

توسعه یک شاخص ترکیبی چندمتغیره بر پایه تحلیل مؤلفه مبنا برای ارزیابی خشک‌سالی‌های آب - هواشناختی در جنوب‌شرق ایران (مطالعه موردی: حوضه سد پیشین)

حمید نظری پور^۱ - استادیار آب و هواشناسی، گروه محیط‌زیست، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۷ تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۴/۹

چکیده

خشک‌سالی یک ناهنجاری اقلیمی است که با کمبود (نبود) بارش و مهیایی منابع آب در پهنه جغرافیایی بزرگ پیوند داشته و در طول دوره قابل توجهی از زمان گسترش می‌یابد که می‌تواند بخش‌های مختلف از زندگی و محیط‌زیست را متأثر سازد. نمایه‌های زیادی برای پایش شرایط خشک‌سالی توسعه یافته‌اند. گسترش فضایی، زمانی و شدت (سختی) خشک‌سالی با استفاده از این شاخص‌ها مشخص می‌گردد. در این بررسی، یک شاخص ترکیبی برای ارزیابی خشک‌سالی‌های تلفیقی (آب-هواشناختی) در جنوب‌شرق ایران توسعه داده شده است. شاخص ترکیبی به‌طور جامع همه اشکال فیزیکی خشک‌سالی (هواشناختی، آب‌شناختی و کشاورزی) را از طریق انتخاب متغیرهای مرتبط به هر نوع خشک‌سالی شامل می‌شود. در این بررسی، ارزش‌های روزانه شاخص خشک‌سالی مؤثر و شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه‌ای تحت یک تحلیل مؤلفه مبنا قرار گرفته و بر اساس مؤلفه نخست آن، ارزش شاخص ترکیبی واحد به دست آمده است. دوره مورد بررسی از سال آبی ۶۱-۱۳۶۰ تا ۹۰-۱۳۸۹ شمسی و سرآغاز سال آبی نیز از ماه مهر تعیین گردیده است. بر اساس نتایج شاخص ترکیبی، یک دوره بزرگ خشک‌سالی از سال آبی ۷۹-۱۳۷۸ الی ۸۵-۱۳۸۴ در جنوب‌شرق ایران حاکم بوده است که شدت آن در سال آبی ۸۳-۱۳۸۲ فوق‌العاده زیاد بوده است. توزیع فضایی بارش ایران در این هنگام نیز آشکار می‌سازد که در فصل‌های پاییز و زمستان مقدار دریافتی بارش در منطقه جنوب‌شرق ایران بسیار ناچیز بوده است. روش‌شناسی شاخص ترکیبی خشک‌سالی، یک رویکرد عینی و واضح برای توصیف شدت خشک‌سالی‌های تلفیقی فراهم می‌کند. شاخص مزبور به‌خوبی قادر به نمایش رفتار خشک‌سالی‌های آب-هواشناختی محدوده مورد مطالعه بوده و به‌عنوان شاخص ترکیبی جدید برای پایش و ارزیابی خشک‌سالی منطقه‌ای توصیه می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: خشک‌سالی آب-هواشناختی، شاخص ترکیبی خشک‌سالی، تحلیل مؤلفه مبنا، حوضه سد پیشین، جنوب‌شرق ایران.

۱. مقدمه

تعاریف متعددی از خشک‌سالی موجود است، اما بسط یک تعریف واحد از آن مشکل است. خشک‌سالی یک پدیده منطقه‌ای و یک رویداد سه‌بعدی با مشخصه‌های سختی، دوام و گستره فضایی می‌باشد (روسی و همکاران^۱، ۱۹۹۲). بنابر برخی از تعاریف گرایش‌دار به هواشناسی، خشک‌سالی یک ناهنجاری آب و هوایی است که با کمبود (نبود) بارش، تبخیر و تعرق زیاد و توزیع نامناسب بارش مشخص می‌گردد (نوروزی و همکاران^۲، ۲۰۱۲). بنا به تعریف گرایش‌دار به منابع آب، خشک‌سالی یک پدیده طبیعی برگشت‌پذیر است که با کمبود مُمه‌یابی منابع آب در پهنه جغرافیایی بزرگ پیوند داشته و در طول دوره قابل‌توجهی از زمان گسترش می‌یابد (روسی، ۲۰۰۰)، که می‌تواند بخش‌های مختلف از زندگی و محیط‌زیست را متأثر سازد (تیگس^۳، ۲۰۰۸). خشک‌سالی به چهار نوع طبقه‌بندی شده است (ویل‌هایت و گلانتز^۴، ۱۹۸۵): خشک‌سالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اجتماعی-اقتصادی (دراکپ و همکاران^۵، ۱۹۸۰).

آثار خشک‌سالی اغلب و به‌آرامی بر روی یک دوره قابل‌توجهی از زمان انباشته می‌گردد که ممکن است برای چندین سال حتی بعد از پایان خشک‌سالی درنگ داشته باشد. بنابراین برخی‌ها، آن را پدیده خزننده می‌نامند (ویل‌هایت و همکاران، ۲۰۰۰). این مشخصه، تعیین دقیق زمان شروع و پایان یک رویداد خشک‌سالی را دشوار می‌کند. خشک‌سالی بیش از هر مخاطره دیگر، تأثیر بیشتری بر مردم می‌گذارد؛ اما باین‌وجود، در بین تمام مخاطره‌های طبیعی، کمتر قابل‌درک است (میشرا و دسای^۶، ۲۰۰۵). حدود ۸۵ درصد از بلایای طبیعی با رویدادهای فرین هواشناسی مرتبط می‌باشند (آباسی^۷، ۱۹۹۴) و در این میان، خشک‌سالی یکی از علل بیشترین خسارات محسوب می‌گردد (مرکز تحقیقات اپیدمیولوژی بلایای طبیعی^۸، ۲۰۰۳). خشک‌سالی با کمبود بارش ایجاد می‌گردد و آسیب‌های قابل‌توجهی در تمام چشم‌اندازها سبب می‌گردد. این باعث ضرر و زیان عظیمی در کشاورزی می‌گردد و آثار منفی زیادی در اکوسیستم‌های طبیعی دارد. خشک‌سالی باعث تخریب خاک، تشکیل بیابان، قحطی و فقر می‌گردد (پیکاپ^۹، ۱۹۹۸؛ نیکلسون و همکاران^{۱۰}، ۱۹۹۰).

1 Rossi et al

2 Norouzi et al

3 Tigkas

4 Wilhite and Glantz

5 Dracup et al

6 Mishra and Desai

7 Obasi

8 Center for Research on the Epidemiology of Disasters

9 Pickup

10 Nicholson et al

شناسایی رویدادهای خشک‌سالی و ارزیابی سختی آن‌ها با ابزار مناسب، خیلی با اهمیت خواهد بود (تیگس، ۲۰۰۸). یکی از روش‌های خیلی رایج در ارزیابی خشک‌سالی، محاسبه شاخص‌های خشک‌سالی می‌باشد (بناکورسو و همکاران^۱، ۲۰۰۳؛ پائولو و پریرا^۲، ۲۰۰۶؛ تساکیریس و همکاران^۳، ۲۰۰۷a؛ تساکیریس و همکاران^۴، ۲۰۰۷b). گسترش فضایی و زمانی و شدت (سختی) خشک‌سالی با استفاده از این شاخص‌ها مشخص می‌گردد (گوتمن^۵، ۱۹۹۸؛ هایز^۵، ۲۰۰۰). مرور جامع درباره این شاخص‌ها در مقالات و نشریات متعدد خاص یافت می‌گردد. پس از یک مطالعه اصولی از شاخص‌های متنوع بکار گرفته شده در شناسایی و ارزیابی سختی خشک‌سالی، این نتیجه حاصل شده است که هرچند تمامی این شاخص‌ها مفیدند؛ اما هیچ‌یک از آن‌ها دارای قابلیت کاربست جهانی نیستند. به این دلیل، در سال‌های اخیر چندین شاخص جدید پایش و ارزیابی خشک‌سالی ابداع گردیده است. از جمله این شاخص‌ها، شاخص ترکیبی خشک‌سالی است که برای پایش خشک‌سالی‌های منطقه‌ای کارآمد بوده است. در این بررسی، تمرکز بر روی استفاده از تحلیل مؤلفه مبنا در ایجاد شاخص ترکیبی خشک‌سالی به منظور ارزیابی و پایش خشک‌سالی‌های تلفیقی (آب-هواشناختی) حوضه آبریز سد پیشین در جنوب شرق ایران می‌باشد.

۲. محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه این بررسی حوضه بالادست سد پیشین می‌باشد. این حوضه آبریز شامل حوضه‌های آبریز محدوده‌های مطالعاتی پیشین (کد ۲۹۱۳) و راسک-سرباز (کد ۲۹۱۴) از ریزحوضه‌های آبریز رودخانه‌های بلوچستان جنوبی بین سدییچ و مرز پاکستان (کد ۲۹) از حوضه آبریز اصلی حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان (کد ۲) می‌باشد که در محدوده شهرستان سرباز از استان سیستان و بلوچستان قرار دارد. مساحت این حوضه‌های آبریز ۲۰۴۶/۳ و ۵۱۵۱/۴ کیلومترمربع به ترتیب برای کد ۲۹۱۳ و ۲۹۱۴ می‌باشد که حدود ۹۳ درصد آن را مناطق کوهستانی و باقیمانده را مناطقی دستی و کوهپایه‌ای تشکیل داده است. میانگین بارندگی سالانه این حوضه آبریز ۱۷۸ میلی‌متر و تیپ اقلیمی آن فراخشک گرم می‌باشد (سعیدی و زهرایی، ۱۳۹۰). مهم‌ترین رودخانه این حوضه آبریز، رودخانه سرباز می‌باشد. جهت جریان این رودخانه از شمال به جنوب و دبی متوسط سالانه آن ۶/۶۳ مترمکعب بر ثانیه است. این رودخانه، شاخه اصلی رودخانه باهوکلالت مهم‌ترین رودخانه حوضه آبریز رودخانه‌های بلوچستان جنوبی بین سدییچ و مرز پاکستان می‌باشد. سد مخزنی پیشین، بزرگ‌ترین سد این محدوده مطالعاتی بوده که حجم مفید و قابل تنظیم آن معادل

1 Bonaccorso et al

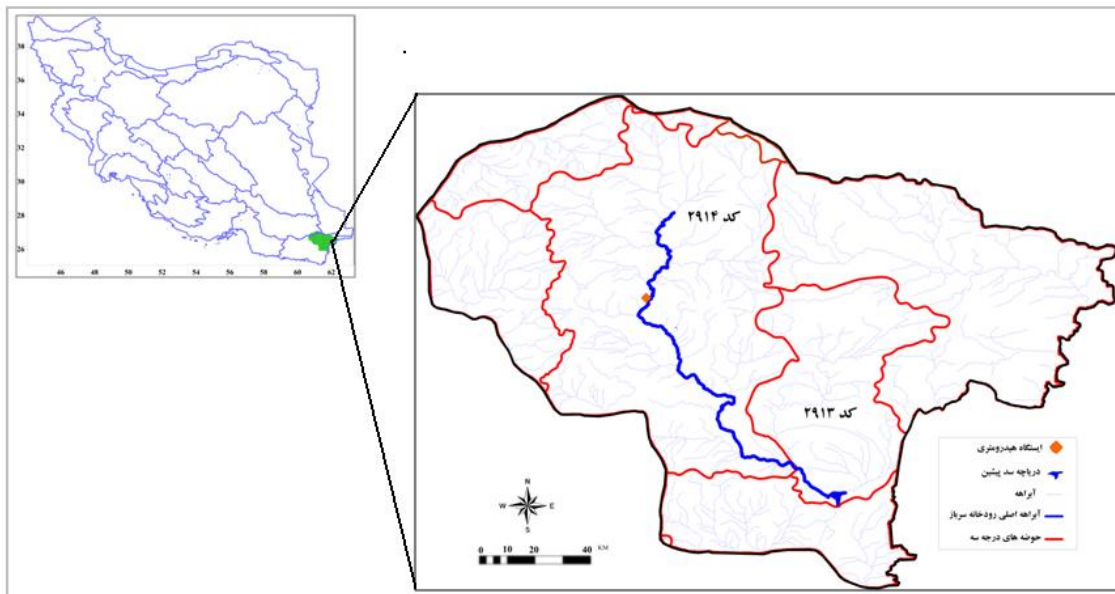
2 Paulo and Pereira

3 Tsakiris and Tigkas

4 Guttman

5 Hayes

۱۷۵ و ۹۱ میلیون مترمکعب است. در شکل (۱) موقعیت محدوده مورد مطالعه به همراه ایستگاه آب‌سنجی، سد پیشین و رودخانه سرباز نشان داده شده است.



شکل ۱ موقعیت حوضه‌های آبریز مورد مطالعه در جنوب شرق ایران

۳. مواد و روش‌ها

۱.۳ داده‌ها

داده‌های مورد نیاز این پژوهش شامل داده‌های جنبه‌های آب‌شناختی و هواشناختی خشک‌سالی می‌باشد که به ترتیب دبی^۱ رودخانه و ارتفاع بارش می‌باشند. داده‌های دبی رودخانه در این بررسی، متعلق به رودخانه سرباز در ایستگاه آب‌سنجی پیردان می‌باشد که موقعیت آن در شکل ۱ نشان داده شده است. داده‌های دبی ایستگاه مزبور به صورت روزانه و برای دوره آماری سال‌های آبی ۵۵-۱۳۵۴ تا ۸۹-۱۳۸۸ موجود است. داده‌های دبی سال‌های آبی ۶۱-۱۳۶۰ تا ۸۹-۱۳۸۸ در این بررسی مورد استفاده قرار گرفته است که برای سال آبی ۸۶-۱۳۸۵ فاقد آمار می‌باشد. داده‌های ارتفاع بارش روزانه نیز برای دوره مشابه از ایستگاه هواشناسی منطقه مورد مطالعه تهیه شده است.

۲.۳ روش‌شناسی

محاسبه شاخص ترکیبی خشک‌سالی^۲ (آب-هواشناختی^۳) نیاز به داده‌های آب‌شناختی و هواشناختی دارد. بنابراین لازم است ابتدا ارزش نمایه‌های خشک‌سالی آب‌شناختی و هواشناختی محاسبه و سپس شاخص

1 Stream flow volume(River discharge)

2 Aggregate Drought Index(ADI)

3 Hydro-Meteorological

ترکیبی بر اساس روش‌شناسی پیشنهادی ایجاد گردد. شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه‌ای^۱ و شاخص خشک‌سالی مؤثر^۲ به ترتیب برای برآورد خشک‌سالی‌های آب‌شناختی و هواشناختی در این بررسی استفاده شده‌اند.

روش‌شناسی محاسبه شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه‌ای و شاخص بارش مؤثر و چگونگی ترکیب آن‌ها برای توسعه شاخص ترکیبی خشک‌سالی (آب‌شناختی- هواشناختی) به ترتیب در زیر تشریح شده است:

۱،۲،۳. شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه‌ای (خشک‌سالی آب‌شناختی)

چنانچه سری زمانی ماهانه از حجم جریان رودخانه‌ای $Q_{i,j}$ برای سال‌های آبی موجود باشد، شاخص خشک‌سالی هیدرولوژیکی جریان رودخانه‌ای برای ماه j ام از سال آبی i ام طبق معادلات زیر قابل محاسبه است (نالبنتیس^۳، ۲۰۰۸).

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j} \quad i=1,2,\dots,N \quad j=1,2,\dots,12 \quad k=1,2,3,4 \quad (1)$$

در اینجا، $V_{i,k}$ حجم تجمعی جریان رودخانه‌ای برای سال آبی i ام و دوره مرجع k ام می‌باشد. شروع سال آبی مبنای دوره مرجع‌ها می‌باشد. برای اقلیم ایران سال آبی از اول پاییز آغاز می‌گردد (زارچ^۴ و همکاران، ۲۰۱۱). بنابراین $k=1$ برای مهر تا آذر، $k=2$ برای مهر تا اسفند، $k=3$ برای مهر تا خرداد و $k=4$ برای مهر تا شهریور می‌باشد. در اینجا فاصله دوره مرجع ۳ ماه می‌باشد. لازم به ذکر است که شروع سال آبی می‌تواند متفاوت از ماه مهر بوده و فاصله دوره‌های مرجع نیز متفاوت از ۳ باشد.

بر اساس حجم تجمعی جریان رودخانه‌ای $V_{i,k}$ ، شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه‌ای برای هر دوره مرجع k از هر سال آبی i به طریق زیر برآورد می‌گردد:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{S_k} \quad i=1,2,\dots,N \quad k=1,2,3,4 \quad (2)$$

در اینجا \bar{V}_k و S_k به ترتیب میانگین و انحراف معیار از حجم تجمعی جریان رودخانه‌ای دوره مرجع k می‌باشند که براساس دوره طولانی‌مدت برآورد می‌گردند.

به‌طورکلی، برای حوضه‌های آبی کوچک، جریان رودخانه‌ای ممکن است از توزیع احتمال نامتوازن پیروی کند که به‌خوبی می‌تواند با استفاده از خانواده توابع توزیع گاما تقریب زده شود. سپس، توزیع به نرمال

1 Stream flow Drought Index(SDI)

2 Effective Drought Index (EDI)

3 Nalbantis

4 Zarch et al

تبدیل می‌گردد. در این بررسی، از پارامترهای توزیع لگاریتم طبیعی برای نرمال نمودن استفاده می‌گردد. بنابراین، کافی است لگاریتم طبیعی برای حجم جریان رودخانه‌ای در نظر گرفته شود. بر این اساس، شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه‌ای تعریف می‌گردد:

$$SDI_{i,k} = \frac{y_{i,k} - \bar{y}_k}{S_{y,k}} \quad i=1,2,\dots,N \quad k=1,2,3,4 \quad (3)$$

در اینجا

$$y_{i,k} = \ln(V_{i,k}) \quad i=1,2,\dots,N \quad k=1,2,3,4 \quad (4)$$

در اینجا نیز \bar{y}_k و $S_{y,k}$ به ترتیب میانگین و انحراف معیار می‌باشند که بر اساس دوره طولانی مدت محاسبه می‌گردند. بر اساس شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه‌ای SDI ، حالت‌های خشک‌سالی هیدرولوژیکی تعریف می‌گردند که با حالت‌های شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی مانند RDI ، SPI و EDI همانند می‌باشند (نالبیتیس، ۲۰۰۸).

جدول ۱ حالت‌های خشک‌سالی آب‌شناختی بر اساس شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه‌ای

ملاک	تشریح حالت خشک‌سالی	حالت خشک‌سالی
$SDI > 2$	ترسالی فوق‌العاده شدید	۴
$1.5 < SDI \leq 2$	ترسالی شدید	۳
$1 < SDI \leq 1.5$	ترسالی متوسط	۲
$0.0 < SDI \leq 1$	ترسالی خفیف	۱
$SDI \geq 0.0$	بدون خشک‌سالی	۰
$-1.0 \leq SD < 0.0$	خشک‌سالی خفیف	-۱
$-1.5 \leq SDI < -1.0$	خشک‌سالی متوسط	-۲
$-2.0 \leq SDI < -1.5$	خشک‌سالی شدید	-۳
$SDI < -2.0$	خشک‌سالی فوق‌العاده شدید	-۴

۲،۲،۳. شاخص خشک‌سالی مؤثر (خشک‌سالی هواشناسی)

چنانچه سری زمانی بارش روزانه برای دوره بزرگ‌تر از ۳۰ سال در دسترس باشد می‌توان شاخص خشک‌سالی مؤثر را از طریق معادلات زیر محاسبه نمود.

$$EP_i = \sum_{n=1}^i \left[\left(\sum_{m=1}^n P_m \right) / n \right] \quad (5)$$

$$DEP = EP - MEP \quad (6)$$

$$EDI = DEP / SD(DEP) \quad (7)$$

در معادله ۵، EP_i بیانگر انباشتگی معتبر از بارش، P_m بیانگر ارتفاع بارش برای روز و m روزهای قبل از یک تاریخ مشخص می‌باشد. i در معادله ۵ از ۳۶۵ شروع می‌گردد. بنابراین، EP انباشتگی معتبر از بارش برای ۳۶۵ روز از تاریخ مشخص می‌باشد. به عبارت دیگر EP به معنای جمع مقادیر بارش روزانه با یک تابع کاهشی وابسته به زمان می‌باشد. مقدار EP برای هر روز، تابعی از بارندگی همان روز و یک دورهٔ ما قبل خود بوده که در آن بارش‌های اخیر نسبت به بارش‌های قدیمی‌تر وزن بیشتری دارند. بر طبق معادله ۵ بدیهی است که EP برای سال اول دوره آماری قابل انجام نخواهد بود.

در معادله ۶، DEP بیانگر انحراف EP از MEP می‌باشد. MEP نیز متوسط ۳۰ ساله EP می‌باشد. هنگامی که ارزش DEP برای دو روز پیاپی منفی شود، i برابر می‌شود با $(-1 + 365 + 2) = 366$ و محاسبه برای یکبار دیگر آغاز می‌گردد. بنابراین، اثر خشک شدن خاک از خشک‌سالی که چندین سال پیش‌تر رخ داده است در EDI منعکس می‌گردد.

جزئیات بیشتر درباره این شاخص در مقدسی و همکاران، ۱۳۸۴؛ حجازی زاده و فتاحی، ۱۳۸۳؛ نصرتی و کاظمی، ۱۳۹۰؛ زارع‌زاده مهریزی و مرید، ۱۳۹۰؛ بیون و وله‌ایت^۱، ۱۹۹۹؛ اختری و همکاران^۲، ۲۰۰۹؛ مرید و همکاران^۳، ۲۰۰۶؛ کالامراس و همکاران^۴، ۲۰۱۰؛ کیم و همکاران^۵، ۲۰۰۹؛ پاندی و همکاران^۶، ۲۰۰۸؛ دوگان و همکاران^۷، ۲۰۱۲ و دیگران موجود است.

جدول ۲ حالت‌های خشک‌سالی هواشناسی بر اساس شاخص خشک‌سالی مؤثر

حالت خشک‌سالی	تشریح حالت خشک‌سالی	ملاک
۳	تری بسیار شدید	$EDI \geq 2.5$
۲	تری شدید	$2.49 \geq EDI \geq 1.5$
۱	تری متوسط	$1.49 \geq EDI \geq 0.7$
۰	نرمال	$0.69 \geq EDI \geq -0.69$
-۱	خشکی متوسط	$-0.7 \geq EDI \geq -1.49$
-۲	خشکی شدید	$-1.5 \geq EDI \geq -2.49$
-۳	خشکی بسیار شدید	$EDI \leq -2.5$

1 Byun and Wolhite

2 Akhtari et al

3 Morid et al

4 Kalamaras et al

5 Kim et al

6 Pandey et al

7 Dogan et al

۳،۲،۳. شاخص ترکیبی خشک‌سالی (آب- هواشناختی)

شاخص ترکیبی خشک‌سالی تلفیقی، به‌وسیله کیانتش و دراکپ^۱ در سال ۲۰۰۴ توسعه یافته و شاخص ترکیبی خشک‌سالی چند متغیره جامع برای بررسی مقدار حجم آب در رژیم‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی خشک‌سالی می‌باشد. این شاخص اطلاعات هواشناختی (بارش)، آب‌شناختی (جریان، ذخیره مخازن) و سطح زمین (تبخیر و تعرق، رطوبت خاک، محتوای آب برف) را لحاظ می‌کند. استخراج این شاخص شامل تحلیل مؤلفه مبنا برای استخراج قوی‌ترین سیگنال از همبستگی متغیرهای ورودی می‌باشد که بزرگ‌ترین بخش واریانس را تشریح می‌نمایند (نوروزی و همکاران^۲، ۲۰۱۲).

تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های مبنا، به‌طور گسترده در علوم جوی و هیدرولوژیکی، برای توصیف الگوهای غالب در داده‌ها به کار گرفته می‌شود (لینس^۳، ۱۹۹۷؛ هیدالگو و همکاران^۴، ۲۰۰۰؛ باربستون و لیوزی^۵، ۱۹۸۷). در این بررسی نیز از تحلیل مؤلفه‌های مبنا، توسعه شاخص جامع و ترکیبی چندمتغیره خشک‌سالی استفاده می‌گردد. برای این منظور از میان حالت‌های تحلیل مؤلفه اصلی، به‌ویژه از حالت P استفاده می‌گردد (کاتل^۶، ۱۹۵۲). در این حالت، نوسانات زمانی از متغیرهای ورودی در مکان ثابت توصیف و تحلیل می‌گردد. محاسبه اجزای اصلی نیازمند ساخت یک مربع $(P \times P)$ که P تعداد متغیرهاست، متقارن، در تشریح ارتباط بین داده‌های اصلی می‌باشد که ماتریس همبستگی (R) نام دارد (هان^۷، ۱۹۹۷؛ ویلکس^۸، ۱۹۹۵؛ پریسندورفر^۹، ۱۹۸۸).

معادله شاخص ترکیبی خشک‌سالی (ADI) به شکل زیر است.

$$Z = XE \quad (۸)$$

در اینجا؛ Z ماتریس $n \times p$ از مؤلفه‌های اصلی، X ماتریس $n \times p$ از داده استاندارد شده و E ماتریس $p \times p$ از بردارهای ویژه و n تعداد مشاهدات می‌باشد. شاخص ترکیبی خشک‌سالی به‌عنوان مؤلفه اصلی در نظر گرفته می‌شود و بر طبق معادله ۹ به‌وسیله انحراف معیار، نرمال می‌گردد.

$$ADI_{i,k} = \frac{Z_{i,1,k}}{\sigma} \quad (۹)$$

1 Keyantash and Dracup

2 Norouzi et al

3 Lins

4 Hidalgo et al

5 Barbston and Livezey

6 Kattel

7 Haan

8 Wilks

9 Preisendorfer

در اینجا؛ $ADI_{i,k}$ ارزش ADI برای ماه k ام در سال i ام و $Z_{i,l,k}$ مؤلفه اصلی نخست در طول سال i ام برای ماه k ام و σ انحراف معیار ساده از $Z_{i,l,k}$ برای تمام سال‌های i می‌باشد. مؤلفه‌ها ترکیب خطی متغیرهای اولیه بوده و بردار ویژه سبب بیشینه شدن پراش توجیه شده توسط مؤلفه نخست می‌گردد. بنابراین، شاخص ترکیبی خشک‌سالی از مؤلفه اول پدید می‌آید. زیرا مؤلفه نخست، بخش بزرگی از پراش را تشریح می‌نماید. بر این اساس، با یک تعدیل در معادله ۹ می‌توان شاخص ترکیبی خشک‌سالی را به صورت زیر نوشت:

$$ADI = \frac{Z_{e_1}}{\sigma} \quad (10)$$

در اینجا، Z ماتریس استاندارد شده متغیرهای اولیه، e بردار ویژه مؤلفه نخست و σ انحراف معیار مؤلفه نخست می‌باشد. حالت‌های خشک‌سالی ترکیبی برپایه آستانه‌های صدک قرار دارد. هرچند آستانه‌های جدول ۳ برای اولین بار ارائه شده‌اند؛ ولیکن می‌تواند برای هر منطقه اقلیمی متفاوت باشد.

جدول ۳ حالت‌های خشک‌سالی بر اساس شاخص چند متغیره خشک‌سالی (شاخص ترکیبی خشک‌سالی)

ملاک	تشریح حالت خشک‌سالی	حالت خشک‌سالی
$16^{th} \text{ percentile} < ADI < 84^{th} \text{ percentile}$	شرایط نزدیک به نرمال (بدون خشک‌سالی)	۱
$7^{th} \text{ percentile} < ADI < 16^{th} \text{ percentile}$	خشک‌سالی متوسط	۲
$2^{nd} \text{ percentile} < ADI < 7^{th} \text{ percentile}$	خشک‌سالی شدید	۳
$ADI < 2^{nd} \text{ percentile}$	خشک‌سالی بسیار شدید	۴

۴. نتایج و بحث

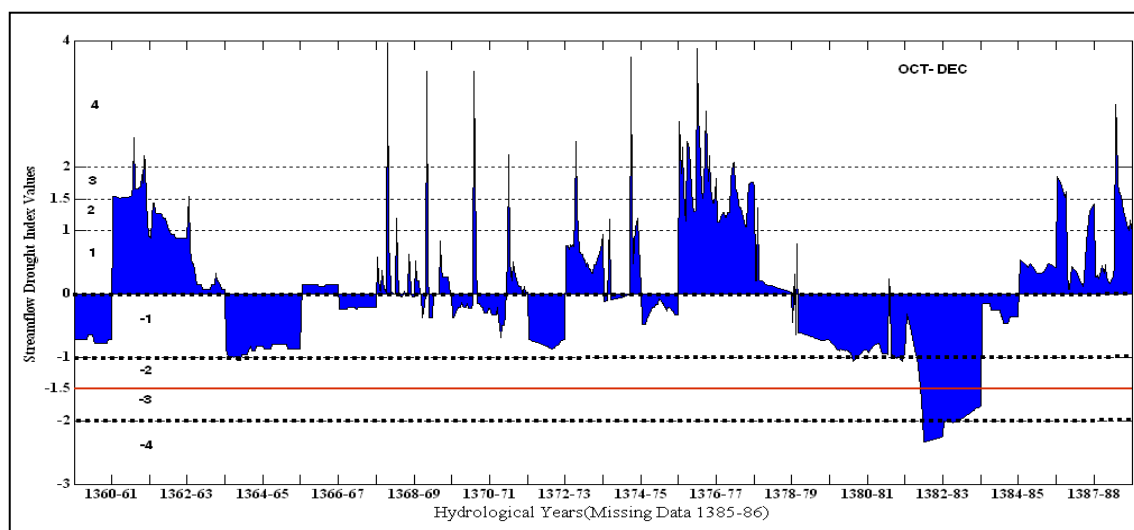
بر اساس ضریب چولگی در جدول ۴ (نالببتیس و تساکیریس، ۲۰۰۹)، خشک‌سالی آب‌شناختی بر پایه شاخص جریان رودخانه، با استفاده از معادله ۳ به صورت روزانه محاسبه شده است. بر طبق این آزمون (سندکور و کوچران، ۱۹۶۷) حدودهای بحرانی بالا از ارزش مطلق ضریب چولگی برابر $0/986$ و $0/662$ به ترتیب در $0/02$ و $0/10$ سطح معنی‌داری می‌باشد (نظری‌پور و بابائی، ۱۳۹۳). بنابراین برازش لگارتیم طبیعی برای تمام دوره‌های مرجع لازم می‌باشد. این شاخص برای دوره‌های K_1, K_2, K_3 و K_4 برآورد شده است. ضریب همبستگی میان این سری‌ها بیانگر رفتار همانند K_1 و K_2 با همدیگر و K_3 و K_4 با همدیگر می‌باشد (معادله ۱۰). این همانندی دوره‌ها، ناشی از تأثیرپذیری جریان رودخانه‌ای در دوره K_1 و K_2 از بارش پاییزه و زمستانه و در دوره K_3 و K_4 از بارش بهار و تابستانه می‌باشد که الگوهای متفاوت از هم دارند.

جدول ۴ ضریب چولگی برای شاخص جریان رودخانه $V_{i,k}$ و برازش لگاریتم طبیعی $y_{i,k} = \ln(V_{i,k})$

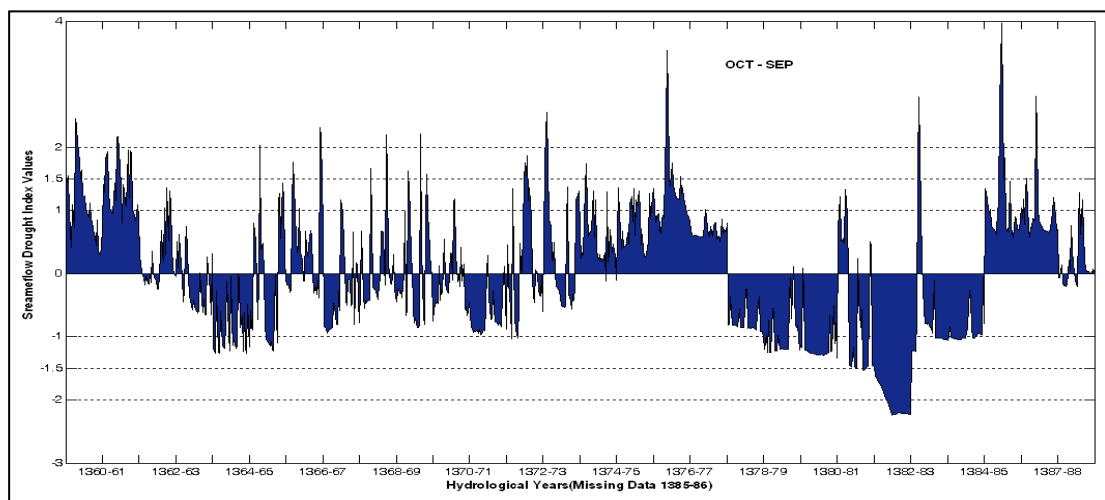
متغیر	اساس برآورد	K_1	K_2	K_3	K_4
جریان رودخانه	داده اولیه	8.29	17.38	12.95	14.67
	برازش لگاریتم طبیعی	0.43*	0.68*	0.43*	0.22*
	داده نهایی	0.43	0.68	0.43	0.22

*ارزش‌های معنی‌دار آماری (at the 0.10 probability)

سری زمانی شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه‌ای برای مهر تا آذر K_1 و مهر تا شهریور K_4 به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. این سری‌ها برای سال‌های آبی ۶۱-۱۳۶۰ الی ۸۸-۱۳۸۷ تهیه شده است. این شاخص برای سال آبی ۸۶-۱۳۸۵ موجود نیست. بر اساس این شاخص، دو دوره طولانی از خشک‌سالی و ترسالی آب‌شناختی موجود است. حالت‌های شدید خشک‌سالی و ترسالی نیز در دوره‌های مزبور رخ داده است. دوره ترسالی در سال آبی ۷۵-۱۳۷۴ تا ۷۸-۱۳۷۷ و دوره خشک‌سالی از ۷۹-۱۳۷۸ تا ۸۵-۱۳۸۴ حاکم بوده است. بر اساس این اطلاعات، سال آبی ۸۳-۱۳۸۲ و ۷۷-۱۳۷۶ به ترتیب شدیدترین خشک‌سالی و ترسالی آبی می‌باشند. فراوانی خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌ها بر اساس جدول (۱)، برای دوره‌های K_1 ، K_2 ، K_3 و K_4 محاسبه شده و در جدول (۵) ارائه شده است. بررسی و مقایسه فراوانی حالت شدید ترسالی ($SDI > 1.5$) و خشک‌سالی ($SDI < -1.5$) بیانگر شدت خشک‌سالی سال آبی ۸۳-۱۳۸۲ و ترسالی سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ در منطقه جنوب‌شرق ایران می‌باشد.



شکل ۲ ارزش روزانه شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه برای دوره مهر تا آذر (K_1)



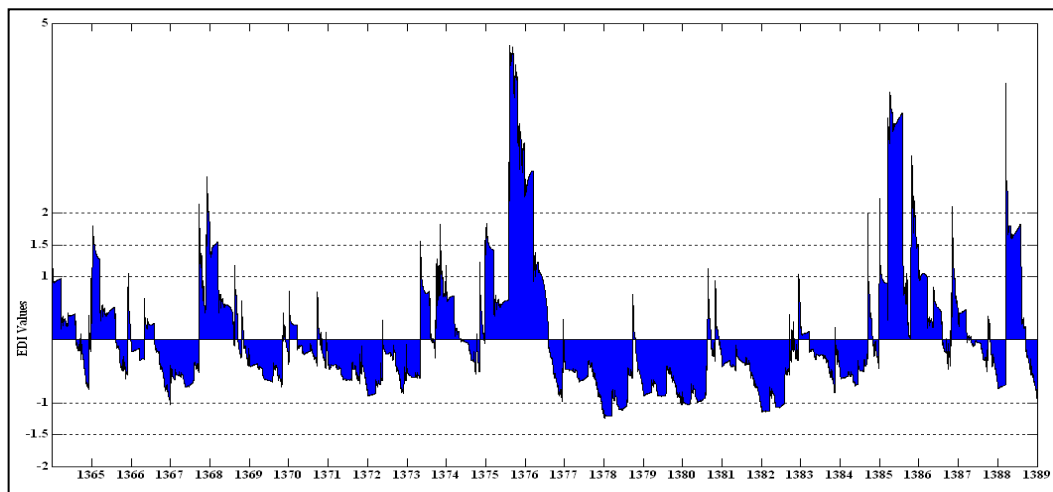
شکل ۳ ارزش روزانه شاخص خشک سالی جریان رودخانه‌ای برای دوره مهر تا شهریور (K₄)
جدول ۵ دوره‌های تر و خشک شدید آب‌شناختی بر اساس شاخص خشک سالی جریان رودخانه

K ₄		K ₃		K ₂		K ₁		دوره مرجع	
درصد	سال آبی	درصد	سال آبی	درصد	سال آبی	درصد	سال آبی		
۱۷	۱۳۶۱-۶۲	۱۸/۶	۱۳۷۶-۷۷	۲۸/۸	۱۳۷۶-۷۷	۳۳/۸	۱۳۶۱-۶۲	دوره‌های تر شدید	
	۱۳			۱۳۷۶-۷۷	۱۶/۷	۱۳۸۶-۸۷	۲۷/۵		۱۳۷۶-۷۷
	۱۳			۱۳۶۰-۶۱	۱۰/۶	۱۳۷۴-۷۵	۱۴		۱۳۷۷-۷۸
		۱۰/۶	۱۳۶۹-۷۰	۱۰	۱۳۸۶-۸۷				
۱۰۰	۱۳۸۲-۸۳	۱۰۰	۱۳۸۲-۸۳	۹۹/۹	۱۳۸۲-۸۳	۳۷/۵	۱۳۸۲-۸۳		دوره‌های خشک شدید
						۶۲/۵	۱۳۸۳-۸۴		

*رویدادهای خشک و تر با فراوانی رخداد ۱۰ درصد و بالاتر از آن در هر دوره مرجع نمایش داده شده

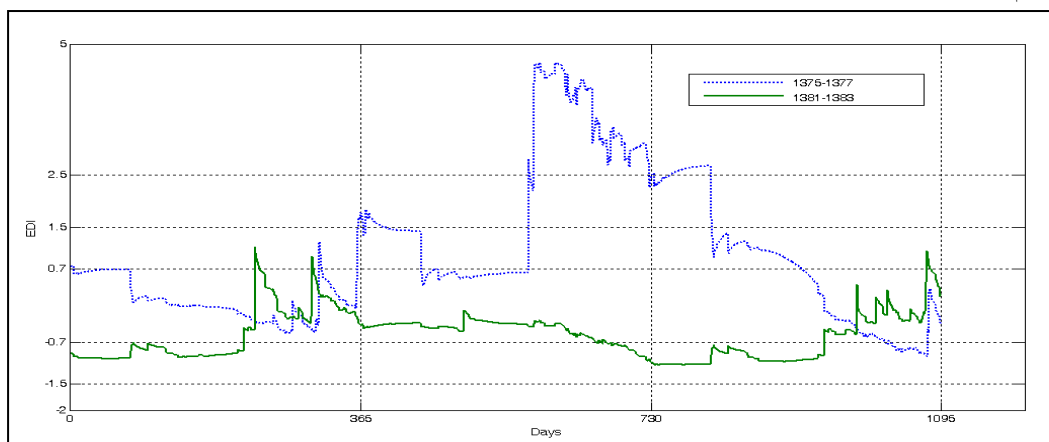
است.

خشک سالی هواشناختی بر اساس معادلات ۵، ۶ و ۷ در مقیاس روزانه برای سال‌های ۱۳۶۵ الی ۱۳۸۹ محاسبه و در شکل ۴ نمایش داده شده است. بر اساس این شاخص، یک دوره بزرگ خشک سالی از اواخر سال ۱۳۷۷ آغاز و تا سال ۱۳۸۵ ادامه داشته است. بر اساس این شاخص، دوره‌های خشک سالی طولانی‌تر از دوره‌های ترسالی می‌باشند. دوره‌های بزرگ ترسالی با شدت زیاد نیز در اواخر سال ۱۳۷۵ تا اوایل سال ۱۳۷۷ و اواخر سال ۱۳۸۵ تا میانه سال ۱۳۸۷ حاکم بوده است (شکل ۴).



شکل ۴ ارزش روزانه شاخص خشک‌سالی بارش مؤثر برای دوره تقویمی ۱۳۶۵ الی ۱۳۸۹

برای درک بهتر شرایط خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌های شدید، ارزش شاخص خشک‌سالی مؤثر برای دوره ۷۷-۱۳۷۵ و دوره ۸۳-۱۳۸۱ نمایش داده شده است (شکل ۵). سیر روزانه شاخص خشک‌سالی مؤثر برای این دوره‌های نشان می‌دهد که از لحاظ هواشناسی ترسالی شدید ($EDI \geq 2.5$) از اوایل آبان ماه ۱۳۷۶ آغاز و تا اواخر فروردین‌ماه ۱۳۷۷ ادامه دارد. دوره خشک‌سالی نیز از اوایل زمستان ۱۳۸۲ آغاز و تا میانه آبان ۱۳۸۳ ادامه داشته است. در ماه‌های فصل بهار شدت خشک‌سالی بیشتر و برعکس آن شرایط خشک‌سالی در ماه‌های اوایل فصل تابستان ملایم‌تر شده و نهایتاً در ماه‌های اوایل فصل پاییز شدت خشک‌سالی بیشتر می‌گردد. کاهش شدت خشک‌سالی در ماه‌های آغازین فصل تابستان بیانگر نقش بارش‌های تابستانه در تعدیل شدت خشک‌سالی می‌باشد. برعکس شاخص خشک‌سالی آب‌شناختی، شاخص خشک‌سالی هواشناختی دوره‌های ترسالی را بارزتر نمایش می‌دهد. بر اساس شاخص خشک‌سالی هواشناختی، ترسالی‌های منطقه مورد مطالعه، از نظر سختی شدیدتر و از نظر دوام کوتاه‌تر از خشک‌سالی‌ها می‌باشند.



شکل ۵ ارزش روزانه شاخص خشک‌سالی هواشناختی برای دوره‌های شدید ترسالی و خشک‌سالی

سری‌های زمانی چهارگانه شاخص‌های خشک‌سالی آب‌شناختی و هواشناختی شامل SDI_{K2} ، SDI_{K1} ، SDI_{K3} ، SDI_{K4} و EDI به‌عنوان ورودی یک تحلیل مؤلفه مبنا (خسروی و نظری پور، ۱۳۹۱) جهت تولید یک شاخص واحد ترکیبی چند متغیره و جامع خشک‌سالی آب-هواشناختی استفاده شده است. برای این منظور از خروجی شاخص خشک‌سالی هواشناختی و شاخص خشک‌سالی آب‌شناختی در یک آرایه استاندارد شده و با آرایش P (پارنال^۱) (۱۹۹۳) استفاده شده است. خروجی یک تحلیل مؤلفه مبنا، سه آرایه خواهد بود. آرایه بردار ویژه (e) مهم‌ترین آرایه محسوب می‌گردد. زیرا حامل ضرابی است که حاصل ضرب آن‌ها در متغیرهای اولیه (مرکزی شده)، مؤلفه‌ها را پدید می‌آورد و دارای خاصیتی است که پراش مؤلفه‌ها را بیشینه می‌نماید. پراش مؤلفه‌ها همیشه پایگانی می‌باشد. هراندازه همبستگی میان متغیرهای اولیه بیشتر باشد، تعداد مؤلفه‌ها کمتر خواهد بود و برعکس. از آنجاکه پراش مؤلفه‌ها پایگانی می‌باشد، در ایجاد شاخص ترکیبی خشک‌سالی از مؤلفه نخست بر اساس معادله (۱۰) استفاده می‌گردد (کیانتش و دراکپ، ۲۰۰۴). روابط ۱۱، ۱۲ و ۱۳ مراحل محاسبه این شاخص نشان می‌دهند.

همبستگی میان متغیرهای اولیه نشان می‌دهد که شاخص خشک‌سالی هواشناختی بالاترین همانندی (۰/۹۳) را با شاخص خشک‌سالی آب‌شناختی دوره مرجع اول K_1 دارا می‌باشد. از طرفی با افزایش طول دوره‌ها همبستگی شاخص خشک‌سالی مؤثر با شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه کاهش می‌یابد. واضح است که رژیم آب‌آوردی رودخانه با رژیم پاییزه و زمستانه بارش منطقه هماهنگ‌تر می‌باشد. از طرف دیگر، در میان دوره‌های مرجع شاخص آب‌شناختی، دوره مرجع دوم K_2 دارای ضریب همبستگی بالاتری (۰/۸۰) با دوره مرجع چهارم K_4 می‌باشد. این همبستگی ناشی از اهمیت رژیم آبدهی پاییزه در رژیم سالانه رودخانه می‌باشد.

$$R = \frac{1}{689} X^T X = \begin{bmatrix} 1 & 0.93 & 0.65 & 0.57 & 0.53 \\ 0.93 & 1 & 0.70 & 0.61 & 0.80 \\ 0.65 & 0.70 & 1 & 0.85 & 0.56 \\ 0.57 & 0.61 & 0.85 & 1 & 0.47 \\ 0.53 & 0.80 & 0.56 & 0.47 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

هراندازه همبستگی میان متغیرهای اولیه زیادتر باشد، تعداد مؤلفه‌های کمتری قادر به توجیه پراش آن‌ها می‌شوند و برعکس. در این بررسی، مؤلفه نخست بیش از سه‌چهارم پراش متغیرهای اولیه را توجیه و به‌عنوان عامل اصلی پراش داده‌ها شناخته می‌شود (جدول ۶).

جدول ۶ پراش تبیین شده توسط مؤلفه‌های حاصل از تحلیل مؤلفه مبنا

مؤلفه‌ها	مؤلفه اول	مؤلفه دوم	مؤلفه سوم	مؤلفه چهارم	مؤلفه چهارم
پراش تبیین شده	۷۴/۴	۱۴/۳	۸/۳	۳	۱

بردار ویژه مؤلفه نخست در رابطه ۱۲ آورده شده است و حامل ضرایبی است که حاصل ضرب آن‌ها در متغیرهای اولیه (مرکزی شده)، مؤلفه نخست را پدید می‌آورد و دارای خاصیتی است پراش مؤلفه نخست را بیشینه می‌نماید.

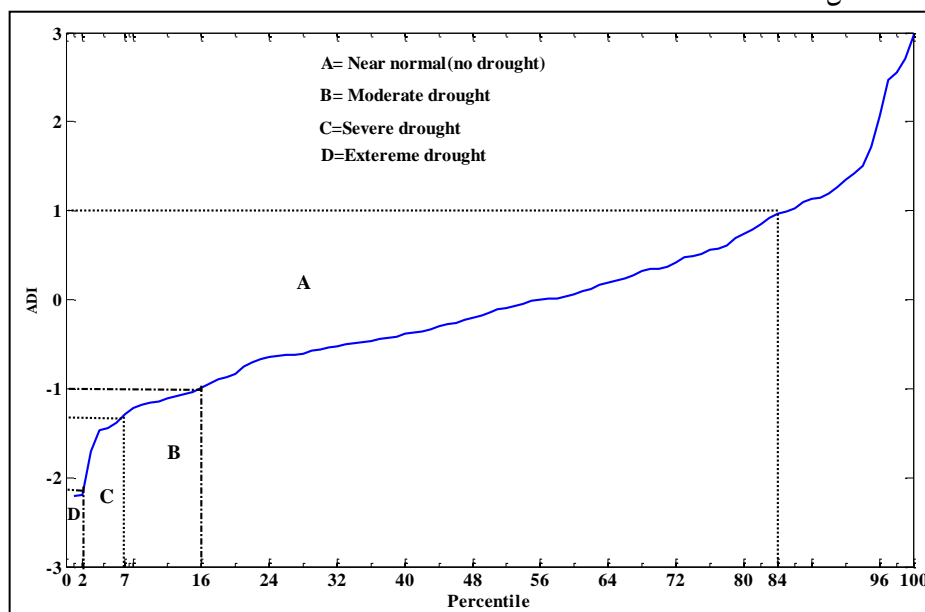
$$e_1 = [0.47 \quad 0.47 \quad 0.48 \quad 0.45 \quad 0.33] \quad (12)$$

سپس، انحراف معیار مؤلفه نخست محاسبه و در حاصل ضرب متغیرهای اولیه مرکزی شده و بردار ویژه مؤلفه نخست ضرب می‌گردد تا ارزش شاخص ترکیبی مورد نظر بر طبق رابطه ۱۰ حاصل گردد.

$$ADI = \frac{1}{1.85} \times \begin{bmatrix} -0.82 & -0.49 & -0.30 & -0.51 & 0.21 \\ -0.82 & -0.548 & -0.64 & -0.78 & 0.10 \\ -0.82 & -0.55 & -0.70 & -0.82 & 0.06 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1.0 & 0.72 & 0.01 & 0.07 & -0.03 \\ 1.21 & 0.83 & 0.08 & 0.13 & -0.05 \\ 1.03 & 0.68 & -0.04 & 0.06 & -0.09 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.47 \\ 0.47 \\ 0.48 \\ 0.45 \\ 0.33 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.50 \\ -0.69 \\ -0.72 \\ 0.20 \\ -0.01 \\ \dots \\ 0.43 \\ 0.47 \\ 0.46 \\ 0.57 \\ 0.42 \end{bmatrix} \quad (13)$$

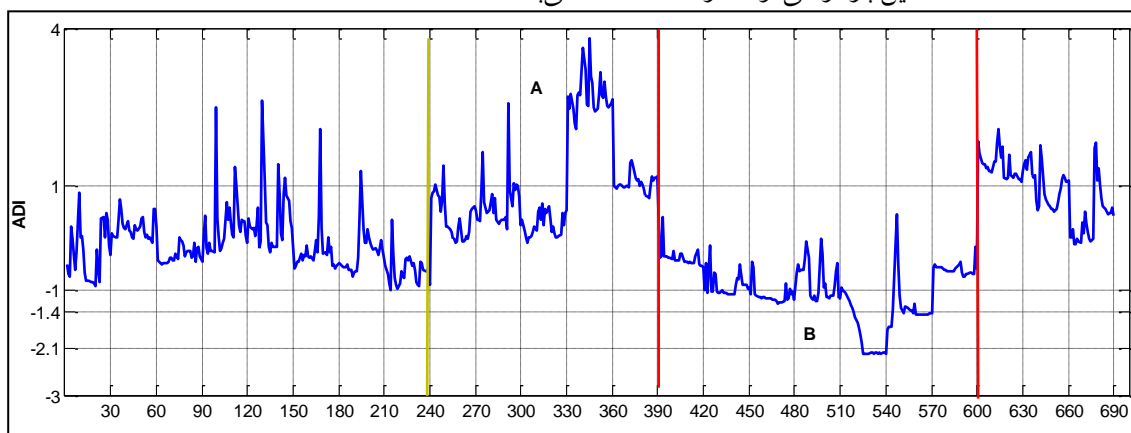
* $Z = 690 \times 5$ و $ADI = 690 \times 1$ می‌باشد.

از این طریق، آرایه ADI_{690*1} حاصل می‌گردد که ارزش شاخص ترکیبی خشک‌سالی آب- هواشناختی برای منطقه مورد مطالعه می‌باشد. بر اساس آستانه‌های قراردادی (جدول ۳) حالت‌های مختلف خشک‌سالی مشخص است (شکل ۶).



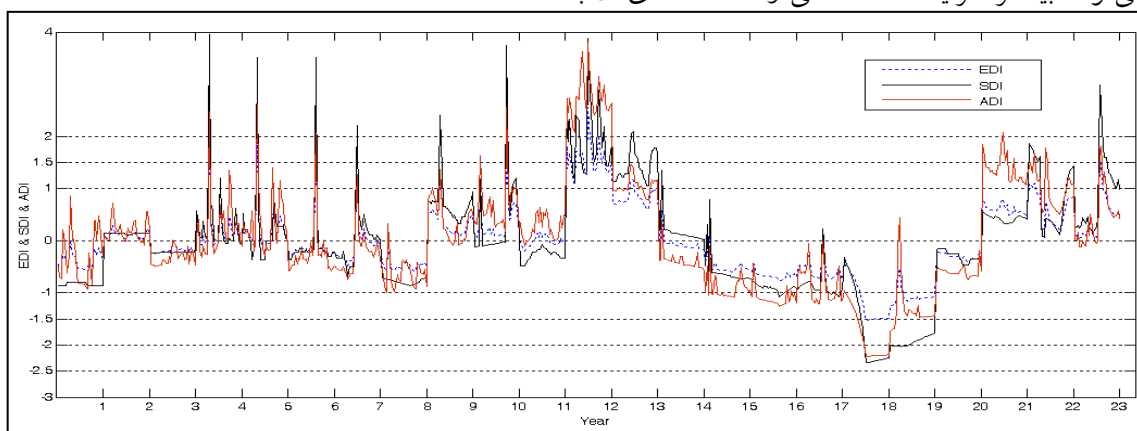
شکل ۶ آستانه‌های قراردادی بر اساس صدک‌ها برای تعیین حالت‌های مختلف خشک‌سالی ترکیبی

میانگین ارزش روزانه شاخص ترکیبی خشک‌سالی برای سال‌های آبی ۶۶-۱۳۶۵ الی ۸۹-۱۳۸۸ در شکل ۷ آورده شده است. این ارزش برای سال آبی ۸۶-۱۳۸۵ موجود نیست. بر اساس آستانه‌های شکل ۶ و جدول ۳ مشخص است که سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ (۳۳۰-۳۶۰) به‌عنوان سال آبی تر فرین و سال آبی ۸۳-۱۳۸۲ (۵۴۰-۵۱۰) به‌عنوان سال آبی خشک فوق‌العاده زیاد می‌باشند. مشخص است که یک دوره بزرگ ترسالی که در شکل ۷ با علامت A نشان داده است از سال آبی ۷۴-۱۳۷۳ آغاز و تا سال ۷۸-۱۳۷۷ ادامه دارد. این بازه زمانی از شماره ۲۴۰ تا ۳۹۰ می‌باشد. در برابر آن، یک دوره بزرگ خشک‌سالی نیز بلافاصله بعد از پایان دوره ترسالی آغاز و تا سال آبی ۸۵-۱۳۸۴ ادامه داشته است که با علامت B نشان داده شده است. این بازه زمانی از شماره ۳۹۰ تا ۶۰۰ می‌باشد.



شکل ۷ ارزش روزانه شاخص ترکیبی خشک‌سالی برای دوره ۶۶-۱۳۶۵ تا ۸۹-۱۳۸۸

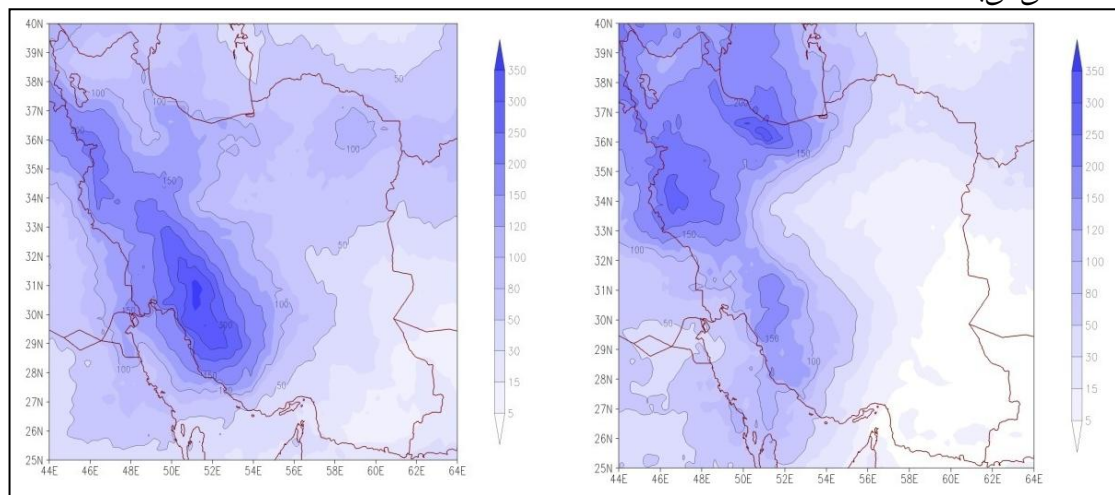
میانگین ارزش روزانه شاخص ترکیبی خشک‌سالی (ADI) با شاخص خشک‌سالی مؤثر (EDI) و خشک‌سالی جریان رودخانه (SDI) در شکل ۸ مقایسه شده است. سری زمانی ارزش‌های شاخص ترکیبی، از روند سری زمانی ارزش‌های شاخص SDI و EDI پیروی می‌نماید. شاخص ترکیبی به دلیل دربرداشتن اطلاعات همزمان از شاخص‌های خشک‌سالی هواشناختی و آب‌شناختی به‌عنوان شاخص چندمتغیره، بهتر می‌تواند بیانگر شرایط خشک‌سالی و مشخصه‌های آن باشد.



شکل ۸ ارزش شاخص خشک‌سالی هواشناختی، آب‌شناختی و شاخص ترکیبی در دوره ۶۶-۱۳۶۵ تا ۸۹-۱۳۸۸

داده‌های بارش روزانه سال‌های ۱۹۹۷، ۱۹۹۸، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ برای دامین^۱ ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی از پایگاه داده پرشین^۲ دریافت شده است. جزئیات این پایگاه داده بارش در بخش داده‌های اقلیمی مرکز ملی تحقیقات جوی^۳ و شرکت دانشگاه در تحقیقات جوی^۴ موجود است (هسو و همکاران، ۱۹۹۷). تفکیک فضایی این پایگاه داده ۰/۲۵ درجه بوده و از اطلاعات ماهواره‌ای برای ایجاد آن استفاده شده و برای کل سیاره زمین (اقیانوس و خشکی) دارای اطلاعات می‌باشد. ارزش‌های روزانه بارش در این پایگاه داده از سال ۱۹۸۳ موجود و در حال توسعه می‌باشد (سرووشیان و همکاران^۵، ۲۰۰۰؛ مهران و آقاچوک^۶، ۲۰۱۳؛ آقاچوک و همکاران^۷، ۲۰۱۱).

مجموع بارش روزانه دریافتی ایران در هنگام خشک‌سالی ۸۳-۱۳۸۲ در شکل ۹ آورده شده است. در ماه‌های مهر، آبان و آذر (شروع دوره آبی)، مقدار بارش دریافتی جنوب شرق ایران کمتر از ۵ میلی‌متر می‌باشد و به عبارتی بارشی در این محدوده از ایران رخ نداده است. در این هنگام، هسته‌های بیشینه بارش در نیمه غربی ایران بر روی ناهمواری زاگرس و در شمال ایران بر سواحل دریای خزر قرار دارد. در ماه‌های دی، بهمن و اسفند نیز هسته بزرگ از بیشینه بارش ایران در جنوب غرب ایران و در ناهمواری‌های زاگرس قرار دارد و بخش‌های جنوب شرقی ایران کمتر از ۳۰ میلی‌متر بارش دریافت نموده‌اند. بنابراین میزان دریافتی بارش دوره مرجع دوم K2 در جنوب شرق ایران بسیار ناچیز و بیانگر یک رویداد خشک‌سالی می‌باشد.

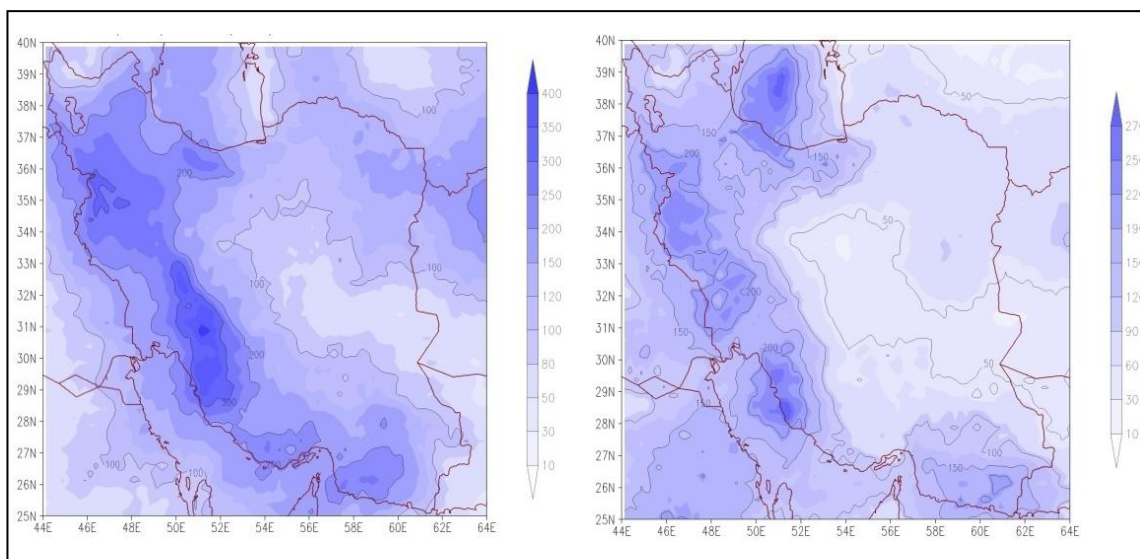


شکل ۹ توزیع فضایی مجموع بارش روزانه ایران در دوره مرجع نخست (شکل سمت راست) و دوره مرجع دوم

(شکل سمت چپ) در سال ۱۳۸۲

- 1 Domain
- 2 PERSIANN: Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks
- 3 National Center for Atmospheric Research(NCAR)
- 4 University Corporation for Atmospheric Research(UCAR)
- 5 Hsu et al
- 6 Sorooshian et al
- 7 Mehran and AghaKouchak
- 8 AghaKouchak et al

مجموع بارش روزانه ایران در هنگام ترسالی ۷۷-۱۳۷۶ نیز در شکل‌های ۱۰ آورده شده است. در ماه‌های مهر، آبان و آذر (شروع دوره آبی)، مقدار بارش دریافتی جنوب شرق ایران بیش از ۱۰۰ میلی‌متر بوده و به‌عنوان یکی از هسته‌های بیشینه بارش ایران می‌باشد. در این هنگام، به‌جز مناطق مرکزی ایران، دشت لوت و دشت سیستان در شرق ایران، سایر گستره ایران بیش از ۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر بارش دریافت نموده‌اند. در ماه‌های دی، بهمن و اسفند نیز بارش دریافتی جنوب شرق ایران بیشینه بوده است و بیش از ۱۰۰ تا بیش از ۲۰۰ میلی‌متر بارش دریافت نموده است. بنابراین میزان دریافتی بارش دوره مهر تا اسفند (K_2) در جنوب شرق ایران بسیار زیاد و بیانگر یک رویداد ترسالی می‌باشد.



شکل ۱۱ توزیع فضایی مجموع بارش روزانه ایران در دوره مرجع نخست (شکل سمت راست) و دوره مرجع دوم (شکل سمت چپ) در سال ۱۳۷۶

۴. نتیجه‌گیری

شاخص ترکیبی خشک‌سالی به‌طور جامع همه اشکال فیزیکی خشک‌سالی (هواشناختی، آب‌شناختی و کشاورزی) را از طریق انتخاب متغیرهای مرتبط به هر نوع خشک‌سالی شامل می‌شود. در این بررسی، یک شاخص ترکیبی جامع و چندمتغیره خشک‌سالی (آب- هواشناختی) برای ارزیابی خشک‌سالی‌های منطقه‌ای در حوضه بالادست سد پیشین در جنوب شرق ایران توسعه داده شده است. ارزش‌های روزانه و شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه‌ای و شاخص خشک‌سالی مؤثر با استفاده از داده‌های دبی رودخانه سرباز و بارش روزانه محاسبه و تحت یک تحلیل مؤلفه مبنا قرار گرفته است. بر اساس مؤلفه نخست تحلیل مؤلفه مبنا، شاخص ترکیبی واحد و چندمتغیره خشک‌سالی به دست آمده است.

بر اساس نتایج شاخص ترکیبی خشک‌سالی، یک دوره بزرگ خشک‌سالی از سال آبی ۷۹-۱۳۷۸ تا ۸۵-۱۳۸۴ در جنوب شرق ایران حاکم بوده است که شدت آن در سال آبی ۸۳-۱۳۸۲ فوق‌العاده زیاد بوده است. توزیع مکانی بارش ایران نیز در این سال آبی، آشکار می‌سازد که در فصل پاییز و زمستان مقدار دریافتی بارش در منطقه جنوب شرق ایران بسیار ناچیز بوده است. یک دوره بزرگ ترسالی نیز از سال آبی ۷۴-۱۳۷۳ آغاز و تا سال ۷۸-۱۳۷۷ ادامه داشته است. توزیع مکانی بارش ایران در این مواقع نیز بیانگر وجود یک هسته بیشینه بارش در جنوب شرق ایران بوده و بیانگر یک رویداد ترسالی می‌باشد. بنابراین، سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ به‌عنوان سال آبی تر فرین و سال آبی ۸۳-۱۳۸۲ به‌عنوان سال آبی خشک فوق‌العاده زیاد در جنوب شرق ایران می‌باشند. روش‌شناسی شاخص تلفیقی خشک‌سالی، یک رویکرد عینی و واضح برای توصیف شدت خشک‌سالی فراهم می‌کند. شاخص مزبور به‌خوبی قادر به نمایش رفتار خشک‌سالی‌های آب-هواشناختی محدوده مورد مطالعه بوده و به‌عنوان شاخص ترکیبی جدید برای پایش و ارزیابی خشک‌سالی منطقه‌ای توصیه می‌گردد.

تشکر و قدردانی

این مطالعه در چارچوب طرح تحقیقاتی «کاربست شاخص تلفیقی خشک‌سالی (هیدرولوژیکی-هواشناسی) بر پایه تحلیل مؤلفه منا در ارزیابی خشک‌سالی‌های منطقه‌ای جنوب شرق ایران» با شماره قرارداد ۱/۵۰۳۰ از جانب پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری کرمان تأمین مالی شده است. از این‌رو از این بزرگواران برای حمایت‌هایشان و نیز از داوران ناشناس برای بررسی‌های دقیق و توصیه‌ها و پیشنهادهای ارزشمند درباره روش‌شناسی، تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌ها قدردانی می‌گردد.

کتابنامه

- حجازی زاده، زهرا؛ فتاحی، ابراهیم؛ ۱۳۸۳. تحلیل کمی شدت و تداوم خشک‌سالی‌های روزانه در ایستگاه شهرکرد. نشریه علوم جغرافیایی. ۳(۳). ۱۶۱-۱۴۷.
- خسروی، محمود؛ نظری پور، حمید؛ ۱۳۹۱. مطالعه هم‌دید تیپ‌های هوای غالب منطقه سیستان (ایستگاه زابل). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. ۳(۸۱). ۶۲-۳۹.
- زارع‌زاده مهریزی، محبوبه؛ مرید، سعید؛ ۱۳۹۰. پایش خشک‌سالی با استفاده از تراز مخزن سد و شاخص‌های هواشناسی (مطالعه موردی سیستم آب زاینده‌رود اصفهان). مجله تحقیقات آب‌و‌خاک ایران. دوره ۴۲. شماره یک: ۱۹-۲۶.
- سعیدی، رضا؛ زهرایی، بنفشه؛ ۱۳۹۰. مدل‌سازی فرایند بارش-رواناب در حوضه آبریز سد پیشین برای شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه سمنان. ایران.

- مقدسی، مهنوش؛ مرید، سعید؛ قائمی، هوشنگ؛ محمدولی سامانی، جمال؛ ۱۳۸۴. پایش روزانه خشک‌سالی در استان تهران. *مجله علوم کشاورزی ایران*. ۳۶(۱). ۶۲-۵۱.
- نصرتی، کاظم؛ کاظمی، یونس؛ ۱۳۹۰. پایش روزانه خشک‌سالی و منابع آب در اقلیم‌های مختلف ایران، مرتع و آبخیزداری (منابع طبیعی ایران). ۶۴(۱). ۹۴-۷۹.
- نظری پور، حمید؛ بابائی، ندا؛ ۱۳۹۳. ارزیابی سختی خشک‌سالی‌های آب‌شناختی برپایه شاخص رواناب استاندارد شده و پیش‌بینی آن با زنجیره مارکوف در حوضه آبریز کویر لوت. دومین کنگره بین‌المللی علوم کشاورزی و محیط‌زیست. دانشگاه شهید بهشتی. تهران. ایران.
- Agha Kouchak, A., Behrangi, A., Sorooshian, S., Hsu, K., & Amitai, E. (2011). Evaluation of satellite-retrieved extreme precipitation rates across the central United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D2), 1984-2012.
- Akhtari, R., Morid, S., Mahdian, M. H., & Smakhtin, V. (2009). Assessment of areal interpolation methods for spatial analysis of SPI and EDI drought indices. *International Journal of Climatology*, 29(1), 135-145.
- Barnston, A. G., & Livezey, R. E. (1987). Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, 115(6), 1083-1126.
- Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G., & Sutera, A. (2003). Spatial variability of drought: An analysis of the SPI in Sicily. *Water Resources Management*, 17(4), 273-296.
- Byun, H. R., & Wilhite, D. A. (1999). Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12(9), 2747-2756.
- Cattell, R. B. (1952). *Factor analysis: An introduction and manual for the psychologist and social scientist*. Westport, Conn: Greenport Press.
- Chen, S. T., Kuo, C. C., & Yu, P. S. (2009). Historical trends and variability of meteorological droughts in Taiwan. *Hydrological Sciences Journal*, 54(3), 430-441.
- CRDE. (2003). *Disasters database*. Retrieved from <http://www.cred.be/emdat/intro.htm>.
- Dogan, S., Berkty, A., & Sing, V. P. (2012). Comparison of multi-monthly rainfall-based drought severity indices, with application to semi-arid Konya closed basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 470-471, 255-268.
- Dracup, J. A., Lee, K. S., & Paulson, E. G. (1980). On the definition of droughts. *Water Resources Research*, 16(2), 297-302.
- Guttman, N. B. (1998). Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index. *Journal of American Water Resources Association*, 34(1), 113-121.
- Haan, C. T. (1977). *Statistical methods in hydrology*. Iowa: Iowa State University Press.
- Hayes, M. J., Svoboda, M. D., & Wilhite, D. A. (2000). Monitoring drought using the standardized precipitation index. In D.A. Wilhite (Ed.), *Drought: A global assessment* (pp. 168-180). UK: Routledge.

- Hidalgo, H. G., Piechota, T. C., & Dracup, J. A. (2000). Alternative principal components regression procedures for dendrohydrologic reconstructions. *Water Resources Research*, 36(11), 3241-3249.
- Hsu, K. L., Gao, X., Sorooshian, S., & Gupta, H. V. (1997). Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. *Journal of Applied Meteorology*, 36(9), 1176-1190.
- Kalamaras, N., Michalopoulou, H., & Byun, H. R. (2010). Detection of drought events in Greece using daily precipitation. *Hydrology Research*, 41(2), 126-133.
- Keyantash, J. A., & Dracup, J. A. (2004). An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resources Research*, 40(9), 1-13.
- Kim, D. W., Byun, H. R., & Choi, K. S. (2009). Evaluation, modification, and application of the effective drought index to 200-year drought climatology of Seoul, Korea. *Journal of Hydrology*, 378(1), 1-12.
- Lins, H. F. (1997). Regional streamflow regimes and hydroclimatology of the United States. *Water Resources Research*, 33(7), 1655-1667.
- Linsely Jr., R. K., Kohlerm, M. A., & Paulhus, J. L. H. (1959). *Applied hydrology*. New York: McGraw Hill.
- Mehran, A., & Agha Kouchak, A. (2014). Capabilities of satellite precipitation datasets to estimate heavy precipitation rates at different temporal accumulations. *Hydrological Processes*, 28(4), 2262-2270.
- Mishra, A. K., & Desai, V. R. (2005). Drought forecasting using stochastic models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(5), 326-339.
- Morid, S., Smakhtin, V., & Moghaddasi, M. (2006). Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International Journal of Climatology*, 26(7), 971-985.
- Nalbantis, I. (2008). Evaluation of a hydrological drought index. *European Water*, 23(24), 67-77.
- Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23(5), 881-897.
- Nicholson, S. E., Davenport, M. L., & Malo, A. R. (1990). A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR. *Climatic Change*, 17(2-3), 209-241.
- Norouzi, A., Nohegar, A., & Ghorbani, A. (2012). Comparison of the suitability of standardized precipitation index (SPI) and aggregated drought index (ADI) in Minab watershed (Hormozgan province/South of Iran). *African Journal of Agricultural Research*, 7(44), 5905-5911.
- Obasi, G. O. P. (1994). WMO's role in the international decade for natural disaster reduction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75(9), 1655-1661.
- Pandey, R. P., Dash, B. B., Mishra, S. K., & Singh, R. (2008). Study of indices for drought characterization in KBK districts in Orissa (India). *Hydrological Processes*, 22(12), 1895-1907.

- Paulo, A. A., & Pereira, L. S. (2006). Drought concepts and characterization: Comparing drought indices applied at local and regional scales. *Water International*, 31(1), 37-49.
- Pickup, G. (1998). Desertification and climate change: The Australian perspective. *Climate Research*, 11(1), 51-63.
- Preisendorfer, R. W. (1988). *Principal component analysis in meteorology and oceanography* (Vol. 17). Amsterdam: Elsevier.
- Rossi, G. (2000). Drought mitigation measures: A comprehensive framework. In J. V. Vogt & F. Somma (Eds.), *Drought and drought mitigation in Europe* (pp. 233-246). Netherlands: Springer.
- Rossi, G., Benedini, M., Tsakiris, G., & Giakoumakis, S. (1992). On regional drought estimation and analysis. *Water Resources Management*, 6(4), 249-277.
- Saedi, R., & Zahraei, B. (2011, April). *Rainfall-runoff modeling to simulate the effects of climate change in the Pishin dam basin*. Paper presented at the 6th National Congress on Civil Engineering, Semnan University, Iran.
- Snedecor, G. W., & Cochran, W. G. (1967). *Statistical methods*. Iowa: Iowa University Press.
- Sorooshian, S., Hsu, K. L., Gao, X., Gupta, H. V., Imam, B., & Braithwaite, D. (2000). Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(9), 2035-2046.
- Tigkas, D. (2008). Drought characterization and monitoring in regions of Greece. *European Water*, 23(24), 29-39.
- Tsakiris G., Pangalou D., & Vangelis H. (2007). Regional drought assessment based on the reconnaissance drought index (RDI). *Water Resources Management*, 21(5), 821-833.
- Tsakiris G., Tigkas D., Vangelis, H., Pangalou, D. (2007). Regional drought identification and assessment – Case study in Crete. In G. Rossi, T. Vega, & B. Bonaccorso (Eds.), *Methods and tools for drought analysis and management* (pp. 169-191). The Netherlands: Springer.
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3), 111-120.
- Wilhite, D. A., Sivakumar M. V. K., & Wood D. A. (2000, September). Early warning systems for drought preparedness and drought management. Paper presented at an Expert Group Meeting, Lisbon, Portugal.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences: An introduction* (Vol. 100). USA: Academic Press.
- Yarnal, B. (1993). *Synoptic climatology in environmental analysis: A primer*. London: Belhaven Press.
- Zarch, M. A. A., Malekinezhad, H., Mobin, M. H., Dastorani, M. T., & Kousari, M. R. (2011). Drought monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. *Water Resources Management*, 25(13), 3485-3504.