

استاندارد شده (SSI)، شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، تابع توزیع، استان تهران

مقدمه

خشک‌سالی از جمله بلاایای طبیعی است که به آهستگی به وقوع می‌پیوندد و می‌تواند برای مدتی طولانی تداوم یابد و قسمت‌های وسیعی از سرزمین را درگیر کند [۲]. این بلیه در مقایسه با سایر بلاای طبیعی هم از نظر شدت و فراوانی و هم از نظر وسعت مکانی و میزان خسارتی که به بار می‌آورد، اهمیت دارد [۱۲]. بشر همواره با بلاایای طبیعی نظیر خشک‌سالی، سیل و زلزله دست به گریبان بوده است و تحقیقات و پژوهش‌های متعددی برای پیش‌بینی، کنترل و برنامه‌ریزی‌هایی برای جلوگیری از خسارت‌های این پدیده‌ها انجام شده است [۱۰]. آثار خشک‌سالی در جامعه به دلیل تاثیر اساسی منابع آب در برطرف کردن نیازهای انسانی در همه فعالیت‌های او بسیار روشن است. این اثر اغلب ناشی از ناسازگاری فعالیت‌ها با محیط طبیعی است و سهم نقص طراحی و مدیریت انسان نسبت به تغییرات عوامل اقلیمی بیشتر است [۷]. خشک‌سالی پدیده‌ای متفاوت از دیگر بلاایای طبیعی است که به طور اتفاقی و ناگهانی رخ نمی‌دهد و خسارت‌هایی که می‌تواند در صورت وقوع طی یک دوره زمانی وارد کند، جبران نشدنی است [۱۳]. بنابراین مقابله با این پدیده اهمیت زیادی دارد. خشک‌سالی انواع متفاوتی دارد که توسط شاخص‌های مختلف طبقه بندی می‌شوند. زمانی که مقدار بارش طی دوره‌ای کمتر از مقدار متوسط آن باشد، خشک‌سالی هواشناسی اتفاق می‌افتد و با شاخص‌های مبتنی بر بارش، مانند RAI^6 ، $PNPI^5$ ، $SIAP^4$ ، SPI^3 و... سنجیده می‌شود [۳]. نوع دیگر خشک‌سالی، خشک‌سالی هیدرولوژیکی است و هنگامی روی می‌دهد که جریان آب‌های سطحی، سطح آب دریاچه‌ها و منابع آبی کاهش یابد. از شاخص‌های خشک‌سالی هیدرولوژیکی که بر کاهش دبی جریان رودخانه استوار است، می‌توان به شاخص جریان سطحی استاندارد شده (SSI⁷) و شاخص کمبود جریان سطحی (SDI⁸) اشاره کرد [۱۸]. با توجه به اینکه

مطالعه تطبیقی شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی SPI و هیدرولوژیکی SSI بر اساس بهترین تابع توزیع تجمعی در استان تهران

محمدحسین جهانگیر^۱ و سیده مهسا موسوی رینه^۲
تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۴/۱۰ تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۱/۱۸

چکیده

تداوم کمبود بارش نسبت به میانگین بلندمدت (خشک‌سالی هواشناسی)، باعث کاهش جریان آب رودخانه، افت تراز آب زیرزمینی و خشک‌سالی هیدرولوژیکی می‌شود. هدف از این پژوهش، بررسی بهترین توابع توزیع تجمعی برای محاسبه خشک‌سالی بر اساس شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص جریان سطحی استاندارد شده (SSI) است. در این پژوهش ضمن بررسی توابع توزیع تجمعی به پایش خشک‌سالی ۵ ایستگاه مطالعاتی در استان تهران در بازه زمانی ۱۳۹۵ - ۱۳۶۴ در مقیاس سالانه پرداخته شده است. همچنین مطالعه تطبیقی شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در این استان نیز مورد بررسی واقع گردید. نتایج نشان می‌دهند که مناسب‌ترین تابع توزیع تجمعی در ایستگاه درکه تابع لوگ لجستیک، در فیروزکوه و ابعلی تابع گاما، در نمرود تابع فیتینگ لایف و در شریف‌آباد تابع بتا می‌باشند. در بین ایستگاه‌ها با توابع مناسب یاد شده، ایستگاه درکه با بیشترین مقدار P-Value (۰/۹۹۶) و کمترین مقدار RMSE (۰/۹۱۶) بهترین برازش را با تابع لوگ لجستیک داشته است. همچنین وجود تشابه در روند خشک‌سالی‌های منتج از دو شاخص مختلف نشان می‌دهد که شاخص هواشناسی و هیدرولوژیکی کاملاً بر هم منطبق می‌باشند، به عبارت دیگر منابع آب سطحی در استان تهران به شدت از بارش تاثیرپذیر است.

کلیدواژه‌ها: پایش خشک‌سالی، شاخص جریان سطحی

3. Standardized Precipitation Index
4. Standard Index of Annual Precipitation
5. Percent of Anomaly Precipitation Index
6. Rainfall Anomaly Index
7. Standardized Stream flow Index
8. Stream flow Deficient Index

۱- نویسنده مسئول و استادیار گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، پست الکترونیک:

Mh.jahangir@ut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد اکوهیدرولوژی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

با شاخص SDI در حوضه رودخانه بلانیس در بوهیمای مرکزی و جنوبی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بین خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیک ارتباط وجود دارد و شاخص خشک‌سالی هیدرولوژیک متأثر از میزان بارش منطقه است. نتایج به دست آمده نشان داد که ضریب همبستگی قوی تری در دوره‌های سه و شش ماهه این دو شاخص وجود دارد [۱۹]. در تحقیق حاضر برای محاسبه شاخص خشک‌سالی هیدرولوژیک ابتدا داده‌های مربوط به هر ایستگاه با استفاده از مناسب‌ترین توابع توزیع تجمعی، استاندارد گشته و سپس شاخص مورد نظر محاسبه شد، نوآوری این تحقیق انتخاب مناسب‌ترین توابع توزیع تجمعی در هر ایستگاه می‌باشد. هدف از این پژوهش، بررسی وضعیت خشک‌سالی ۵ ایستگاه مختلف، در استان تهران و سپس مقایسه و بررسی تطابق خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیک در این منطقه می‌باشد. به عبارت دیگر تأثیرپذیری و یا تأثیرناپذیری منابع آب سطحی از بارش، از نتایج این تحقیق به شمار می‌رود.

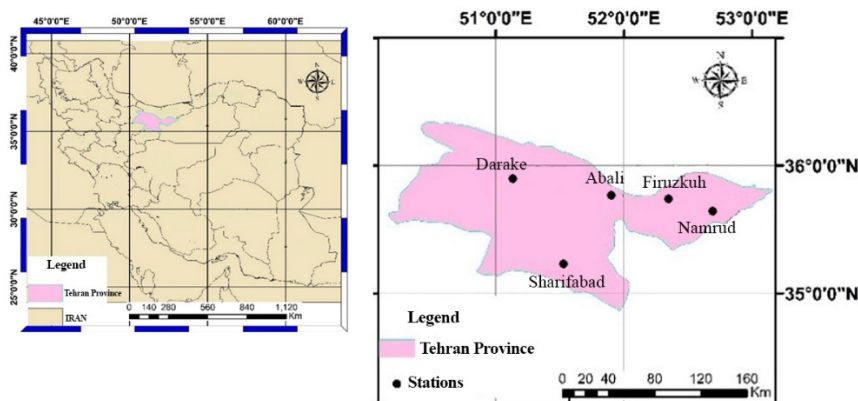
منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

استان تهران به مرکزیت شهر تهران، با وسعتی حدود ۱۲۹۸۱ کیلومتر مربع، بین ۳۴ تا ۳۶/۵ درجه عرض شمالی و ۵۰ تا ۵۳ درجه طول شرقی واقع شده است. ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد در بین ۱۸۰۰ متر در شمال، ۱۲۰۰ متر در مرکز و ۱۰۵۰ متر در جنوب متغیر است. متوسط بارندگی سالانه به دست آمده از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در این استان حدود ۲۳۳ میلی‌متر و دمای میانگین کمینه و بیشینه ۱۱/۹ و ۲۲/۷ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است. جمعیت این استان طبق سرشماری اخیر (در سال ۱۳۹۵) بالغ بر ۱۳۲۶۷۶۳۷ نفر بوده است. با توجه به اینکه روند جمعیتی پایتخت کشور رو به رشد می‌باشد، تامین منابع آبی و بررسی کمبودهای آبی برای این منطقه از موضوعات مهم استان به شمار می‌رود. نقشه منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. نام، مختصات جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ آمده است.

مواد و روش‌ها

یکی از ملزومات انجام یک مطالعه اقلیمی و هواشناسی، در دست داشتن داده‌های مطمئن در طول دوره مطلوب آماری می‌باشد. در این تحقیق، از آمار ۳۲ سال (۱۳۶۴ - ۱۳۹۵) بارندگی و دبی رودخانه در مقیاس سالانه استفاده شد. آمار مربوط به ایستگاه‌ها و داده‌ها از شرکت منابع آب ایران جمع‌آوری شده و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. پس از کنترل کیفی و تصحیح و تکمیل داده‌ها و آنالیز آماری داده‌های بارش و دبی، شاخص خشک‌سالی (SPI) و (SSI) محاسبه شده است. شکل ۲ مراحل انجام کار را نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری شدت بارش نسبت به دبی آسان‌تر است و هم‌چنین تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی نسبت به ایستگاه‌های هیدرومتری بیشتر است، پژوهش‌گران به دنبال این هستند که رابطه‌ای منطقی بین خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیک پیدا کنند. در تحقیقی خشک‌سالی هیدرولوژیک با استفاده از شاخص SDI در حوزه‌ی هلیل‌رود ایران مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد همبستگی زیادی بین شاخص بارش استاندارد شده به عنوان شاخص هواشناسی با شاخص هیدرولوژیک وجود دارد [۱۷]. در پژوهش دیگری خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیک در دشت مشهد ارزیابی شد و نتایج آن نشان داد که شاخص SDI در مقیاس‌های زمانی مختلف می‌تواند تا حد قابل قبولی با شاخص SDI در همان مقیاس‌های زمانی هماهنگی داشته باشد [۲۰]. در پژوهشی که در رودخانه‌ای در اوکلاهما انجام شد سه شاخص خشک‌سالی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان داد که شاخص‌های بارش استاندارد شده (SPI) و پالمر (PDSI) و جریان استاندارد شده (SRI) دارای ضریب همبستگی ۰/۸۱ با تأخیر زمانی حدوداً دو ماهه هستند [۸]. در تحقیقی که در دو منطقه دور افتاده در هند انجام شده از سه شاخص جهت پایش خشک‌سالی استفاده شده است. نتایج حاصل از شاخص‌های (SPI) بر اساس بارش، (VCI) بر اساس وضعیت گیاهی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و جریان سطحی استاندارد شده (SWI) که جزء شاخص‌های هیدرولوژیک به حساب می‌آید، نشان دادند که همبستگی خوبی بین شاخص‌های SPI و VCI برای این منطقه خاص وجود دارد. این مطالعه هم‌چنین نشان داد که علی‌رغم وجود ارتباط و همبستگی میان شاخص‌های هواشناسی و کشاورزی، خشک‌سالی‌های هیدرولوژیک هر سال با خشک‌سالی‌های کشاورزی ارتباط معنی‌داری ندارند [۱۵]. مقایسه‌ای برای تعیین دوره‌های خشک‌سالی و طول دوره‌ها بین شاخص‌های SDI و SRI در حوضه آبریز رودخانه گاتا‌پراها در کشور هند انجام شد. این تحقیق نشان داد که دو شاخص در یک دوره ۳۶ ساله شبیه یکدیگرند [۱۴]. در پژوهشی در جنوب غربی چین سه شاخص مورد مقایسه قرار گرفتند. شاخص بارش و تبخیر تعرق (SPETI)، شاخص درصد رطوبت خاک (SMAPI) و شاخص رواناب استاندارد شده (SRI) به ترتیب برای توصیف خشک‌سالی هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیک مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که بین سه شاخص همبستگی بالایی وجود دارد. SMAPI بهترین ارتباط را با SPEI و SRI در مقیاس ۳ ماهه داشت [۲۲]. در مطالعه‌ای که در یک منطقه خشک و نیمه خشک در چین انجام شد، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص جریان سطحی استاندارد شده (SSI) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که روند خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیک تابع فصل است، که این تأخیر زمانی در فصل تابستان و بهار کوتاه و در فصل پاییز و زمستان طولانی است [۴]. رابطه بین خشک‌سالی هواشناسی با شاخص SPI و هیدرولوژیک



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه شده و ایستگاه‌های مورد پایش جهت ارزیابی وضعیت خشک‌سالی در استان تهران
 Fig. 1. Location of studied area and monitoring stations to assess the drought condition in Tehran province

می‌باشد. شاخص SPI با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌گردد [۱۱].

$$SPI = - \left[t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right]; \quad (1)$$

$$(0 < H(x) \leq 0.5)$$

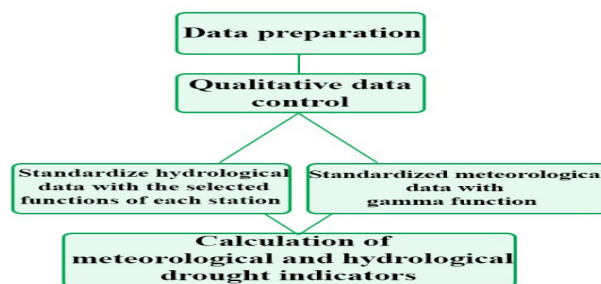
$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{H(x)^2}\right)}$$

$$SPI = + \left[t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right]$$

$$(0.5 < H(x) \leq 1)$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1 - H(x))^2}\right)}$$

که در معادله (۱) مقادیر ثابت عبارتند از: $C_0=2.535537$, $C_1=0.802853$, $C_2=0.030328$, $d_1=3.432788$, $d_2=0.189269$, $d_3=0.003308$ و مقدار تابع تجمعی کل، $H(x)$ از معادله (۹) به دست می‌آید.



شکل ۲. مراحل گام به گام مواد و روش تحقیق
 Fig. 2. Flowchart of materials and methods

معرفی شاخص‌های خشک‌سالی و توابع توزیع شاخص خشک‌سالی بارش نرمال (SPI)

شاخص بارش استاندارد شده توسط مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳) به منظور پایش خشک‌سالی اقلیمی ابداع گردید. این شاخص بر اساس ثبت بارش‌های طولانی مدت پایه‌گذاری شده است. در این شاخص، مقادیر بارندگی سالانه ایستگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. به این ترتیب که ابتدا مقادیر بارندگی به توزیع احتمال گاما برازش داده می‌شود زیرا به عقیده مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳) برای محاسبه شاخص بارش استاندارد شده، تابع چگالی گاما مناسب‌ترین تابع

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مطالعه شده

Table 1. Characteristics of the studied stations

Station name	River name	Longitude	Latitude	Altitude(m)
Darake	Darake	51.37	35.81	1700
Abali	Haraz	51.96	35.76	2034
Namrud	Namrud	52.57	35.74	2212
Firuzkuh	Hablerud	52.77	35.75	1930
Sharifabad	Jajorud	51.53	35.23	850

خشک‌سالی شدید
Extremely dry
-1.46 ≥

معرفی توابع توزیع تجمعی

تابع چگالی گاما که در شاخص خشک‌سالی بارش استاندارد شده مورد استفاده است، به صورت روابط ۳ تا ۱۰ معرفی می‌گردد.

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad X > 0 \quad (3)$$

در این معادله X مقدار متغیر (در این تحقیق مقدار بارش) پارامتر شکل، β پارامتر مقیاس توزیع و α تابع گاما است که معادلات آنها به صورت زیر می‌باشد.

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right] \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (6)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (7)$$

در معادله (۵)، n تعداد مشاهدات بارش می‌باشد.

در این مرحله با استفاده از معادله (۸) احتمال تجمعی گاما محاسبه می‌شود [۶].

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (8)$$

چون تابع گاما برای X مساوی با صفر (بارندگی صفر میلیمتر) تعریف نشده است و توزیع بارندگی ممکن است دارای مقادیر صفر باشد، تابع احتمال تجمعی که در برگیرنده صفر هم باشد، از معادله (۹) به دست می‌آید [۶].

$$H(x) = q + (1 - q)F(x) \quad (9)$$

که در آن، H(X) تابع تجمعی کل، q احتمال صفر بودن مقادیر بارندگی می‌باشد. اگر m تعداد داده‌های بارندگی باشند که مقدار آنها در سری زمانی معادل صفر است، آنگاه q از معادله (۱۰) به دست می‌آید.

$$q = m/n \quad (10)$$

معادلات (۱۱) تا (۱۴) توابع توزیع تجمعی پیشنهادی در محاسبه شاخص خشک‌سالی جریان سطحی استاندارد شده را معرفی می‌کنند. سایر توابع توزیع استفاده شده، F(X) به ترتیب زیر، فتیگ لایف، گاما، لوگ لجستیک^۳ و بتا^۴ می‌باشد.

$$F(x) = \varphi \left(\frac{1}{\alpha} \left(\sqrt{\frac{x-\gamma}{\beta}} - \sqrt{\frac{\beta}{x-\gamma}} \right) \right); \quad (11)$$

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$$

1. Fatigue life
2. Gamma
3. Gen- Loglogestic
4. Beta

طبقه‌بندی درجات خشک‌سالی و ترسالی با استفاده از این شاخص به صورت جدول (۲) ارائه می‌شود [۵].

جدول ۲. طبقه‌بندی خشک‌سالی بر اساس شاخص SPI

Table 2. Drought classification based on SPI

SPI	وضعیت Situation
2 ≤	مرطوب شدید Extremely humid
1.5 - 1.99	بسیار مرطوب Very humid
1 - 1.49	نسبتاً مرطوب Humid
-0.99 - 0.99	نزدیک نرمال Normal
-1 - -1.49	نسبتاً خشک Dry
-1.5 - -1.99	بسیار خشک Very dry
-2 ≥	خشک‌سالی شدید Extremely dry

شاخص خشک‌سالی جریان سطحی استاندارد (SSI)

در شاخص جریان سطحی استاندارد شده از پارامتر دبی رودخانه استفاده شده است که اطلاعات بیشتر را می‌توان در ویسسته سرانو و همکاران (۲۰۱۱) یافت [۲۱]. این روش بر اساس محاسبه تابع توزیع تجمعی برای داده‌های دبی سالانه می‌باشد، در نتیجه برای محاسبه از توابع توزیع تجمعی مختلف استفاده گردید تا در نهایت بهترین تابع توزیع تجمعی برای هر ایستگاه مشخص شود، شاخص SSI با استفاده از معادله (۲) به دست می‌آید [۱].

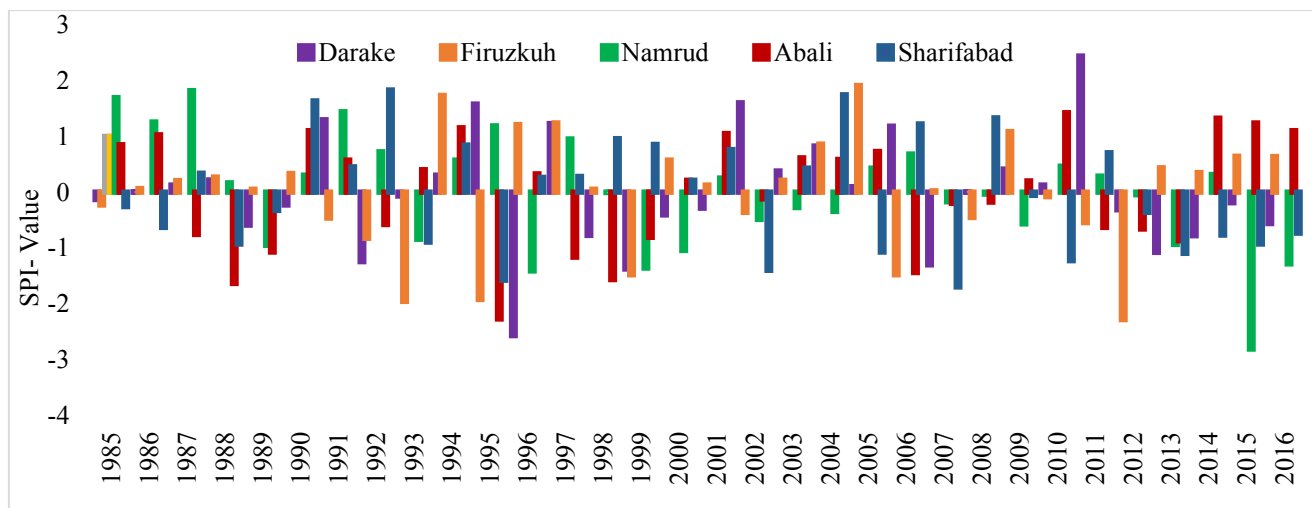
$$SSI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (2)$$

که در معادله بالا، مقادیر ثابت عبارتند از: C₀=2.515517, C₁=0.802853, C₂=0.010328, d₁=1.432788, d₂=0.189269, d₃=0.001308 و مقدار W از معادله w = √(-2ln(p)) حاصل می‌شود که در آن مقدار P برای P ≤ 0.5 برابر است با P=1-F(x) و برای P > 0.5 برابر است با P=F(x) و علامت نهایی SSI برعکس می‌شود، مقادیر نهایی SSI نرمال است به طوری که میانگین آن برابر صفر و انحراف معیار آن برابر با یک می‌باشد [۲۳]. طبقه بندی درجات مختلف خشک‌سالی و ترسالی هیدرولوژیک بر اساس شاخص SSI در جدول (۳) ارائه می‌شود [۹].

جدول ۳. طبقه‌بندی خشک‌سالی بر اساس شاخص SSI

Table 3. Drought classification based on SSI

SSI	Situation
1.46 ≤	ترسالی شدید Very humid
0.52 - 1.46	ترسالی ملایم Humid
-0.52 - 0.52	نرمال Normal
-0.52 - -1.46	خشک‌سالی ملایم Dry



شکل ۳. مقادیر شاخص SPI در ایستگاه‌های مورد مطالعه-استان تهران در بازه زمانی ۱۳۶۴ - ۱۳۹۵.

Fig 3. SPI values at the studied stations in Tehran province during (1985 - 2016)

نزدیک به نرمال) باشد. یک رویداد خشک‌سالی به عنوان یک دوره پیوسته تعریف می‌شود که SPI آن کمتر از ۰ است [۱۶].

نتایج

نتایج حاصل از پایش شاخص خشک‌سالی بارش استاندارد شده برای بررسی وضعیت خشک‌سالی استان تهران مقادیر شاخص خشک‌سالی بارش استاندارد شده به‌عنوان شاخص خشک‌سالی هواشناسی در ۵ ایستگاه مطالعاتی در بازه زمانی ۱۳۶۴ - ۱۳۹۵ محاسبه گردید. مقادیر حاصل از شاخص خشک‌سالی بارش استاندارد شده در همه ایستگاه‌ها با استفاده از تابع تجمعی گاما محاسبه شد و نتایج آن در شکل ۳ آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود روند تغییرات به‌دست آمده بر حسب بارش سالانه می‌باشد و مقادیر مثبت این شاخص نشان‌دهنده ترسالی و مقادیر منفی زیر محور نشان‌دهنده خشک‌سالی است. شدیدترین خشک‌سالی‌ها بر اساس شاخص بارش استاندارد شده در ایستگاه درکه در سال ۱۳۷۱، در ایستگاه فیروزکوه در سال ۱۳۸۱، در ایستگاه آبعلی در سال ۱۳۷۴، در ایستگاه نمرود در سال ۱۳۹۴ و در ایستگاه شریف‌آباد در سال‌های ۱۳۷۴ و ۱۳۸۶ رخ داده است.

نتایج حاصل از پایش شاخص خشک‌سالی جریان سطحی استاندارد شده

مقادیر شاخص جریان سطحی استاندارد شده نیز به‌عنوان شاخص خشک‌سالی هیدرولوژیک با استفاده از چهار تابع توزیع فیتینگ لایف، گاما، لوگ لجستیک و بتا در ایستگاه‌های مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۳۶۴ - ۱۳۹۵ محاسبه گردید. بر اساس نتایج حاصل از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف مناسب‌ترین توابع توزیع تجمعی برای هر

$$F(x) = \frac{\Gamma_{x/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}; \quad (12)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt (\alpha > 0);$$

$$\Gamma_x(\alpha) = \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (\alpha > 0)$$

$$F(x) = \frac{1}{1+(1+kz)^{-1/k}}; \quad z = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (13)$$

$$F(x) = I_x(\alpha_1, \alpha_2); \quad (14)$$

$$I_{x(\alpha_1, \alpha_2)} = \frac{B_x(\alpha_1, \alpha_2)}{B(\alpha_1, \alpha_2)};$$

$$B_{x(\alpha_1, \alpha_2)} = \int_0^x t^{\alpha_1-1} (1-t)^{\alpha_2-1} dt$$

$$(\alpha_1, \alpha_2 > 0, 0 \leq x \leq 1)$$

تعیین شدت خشک‌سالی

جهت تعیین شدت خشک‌سالی در دوره مورد مطالعه با توجه به تعریف مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳) از شاخص بارش استاندارد شده، معادله (۱۵) استفاده می‌گردد [۱۶]:

$$S = -\sum_{i=1}^p SPI_i \quad (15)$$

در معادله بالا S شدت خشک‌سالی و D تداوم خشک‌سالی می‌باشد. به عبارتی دیگر پس از تعیین دوره‌ی خشک، سطح زیر نمودار نشان‌دهنده شدت خشک‌سالی می‌باشد. هر رویداد خشک‌سالی دارای دو ویژگی بسیار مهم است: تداوم و شدت خشک‌سالی. یا

1. Kolmogorov-Smirnov

که طبق طبقه‌بندی این شاخص (جدول ۳) استان تهران شاهد ترسالی‌های بیش‌تری نسبت به سال‌های خشک بوده است. هم‌چنین قابل ذکر است که این استان در ده سال اخیر با خشک‌سالی‌های متوالی بیش‌تری نسبت به قبل رو به رو بوده‌است.

شدیدترین خشک‌سالی‌ها بر اساس شاخص جریان سطحی استاندارد شده در ایستگاه درکه در سال ۱۳۹۲، در ایستگاه فیروزکوه در سال ۱۳۸۰، در ایستگاه نم‌رود در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۹۴، در ایستگاه آبعلی در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۹۲ و در ایستگاه شریف‌آباد در سال ۱۳۷۹ رخ داده است.

بررسی تطابق شاخص خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیک
به منظور بررسی تطابق بین دو شاخص SPI و SSI نمودارهای مقایسه‌ای این دو شاخص در هر ایستگاه تهیه گردید و تطابق دو شاخص SPI و SSI در دو ایستگاه درکه و نم‌رود به عنوان نمونه، در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده‌است.

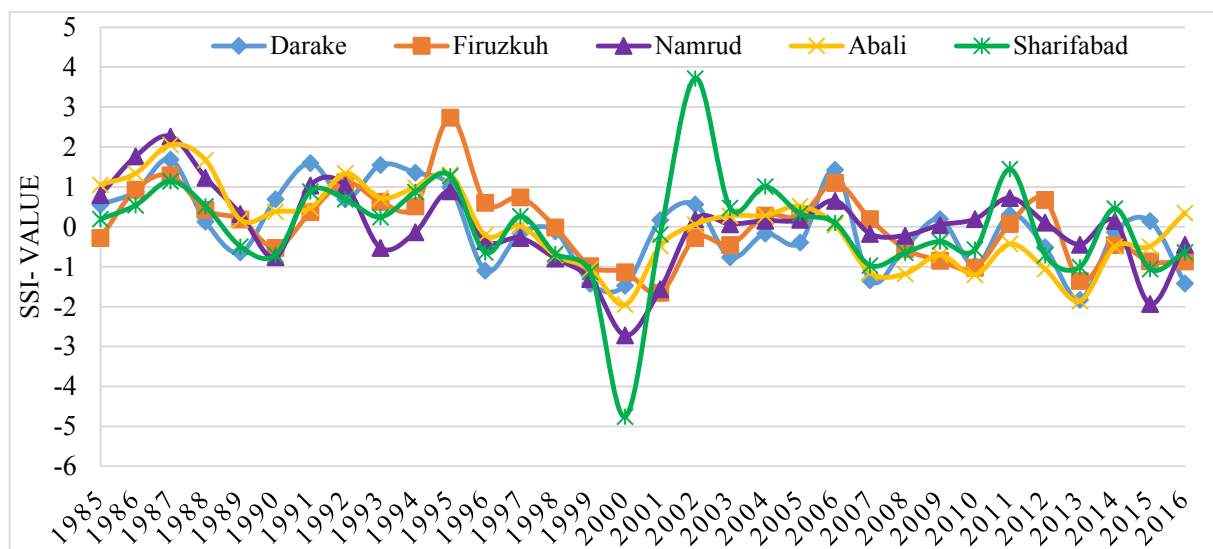
ایستگاه مشخص شد و سپس جهت صحت سنجی، مقادیر خطای حاصل از داده‌های دبی هر ایستگاه و هر تابع به صورت جداگانه محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده‌است.

بر اساس جدول ۴ در ایستگاه درکه تابع لوگ لجستیک، در ایستگاه فیروزکوه و آبعلی تابع گاما، در ایستگاه نم‌رود تابع فیتینگ لایف و در ایستگاه شریف‌آباد تابع بتا مناسب‌ترین توابع می‌باشند. پس از قرار دادن مقادیر دبی در هر یک از توابع مربوطه، $F(X)$ حاصل از آن در معادله (۲) قرار گرفت و شاخص جریان استاندارد شده برای هر ایستگاه محاسبه گردید. مقادیر حاصل از شاخص SSI در ۵ ایستگاه مختلف و با توابع توزیع متفاوت در شکل ۴ آورده شده‌است. برخلاف ایستگاه شریف‌آباد که در سال ۱۳۷۹ یک خشک‌سالی بسیار شدید و در سال ۱۳۸۱ یک ترسالی بسیار شدید را تجربه کرده است، سایر ایستگاه‌ها روندی تقریباً یکسان از نوسانات خشک‌سالی و ترسالی را نشان می‌دهند. به طور کلی می‌توان گفت

جدول ۴. نتایج برازش توابع توزیع تجمعی در هر ایستگاه برای محاسبه شاخص جریان سطحی استاندارد شده

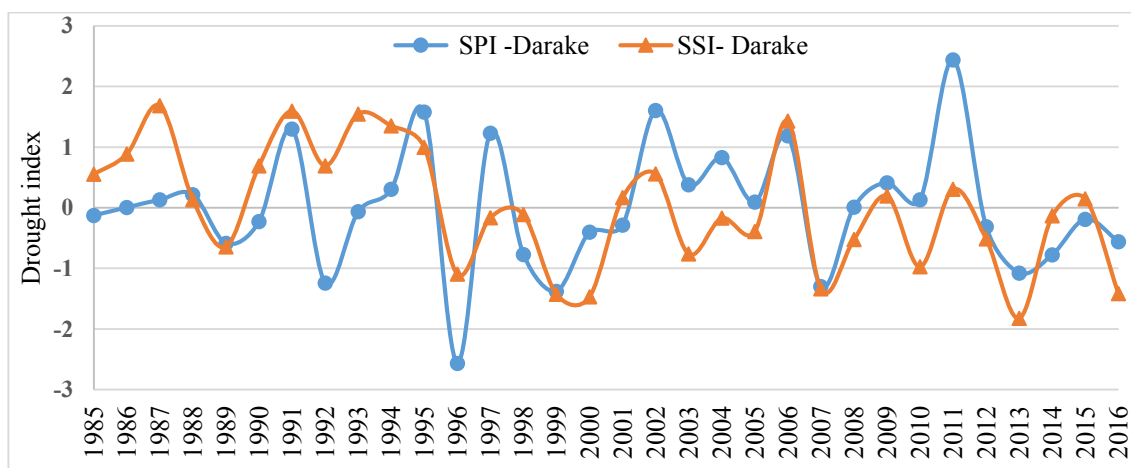
Table 4. The results of the fitting of cumulative distribution functions at each station to calculate the SSI

Stations	Best Fitting model	R ²	ME	RMSE	P-value
Darake	Gen-Loglogestic $y = 6.445x - 2.574$	0.9998	-0.399	0.916	0.996
Firuzkuh	Gamma $y = 1.9974\ln(x) + 0.387$	0.9886	-0.899	1.019	0.99
Namrud	Fatigue life $y = 3.4989\ln(x) - 4.525$	0.9999	-3.792	3.8	0.783
Sharifabad	Beta $y = 1.2978\ln(x) - 1.777$	0.767	-5.375	6.018	0.883
Abali	Gamma $y = 2.0361\ln(x) - 3.4$	0.9916	-5.941	6.198	0.99

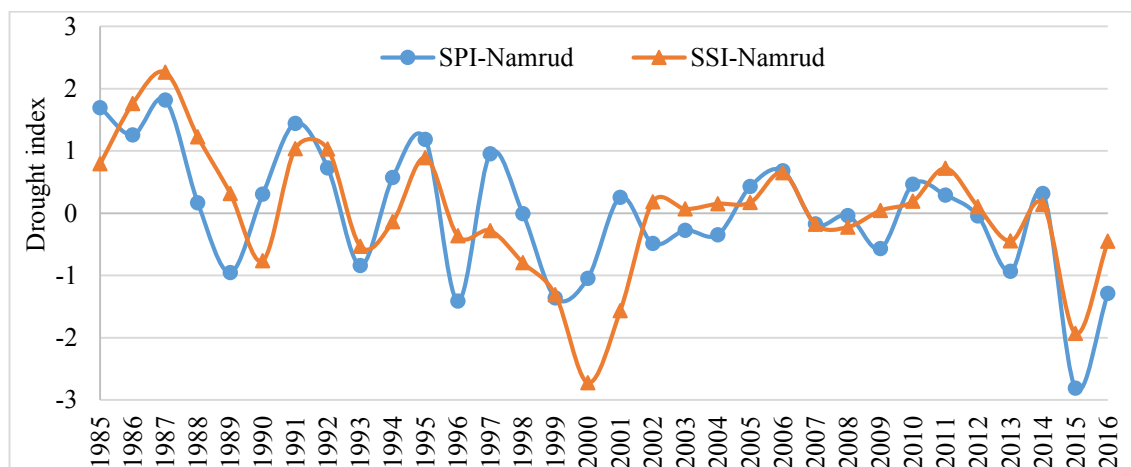


شکل ۴. مقادیر شاخص SSI براساس مناسب‌ترین توابع در هر ایستگاه - استان تهران برای دوره زمانی ۱۳۹۵ - ۱۳۶۴.

Table 4. SSI values at the studied stations in Tehran province during (1985 - 2016)



شکل ۵. مقایسه دو شاخص خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژی در ایستگاه درکه
Fig5. Comparison of meteorological and hydrological indices at Darakeh station



شکل ۶. مقایسه دو شاخص خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژی در ایستگاه نمرد
Fig6. Comparison of meteorological and hydrological indices at Namrud station

زمانی ۱۳۷۹ - ۱۳۷۴ که طولانی‌ترین تداوم دوره خشک در اکثر ایستگاه‌های مورد بررسی رخ داده است، انجام شد. مقادیر آن در ۸ طبقه مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به اختلاف موجود در توابع توزیع به کاررفته برای محاسبه شاخص‌ها، پهنه‌بندی تداوم خشک‌سالی نتایج متفاوتی را در ایستگاه‌های یکسان اما با شاخص‌های متفاوت نشان می‌دهد. بیش‌ترین اختلاف در ایستگاه شریف‌آباد قابل مشاهده است. هم‌چنین بر اساس تجزیه و تحلیل تداوم خشک‌سالی بر اساس شاخص‌ها در بازه زمانی ۱۳۷۹ - ۱۳۷۴، همه ایستگاه‌ها در سال ۱۳۷۹ شاهد خشک‌سالی شدید و ملایم بوده‌اند. هم‌چنین پس از تجزیه و تحلیل نتایج مربوط به شاخص‌های خشک‌سالی، شدیدترین مقادیر در طول دوره تداوم تعیین و بر اساس آن پهنه‌بندی شدت خشک‌سالی به روش درون‌یابی IDW انجام شد، نتایج حاصل از پهنه‌بندی در ۸ طبقه در شکل ۹ قابل مشاهده می‌باشد.

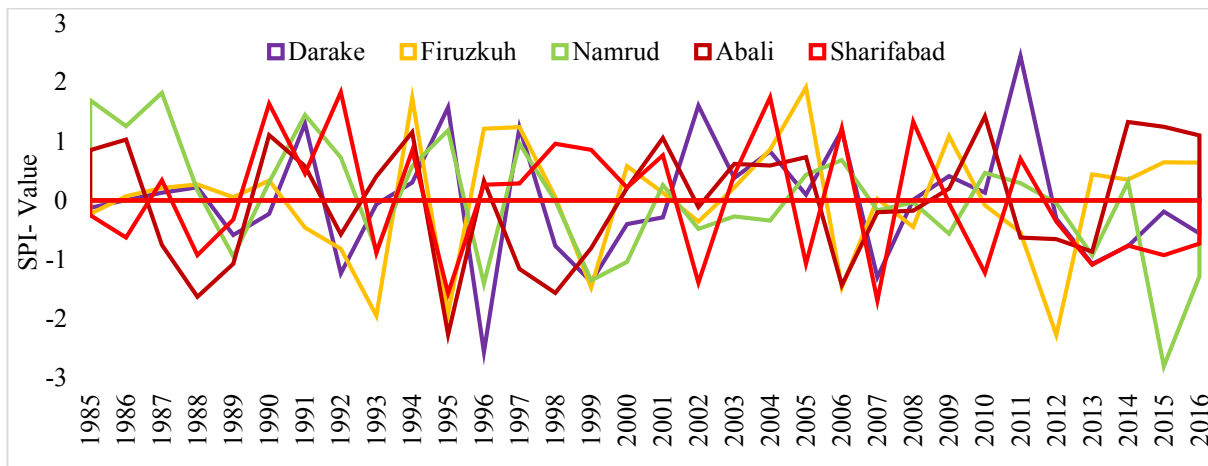
همانگونه که در شکل ۵ و ۶ دیده می‌شود روند تغییرات دو نوع خشک‌سالی کاملاً مشابه یکدیگر است، به این معنا که در هر سالی که روند شاخص خشک‌سالی بارش استاندارد شده کاهش می‌یابد، شاخص رواناب سطحی استاندارد شده نیز روندی نزولی را طی می‌کند. در نتیجه کاهش و یا افزایش میزان بارندگی به طور مستقیم بر کاهش و افزایش میزان جریانات سطحی اثرگذار است.

پهنه‌بندی شدت و تداوم خشک‌سالی

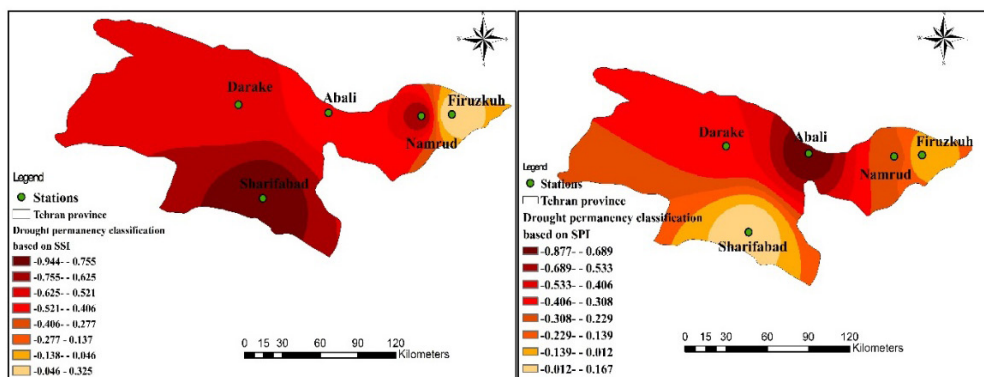
پس از محاسبه مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی به بررسی دو ویژگی مهم خشک‌سالی (تداوم و شدت) پرداخته شد، شکل ۷ نشان‌دهنده تداوم در بازه زمانی ۱۳۷۹ - ۱۳۷۴ و شدت خشک‌سالی (مقادیر کمتر از -۱) با توجه به سطح زیر نمودار اغلب ایستگاه‌ها می‌باشد.

پهنه‌بندی تداوم خشک‌سالی با روش درون‌یابی IDW¹ در بازه

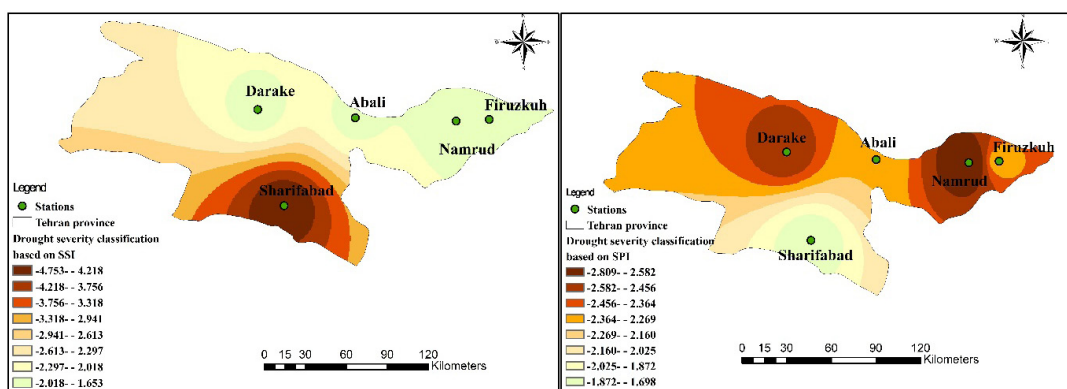
1. Inverse Distance Weighting



شکل ۷. بررسی تداوم و شدت خشکسالی بر اساس شاخص بارش استاندارد در بازه زمانی ۱۳۶۴ - ۱۳۹۵.
Fig7. Investigating the duration and severity of drought based on SPI during (1985 - 2016)



شکل ۸. پهنه بندی تداوم خشکسالی بر اساس شاخص بارش و جریان سطحی استاندارد شده در بازه زمانی ۱۳۷۴ - ۱۳۷۹.
Fig 6. Delineation of Drought duration based on SPI and SSI during 1995 – 2000.



شکل ۹. پهنه بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص بارش و جریان سطحی استاندارد شده در بازه زمانی ۱۳۷۴ - ۱۳۷۹.
Fig. 7. Delineation of drought severity based on SPI and SSI during 1995 – 2000.

خشکسالی بارش استاندارد شده، ایستگاه درکه با مقدار ۲/۵۶- در سال ۱۳۷۵ خشکسالی شدید را نشان می‌دهد.

بر اساس شاخص خشکسالی جریان سطحی استاندارد شده شدیدترین طبقه خشکسالی متعلق به ایستگاه شریف‌آباد با مقدار ۴/۷۵- در سال ۱۳۷۹ می‌باشد درحالی که بر اساس شاخص

1. Abramowitz, M, Irene A. and Stegun. 1965 Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Table. Vol. 2172, Dover New York.
2. Fleig, A. K., Tallaksen, L. M. and Hisdal, H. 2006 "Drought Indices Suitable to Study the Linkages to Large-Scale Climate Drivers in Regions with Seasonal Frost Influence." IAHS PUBLICATION, vol. 308, p. 169.
3. Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wilhite, D. A. and Vanyarkho, O. V. 1999 "Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index." Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 80, no. 3, pp. 429-38.
4. Huang, Sh. Li, P. Huang, Q. Leng, G. Hou, B. and Ma, L. 2017 "The Propagation from Meteorological to Hydrological Drought and Its Potential Influence Factors." Journal of Hydrology, vol. 547, Elsevier, pp. 184-95.
5. Jain, V. K., Pandey, R. P., Jain, M. K. & Byun, H.-R. 2015 "Comparison of Drought Indices for Appraisal of Drought Characteristics in the Ken River Basin." Weather and Climate Extremes, vol. 8, Elsevier, pp. 1-11.
6. Karamouz, M., and Eraghi nejad, Sh., 2014 Professional Hydrology. (In Persian)
7. Khazayi, M., and Telvari, A., 2003 "Hydrological Drought Frequency Distribution Analysis." Journal of Geography and Urban Development, pp. 45-56. (In Persian)
8. Liu, L. Hong, Y. Bednarczyk, Ch N. Yong, Bin Shafer, M A. Riley, R. and Hocker, J E. 2012 "Hydro-Climatological Drought Analyses and Projections Using Meteorological and Hydrological Drought Indices: A Case Study in Blue River Basin, Oklahoma." Water Resources Management, vol. 26, no. 10, Springer, pp. 2761-79.
9. Lorenzo-Lacruz, J., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S. M. & López-Moreno, J. I. 2013 "Streamflow Droughts in the Iberian Peninsula between 1945 and 2005: Spatial and Temporal Patterns." Hydrology and Earth System Sciences, vol. 17, no. 1, Copernicus GmbH, p. 119.
10. Mavedat, E, and Maleki, S. 2014 Classification and Spatial Measurement of Social-Physical Damages of the Cities against Earthquakes by Usjing VIKOR Technique and GIS, Case Study: Yazd City. GEOGRAPHY AND TERRITORIAL SPATIAL ARRANGEMENT. (In Persian)
11. McKee, T. B. Doesken, N. J. and Kleist, J. 1993 "The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales." Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, vol. 17, no. 22, pp. 179-83.
12. Mozafari, Gh.A. 2006. "UNCONFORMITY IN METEOROLOGICAL AND HYDROLOGICAL DROUGHT IN TWO NEIGHBORING BASINS AT THE NORTH SLOPE OF SHIRKOH MOUNTAIN IN YAZD". MODARRES HUMAN

در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های بارندگی سالانه مقادیر شاخص خشک‌سالی SPI و با استفاده از داده‌های دبی جریان رودخانه، شاخص خشک‌سالی SSI در ۵ ایستگاه منتخب در استان تهران محاسبه گردید و وضعیت خشک‌سالی این استان با تجزیه و تحلیل شاخص‌ها مشخص گردید. هم‌چنین انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع تجمعی برای انجام محاسبات مربوط به شاخص خشک‌سالی SSI یکی دیگر از اهداف این تحقیق بوده است. در ایستگاه درکه تابع لوگ لجستیک، ایستگاه فیروزکوه و ابعلی تابع گاما، ایستگاه نمرود تابع فیتینگ لایف و در ایستگاه شریف‌آباد تابع بتا به عنوان مناسب‌ترین توابع توزیع تجمعی تعیین گردیدند. در بین ایستگاه‌ها با توابع مناسب یاد شده، ایستگاه درکه با بیش‌ترین مقدار P-Value (۰/۹۹۶) و کم‌ترین مقدار RMSE (۰/۹۱۶) بهترین برازش را با تابع لوگ لجستیک داشته است. با مطالعه و مقایسه شاخص‌های خشک‌سالی SPI و SSI در استان تهران تطابق بین شاخص هواشناسی و هیدرولوژیک ثابت گردید. به عبارت دیگر، هم‌چون تحقیقات پیشین منابع آب سطحی در استان تهران نیز به شدت از بارش تاثیرپذیر است و با نوسانات بارندگی جریانات آب سطحی هم، نوسان نشان می‌دهند. بنابراین با توجه به شکل ۵ و ۶ می‌توان بیان کرد که روند کاهشی و افزایشی این دو شاخص در سال‌های مورد مطالعه بر هم منطبق می‌باشند. مطالعات مشابهی نظیر تحقیقات سلیمانی و همکاران در هلی‌رود، وردی‌پور و همکاران در دشت مشهد و لیو و همکاران در اوکلاهاما با موضوع تطابق شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیک انجام گرفته است که جملگی نشان دهنده تطابق این دو نوع شاخص بر هم می‌باشند [۱۷ و ۲۰ و ۸]. از دیگر یافته‌های این پژوهش می‌توان بیان نمود که بر اساس پژوهش‌های پیشین تابع گاما به عنوان بهترین تابع برای محاسبه‌ی شاخص SPI به کار می‌رود، هم‌چنین در این تحقیق در محل هر ۵ ایستگاه شاخص SPI بر اساس تابع گاما محاسبه شده است، اما برای محاسبه شاخص SSI در هر ایستگاه برترین تابع با توجه به داده‌های دبی آن ایستگاه انتخاب گردیده است که این امر موجب بالا رفتن سطح دقت در صحت محاسبه این شاخص و هم‌چنین پیش‌بینی روند خشک‌سالی در آینده می‌شود.

هم‌چنین نتایج شاخص‌های خشک‌سالی در بازه زمانی ۱۳۷۹-۱۳۷۴ مبنی بر وجود تداوم و شدت خشک‌سالی به عنوان ویژگی‌های اصلی تعریف خشک‌سالی می‌باشد.

امید است تا مدیران و سیاست‌گذاران برای رسیدن به مدیریت صحیح منابع آبی، از پایش خشک‌سالی بر اساس شاخص‌های متنوع بهره‌جویند و بر اساس روند، شدت و تداوم خشک‌سالی در سال‌های گذشته به پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی و یا ترسالی منطقه در سال‌های آتی بپردازند.

19. Václav, D. and Davidová, T. 2017 "Relating Hydrological and Meteorological Drought Indices in Order to Identify Causes of Low Flows in the Catchment of Blanice River." *Environmental Processes*, vol. 4, no. 1, Springer, pp. 149–61.
20. Vardipour, A. Azaraksh, M. Mosaedi, A. and Farazmehr, J. 2014 "The Relationship between Meteorological and Hydrological Droughts Mashhad Plain." *The National Conference of Sciences and Environment Engineering*. (In Persian)
21. Vicente-Serrano, S M. López-Moreno, J I. Beguería, S. Lorenzo-Lacruz, J. Azorin-Molina, C. and Morán-Tejeda, E. 2011 "Accurate Computation of a Streamflow Drought Index." *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 17, no. 2, American Society of Civil Engineers, pp. 318–32.
22. Zhang, Q. Zhou, Y. Singh, V. P. and Chen, Y. D. 2016 "Exploring Spatiotemporal Relationships among Meteorological, Agricultural, and Hydrological Droughts in Southwest China." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 30, no. 3, pp. 1033–44.
23. Zhang, Q. Zhou, Y. Singh, V. P. and Chen, Y. D. 2011 "Comparison of Detrending Methods for Fluctuation Analysis in Hydrology." *Journal of Hydrology*, vol. 400, no. 1–2, Elsevier, pp. 121–32.
- SCIENCES. (In Persian)
13. Musavi, H. Vali, A. and Moayeri, M. 2009 "Study of Drought Severity and Its Severity in Semnan Using DI Index." *Isfahan Agricultural and Natural Resources Research Center*. (In Persian)
14. Pathak, A A. and Dodamani, B M. 2016 "Comparison of Two Hydrological Drought Indices." *Perspectives in Science*, vol. 8, Elsevier, pp. 626–28.
15. Sahoo, R. N. Dutta, D. Khanna, M., Kumar, N. and Bandyopadhyay, S. K. 2015 "Drought Assessment in the Dhar and Mewat Districts of India Using Meteorological, Hydrological and Remote-Sensing Derived Indices." *Natural Hazards*, vol. 77, no. 2, Springer, pp. 733–51.
16. Shiau, J. T. "Fitting Drought Duration and Severity with Two-Dimensional Copulas." *Water Resources Management*, vol. 20, no. 5, Springer, 2006, pp. 795–815.
17. Soleimanisardou, F. and Bahramand, A. 2014 "Hydrological Drought Analysis Using SDI Index in Halilrud Basin of Iran." *Environmental Resources Research*, vol. 2, no. 1, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, pp. 47–56. (In Persian)
18. Teimuri, F. Ghorbani, K. Bazrafshan, J. and Sharifan, H. 2015 "Comparative Study of Meteorological Indices with Hydrological Indices for Drought Monitoring Using Data Mining Method (Case Study: Arazakuseh Station-Golestan Province)." *Iranian Water and Soil Research, IRANIAN JOURNAL OF SOIL AND WATER RESEARCH*. (In Persian)

*Abstract*

A Comparative Study of Meteorological (SPI) and Hydrological Drought Index (SSI) Based on the Best Cumulative Distribution Function in Tehran Province

M. H. Jahangir¹ and S. M. Mousavi²

Received: 01-07-2018 Accepted: 07-04-2019

Abstract

The permanence of rainfall shortage compared with the long-term average of meteorological droughts, reduces river flow, groundwater level and hydrological droughts. To quantify the drought, several indexes have been defined. In this study, two drought indexes, including standardized precipitation index (SPI) and standardized streamflow index (SSI), were used for meteorological and hydrological drought monitoring. The aim of this study was the monitoring the drought in 5 stations in Tehran province during the period of (1985-2016), determining the most appropriate cumulative distribution function for calculating the SSI drought index and also comparative study of meteorological and hydrological drought indicators in this province. The results show that the most suitable cumulative distribution function at the Darake station is Gen-Loglogestic, at the Firuzkuh and Abali station is Gamma, at the Namrud station is Fatigue life and at the Sharifabad station is Beta. Among the stations with proper functions, Derek with the highest P-value (0.996) and the lowest RMSE (0.916) had the best fit with the Gen-Loglogestic distribution function. Also, the similarity in the process of drought resulting from two different indicators, indicates that the meteorological and hydrological indicators are completely same, in other words, surface water resources in Tehran province are completely influenced by rainfall.

Keywords: *Drought monitoring, Standardized Stream flow Index (SSI), Standardized precipitation Index (SPI), Distribution function, Tehran province*

1. Corresponding Author and Professor, Renewable Energy and Environment, Faculty of New of Science and Technologies, University of Tehran, Email: Mh.jahangir@ut.ac.ir

2. Msc. Student of Ecohydrology, Faculty of New of Science and Technologies, University of Tehran