



Adaptive evaluation and comparison of SMDI, SPI and RDI drought indices in Zarghan region, Fars province

Seyed Amir Shamsnia

Assistant Professor, Department of Water Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran,
Email: amir.shamsnia@iau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2023-9-21
Accepted: 2023-11-2

Keywords:
Drought
Soil Moisture Deficit Index
Standardized Precipitation Index
Reconnaissance Drought Index

ABSTRACT

Introduction: Soil moisture is one of the most important factors that are affected by drought. Soil Moisture Deficit Index (SMDI) is one of the most important indicators that monitors drought based on soil moisture. But due to lack of direct measurement of soil moisture in weather stations and lack of information, it has been used to a limited extent.

Methodology: In this research, the meteorological data of Zarghan synoptic station was used during the statistical period of 30 years (1992 to 2022) and with the help of ET0 and AquaCrop models, the amount of soil moisture was estimated at the depths of 5, 15, 45 and 95 cm. Then the percentage of soil moisture deficiency and SMDI index were calculated to monitor drought. Also, the results of this index were compared and analyzed with two common indices SPI and RDI which are based on precipitation and evapotranspiration data.

Discussion: The highest value of this index occurred in 1996 after a period of heavy rain in 1994 and 1995, and the lowest value occurred in 2011 after the dry years of 2008 to 2010. Considering that the highest and lowest amount of rainfall is in 2004 and 2021, SPI and RDI drought indices have shown the most severe drought in the mentioned years. Severe droughts occurred in 2010, 2011, 2016 and 2021, and all three indicators had similar results. In examining the relationship between meteorological parameters and indices, the results showed that the SMDI index has the lowest coefficient of explanation with evapotranspiration (0.25), RDI index (0.4) and then SPI and precipitation index (0.45). Also, the results showed that there is a strong correlation between SPI and RDI. Regarding moderate and very severe droughts, where the amount of precipitation is greatly reduced and evapotranspiration increases, the RDI index is more accurate and shows the severity of the drought with higher accuracy, and its sensitivity to weather conditions is higher than the SPI index.

Conclusion: Therefore, in arid and semi-arid regions where the severity of drought reaches the severe and very severe threshold, it is recommended to use indicators that take into account other factors in addition to precipitation.

Cite this article Shamsnia, S.A. (2023). Adaptive evaluation and comparison of SMDI, SPI and RDI drought indices in Zarghan region, Fars province. *Journal of the Climate Change Research*, 4 (15), 73-90.





نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال چهارم / شماره مسلسل پانزدهم / پاییز ۱۴۰۲ / صفحات: ۷۳-۹۰

ارزیابی و مقایسه تطبیقی شاخص‌های خشکسالی SMDI، SPI و RDI در منطقه زرقان، استان فارس

سید امیر شمس‌نیا

استادیار گروه مهندسی آب، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، رایانامه: amir.shamsnia@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۶/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۱۱</p> <p>واژه‌های کلیدی: خشکسالی شاخص کمبود رطوبت خاک شاخص استاندارد شده بارش شاخص شناسایی خشکسالی</p>	<p>رطوبت خاک از اصلی‌ترین عواملی است که تحت‌تاثیر خشکسالی قرار می‌گیرد. شاخص کمبود رطوبت خاک (SMDI) یکی از مهمترین شاخص‌هایی است که براساس رطوبت خاک، خشکسالی را پیش می‌نماید. اما به دلیل عدم اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک در ایستگاه‌های هواشناسی و نبود اطلاعات، به‌طور محدودی استفاده شده است. در پژوهش حاضر از داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک زرقان در طول دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲) استفاده و به کمک دو مدل ET0 و AquaCrop مقدار رطوبت خاک در عمق‌های ۵، ۱۵، ۴۵ و ۹۵ سانتیمتر تخمین زده شد. سپس درصد کمبود رطوبت خاک و شاخص SMDI محاسبه گردید. همچنین نتایج این شاخص، با دو شاخص متداول SPI و RDI که مبتنی بر داده‌های بارش و تبخیرتعرق پتانسیل است، مقایسه و تحلیل گردید. بیشترین مقدار این شاخص پس از یک دوره پر باران سالهای ۱۹۹۴ و ۱۹۹۵ در سال ۱۹۹۶ است و کمترین مقدار نیز پس از سالهای خشک ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ در سال ۲۰۱۱ رخ داده است. با توجه به اینکه بیشترین و کمترین مقدار بارندگی در ۲۰۰۴ و ۲۰۲۱ است، شاخص‌های خشکسالی SPI و RDI، شدیدترین ترسالی و خشکسالی را در سالهای مذکور نشان داده‌اند. در سال ۲۰۱۰، ۲۰۱۱، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ خشکسالی‌های شدیدی رخ داده که هر سه شاخص در این مورد نتایج مشابهی داشته‌اند. در بررسی روابط بین پارامترهای هواشناسی و شاخص‌ها، نتایج نشان داد شاخص SMDI کمترین ضریب تبیین را با تبخیرتعرق (۰/۲۵)، شاخص RDI (۰/۴) و پس از آن با شاخص SPI و بارش (۰/۴۵) دارد. همچنین نتایج نشان داد همبستگی و ارتباط قوی بین دو شاخص SPI و RDI وجود دارد. درخصوص خشکسالی‌های حادی و خیلی شدید که میزان بارش کاهش زیادی داشته و تبخیرتعرق نیز افزایش می‌یابد، شاخص RDI مناسبتر بوده و شدت خشکسالی را با دقت بالاتری نشان می‌دهد و حساسیت آن نسبت به شرایط آب و هوایی بیشتر از شاخص SPI است. لذا توصیه می‌گردد در مناطق خشک و نیمه خشک که شدت خشکسالی به آستانه شدید و خیلی شدید نیز می‌رسد، از شاخص‌هایی استفاده گردد که علاوه بر بارش، عوامل دیگر را در نظر بگیرد.</p>
<p>استناد: شمس‌نیا، سیدامیر. (۱۴۰۲). ارزیابی و مقایسه تطبیقی شاخص‌های خشکسالی SMDI، SPI و RDI در منطقه زرقان، استان فارس. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۴ (۱۵)، ۷۳-۹۰.</p>	
<p>ناشر: دانشگاه گلستان © نویسنده‌گان</p>	<p>Doi: 10.30488/CCR.2023.417456.1163</p>



مقدمه

خشکسالی یکی از بلایای طبیعی با شروعی آرام و ماهیتی خزنده است که در یک دوره زمانی نسبتاً طولانی، اقلیم، منابع آبی، کشاورزی و محیط زیست را تحت تاثیر قرار می‌دهد (نوبی و همکاران، ۱۴۰۰: ۲). با تغییر در پارامترهای هواشناسی نظیر کاهش بارش، افزایش دما، بادهای شدید، کاهش رطوبت نسبی، افزایش ساعات آفتابی و غیره، خشکسالی هواشناسی آغاز می‌شود. سپس با افزایش تبخیر تعرق و کم شدن رطوبت خاک و وقوع تنش‌های گیاهی، خشکسالی کشاورزی به وقوع می‌پیوندد. کاهش عملکرد ناشی از خشکسالی کشاورزی، امنیت غذایی و توسعه پایدار اقتصادی و اجتماعی را به‌طور جدی تحت تاثیر می‌دهد (Zhang et al., 2023). با توجه به خصوصیات پیچیده پدیده‌ی خشکسالی، فهم و توسعه‌ی ابزارهایی به منظور ارزیابی کمی و کیفی آن، به مدیریت این پدیده جهت کاهش اثرات و شدت خسارات آن در سطوح مختلف جامعه کمک فراوانی خواهد نمود. لذا پیش این پدیده همواره به عنوان یک ابزار مدیریتی حائز اهمیت است و به کمک شاخص‌ها می‌توان شدت خشکسالی را مورد ارزیابی قرار داد (Guttman 1999؛ شمس نیا و خدادادی، ۱۳۹۹: ۴۴۵). شاخص‌های خشکسالی تعداد زیادی از داده‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی شامل بارندگی، تبخیر تعرق، سطح آب مخازن سطحی و زیرزمینی، رطوبت خاک و ... را در نظر گرفته و پس از ترکیب این داده‌ها، نتیجه را به صورت تصویر قابل درکی از شرایط موجود و معمولاً به صورت یک عدد بیان می‌کنند که این عدد به منظور استفاده در فرآیند تصمیم‌سازی، مؤثرتر و کاراتر از داده‌های خام خواهد بود (سهرابی و همکاران، ۱۳۸۷). عمده شاخص‌ها براساس داده‌های هواشناسی به‌خصوص بارندگی، وضعیت خشکسالی را پیش‌نموده و رطوبت خاک را در ارزیابی در نظر نمی‌گیرند. شاید بتوان گفت علت عدم استفاده از رطوبت خاک در بیشتر شاخص‌ها، عدم اندازه‌گیری مستقیم آنها در ایستگاه‌های هواشناسی است. از مهمترین شاخص‌های خشکسالی که رطوبت خاک را به عنوان پارامتر ورودی

در نظر می‌گیرد، می‌توان به شاخص پالمِر (PDSI¹) و شاخص رطوبت خاک (SMDI²) اشاره نمود. شاخص SMDI درمقایسه با شاخص پالمِر به پارامتر کمتری نیاز دارد و بر مبنای مجموع رطوبت خاک روزانه برای یک سال، شدت خشکسالی را تعیین می‌نماید (رضائی اعتدالی و همکاران، ۱۳۹۱: ۸۵). برای تعیین رطوبت خاک طی یک دوره آماری و ارزیابی خشکسالی کشاورزی، می‌توان از مدل‌های مبتنی بر روابط آب و خاک استفاده نمود. این مدل‌ها می‌توانند حرکت آب در خاک، رشد محصول، تخمین ماده خشک و عملکرد محصول، تخمین رطوبت خاک در بافت‌های مختلف و عمق‌های مختلف توسعه ریشه، برنامه ریزی آبیاری و ... را با در نظر گرفتن داده‌های هواشناسی و اقلیمی شبیه‌سازی نمایند. کاربرد دیگر مدل‌های مبتنی بر روابط آب و خاک استفاده از آنها به عنوان ابزار تصمیم‌گیری برای مدیریت سیستم است (Steduto et al., 2009).

تلاش‌های زیادی از طرف فائو برای رسیدن به یک مدل جدید که از دقت، سادگی و توانایی زیادی برخوردار باشد، صورت گرفت و این تلاش باعث بوجود آمدن مدل AquaCrop که یک مدل مهندسی است، شد. مدل AquaCrop به نسبت مدل‌های شبیه‌ساز دیگر، پارامترها و داده‌های ورودی کمتری برای شبیه‌سازی احتیاج دارد. عملکرد مناسب آن در پژوهش‌های مختلف به اثبات رسیده است و با در نظر گرفتن داده‌های هواشناسی و خاک می‌تواند رطوبت خاک را طی یک دوره آماری در مقیاس‌های مختلف زمانی تخمین بزند (عابدین پور و همکاران، ۱۳۹۹؛ سعیدی و همکاران، ۱۴۰۰). لذا با استفاده از این مدل می‌توان رطوبت خاک را طی یک دوره آماری به صورت روزانه، ماهانه یا سالانه شبیه‌سازی و براساس نتایج آن شاخص SMDI را برآورد نمود. در پژوهشی در ایستگاه سینوپتیک قزوین رطوبت خاک با استفاده از مدل AquaCrop شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد تغییرات ماهیانه رطوبت خاک در عمق پنج

¹ Palmer Drought Severity Index

² Soil Moisture Deficit Index

شاخص شناسایی خشکسالی (RDI^4) جهت ارزیابی و پایش خشکسالی ارائه شده است (Tsakiris and Vangelis, 2005; Tsakiris et al., 2007). پارامترهای مؤثر در محاسبه آن، بارندگی و تبخیر-تعرق پتانسیل است. از آنجائی که بارندگی به‌تنهایی قادر به نشان دادن اثرات خشکسالی بر تولید محصول و عملکرد نمی‌باشد، کاربرد هم‌زمان و توأم بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل در ارزیابی شدت خشکسالی باعث اعتباربخشی به نتایج و افزایش دقت پایش می‌گردد (Vangelis et al., 2013)؛ شمس‌نیا و خدادادی، (۱۳۹۹). در پژوهشی دو شاخص SMDI و SPEI در خصوص عملکرد گندم زمستانه مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج نشان داد میزان همبستگی این دو شاخص ۰/۶۴ تا ۰/۹۷ هست که با زیاد شدن مقیاس زمانی افزایش می‌یابد (Chen et al., 2020). در پژوهشی از دو شاخص SPI و RDI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه در ۴۰ ایستگاه سینوپتیک استفاده گردید. نتایج نشان داد که همبستگی این دو شاخص در مقیاس‌های ۳، ۶ و ۹ ماهه بیشتر از مقیاس‌های ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه است. از آنجائیکه شاخص RDI براساس بارش و تبخیر-تعرق می‌باشد و تبخیر-تعرق نقش مهمی در تلفات آب دارد، می‌تواند در نظارت بر خشکسالی در ایران مفید و ارزشمند باشد (Asadi Zarch, 2011). در پژوهشی پنج شاخص خشکسالی جهت پایش خشکسالی در ایالت سنارا برزیل، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد شاخص SPI نسبت به سایر شاخص‌ها برتری دارد و می‌تواند به‌طور قابل توجهی دوره‌های خشکسالی را نشان دهد و تعداد بیشتری از رویدادها را ثبت کند. بنابراین، SPI بالاترین امتیاز را دریافت نمود و شاخص‌های EDI، SWSI، SDI و RDI در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. در این زمینه مشخص شد که شاخص‌های SPI و SWSI مناسب‌ترین شاخص‌ها برای پایش خشکسالی در منطقه هستند و می‌توان استفاده از آنها را برای مدیریت خشکسالی‌های

سانیمتری بسیار شدید است و با افزایش عمق، تغییرات رطوبت خاک کمتر می‌شود. سپس با استفاده شاخص SMDI ارزیابی خشکسالی کشاورزی صورت گرفته است (رمضانی اعتدالی و همکاران، ۱۳۹۱). در پژوهشی دیگر از مدل AquaCrop جهت شبیه‌سازی تبخیر-تعرق، رطوبت خاک و عملکرد محصول استفاده شد و نتایج نشان داد مدل AquaCrop را می‌توان به‌عنوان یک ابزار بالقوه مفید برای برنامه‌ریزی آبیاری در مناطق خشک و نیمه خشک مورد استفاده قرار داد (Toumi et al., 2016). در پژوهشی با استفاده از داده‌های رطوبت خاک استخراج شده از نرم‌افزار SWAP، خشکسالی با استفاده از شاخص SMDI برآورد گردید (صالحی طیب و همکاران، ۱۳۹۸). در پژوهشی دیگر از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رطوبت خاک در عمق‌های مختلف در ایالت تگزاس استفاده شده است (Narasimhan and Srinivasan, 2005) و با استفاده از شاخص رطوبتی خاک وضعیت خشکسالی کشاورزی بررسی گردید.

از اقدامات مهم دیگر در ارزیابی دقیق‌تر خشکسالی، مقایسه تطبیقی شاخص‌ها است که توسط پژوهشگران مختلف توصیه شده است (Richard and Heim, 2002; Hayes, 2004; Tsakiris and Vangelis, 2005). در بین شاخص‌های متنوع پایش خشکسالی، شاخص SPI^3 کاربرد بیشتری داشته و مورد تأیید محققان زیادی قرار گرفته است (Shamsnia and Pirmoradian, 2009; Zhang et al., 2023). ویژگی شاخص SPI این امکان را به تحلیلگر می‌دهد تا پدیده خشکسالی و ترسالی را در مقیاس زمانی معین و برای هر نقطه‌ای از دنیا تعیین نماید (تبوزاده و همکاران، ۱۳۹۴). اما کاربرد داده‌های متغیر بارش به‌تنهایی، اساسی‌ترین ایراد این شاخص در پایش خشکسالی می‌باشد (Liu et al., 2018) و از سایرمتغیرهای مؤثر بر خشکسالی مانند دما، تبخیر-تعرق، سرعت باد و ذخیره رطوبتی خاک استفاده نمی‌شود. به همین دلیل یک شاخص دیگر به نام

⁴ Reconnaissance Drought Index

³ Standardized Precipitation Index

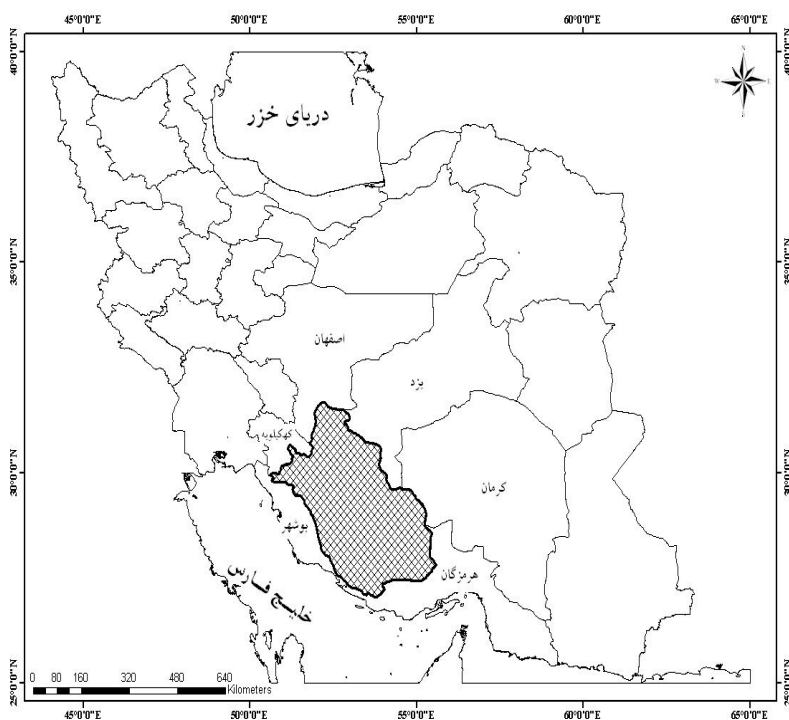
این پژوهش را می‌توان شبیه سازی رطوبت خاک با استفاده از مدل AquaCrop، استفاده از نتایج آن در محاسبه شاخص SMDI و در نهایت مقایسه آن با شاخص SPI و شاخص RDI بیان نمود.

محدوده جغرافیایی پژوهش

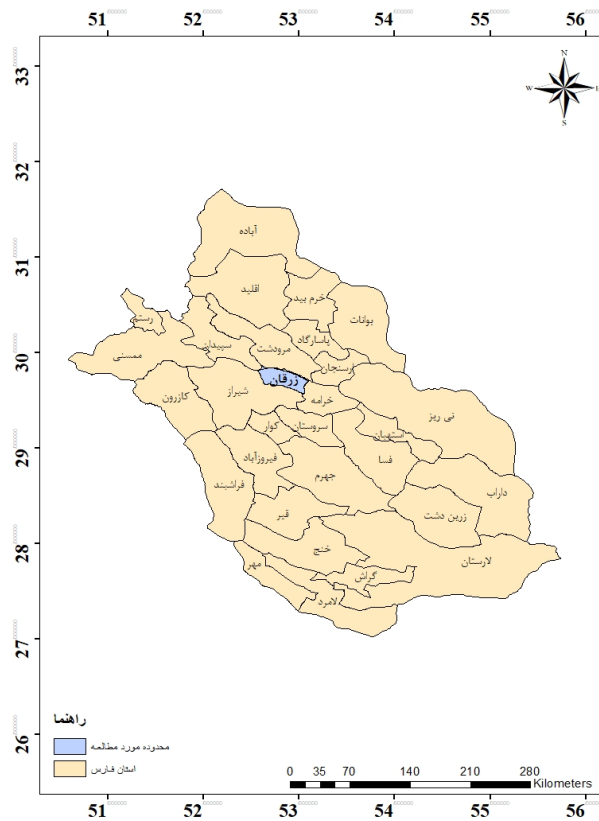
منطقه مورد مطالعه شهرستان زرکان در بخش مرکزی استان فارس می‌باشد که در طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۳ درجه و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۰ درجه قرار دارد. این منطقه به دلیل آنکه در سالهای اخیر مناطق مرکزی استان فارس به علت کمبود بارش و درجه حرارت بالا تحت تأثیر خشکسالی قرار گرفته (حجازی چهارمی و همکاران، ۱۳۹۲)، انتخاب گردید. موقعیت جغرافیایی استان فارس و محدود مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است.

هیدرولوژیکی به منظور بهبود برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب توصیه نمود (Gonçalves et al., 2023).

براساس جمع بندی پژوهش‌های پیشین مشخص می‌گردد ارزیابی رطوبت خاک جهت پایش خشکسالی کشاورزی اهمیت ویژه ای دارد و رطوبت خاک و تغییرات زمانی و مکانی آن که از مهمترین متغیرهای محیطی است، به دلیل اندازه گیری‌های دشوار و پرهزینه و وقت گیر میدانی به طور گسترده در ارزیابی خشکسالی استفاده نشده است. لذا هدف از پژوهش حاضر، تعیین مقادیر رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه طی یک دوره آماری است که براساس آن شاخص SMDI برآورد و ارزیابی خشکسالی کشاورزی انجام می‌شود. جهت مطالعه تطبیقی نتایج حاصل با نتایج شاخص‌های متداول و پرکاربرد که به دلیل سادگی و نیاز به داده‌های کمتر، بیشتر استفاده می‌گردد، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. لذا هدف اصلی

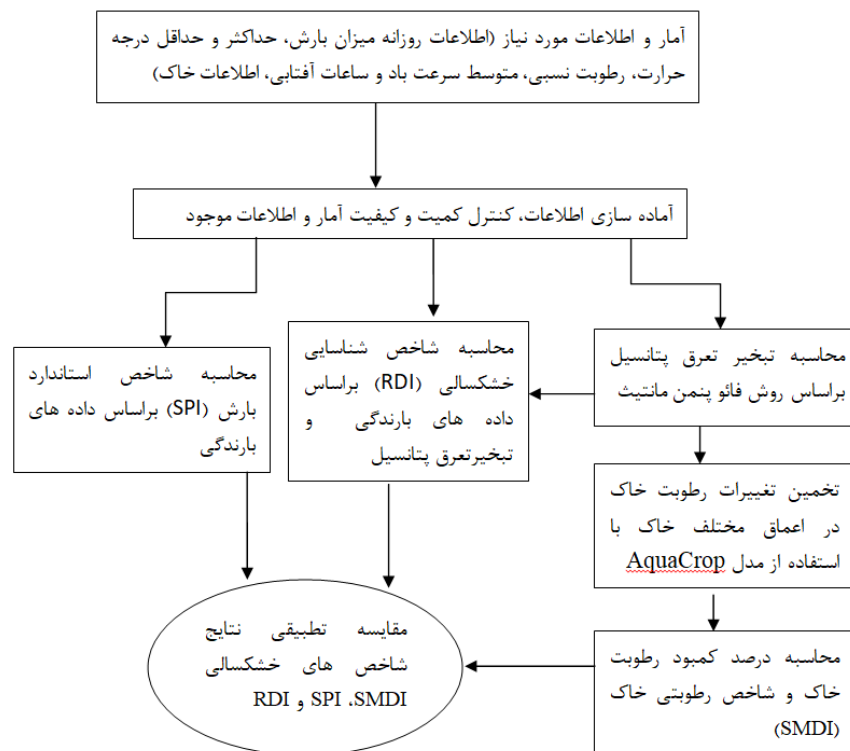


(الف)



(ب)

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان فارس (الف) و محدوده مورد مطالعه (ب)



شکل ۲- فلوجارت روش پژوهش

روش پژوهش

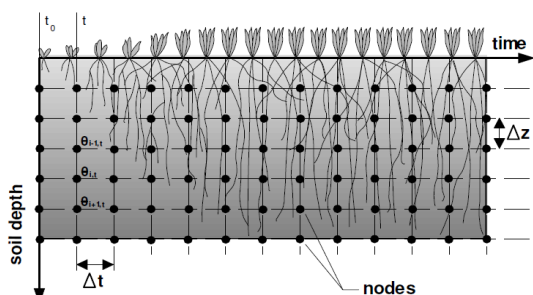
در این پژوهش از داده‌های اندازه‌گیری شده هواشناسی شامل اطلاعات روزانه میزان بارش، حداکثر و حداقل درجه حرارت، رطوبت نسبی، متوسط سرعت باد و ساعات آفتابی ایستگاه مرجع کشاورزی زرقان، در طول دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲) استفاده گردید. جهت دستیابی به اطلاعات خاک منطقه مورد مطالعه از نقشه بافت و پژوهش‌هایی که در منطقه مذکور انجام شده است، استفاده گردید. پژوهش‌های نیاز و همکاران (۱۳۸۴) و صلح جو و محمدی (۱۳۸۶) که در محدوده مطالعات مورد نظر انجام شده و بررسی نقشه‌های بافت خاک نشان داد که خاک منطقه از نوع رسی سیلتی می‌باشد. مراحل انجام این تحقیق در قالب یک فلوجارت (شکل ۲) نشان داده شده است. محاسبه تبخیر تعرق پتانسیل: به منظور بهره‌گیری از آمار اشاره شده، ابتدا داده‌ها به لحاظ صحت و همگنی از طریق روش آماری ران تست، مورد بررسی قرار گرفت. یکی از شرایط زیربنایی جهت تعمیم نتایج نمونه به جامعه اصل «تصادفی بودن داده‌ها» است. تصادفی بودن داده‌ها با آزمون Run-Test انجام می‌شود. با استفاده از این آزمون مشخص می‌شود تا چه حد دنباله‌ای از اعداد به صورت تصادفی گردآوری شده‌اند. با اطمینان از همگنی و تصادفی بودن داده‌های هواشناسی وارد مدل ET0 گردید و براساس معادله فائو پنمن مانیتث، تبخیر تعرق پتانسیل در مقیاس روزانه طی دوره آماری ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ محاسبه گردید.

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma[900(T + 273)]U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

PET : تبخیر و تعرق پتانسیل بر حسب میلی متر بر روز، Δ : شیب منحنی فشار بخار اشباع-دما بر حسب کیلوپاسکال بر درجه سانتیگراد، R_n : تشعشع خالص دریافتی در سطح گیاه بر حسب مگاژول بر مترمربع در روز، G : شار گرمایی خاک بر حسب مگاژول بر مترمربع در روز، γ : ثابت سایکرومتری بر حسب کیلوپاسکال بر درجه سانتیگراد، T : میانگین روزانه

دمای هوادر ارتفاع ۲ متری از سطح زمین بر حسب درجه سانتیگراد، U_2 : میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین بر حسب متر بر ثانیه، e_s : فشار بخار اشباع بر حسب کیلوپاسکال، e_a : فشار بخار واقعی بر حسب کیلوپاسکال، $e_s - e_a$: کمبود فشار بخار اشباع بر حسب کیلوپاسکال.

تخمین تغییرات رطوبت خاک در اعماق مختلف خاک: پس از محاسبه تبخیر تعرق پتانسیل، اطلاعات لازم شامل مقدار تبخیر تعرق پتانسیل، بافت خاک، عمق پروفیل خاک و دوره شبیه سازی وارد مدل AquaCrop گردید. همچنین فرض شد که سطح خاک بدون پوشش گیاهی می‌باشد. برای توصیف دقیق نگهداشت، حرکت و جذب آب در کل پروفیل خاک در طول دوره‌ی رشد، مدل AquaCrop هم پروفیل خاک و هم زمان را به قسمت‌های کوچکتری تقسیم می‌کند (شکل ۳). خطوط شبکه بوسیله متغیرهای مستقل عمق خاک (z) و زمان (t) تقسیم‌بندی می‌شوند. معادله جریان و جذب آب توسط ریشه گیاه برای هر گره در عمق‌های مختلف z_i و زمان t_j به طوریکه متغیر وابسته $\theta_{i,t}$ باشد، برای هر گره از شبکه و برای هر گام زمانی قابل حل است.



شکل ۳- شبکه زمان (t) - عمق (z) برای حل معادله بیلان

آب خاک در مدل AquaCrop

[Raes et al., 2010]

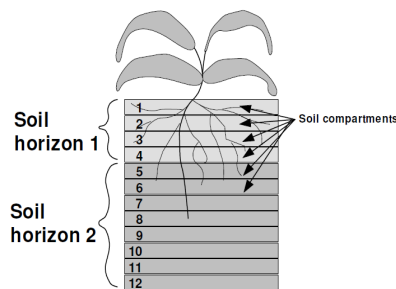
پروفیل خاک به قسمت‌های مختلف (با پیش فرض ۱۲ قسمت) با ضخامت‌های Δz تقسیم می‌شود (شکل ۴). تنظیمات برنامه به کاربر اجازه می‌دهد که تعداد و اندازه تقسیم‌بندی‌های خاک را تنظیم کند.

SD از ۱۰۰ تا ۱۰۰- متغیر است. در ۱۰۰ خاک مرطوبترین و در ۱۰۰- خاک خشکترین وضعیت را دارا است. در نهایت شاخص SMDI از طریق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$SMDI_i = 0.5SMDI_{i-1} + \frac{SD_i}{50} \quad (4)$$

این شاخص از ۴ تا ۴- یعنی از مرطوب تا خشک متغیر است. در این شاخص گام زمانی قبل در شرایط کنونی خشکسالی لحاظ می‌شود. سپس شاخص‌های مناسب و متداولی مانند شاخص استاندارد شده بارش و شاخص شناسایی خشکسالی که در بیشتر پژوهش‌ها مورد تأیید قرار گرفته‌اند، نیز در طی همان دوره آماری محاسبه و نتایج شاخص‌ها مورد ارزیابی تطبیقی قرار گرفت.

شاخص استاندارد شده بارش (SPI): شاخص استاندارد شده بارش در منطقه کلرادو برای ارزیابی خشکسالی معرفی و از سال ۱۹۹۴ به عنوان یک ابزار کاربردی در ارزیابی خشکسالی مورد استفاده قرار گرفت (Mckee et al., 1993). این شاخص یک ابزار قوی در آنالیز داده‌های بارندگی می‌باشد که هدف آن اختصاص ارزش عددی به بارندگی می‌باشد که بوسیله آن بتوان نواحی با آب و هوای کاملاً متفاوت را با هم مقایسه نمود. محاسبه این شاخص نیاز به آمار طولانی مدت دارد. آمارها به یک توزیع آماری برآزش داده می‌شود و سپس این توزیع به توزیع نرمال تبدیل می‌شود. خشکسالی وقتی رخ می‌دهد که SPI از ۱- کمتر و ترسالی وقتی است که SPI از ۱+ بیشتر شود. جهت طبقه‌بندی خشکسالی و ترسالی از طبقه‌بندی اصلاح شده‌ای استفاده گردید که با شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه تطابق بیشتری دارد و خشکسالی‌ها و ترسالی‌های حدی و وضعیت نرمال را بهتر لحاظ می‌نماید (Shamsnia and Pirmoradian, 2009). درجه خشکسالی و ارزش شاخص استاندارد شده بارش در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل ۴- لایه‌ها و تقسیم‌بندی‌های خاک

[Raes et al., 2010]

به این ترتیب و با کمک مدل AquaCrop مقادیر رطوبت خاک شبیه‌سازی گردید. پس از اجرای مدل، به منظور تخمین تغییرات رطوبت خاک در اعماق مختلف، درصد حجمی رطوبت خاک در عمق‌های ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵، ۵۵، ۶۵، ۷۵، ۸۵ و ۹۵ سانتیمتری محاسبه گردید.

محاسبه درصد کمبود رطوبت خاک و شاخص رطوبتی خاک (SMDI): سپس با استفاده از شاخص SMDI، ارزیابی خشکسالی کشاورزی انجام گرفت. این شاخص بر مبنای مجموع رطوبت خاک به طور روزانه برای یک سال استوار است و تنها فاکتور اقلیمی مورد استفاده در این شاخص، رطوبت خاک می‌باشد (Narasimhan and Srinivasan, 2005; رضانی اعتدالی و همکاران، ۱۳۹۱).

$$SD_i = \frac{SW_i - MSW_i}{MSW_i - \min SW_i} \times 100$$

$$If \rightarrow SW_i \leq MSW_i \quad (2)$$

$$If \rightarrow SW_i > MSW_i$$

$$SD_i = \frac{SW_i - MSW_i}{MaxSW_i - MSW_i} \times 100 \quad (3)$$

ا: سال مورد نظر، SW: مجموع رطوبت روزانه خاک در طی سال مورد نظر، MSW: مقدار میانه مجموع رطوبت روزانه در طی دوره آماری، MinSW: مقدار حداقل مجموع رطوبت روزانه خاک در طی دوره آماری، MaxSW: مقدار حداکثر مجموع رطوبت روزانه در طی دوره آماری و SD کمبود رطوبت خاک است.

جدول ۱- طبقه‌بندی اصلاح شده شاخص استاندارد شده بارش (Shamsnia and Pirmoradian, 2009)

وضعیت	ارزش SPI
مرطوب حاد	+۲
خیلی مرطوب (مرطوب شدید)	۱/۹۹ تا ۱/۵
مرطوب متوسط	۱ تا ۱/۴۹
مرطوب ملایم	۰/۵ تا ۰/۹۹
تقریباً نرمال	-۰/۴۹ تا ۰/۴۹
خشکسالی ملایم	-۰/۹۹ تا -۰/۵
خشکسالی متوسط	-۱ تا -۱/۴۹
خیلی خشک (خشکسالی شدید)	-۱/۹۹ تا -۱/۵
خشکسالی حاد	-۲

$$RDI_{st(k)}^{(i)} = \frac{y_k^{(i)} - \bar{y}_k}{\hat{\sigma}_{yk}} \quad (7)$$

درجه خشکسالی و ارزش شناسایی خشکسالی مشابه شاخص استاندارد شده بارش می‌باشد.

نتایج

بررسی تغییرات پارامترهای هواشناسی بارش و تبخیر تعرق پتانسیل: پس از آماده سازی داده‌ها، با استفاده از مدل ET0، تبخیر تعرق پتانسیل براساس روش فائو پنمن مانیتیت محاسبه گردید. سپس فایل‌های ورودی شامل تبخیر تعرق پتانسیل، خصوصیات خاک و دوره شبیه سازی به مدل AquaCrop داده شد و پس از اجرای مدل، رطوبت خاک در لایه‌های مختلف محاسبه گردید. ارتفاع بارندگی و تبخیر تعرق طی سالهای آماری مورد مطالعه در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده است طی دوره آماری ۳۰ ساله مورد مطالعه، روند بارش با کاهش و روند تبخیر تعرق با افزایش همراه بوده است. به طوری که از سال ۲۰۰۵ به بعد در بیشتر سال‌ها بارندگی کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر (متوسط بارندگی منطقه) می‌باشد. در خصوص تبخیر تعرق نیز متوسط تبخیر تعرق سالانه ۱۹۵۰ میلی‌متر در سال می‌باشد که در سال‌های اخیر با افزایش زیادی همراه بوده است.

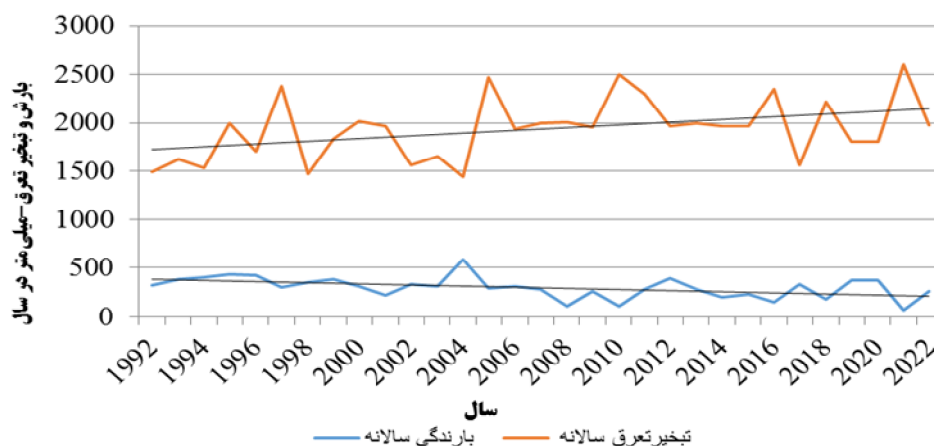
شاخص شناسایی خشکسالی (RDI): نحوه محاسبه شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) به شرح زیر است (Tsakiris and Vangelis, 2005; Tsakiris et al. 2007). ابتدا با استفاده از فرمول زیر برای هر سال (i) از دوره آماری مورد مطالعه مقداری با عنوان a_0 محاسبه می‌شود:

$$a_0^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_j}{\sum_{j=1}^{12} PET_{ij}}, i=1(1)N \quad \text{and } j=1(1)12 \quad (5)$$

P: بارندگی، ET: تبخیر و تعرق پتانسیل در زامین ماه سال i. مقدار i از یک تا N (تعداد سال‌هایی است که آمار آن در دسترس است) تغییر خواهد کرد. چنانچه بارندگی و تبخیر و تعرق به صورت سالانه محاسبه شوند نیازی به جمع کردن مقادیر ماهانه در فرمول نیست. گام بعدی تعیین شاخصی با عنوان RDI نرمال (RDI_n) هر سال است که از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$RDI_n^{(i)} = \frac{a_0^{(i)}}{\bar{a}} - 1 \quad (6)$$

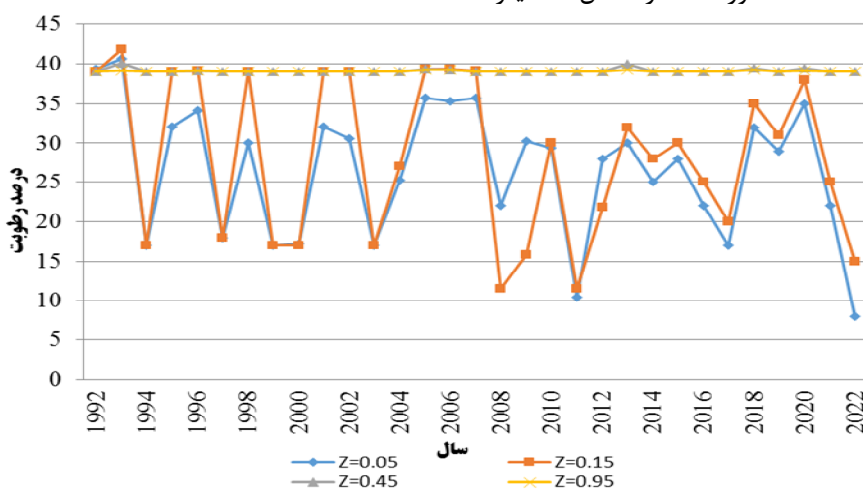
در این فرمول \bar{a}_0 میانگین حسابی اعداد a_0 هر سال است. جهت محاسبه شاخص استاندارد شده RDI (RDI_s) از مقادیر سالانه a_0 لگاریتم گرفته که عددی با عنوان y_i بدست می‌آید. سپس میانگین حسابی و انحراف معیار استاندارد این اعداد محاسبه و به ترتیب \bar{y}_k و $\hat{\sigma}_{yk}$ نامیده می‌شود. و نهایتاً شاخص استاندارد RDI بدست می‌آید.



شکل ۵- تغییرات و روند بارندگی و تبخیرتقرق در طی دوره آماری در منطقه زرگان، استان فارس

مشخص است، تغییرات رطوبت خاک در عمق‌های بیشتر بسیار ناچیز است. تغییرات رطوبت خاک در لایه‌های سطحی (۵ و ۱۵ سانتیمتری) تابع بارندگی و تبخیر در منطقه است. همچنین زمان عکس العمل رطوبت خاک به بارندگی و البته تبخیر متفاوت است. در واقع تغییرات رطوبت خاک نسبت به بارش و تبخیر در عمق‌های کمتر، سریعتر صورت می‌گیرد. در عمق ۴۵ و ۹۵ سانتی‌متری نیز علاوه بر تأخیر زمانی، تعدیل و کاهش رطوبتی نیز رخ داده است. در عمق ۴۵ سانتی‌متری، تأثیرپذیری و در نتیجه تغییرات رطوبت خاک از بارندگی و تبخیر کمتر بوده و مقداری از رطوبت این عمق به وسیله پدیده مویبندی جبران می‌شود.

درصد حجمی رطوبت خاک با استفاده از مدل Aquacrop در عمق‌های ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵، ۵۵، ۶۵، ۷۵، ۸۵ و ۹۵ سانتی‌متری برآورد گردید و درصد رطوبت خاک در عمق‌های ۵، ۱۵، ۴۵ و ۹۵ سانتی‌متری در شکل (۵) نشان داده شده است. همانگونه در شکل (۵) نمایان است تغییرات درصد رطوبت خاک در عمق ۵ و ۱۵ سانتی‌متری بسیار شدید است. این تغییرات رطوبت عمدتاً از حدود ۱۰ درصد تا ۳۲ درصد (پژمردگی دائم تا ظرفیت زراعی) در ماه‌های مختلف متغیر است. علت تغییرات رطوبت خاک در لایه‌های سطحی خاک به دلیل تابش مستقیم نور خورشید و در نتیجه تبخیر بیشتر است. همچنین بارندگی (حتی به میزان کم) نیز باعث افزایش رطوبت خاک خواهد شد. اما همانطور که در شکل (۶) نیز

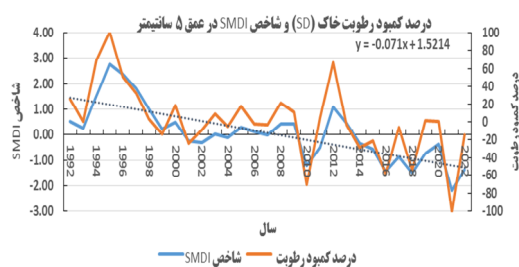


شکل ۶- تغییرات رطوبت خاک در عمق‌های ۵، ۱۵، ۴۵ و ۹۵ سانتی‌متری خاک در منطقه زرگان، استان فارس

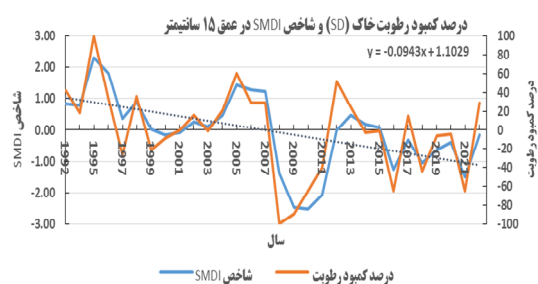
پارامترهای هواشناسی محاسبه می‌شوند نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های SMDI، SPI و RDI در شکل (۸) نشان داده شده است. بیشترین و کمترین مقدار بارش مربوط به سال ۲۰۰۴ و ۲۰۲۱ است. شاخص‌های خشکسالی SPI و RDI نیز بیشترین و کمترین مقدار (ترسالی و خشکسالی) را در سالهای مذکور نشان داده اند. اما در مورد شاخص SMDI بیشترین مقدار این شاخص (ترسالی) در سال ۱۹۹۶ و کمترین مقدار (خشکسالی) در سال ۲۰۱۶ و بعد از آن ۲۰۱۵ نشان داده شده است. نکته مهم شاخص SMDI آن است که این شاخص علاوه بر شرایط کنونی رطوبت خاک به شرایط سال قبل نیز توجه دارد. بنابراین مشاهده می‌شود بیشترین و کمترین مقدار این شاخص در سالهایی متفاوت نسبت به دیگر شاخص‌ها بوده و متاثر از وضعیت بارندگی آن سال نمی‌باشد. بیشترین مقدار این شاخص پس از یک دوره پر باران سالهای ۱۹۹۴ و ۱۹۹۵ در سال ۱۹۹۶ رخ داده و کمترین مقدار نیز پس از سالهای خشک ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۵ در سال ۲۰۱۶ رخ داده است.

پس از تعیین درصد رطوبت در عمق‌های مختلف خاک، اقدام به محاسبه شاخص SMDI گردید. برای محاسبه این شاخص ابتدا بایستی درصد کمبود رطوبت خاک (SD) محاسبه گردد. نتایج حاصل از محاسبه SD و SMDI و شیب تغییرات رطوبت در عمق‌های مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین شدت خشکسالی در عمق ۵ سانتیمتری مربوط به سالهای ۲۰۱۰ و ۲۰۲۱ است که در عمق ۱۵ سانتیمتری تداوم زمانی بیشتری یافته است. در عمق ۴۵ و ۹۵ سانتیمتری به دلیل تاخیر زمانی و تعدیل رطوبتی، تداوم خشکسالی بیشتر شده و خاک با شرایط خشکسالی کشاورزی و کاهش رطوبت بیشتری همراه بوده است و شدت خشکسالی نیز افزایش یافته است. همچنین شیب کاهش رطوبت نیز بیشتر شده است؛ به طوریکه از ۰/۰۷- در عمق ۵ سانتیمتری به ۰/۱۲- در عمق ۹۵ سانتیمتری رسیده است.

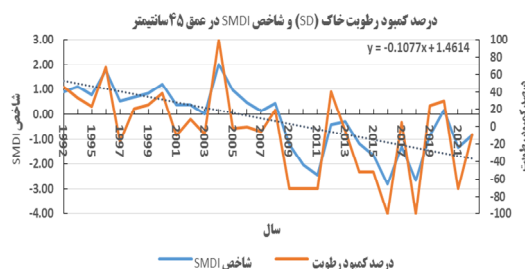
مقایسه نتایج حاصل از شاخص SMDI با شاخص‌های SPI و RDI: جهت مقایسه تطبیقی بین شاخص‌ها، نتایج دو شاخص SPI و RDI که براساس



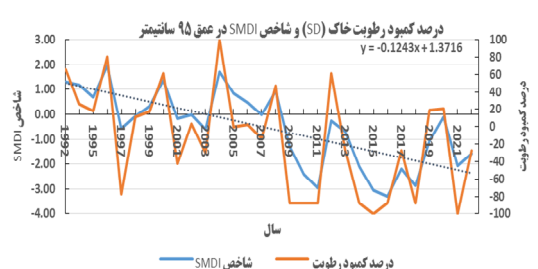
(الف)



(ب)



(پ)



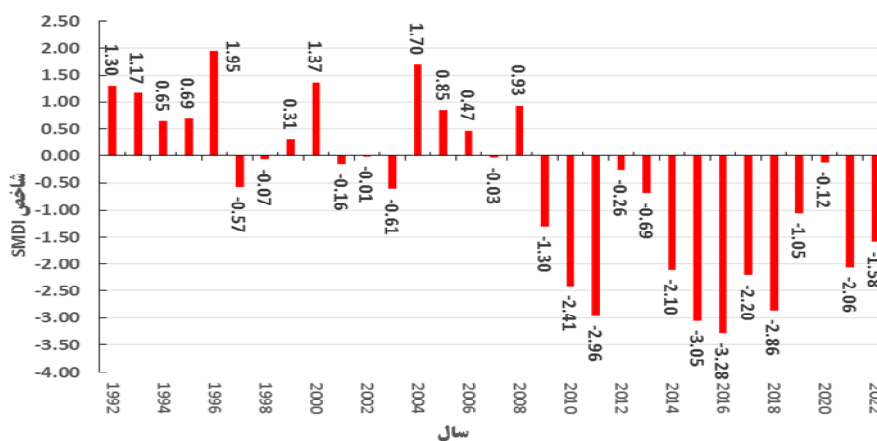
(ت)

شکل ۷- درصد کمبود رطوبت خاک (SD) و شاخص SMDI و شیب تغییرات رطوبت در عمق‌های

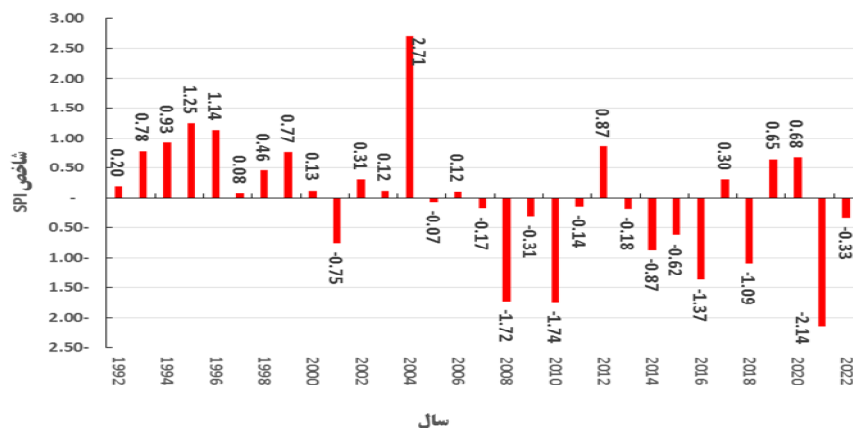
۵ (الف)، ۱۵ (ب)، ۴۵ (پ) و ۹۵ (ت) سانتیمتری خاک طی سالهای ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ در منطقه زرکان، استان فارس

کشاورزی است، مورد توجه قرار گیرد. هر سه شاخص نشان می‌دهد از سال ۲۰۰۵ به بعد منطقه وضعیت ترسالی نداشته و با خشکسالی ملایم تا خیلی شدید همراه بوده و شدت آن مرتبا در حال افزایش است. در سال ۲۰۱۰، ۲۰۱۱، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ خشکسالی‌های شدیدی رخ داده که شدت آنها در شکل (۹) نشان داده شده است.

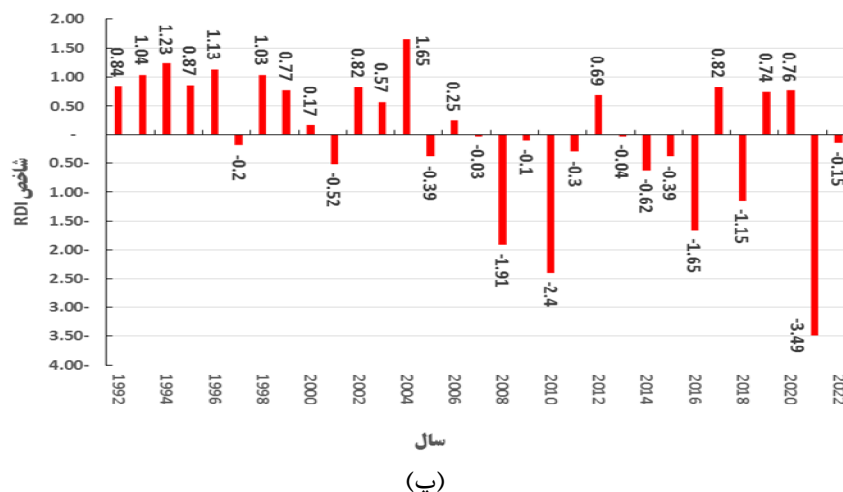
مقایسه تطبیقی نتایج سه شاخص مورد مطالعه نیز در شکل (۹) نشان داده شده است. بررسی روند تغییرات شاخص‌های خشکسالی نشان می‌دهد که هر سه شاخص افزایش فراوانی و شدت خشکسالی را در منطقه مورد مطالعه تایید می‌نمایند. به عبارت دیگر، با توجه به کاهش میزان بارندگی و افزایش تبخیر، عرق، خشکسالی در منطقه رو به افزایش است. این موضوع باید در این منطقه که یکی از قطب‌های



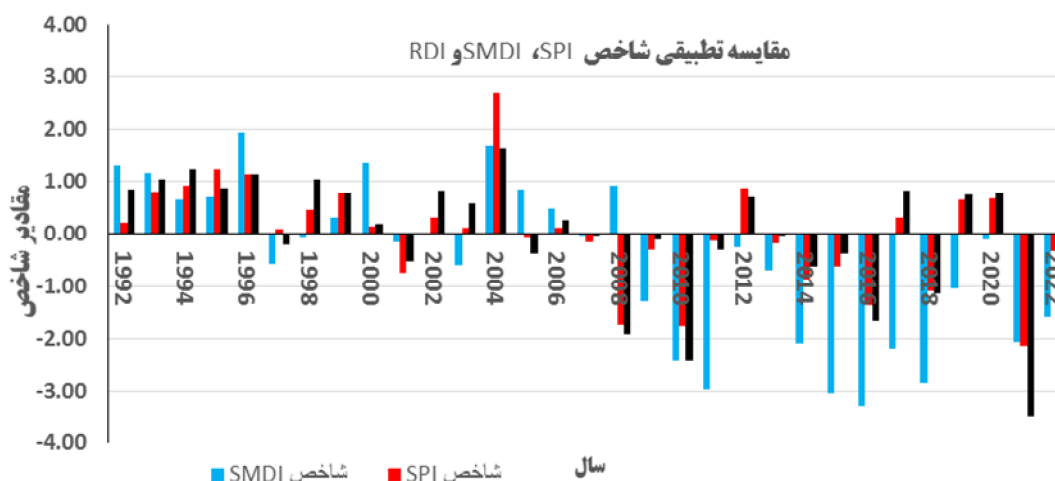
(الف)



(ب)



شکل ۸- پایش خشکسالی با استفاده از شاخص SMDI (الف)، شاخص SPI (ب) و شاخص RDI (پ) در منطقه زرقان، استان فارس



شکل ۹- مقایسه تطبیقی شاخص‌های SMDI، SPI و RDI در پایش خشکسالی کشاورزی در منطقه زرقان، استان فارس

میزان کمبود رطوبت حدود ۵۰ درصد به عوامل و پارامترهایی غیر از بارندگی وابسته است. ارتباط شاخص SMDI با بارش نیز نشان می‌دهد رطوبت خاک حدود ۴۵ درصد به بارندگی و بیش از ۵۰ درصد به عوامل و پارامترهایی غیر از بارندگی وابسته است. در خصوص ارتباط بارش با دو شاخص SPI و RDI نتایج نشان می‌دهد این دو شاخص به شدت وابسته به بارندگی بوده به طوریکه شاخص SPI به طور کامل به بارندگی ارتباط دارد و شاخص RDI که به دو پارامتر بارش و تبخیر تعرق وابسته است، همبستگی قابل توجهی به بارش دارد. در خصوص ارتباط میان

جهت بررسی دقیق تر نتایج، روابط بین شاخص‌های خشکسالی، بارندگی و تبخیر تعرق بررسی شد و ضریب همبستگی پارامترها تعیین گردید. نتایج مربوط به ارزیابی همبستگی بین بارندگی، تبخیر تعرق سالانه، درصد کمبود رطوبت، شاخص SMDI، شاخص SPI و شاخص RDI در ایستگاه سینوپتیک زرقان در جدول (۲) نشان داده شده است. در برخی از سالها به ویژه سالهای پربارش و کم بارش ارتباط معکوس میان بارندگی و تبخیر تعرق وجود دارد و ضریب همبستگی این دو پارامتر ۰/۴۸ است. در خصوص ارتباط میان بارش و کمبود رطوبت خاک نتایج نشان می‌دهد که

و مقدار SD نیز نتایج نشان می‌دهد بین این دو پارامتر ارتباط قوی وجود ندارد. نتایج حاصل از همبستگی میان شاخص کمبود رطوبت خاک با سایر شاخص‌های خشکسالی نشان می‌دهد، با توجه به وابستگی کامل شاخص SPI با بارندگی، همبستگی دو شاخص SPI و SMDI مشابه نتایج مربوط به همبستگی بارندگی با شاخص SPI بوده و میزان ضریب همبستگی برابر ۰/۴۵ می‌باشد. با توجه به ضعیف بودن همبستگی بین تبخیرتغرق و شاخص SMDI، ارتباط بین شاخص‌های RDI و SMDI نیز ضعیف می‌باشد. نتایج حاصل از همبستگی میان شاخص استاندارد شده بارش با شاخص شناسایی خشکسالی نشان می‌دهد با توجه به وابستگی بسیار زیاد این دو شاخص به بارندگی، نتایج دو شاخص در تعیین میزان شدت خشکسالی مشابه بوده و همبستگی قوی وجود دارد.

تبخیرتغرق و کمبود رطوبت خاک مشخص گردید که عوامل دیگری غیر بارندگی در تعیین مقدار این پارامتر موثر است. طبق نتایج به دست آمده کمبود رطوبت خاک با تبخیرتغرق همبستگی در حدود ۴۰ درصد دارد. در خصوص ارتباط شاخص SMDI با تبخیرتغرق نیز نتایج نشان می‌دهد ارتباط و همبستگی ضعیفی میان این دو پارامتر وجود دارد. در خصوص ارتباط تبخیرتغرق با دو شاخص SPI و RDI نتایج نشان می‌دهد شاخص SPI همبستگی ضعیفی داشته و شاخص RDI همبستگی نسبتاً قوی دارد. در خصوص ارتباط بین درصد کمبود رطوبت خاک با شاخص SMDI، نتایج نشان داد همبستگی بالایی به این دو پارامتر وجود دارد. در خصوص ارتباط بین شاخص SPI و مقدار SD نیز با توجه به اینکه شاخص SPI کاملاً وابسته به بارندگی می‌باشد، نتایج حاصله و میزان همبستگی مشابه ارتباط بین بارش و درصد کمبود می‌باشد. در خصوص ارتباط بین شاخص RDI

جدول ۲- ماتریس همبستگی میان پارامترهای هواشناسی و شاخص‌های خشکسالی در منطقه زرقان، استان فارس

RDI	SPI	SMDI	SD	تبخیرتغرق	بارندگی	
۰/۸۵۳	۱	۰/۴۵۵	۰/۵۱۱	۰/۴۸۵	۱	بارندگی
۰/۷۰۳	۰/۴۶۵	۰/۲۵۹	۰/۳۸۸	۱		تبخیرتغرق
۰/۴۶۲	۰/۵۱۱	۰/۷۴۴	۱			SD
۰/۴۰۰	۰/۴۵۵	۱				SMDI
۰/۷۹۲	۱					SPI
۱						RDI

خشکسالی را تخمین می‌زند. به همین علت نتایج حاصله با نتایج شاخص‌هایی که وضعیت پارامترهای هواشناسی را در هر سال لحاظ می‌نماید تا حدودی متفاوت است. بیشترین مقدار این شاخص پس از یک دوره پر باران سالهای ۱۹۹۴ و ۱۹۹۵ در سال ۱۹۹۶ رخ داده و کمترین مقدار نیز پس از سالهای خشک ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ در سال ۲۰۱۱ رخ داده است. نتایج این شاخص با نتایج دو شاخص SPI و RDI که وابسته به مقدار بارندگی می‌باشد، نیز مقایسه گردید. در این خصوص با توجه به اینکه بیشترین و کمترین مقدار بارش رخ داده مربوط به سال ۲۰۰۴ و ۲۰۲۱ است،

بحث

در این پژوهش با استفاده از دو مدل ET0 و AquaCrop مقدار رطوبت خاک در عمق‌های ۵، ۱۵، ۴۵ و ۹۵ سانتیمتر تخمین زده شد. براساس مقادیر و تغییرات رطوبت خاک، درصد کمبود رطوبت خاک و شاخص SMDI جهت پایش خشکسالی در ایستگاه زرقان استان فارس محاسبه گردید. براساس نتایج این شاخص سال‌های ۱۹۹۴، ۱۹۹۵ و ۱۹۹۶ ترسالی و طی سالهای ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱ خشکسالی رخ داده است. این شاخص علاوه بر شرایط کنونی رطوبت خاک به شرایط سال قبل نیز توجه دارد و براین اساس شدت

دلیل این امر آن است که پارامتر بارش به صورت موثرتری در شکل‌گیری و شدت گرفتن خشکسالی نقش دارد و اثر پارامتر بارش در رخداد خشکسالی بیشتر از تبخیرتغرق پتانسیل است. این نتیجه با نتایج پژوهش‌های دیگر تطابق دارد (Haydarzadeh and Salari, 2022). در خصوص خشکسالی‌های حادی و خیلی شدید که میزان بارش کاهش زیادی داشته و تبخیرتغرق نیز افزایش می‌یابد، شاخص RDI دقیقتر بوده و میزان شدت خشکسالی را با دقت بالاتری نشان می‌دهد و حساسیت شاخص RDI نسبت به شرایط آب و هوایی بیشتر از شاخص SPI است. در پژوهشی، نتایج نشان داد که هر دو شاخص بطور مشابه رفتار می‌کنند ولی شاخص RDI به دلیل استفاده از پارامتر تبخیرتغرق بالقوه در یک شرایط آب و هوایی، حساس تر است (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۸).

نتیجه‌گیری

براساس نتایج حاصل از پژوهش حاضر با توجه به اهمیت ارزیابی دقیق شدت‌های خشکسالی که می‌تواند تبعات اقتصادی و اجتماعی داشته باشد، توصیه می‌گردد در مناطق خشک و نیمه خشک که شدت خشکسالی به آستانه شدید و خیلی شدید نیز می‌رسد از شاخص‌هایی استفاده گردد که علاوه بر بارش، عوامل دیگر را در نظر بگیرد. در این راستا عامل دما که محدود کننده رطوبت خاک است و باعث بالارفتن تبخیرتغرق می‌شود، می‌تواند در پایش و ارزیابی خشکسالی استفاده گردد. شاخص SMDI با توجه به اینکه علاوه بر شرایط کنونی رطوبت خاک به شرایط سال قبل نیز توجه دارد و عوامل مختلف بارندگی، دما و سایر پارامترهای هواشناسی را نیز در نظر می‌گیرد، می‌تواند شاخص مفید و کارایی باشد و با توجه به کمبود داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک در ایستگاه‌ها می‌توان از مدل‌های شبیه‌ساز آب و خاک جهت برآورد و تخمین رطوبت خاک جهت محاسبه این شاخص استفاده نمود.

شاخص‌های خشکسالی SPI و RDI نیز بیشترین کمترین مقدار این شاخص‌ها (ترسالی و خشکسالی) را در سالهای مذکور نشان داده‌اند. اما آنچه در نتایج پایش خشکسالی با استفاده از هر سه شاخص مشخص گردید آن است که افزایش شدت خشکسالی در منطقه قابل پیش‌بینی است. به عبارت دیگر، میزان بارندگی‌ها در منطقه رو به کاهش بوده و خطر خشکسالی در منطقه رو به افزایش است. نتایج هر سه شاخص نشان می‌دهد از سال ۲۰۰۵ به بعد منطقه وضعیت ترسالی نداشته و با خشکسالی همراه بوده و شدت آن مرتباً در حال افزایش بوده است. در سال ۲۰۱۰، ۲۰۱۱، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ خشکسالی‌های شدیدی رخ داده که هر سه شاخص در این مورد نتایج مشابهی داشته‌اند. جهت بررسی دقیق‌تر نتایج، روابط بین شاخص‌های خشکسالی، بارندگی و تبخیرتغرق بررسی شد. شاخص SMDI کمترین ضریب تبیین را با تبخیرتغرق (۰/۲۵)، شاخص RDI (۰/۴) و پس از آن با شاخص SPI و بارش (۰/۴۵) دارد. علت پایین بودن ضریب تبیین شاخص SMDI، تفاوت در ماهیت این شاخص است. شاخص SPI براساس مقادیر بارندگی و شاخص RDI براساس بارش و تبخیرتغرق محاسبه می‌شوند و به همین دلیل همبستگی آنها با بارش بسیار بالا است. اما شاخص SMDI علاوه بر بارش به عوامل و پارامترهای دیگری وابسته است. این موضوع در پژوهش Narasimhan and Srinivasan, 2005 و رضانی اعتدالی و همکاران (۱۳۹۱) نیز به همین صورت بوده است. بیشترین همبستگی تبخیرتغرق با شاخص RDI است که علت آن مربوط به ماهیت این شاخص است. در محاسبه این شاخص دو پارامتر بارش و تبخیرتغرق پتانسیل نقش دارند. ضریب همبستگی شاخص SPI با تبخیرتغرق کم می‌باشد. دلیل این موضوع آن است که در محاسبه شاخص SPI پارامتر تبخیرتغرق نقشی نداشته و این شاخص فقط وابسته به بارندگی است. نتایج مقایسه تطبیقی بین سه شاخص خشکسالی SMDI، SPI و RDI نشان داد همبستگی و ارتباط قوی بین دو شاخص SPI و RDI وجود دارد.

۹. صلح جو، ع.ا. و محمدی، د. ۱۳۸۶. مقایسه فنی-اقتصادی زیرشکنی خاک و خاکورزی مرسوم در دوره‌های مختلف آبیاری بر تولید چغندر قند. مجله پژوهش و سازندگی. شماره ۷۷: ۱۸۲-۱۹۱.
۱۰. عابدین پور، م.، دهقان، ه.، مکاری باغخیراتی، م. و معاریان خلیل آباد، ه. ۱۳۹۹. شبیه سازی رطوبت خاک و عملکرد گندم با مدل AquaCrop در شرایط مزرعه ای دشت نیشابور. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۳۴(۱): ۱۶-۲۹.
۱۱. نوابی، ن.، مقدسی، م. و گنجی خرم دل، ن. ۱۴۰۰. ارزیابی پایش خشکسالی کشاورزی با استفاده از شاخص‌های مختلف براساس داده‌های زمینی و سنجش از دور، مطالعه موردی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه. نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز. ۱۳(۱): ۱-۱۲.
۱۲. نیازی، ج.، فولادمند، ح.ر.، احمدی، س.ح. و وزیر، ژ. ۱۳۸۴. نیازآبی و ضریب گیاهی گندم در منطقه زرقان استان فارس. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۹(۱): ۷-۱.
13. Asadi Zarch, M.A., Malekinezhad, H., Mobin, M.H., Taghi Dastorani, M. and Kousari, M.R. 2011. Drought Monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran. *Water Resour Manag.* 25(13):3485-3504.
14. Chen, X., Li, Y., Yao, N., Liu, D., Javed, T., Liu, C. and Liu, F. 2020. Impacts of Multi-Timescale SPEI and SMDI Variations on Winter Wheat Yields. *Agricultural Systems.* 185: 102955.
15. Gonçalves, S.T.N., Vasconcelos Júnior, F.d.C., Silveira, C.d.S., Cid, D.A.C., Martins, E.S.P.R. and Costa, J.M.F.d. 2023. Comparative Analysis of Drought Indices in Hydrological Monitoring in Ceará's Semi-Arid Basins, Brazil. *Water*, 15, 1259.
16. Guttman, N.B. 1999. Accepting the Standardized Precipitation Index: A Calculation Algorithm, *Journal of American water Resources Association.* 35(2): 311-322.
17. Haydarzadeh, M. and Salari, A. 2022. Monitoring Meteorological Drought with SPI and RDI Drought Indices and Forecasting Class Transitions Using Markov Chains in Southern Iran. *Desert*

منابع

۱. بذرافشان، ا.، محمودزاده، ف.، عسگری نژاد، ا. و بذرافشان، ج. ۱۳۹۸. مقایسه تطبیقی شاخصهای SPI، RDI و SPEI در تحلیل روند شدت، مدت و فراوانی خشکسالی در مناطق خشک و نیمه خشک ایران. علوم و مهندسی آبیاری. ۴۲(۳): ۱۱۷-۱۳۱.
۲. تبوزاده، ش.، زارعی، ح. و بذرافشان، ا. ۱۳۹۴. تحلیل شدت، مدت، فراوانی و گستره خشکسالی هواشناسی در حوضه آبریز بختگان. علوم و مهندسی آبیاری. ۳۸(۴): ۱۰۹-۱۲۳.
۳. حجازی جهرمی، ک.، پیرمردیان، ن.، شمس نیا، س.ا. و شهیدی، ن. ۱۳۹۲. ارزیابی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی جهت استفاده در سیستم‌های آبیاری (مطالعه موردی: دشت‌های جنوبی و جنوب شرقی استان فارس). نشریه جغرافیای طبیعی. ۶(۱۹): ۳۳-۴۴.
۴. رضانی اعتدالی، ه.، لیاقت، ع.، پارسی نژاد، م. و رضانی اعتدالی، م. ۱۳۹۱. بررسی وضعیت خشکسالی کشاورزی بر اساس رطوبت خاک در ایستگاه سینوپتیک قزوین. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۲۶(۱): ۸۳-۹۳.
۵. سعیدی، ر.، رضانی اعتدالی، ه.، ستوده نیا، ع.، نظری، ب. و کاویانی، ع. ۱۴۰۰. ارزیابی مدل AquaCrop برآورد روند تغییرات رطوبت خاک، تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت، تحت تنش‌های شوری و حاصلخیزی. تنش‌های محیطی در علوم زراعی. ۱۴(۱): ۱۹۵-۲۱۰.
۶. سهرابی، ر.، سهرابی، ح. و عرب، د. ۱۳۸۷. بررسی شاخصهای پایش خشکسالی از مناظر تحول، ماهیت و عملکرد و پیشنهاد فرآیند انتخاب شاخص متناسب با شرایط مناطق، مجموعه مقالات سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشکده عمران تبریز، ایران.
۷. شمس نیا، س.ا. و خدادادی دهکردی، د. ۱۳۹۹. پایش خشکسالی کشاورزی با استفاده از شاخص خشکسالی RDI و مدل زمین آماری کریجینگ (مطالعه موردی: مناطق مرکزی و جنوبی استان فارس). محیط زیست و مهندسی آب. ۶(۴): ۴۴۴-۴۵۸.
۸. صالحی طبس، م.، یعقوب زاده، م.، هاشمی، س.ر.، منصور، ح. و قوام سعیدی نوقابی، س. ۱۳۹۸. برآورد خشکسالی کشاورزی برای دوره آتی به کمک شاخص SMDI و داده‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۳۳(۳): ۴۷۹-۴۹۲.

- (IRAN). 2nd India Disaster Management Congress. National Institute of Disaster Management, 4-6 November.
25. Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agron. J.* 101: 426-437.
26. Tsakiris, G. and Vangelis, H. 2005. Establishing a Drought Index Incorporating Evapotranspiration. *European Water.* 9/10: 3-11.
27. Tsakiris G., Pangalou D. and Vangelis, H. 2007. Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resource Management.*, 21, 821-833
28. Toumi, J., Raki, S., Ezzahar, J., Khabba, S., Jarlan, A. and Chehbouni, A. 2016. Performance Assessment of AquaCrop Model for Estimating Evapotranspiration, Soil Water Content and Grain Yield of Winter Wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to Irrigation Management. *Agricultural Water Management.* 163: 219-235.
29. Vangelis H., Tikas D. and Tsakiris G. 2013. The Effect of PET Method on Reconnaissance Drought Index (RDI) Calculation. *Mitigation in Europe.* Kluwer, The Netherlands. 119-132pp.
30. Zhang, R., Virgilio A. Junyu Qi, B., Xu, F., Wu, J., Qiu, J., Li, J., Shui, W. and Wang, Q. 2023. The First High Spatial Resolution Multi-Scale Daily SPI and SPEI Raster Dataset for Drought Monitoring and Evaluating Over China from 1979 to 2018, *Big Earth Data*, 7:3: 860-885.
- Ecosystem Engineering Journal.* 11 (7): 13-26.
18. Hayes, M. 2004. Drought Indices, National Drought Mitigation Center, Available on website: [Http://www.drought.unl.edu/whatis/indices.htm](http://www.drought.unl.edu/whatis/indices.htm).
19. Liu, X., Zhu, X. and Pan, Y. 2018. Performance of Different Drought Indices for Agriculture Drought in the North China Plain. *J. Arid Land* 10, 507-516.
20. McKee, T. B., Doesken, N.J. and Kleist, J. 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales, Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA, pp.179-184.
21. Narasimhan, B. and Srinivasan, R. 2005. Development and Evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agriculture drought monitoring. *J. Agriculture and Forest Meteorology*, 133: 69-88.
22. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agron. J.* 101: 438-447.
23. Richard, R. and Heim, J. 2002. A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *American Meteorological Society.* 1149-1166.
24. Shamsnia S.A. and Pirmoradian, N. (2009). Rectification of the Standardized Precipitation Index (SPI) Classification for Drought Evaluation in Fars Province

