توجه به جداول ۶-۱۱، بیشترین شدت خشکسالی در شهرستان بیرجند با ۱۱/۱۳- در سال ۱۹۹۱، قائن با ۱۲/۱۷۱- در سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳، نهبندان با ۱۲/۱۲- در سال ۱۹۹۶، فردوس با ۹/۰۱- در سال ۲۰۰۵، طبس با ۲۵/۴۲- از سپتامبر سال ۲۰۰۵ شروع و تا سپتامبر سال ۲۰۰۷ ادامه داشته است و بشرویه با ۱۴/۷۶- در سال ۲۰۱۶ رخ داده است. این نتایج نشان می‌دهد در ۳۰ سال اخیر خشکسالی در استان خراسان جنوبی دیده شده و این شدت در حال افزایش است. همچنین شهرستان فردوس بیشترین تداوم خشکسالی را با ۶۸ ماه داشته و شهرستان طبس کمترین تداوم خشکسالی را با ۵۳ ماه داشته اما با این وجود بیشترین شدت خشکسالی با مقدار ۲۵/۴۲- مربوط به شهرستان طبس می‌باشد.

های خشکسالی خراسان جنوبی را با استفاده از شاخص SDI رسیدند که کمترین SDI (۲/۱۸-) مربوط به سال ۲۰۰۱ می باشد. در دوره زمانی ۱۹۷۴-۲۰۰۳ بررسی کردند و به این نتیجه

جدول ۱۲- تعداد ماه‌های طبقه‌بندی شده هر شهرستان بر اساس RAI

شهرستان	مرطوب	نزدیک نرمال	خشکسالی ضعیف	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	خشکسالی بسیار شدید
بیرجند	۷۴	۴۸	۱۷	۴۰	۸۸	۱۰۵
قائن	۷۷	۴۷	۲۸	۲۸	۸۳	۱۰۹
نهبندان	۶۵	۳۶	۱۸	۲۶	۱۰۳	۱۲۴
فردوس	۸۹	۳۸	۲۳	۲۶	۷۱	۱۲۵
طبس	۸۸	۳۵	۱۴	۲۳	۷۸	۱۳۴
بشرویه	۹۱	۳۴	۱۶	۲۴	۶۸	۱۳۹



شکل ۳- نمودار شاخص RAI سالانه شهرستان‌ها

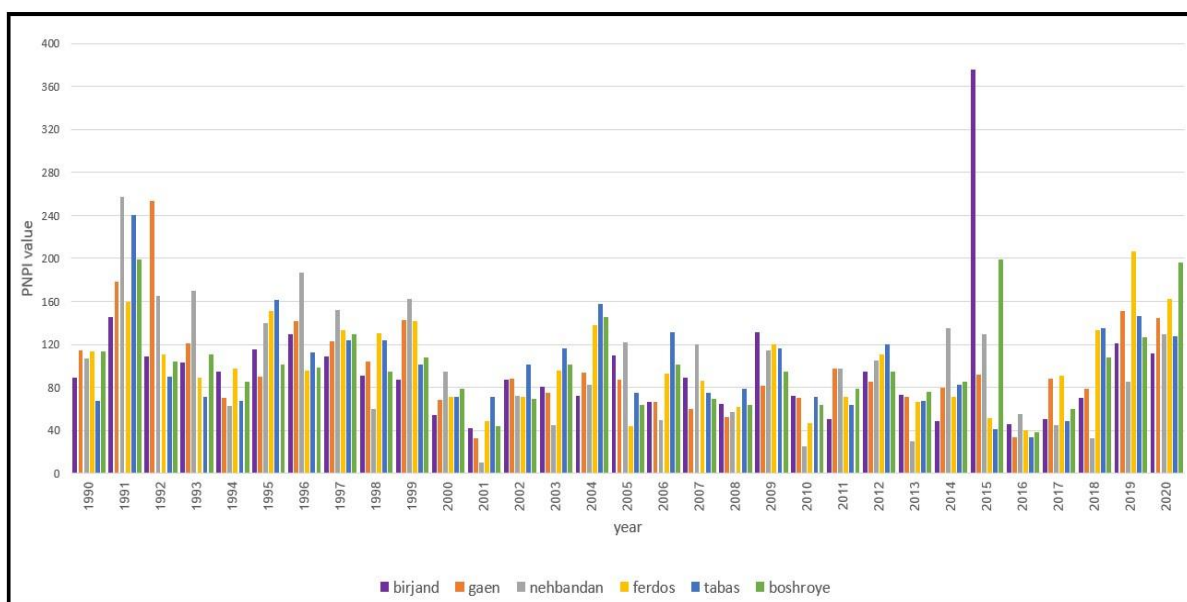
۳-۴. درصد نرمال بارندگی (PNPI)

خشکسالی شدید را داشته، نهبندان بیشترین خشکسالی متوسط را داشته، قائن نزدیک به نرمال بوده و فردوس بیشترین ماه‌های مرطوب را داشته است.

محاسبه شاخص PNPI، با کدنویسی در نرم‌افزار R انجام شد. نتایج استخراج شده از این شاخص نشان می‌دهد، بشرویه و طبس به ترتیب بیشترین ماه‌های خشکسالی خیلی شدید را داشته‌اند. همچنین بیرجند پس از طبس بیشترین تعداد ماه

جدول ۱۳- تعداد ماه‌های طبقه‌بندی شده هر شهرستان بر اساس PNPI

شهرستان	مرطوب	نرمال	خشکسالی ضعیف	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	خشکسالی خیلی شدید
بیرجند	۱۰۶	۲۵	-	۲۰	۲۳	۱۹۸
قائن	۱۱۰	۳۲	-	۱۹	۱۹	۱۹۲
نهبندان	۸۱	۲۷	-	۲۳	-	۲۴۱
فردوس	۱۱۳	۱۳	۱۹	-	۲۱	۲۰۶
طبس	۱۱۰	۲۵	-	-	۳۴	۲۰۳
بشرویه	۹۹	۲۵	۱۹	-	-	۲۲۹



شکل ۴- نمودار شاخص PNPI سالانه شهرستان‌ها

اقتصادی و اجتماعی در کشور شده است. با توجه به اینکه شاخص‌های استاتیک مانند RAI و PNPI در مقیاس ماهانه جهت پایش خشکسالی با خطا مواجه می‌شوند بهتر است از شاخص‌های دینامیک استفاده شود. از بین شاخص‌های دینامیک، شاخص SDI با مقیاس شش تا ۱۲ ماهه برتری دارد، زیرا در مقیاس ماهانه با مشکل مواجه نخواهد شد و قادر است ارزیابی‌های ماهانه خشکسالی را در اختیار قرار دهد (کرمی و همکاران، ۱۳۹۳). با توجه به نتایج استخراج شده از شاخص‌های SDI، RAI و PNPI، شاخص RAI تشابه

با توجه شکل ۴، شهرستان‌هایی که مجموع PNPI سالانه آن‌ها زیر ۴۰٪ باشد دارای خشکسالی بسیار شدید هستند که در شکل ۴، سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۶ مقدار PNPI اکثر شهرستان‌ها زیر مقدار ۴۰٪ است که نشان‌دهنده خشکسالی بسیار شدید در این دو سال می‌باشد.

۳-۵. بحث

خشکسالی که یکی از بلاای طبیعی است که طی سال‌های اخیر موجب برهم خوردن تعادل اقلیمی و بروز پیامدهای

بیشتری با SDI داشته و سپس شاخص PNPI قرار می‌گیرد. علت تشابه دو شاخص RAI و PNPI سنجش مقدار بارندگی در هر ماه است. جهانگیر و نوروزی (۱۳۹۶) با مقایسه عددی شاخص‌های هواشناسی RAI و PNPI در استان خوزستان به این نتیجه رسیدند که به دلیل اینکه پایه هر دو شاخص بارش است، نتایج مشابهی را نیز ارائه داده‌اند. تفاوت این مورد که شاخص SDI تعداد ماه‌های نرمال را زیاد نشان داده و شاخص‌های RAI و PNPI تعداد ماه‌های خشکسالی‌های خیلی شدید را نشان داده، به این علت می‌باشد که شاخص SDI برای هر ماه میانگین ۱۲ ماه قبل را در نظر می‌گیرد و چون کمتر اتفاق افتاده که ۱۲ ماه قبل، خشک باشند تعداد ماه‌ها به طبقه نرمال منتقل شده است؛ اما در شاخص‌های RAI و PNPI به دلیل اینکه صرفاً بارندگی همان ماه در نظر گرفته می‌شود در طبقه بسیار خشک طبقه‌بندی شده‌اند، در حالی که این خشکسالی موقتی است و با بارش ماه بعد احتمال جبران آن وجود دارد. تئوری RUN خروجی‌های شاخص SDI را به عنوان ورودی در نظر گرفته و تداوم و میزان شدت خشکسالی‌ها را نشان می‌دهد که تاییدی بر نتایج شاخص SDI است. نتیجه پژوهش کرمی و همکاران (۱۳۹۳) تایید می‌کند که شاخص RAI شباهت بیشتری نسبت به PNPI با شاخص SDI دارد. بنابر گفته‌های فوق، شاخص SDI دوازده ماهه می‌تواند خشکسالی را نزدیک‌تر به واقعیت نشان دهد.

۴. نتیجه‌گیری

خشکسالی یکی از پدیده‌های حادی است که آگاهی از وقوع زمان، شدت و تداوم این رخداد، کمک درخور توجهی به مدیران بخش‌های مختلف خواهد داد. هدف از این پژوهش بررسی قابلیت نرم‌افزار R در تعیین خشکسالی می‌باشد. محدوده مورد مطالعه این پژوهش، شش شهرستان بیرجند، قائن، نهبندان، فردوس، طبس و بشرویه در استان خراسان جنوبی است که میزان و شدت خشکسالی این

شهرستان‌ها در طول دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۲۰ از طریق کدنویسی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی بررسی شد. شاخص‌های SDI و RunDS از کتابخانه Drought و شاخص‌های RAI و PNPI از طریق کدنویسی در نرم‌افزار R محاسبه شدند. نتایج شاخص SDI نشان داد، ماه اکتبر در طول دوره آماری خشک‌ترین ماه است. همچنین از نظر این شاخص سال ۲۰۰۸، خشک‌ترین سال بوده و شهرستان طبس با مقدار خشکسالی ۲/۴۷- خشک‌ترین شهرستان می‌باشد. تئوری RUN نشان داد، شهرستان فردوس بیشترین تداوم خشکسالی را داشته و شهرستان طبس با شدت ۲۵/۴۲- بیشترین شدت خشکسالی را در بین شهرستان‌ها داشته است. همچنین این شاخص سال ۲۰۰۱ را به عنوان خشک‌ترین سال معرفی کرد. نتایج RAI بیانگر آن است که بیشترین خشکسالی‌های بسیار شدید در بشرویه و طبس رخ داده و بیشترین خشکسالی شدید در شهرستان نهبندان به وقوع پیوسته است. نتایج PNPI حاکی از آن است که شهرستان‌های طبس و بشرویه نیز بیشترین تعداد خشکسالی‌های خیلی شدید را تجربه کرده‌اند و بعد از طبس، بیرجند بیشترین تعداد خشکسالی شدید را تجربه کرده است. طبق این شاخص، سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۶ جزو خشک‌ترین سال‌ها در طی دوره آماری بوده‌اند. بنابراین، شهرستان طبس از لحاظ تمام شاخص‌ها، خشک‌ترین شهرستان تعیین شد که ۵۳ ماه تداوم خشکسالی داشته است. همچنین با توجه به اینکه شاخص SDI دوازده ماهه از میانگین ۱۲ ماه گذشته استفاده می‌کند، این شاخص تعداد ماه‌های نرمال را بیشتر از شاخص‌های RAI و PNPI نشان داده است. با توجه به اینکه مقادیر شاخص‌های RAI و PNPI صرفاً به بارندگی همان ماه توجه می‌کند برای تعیین خشکسالی ایجاد خطا می‌کند. شاخص SDI در مقیاس‌های زمانی بلند مدت، نتایج نزدیک‌تر به واقعیت را برآورد می‌کند. با توجه به اینکه نتایج حاصل از پژوهش با پژوهش‌های دیگری که توسط کتابخانه Drought

۶. جهانگیر، م.ح و نوروزی، ا.، ۱۳۹۶، مقایسه عددی شاخص‌های هواشناسی RAI و PNPI به منظور ارزیابی و پهنه‌بندی وضعیت خشکسالی در استان خوزستان، نشریه اکوهیدرولوژی، جلد ۴، شماره ۳، صفحه‌های ۹۲۳ تا ۹۳۰.

۷. رهنما، س.، شهیدی، ع.، یعقوب زاده، م و مهران، ع.ا.، ۱۴۰۰، ارزیابی و پهنه‌بندی خشکسالی هواشناسی در استان خراسان جنوبی، پنجمین کنگره ملی آبیاری وزهکشی ایران. دانشگاه بیرجند.

۸. سیاسر، ه.، ۱۳۹۴، پایش خشکسالی با استفاده از تئوری RUN در استان سیستان و بلوچستان، اولین کنگره علمی پژوهشی توسعه و ترویج علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست ایران. انجمن توسعه و ترویج علوم و فنون بنیادین.

۹. صالحی طبس، م.، یعقوب‌زاده، م.، زمانی، غ و امیرآبادی‌زاده، م.، ۱۳۹۹، اثر تغییر اقلیم بر شدت و فراوانی خشکسالی در خراسان جنوبی، مجله آبیاری و زهکشی ایران، سال ۱۴، شماره ۲، صفحه‌های ۴۸۲ تا ۴۹۷.

۱۰. قوام سعیدی نوقایی، س.، سعقوب‌زاده، م.، نجفی مود، م.ح و صالحی طبس، م.، ۱۳۹۹، تحلیل وضعیت خشکسالی هواشناسی ایستگاه نیشابور به کمک داده‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم، فصلنامه دانش آب و خاک، سال ۳۰، شماره ۴، صفحه‌های ۱۵ تا ۲۸.

۱۱. کرمی، م.، داداشی رودباری، ع و رحیمی، ع.، ۱۳۹۳، مقایسه پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های SPI، PNPI، RAI و پهنه‌بندی آنها در استان کرمانشاه. اولین همایش ملی آب، انسان، زمین، اصفهان.

۱۲. کریمی، و.، اکبری نودهی، د.، ۱۳۹۸، مقایسه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در استان مازندران، نیوار، دوره ۴۳، شماره ۱۰۶-۱۰۷، صفحه‌های ۷۳ تا ۸۵.

۱۳. مصطفی‌زاده، ر و ذبیحی، م.، ۱۳۹۵، تحلیل و مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI در ارزیابی خشکسالی هواشناسی با استفاده از نرم‌افزار R - بررسی موردی: استان

انجام نشده‌اند، شباهت دارد می‌توان نتیجه گرفت که کتابخانه Drought در نرم‌افزار R می‌تواند در بررسی خشکسالی‌ها مورد استفاده قرار بگیرد. با توجه به اینکه تمامی شهرستان‌های مورد مطالعه، خشکسالی را تجربه کرده‌اند، توصیه می‌شود پیش‌بینی‌های لازم جهت جلوگیری از آسیب‌های خشکسالی انجام گیرد. همچنین تمهیدات مناسبی برای مقابله با خشکسالی در نظر گرفته شود.

۵. منابع

۱. ایران‌صالحوند، م.م و مومنی، م.، ۱۳۹۲، پهنه‌بندی خشکسالی با شاخص‌های SPI, PNI, ZCI, DI و دنباله‌ها در شهرهای خوزستان در محیط GIS، فصلنامه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری چشم‌انداز زاگرس، جلد ۵، شماره ۱۷، صفحه‌های ۳۵ تا ۵۲.

۲. پارسامهر، ا.ح.، مبین، م.ح و خسروانی، ز.، ۱۳۹۷، استفاده از تنوع RUN در تحلیل شدت، مدت و دوره بازگشت خشکسالی (مطالعه موردی: استان فارس)، اکوهیدرولوژی، جلد ۵، شماره ۲، صفحه‌های ۴۷۱ تا ۴۸۱.

۳. جان‌بزرگی، م.، حنیفه‌پور، م و خسروی، ح.، ۱۴۰۰، تغییرات زمانی خشکسالی هواشناسی - هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: استان گیلان)، مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، جلد ۱، شماره ۲، صفحه‌های ۱ تا ۱۳.

۴. اصلاحی، م.، سبحانی، ب و پوراصغر، ف.، ۱۳۹۳، بررسی و کاربرد شاخص خشکسالی تبخیر و تعرق بارش استاندارد شده (SPETI) مطالعه موردی: ایستگاه هواشناسی تبریز، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، جلد ۵، شماره ۱۹، صفحه‌های ۲۳ تا ۳۸.

۵. جهانگیر، م.ح و سارانی راد، م.، ۱۳۹۸، بررسی وضعیت خشکسالی در استان خراسان جنوبی توسط شاخص درصد بارش نرمال (PNPI) و شاخص روش استانداردسازی (Z)، علوم و تکنولوژی محیط زیست، جلد ۲۱، شماره ۴، صفحه‌های ۴۵ تا ۵۹.

20. Mishra, A. and Singh, V. P., 2010, A review of drought concepts, *Journal of Hydrology*, 391, 202-216.
21. Rooy, M.P. and Van, A. 1965. Rainfall Anomaly Index Independent of Time and Space, *Notos. Weather Bureau South Africa*, 14(43).
22. Hao, Z. et al. (2017), An integrated package for drought monitoring, prediction and analysis to aid drought modeling and assessment, *Environ Modell Softw*, 91, 199-209.
23. Yevjevich, V., (1967). An Objective Approach to Definitions and Investigations of Continental Hydrologic Droughts. *Hydrology Paper 23. Colorado State University, Fort Collins, CO*.
24. Siphesihle Ndlovu, M., Demlie, M., 2020. Assessment of Meteorological Drought and Wet Conditions Using Two Drought Indices Across KwaZulu-Natal Province, South Africa. *Atmosphere*, 11, 623; doi:10.3390/atmos11060623
25. Javan, kh., Azizzadeh, M.R., Yousefi, S., 2016. An Investigation and assessment of meteorological drought in Lake Urmia Basin using drought indices and probabilistic methods. *Natural Environment Change*, Vol. 2, No. 2, pp. 153- 164.
- کردستان، فیزیک زمینی و فضا، جلد ۴۲، شماره ۳، صفحه‌های ۶۳۳ تا ۶۴۳.
۱۴. میریعقوب زاده م.ح.، خسروی، ا و ذیحی، م.، ۱۳۹۸، مروری بر شاخص‌های خشکسالی و بررسی عملکرد آنها. نشریه آب و توسعه پایدار، جلد ۶، شماره ۱، صفحه‌های ۱۰۳ تا ۱۱۲.
۱۵. موغلی، م.، ۱۳۹۴، ارزیابی شاخص‌های درون‌یابی در پهنه‌بندی خشکسالی‌ها با استفاده از GIS - مطالعه موردی: لارستان. فصلنامه جغرافیای طبیعی، جلد ۸، شماره ۸۲، صفحه‌های ۲۹-۴۲.
16. Shahid, S., and Behrawan, H., 2008. Drought risk assessment in the western part of Bangladesh. *Natural Hazards* 46: 391-413.
17. Pandey, S., Pandey, A., Nathawat, M., Kumar, M., and Mahanti, N., 2012. Drought hazard assessment using geoinformatics over parts of Chotanagpur plateau region, Jharkhand, India. *Natural Hazards* 63: 279-303.
18. McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J., 1993, The relationship of drought frequency and duration to time scales, In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179-183.