

Monitoring and Zoning of Drought in Southern Alborz

Porya Ghasemi

Phd Condidate, Department of water engineering and sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Masoud Karbasi (Corresponding Author)

Associate Professor, Water engineering department,, Agriculture Falulty, University of Zanjan, Zanjan, Iran
m.karbasi@znu.ac.ir

Alireza Zamani Noori

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Mahdi Sarai Tabrizi

Assistant Professor, Department of water engineering and sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

Drought is one of the most important natural hazards and often affects the lives of many people and causes economic damage, environmental damage and social problems. This study was conducted to evaluate the drought trend, intensity and duration during 1988-2019 in relation to the existing climates in the southern Alborz region. To describe droughts in 3, 6, 12 and 24-month time scales, two drought indices, namely standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) were used. In the case of SPEI, evapotranspiration was an important factor in monitoring drought. Therefore, (HS) method was used to calculate evapotranspiration. Drought intensity and duration maps were presented for SPI and SPEI. The correlation between SPI and SPEI was also examined. In the present results, unlike humid climates, SPI does not have a good correlation with SPEI in extremely arid and arid climates and shows the importance of reference evapotranspiration (ET₀) to identify drought in these areas and the index (SPEI) has more accurate monitoring results. Relative to the index (SPI). In addition, drought intensity maps for (SPI) and (SPEI) have shown that the region is experiencing very dry conditions and water resources are affected by intense drought in the short and medium term. Short-term drought in the east of the region (Zanjan) and long-term drought in the center and west of the region (Garmsar, Semnan, Karaj, Tehran) have been more.

Keywords: Drought, SPI and SPEI indicators, Drought Intensity and duration, Correlation coefficient, Zoning

 DOR: 20.1001.1.20087845.1400.10.39.6.2

مقاله پژوهشی

پایش و پهنه‌بندی خشکسالی در البرز جنوبی

پوریا قاسمی؛ دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مسعود کرباسی؛ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

علیرضا زمانی نوری؛ دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مهدی سرائی تبریزی؛ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

خشکسالی یکی از مهمترین مخاطرات طبیعی است و اغلب زندگی تعداد زیادی از مردم را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باعث خسارات اقتصادی، آسیب‌های زیست محیطی و معضلات اجتماعی می‌شود. این مطالعه برای ارزیابی روند خشکسالی، شدت و مدت آن در طی سال‌های ۱۹۸۸-۲۰۱۹ نسبت به اقلیم‌های موجود در منطقه البرز جنوبی انجام شده است. برای توصیف خشکسالی‌ها در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه، از دو شاخص خشکسالی، یعنی شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) استفاده شد. در مورد محاسبه (SPEI)، تبخیر و تعرق عامل مهمی برای پایش و نظارت بر خشکسالی بود. بنابراین برای محاسبه تبخیر و تعرق از روش هارگریوز-سامانی (HS) استفاده شد. نقشه‌های شدت و مدت خشکسالی برای SPI و SPEI ارائه شدند. همبستگی SPI و SPEI نیز مورد بررسی قرار گرفت. که در نتایج حاضر بر خلاف اقلیم‌های مرطوب، SPI با SPEI در اقلیم‌های بیش از حد خشک و خشک همبستگی خوبی نداشته و نشان دهنده اهمیت تبخیر و تعرق مرجع (ETO) برای شناسایی خشکسالی در این مناطق می‌باشد و شاخص (SPEI) دارای نتایج پایش دقیق‌تری نسبت به شاخص (SPI) می‌باشد. علاوه بر این، نقشه‌های شدت خشکسالی برای (SPI) و (SPEI) نشان داده است که منطقه با شرایط بسیار خشک مواجه بوده است و منابع آب هم در کوتاه مدت و هم در میان مدت تحت تأثیر شدت خشکسالی قرار دارند. که خشکسالی کوتاه مدت در شرق منطقه (زنجان) و خشکسالی بلند مدت در مرکز و غرب منطقه (گرمسار، سمنان، کرج، تهران) بیشتر بوده است.

کلمات کلیدی: خشکسالی، شاخص‌های SPI و SPEI، شدت و مدت خشکسالی، ضریب همبستگی، پهنه‌بندی.

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۲/۲۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۴/۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۱

نویسنده مسئول: مسعود کرباسی، دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران m.karbasi@znu.ac.ir

مقدمه و بیان مسئله :

کشور ایران با مساحتی در حدود ۱/۶ میلیون کیلومتر مربع، هجدهمین کشور بزرگ جهان می‌باشد. که به دلیل دارا بودن موقعیت خاص جغرافیایی و ویژگیهای توپوگرافی، هر منطقه از آن آب و هوای متفاوتی دارد (فرج‌زاده، ۸۴، ۲). از نظر تاریخی، ایرانیان همیشه با شرایط خشک و تعدادی از چالش‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی مرتبط با خشکسالی روبرو بوده‌اند (کشاورز و همکاران، ۲۰۱۳). در میان فاجعه‌های آب و هوایی، از نظر اقتصادی خشکسالی در مقایسه با هر فاجعه دیگری قدرت تخریب بیشتری دارد. خشکسالی به محصولات زراعی برای تأمین خوراک ۸۱ میلیون نفر در سال آسیب می‌رساند، که چندین برابر بیشتر از خسارات ناشی از سیل است (Damania et al., 2017). در سالهای اخیر گزارش شده که فرکانس و شدت خشکسالی در جهان افزایش یافته است بنابراین، ارزیابی تغییرات و پایش خشکسالی برای مقاومت در برابر تغییرات محیطی جهانی بسیار مهم است (Qutbudin et al, 2019: 1). خشکسالی اثرات منفی فراوانی در بخش‌های زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی، در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی ایجاد می‌کند. تاثیر خشکسالی را می‌توان با استفاده از سری‌های زمانی شاخص خشکسالی اندازه‌گیری نمود (چن و همکاران، ۲۰۱۳: ۷۹۷). از آنجا که عوامل بسیاری در به وقوع پیوستن یک خشکسالی دخالت دارند، شاخص‌های مختلفی برای پایش خشکسالی تعریف شده‌اند که هر شاخص تنها یک یا چند پارامتر خشکسالی به وقوع پیوسته را می‌سنجد (کارآموز و عراقی‌نژاد، ۱۳۸۴). تعدادی از شاخص‌ها برای شناسایی خشکسالی‌های هواشناسی توسعه یافته‌اند مانند، شاخص خشکسالی پالم (PDSI)^۱، توسط پالم (۱۹۶۵)، شاخص بارش استاندارد شده (SPI)^۲، توسط مک کی و همکاران (۱۹۹۳)، شاخص خشکسالی موثر (EDI)^۳، توسط بویون و ویلهایت (۱۹۹۹)، شاخص فرکانس خشکسالی (DFI)^۴، توسط گونزالس و والدس (۲۰۰۶)، شاخص خشکسالی احیای بارش (RDI)^۵، توسط تساکریس و همکاران (۲۰۰۷) و شاخص بارش تبخیر- تعرق استاندارد شده (SPEI)^۶ و یسنت سرانو و همکاران (۲۰۱۰). در این میان SPI و SPEI بیشترین تعداد را دارند و به طور گسترده استفاده می‌شود (فرانک و همکاران، ۲۰۱۷). در میان شاخص‌های متعدد موجود، شاخص بارندگی استاندارد شده SPI که توسط مک کی و همکاران (۱۹۹۳) ارائه شده است، در پایش دوره‌های خشک و تر، گسترده‌ترین کاربرد را دارا می‌باشد (سرینالیدی و همکاران، ۲۰۰۹) شاخص SPI بر اساس سری زمانی بارش تجمعی ماهانه و در مقیاس‌های زمانی مختلف، می‌تواند به تجزیه و تحلیل انواع مختلف پدیده‌های خشکسالی (مانند هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و غیره) به کار برده شود و همچنین به دلیل ماهیت استاندارد آن، برای مقایسه شرایط خشکسالی در دوره‌های زمانی مختلف و مناطق با شرایط آب و هوایی مختلف استفاده گردد (بوناکورسو و همکاران، ۲۰۰۳) علاوه بر این، به علت ماهیت احتمالاتی آن، به نظر می‌رسد که شاخص SPI برای انجام تجزیه و تحلیل ریسک خشکسالی کافی باشد (گاتمن، ۱۹۹۸). مهمترین مزیت شاخص SPEI نسبت به دیگر شاخص‌های پایش خشکسالی که کاربرد زیادی نیز دارند در این امر نهفته است که این شاخص توانایی تشخیص اثر تغییر مقادیر تبخیر و تعرق و دما را در ارتباط با گرمایش جهانی و کمبود آب داراست. بنابراین از آنجا که پدیده خشکسالی به عنوان یک بخش طبیعی و جدا ناپذیر از محیط زیست ایران می‌باشد، لازم است که در جهت شناخت هرچه بیشتر این پدیده، گام‌های اساسی برداشته شود. وجود یک سامانه مدیریت خشکسالی خصوصاً بر مبنای پایش خشکسالی می‌تواند تا حد قابل توجهی از خسارات خشکسالی‌ها بکاهد. متغیرهای بارش و تبخیر و تعرق، دو پارامتر مهم و ضروری برای پایش خشکسالی‌های هواشناسی می‌باشند (بلنکینسوپ و فولر، ۲۰۰۷).

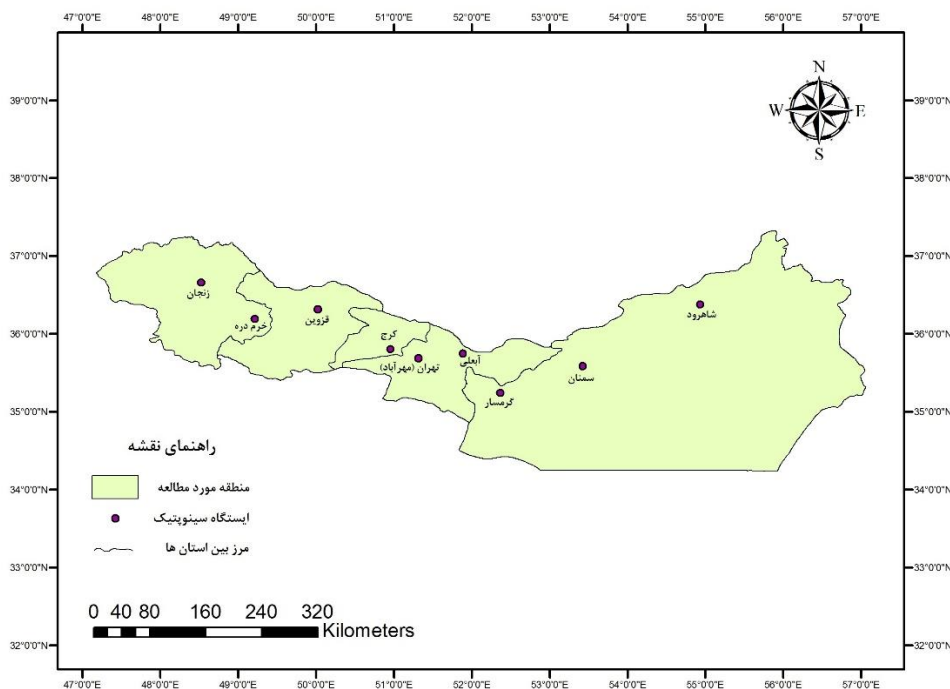
1. Palmer drought severity index
2. Standardized Precipitation Index
3. Effective Drought Index
4. Drought Frequency Index
5. Reconnaissance Drought Index
6. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

تساکریس و همکاران (۲۰۰۷) با بیان این که خشکسالی‌های منطقه‌ای مدیترانه با افزایش دما و به تبع آن افزایش تبخیر و تعرق همراه هستند و شاخص‌های مبتنی بر بارش به تنهایی نمی‌تواند بیانگر خصوصیات خشکسالی در این مناطق باشند. شاخص SPEI به‌طور گسترده در مطالعات مختلف تحلیل تغییرات مکانی خشکسالی، پایش خشکسالی، پیش‌بینی خشکسالی، فرآیندهای جوی خشکسالی، تغییر اقلیم و شناسایی اثرات خشکسالی در بخش‌های مختلف هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و سیستم‌های اکولوژیک استفاده شده است (بگوریا و همکاران، ۲۰۱۴) منصور و همکاران (۲۰۱۳) به ارزیابی اثرات خشکسالی بر کشت گندم به عنوان یک محصول استراتژیک در ایران، با استفاده از شاخص SPI پرداختند. برای محاسبه شاخص SPI از داده‌های بارندگی ماهانه ۴۸ ایستگاه سینوپتیک، در دوره آماری ۳۰ ساله استفاده نمودند. آنها نقشه شاخص خطر خشکسالی‌ها را بر اساس چهار سطح کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد طبقه‌بندی نمودند و همچنین آنها از لحاظ جغرافیایی، مناطق اصلی خطر خشکسالی را به پنج منطقه تقسیم‌بندی نمودند و نشان دادند که روند وقوع مکرر خشکسالیها در شمال غرب ایران (منطقه آذربایجان تا دریای خزر) بسیار زیاد، جنوب شرق (منطقه بلوچستان) زیاد، مرکز (منطقه اصفهان) متوسط، شمال (منطقه خراسان) و جنوب غربی (منطقه خوزستان تا فارس) کم می‌باشند. ویست سرانو و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی نقش بارش و تبخیر و تعرق در چهار شاخص خشکسالی شامل شاخص احیای بارش (RDI)، شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI)، شاخص خشکسالی پالمراستندارد شده (SPDI) و شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در مناطق مختلف اقلیمی دنیا پرداختند. آنها اظهار داشتند هر یک از شاخص‌های مورد بررسی نسبت به تغییر مقادیر بارش و تبخیر و تعرق دارای حساسیت می‌باشند اما شدت و چگونگی این حساسیت در میان شاخص‌های مذکور تفاوت قابل ملاحظه‌ای باهم دارند. بر پایه‌ی نتایج بدست آمده نتیجه‌گیری نمودند که شاخص (SPEI) به میزان حساسیت برابر نسبت به بارش و تبخیر و تعرق می‌تواند شاخص مناسبی برای پایش خشکسالی باشد. گنست و همکاران (۲۰۰۹) ارتباط بین خشکسالی‌های هواشناسی و عملکرد محصولات عمده در شرایط مختلف آب و هوایی اروپا (آتلانتیک، قاره‌ای و مدیترانه‌ای) بررسی کردند. آنها از شاخص‌های خشکسالی (SPI) و (SPEI) در مقیاس‌های زمانی ۱، ۲، ۳ و ۶ ماهه برای یافتن ارتباط بین خشکسالی و عملکرد محصولات کشاورزی استفاده نمودند. و از تاثیر بازه‌های خشکی بر عملکرد محصولات را در مناطق با شرایط مختلف آب و هوایی متفاوت گزارش کردند. مورهد و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی با بررسی مروری شاخص‌های خشکسالی کشاورزی در مناطق نیمه‌خشک، به پایش خشکسالی در ۱۲ دشت از ایالت تگزاس پرداختند. بر پایه‌ی بررسی آنها شاخص (SPEI) برای پایش خشکسالی کشاورزی دارای نتایج رضایت‌بخشی بوده است. قبائی سوق و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی ارتباط بین شاخص‌های خشکسالی (SPI) و (SPEI) در ۱۱ ایستگاه مختلف از ۶ ناحیه‌ی متفاوت اقلیمی در گستره‌ی ایران در مقیاس‌های زمانی ۱ تا ۲۴ ماهه بیان داشتند نتایج شاخص‌های مذکور در مناطق مرطوب و ساحلی دارای بیشترین تطابق و در مناطق خشک دارای کمترین تطابق با یکدیگر می‌باشند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که شاخص (SPEI) با توجه به منظور نمودن نقش دما از طریق وارد نمودن تبخیر و تعرق در مدل توازن آبی خود دارای نتایج پایش دقیق‌تری نسبت به شاخص (SPI) می‌باشد. بذرافشان (۲۰۱۷) روند و ارتباط SPI و SPEI مبتنی بر دما را در مقیاس ۱۲ ماهه در بیش از ۱۵ ایستگاه طی سالهای ۱۹۵۱-۲۰۱۴ در ایران بررسی کرد. وی تفاوت بین SPI12 و SPEI12 را با تغییرات دما تحت تاثیر تغییرات ETO توضیح داد. شرافتی و همکاران سال (۲۰۲۰) به علت همبستگی بین SPI و SPEI با استفاده از پایش خشکسالی ایران را به ۸ منطقه آب و هوایی تقسیم کرده و فقط با نتایج شاخص SPI مطالعه کردند. نتایج نشان داد که خشکسالی‌های کوتاه مدت در شمال و بلند مدت در جنوب کشور شدیدتر هستند. هدف اصلی این مطالعه بررسی و پایش ویژگی‌های مختلف خشکسالی، مانند شدت (I) و مدت زمان (D) در منطقه البرز جنوبی است. برای درک بهتر تاثیر تغییرات مکانی و زمانی بارش و تبخیر و تعرق در ویژگی‌های

خشکسالی از شاخص‌های SPI و SPEI برای چهار گام زمانی مختلف یعنی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ استفاده شده است. بدین منظور از داده‌های ثبت شده در ۹ ایستگاه سینوپتیک برای بارش‌های مختلف طی ۳۳ سال در بازه ۱۹۸۸-۲۰۱۹ استفاده گردید.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی شامل پنج استان سمنان، تهران، کرج، قزوین و زنجان تقریباً تمامی دامنه‌های جنوبی رشته کوه‌های البرز و دشت‌ها و جلگه‌های متصل به آن را تا قلب کویر مرکزی فراگرفته است. طول جغرافیایی ۴۷ تا ۵۷ درجه شرقی و عرض جغرافیایی منطقه بین ۳۳ تا ۳۷ درجه شمالی متغیر است. سلسله جبال البرز در بخش شمالی چون دیوارهای ستبر مانع از نفوذ جریان‌های مرطوب خزری به بخش‌های جنوبی است. به این دلیل اقلیم‌شناسان البرز را یک دیواره اقلیمی نام نهاده‌اند. اثر هوای مرطوب خزری بر دامنه‌های شمالی البرز باعث ریزش بارندگی‌های نسبتاً فراوان در این ناحیه است. در بخش جنوبی ریزش هوای خشک و از رطوبت تخلیه شده کم و بیش پدیده فوهن (گرمداد دامنه) را ایجاد می‌کند. بارندگی سالانه کندوان در دهانه شمالی تونل ۹۰۶ و در کندوان جنوبی ۶۷۸ میلی‌متر در سال است (توفیق و نصیری، ۱۳۸۷: ۲:۲۲۲). در بخش شرقی رطوبت‌چندانی ندارند و به تدریج که از غرب به شرق محدوده مطالعاتی نزدیک می‌شویم از میزان بارندگی کاسته می‌شود و در مناطق کویر مرکزی بارندگی به کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر می‌رسیم. اقلیم منطقه به تبعیت از ارتفاع و میزان بارش طیف گسترده‌ای از اقلیم فراخشک در کویرهای مرکزی تا بسیار مرطوب در ارتفاعات را در بردارد. توده‌های هوایی که منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهند در زمستان‌ها مدیترانه‌ای از غرب، قطبی بری و بری شمالی از قطاع شمالی، قطبی بحری از شمال غربی و در تابستان‌ها بری تروپیکال از منشأ کویر یا صحرای عربستان و آفریقا و همچنین از شمال غربی، از اسکاندیناوی و اروپای مرکزی است. گاهی غلبه توده‌های هوای گرم و مرطوب در تابستان‌ها از سمت شمال غرب یا جنوب غربی (جریان موسمی) نیز گزارش شده است (توفیق و نصیری، ۱۳۸۷: ۲:۲۲۲).



شکل (۱): مشخصات منطقه مورد مطالعه (البرز جنوبی)

جدول (۱): جزئیات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

ایستگاه	Latitude	Longitude	Elevation(m)	Rain (mm)	Climate
آبعلی	35.8 N	51.9 E	2465.2	555.5	Humid
گرمسار	35.2 N	52.4 E	899.9	111.7	Arid
کرج	35.8 N	51 E	1292.9	250.6	Semi-Arid
خرم دره	36.2 N	49.2 E	1575	298.8	Semi-Arid
قزوین	36.3 N	50 E	1279.1	316.4	Semi-Arid
سمنان	35.6 N	53.4 E	1127	135	Arid
شاهرود	36.4 N	54.9 E	1325.2	151.8	Arid
تهران (مهر آباد)	35.7 N	51.3 E	1191	231.2	Arid
زنجان	36.7 N	48.5 E	1659.4	286.7	Semi-Arid

داده‌ها و روش‌ها

به منظور پایش خشکسالی روش‌های گوناگونی ارائه گردیده است که به طور کلی می‌توان به تحلیل داده‌های بارندگی، تحلیل جریان، تحلیل سینوپتیکی و استفاده از اطلاعات زمین ریخت‌شناسی و تاریخی اشاره نمود. در جهت تحقق این هدف نیاز به یک سیستم پایش برای تشخیص به موقع تغییرات آب و هوایی، روند توزیع آب و درنهایت تعیین دقیق و یا احتمال وقوع خشکسالی و شدت مدت انتظار آن احساس می‌شود (هایز، ۲۰۰۰). برای تشخیص و توصیف شروع، شدت، اثر خشکسالی و مطالعه‌ی الگوهای مکانی و زمانی آن نیاز به اعدادی داریم تا بتوانیم این مقادیر را بصورت کمی بررسی کنیم. این مقادیر کمی با نام شاخص‌های خشکسالی خوانده می‌شوند که معمولاً با یک عدد نشان داده می‌شوند و اعتقاد بر این است که این شاخص‌ها به مراتب کاربردی‌تر از داده‌های خام در تصمیم‌گیری‌ها و بررسی روند تغییرات خشکسالی هستند. (هایز و همکاران، ۲۰۰۴: ۱۰۶).

شاخص بارش استاندارد شده SPI

یکی از مرسوم‌ترین شاخص‌ها در تعیین اندازه خشکسالی، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) است. شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI) که اولین بار توسط مک‌کی و همکاران در سال ۱۹۹۳ ارائه شده است، یک ابزار قوی در آنالیز داده‌های بارندگی می‌باشد که موارد استفاده متعدد آن در زمینه پایش و پیش‌بینی خشکسالی در کشورهای مختلف دیده شده است. مقادیر این شاخص در دوره‌های زمانی مورد نظر، با برازش تابع توزیع گامای دو پارامتری بر داده‌های بارندگی و تبدیل آن به توزیع نرمال استاندارد شده با میانگین صفر و انحراف از معیار یک، بدست آمده است. شاخص (SPI) ابزار قوی در آنالیز داده‌های بارش می‌باشد. این ابزار، عددی به بارندگی اختصاص می‌دهد که می‌توان توسط آن عدد، نواحی آب و هوایی کاملاً متفاوت را با هم مقایسه کرد. زیرا ممکن است میزان بارشی که در نواحی حاره‌ای خشکسالی ایجاد می‌کند، همان مقدار بارندگی در نواحی بیابانی "بارش سنگین" ایجاد می‌کند. شاخص (SPI) کل بارندگی تجمعی را برای ایستگاه یا ناحیه خاص در بازه زمانی مشخص برای مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ با میانگین دراز مدت بارندگی برای همان بازه زمانی، در طول دوره آماری مقایسه می‌کند (شفیعی، ۱۳۹۴، ۲۹). تقسیم‌بندی کلاس‌ها و طبقات شدت خشکسالی طبق جدول (۲) می‌باشد. که این طبقه‌بندی اولین بار توسط ادوارد و مک‌کی برای شاخص SPI ارائه گردید.

جدول (۲): طبقه بندی شاخص SPI

مقدار شاخص SPI	طبقه بندی خشکسالی	مقدار شاخص SPI	طبقه بندی خشکسالی
۲ و بیشتر از آن	به شدت مرطوب	۰ تا ۰/۹۹	خشکسالی ملایم
۱/۵ تا ۱/۹۹	خیلی مرطوب	۱- تا ۱/۴۹	نسبتاً خشک
۱ تا ۱/۴۹	نسبتاً مرطوب	۱/۵- تا ۱/۹۹	خیلی خشک
۰ تا ۰/۹۹	مرطوب ملایم	۲- و کمتر از آن	به شدت خشک

شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده SPEI

این نمایه در سال ۲۰۱۰ توسط ویسنت سرانو و همکاران شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده ارائه گردید. در این شاخص همزمان هم به پارامتر بارش و هم به پارامتر تبخیر و تعرق توجه می‌شود. طی چند سال گذشته، شاخص (SPEI) گسترده‌ترین کاربرد را برای نظارت بر خشکسالی پیدا کرده است (بگوریا و همکاران، ۲۰۱۴).

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

محاسبه این شاخص همانند روش ارائه شده برای محاسبه‌ی شاخص SPI نیازمند برآورد مقادیر احتمال تجمعی مقادیر D_i می‌باشد. البته بررسی قابلیت توزیع‌های آماری دیگر خصوصاً تابع توزیع گاما بر سری‌های زمانی SPEI نیز ضروری به نظر می‌رسد. ویسنت سرانو و همکاران با بررسی توابع مختلف سه پارامتری، تابع چگالی احتمال لوگ لوجستیک سه پارامتری را دارای بهترین برازش بر مقادیر مختلفی بر سری‌های زمانی در مقیاس‌های مختلف زمانی D_i تشخیص دادند. فرم کلی تابع چگالی احتمال این تابع به صورت رابطه زیر است.

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2} \quad (2)$$

$$\gamma > D < \infty \quad (3)$$

پارامترهای α ، β و γ مربوط به پارامترهای مقیاس، شکل و اصلی برای مقادیر D_i می‌باشند. فرم تابع احتمال تجمعی لوگ لوجستیک سه پارامتری بصورت زیر می‌باشد.

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^{\beta}\right]^{-1} \quad (4)$$

در مرحله بعد احتمال تجمعی به متغیر نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس ۱ تبدیل می‌گردد که برابر با شاخص SPEI است. تابع کلاسیک آبراموویتز و استیگان (۱۹۶۵) با استفاده از مقادیر تابع $F(x)$ تخمینی برای مقادیر شاخص SPEI می‌باشد

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (5)$$

$$W = \sqrt{-\ln(P)} \quad \text{for } P \ll 0.5 \quad (6)$$

$$P = 1 - F(x) \quad (7)$$

که اگر مقدار P بزرگ تر از ۰/۵ باشد. آنگاه مقدار P با $1-P$ جایگزین خواهد شد. ضرایب ثابت ارائه شده در فرمول‌های فوق، بصورت زیر ارائه می‌گردد. تقسیم‌بندی کلاسها و طبقات شدت خشکسالی به مانند SPI است.

$$\begin{cases} C_0 = 2.515517 \\ C_1 = 0.802853 \\ C_2 = 0.010328 \end{cases} \quad \begin{cases} D_1 = 1.432788 \\ D_2 = 0.189269 \\ D_3 = 0.001308 \end{cases} \quad (8)$$

برآورد تبخیر و تعرق

در این تحقیق برای محاسبه تبخیر و تعرق از روش هارگریوز-سامانی (HS) استفاده شده است. عملکرد روش هارگریوز اصلاح شده برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه در مقایسه با روشهای دیگر چشمگیر است و نیاز کم داده در این روش، آن را به یک روش جذاب در مواقع دقت کم داده‌های اندازه‌گیری شده بدل می‌کند (دروگرز و آلن، ۲۰۰۲، ۳۷). که در آن R_a بیانگر تابش فرازمینی λ گرمای نهان تبخیر می‌باشد.

$$HS = 0.0023 \frac{R_a}{\lambda} (T_{mean} + 17.8) \sqrt{TR} \quad (9)$$

$$TR = T_{max} - T_{min} \quad (10)$$

پس از تعیین شاخص‌های (SPI) و (SPEI) در مقیاس‌های زمانی مختلف، که توسط نرم افزار (R) و (RSTUDIO) محاسبه می‌شود. دو مشخصه اصلی خشکسالی اعم از مدت و شدت خشکسالی محاسبه می‌گردد. برای استخراج مشخصات خشکسالی، سری زمانی بارندگی تجمعی در بازه‌های زمانی دلخواه از قبیل ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ تشکیل و محاسبه می‌گردد. برای تشخیص و توصیف شروع، شدت، اثر خشکسالی و مطالعه‌ی الگوهای مکانی و زمانی آن نیاز به اعدادی داریم تا بتوانیم این مقادیر را به صورت کمی بررسی کنیم. این مقادیر کمی با نام شاخص‌های خشکسالی خوانده می‌شوند که معمولاً با یک عدد نشان داده می‌شوند و اعتقاد بر این است که این شاخص‌ها به مراتب کاربردی‌تر از داده‌های خام در تصمیم‌گیری‌ها و بررسی روند تغییرات خشکسالی هستند. (هایز و همکاران، ۲۰۰۴: ۱۰۹). شاخص‌های خشکسالی در واقع معادلات ریاضی بدست آمده، مربوط به اجزای اصلی تعادل آب با برخی از پارامترهای هواشناسی- هیدرولوژیکی هستند. در واقع این اعداد، ابزارهایی ضروری برای بررسی و نظارت بر خشکسالی هستند، چرا که آنها توابع پیچیده‌ی اقلیمی را بصورت ساده بیان می‌کنند و می‌توانند ناهنجاری‌های اقلیمی مانند شدت، مدت و فراوانی خشکسالی را کمی سازند، علاوه بر این اعداد قادر هستند که برای مخاطبان نشان اطلاعات قابل فهمی را در درک مناسبی از خشکسالی ارائه کنند (کنسلیره، ۲۰۰۷: ۸۰۱). یک شاخص خشکسالی زمانی مفید است که بتواند ارزیابی کمی، ساده و روشنی از خصوصیات اصلی خشکسالی یعنی تداوم، شدت، فراوانی و سطح دربرگیرنده خشکسالی را ارائه دهد (میشرا و سینگ، ۲۰۱۰: ۲۰۲).

انواع مشخصه خشکسالی

تداوم خشکسالی

تعداد سال‌های پشت سر هم که در آنها بارش (جریان سالانه)، پایین‌تر از میانگین دراز مدت قرار دارد. زمان آغاز تا پایان خشکسالی که به عنوان دوره تداوم خشکسالی نامیده می‌شود. مقیاس زمانی دوره تداوم یک خشکسالی می‌تواند از ماه، سال یا یک دوره خاص تفاوت کند. هر قدر تداوم خشکسالی طولانی‌تر شود، میزان ذخایر آب منطقه، تحت خطر جدی قرار گرفته و به همین جهت می‌تواند شدت خشکسالی رخ داده را افزایش دهد.

شدت

تجمع مقادیر بارش (جریان سالانه) برای تداوم خشکسالی است (نسبت حجم خشکسالی و ترسالی به تداوم را گویند)، هر قدر میزان بارندگی نسبت به شرایط نرمال کمتر باشد، به همان اندازه میزان تأثیر خشکسالی بیشتر نمود عینی پیدا می‌کند. علاوه بر این، مدت استمرار حالت خشکسالی در یک منطقه نیز گویای شدت خشکسالی در همان منطقه است یعنی در شرایطی که خشکسالی تنها برای یک ماه استمرار داشته باشد احتمال دارد بارش ماه بعد، میزان کمبود ماه مزبور را جبران نماید. ولی اگر ماه بعدی نیز نسبت به شرایط طبیعی کمبود داشته باشد، به مراتب در شدت بخشیدن حالت خشکسالی مؤثر خواهد بود.

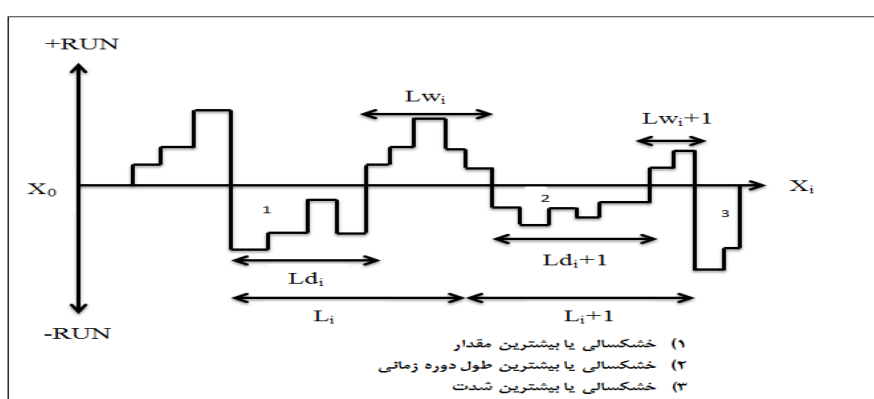
مقدار

متوسط کمبودهای جریان برای تداوم خشکسالی، بررسی و تحلیل دنباله‌ها، از روش‌های متداوم تحلیل خشکسالی استفاده می‌شود که در این روش اگر مقادیر دبی از یک حد آستانه کمتر باشد خشکسالی یا کم‌آبی رخ می‌دهد.

تئوری ران (Run Theory)

یوجویچ با استفاده از تئوری Run سه ویژگی مهم خشکسالی (تداوم، شدت و بزرگی خشکسالی) را تعریف و تشریح کرد و نتیجه گرفت که تئوری Run کاربردهای مؤثری در تحلیل روند خشکسالی‌ها دارد. بر اساس روش ران تست تعریف خاصی را برای خشکسالی قائل شد. منظور از ران دنباله‌ی ممتدی از دنباله‌ها است که مقدار آنها بزرگتر یا کوچکتر از حد (مبنا) باشد. در این تعریف منظور از خشکسالی، یک رشته بدون وقفه از متغیرهاست که زیر سطح مبنا قرار گرفته است (یوجویچ، ۱۹۶۷: ۴-۵). به هنگام استفاده از تئوری ران در بررسی خشکسالی، این تئوری به صورت کمی بیان می‌دارد که چگونه فرآیند هیدرولوژیکی

از بالا و پایین یک آستانه بحرانی عبور می‌کند. قبل از تحلیل، داده‌ها باید از میانگین دراز مدت کم شوند. در شکل (۲) یک سری زمانی گویا از متغیرهای هیدرولوژیکی را در فرایند تئوری ران نشان می‌دهد. که X_0 مقداری از متغیر X است که مقادیر منفی نسبت به آن مشخص و تعریف می‌شود. به عبارتی، X_0 همان سطح بحرانی است برای تحلیل خشکسالی‌ها فقط باقیمانده‌های منفی مورد توجه‌اند، اما ویژگی‌های آن نیز برای تحلیل ترسالی‌ها و ماه‌های تر وجود دارد زمانی که مقدار X به زیر X_0 افت کند شروع خشکسالی را نشان می‌دهد. اندیس L_d نشان‌دهنده مدت خشکسالی و L_w نشان‌دهنده طول دوره ترسالی است و L فاصله بین دو دوره خشکسالی پیوسته و X_0 میانگین سری است.

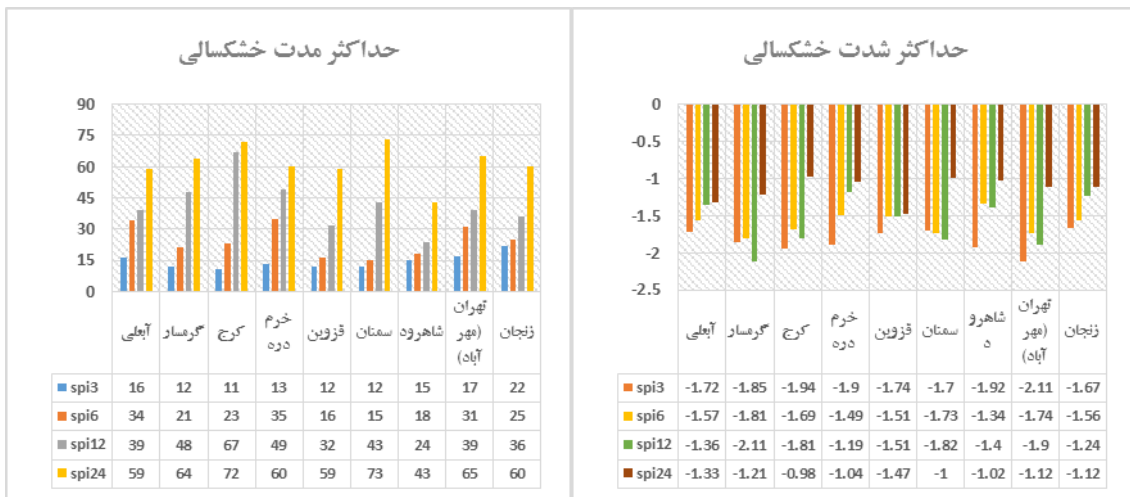


شکل (۲): روند کلی تعیین مشخصه‌های خشکسالی و ترسالی در یک سری زمانی بارش

در تحقیق حاضر به منظور بررسی خصوصیات خشکسالی (زمان شروع، زمان خاتمه، تداوم خشکسالی، شدت خشکسالی و بزرگی خشکسالی) از تئوری (Run تحلیل دنباله‌ها) استفاده گردید. این تئوری فرآیند شروع و خاتمه خشکسالی و ترسالی را از حد بالا و پایین یک آستانه‌ی بحرانی تعیین می‌نماید (مویی و همکاران، ۱۹۸۸). در این تحقیق به عنوان نمونه با استفاده از سری زمانی داده‌های هواشناسی روزانه ۹ ایستگاه هیدرومتری منطقه مورد مطالعه، دوره‌های خشکسالی استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای برآورد شدت، تداوم، مقدار و نرخ خشکسالی مدت خشکسالی و ترسالی مشخصه مدت با استفاده از شمارش تعداد خشکسالی و ترسالی متوالی محاسبه شد. مقدار (حجم خشکسالی) جمع تمام مقادیر کوچکتر از صفر در هر تداوم و برای ترسالی نیز جمع تمام مقادیر بزرگتر از صفر در هر تداوم (ران) هیدرولوژیکی از تئوری ران استفاده شد.

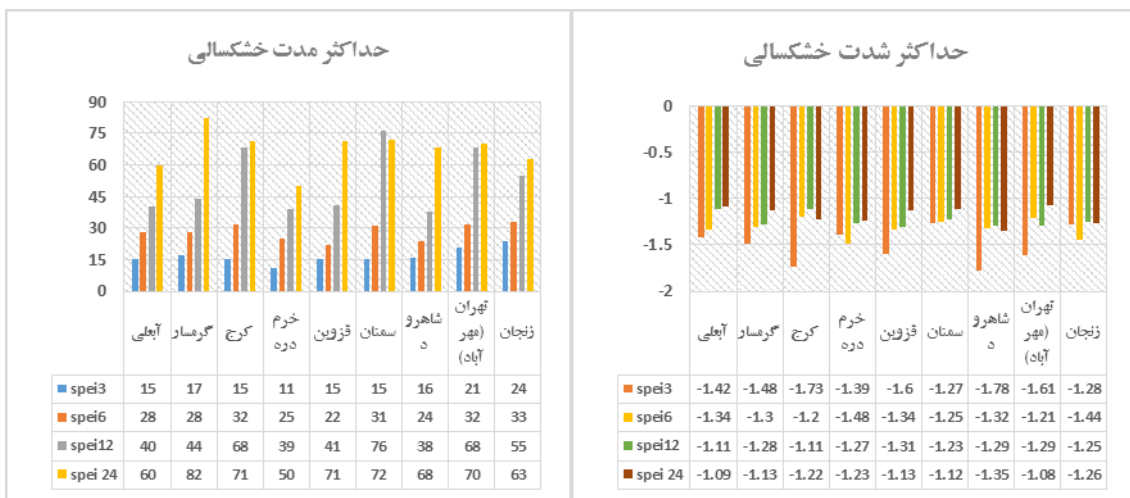
مشخصات آماری و ویژگی خشکسالی

مشخصات آماری از ویژگی‌های خشکسالی برای مناطق مختلف آب و هوایی برحسب SPI و SPEI در شکل ۳ و ۴ برای نشان دادن ویژگی‌های منطقه‌ای و خشکسالی ارائه شده است. حداکثر زمان خشکسالی کوتاه مدت SPI3 بر حسب ماه در ایستگاه سینوپتیک زنجان به مدت زمان ۲۲ ماه و حداقل آن در شهر کرج و ۱۱ ماه بوده است. حداکثر زمان خشکسالی کوتاه مدت SPI6 در ایستگاه خرم دره با ۳۵ ماه و ایستگاه آبعلی ۳۴ ماه، حداکثر زمان خشکسالی بلند مدت SPI12 و SPI24 به ترتیب در ایستگاه شاهرود با مدت زمان ۲۴ ماهه و ایستگاه سمنان ۷۳ ماهه بوده است. از طرفی حداکثر شدت SPI3 در تهران (مهرآباد) با مقدار $-2/11$ ، حداکثر شدت SPI6 در گرمسار با مقدار $-1/81$ ، حداکثر شدت SPI12 در گرمسار با مقدار $-2/11$ و حداکثر شدت SPI24 در ایستگاه قزوین و با مقدار $-1/47$ می‌باشد. (شکل ۳)

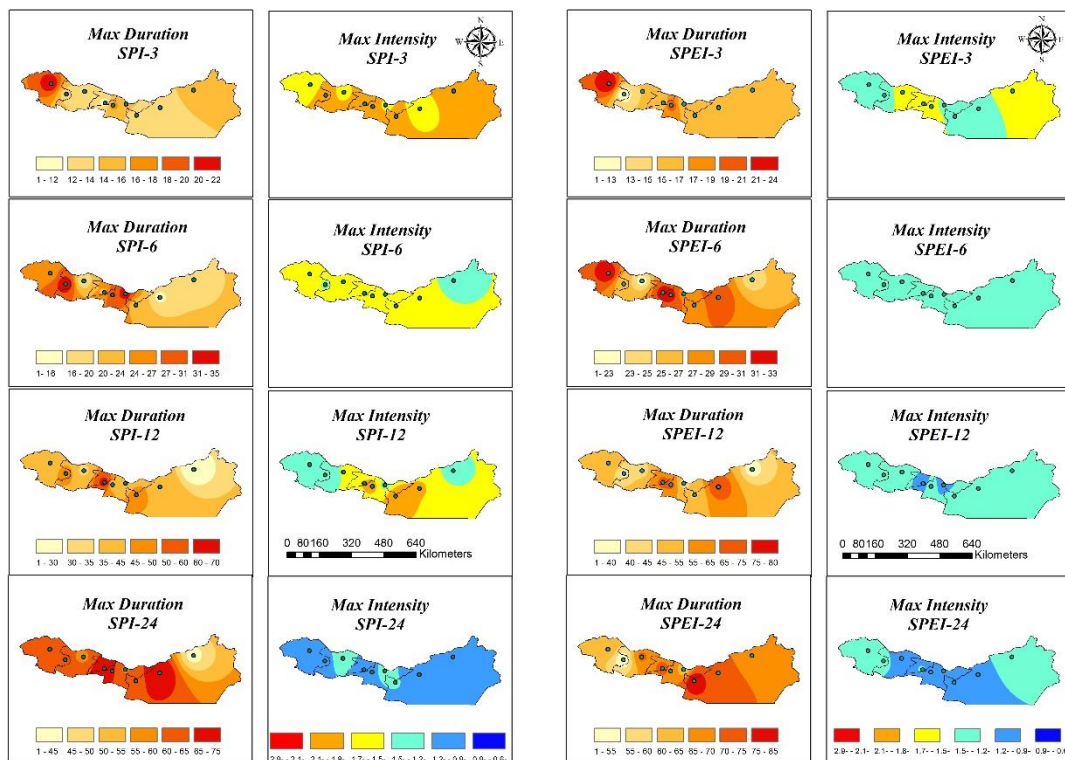


شکل (۳): حداکثر شدت و مدت خشکسالی بر حسب SPI

و اما در مورد SPEI3 حداکثر مدت خشکسالی ۳ ماهه در شهر زنجان با ۲۴ ماه، SPEI6 حداکثر مدت خشکسالی ۶ ماهه در شهر زنجان با ۳۳ ماه و تهران (مهرآباد) و کرج ۳۲ ماه، SPEI12 حداکثر مدت خشکسالی ۱۲ ماهه در شهر سمنان با ۷۶ ماه و SPEI24 حداکثر مدت خشکسالی ۲۴ ماهه در ایستگاه گرمسار با ۸۲ ماه بوده است. با مقایسه شدت خشکسالی بین ایستگاه‌ها، حداکثر شدت خشکسالی ۳ ماهه SPEI3 ایستگاه شاهرود با مقدار $-1/78$ ، حداکثر شدت خشکسالی ۶ ماهه SPEI6 ایستگاه خرمدره با مقدار $-1/48$ ، حداکثر شدت خشکسالی ۱۲ ماهه SPEI12 ایستگاه قزوین با مقدار $-1/31$ و حداکثر شدت خشکسالی ۲۴ ماهه SPEI24 ایستگاه شاهرود با مقدار $-1/35$ بوده است. (شکل ۴)



شکل (۴): حداکثر شدت و مدت خشکسالی بر حسب SPEI



شکل (۵): پهنه‌بندی حداکثر شدت و مدت خشکسالی منطقه بر حسب SPI و SPEI

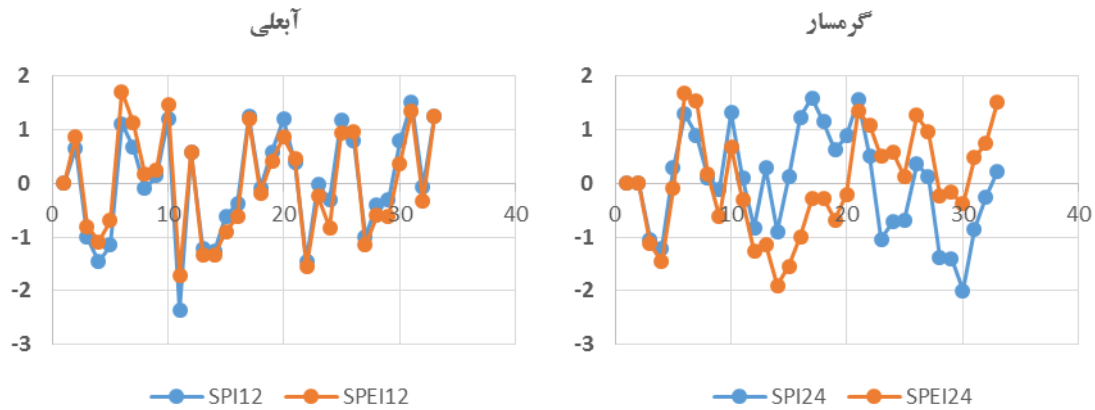
با توجه به پهنه‌بندی SPI، خشکسالی کوتاه مدت در غرب البرز جنوبی بیشتر و بلند مدت در مرکز و متمایل به شرق بوده است. در مورد پهنه‌بندی SPEI، خشکسالی کوتاه مدت در غرب البرز جنوبی بیشتر و بلند مدت بیشتر در مرکز و شرق منطقه بوده است. حداکثر شدت خشکسالی کوتاه مدت در پهنه‌بندی SPI، در شرق و مرکز متمایل به غرب البرز جنوبی و حداکثر شدت خشکسالی بلند مدت بیشتر مناطق بجز اطراف سمنان و گرمسار (مرکز متمایل به شرق) اوضاع بهتری داشته‌اند. در مورد پهنه‌بندی SPEI، حداکثر شدت خشکسالی شرق و مرکز، حداکثر شدت خشکسالی بلند مدت مانند پهنه‌بندی SPI تمام مناطق بجز (مرکز متمایل به شرق) اوضاع بهتری داشته‌اند. (شکل ۵)

همبستگی SPI و SPEI

مقدار همبستگی SPI و SPEI در کل منطقه مطابق جدول (۳) و حداکثر و حداقل آن در نمودار (۱) مشهود است.

جدول (۳): مقدار همبستگی SPI و SPEI برای مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماه

ایستگاه	3	6	12	24	avrege
آبعلی	0.91	0.9	0.96	0.93	0.93
گرمسار	0.59	0.44	0.63	0.36	0.51
کرج	0.83	0.8	0.9	0.88	0.85
خرم دره	0.84	0.81	0.92	0.91	0.87
قزوین	0.86	0.79	0.94	0.92	0.88
سمنان	0.57	0.51	0.7	0.54	0.58
شاهرود	0.71	0.83	0.95	0.9	0.85
تهران (مهر آباد)	0.82	0.83	0.94	0.96	0.89
زنجان	0.88	0.86	0.86	0.79	0.85



نمودار (۱): نمودار حداکثر و حداقل همبستگی بین شاخص‌های SPI و SPEI، حداکثر همبستگی در ایستگاه آبعلی (۰/۹۶) و حداقل همبستگی ایستگاه گرمسار (۰/۳۶)

بحث

در این مطالعه روند خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت هواشناسی بررسی و ارزیابی شد که به دلیل بارش کم و تبخیر و تعرق زیاد برای مدت طولانی در منطقه رخ می‌دهد. نتایج نشان از همبستگی خوب بین SPI و SPEI در مناطق مرطوب و نیمه خشک وجود دارد در حالیکه همبستگی خوبی بین SPI و SPEI در مناطق خشک و فرا خشک دیده نشده است که نشان می‌دهد خشکسالی‌های هواشناسی در ایران نسبت به تبخیر و تعرق و بارش حساس‌ترند. همبستگی SPI و SPEI در ایران که در مطالعه شرافتی در سال (۲۰۲۰) انجام شده بود با نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر در تضاد بوده، اشتباه آنها در تقسیم بندی کردن ایران به ۸ منطقه و محاسبه ضریب همبستگی بطور کلی برای هر منطقه بوده است که بایستی ضریب همبستگی را برای تک تک ایستگاه‌ها و بطور جداگانه مطالعه می‌کردند این در حالی است که ویسنت سرانو ۲۰۱۰ در تحقیقات خود نسبت به نادیده گرفتن تبخیر و تعرق در تجزیه و تحلیل خشکسالی هشدار داده بود. با این حال، بذرافشان سال (۲۰۱۷) که مطالعه ۲۰ ایستگاه در نوار مرزی کشور را مطالعه کرده بود از برتر بودن SPEI نسبت به SPI خبر داده بود که با نتایج این تحقیق سازگار است. زارع و همکاران در سال (۲۰۱۱) همبستگی بین SPI و RDI را ارزیابی کرد که برای نظارت بیشتر بر خشکسالی به تبخیر و تعرق روش RDI پیشنهاد دادند. بنابراین، نتایج بدست آمده در مطالعه حاضر با استفاده از SPEI را می‌توان قابل اعتمادتر از SPI دانست. نتایج نشان می‌دهد که خشکسالی‌های کوتاه مدت (۶ ماه یا کمتر) در غرب شدیدتر هستند در حالی که خشکسالی‌های طولانی مدت (بیش از ۶ ماه) در مرکز و شرق بیشتر و شدیدتر هستند، خشکسالی در ایران در تعداد زیادی از مطالعات با شاخص‌های مختلف مشخص شده است (زارع و همکاران (۲۰۱۱)، تاج بخش و همکاران (۲۰۱۵)، کوثری و همکاران (۲۰۱۷)، دارند و سهرابی (۲۰۱۸)، نبی و همکاران (۲۰۱۹). نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر با مطالعات قبلی مطابقت دارد. در مطالعه بذرافشان و همکاران (۲۰۱۹) شمال شرق ایران که همان شرق منطقه مورد نظر است بر اساس فراوانی، شدت و مدت زمان خشکسالی شمال شرقی ایران را به عنوان حساس‌ترین منطقه خشکسالی در کشور نشان داد که با نتایج بدست آمده مطابقت دارد. نتایج در مطالعه حاضر از طریق تجزیه و تحلیل الگوی مکانی روند خشکسالی در ۹ ایستگاه سینوپتیک توزیع شده در البرز جنوبی بدست آمده است. با این حال، ارزیابی درستی از منطقه مورد مطالعه در ویژگی‌های مختلف خشکسالی به دست آمده که در مطالعات قبلی به خوبی با آنچه در مطالعه حاضر به دست آمده مطابقت دارد. خشکسالی در سالهای ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ باعث خسارت ۷/۸ میلیارد دلاری کشاورزی و تلف شدن ۲۰ میلیون دام شد که باعث کاهش ۶٪ تولید ناخالص ملی شد (سلامی و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۰۳۳). از آنجا که معیشت اکثر جمعیت فقیر روستایی ایران به کشاورزی بستگی دارد، خشکسالی به سختی

فقرا را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش دفعات خشکسالی ممکن است به شدت بر جمعیت فقیر روستایی کشور تأثیر بگذارد و نابرابری و اختلاف اجتماعی را افزایش دهد. خشکسالی باعث خشک شدن آبهای سطحی و زیر سطحی می‌شود و جمعیت عظیمی از کشور را تحت تنش آبی قرار می‌دهد (شاهی، ۲۰۱۹). خشکسالی ۱۹۹۹-۲۰۰۱ باعث شد ۲۰ میلیون نفر تحت ذخیره شدید آب قرار بگیرند (Procházka و همکاران، ۲۰۱۸). در طی خشکسالی که باعث شیوع بیماری می‌شود، جمعیت فزاینده ای از حشرات و آفات گزارش شده است، کمبود آب، کاهش کیفیت آب و خطر ابتلا به بیماری‌ها جمعیت عظیمی از ایران را در معرض مشکلات مختلف مرتبط با بهداشت عمومی قرار می‌دهد که ممکن است در آینده نزدیک به دلیل افزایش مدت زمان و شدت خشکسالی شدیدتر باشد (شرافتی و همکاران، ۲۰۲۰: ۸۲۹).

نتیجه‌گیری

ایران دارای یک اقلیم غالباً خشک و نیمه خشک است که در آن خشکسالی خطرات و تأثیر شدیدی بر منابع آبی ایران دارد. این وضعیت ملاحظات بیشتری را در زمینه مطالعه و مدیریت خشکسالی ایجاد کرده است. مطالعه حاضر بر روی دو شاخص مهم متمرکز شده است. دو شاخص SPI و SPEI برای مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماه در ۹ ایستگاه سینوپتیک هواشناسی در البرز جنوبی مورد بررسی قرار گرفتند. همبستگی پایین SPI و SPEI در مناطق خشک و نیمه خشک نشانه شرایط خطرناک برای مدیریت منابع آب است. به علت این که نشان دهنده میزان بالای تبخیر و تعرق بوده است و همچنین نشان از برتر و با ارزش بودن شاخص SPEI نسبت به SPI می‌باشد که دلیل دقت بالای آن را می‌توان به اهمیت تبخیر و تعرق مرجع (ETO) که برای شناسایی و ارزیابی خشکسالی در شاخص SPEI استفاده می‌شود، دانست در حالی که در شاخص SPI فقط از اطلاعات مربوط به بارندگی استفاده می‌شود. روندهای کاهش چشمگیر شدت خشکسالی نشان از این واقعیت است که منابع آب هم در کوتاه مدت و میان مدت تحت تأثیر خشکسالی قرار دارند و می‌توان نتیجه گرفت پایش و نظارت موثر بر خشکسالی، به ویژه تحت اثر گرم شدن کره زمین، در برنامه ریزی و مدیریت منابع آب نقش مهمی دارد که بایستی تصمیم گیرندگان، متخصصان و محققان در زمینه منابع آب به فکر بهینه‌سازی مصرف و تخصیص بهینه آب باشند از یافته‌های این مطالعه می‌توان برای مدیریت ریسک خشکسالی، واکنش اضطراری و بهبود آن استفاده کرد. از نقشه‌های تولید شده در این مطالعه می‌توان برای برنامه‌ریزی برای کاهش خشکسالی استفاده کرد. و در آخر پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی در ایران، از شاخص SPEI و یا سایر شاخص‌های حساس به تبخیر و تعرق به علت موقعیت آب و هوایی (اقلیم‌های ایران) که اکثراً خشک و نیمه خشک هستند در پایش و پهنه‌بندی استفاده گردد.

منابع

- توفیق، فیروز و هائیده نصیری (۱۳۸۷): طرح کالبدی منطقه البرز جنوبی، انتشارات مرکز مطالعات و تحقیقات شهرسازی و معماری ایران، چاپ اول، تهران.
- فرج زاده اصل، منوچهر (۱۳۸۴): خشکسالی از مفهوم تا راهکار، انتشارات سازمان جغرافیایی وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح، چاپ اول، تهران.
- قبائی سوق، محمد، حمید زارع ایبانه، ابوالفضل مساعدی و زهرا صمدی (۱۳۹۵): پایش وضعیت‌های رطوبتی و روند آنها بر مبنای شاخص بارش تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در نواحی مختلف آب و هوایی ایران، نشریه آب و خاک، ۳۰(۵)، ۱۷۰۰-۱۷۱۷
- کارآموز، محمد و شهاب عراقی نژاد (۱۳۸۴): هیدرولوژی پیشرفته، انتشارات دانشگاه امیرکبیر. چاپ اول، تهران.
- Abramowitz, M., and Stegun, I. (1965): Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables, 9th edn New York. NY: Dover Publications.
- Bazrafshan, J. (2017): Effect of air temperature on historical trend of long-term droughts in different climates of Iran. Water Resources Management, 31(14), 4683-4698.
- Beguéría, S., Vicente-Serrano, F. and Latorre, B (2014): Standardized precipitation evapo-transpiration

index revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001-3023.

Blenkinsop, S., and Fowler, H. J. (2007): Changes in European drought characteristics projected by the PRUDENCE regional climate models. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(12), 1595-1610.

Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G. and Sutera, A. (2003): Spatial variability of drought: an analysis of SPI in Sicily. *Water Resour. Manag.* 17, 273-296.

Byun, H. R. and Wilhite, D. A. (1999): Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12(9), 2747-2756.

Cancelliere, A., Mauro, G. D., Bonaccorso, B., and Rossi, G. (2007): Drought forecasting using the standardized precipitation index. *Water Resource Manage*, 21(5), 801-819.

Chen, L., Singh, V. P., Guo, S., Mishra, A. K. and Guo, J. (2013): Drought analysis using copulas. *J. Hydrol. Eng.* 18(7), 797-808.

Damania, R., Desbureaux, S., Hyland, M., Islam, A., Moore, S., Rodella, A. S., Russ, J. and Zaveri, E. (2017): *Uncharted Waters*. Washington, DC: World Bank Publications.

Darand, M., & Sohrabi, M. M. (2018). Identifying drought-and flood-prone areas based on significant changes in daily precipitation over Iran. *Natural Hazards*, 90(3), 1427-1446

Droogers, P., and Allen, R. G. (2002): Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and drainage systems*, 16(1), 33-45.

Frank, A., Armenski, T., Gocic, M., Popov, S., Popovic, L. and Trajkovic, S. (2017): Influence of mathematical and physical background of drought indices on their complementarity and drought recognition ability. *Atmospheric Research*, 194, 268–280.

Genest, C., R'emillard, B. and Beaudoin, D (2009): Goodness-of-fit tests for copulas: A review and a power study. *Journal of Mathematics and Economics*, 44(2), 199–213.

González, J. and Valdés, J. B. (2006): New drought frequency index: definition and comparative performance analysis. *Water Resources Research*, 42(11), W11421.

Guttman, N. B. (1998): Comparing the palmer drought severity index and the standardized precipitation index. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34 (1), 113-121.

Hayes, M. J. (2000): What is drought?. National drought mitigation center.

Hayes, M.J., Wilhelmi, O. V., and Knutson, C. L. (2004). Reducing drought risk: bridging theory and practice. *Natural Hazards Review*. 5(2), 106-113.

Keshavarz, M., Karami, E. and Vanclay, F. (2013): The social experience of drought in rural Iran. *Land Use Policy*, 30(1), 120–129.

Kousari, M. R., Hosseini, M. E., Ahani, H., and Hakimelahi, H. (2017): Introducing an operational method to forecast long-term regional drought based on the application of artificial intelligence capabilities. *Theoretical and applied climatology*, 127(1-2), 361-380.

Mansouri, M. R., Bagherzadeh, A. and Khosravi, M. (2013): Assessment of drought hazard impact on wheat cultivation using standardized precipitation index in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(11), 4463-4473.

McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA, pp. 179-184.

Mishra, A. K., and Singh, V. P. (2010): A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202– 2016.

Moorhead, J. E., Gowda, P. H., Singh, V. P., Porter, D. O., Marek, T. H., Howell, T. A. and Stewart, B. A. (2015): "Identifying and Evaluating a Suitable Index for Agricultural Drought Monitoring in the Texas High Plains. *JAWRA*" *Journal of the American Water Resources Association*, 51(3), 807–820.

Nabaei, S., Sharafati, A., Yaseen, Z. M., and Shahid, S. (2019): Copula based assessment of meteorological drought characteristics: regional investigation of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology*, 276, 107611.

Palmer, W. C. (1965): *Meteorological drought*. US Department of Commerce, Weather Bureau. Washington, DC: Office of Climatology.

Procházka, P., Hönl, V., Maitah, M., Pljuc'arská, I. and Kleindienst, J. (2018): Evaluation of water scarcity in selected countries of the Middle East. *Water*, 10(10), 1482.

Outbudin, I., Shiru, M. S., Sharafati, A., Ahmed, K., Al-Ansari, N., Yaseen, Z.M., Shahid, S. and Wang, X. (2019): Seasonal drought pattern changes due to climate variability: case study in Afghanistan. *Water*, 11(5), 1096.

Salami, H., Shahnooshi, N. and Thomson, K. (2009): The economic impacts of drought on the economy of Iran: An integration of linear programming and macro- econometric modeling approaches. *Journal of Ecological Economics*, 68, 1032–1039.

Serinaldi, F., Bonaccorso, B., Cancelliere, A. and Grimaldi, S. (2009): Probabilistic characterization of drought properties through copulas. *Phys. Chem. Earth* 34, 596-605.

Shahi, A. (2019): Drought: the Achilles heel of the Islamic Republic of Iran. *Asian Affairs*, 50(1), 18–39.

Sharafati, A, Nabaei, S, and Shahid, S. (2020): Spatial assessment of meteorological drought features over different climate regions in Iran. *Int J Climatol*. 40(7), 1864– 1884.

Tsakiris, G., Pangalou, D., and Vangelis, H (2007): Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resource Manage*, 21(5), 821–833.

Tajbakhsh, S., Eisakhani, N. and FAZL, K. A. (2015): Assessment of meteorological drought in Iran using standardized precipitation and evapotranspiration index (SPEI). *Journal of the Earth and Space Physics*, 41(2), 313–321.

Vicente-Serrano S. M., Beguería S., and López-Moreno J. I (2010): A Multi–scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index –SPEI”. *Journal of Climate*, 23(7), 1696– 1718.

Yevjevich, V. (1967): An objective approach to definition and investigations of continental hydrologic droughts, *Hydrology papers*, Colorado State University, Fort Collins, USA, pp. 23.

Zarch, M. A. A., Malekinezhad, H., Mobin, M. H., Dastorani, M. T. and Kousari, M. R. (2011): Drought monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. *Water Resources Management*, 25(13), 3485.