



بررسی وضعیت خشکسالی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در طی دوره های آتی

علیرضا مقدم نیا^{۱*}، سیما ظاهری^۲

۱- دانشجویار گروه مهندسی احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، a.moghaddamnia@ut.ac.ir

۲- دانشجوی ارشد علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، sima.zaheri@ut.ac.ir

چکیده

از آنجایی که خشکسالی یک پدیده اقلیمی گسترده بوده که از کمبود بارندگی در یک منطقه به وجود می آید، لذا توزیع منطقه ای آن یکی از ویژگی های مهم به شمار می رود. تاکنون شاخص های زیادی جهت تحلیل خشکسالی ارائه گردیده است که می توان به SPI و MSPI اشاره کرد. در این پژوهش از چهار ایستگاه ارومیه، تبریز، سقز و دریان طی دوره آماری ۳۰ سال توسط مدل LARS-WG بر اساس سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 ریزمقیاس نمایی گردید و طبق سناریوی RCP2.6 بیشترین میزان همبستگی در ایستگاه دریان با مقدار ۰/۶۳ و در سناریوی RCP8.5 بیشترین مقدار همبستگی در ایستگاه سقز با مقدار ۰/۵۱ مشاهده گردید. در بررسی میزان همبستگی شاخص ها با یکدیگر، ایستگاه سقز بهترین مکان برای منطقه برای بکارگیری شاخص ها مشخص شد. در ادامه پژوهش شاخص SPI و MSPI در مقیاس ۱۲ ماهه برای سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 هر کدام از ایستگاه ها برآورد گردید. نتیجه پژوهش نشان داد که تفاوت معنی داری میان شاخص های خشکسالی برای ارزیابی و پایش خشکسالی وجود ندارد. طی ۳۰ سال آینده در دوره نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و دوره دور (۲۰۵۱-۲۰۸۰) در تمام ایستگاه ها با خشکسالی شدید مواجه خواهیم شد به طوریکه شدت و فراوانی خشکسالی ها در دوره دور نسبت به دوره مشاهداتی و دوره نزدیک بیشتر شده است. بیشترین مقدار خشکسالی برای ایستگاه تبریز و کمترین مقدار خشکسالی برای ایستگاه سقز و ارومیه می باشد. با توجه به نتیجه تحقیق، اعمال مدیریت و برنامه ریزی برای آینده ضروری می باشد.

واژگان کلیدی: شاخص های خشکسالی، سناریوهای اقلیمی، توزیع منطقه ای خشکسالی، حوزه آبخیز دریاچه ارومیه



۱-مقدمه

خشکسالی یکی از مخاطرات طبیعی زیانبار می‌باشد و به کمبود مستمر و غیرطبیعی بارش و رطوبت گفته می‌شود که دارای اثر تدریجی بوده و در دوره زمانی طولانی رخ می‌دهد. در واقع خشکسالی حالتی طبیعی و مستمر از اقلیم است، در حالی که بسیاری به اشتباه آن را واقعه‌ای تصادفی می‌پندارد، این پدیده به تقریب در تمامی مناطق اقلیمی رخ می‌دهد ولی مشخصه آن از یک منطقه به منطقه‌ای دیگر به طور کامل تفاوت دارد. پدیده خشکسالی موجب کاهش سریع جریان‌های سطحی، افت مخازن زیرزمینی، فرسایش آبی و بادی خاک، تغییر کیفیت منابع آب و خاک، افزایش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و نشست زمین می‌شود. بنابراین پیش‌بینی و آمادگی مدیریت آن تا حدی از مشکلات ناشی از این پدیده می‌کاهد. در حال حاضر مدیریت خشکسالی در ایران بر مبنای مدیریت بحران بنا شده و به دلیل اینکه برنامه‌ریزی‌های تدوین شده نیست، تصمیم‌گیری و اقدامات عملیاتی دیر هنگام بوده و تصمیمات فاقد کارایی لازم می‌باشد. این در حالی است که در مدیریت خشکسالی، تاکید بر برنامه‌ریزی و ایجاد آمادگی و کاهش بحران خشکسالی است و با اعمال این مدیریت در زمان قبل از وقوع خشکسالی و آمادگی لازم می‌توان به مقابله با خشکسالی اقدام کرد [۱]. جهت کاهش اثرات این پدیده و مدیریت خطر آن، ارزیابی خشکسالی و تداوم دوره‌های آن ضروری می‌باشد [۲].

به طور کلی خشکسالی یکی از مزمن‌ترین و زیان‌بارترین بلاهای طبیعی است که جمعیت‌های انسانی را تحت تاثیر قرار داده و باعث بروز بسیاری از مشکلات می‌گردد [۳]. در ادامه به تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده است اشاره خواهد شد. فضل‌اولی و همکاران [۴] با استفاده از شاخص‌های اصلاح شده بارش استاندارد شده (SPI_{mod}) و خشکسالی جریان رودخانه‌ای (SDI_{mod}) جهت ارزیابی و تحلیل زمانی وقوع خشکسالی‌ها در حوزه آبخیز تجن پرداختند. برای این منظور آمار ۱۵ ایستگاه باران‌سنجی و ۴ ایستگاه هیدرومتری در حوزه آبخیز تجن استفاده شد و شاخص‌ها در شش بازه زمانی کوتاه مدت (یک و سه ماهه)، میان مدت (شش و نه ماهه) و بلند مدت (دوازده و بیست و چهار ماهه) در نرم افزار MATLAB محاسبه شد. مقادیر شاخص اصلاح شدت خشکسالی جریان رودخانه‌ای با سری‌های زمانی شاخص اصلاح شده بارندگی استاندارد در بازه‌های زمانی مختلف به روش همبستگی پیرسون در کل حوزه و همچنین به تفکیک زیر حوزه‌ها بررسی شد. نتایج همبستگی بالا در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار را در رابطه زمانی وقوع خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی با یکدیگر نشان داد و این همبستگی در حوزه آبخیز تجن در گام زمانی ۹ ماهه حداکثر است. همچنین وقوع خشکسالی هواشناسی در منطقه مورد مطالعه، اثر خود را در همان ماه و با تاخیرهای ۱ تا ۷ ماهه روی منابع آب سطحی نشان داده است. باقری [۵] نقشه خطر خشکسالی را در استان فارس را با کمک شاخص بارش استاندارد شده و GIS بین سال‌های ۲۰۱۱-۱۹۹۴ برآورد کرد. نتایج نشان داد خشکسالی که از جنوب استان آغاز شده به سرعت در حال پیشروی به سمت شمال، شمال شرق و شمال غرب استان است. شاکر و اسدی [۶] به بررسی تاثیر خشکسالی هیدرولوژیکی و هواشناسی دشت سلماس بر نوسانات سطح آب زیرزمینی پرداختند. در این پژوهش با محاسبه سه شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، رواناب استاندارد شده (SRI) و منابع آب زیرزمینی (GRI) در محدوده منطقه مورد مطالعه در دوره آماری ۱۳۶۵-۱۳۶۴ تا ۱۳۹۵-۱۳۹۶ اثرات خشکسالی بر نوسانات هیدرولوژیکی بررسی شد. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده رابطه بین شاخص SPI دوازده ماهه و شاخص SRI یک ماهه در مقیاس کوتاه مدت با شاخص GRI است. نتایج حاکی از آن است که خشکسالی هواشناسی با خشکسالی آب زیرزمینی رابطه معنی‌داری با تاخیر فاز زمانی یک ماهه GRI در مقیاس زمانی کوتاه مدت (P-value_{SPI 12} = 0.998) دارد و خشکسالی هیدرولوژیکی نسبت به خشکسالی آب زیرزمینی با تاخیر شش ماهه GRI در مقیاس کوتاه مدت (P-value_{SRI 1} = 0.993) ارتباط بسیار خوبی دارد. فنگ‌یه و همکاران [۷] ویژگی‌های خشکسالی در شمال تایوان را به کار بردن شاخص خشکسالی رودخانه (SDI) و زنجیره مارکوف مورد بررسی قرار دادند. آنالیز نتایج زمانی در سه ماه (نوامبر تا ژانویه) و شش ماهه (نوامبر تا آوریل) خشکسالی قابل توجهی را نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که احتمال رویداد پدیده خشکسالی در حوزه

1- Streamflow Drought Index

2- Standard Precipitation

3- Standardized Runoff Index

4- Groundwater Resource Index

5 -Feng Yeh

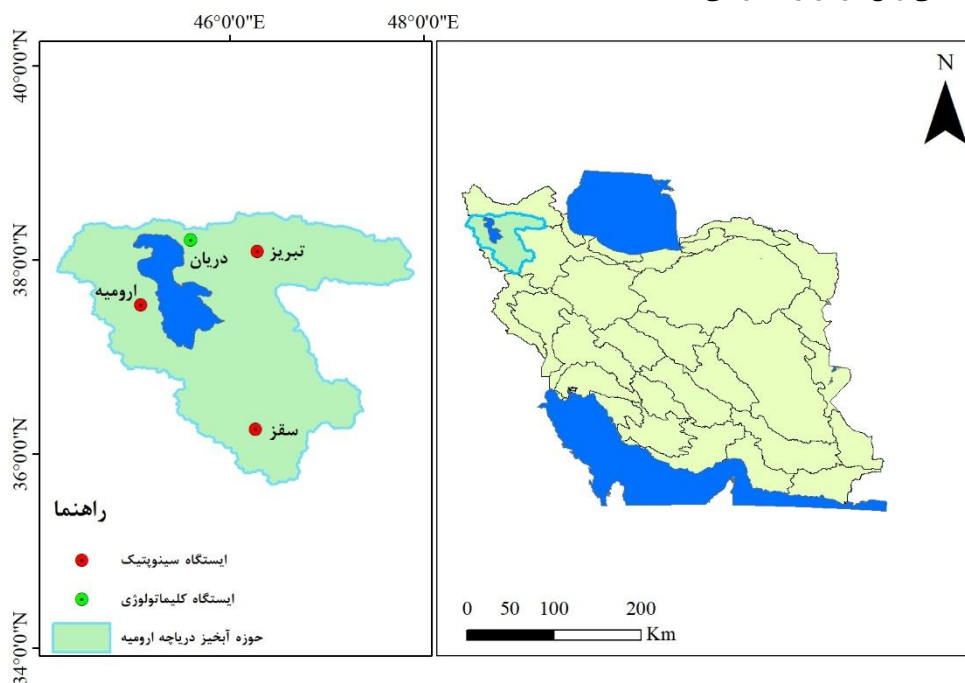


رودخانه لاینانگ نسبت به رودخانه ییلان بیشتر است. ژاینائو همکاران [۸] طی مطالعه‌ای در قسمت بالای رودخانه پوآتی در جنوب اکوادور با شاخص استاندارد بارندگی و تبخیر و تعرق برای خشکسالی در دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۰۵) و دوره پیش‌بینی (۲۰۱۱-۲۰۷۰) با RCP4.5 و RCP8.5 با دوره بازگشت ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال انجام دادند. نتایج نشان داد که در آینده نزدیک کاهش چشمگیری در بزرگی و مدت زمان خشکسالی خواهیم داشت و همچنین شدت خشکسالی با افزایش دوره بازگشت حالت افزایشی دارد. با توجه به مطالعات فوق‌الذکر کشور ایران در چند دهه اخیر با پدیده کم‌آبی و بحران خشکسالی روبه‌رو بوده است و حوزه آبخیز دریاچه ارومیه که یکی از مهم‌ترین حوزه‌های آبخیز کشور می‌باشد از این قاعده مستثنا نیست و این پدیده خسارات قابل توجهی به واسطه کاهش منابع آب زیرزمینی و سطحی، در سطح ملی و منطقه‌ای وارد ساخته است. بنابراین اثرات احتمالی خشکسالی جهت پیش‌بینی، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در آینده ضروری است.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز دریاچه ارومیه دارای مختصات جغرافیایی ۴۴ تا ۴۷ درجه طول شرقی و ۳۵ تا ۳۷ درجه عرض شمالی در شمال غرب کشور می‌باشد. متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۱ درجه سانتی‌گراد و میانگین سالانه بارندگی بین ۱۸۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر است. این دریاچه دارای ۲۱ رودخانه اصلی و فصلی از جمله آجی چای، زرینه‌رود، سیمینه‌رود و کهریز چای به همراه ۴۹ رودخانه مقطعی می‌باشد. از مهم‌ترین جزیره‌های دریاچه، می‌توان به کبودان، اسپیر، آرزو و اشک داغی اشاره کرد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوزه دریاچه ارومیه و ایستگاه‌های هواشناسی واقع در آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

6 - Zhiña

7 - Puate

8 - Ecuador



۲-۲ روش تحقیق

در این مطالعه به منظور تحلیل خشکسالی در طی دوره آبی در سطح حوزه دریاچه ارومیه، آمار بارش روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی که دارای طول دوره آماری کافی بودند از سازمان هواشناسی اخذ گردید. بدین منظور داده‌های روزانه بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه ریزمقیاس و سپس شاخص‌های خشکسالی برآورد گردید. مشخصات ایستگاه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	متوسط بارش (میلیمتر)	نوع ایستگاه	دوره آماری
دریان	۴۵/۶	۳۸/۲	۱۵۸۰	۲۴۱	کلیماتولوژی	۱۹۸۸-۲۰۱۸
تبریز	۴۶/۲۴	۳۸/۱۲	۱۳۶۱	۵۳۴	سینوپتیک	۱۹۹۰-۲۰۲۰
سقز	۴۶/۳۱	۳۶/۲۲	۱۵۲۲	۲۷۸	سینوپتیک	۱۹۹۰-۲۰۲۰
ارومیه	۴۵/۰۵	۳۷/۶۵	۱۳۲۸	۳۳۹	سینوپتیک	۱۹۹۰-۲۰۲۰

۳-۲ - ریزمقیاس‌نمایی مدل گردش عمومی جو

در این پژوهش به منظور ریزمقیاس‌نمایی و پیش‌بینی پارامتر بارش طی دوره آبی از مدل LARS-WG تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 استفاده گردید. این مدل برای مدل‌سازی متغیرهای هواشناسی، توزیع‌های آماری پیچیده‌ای را به کار می‌برد و بر مبنای تولید سری‌های آب و هوایی دمای حداقل، حداکثر، تابش و بارش و طول سری‌های تر و خشک می‌باشد. همچنین برای طول سری‌های تر و خشک، بارش روزانه و تابش روزانه از توزیع نیمه‌تجربی استفاده می‌کند. ارزیابی توانمندی این مدل از طریق مقایسه بین داده‌های گذشته یا داده‌های تولید شده توسط مدل، انجام می‌گیرد. در سناریوهای تغییر اقلیم استفاده شده در این پژوهش در ادامه توضیح داده می‌شود.

RCP8.5

در این سناریو بدون اتخاذ هیچ‌گونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای تغییر اقلیم کره زمین، میزان غلظت کربن‌دی‌اکسید تا سال ۲۱۰۰، ۱۳۷۰ ppm تخمین زده شده است و اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشتهای تابشی تا ۸/۵ وات در مترمربع پیش‌بینی شده است. همچنین در این سناریو میزان جمعیت تا سال ۲۱۰۰ حدود ۱۲ میلیارد نفر خواهد بود که این میزان، جمعیتی بین سناریوهای A1 و A2 در سناریوهای انتشار SRES است. از سوی دیگر در این سناریو میزان تولید ناخالص داخلی در کشورهای توسعه یافته به دلیل افزایش جمعیت و سطح پایین توسعه تکنولوژی پایین است.

RCP2.6

این سناریو دربرگیرنده کمترین نرخ افزایش گازهای گلخانه‌ای و واداشته تابشی ناشی از آن است. مطابق این سناریو واداشته تابشی در اواسط این قرن افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در این سناریو میزان غلظت کربن‌دی‌اکسید تا سال ۲۱۰۰، ۴۹۰ ppm تخمین زده شده است و اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشتهای تابشی در اواسط این قرن به حد ۳/۱ وات در مترمربع رسیده و سپس کاهش یافته و به ۲/۶ وات در مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد. برای رسیدن به این سطح واداشته تابشی بایستی از گازهای گلخانه‌ای به میزان قابل توجهی کاهش یابد. همچنین در این سناریو میزان جمعیت تا سال ۲۱۰۰ حدود ۷ میلیارد نفر تخمین زده شده است. از سوی دیگر رشد تکنولوژی‌های جدید نسبت به دیگر سناریوها بیش‌تر است و به دلیل نرخ رشد جمعیت پایین و استفاده از انرژی‌های نو، میزان تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتر از سایر سناریوها است.

۴-۲ - شاخص‌های خشکسالی

۱-۴-۲ - شاخص بارش استاندارد شده (SPI)



یکی از روش‌های تعیین خشکسالی، شاخص بارش استاندارد شده است که توسط Mackee و همکاران [۹] و با هدف پایش خشکسالی در ایالت کلرادو ارائه شد. این شاخص به دلیل سادگی در محاسبات، استفاده از داده‌های قابل دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی و هر نوع شرایط آب و هوایی به عنوان مناسب‌ترین شاخص شناخته می‌شود. شاخص مذکور برای محاسبه خشکسالی در مقیاس‌های کوتاه‌مدت (۱، ۳ و ۶ ماهه) و بلندمدت (۱۲، ۲۴، ۴۸، ۷۲ ماهه) و بر مبنای داده‌های بارش که همبستگی بالایی نسبت به هم دارند استوار است. یکی از روش‌های تعیین خشکسالی، شاخص بارش استاندارد شده است که توسط Mackee و همکاران [۹] و با هدف پایش خشکسالی در ایالت کلرادو ارائه شد. این شاخص به دلیل سادگی در محاسبات، استفاده از داده‌های قابل دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی و هر نوع شرایط آب و هوایی به عنوان مناسب‌ترین شاخص شناخته می‌شود. شاخص مذکور برای محاسبه خشکسالی در مقیاس‌های کوتاه‌مدت (۱، ۳ و ۶ ماهه) و بلندمدت (۱۲، ۲۴، ۴۸، ۷۲ ماهه) و بر مبنای داده‌های بارش که همبستگی بالایی نسبت به هم دارند استوار است. به طور کلی به منظور محاسبه SPI، باید به تابع توزیع گاما برازش داده شود. تابع چگالی احتمال این توزیع در معادله ۱ آورده شده است.

$$G(x) = \int_0^x \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x X^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad \text{for } X > 0 \quad (1)$$

X مقدار بارش، α پارامتر شکل، β پارامتر مقیاس. Γ معرف تابع گاما است. لازم به ذکر است که مقادیر β ، α ، X با استفاده از معادلات ۲ تا ۴ محاسبه می‌شود.

$$\alpha = \frac{1}{4A} \sqrt{\left(1 + \frac{4A}{3}\right)} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\bar{X}}{4A} \quad (3)$$

$$A = \ln(\bar{X}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (4)$$

N تعداد مشاهدات بارندگی است. به علاوه \bar{X} برای هر یک ماه مشخص، میانگین بارندگی تجمعی برای یک ماه در طول دوره آماری است. پارامترهای محاسبه شده اجازه می‌دهد که توزیع بارندگی در ایستگاه به صورت موثری توسط یک تابع احتمال ریاضی به صورت معادله ۵ نشان داده شود.

$$G(x) = \int_0^x \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x X^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (5)$$

از آنجا که گاما برای مقادیر $X=0$ تعریف نشده است و توزیع بارندگی ممکن است مقدار صفر اتخاذ کند احتمال تجمعی با استفاده از رابطه ۶ به دست می‌آید.

$$H(x) = q + (1 - q) G(x) \quad (6)$$

Q همان احتمال صفر و $H(x)$ تابع احتمال تجمعی با وجود داده‌های $X=0$ است. سپس برای تولید مقادیر SPI تجمعی $H(x)$ به توزیع نرمال استاندارد مبدل شده است.

به منظور تفسیر و بررسی نتایج حاصل از این محاسبه جدولی ارائه شده که در آن مقادیر مثبت نشان‌دهنده بارندگی بیش از بارش متوسط و مقادیر منفی عکس آن است. طبق این روش، خشکسالی زمانی روی می‌دهد که SPI به طور مستمر منفی و به ۱- یا کمتر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که مثبت شود. مدت دوره خشکسالی با شروع و خاتمه ارقام منفی آن تعیین می‌شود و مقادیر تجمعی SPI نیز بزرگی و شدت دوره خشکسالی را نشان می‌دهد. از مزایای این شاخص توانایی ارائه SPI در هشدار اولیه در مورد خشکسالی و شدت آن می‌باشد. البته باید توجه شود که SPI توزیع نرمال را برای بارش در نظر می‌گیرد. چون بارندگی اغلب از توزیع نرمال پیروی نمی‌کند، لذا باید قانون احتمالی حاکم بر آن را پس از مشخص کردن به نرمال استاندارد تبدیل کرد [۹].

۲-۴-۲- شاخص بارندگی استاندارد شده چند متغیره (MSPI)



شاخص بارندگی استاندارد چند متغیره (MSPI) مبتنی بر اولین مولفه اصلی (PC1) است. PC1 ترکیب خطی از K متغیر اولیه (K) سری زمانی SPI متناظر با K مقیاس زمانی که برابر با ۱۰ است) است که می‌تواند بیشترین درصد تغییرپذیری در K متغیر اولیه را توضیح است. به دلیل خصلت جبری PC1، مقادیر آن نیز بین ماه‌ها و مکان‌های مختلف قابل مقایسه نیست، یعنی بر خلاف SPI، که دارای میانگین صفر و واریانس یک است، PC1 از چنین ویژگی برخوردار نمی‌باشد. بنابراین، لازم است سری زمانی PC1 نسبت به میانگین و انحراف معیار ماه‌های PC1 نسبت به میانگین و انحراف معیار ماه‌های مختلف سال استاندارد شود:

$$Z_{lym} = \frac{PC_{lym} - \overline{PC}_{lm}}{SD_{lm}} \approx \frac{PC_{lym}}{SD_{lm}} \quad (7)$$

که در آن Z_{lym} مقدار استاندارد شده PC_i در y امین سال و m امین ماه است، در واقع میانگین PC_i در ماه m است و SD_{lm} انحراف معیار PC_i در ماه m است. با توجه به این که مقدار \overline{PC} در رابطه بالا کوچک و نزدیک به صفر است، پس می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد.

جدول ۲. طبقه‌بندی شاخص بارندگی استاندارد SPI و MSPI

ردیف	وضعیت	MSPI و SPI
۱	فرامرطوب	$2 \leq$
۲	بسیار مرطوب	۱/۵ تا ۱/۹۹
۳	نسبتاً مرطوب	۱ تا ۱/۴۹
۴	نزدیک نرمال	۰/۹۹ تا -۰/۹۹
۵	نسبتاً خشک	-۱ تا -۱/۴۹
۶	بسیار خشک	-۱/۵ تا -۱/۹۹
۷	فرا خشک	≤ -2

۳-۴-۲- معیارهای ارزیابی خطا

در این تحقیق به منظور ارزیابی دقت برآورد از دو معیار ارزیابی خطا شامل ضریب همبستگی (r) و ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است. روابط مربوط به این آماره‌ها به صورت زیر می‌باشند:

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (9)$$

در این روابط، X_i و Y_i به ترتیب i امین داده واقعی (مشاهده شده) و برآورد شده، \bar{X} و \bar{Y} میانگین کل داده‌های X_i و Y_i در کل جامعه آماری و n تعداد کل نمونه‌های ارزیابی شده است (۱۰).

۴- نتایج

در این پژوهش به منظور تحلیل خشکسالی طی دوره آبی با استفاده از مدل LARS-WG پارامتر بارش ریزمقیاس‌نمایی گردید. در ادامه به منظور بررسی دقت و کارایی این مدل جهت ریزمقیاس‌نمایی از معیارهای R و RMSE استفاده شد. سپس شاخص‌های



خشکسالی SPI و MSPI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه برای RCP2.6 و RCP8.5 برای دوره نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱) و دوره دور (۲۰۸۰-۲۰۵۱) برآورد گردید. همچنین برای تعیین مناسبترین منطقه جهت بکارگیری شاخصهای خشکسالی، همبستگی این شاخصها با یکدیگر در ایستگاههای مورد مطالعه بررسی شد.

به منظور محاسبه میزان همبستگی سناریوهای تغییر اقلیم با دادههای مشاهداتی از معیارهای ارزیابی خطا R و RMSE استفاده گردید که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج این جدول، در سناریوی RCP2.6 ایستگاه دریان با مقدار ۰/۶۳ و در سناریوی RCP8.5 ایستگاه سقز با مقدار ۰/۵۱ بیشترین همبستگی را نسبت به ایستگاههای دیگر دارند. همچنین کمترین مقدار RMSE در سناریوی RCP2.6 برای ایستگاه دریان و بیشترین برای ایستگاه سقز می باشد. همچنین در سناریوی RCP8.5 کمترین مقدار RMSE متعلق به ایستگاه تبریز و بیشترین مقدار برای ایستگاه سقز می باشد.

جدول ۳. نتایج میزان همبستگی سناریوهای تغییر اقلیم (RCP2.6 و RCP8.5) با دادههای مشاهداتی

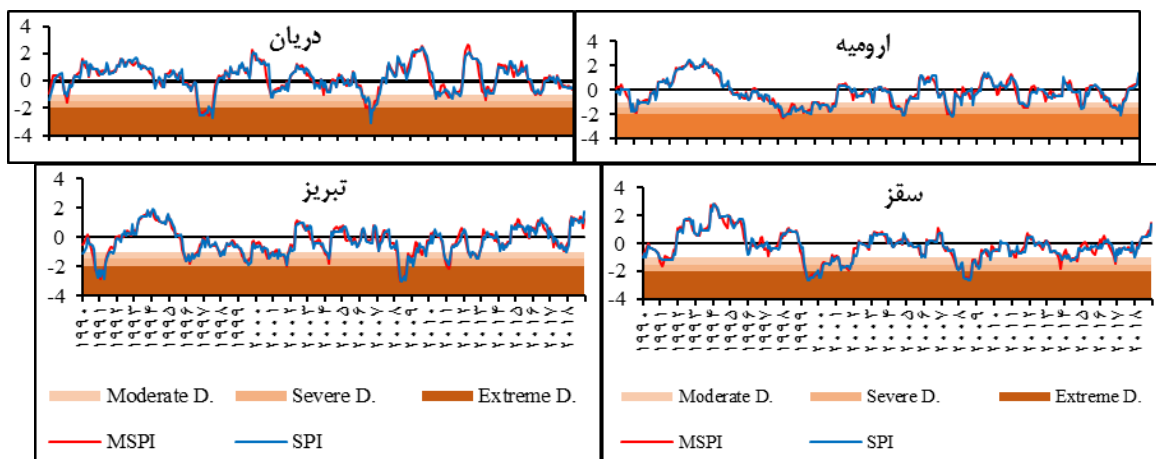
نام ایستگاه	RCP2.6		RCP8.5	
	RMSE	R	RMSE	R
دریان	۸/۳۷	۰/۶۳	۳۷/۰۶	۰/۴۴
تبریز	۲۶/۰۱	۰/۳۳	۲۶/۳۵	۰/۲۰
سقز	۴۱/۱۷	۰/۵۰	۴۱/۰۷	۰/۵۱
ارومیه	۳۳/۵۹	۰/۳۸	۳۳/۸۸	۰/۳۶

در این بخش از پژوهش، به محاسبه ضریب همبستگی در ایستگاههای مورد مطالعه با دو شاخص خشکسالی هواشناسی SPI و MSPI با کمک ضریب تعیین در جدول ۴ پرداخته شد. بر اساس جدول مذکور این دو شاخص در همه ایستگاهها همبستگی بیشتری دارند اما همبستگی ایستگاه سقز از بقیه ایستگاهها بیشتر می باشد. همچنین مقدار خطای RMSE همانند ضریب تعیین در ایستگاه سقز کمتر از بقیه ایستگاهها است و با توجه به مطالب بیان شده مشخص می شود که سقز مناسبترین منطقه برای بکارگیری شاخصهای خشکسالی هواشناسی می باشد.

جدول ۴. نتایج میزان همبستگی شاخصهای هواشناسی SPI و MSPI در دوره مشاهداتی

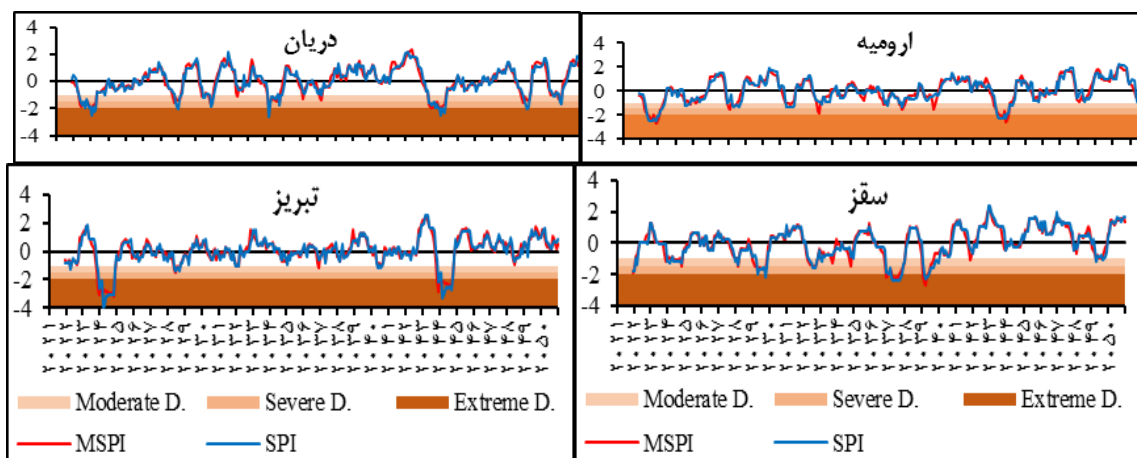
نام ایستگاه	RMSE	R
دریان	۰/۳۰	۰/۹۶
تبریز	۰/۲۷	۰/۹۶
سقز	۰/۲۵	۰/۹۷
ارومیه	۰/۲۷	۰/۹۰

نتایج حاصل از محاسبه شاخص SPI و MSPI برای دوره مشاهداتی در شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می شود، در اکثر ایستگاهها در فاصله زمانی ۱۹۹۱-۱۹۹۰، ۱۹۹۸-۱۹۹۹ و ۲۰۰۸-۲۰۰۹ وقوع خشکسالیها بیشتر بوده است. همچنین در ایستگاه دریان وقوع نوسانات خشکسالی نسبت به ایستگاههای دیگر در دوره مشاهداتی کمتر بوده است. در تحلیل نتایج حاصل از محاسبه این شاخصها مشخص شد که شدتهای متفاوت شاخصهای گفته شده در ایستگاههای مورد بررسی متفاوت به دست آمد. در این راستا ایستگاه ارومیه شدت خشکسالی کمتری نسبت به سایر ایستگاهها داشته است. بر اساس نتایج در ایستگاه ارومیه در سال ۱۹۹۹ خشکسالی با بیشترین شدت اتفاق افتاده است در حالیکه در ایستگاههای دریان، تبریز و سقز خشکسالی با شدت زیاد در سالهای ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ اتفاق افتاده است.



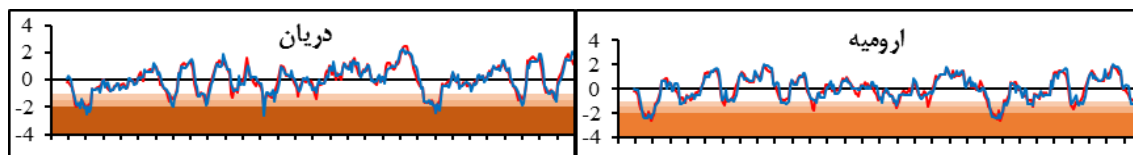
شکل ۲. مقایسه شاخص SPI و MSPI برای دوره مشاهداتی با دوره زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰

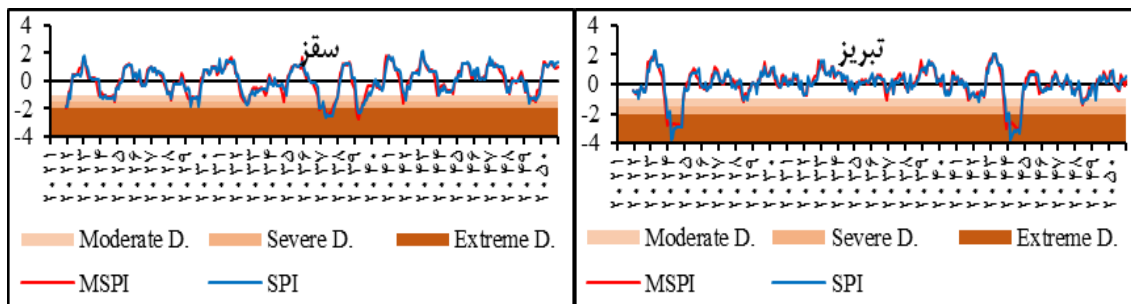
با توجه به نتایج حاصل از RCP_{2.6} در شکل ۳، ایستگاه دریان در سال‌های ۲۰۲۳-۲۰۲۴، ۲۰۴۳-۲۰۴۴ و ۲۰۳۳-۲۰۳۴ و ایستگاه تبریز در سال‌های ۲۰۲۴-۲۰۲۵ و ۲۰۴۴-۲۰۴۵ دارای بیشترین شدت خشکسالی می‌باشد و همچنین تعداد وقوع خشکسالی در ایستگاه دریان از دیگر ایستگاه‌ها بیشتر است. مقدار خفیف خشکسالی در ایستگاه ارومیه مشاهده گردید. مقدار برآورد دو شاخص در ایستگاه دریان نسبت به یکدیگر متفاوت است در واقع مقدار SPI بیشتر از مقدار MSPI می‌باشد. در تمام ایستگاه‌ها سال‌های ۲۰۲۳-۲۰۲۴ به جز ایستگاه سقز دارای شدت خشکسالی بیشتری می‌باشد.



شکل ۳- مقایسه شاخص SPI و MSPI برای RCP_{2.6} با دوره نزدیک

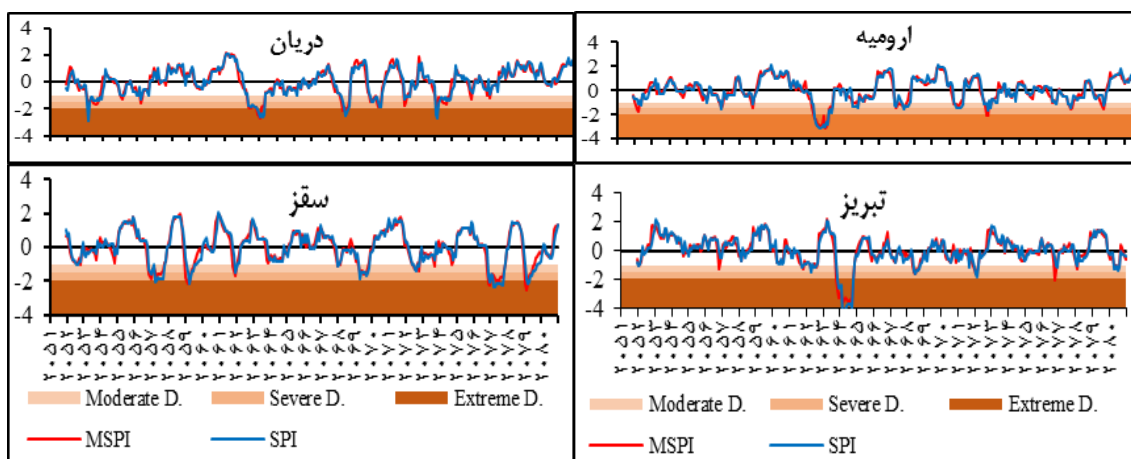
نتایج حاصل از شاخص‌های SPI و MSPI مربوط به RCP_{8.5} که در شکل ۴ نشان داده شده است با کمترین مقدار تفاوت با RCP_{2.6} برآورد گردیده است اما مقدار خشکسالی در سناریوی RCP_{8.5} محسوس می‌باشد. در سناریوی RCP_{2.6} و RCP_{8.5} سقز از لحاظ شدت و تعداد خشکسالی از بقیه ایستگاه‌ها متفاوت است. تعداد خشکسالی شدید در ایستگاه دریان از دیگر ایستگاه‌ها بیشتر می‌باشد.





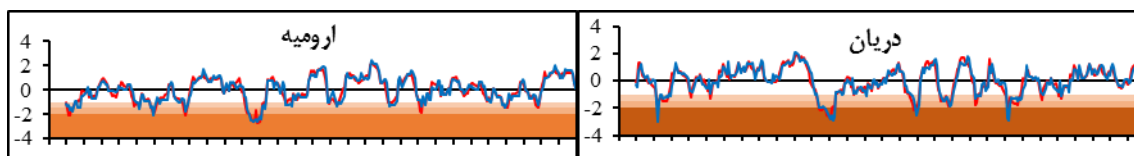
شکل ۴. مقایسه شاخص SPI و MSPI برای RCP_{8.5} در دوره نزدیک

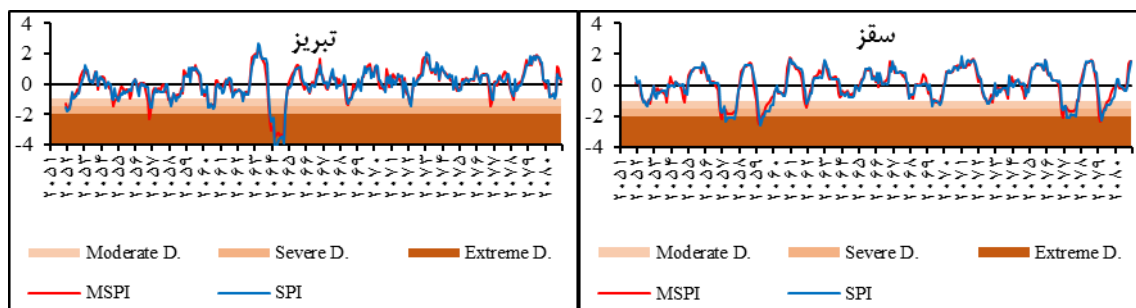
نتایج حاصل از شاخص SPI و MSPI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار برآورد شاخص SPI و MSPI در همه‌ی ایستگاه‌ها مشابه و نزدیک به هم می‌باشد. در ایستگاه‌های دریان و ارومیه در سال ۲۰۶۳ به طور مشترک خشکسالی شدیدی را خواهیم داشت. همچنین شدیدترین خشکسالی‌ها در ایستگاه تبریز (سال ۲۰۶۴) رخ خواهد داد. لازم به توضیح می‌باشد که شدت و فراوانی خشکسالی‌ها در این دوره و مقیاس نسبت به دوره‌های مشاهده‌ای و دوره نزدیک بیشتر شده است، که این امر بیانگر افزایش وقایع حدی طی دوره‌های آتی می‌باشد.



شکل ۵. مقایسه شاخص SPI و MSPI برای RCP_{2.6} در دوره دور

نتایج حاصل از شاخص SPI و MSPI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در شکل ۶ نشان داده شده است. مقدار برآورد شاخص SPI و MSPI در همه ایستگاه‌ها همانند دوره‌های قبلی، مشابه و نزدیک به هم می‌باشد. ایستگاه دریان در سال ۲۰۵۳ و ۲۰۷۳ خشکسالی شدیدی تحت شاخص SPI خواهد داشت در حالیکه در بقیه‌ی ایستگاه‌ها در سال‌ها فوق‌الذکر خشکسالی به صورت خفیف و متوسط خواهد بود. شدیدترین خشکسالی در این دوره و مقیاس همانند دوره دور RCP_{2.6} در ایستگاه تبریز (سال ۲۰۶۴) رخ خواهد داد. لازم به توضیح می‌باشد که شدت و فراوانی خشکسالی‌ها در این دوره و مقیاس نسبت به دوره مشاهده‌ای و دوره دور RCP_{2.6} بیشتر شده است، که این امر بیانگر افزایش وقایع حدی طی دوره‌های آتی می‌باشد.





شکل ۶. مقایسه شاخص SPI و MSPI برای RCP8.5 در دوره دور

با توجه به نمودار دوره مشاهداتی و سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 مقدار خشکسالی در سی سال آینده در دوره‌های دور و نزدیک افزایش خواهد یافت به طور مثال در دوره مشاهداتی در سه ایستگاه دریا، سقز و تبریز خشکسالی شدید مشاهده گردید در حالیکه در هر دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 در تمام ایستگاه‌ها با خشکسالی شدید مواجه هستیم.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به تحلیل خشکسالی در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در طی دوره آینده با مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG طی دوره آماری ۳۰ سال در دوره نزدیک و دور با سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 بر اساس شاخص‌های SPI و MSPI پرداخته شد. همانگونه که اشاره شد در طول دوره نزدیک و دور، بیشترین درصد خشکسالی در ایستگاه تبریز و کمترین درصد برای ایستگاه سقز و ارومیه است. روند خشکسالی در دریاچه ارومیه به صورت افزایشی می‌باشد بطوریکه شدت خشکسالی بیشتری در دوره دور تحت سناریوهای مورد مطالعه نسبت به دوره نزدیک و مشاهداتی خواهیم داشت. طی دوره مشاهداتی نوسانات خشکسالی بیشتر در دهه ۲۰۰۰ بوده است. به طوری که مطالعات خشکسالی‌شناسی و همکاران [۱۰] نشان داد که شدیدترین خشکسالی‌ها در آذربایجان غربی از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۹ رخ داده است. همچنین پیش‌بینی شد که در دوره‌ی آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم در حوزه دریاچه ارومیه، شدت و فراوانی خشکسالی‌ها نسبت به دوره مشاهداتی بحرانی‌تر خواهد بود. ملاحظه می‌شود که نتایج این تحقیق با مطالعات نیکبخت [۱۱] همخوانی دارد. در حالی مطالعات حسین آبادی و همکاران [۱۲] در شهرهای زابل و شیراز و مطالعات فراهانی و همکاران [۱۳] در حوضه شادگان نتایج این تحقیق را تایید نمی‌کند. نظر به نتایج تحقیق حاضر در زمینه وضعیت بحرانی خشکسالی‌ها در دوره‌های آتی و با توجه به تعداد کم مطالعات در رابطه با بررسی خشکسالی‌ها در دوره آینده، ضرورت دارد برای مدیریت بهتر منابع آب، طوفان‌های گرد و غبار، جلوگیری از نشست زمین، تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شود.

منابع

- [۱] اسمعیلی، ف.، کریمی، ی.، یاسمی، ف. مدیریت ریسک یا مدیریت بحران خشکسالی (مطالعه موردی: جامعه عشایری استان ایلام)، دومین همایش ملی اثرات خشکسالی و راهکارهای مدیریت آن، ۱۳۸۸.
- [۲] امیری بقال، س. پیش‌بینی خشکسالی در استان آذربایجان شرقی با استفاده از زنجیره مارکوف. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۳.
- [۳] محسنی ساروی، م.، صفدری، ع. ا.، ثقفیان، ب.، مهدوی، م. تحلیل شدت، فراوانی، مدت و گستره خشکسالی‌های حوضه کارون به کمک شاخص بارش استاندارد. مجله منابع طبیعی ایران، ۱۳۸۳.



- [4] فضل‌اولی، ر.، قایناتی، ش.، مسعودیان، م.، نادى، م. استفاده از دو شاخص SPImod و SDImod به منظور بررسی تطبیقی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه آبریز تجن، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳۹۸.
- [5] شاکر سوره، ف.، اسدی، ا. ارتباط بین خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در دشت سلماس. مجله علمی پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان، ۱۳۹۸.
- [6] خشتکارثانی، ص. واکاوی خشکسالی‌های استان آذربایجان غربی با شاخص‌های SPI و GIS. کنفرانس بین‌المللی با محوریت کشاورزی، محیط‌زیست و گردشگری، ۱۳۹۵.
- [7] نیکبخت، ش. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر تغییرات بارندگی و دما در حوضه آبریز سد کارون ۳، مجله محیط زیست و مهندسی آب. ۱۳۹۶.
- [8] حسین آبادی، س.، یعقوب‌زاده، م.، امیرآبادی‌زاده، م.، فروزان‌مهر، م. ارزیابی خشکسالی هواشناسی در دوره‌های آتی به کمک داده‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم (مطالعه‌ی موردی: شهرستان‌های زابل و شیراز). مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۳۹۹.
- [9] نوده فراهانی، م.ع.، راسخی، آ.، پرماس، ب.، کشوری، ع. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دما، بارش و خشکسالی‌های دوره آتی حوضه شادگان، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳۹۷.
- [10] Bagheri, F. Mapping drought hazard using SPI index and gis (a case study: Fars province, Iran). International Journal of Environment and Geoinformatics, 3(1), 22-28, 2016.
- [11] Yeh, C. F., Wang, J., Yeh, H. F., & Lee, C. H. SDI and Markov chains for regional drought characteristics. Sustainability, 7(8), 10789-10808, 2015.
- [12] Zhiña, D., Montenegro, M., Montalván, L., Mendoza, D., Contreras, J., Campozano, L., & Avilés, A. Climate change influences of temporal and spatial drought variation in the andean high mountain basin. Atmosphere, 10(9), 558. 2019.
- [13] McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183), 1993.