



جغرافیا و روابط انسانی، بهار ۱۴۰۲، دوره ۵، شماره ۴، صص ۶۵۲-۶۲۵

شناسایی و تشخیص روند خشکسالی کشاورزی با استفاده از شاخص‌های RDI و eRDI در یک اقلیم گرم و خشک

مسعود عشقی‌زاده^{۱*} و یاسر اسماعیلیان^۲

^۱ و ^۲: مجتمع آموزش عالی گناباد، دانشکده علوم پایه، گروه مهندسی کشاورزی و منابع طبیعی، گناباد، ایران

Email: m.eshghizadeh@gonabad.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۷

چکیده

در بین تنش‌ها و مخاطرات محیطی مختلف، خشکسالی به‌عنوان مهم‌ترین عامل محیطی شناخته می‌شود که چالش اصلی مناطق مختلف جهان و به‌خصوص ناحیه خاورمیانه می‌باشد که علاوه بر تأثیرات گسترده بر تولید و بهره‌وری محصولات کشاورزی، بر سایر ابعاد اجتماعی و اقتصادی کشورها اثرگذار است. بنابراین، آنالیز، پایش و شاخص‌بندی خشکسالی از ضروریات اصلی مدیریت و برنامه‌ریزی در زمینه خشکسالی می‌باشد. در این پژوهش، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) و نسخه بهبود یافته آن یعنی شاخص شناسایی خشکسالی مؤثر (eRDI) برای یک دوره آماری ۵۹ ساله (۱۹۶۱-۲۰۲۰) به‌منظور شناسایی و بررسی روند خشکسالی کشاورزی در منطقه گناباد مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق مشخص کرد بین شاخص‌های مورد آزمون در تعیین و پایش خشکسالی اختلاف معنی‌داری وجود نداشت، هرچند شاخص eRDI در مورد تعیین شدت خشکسالی در دوره‌های فصلی حساسیت و دقت بیشتری نشان داد. طولانی‌ترین دوره خشکسالی به مدت ۹ سال از طریق شاخص eRDI FAO بدست آمد و طولانی‌ترین دوره ترسالی نیز توسط تمامی شاخص‌ها به مدت ۱۱ سال محاسبه شد. همچنین، بیشترین فراوانی شرایط آب و هوایی مربوط به وضعیت نرمال (۳۳/۹ تا ۳۹ درصد) بود. در مقیاس فصلی، طولانی‌ترین دوره خشکسالی و ترسالی در فصل بهار به ترتیب ۸ و ۶ سال محاسبه شد. تمامی شاخص‌ها شرایط ترسالی را برای تابستان تشخیص داده و اعداد مذکور برای فصل پاییز به ترتیب ۷ و ۶، و برای زمستان به ترتیب ۹ و ۷ سال بدست آمد. به‌طور کلی، هرچند شاخص eRDI به دلیل استفاده از بارش مؤثر بجای بارش تجمعی در شناسایی خشکسالی می‌تواند کارایی بهتری در تعیین و پایش خشکسالی کشاورزی داشته باشد، اما در این پژوهش تفاوت معنی‌داری در آنالیز خشکسالی کشاورزی بین دو شاخص مشاهده نشد و به همین علت به‌نظر می‌رسد می‌توان از شاخص RDI در پایش و تحلیل خشکسالی در مناطق اقلیمی مشابه با منطقه مورد مطالعه بهره برد.

واژگان کلیدی: بارش مؤثر، تبخیر و تعرق، تغییرات اقلیمی، خشکسالی کشاورزی، دوره رشد



تغییرات اقلیمی یکی از چالش‌های اساسی زیست محیطی در جهان است و پیامدهای مهم اجتماعی و اقتصادی را به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه و کم درآمد به دنبال دارد (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم ۱، ۲۰۱۳). خشکسالی به‌عنوان حالت طبیعی ناشی از تغییرات اقلیمی و چرخه آب محسوب شده و می‌تواند در تمامی نواحی اقلیمی رخ دهد. این امر ناشی از کاهش موقت رژیم بارش نرمال در یک مقیاس سطح وسیع می‌باشد، هرچند سایر عوامل اقلیمی از قبیل درجه حرارت بالا و باد یا پایین بودن رطوبت نسبی می‌تواند به‌طور معنی‌داری شدت این پدیده طبیعی را تغییر دهد. عوامل و محرک‌های انسانی همانند مصرف بی‌رویه آب و مدیریت ضعیف آن می‌تواند شرایط خشکسالی را تشدید کند و در پی آن، آسیب‌پذیری اجتماعی افزایش یابد (وروسمارتی ۲ و همکاران، ۲۰۰۰؛ تالاکسن و ون‌لانن ۳، ۲۰۰۴؛ دوول ۴ و همکاران، ۲۰۰۹؛ واد ۵ و همکاران، ۲۰۱۳).

آثار خشکسالی اغلب به آرامی در طی مدت زمان قابل توجهی تجمع می‌یابد که ممکن است چندین سال حتی پس از پایان خشکسالی ادامه یابد. بنابراین، برخی نویسندگان آن را پدیده‌ای خزنده خوانده‌اند (ویلهیت ۶، ۲۰۰۰). خشکسالی می‌تواند کوتاه‌مدت باشد و فقط چند ماه طول بکشد یا ممکن است سال‌ها ادامه یابد تا شرایط آب و هوایی به حالت عادی بازگردد (زارچ و همکاران، ۲۰۱۱).

خشکسالی می‌تواند آثار اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی گسترده‌ای داشته باشد. درحالی که بسیاری از بخش‌ها و ابعاد مختلف جوامع تحت تأثیر خشکسالی قرار می‌گیرد، اما بخش کشاورزی به‌عنوان مهم‌ترین بخش استفاده‌کننده از اراضی و مهم‌ترین فعالیت اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی در بسیاری از نقاط جهان، به‌دلیل وابستگی زیاد به دسترسی و فراهمی آب، حساسیت و تأثیرپذیری بسیار بالایی از تغییرات اقلیمی دارد (دیلی ۷ و همکاران، ۲۰۰۵؛ هاودن ۸ و همکاران، ۲۰۰۷؛ دفتر کاهش خطر بلایای سازمان ملل متحد، ۲۰۱۹). طبق پیش‌بینی‌های انجام شده، با توجه به افزایش قابل توجه نیاز به تأمین غذا تا سال ۲۰۵۰ میلادی، تولید محصولات کشاورزی باید به میزان دو برابر وضعیت کنونی افزایش یابد (تیلمن ۹ و همکاران، ۲۰۱۱).

1 - IPCC

2 - Vörösmarty

3 - Tallaksen & van Lanen

4 - Döll

5 - Wada

6 - Wilhite

7 - Dilley

8 - Howden

9 - Tilman

با توجه به اشتغال نزدیک به ۱/۴ میلیارد نفر (حدود ۱۸ درصد از جمعیت جهان) در بخش کشاورزی، خشکسالی معیشت و اشتغال قشر بزرگی از جوامع را تهدید می‌کند و می‌تواند مانع دستیابی به اهداف توسعه پایدار شود (مزایا و همکاران، ۲۰۱۹). بر اساس گزارش اخیر سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (۲۰۱۷)، خشکسالی‌ها بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ در مجموع ۲۹ میلیارد دلار خسارت در بخش کشاورزی کشورهای در حال توسعه ایجاد کرده است. اکثر نقاط جهان خشکسالی را تجربه می‌کنند، به‌ویژه در مناطق خشک که بارندگی سالانه عمدتاً حاصل چند رخداد بارندگی معدود است. از آنجا که کشورهای در حال توسعه از کمبود غذا رنج می‌برند، تشدید خشکسالی و گسترش آن باعث افزایش خسارت‌ها به کشاورزی می‌شود و امنیت غذایی و رفاه تقریباً نیمی از جمعیت جهان را دچار بحران شدید می‌کند. اگر خشکسالی‌ها مکرر و شدیدتر شده و به مناطق جدید سرایت کنند، تلفات کشاورزی بسیار بیشتر خواهد شد و مشکلات بیشتری را در زمینه تأمین مواد غذایی در سطح منطقه‌ای و جهانی ایجاد می‌کند. چنانچه کشاورزی به دلیل تشدید و گسترش خشکسالی از میزان تولید محصول کمتری برخوردار باشد، بیلان منفی بین عرضه و تقاضای منابع غذایی بسیار قوی‌تر و سریع‌تر افزایش می‌یابد (گادفری و همکاران، ۲۰۱۰؛ هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۱۴؛ کوغان، ۲۰۱۸). ایران از جمله کشورهایی است که به دلیل پایین بودن میانگین بارندگی و محدود بودن منابع آب از یک طرف و وابستگی به کشاورزی که حساسیت بالایی به شرایط آب و هوایی دارد، به‌طور بالقوه آسیب‌پذیری زیادی از تغییرات اقلیمی و پیامدهای خشکسالی ناشی از آن در بخش کشاورزی دارد (نصیری و همکاران، ۲۰۰۶).

خشکسالی کشاورزی ۴ اصطلاحی است که برای تشریح میزان اثرات خشکسالی بر محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد و میزان حساسیت گیاهان به شرایط آب و هوایی و هیدرولوژیکی را مورد محاسبه قرار می‌دهد (ویلپیت و بوچانا-اسمیت، ۲۰۰۵). در واقع، خشکسالی کشاورزی ویژگی‌های مختلف خشکسالی آب و هوایی را به اثرات بر کشاورزی مرتبط می‌کند (ویلپیت، ۲۰۰۰؛ بلوم، ۲۰۰۵؛ میشر و سینگ، ۲۰۱۰). شاخص‌بندی و تجزیه و تحلیل خشکسالی از جنبه‌های مهم در راستای مدیریت خشکسالی و برنامه‌ریزی عملیاتی در مورد سازگاری و تخفیف اثرات آن بر بخش‌های مختلف مصرف‌کننده آب است. کمی کردن شدت خشکسالی که معمولاً با استفاده از شاخص‌های خشکسالی به‌دست می‌آید جزء اصلی تجزیه و تحلیل خشکسالی است (وانگلیس و همکاران، ۲۰۱۳؛ تیکاس و همکاران، ۲۰۱۷).

1 - Meza

2 - Godfray

3 - Kogan

4 - Agricultural drought

5 - Wilhite & Buchanan-Smith

6 - Blum

7 - Mishra & Singh

8 - Vangelis

9 - Tigkas

شمار زیادی از شاخص‌ها برای آنالیز و شاخصه‌بندی خشکسالی کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته است (سیوکومار ۱ و همکاران، ۲۰۱۱). بسته به ناحیه اقلیمی، نوع خشکسالی و هدف مطالعه، شاخص‌های خشکسالی اطلاعات مربوط به بارندگی، تبخیر و تعرق پتانسیل، رطوبت خاک، آب سطحی، آب زیرزمینی یا کمبود عرضه را بکار می‌گیرند (خدون ۲ و همکاران، ۲۰۱۲؛ هائو ۳ و آفاکوچک، ۲۰۱۳). اخیراً، شاخص‌هایی که تبخیر و تعرق پتانسیل را به‌منظور تعیین وضعیت خشکسالی مورد استفاده قرار می‌دهند توسعه یافته‌اند که از این شاخص‌ها می‌توان به شاخص شناسایی خشکسالی ۴ (RDI) و نسخه بهبود یافته آن یعنی شاخص شناسایی خشکسالی مؤثر ۵ (eRDI) اشاره کرد (ساکریس و همکاران، ۲۰۰۷b؛ تیکاس و همکاران، ۲۰۱۷). نقش تبخیر و تعرق پتانسیل در این شاخص‌های خشکسالی به‌عنوان یک معیار دقیق مرتبط با پدیده خشکسالی مورد توجه زیادی واقع شده است (تولینگ و همکاران، ۲۰۱۳).

شاخص RDI به‌عنوان یک شاخص مهم در ارزیابی و طبقه‌بندی خشکسالی توسط سازمان جهانی هواشناسی ۶ (WMO) توصیه شده است. این شاخص به‌منظور تشخیص کمبود آب توسعه یافته است و از هر دو عامل بارندگی و درجه حرارت برای تشخیص وضعیت خشکسالی استفاده می‌کند (ساکریس و وانگلیس، ۲۰۰۵؛ تیکاس و همکاران، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷). این شاخص برای مطالعات در مقیاس‌های مکانی کوچک به‌طور موفقیت‌آمیزی مورد استفاده قرار گرفته است (مرابتی ۷ و همکاران، ۲۰۱۷).

خلیلی و همکاران (۲۰۱۱) به مقایسه شاخص بارش استاندارد شده ۸ (SPI) و شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) در زمینه تعیین خصوصیات خشکسالی در ایران پرداخته و به این نتیجه رسیدند که هر دو شاخص تقریباً عملکرد مشابهی را بروز دادند. محققان اظهار داشتند شاخص RDI به‌دلیل استفاده از تبخیر و تعرق پتانسیل (ETO) می‌تواند نسبت به تغییرات اقلیمی بسیار حساس باشد. آنها به این نتیجه رسیدند که به‌منظور تجزیه و تحلیل خشکسالی برای کاربردهای کشاورزی، استفاده از شاخص RDI نسبت به SPI مزیت بیشتری دارد. در مطالعه‌ای که به ارزیابی شاخص RDI در تشخیص و ارزیابی خشکسالی در مناطق مختلف بیابانی کشور هند پرداخته شد محققان به این نتیجه رسیدند که این شاخص توانایی تجزیه و تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر سناریوهای خشکی در نواحی مختلف مورد مطالعه را دارد. همچنین، مشاهده شد که هر رویداد

1 - Sivakumar

2 - Khedun

3 - Hao

4 - Reconnaissance Drought Index

5 - Effective Reconnaissance Drought Index

6 - World Meteorological Organization

7 - Merabti

8 - Standardized Precipitation Index

خشکسالی منحصر به فرد بوده و روند پیشرفت و اتمام آن بسته به الگوی بارندگی در ماه‌های مختلف سال آبی متفاوت است (توماس و همکاران، ۲۰۱۶).

مطالعه ای در مورد ارزیابی دو شاخص RDI و eRDI در پایش و شناسایی شدت خشکسالی در ۲۲ منطقه اقلیمی متفاوت در ایران انجام گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد میانگین‌های بدست آمده از دو شاخص در مناطق با شرایط اقلیمی مرطوب اختلاف معنی‌داری از نظر آماری نشان نداد، درحالی که در اقلیم‌های خشک و بسیار خشک اختلاف میانگین‌های بدست آمده معنی‌دار بود. نگارندگان پیشنهاد کردند در مناطق با اقلیم مرطوب و نیمه مرطوب استفاده از شاخص RDI توصیه می‌شود. اما در اقلیم‌های خشک و بسیار خشک بهتر است شاخص eRDI جایگزین شاخص RDI شود (زارعی و همکاران، ۲۰۱۹).

با توجه به شرایط اقلیمی نواحی مختلف ایران و به‌خصوص منطقه مورد مطالعه، نوسانات و تغییرات شدید عوامل آب و هوایی به‌ویژه بارندگی از مسائل و چالش‌های اصلی این مناطق می‌باشد. از طرف دیگر، بخش کشاورزی به‌عنوان مهم‌ترین رکن اقتصادی شهرستان گناباد با دارا بودن سهم بالا در اشتغال و توسعه اجتماعی-اقتصادی این منطقه در سال‌های اخیر به شدت تحت تأثیر تبعات و مخاطرات خشکسالی قرار گرفته است. بنابراین شناسایی، تجزیه و تحلیل و برنامه‌ریزی در زمینه خشکسالی در این منطقه بسیار حیاتی و ضروری است. طبق بررسی‌های انجام شده، تاکنون مطالعه‌ای در زمینه شناسایی و ارزیابی خشکسالی در شهرستان گناباد انجام نشده است. ضمن اینکه پژوهش‌های انجام شده در مورد مقایسه دو شاخص خشکسالی RDI و eRDI در کشور بسیار محدود است. بنابراین، پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی و مقایسه دو شاخص مذکور در شناسایی و تعیین شدت خشکسالی کشاورزی و همچنین پایش تناوب و طول مدت دوره‌های خشکی در منطقه گناباد صورت گرفت. همچنین، کارایی چهار روش USDA-CROPWAT، USDA-SCS، USBR، FAO برای برآورد بارش مؤثر در شاخص eRDI مورد بررسی قرار گرفت.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

به‌منظور بررسی و مقایسه دو شاخص RDI و eRDI در شناسایی و تجزیه و تحلیل خشکسالی کشاورزی، از آمار ایستگاه هواشناسی گناباد طی دوره زمانی سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۲۰ میلادی استفاده شد. ایستگاه هواشناسی گناباد در شهر گناباد واقع در جنوب استان خراسان رضوی با طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۴۲ دقیقه، عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه و ارتفاع ۱۱۵۰ متری از سطح دریا قرار دارد (شکل ۱). بر اساس آمار بلند مدت، متوسط بارش سالانه ثبت شده در این ایستگاه ۱۴۱/۵ میلی‌متر است. همچنین متوسط دمای سالانه آن ۱۷/۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم خشک می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

شاخص شناسایی خشکسالی (RDI)

مطالعات نشان داده است که خشکسالی‌های مناطق مدیترانه‌ای با افزایش درجه حرارت به شدت تحت تأثیر میزان تبخیر و تعرق قرار می‌گیرند و بنابراین، شاخص‌های بر پایه میزان بارندگی به تنهایی قادر به تعیین وضعیت و پایش خشکسالی در این نواحی اقلیمی نیستند. به همین دلیل ساکرینس و همکاران (۲۰۰۷) شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) را بر اساس مفاهیم و اصول شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI) با نسبت میزان بارش به تبخیر و تعرق در شرایط اقلیمی متفاوت برای ارزیابی و تجزیه و تحلیل خشکسالی کشاورزی توسعه دادند. شاخص RDI دو پارامتر بارش تجمعی (P) و تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) را برای دوره‌های زمانی ویژه مرجع مورد استفاده قرار می‌دهد و تشریحی از میزان تعادل آب در اکوسیستم را ارائه می‌دهد (ساکرینس و وانگلیس، ۲۰۰۵).

این شاخص برای ارزیابی خشکسالی تحت سه شکل شاخص شامل میزان اولیه RDI (α_k)، RDI نرمال شده (RDIn) و RDI استاندارد شده (RDIST) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شاخص میزان اولیه RDI طبق رابطه ۱ زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_k = \frac{\sum_{j=1}^{j=k} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{j=k} PET_{ij}} \quad (1)$$

در رابطه فوق، P و PET به ترتیب مقادیر بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل در j امین ماه از سال a هستند. مقدار a از ۱ تا N (تعداد سال‌هایی که داده‌های آماری مورد استفاده قرار می‌گیرند) متغیر است.

شاخص RDI نرمال شده از طریق رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$RDI_n(k) = \frac{\alpha_k}{\bar{\alpha}_k} - 1 \quad (2)$$

در رابطه فوق، $\bar{\alpha}k$ میانگین بلند مدت مقادیر αk است.

مقادیر RDI استاندارد شده بر اساس رابطه ۳ محاسبه می‌شوند:

$$RDI_{st}(k) = \frac{y_k - \bar{y}_k}{\sigma_{y_k}} \quad (3)$$

در معادله فوق، y_k لگاریتم طبیعی αk و \bar{y}_k میانگین بلند مدت و σ_{y_k} انحراف معیار مقادیر y_k هستند. در این تحقیق فرض بر این است که مقادیر نسبت بارندگی به تبخیر و تعرق از تابع چگالی لوگ نرمال تبعیت می‌کند. مطابق نتایج ساکرینس و همکاران (۲۰۰۸) تابع توزیع گاما برازش بهتری برای مقادیر αk دارد. بنابراین، در این مطالعه با برازش توزیع گاما و یافتن مقادیر احتمال تجمعی آن، مقادیر RDI بر پایه مفاهیم شاخص SPI محاسبه شدند. تعیین وضعیت خشکسالی بر اساس طبقات شدت خشکسالی مطابق با مقادیر RDI استاندارد شده همانند شاخص SPI طبق جدول ۱ انجام می‌شود (ساکرینس و همکاران، ۲۰۰۷a؛ شکوهی، ۱۳۹۱).

جدول ۱- طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس مقادیر RDI استاندارد شده

طبقه‌بندی	مقادیر RDIst
بسیار مرطوب	بیشتر از ۲
خیلی مرطوب	۱/۹۹ تا ۱/۵۰
مرطوب متوسط	۱/۴۹ تا ۱/۰۰
نرمال	۰/۹۹ تا ۰/۰۰
خشکی ملایم	۰/۰۰ تا -۰/۹۹
خشکی متوسط	-۱/۴۹ تا -۱/۰۰
خیلی خشک	-۱/۵۰ تا -۱/۹۹
بسیار خشک	کمتر از -۲

شاخص شناسایی خشکسالی مؤثر (eRDI)

جنبه اصلی در شاخص اصلاحی eRDI، جایگزینی بارندگی کل با بارندگی مؤثر (Pe) کل می‌باشد. هرچند، پژوهش‌هایی نشان دهنده کاربرد موفق شاخص RDI در ارزیابی اثرات خشکسالی بر عملکرد محصولات کشاورزی است (ساکرینس و همکاران، ۲۰۱۰؛ تیکاس و ساکرینس، ۲۰۱۵)، اما خصوصاً در کشاورزی دیم، کاربرد شاخص eRDI با استفاده از پارامتر بارندگی مؤثر که به میزان دقیق‌تری میزان آبی که توسط محصولات کشاورزی قابل استفاده است را معین می‌کند، منجر به افزایش سطح تفسیری شاخص برای تشخیص خشکسالی در کشاورزی می‌شود.

در این شاخص، شکل اولیه شاخص eRDI (αk) طبق رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$\alpha_k = \frac{\sum_{j=1}^{j=k} Pe_j}{\sum_{j=1}^{j=k} PET_j} \quad (4)$$

که در رابطه فوق، Pe_j بارندگی مؤثر ماهیانه مربوط به ماه l است. قابل ذکر است که برآورد Pe همیشه بر اساس مقادیر ماهیانه مربوط به بارندگی کل است و نه بر اساس مقادیر کل دوره مرجع مورد استفاده. فرمول‌های شاخص RDI نرمال شده و RDI استاندارد شده در شاخص $eRDI$ مشابه با روابطی است که قبلاً برای شاخص RDI تشریح شد. همچنین، طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس مقادیر $eRDI$ استاندارد شده مطابق با همان طبقه‌بندی جدول ۱ می‌باشد.

یکی دیگر از عوامل مهم که باید در نظر گرفته شود، انتخاب دوره‌های مرجع مناسب برای محاسبه شاخص است.

ساکریس و وانگلیس (۲۰۰۵) محاسبه RDI اصلی را بر اساس سال آبی یعنی با استفاده از دوره‌های مرجع از اولین ماه سال آبی (معمولاً مهر ماه برای شرایط مدیترانه‌ای) پیشنهاد کرده‌اند. این رویکرد منجر به ارزیابی منطقی کمبود آب می‌شود که در کاربردهای هیدرولوژیکی، سیستم‌های هشدار اولیه و پایش خشکسالی مفید واقع می‌شود (تیکاس، ۲۰۰۸). قابل ذکر است خشکسالی کشاورزی غالباً با دوره نمودی محصول نسبت به دوره سال آبی ارتباط بیشتری دارد و بعلاوه، هر محصول ممکن است در طول مراحل ویژه نمودی خود بسته به اقلیم منطقه و دیگر عوامل محیطی آسیب‌پذیری بیشتری از خشکسالی داشته باشد. بنابراین، برای انتخاب دوره‌های مرجع مناسب برای محاسبه $eRDI$ باید ملاحظات فوق را در نظر گرفت.

معیار اصلی برای این انتخاب، هدف از تجزیه و تحلیل خشکسالی می‌باشد. به‌عنوان مثال، اگر هدف ارزیابی کلی خشکسالی کشاورزی در یک منطقه است، توصیه می‌شود که بر محصول اصلی منطقه تمرکز شود. در مورد پایش خشکسالی کشاورزی و یا اگر هدف یک ارزیابی اولیه از اثرات خشکسالی است، جهت انتخاب دوره‌های زمانی مرجع می‌توان زمان کاشت (یا اگر سطح رطوبت خاک برای جوانه‌زنی اهمیت زیادی دارد، ماه قبل از کاشت) را به‌عنوان زمان مرجع در نظر گرفت و از این نقطه شروع به دوره‌های یک ماهه، دو ماهه و غیره تعمیم داده شود. تأکید بر دوره‌های مرجع مرتبط با مراحل مهم نمودی گیاه می‌تواند درک خوبی از پدیده در جهت پشتیبانی از سیستم‌های هشدار اولیه ارائه دهد. هرچند، اگر هدف ارزیابی تأثیرات پس از رویداد (به‌عنوان مثال، اقدامات کاهش اثرات منفی خشکسالی) باشد، ایده‌آل این است که دوره مرجعی را انتخاب کنیم که مربوط به کل دوره رشد محصول باشد (تیکاس و ساگریس، ۲۰۱۵).

بارش مؤثر در کشاورزی

اصطلاح بارش مؤثر^۱ با توجه به زمینه مورد مطالعه (مانند آبخیزداری و مدیریت منابع آب، هیدرولوژی شهری، کشاورزی و ...) دارای تعاریف متفاوتی است. در آبخیزداری و هیدرولوژی، بخشی از بارش که در سطح زمین جاری شده و رواناب سطحی را بوجود می‌آورد، به‌عنوان بارش

1 - Effective rainfall

مؤثر نامیده می‌شود (مهدوی، ۱۳۸۸). در مدیریت منابع آب، بارش مؤثر به عنوان مجموع مقدار بارش روزانه، ماهانه یا سالانه با یک تابع زمانی کاهشی که کمبود روزانه منابع آب را نشان می‌دهد، توصیف می‌شود (بیون و ویلهیت، ۱۹۹۹). مفهوم بارش مؤثر در این تحقیق بر مصرف آب در مراحل نمو گیاهان متمرکز شده است. حتی در این زمینه نیز بارش مؤثر به روش‌های مختلفی بسته به اهداف خاص قابل تعریف است. به‌طور کلی بارش مؤثر از نظر کشاورزی به بخشی از بارش که می‌تواند به‌طور مستقیم یا غیر مستقیم جهت تولید توسط گیاهان (بدون در نظر گرفتن آب آبیاری) استفاده شود، اطلاق می‌شود. این بخش از بارش به پارامترهایی از قبیل بارش (مقدار، شدت، فراوانی و توزیع زمانی و مکانی)، تبخیر و تعرق، پستی و بلندی زمین، کاربری و پوشش زمین، خصوصیات خاک (عمق، بافت، ساختمان، رطوبت و ...)، عمق آب زیرزمینی، نوع محصول، مدیریت زراعی و سیستم زهکشی بستگی دارد (باس ۲ و همکاران، ۲۰۰۸).

مقدار بارش مؤثر را می‌توان توسط روش‌های مختلفی از قبیل برآورد تغییرات رطوبت خاک با استفاده از لیسیمترها و یا مدل‌های بیلان آبی محاسبه نمود (باس و همکاران، ۲۰۰۸؛ ابراهیم‌پور و همکاران، ۲۰۱۵).

اساس برآوردها در خصوص محاسبه بارش مؤثر، معادله بیلان آبی است. رابطه ۵ اجزای پایه در بیلان آبی در یک مزرعه را نشان می‌دهد (جنسن ۳، ۲۰۰۷):

$$W = ET + \Delta S + Q + DP \quad (5)$$

W = حجم آب ناخالص دریافتی مزرعه شامل بارش و آبیاری

ET = مقدار تبخیر و تعرق شامل تبخیر از خاک و منطقه گیرش (۱)

ΔS = تغییر در مقدار آب ذخیره شده در منطقه ریشه

Q = مقدار رواناب سطحی

DP = مقدار زهکشی عمودی در پایین منطقه ریشه

بارش مؤثر همچنین می‌تواند به‌عنوان بخشی از بارش که قادر است نیازهای مصرفی محصول را پوشش دهد، با استفاده از مقدار آب نفوذ کرده به خاک که از طریق نفوذ عمقی در پایین منطقه زهکشی از بین نمی‌رود؛ طبق رابطه ۶ بیان شود (پاتوادهان ۴ و همکاران، ۱۹۹۰):

1 - Byun & Wilhite

2 - Bos

3 - Jensen

4 - Patwardhan

$$P_e = P - (I + Q + DP) \quad (6)$$

Pe = بارش مؤثر

P = مقدار بارش

I = مقدار آب نفوذ کرده به خاک

Q = مقدار رواناب سطحی

DP = مقدار زهکشی عمودی در پایین منطقه ریشه

از طرف دیگر، بارش مؤثر می‌تواند مشتمل بر استفاده‌های غیرمصرفی آب که شامل کمک به حفظ شرایط مناسب خاک مانند آماده‌سازی و قوام، آبشویی و نمک‌شویی خاک می‌شود باشد. در رابطه ۷ بارش مؤثر یا در نظر گرفتن این موارد بیان شده است (داستانه ۱، ۱۹۷۸).

$$P_e = I + ET + R \quad (7)$$

Pe = مقدار بارش مؤثر

I = مقدار آب نفوذ کرده به خاک

ET = مقدار تبخیر و تعرق شامل تبخیر از خاک و منطقه گیرش

R = مقدار آب غیر مصرفی

با توجه به اینکه مقدار آب غیرمصرفی بستگی به ویژگی‌های منطقه و نیازهای محصول دارد، معمولاً از مقدار آن صرف نظر می‌شود. بنابراین درصد باقیمانده از کل بارش شامل مقدار هدرفت‌ها به صورت رواناب سطحی، برگاب، ذخیره چالابی، تبخیر مستقیم، نفوذ عمقی و رطوبت باقیمانده در خاک بعد از برداشت محصول می‌باشد.

متداول‌ترین روش‌های برآورد بارش مؤثر عبارتند از:

۱- روش FAO

این روش، یک روش تجربی ساده است که به وسیله فائو به منظور محاسبه بارش مؤثر در زمینه محصولات کشاورزی ارائه شده است. این روش می تواند در مناطقی با شیب حداکثر ۴ تا ۵ درصد بکار برده شود. روش مذکور بر اساس رابطه های ۸ و ۹ بارش مؤثر را برآورد می کند (بروور و هیبلوئم، ۱۹۸۶).

$$P_e = 0.6P - 10 \quad \text{for } P < 70 \text{ mm} \quad (8)$$

$$P_e = 0.8P - 25 \quad \text{for } P \geq 70 \text{ mm} \quad (9)$$

۲- روش USBR

این روش بر اساس مقادیر تجربی محاسبه شده برای طبقات بارش ماهانه (جدول ۲) استوار بوده و قابل کاربرد در مناطق خشک و نیمه خشک است (استام، ۱۹۶۷).

جدول ۲- مقادیر بارش مؤثر برای طبقات بارش ماهانه در روش USBR

بارش مؤثر (درصد)	مجموع بارش ماهانه (میلی متر)
۹۰-۱۰۰	۰-۲۵/۴
۸۵-۹۵	۲۵/۴-۵۰/۸
۷۵-۷۰	۵۰/۸-۷۶/۲
۵۰-۸۰	۷۶/۲-۱۰۱/۶
۳۰-۶۰	۱۰۱/۶-۱۲۷
۱۰-۴۰	۱۲۷-۱۵۲/۴
۰-۱۰	>۱۵۲/۴

1 - Brouwer & Heibloem

2 - Stamm

۳- روش USDA-SCS

این روش بر اساس تجزیه و تحلیل بلندمدت داده‌ها در دامنه وسیعی از شرایط اقلیمی و خاکی ایالات متحده توسط سرویس حفاظت آب و خاک این کشور توسعه داده شده است. در این روش بارش مؤثر بر اساس پارامترهای مجموع بارش (P)، تبخیر و تعرق از محصول (ETC)، فاکتور ذخیره آب در خاک (SF) بر حسب میلی‌متر به صورت رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شود (هس، ۱، ۲۰۱۰).

$$P_e = 25.4SF(0.04931P^{0.82416} - 0.11565)10^{0.000955ET_e} \quad (10)$$

$$SF = 0.531747 + 0.011621D - 8.943 \times 10^{-5} D^2 + 2.321 \times 10^{-7} D^3 \quad (11)$$

در رابطه بالا، D مقدار ذخیره آب قابل استفاده است که تقریباً برابر با ۴۰ تا ۶۰ درصد رطوبت خاک موجود در منطقه توسعه ریشه در نظر گرفته می‌شود.

با فرض ثابت در نظر گرفتن مقدار تبخیر و تعرق از محصول (ETC) و مقدار ۱ برای SF در حالت تقریبی ۷۵ میلی‌متر ذخیره آب قابل استفاده در خاک، رابطه ۶ می‌تواند به شکل ساده‌تری برای برآورد بارش مؤثر بیان شود. بر این اساس، تنها با در نظر گرفتن مقدار بارش و مقدار تبخیر و تعرق ۲۰۰ میلی‌متر، رابطه ۱۲ برای این روش قابل ارائه است:

$$P_e = 1.9443P^{0.82416} - 4.56 \quad (12)$$

۴- روش USDA- CROPWAT

در این روش بارش مؤثر بر پایه روش USDA-SCS توسط مدل CROPWAT با در نظر گرفتن مقادیر بارش ماهانه مطابق رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ محاسبه می‌شود (اسمیت، ۲، ۱۹۹۲).

$$P_e = P(125 - 0.2P)/125 \quad \text{for } P \leq 250 \text{ mm} \quad (13)$$

$$P_e = 0.1P - 125 \quad \text{for } P > 250 \text{ mm} \quad (14)$$

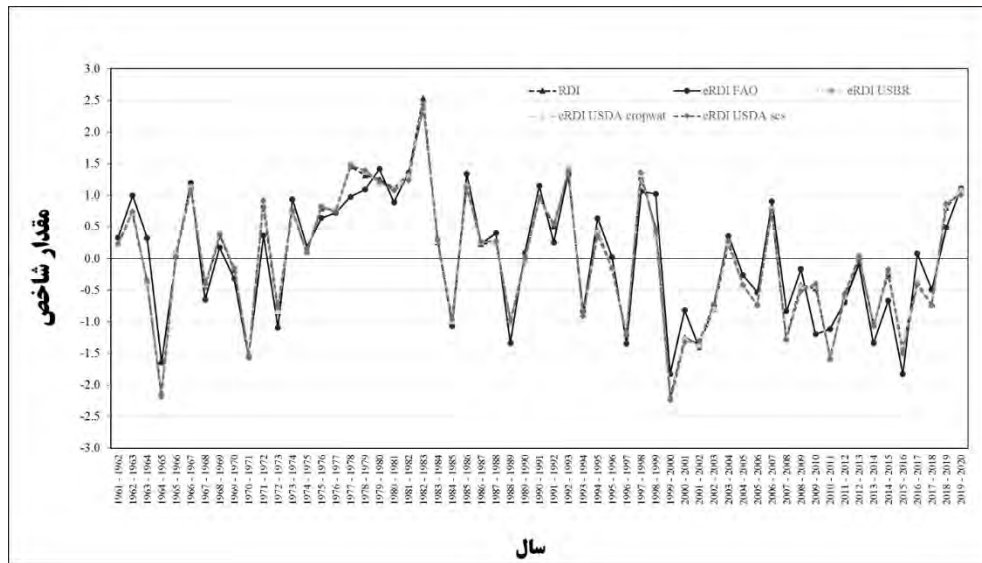
1 - Hess

2 - Smith

۳- نتایج و بحث

بررسی خشکسالی کشاورزی در مقیاس سالانه

نتایج ارزیابی شاخص‌های خشکسالی مربوط به دوره آماری منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشخص است اعداد بدست آمده از شاخص‌های RDI، eRDI USDA-CROPWAT، eRDI USDA-SCS، eRDI USBR، eRDI FAO، و eRDI بسیار به یکدیگر نزدیک بوده که نشان‌دهنده عدم اختلاف شاخص‌های مورد آزمون در تعیین شدت خشکسالی در منطقه مورد مطالعه است. این در حالی است که نتایج پژوهش دیگری نشان داد در اقلیم‌های مرطوب اختلاف معنی‌داری بین نتایج شاخص RDI با eRDI وجود نداشت، اما در اقلیم‌های خشک و بسیار خشک دو شاخص از لحاظ شناسایی خشکسالی اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نشان دادند (زارعی و همکاران، ۲۰۱۹). این اختلاف در نتایج دو پژوهش مشخص می‌کند که نتایج پایش خشکسالی در هر منطقه به میزان زیادی تحت تأثیر عوامل اقلیمی حاکم بر آن منطقه است (اقتدارنژاد و همکاران، ۱۳۹۵). نتایج حاصل از طبقه‌بندی مقادیر شاخص‌های RDI و eRDI سالانه نشان می‌دهد در سال آبی ۱۹۶۵-۱۹۶۴ و ۱۹۹۹-۲۰۰۰ خشکسالی بسیار شدید در منطقه وقوع یافته است. همچنین از سال آبی ۱۹۹۹ به غیر از دو سال ۲۰۰۶-۲۰۰۷ و ۲۰۰۳-۲۰۰۴ تا سال ۲۰۱۹ شرایط خشکسالی در منطقه حاکم بوده است (شکل ۲). بررسی توالی دوره‌های خشکسالی و ترسالی بر اساس هر یک از شاخص‌های مورد مطالعه در جدول ۳ آورده شده است. بر اساس این نتایج، طولانی‌ترین دوره ترسالی را تمامی شاخص‌ها و روش‌ها به مدت ۱۱ سال از ۱۹۷۴ تا ۱۹۸۴ نشان دادند. طولانی‌ترین دوره خشکسالی در منطقه را شاخص eRDI FAO به مدت ۹ سال نشان داد و سایر روش‌ها ۵ سال را نشان دادند. بررسی درصد فراوانی وقوع شرایط اقلیمی در مقیاس سالانه نشان داد بیشترین فراوانی وقوع مربوط به شرایط اقلیمی نرمال و بین ۳۳/۹ تا ۳۹ درصد است. بعد از آن شرایط خشکسالی ملایم با فراوانی وقوع ۲۲ تا ۳۰/۵ درصد بدست آمد. همچنین شرایط اقلیمی مرطوب متوسط ۱۵/۲ تا ۱۶/۹ درصد و شرایط اقلیمی خشکی متوسط دارای فراوانی وقوع ۸/۵ تا ۱۳/۶ درصد بودند (جدول ۴). در طی مطالعه‌ای که به منظور ارزیابی شاخص eRDI و مقایسه آن با شاخص RDI در تحلیل و پایش خشکسالی کشاورزی در منطقه لاریزا یونان برای دوره آماری ۱۹۵۵ تا ۲۰۰۲ انجام شد نیز گزارش گردید این شاخص‌ها توانایی و دقت بالایی در تشخیص دوره‌های خشکسالی و میزان شدت آن در منطقه مورد مطالعه داشته و شاخص eRDI با برقراری ارتباط بهتر شدت خشکسالی و افت عملکرد محصول زراعی معیار مناسب‌تری برای شاخصه-بندی خشکسالی کشاورزی و اثرات آن بر گیاهان است (تیکاس و همکاران، ۲۰۱۶).



شکل ۲- مقادیر شاخص های مورد بررسی در مقیاس زمانی سالانه طی دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۲۰

جدول ۳- توالی دوره های خشکسالی و ترسالی بر اساس شاخص های مورد مطالعه در مقیاس سالانه طی دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۲۰

شاخص	دوره ترسالی			دوره خشکسالی		
	دوره ها (سال)	تعداد توالی	مجموع	دوره ها (سال)	تعداد توالی	مجموع
RDI	-۱-۳-۳-۱۱-۱-۱-۱-۲	۱۳	۳۱	-۲-۱-۱-۱-۳	۱۲	۲۹
eRDI FAO	-۲-۱-۱-۱-۳	۱۵	۳۵	-۲-۱-۱-۱-۳	۱۲	۳۰
eRDI USBR	-۱-۳-۳-۱۱-۱-۱-۱-۲	۱۳	۳۱	-۲-۱-۱-۱-۳	۱۲	۲۹
eRDI USDA CROPWAT	-۱-۳-۳-۱۱-۱-۱-۱-۲	۱۳	۳۱	-۲-۱-۱-۱-۳	۱۲	۲۹
eRDI USDA SCS	-۱-۳-۳-۱۱-۱-۱-۱-۲	۱۳	۳۱	-۲-۱-۱-۱-۳	۱۲	۲۹

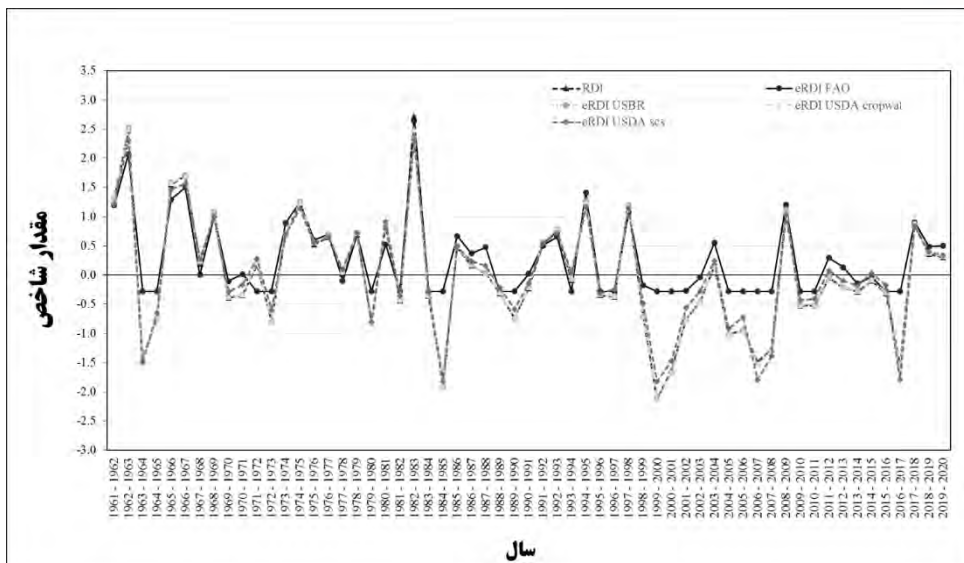
جدول ۴- درصد فراوانی وقوع شرایط اقلیمی مختلف بر اساس شاخص‌های مورد مطالعه در مقیاس سالانه طی دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۲۰

شاخص	بسیار مرطوب	خیلی مرطوب	مرطوب متوسط	نرمال	خشکی ملایم	خشکی متوسط	خیلی خشک	بسیار خشک
RDI	۱/۷	۰	۱۶/۹	۳۳/۹	۲۷/۱	۱۳/۶	۳/۴	۳/۴
eRDI FAO	۱/۷	۰	۱۶/۹	۳۹	۲۲	۱۳/۶	۶/۸	۰
eRDI USBR	۱/۷	۰	۱۶/۹	۳۳/۹	۲۸/۸	۱۱/۹	۳/۴	۳/۴
USDA CROPWAT	۱/۷	۱/۷	۱۵/۲	۳۳/۹	۳۰/۵	۱۰/۲	۳/۴	۳/۴
eRDI USDA SCS	۱/۷	۰	۱۶/۹	۳۵/۶	۲۸/۸	۸/۵	۵/۱	۳/۴

بررسی خشکسالی کشاورزی در مقیاس فصلی

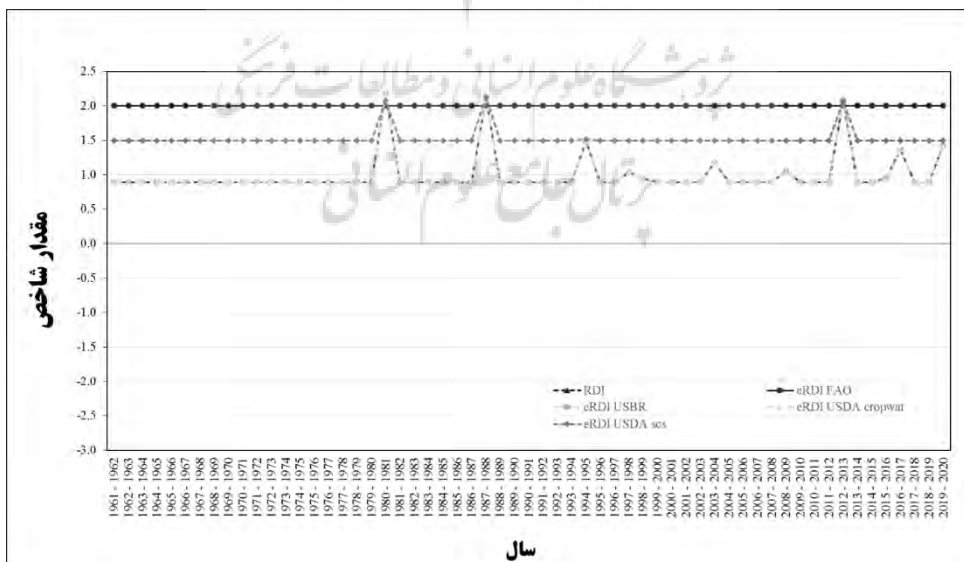
ارزیابی شاخص‌های این مطالعه در شناسایی خشکسالی مربوط به دوره‌های سه ماهه نشان‌دهنده دقت و حساسیت بیشتر شاخص‌ها در تشخیص خشکسالی و همچنین، اختلاف بیشتر آنها در برآورد شدت خشکسالی است. در طی بررسی دیگری نیز که در آفریقای جنوبی انجام شد به حساسیت و دقت شاخص RDI در تعیین خشکسالی‌های شدید اشاره شد که نگارندگان علت آن را همبستگی و ارتباط قوی آن با فصل رشد گیاه عنوان کردند (ابوبکر و همکاران، ۲۰۲۰). هرچند، مقیاس‌های فصلی با توجه به مراحل بحرانی نمودی محصولات زراعی و شرایط ویژه هر منطقه ممکن است متفاوت باشد (تیکاس و همکاران، ۲۰۱۷). در تحقیق حاضر، طولانی‌ترین توالی خشکسالی ثبت شده در فصل بهار به مدت ۸ سال و طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ توسط شاخص‌های RDI، eRDI USBR و eRDI USDA CROPWAT مشخص گردید. درحالی که طولانی‌ترین توالی ترسالی فصل بهار ۶ سال و طی سال‌های ۱۹۷۴ تا ۱۹۷۹ مشخص گردید (جدول ۵).

بر اساس نتایج این مطالعه، بیشترین فراوانی وقوع مربوط به شرایط اقلیمی خشکی ملایم و در فصل بهار بین ۳۷/۳ تا ۵۰/۸ درصد است (جدول ۶). در فصل بهار شاخص RDI و روش‌های USBR و USDA CROPWAT از روش eRDI خشکسالی بسیار شدید را در سال ۲۰۰۰ در منطقه نشان دادند. دلیل حصول چنین نتیجه‌ای را می‌توان به دو عامل توأم کمبود بارش و بالا بودن تبخیر و تعرق پتانسیل در این سال نسبت داد، همچنین، تمامی شاخص‌های مورد مطالعه در سال‌های ۱۹۶۳ و ۱۹۸۳ فصل بهار بسیار مرطوبی را نشان دادند (شکل ۳).



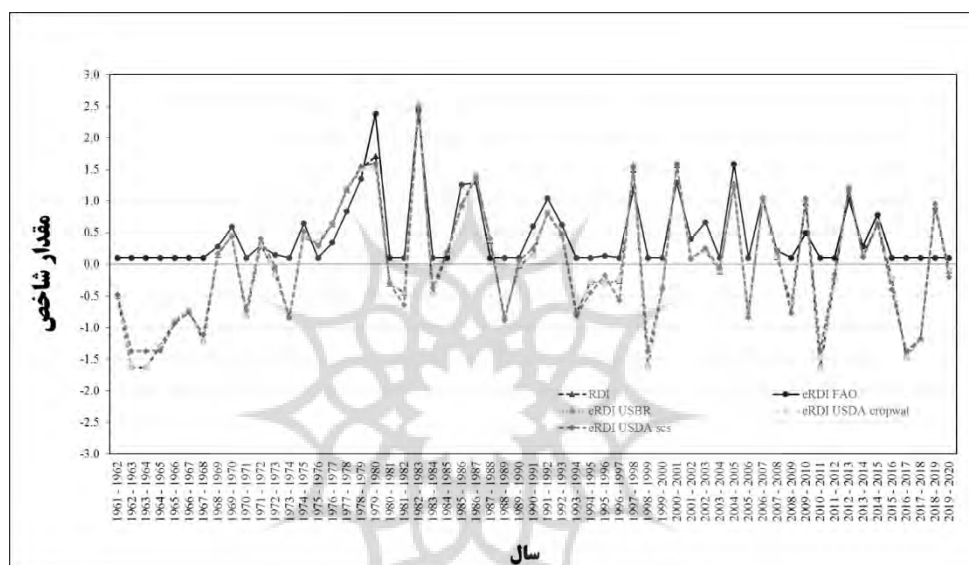
شکل ۳- مقادیر شاخص‌های مورد بررسی برای فصل بهار طی دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۲۰

با توجه به تغییرات بسیار کم بارش در فصل تابستان در منطقه و عدم بارش در بسیاری از سال‌ها در این فصل، تمامی شاخص‌های مورد مطالعه، مقادیر بالای صفر و شرایط ترسالی را نشان دادند (شکل ۴). با این وجود، شاخص‌های RDI، eRDI USBR و eRDI USDA CROPWAT شرایط منطقی‌تری از اقلیم منطقه را نشان دادند، به طوری که ۵۲ سال از دوره مطالعه را در فصل تابستان دارای شرایط اقلیمی نرمال نشان دادند. شاخص eRDI FAO هیچ‌گونه تغییری در نوسان اقلیمی برای فصل تابستان نشان نداد، اما شاخص‌های RDI، eRDI USBR و eRDI USDA CROPWAT بیشترین نوسان‌ها را در دوره زمانی مورد مطالعه نشان دادند که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر آنها به تغییرات جزئی بارش است.



شکل ۴- مقادیر شاخص‌های مورد بررسی برای فصل تابستان طی دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۲۰

بر اساس نتایج بدست آمده، در فصل پاییز تنها در سال ۱۹۸۲ شرایط بسیار مرطوب در منطقه دیده شده است. همچنین، شرایط اقلیمی خیلی خشک در فصل پاییز سال‌های ۱۹۶۲، ۱۹۶۳، ۱۹۹۸ و ۲۰۱۰ در منطقه مشخص گردید (شکل ۵). طولانی‌ترین دوره خشکسالی به مدت ۷ سال طی سال‌های ۱۹۶۱ تا ۱۹۶۷ در فصل پاییز قابل تشخیص است. طولانی‌ترین دوره ترسالی نیز در این فصل (۶ سال) و طی سال‌های ۱۹۷۴ تا ۱۹۷۹ به وقوع پیوسته است (جدول ۵). در این بین، تنها شاخص erDI FAO ۸۱/۳ درصد دوره زمانی مرود مطالعه را به صورت شرایط نرمال نشان می‌دهد. در حالی که سایر شاخص‌ها بیشترین فراوانی وقوع را شرایط اقلیمی خشکی ملایم و بین ۳۵/۶ ال ۳۷/۳ درصد نشان دادند (جدول ۶).



شکل ۵- مقادیر شاخص‌های مورد بررسی برای فصل پاییز طی دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۶۱

بررسی مقادیر شاخص‌های مورد مطالعه برای فصل زمستان نشان داد که در زمستان ۱۹۸۲ وضعیت بسیار مرطوب توسط شاخص‌های RDI، eRDI USBR، eRDI USDA CROPWAT و eRDI USDA SCS قابل مشاهده است. درحالی که وضعیت بسیار خشک تنها در سال ۲۰۰۱ توسط شاخص‌های RDI و eRDI USDA SCS قابل تشخیص است (شکل ۶). طولانی‌ترین توالی خشکسالی در فصل زمستان بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۶ و به مدت ۹ سال بوده است. طولانی‌ترین توالی ترسالی نیز به مدت ۷ سال طی سال‌های ۱۹۷۸ تا ۱۹۸۴ بوده است (جدول ۵). بیشترین شرایط اقلیمی به وقوع پیوسته مربوط به شرایط اقلیمی خشکی ملایم بین ۳۲/۲ تا ۳۷/۳ درصد فراوانی وقوع و بعد از آن شرایط اقلیمی نرمال با فراوانی وقوع ۲۷/۱ تا ۳۵/۶ درصد بوده است (جدول ۶). تیکاس و همکاران (۲۰۱۷) نیز بهترین دوره مرجع برای تحلیل خشکسالی کشاورزی توسط شاخص‌های RDI و eRDI را دوره سه ماهه (فوریه تا آوریل) دانسته و گزارش کردند دو شاخص مورد مطالعه دوره‌های خشک و مرطوب را با دقت بالایی تشخیص داده و تفاوت معنی‌داری در تشخیص شدت و مدت خشکسالی بین دو شاخص مذکور وجود نداشت. همچنین، مرطوب‌ترین دوره از نظر هر دو شاخص در سال ۸۲-۱۹۸۱ و خشک‌ترین دوره در سال ۷۴-۱۹۷۳ تشخیص داده شد.

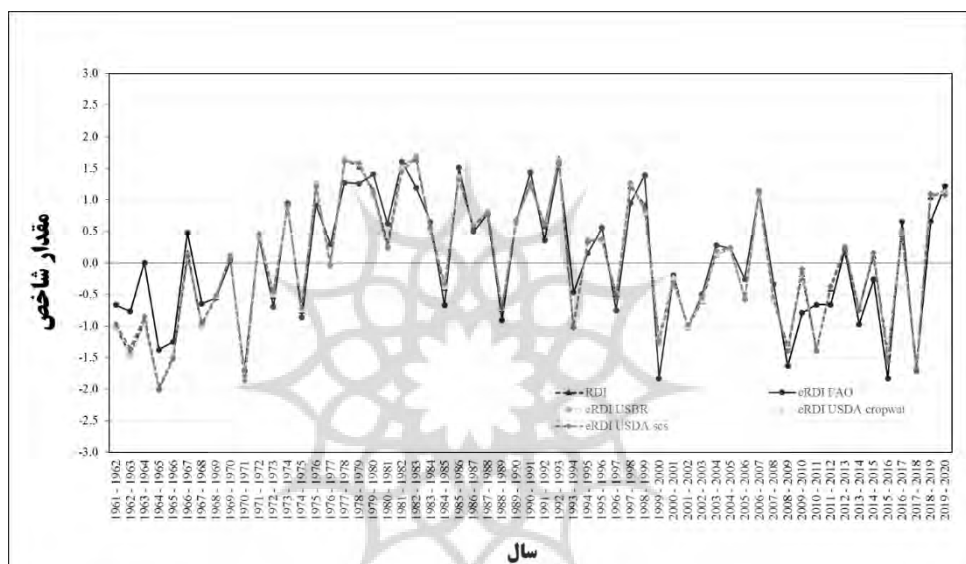
۳۲	۱۲	-۲-۱-۳-۲-۱-۱-۱-۲-۲	۲۷	۱۳	-۱-۱-۲-۳-۱-۱-۱-۶-۱-۴-۲	بهار	eRDI USDA CROPWAT
۰	۰	۸-۴-۵	۵۹	۱	۳-۱-۱	تابستان	
۲۹	۱۴	-۱-۲-۴-۱-۱-۲-۲-۱-۷	۳۰	۱۳	-۲-۱-۳-۱-۴-۴-۱-۶-۱-۲	پاییز	
۰	۰	۱-۳-۲-۱-۱	۰	۰	۱-۳-۱	۰	
۲۸	۱۳	-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۳-۲-۲	۲۸	۱۳	-۲-۲-۶-۱-۷-۱-۱-۱-۲-۱	زمستان	eRDI USDA SCS
۰	۰	۱-۹-۷-۱	۰	۰	۲-۱-۱	۰	
۳۲	۱۲	-۲-۱-۳-۲-۱-۱-۱-۲-۲	۲۷	۱۳	-۱-۱-۲-۳-۱-۱-۱-۶-۱-۴-۲	بهار	
۰	۰	۸-۴-۵	۵۹	۱	۳-۱-۱	تابستان	
۲۹	۱۴	-۱-۲-۴-۱-۱-۲-۲-۱-۷	۳۰	۱۳	-۲-۱-۳-۱-۴-۴-۱-۶-۱-۲	پاییز	eRDI USDA SCS
۰	۰	۱-۳-۲-۱-۱	۰	۰	۱-۳-۱	۰	
۲۹	۱۵	-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۲-۲	۳۰	۱۵	-۲-۶-۱-۷-۱-۱-۱-۱-۲-۱	زمستان	
۰	۰	۱-۹-۲-۴-۱-۱	۰	۰	۲-۱-۱-۱-۲	۰	
۲۹	۱۳	-۵-۲-۳-۲-۱-۱-۱-۲-۲	۳۰	۱۴	-۱-۱-۴-۳-۱-۱-۶-۱-۴-۲	بهار	eRDI USDA SCS
۰	۰	۲-۲-۲-۴	۵۹	۱	۳-۱-۱-۱	تابستان	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	

جدول ۶- درصد فراوانی وقوع شرایط اقلیمی مختلف بر اساس شاخص‌های مورد مطالعه در مقیاس فصلی طی دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۲۰

شاخص	فصل	بسیار مرطوب	خیلی مرطوب	مرطوب متوسط	نرمال	خشکی ملایم	خشکی متوسط	خیلی خشک	بسیار خشک
RDI	پاییز	۱/۷	۵/۱	۱۰/۲	۳۲/۲	۳۷/۳	۶/۸	۶/۸	۰
	زمستان	۱/۷	۶/۸	۶/۸	۳۲/۲	۳۵/۶	۱۳/۶	۳/۴	۰
	بهار	۳/۴	۳/۴	۱۰/۲	۲۸/۸	۴۰/۷	۵/۱	۶/۸	۱/۷
	تابستان	۵/۱	۰	۱۰/۲	۸۴/۷	۰	۰	۰	۰
eRDI FAO	پاییز	۳/۴	۱/۷	۱۳/۶	۸۱/۳	۰	۰	۰	۰
	زمستان	۰	۸/۵	۸/۵	۲۷/۱	۳۷/۳	۱۱/۹	۶/۸	۰
	بهار	۳/۴	۰	۱۳/۶	۳۲/۲	۵۰/۸	۰	۰	۰
	تابستان	۰	۱۰/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
eRDI USBR	پاییز	۱/۷	۶/۸	۱۰/۲	۳۰/۵	۳۷/۳	۶/۸	۶/۸	۰
	زمستان	۱/۷	۵/۱	۱۰/۲	۳۰/۵	۳۵/۶	۱۰/۲	۶/۸	۰
	بهار	۳/۴	۳/۴	۱۰/۲	۲۸/۸	۴۰/۷	۵/۱	۶/۸	۱/۷
	تابستان	۵/۱	۰	۱۰/۲	۸۴/۷	۰	۰	۰	۰
eRDI USDA CROPWAT	پاییز	۱/۷	۶/۸	۱۰/۲	۳۲/۲	۳۵/۶	۶/۸	۶/۸	۰
	زمستان	۱/۷	۵/۱	۱۰/۲	۳۰/۵	۳۳/۹	۱۱/۹	۶/۸	۰
	بهار	۳/۴	۳/۴	۱۰/۲	۲۸/۸	۴۰/۷	۵/۱	۶/۸	۱/۷
	تابستان	۵/۱	۱۰/۲	۰	۸۴/۷	۰	۰	۰	۰
eRDI USDA SCS	پاییز	۱/۷	۶/۸	۱۰/۲	۳۲/۲	۳۵/۶	۱۳/۶	۶/۸	۰
	زمستان	۱/۷	۵/۱	۸/۵	۳۵/۶	۳۲/۲	۱۱/۹	۳/۴	۱/۷
	بهار	۳/۴	۱/۷	۱۱/۹	۳۳/۹	۳۷/۳	۳/۴	۶/۸	۸/۵
	تابستان	۵/۱	۱۰/۲	۸۴/۷	۰	۰	۰	۰	۰

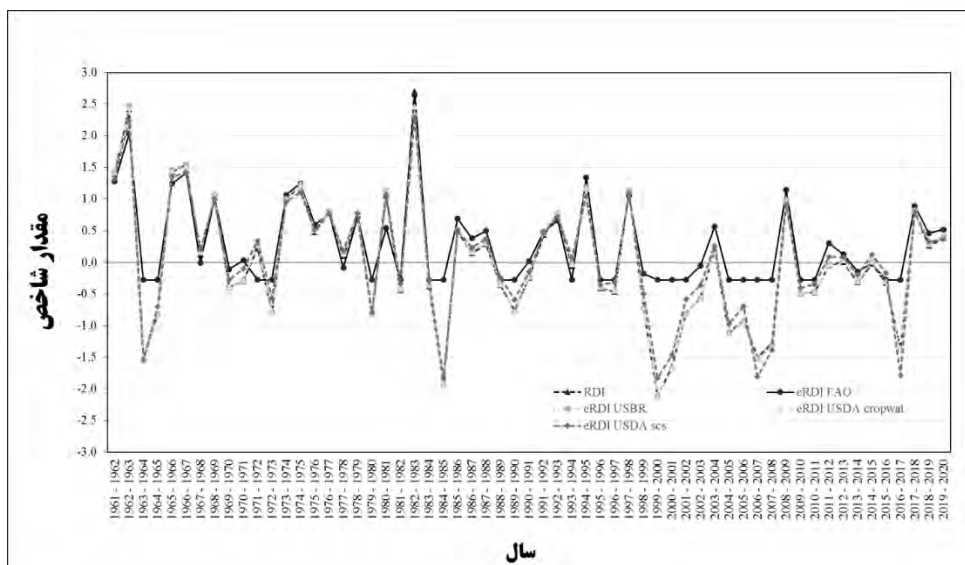
بررسی شرایط اقلیمی در دوره خواب و رشد گیاهی

بررسی شاخص‌های مورد مطالعه نشان داد در دوره خواب گیاهی، در سال ۱۹۸۳ وضعیت اقلیمی بسیار خشک بوده است. اما در طول دوره آماری مطالعه شده وضعیت اقلیمی بسیار مرطوب وجود نداشته است و تنها در سال‌های ۱۹۷۷، ۱۹۷۸، ۱۹۸۱، ۱۹۸۲ و ۱۹۹۲ شرایط اقلیمی خیلی مرطوب بوده است (شکل ۷). در دوره خواب گیاهی، طولانی‌ترین دوره خشکسالی ۵ سال و در سال‌های ۱۹۶۱ تا ۱۹۶۵ و ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ و طولانی‌ترین دوره ترسالی بین سال‌های ۱۹۷۷ تا ۱۹۸۳ برای مدت ۷ سال رخ داده است (جدول ۷). بیشترین درصد فراوانی وقوع در دوره خواب گیاهی مربوط به شرایط اقلیمی نرمال و بین ۳۰/۵ تا ۳۵/۶ درصد بوده است. (جدول ۸).



شکل ۷- مقادیر شاخص‌های مورد بررسی برای دوره خواب گیاهی طی دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۲۰

بررسی شاخص‌های مورد مطالعه نشان داد در دوره رشد گیاهی، در سال‌های ۱۹۶۳ و ۱۹۸۳ وضعیت اقلیمی بسیار مرطوب بوده است. اما در سال ۲۰۰۱ شرایط اقلیمی بر اساس دو شاخص RDI و eRDI USBR بسیار خشک بوده است (شکل ۸). طولانی‌ترین دوره خشکسالی ۵ سال طی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳ و طولانی‌ترین دوره ترسالی ۶ سال طی سال‌های ۱۹۷۴ تا ۱۹۷۹ بوده است (جدول ۷). در دوره رشد گیاهی بیشترین فراوانی وقوع مربوط به شرایط خشکی ملایم با فراوانی وقوع ۳۵/۶ تا ۵۲/۵ درصد بوده است (جدول ۸). با توجه به اینکه در طی فصل رشد میزان پوشش گیاهی و سطح سبز تعرق‌کننده افزایش می‌یابد، این موضوع موجب افزایش میزان تبخیر و تعرق پتانسیل شده و کمبود بارش و بخصوص بارش مؤثر می‌تواند شدت خشکسالی را به میزان زیادی تحت تأثیر خود قرار دهد (سرابی و همکاران، ۱۳۹۴).



شکل ۸- مقادیر شاخص‌های مورد بررسی برای دوره رشد گیاهی طی دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۲۰

جدول ۷- توالی دوره‌های خشکسالی و ترسالی بر اساس شاخص‌های مورد مطالعه بر اساس دوره‌های خواب و رشد گیاهی طی دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۲۰

شاخص	دوره گیاهی	دوره ترسالی		دوره خشکسالی	
		تعداد توالی	دوره ها (سال)	تعداد توالی	دوره ها (سال)
RDI	خواب	۱۶	-۱-۱-۲-۲-۲-۴-۳-۷-۱-۱-۱-۱-۱	۱۶	-۴-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۲-۵
	رشد	۱۶	۱-۱	۳۱	۱-۱-۱-۵-۱
eRDI FAO	خواب	۱۵	-۱-۱-۲-۲-۲-۴-۳-۹-۱-۱-۱-۱-۱	۳۲	-۴-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۲-۲-۲
	رشد	۱۷	۳-۱-۲-۱	۲۹	۲-۱-۲-۴-۵
eRDI USBR	خواب	۱۶	-۱-۱-۲-۲-۲-۴-۳-۷-۱-۱-۱-۱-۱	۳۱	-۴-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۲-۵
	رشد	۱۶	۳-۱-۱	۳۰	۱-۱-۳
eRDI USDA CROPWAT	خواب	۱۶	-۱-۱-۲-۲-۲-۴-۳-۷-۱-۱-۱-۱-۱	۳۱	-۴-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۲-۵
	رشد	۱۶	۳-۱-۱	۳۰	۱-۱-۳
eRDI USDA SCS	خواب	۱۵	-۲-۱-۱-۱-۱-۱-۳-۱-۱-۱-۱-۱-۱-۱	۳۲	-۲-۴-۵-۲-۳-۲-۱-۱-۱-۲-۲
	رشد	۱۵	۳-۱	۳۲	۱-۱

جدول ۸- درصد فراوانی وقوع شرایط اقلیمی مختلف بر اساس شاخص‌های مورد مطالعه بر اساس دوره‌های خواب و رشد گیاهی طی دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۲۰

شاخص	دوره گیاهی	بسیار مرطوب	خیلی مرطوب	مرطوب متوسط	نرمال	خشکی ملایم	خشکی متوسط	خیلی خشک	بسیار خشک
RDI	خواب	۰	۸/۵	۱۳/۶	۳۰/۵	۲۵/۴	۱۶/۹	۵/۱	۰
	رشد	۳/۴	۱/۷	۱۱/۹	۳۰/۵	۳۹	۵/۱	۶/۸	۱/۷
eRDI FAO	خواب	۰	۵/۱	۱۳/۶	۳۵/۶	۳۲/۲	۵/۱	۸/۵	۰
	رشد	۳/۴	۰	۱۵/۲	۲۸/۸	۵۲/۵	۰	۰	۰
eRDI USBR	خواب	۰	۸/۵	۱۳/۶	۳۰/۵	۲۵/۴	۱۶/۹	۳/۴	۱/۷
	رشد	۳/۴	۱/۷	۱۱/۹	۳۲/۲	۳۷/۳	۵/۱	۶/۸	۱/۷
eRDI USDA CROPWAT	خواب	۰	۸/۵	۱۳/۶	۳۰/۵	۲۳/۷	۱۸/۶	۳/۴	۱/۷
	رشد	۳/۴	۱/۷	۱۱/۹	۳۲/۲	۳۷/۳	۵/۱	۶/۸	۱/۷
eRDI USDA SCS	خواب	۰	۶/۸	۱۵/۲	۳۰/۵	۳۰/۵	۸/۵	۸/۵	۰
	رشد	۳/۴	۰	۱۱/۹	۳۷/۳	۳۵/۶	۳/۴	۸/۵	۰

نتایج بررسی تفاوت شاخص‌ها و روش‌های مورد مطالعه از نظر آماری، تنها تفاوت شاخص eRDI FAO را برای فصل پاییز در سطح ۵ درصد ($P\text{-value}=0.030$) با سایر روش‌های مورد مطالعه نشان داد. همچنین، همبستگی مجموع بارش هر مقیاس زمانی با مقادیر هر یک از شاخص‌ها و روش‌های مورد مطالعه در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. بر اساس معادله خطی هر یک از شاخص‌ها و بارش برای مقیاس زمانی مطالعه شده، مرز بین شرایط خشکسالی و ترسالی محاسبه گردید و مقادیر متوسط بلندمدت آن در دوره زمانی مطالعه شده مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۹). بررسی نتایج نشان داد با وجود در نظر گرفتن بارش مؤثر در شاخص eRDI بجز روش FAO، مرز مقدار بارش برای شرایط خشکسالی و ترسالی با شاخص RDI مشابه و تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. همچنین، با مقدار متوسط بارش بلند مدت (۲۰۲۰-۱۹۶۱) در هر مقیاس زمانی در نظر گرفته شده تفاوت معنی‌داری وجود نداشت.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

جدول ۹- ضریب همبستگی و مرز بارش محاسبه شده برای شرایط ترسالی و خشکسالی بر اساس هر یک شاخص‌های مورد مطالعه طی دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۶۱

شاخص	سالانه		پاییز		زمستان		بهار		تابستان		دوره خواب		دوره رشد	
	R2	mm	R2	m m	R2	m m	R2	m m	R2	m m	R2	mm	R2	m m
RDI	۱۴۲	۹۰۸	۲/۳	۸۹۷	۷/۲	۸۳۴	۳/۱	۸۹۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰
eRDI FAO	۱۴/۵	۸۶۷	۷/۴	۸۵۳	۷۷	۸۹۲	۲/۵	۹۲۰	-	۰	۰	۰	۰	۰
eRDI USBR	۱۴/۳	۹۰۰	۲/۳	۸۶۷	۷/۴	۸۲۲	۳۵	۸۷۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰
eRDI USDA CROPW AT	۱۴/۴	۹۰۱	۲/۳	۸۶۵	۷/۲	۸۱۸	۳۵	۸۷۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰
eRDI USDA SCS	۱۴/۶	۹۰۳	۲/۹	۸۸۴	۷/۳	۸۲۲	۳/۹	۸۵۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰
متوسط دوره آماري	۱۴۱/۷		۲۸/۱		۷۸/۱		۳۵		۰/۵		۱۰۶/۲		۳۵/۵	

نتایج این تحقیق به خوبی قابلیت استفاده از شاخص‌های RDI و eRDI را برای پایش خشکسالی بویژه در بخش کشاورزی نشان داد. در نظر گرفتن مقیاس فصلی برای پایش خشکسالی می‌تواند هم‌خوانی بیشتر با پوشش گیاهی و تاثیرات آن داشته باشد. بر اساس نتایج سلیمانی مطلق و همکاران (۲۰۲۰)، مقیاس زمانی فصلی یا سه ماهه را برای پایش و پیش‌بینی سریع خشکسالی کشاورزی را با توجه به امکان مطابقت با دوره‌های رشد کوتاه مدت و فصلی گیاهان دارد، را پیشنهاد نمودند. آنها برای این منظور پایش خشکسالی در فصل بهار را برای نمایش بهتر شدت خشکسالی کشاورزی نشان دادند.

بررسی نتایج این تحقیق نشان داد روش FAO برای محاسبه بارش مؤثر در شاخص eRDI شرایط اقلیمی را به سمت شرایط مرطوب تر تعدیل می‌سازد بویژه در فصل پاییز کامل مشخص و معنی دار بود. لذا برای مناطق خشک مشابه منطقه مورد مطالعه بکارگیری این روش محاسبه بارش مؤثر پیشنهاد نمی‌شود.

مهم‌ترین ویژگی شاخص eRDI جایگزینی بارش مؤثر به جای بارش در شاخص RDI می‌باشد. نتایج این تحقیق همانند برخی از نتایج تحقیقات قبلی که توانایی شاخص RDI را در ارزیابی اثرات خشکسالی بر عملکرد محصولات دیم تأیید نموده‌اند، نشان داد تفاوت معنی‌داری بین نتایج این دو شاخص در منطقه مورد مطالعه که نمونه‌ای از مناطق خشک می‌باشد، وجود ندارد. نتایج زارعی و همکاران (۲۰۱۹) نیز تفاوت معنی‌داری را بین این دو شاخص برای مناطق مختلف نشان نداد و تنها در مناطق بسیار خشک این اختلاف معنی‌دار شد. بررسی همبستگی مقادیر RDI و انواع روش‌های eRDI در تمامی مقیاس‌های زمانی مطالعه شده در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود که مشابه نتایج مطالعه زارعی و همکاران (۲۰۱۹) نیز همین همبستگی بالا را نشان داده بود. با این وجود، شاخص eRDI به دلیل استفاده از بارش مؤثر می‌تواند نمایش دقیق‌تری از مقدار آب استفاده شده برای محصولات زراعی را ارائه نماید که می‌تواند منجر به فهم بیشتر از تشخیص خشکسالی کشاورزی شود (ساکریس و همکاران،

۲۰۱۰؛ تیکاس و ساکریس، ۲۰۱۵؛ تیکاس و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین، در طی مطالعه‌ای که در زمینه مقایسه شاخص‌های RDI و eRDI در ارزیابی شدت خشکسالی در مناطق مختلف اقلیمی ایران انجام شد نیز محققان به این نتیجه رسیدند که در اقلیم‌های مرطوب اختلاف معنی‌داری در نتایج دو شاخص مشاهده نشد و همبستگی بالایی بین دو شاخص وجود داشت، در حالی که در اقلیم‌های خشک و بسیار خشک اختلاف بین دو شاخص از نظر آماری معنی‌دار بود. نگارندگان بر اساس این نتایج پیشنهاد کردند که در اقلیم‌های خشک و بسیار خشک شاخص eRDI کارکرد بهتری داشته و می‌تواند جایگزین شاخص RDI شود (زارعی و همکاران، ۲۰۱۹).

تیان^۱ و همکاران (۲۰۱۸) و سلیمانی مطلق و همکاران (۲۰۲۰) نیز بیان کرده‌اند شاخص‌هایی مانند RDI که علاوه بر بارش، تبخیر و تعرق را در نظر می‌گیرند در ارزیابی خشکسالی‌های کشاورزی می‌توانند از جامعیت بیش‌تری برخوردار باشند. مطالعات زیادی نیز نشان داده‌اند که RDI برای نمایش ویژگی‌های خشکی در شرایط تغییر اقلیم مناسب است (زارچ و همکاران، ۲۰۱۵؛ شکوهی و مروتی، ۲۰۱۵؛ الفرجی و همکاران، ۲۰۱۴؛ تیکاس و همکاران، ۲۰۱۵).

نتیجه‌گیری

با توجه به بکارگیری پارامتر بارش مؤثر در آنالیز و تشخیص خشکسالی توسط شاخص eRDI که از این طریق آبی که به‌طور مؤثری قابل استفاده برای محصولات کشاورزی است را در محاسبات خود دخالت می‌دهد، بنابراین، ارتباط قوی‌تری بین شدت خشکسالی و کاهش رشد و عملکرد گیاهان را به نمایش می‌گذارد. به‌همین دلیل در پژوهش حاضر به مقایسه دو شاخص RDI و نسخه بهبود یافته آن (eRDI) در شناسایی و تحلیل خشکسالی کشاورزی در یک منطقه گرم و خشک پرداخته شد. محاسبات انجام شده توسط شاخص‌های شناسایی خشکسالی نشان‌دهنده یک دوره خشکسالی ۹ ساله و یک دوره ترسالی ۱۱ ساله در طول دوره آماری مورد مطالعه است. هرچند مشابهت و تناسب بالایی در ارزیابی شدت خشکسالی در بین شاخص‌های مورد بررسی مشاهده شد، اما در مجموع شاخص eRDI حساسیت و دقت بیشتری در تشخیص خشکسالی نشان داد و شدت خشکسالی را در اکثر سال‌های مورد بررسی نسبت به شاخص RDI به میزان بالاتری نشان داد. این اختلاف بین شاخص RDI و شاخص eRDI بر اساس انواع روش‌های محاسبه بارش مؤثر در برآورد شدت خشکسالی در بازه‌های زمانی فصلی (سه ماهه) محسوس‌تر بود. توالی دوره‌های خشکسالی و همچنین ترسالی برآورد شده توسط انواع شاخص‌های شناسایی خشکسالی در مقیاس دوره رشد گیاهی نسبت به دوره خواب گیاه بیشتر بود. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد اختلاف معنی‌داری بین نتایج ارزیابی شدت و توالی دوره‌های خشکسالی بین شاخص RDI و شاخص eRDI وجود نداشت و بنابراین، می‌توان از شاخص RDI با اطمینان بالایی برای آنالیز خشکسالی در منطقه مورد مطالعه و یا سایر مناطق اقلیمی مشابه با محل این پژوهش بهره برد.

- Al-Faraj, F.A., Scholz, M., & Tigkas, D. (2014). Sensitivity of surface runoff to drought and climate change: application for shared river basins. *Water*, 6(10), 3033–3048.
- Blum, A. (2005). Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential-are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Australian Journal of Agricultural Research*, 56, 1159-1168.
- Bos, M.G., Kselik, R.A., Allen, R.G., & Molden, D. (2008). *Water requirements for irrigation and the environment*. Springer Publications. Netherlands, 174 p.
- Brouwer, C., & Heibloem, M. (1986), *Irrigation water management: irrigation water needs*. Training manual, No. 3. FAO. Rome.
- Byun, H.R., & Wilhite, D.A. (1999). Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12(9), 2747-2756.
- Dastane, N.G. (1978). *Effective rainfall in irrigated agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 25. Rome. Italy.
- Dilley, M., Chen, R.S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A.L. Arnold, M., Agew, J., Buys, P., Kjevstad, O., Lyon, B., & Yetman, G. (2005). *Natural disaster hotspots: a global risk analysis*. World Bank Publications, Washington, DC. World Bank.
- Döll, P., Fiedler, K., & Zhang, J. (2009). Global-scale analysis of river flow alterations due to water withdrawals and reservoirs. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 2413-2432.
- Ebrahimpour, M., Rahimi, J., Nikkhah, A., & Bazrafshan, J. (2015). Monitoring agricultural drought using the standardized effective precipitation index. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(1), 04014044-1-9. [In Persian]
- Eghtedar Nezhad, M., Bazrafshan, O., & Sadeghi Lari, A. (2017). Adaptive evaluation of SPI, RDI and SDI indices in analyzing the meteorological and hydrological drought characteristics (case study: Bam plain). *Water and Soil Science*, 26(4.2), 69-81. [In Persian]
- Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., & Thomas, S.M. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327, 812-818.
- Hao, Z., & AghaKouchak, A. (2013). Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model. *Advances in Water Resources*, 57, 12-18.
- Hess, T. (2010). Estimating green water footprints in a temperate environment. *Water*, 2(3), 351-362.

- Howden, S.M., Soussana, J.F., Tubiello, N.T., Chhetri, N., Dunlop, M., & Meinke, H. (2007). Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(50), 19691-19696.
- IPCC. (2013). Summary for policy makers in climate change 2013: the Physical Science Basis Contribution of Working Group 1 to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom and New York. NY. USA. 582 p.
- IPCC. (2014). Climate change 2014, synthesis report. 5th Assessment [Pachauri, R.K., Meyer, L., (eds.)]. Geneva. Switzerland. 151 p.
- Jensen, M.E., (2007), Beyond irrigation efficiency. *Irrigation Science*, 25(3), 233-245.
- Khalili, D., Farnoud, T., Jamshidi, H., Kamgar-Haghighi, A., & Zand-Parsa, S. (2011). Comparability analyses of the SPI and RDI meteorological drought indices in different climatic zones. *Water Resources Management*, 25, 1737-1757.
- Khedun, C.P., Chowdhary, H., Mishra, A.K., Giardino, J.R., & Singh, V.P. (2012). Water deficit duration and severity analysis based on runoff derived from Noah Land Surface Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(7), 817-833.
- Kogan F., (2018), Remote sensing for food security. Springer Publications. Switzerland. 255 p.
- Mahdavi, M. (2009). *Applied Hydrology*. Vol. 2, 6th Edition, University of Tehran Press, Tehran.
- Merabti, A., Meddi, M., Martins, D.S., & Pereira, L.S. (2017). Comparing SPI and RDI applied at local scale as influenced by climate. *Water Resources Management*, 32, 1071-1085.
- Meza, I., Hagenlocher, M., Naumann, G., Vogt, J., & Frischen, J. (2019). Drought vulnerability indicators for global-scale drought risk assessments, EUR 29824 EN, Publications Office of the European Union. Luxembourg.
- Mishra, A.K., & Singh, V.P. (2006). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 202-216.
- Nassiri, M., Koocheki, A., Kamali, G.A., & Shahandeh, H. (2006). Potential impact of climate change on rainfed wheat production in Iran. *Achieves of Agronomy and Soil Sciences*, 52, 113-124.
- Patwardhan, A.S., Nieber, J.L., & Johns, E.L. (1990). Effective rainfall estimation methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116(2), 182-193.
- Sarabi, S., Heshmatpour, A., Komaki, B., & Tahmasebi, A. (2015). Relationship between MODIS vegetation indices and drought in northern rangelands of Golestan province. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 22(2), 392-405. [In Persian]
- Shokoohi, A. (2011). Comparison of SPI and RDI in drought analysis in local scale with emphasizing on agricultural drought (Case study: Qazvin and Takestan). *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 3(4), 111-122. [In Persian]

- Shokoohi A., & Morovati, R. (2015). Basinwide comparison of RDI and SPI within an IWRM framework. *Water Resources Management*, 29(6):2011–2026.
- Sivakumar, M.V.K., Motha, R.P., Wilhite, D.A., & Wood, D.A. (2011). Agricultural drought indices. *Proceedings of the WMO/UNISDR Expert Group Meeting on Agricultural Drought Indices, 2-4 June 2010, Murcia. Spain. Geneva. Switzerland: World Meteorological Organization. 197 p.*
- Smith, M. (1992). CROPWAT-a computer program for irrigation planning and management. *FAO Irrigation and Drainage Paper 46. Rome. Italy.*
- Soleimani motlagh, M., Soleimani sardo, M., & Davoodi, E. (2020). An early warning system for agricultural drought and groundwater storage depletion using eRDI index. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 11(41):240-255. [In Persian]
- Stamm, G.G. (1967). Problems and procedures in determining water supply requirements for irrigation projects. In R. Hagan et al. (Eds) *Irrigation of agricultural lands, American Society of Agronomy, Madison, WI., pp. 71–784.*
- Tallaksen, L.M., & Van Lanen, H.A.J. (2004). Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater. *Developments in water science*, 48, Elsevier. Amsterdam.
- Thomas, T., Jaiswal, R.K., Galkate, R.V., & Nayak, T.R. (2016). Reconnaissance drought index based evaluation of meteorological drought characteristics in Bundelkhand. *Procedia Technology*, 24, 23-30.
- Tian, Y., Y-P. Xu & Wang, G. (2018). Agricultural drought prediction using climate indices based on Support Vector Regression in Xiangjiang River basin. *Science of the Total Environment*, 622/623: 710–720.
- Tigkas, D. (2008). Drought characterisation and monitoring in regions of Greece, *European Water*, 23/24, 29-39.
- Tigkas, D., & Tsakiris, G. (2015). Early estimation of drought impacts on rainfed wheat yield in Mediterranean climate. *Environmental Processes*, 2(1), 97-114.
- Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2016). Introducing a modified Reconnaissance Drought Index (RDIE) incorporating effective precipitation. *Procedia Engineering*, 162, 332-339.
- Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2017). An enhanced effective reconnaissance drought index for the characterisation of agricultural drought. *Environmental Processes*, 4, 137-148.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B.L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108 (50), 20260-20264.
- Tsakiris, G., Nalbantis, I., Pangalou, D., Tigkas, D., & Vangelis, H. (2008). Drought meteorological monitoring network design for the reconnaissance drought index (RDI). *Proceedings of the 1st International Conference “Drought Management: scientific and technological innovations”, 12-14 June, Zaragoza. Spain, 57-62.*

- Tsakiris, G., Loukas, A., Pangalou, D., Vangelis, H., Tigkas, D., Rossi, G., & Cancelliere, A. (2007a). Drought characterization. In: Iglesias, A., Moneo, M., López-Francos A., (eds.), Drought Management Guidelines Technical Annex, Options Méditerranéennes, Series B, No. 58, Zaragoza. Spain, 85-102.
- Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2007b). Regional drought assessment based on the reconnaissance drought index (RDI). *Water Resources Management*, 21(5), 821-833.
- Tsakiris, G., & Vangelis, H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9/10, 3-11.
- Tsakiris G., Vangelis, H., & Tigkas, D. (2010). Drought impacts on yield potential in rainfed agriculture. Proceedings of the Second International Conference on Drought Management “Economics of Drought and Drought Preparedness in a Climate Change Context”, 4-6 March 2010, Istanbul. Turkey.
- UNDRR. (2019). Global assessment report on disaster risk reduction. Geneva. Switzerland.
- Vangelis, H., Tigkas, D., & Tsakiris, G. (2013). The effect of PET method on Reconnaissance Drought Index (RDI) calculation. *Journal of Arid Environments*, 88, 130-140.
- Vörösmarty, C.J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R.B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289, 284-288.
- Wada, Y., Van Beek, L.P.H., Wanders, N., & Bierkens, M.F.P. (2013). Human water consumption intensifies hydrological drought worldwide. *Environmental Research Letters*, 8, 1-14.
- Wilhite, D.A. (2000). Drought as a natural hazard: concepts and definitions. Routledge. London. UK.
- Wilhite, D.A., & Buchanan-Smith, M. (2005). Drought as hazard: understanding the natural and social context. In: Wilhite, D.A., (eds.). Drought and water crises: science, technology and management issues. CRC Press, Boca Raton.
- Wilhite, D.A., Hayes, M.J., & Svodoba, M.D. (2000). Drought monitoring and assessment in the U.S. In: Voght, J.V., Somma, F., (eds.). Drought and drought mitigation in Europe. Kluwers, Dordrecht.
- 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, 3485-3504.
- Zarch, M.A.A., Sivakumar, B., & Sharma, A. (2015). Droughts in a warming climate: a global assessment of standardized precipitation index (SPI) and reconnaissance drought index (RDI). *Journal of Hydrology*, 526: 183–195
- Zarei, A.R., Moghimi, M.M., & Bahrami, M. (2019). Comparison of reconnaissance drought index (RDI) and effective reconnaissance drought index (eRDI) to evaluate drought severity. *Sustainable Water Resources Management*, 5, 1345-1356.