

مقاله علمی-پژوهشی

تأثیر خشکسالی بر عملکرد گندم و جو دیم در اقلیم‌های مختلف ایران

سعید شرفی^{۱*}، مهدی محمدی قلعه‌نی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵

چکیده

رویدادهای خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل تأثیرات گسترده و پرهزینه‌ای که در بخش‌های مختلف اقتصادی و محیط زیست دارند، از اهمیت بالایی برخوردار است. در سال‌های اخیر اثرات این پدیده طبیعی به‌ویژه بر محصولات دیم بسیار مشهود بوده است. در این مطالعه اثرات خشکسالی بر دو محصول استراتژیک دیم ایران (گندم و جو) مورد ارزیابی قرار گرفت. از آنجایی که بخش کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیر است، شناسایی مناسب‌ترین ابزار به‌منظور نظارت بر تأثیر اقلیم بر عملکرد محصولات کشاورزی بسیار مهم می‌باشد. بنابراین ارزیابی اثرات شاخص‌های خشکسالی موثرترین ابزار می‌باشد. شاخص‌های مختلف خشکسالی برای ارزیابی تأثیر خشکسالی بر عملکرد گندم و جو دیم در ایران استفاده شده است، که شامل: شاخص بارش استاندارد (SPI)، شاخص استاندارد تبخیر و تعرق بارش (SPEI)، شاخص استاندارد رطوبت خاک دو لایه بالایی (SSI₁) و (SSI₂)، شاخص خشکسالی استاندارد دومتغیره شامل: MSDI₁ بر اساس بارش و تبخیر و تعرق مرجع (P&ET_{ref})، MSDI₂ بر اساس بارش و رطوبت خاک در لایه اول خاک (P&SM₁) و MSDI₃ بر اساس بارش و رطوبت خاک در لایه دوم خاک (P&SM₂) بودند. دو مجموعه از داده‌های عملکرد محصول در مقیاس‌های مکانی و دوره‌های زمانی مختلف در تجزیه و تحلیل استفاده شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های خشکسالی محاسبه شده در مقیاس‌های زمانی مختلف SPI و SPEI بیشترین همبستگی را با عملکرد گندم و جو دیم به ترتیب در اقلیم‌های نیمه‌خشک (۰/۷ و ۰/۷۷)، خشک (۰/۶۸ و ۰/۶۴)، خیلی خشک (۰/۶۳ و ۰/۶۱) و مرطوب (۰/۶۴ و ۰/۵۲) داشتند. همچنین نتایج نشان داد که الگوهای مختلف واکنش عملکرد گیاهان به خشکسالی بسته به اقلیم، دوره سال و مقیاس زمانی خشکسالی رخ می‌دهد. پاسخ‌های متفاوت در سراسر کشور مربوط به فصل و مقادیر متغیرهای مختلف اقلیمی بود.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق مرجع، تغییرات اقلیمی، خلاء عملکرد، دیم‌کاری، شاخص‌های دومتغیره

مقدمه

خاورمیانه یکی از مناطق استراتژیک است که در معرض تأثیرات تغییرات گسترده اقلیمی قرار دارد. انتظار می‌رود بسیاری از مناطق نیمه خشک جنوب غرب آسیا به دلیل کاهش بارندگی و افزایش نوسانات بارندگی بین سالانه و درون سالانه، و کاهش در دسترس بودن آب به شدت کاهش یابد (IPCC, 2014; EEA, 2017). همچنین انتظار می‌رود که تغییرات آبی در رژیم بارش، همراه با افزایش درجه حرارت، رویدادهای وخیم اقلیمی را به همراه داشته باشد (Webber et al., 2018) که زیست‌بوم‌ها و بخش‌های اقتصادی را تحت تأثیر قرار خواهند داد (Asseng et al., 2014; Tack et al., 2011).

مطالعات نشان داده است که تغییرات بارش و درجه حرارت در منطقه خاورمیانه منجر به رویدادهای خشکسالی شدیدتر و طولانی‌تر در دهه‌های آینده خواهد شد (Forzieri et al., 2016; Spinoni et al., 2018; Vicente-Serrano et al., 2014; Sharafi and Mir Karim, 2020; Sharafi and Ghaleni, 2022). بنابراین این موضوع از اهمیت بسیاری برخوردار است، زیرا کشاورزی نقش کلیدی در تامین مواد غذایی دارد.

بخش کشاورزی به شدت در برابر خشکسالی آسیب‌پذیر است، زیرا به‌طور مستقیم به میزان در دسترس بودن آب بستگی دارد (Hanjra and Qureshi, 2010; Meng et al., 2016). اگرچه هر محصول از نظر انعطاف‌پذیری در برابر تنش آبی متفاوت است (Liu et al., 2011; Lobell et al., 2016; et al., 2016)، اگر شرایط اقلیمی در حساس‌ترین مرحله رشد محصول نامطلوب باشد، خشکسالی می‌تواند باعث شکست در برداشت محصول شود (Lobell and Field, 2007). اثرات نامطلوب خشکسالی در رویدادهای شدید اخیر برجسته

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: s-sharafi@araku.ac.ir)

به عملکرد گیاه معمولاً از نظر در دسترس بودن مکانی یا زمانی محدود است. مطالعات اخیر در ایران تأثیر اقلیم بر گیاهان مختلف را در مقیاس کشوری تحلیل کرده است (Sharafi and Ghaleini, 2022)، اما تعداد کمی از داده‌های بازده با وضوح بهتر استفاده کرده‌اند. دهقانی سرگزی و همکاران (۱۴۰۰) اثرات خشکسالی هواشناسی-کشاورزی را بر عملکرد گندم دیم در ایران با استفاده از شاخص SPEI بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که بیشترین همبستگی در مقیاس‌های زمانی ۳ و ۶ ماهه به ترتیب در مناطق جنوب شرق، غرب و شمال غرب و کمترین همبستگی مربوط به شرق کشور ایران بود. نتایج آنها تایید کرد که روند خشکسالی رو به افزایش، ولیکن عملکرد گیاه فاقد روند معنی‌دار و کاهشی گزارش گردید. هم‌چنین گالاردو و همکاران تأثیر شاخص‌های مختلف خشکسالی از جمله SPI، SPEI، شاخص پالم، شاخص هیدرولوژیکی پالم و شاخص اصلاح شده پالم را بر عملکرد گندم و جو دیم در اسپانیا بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که شاخص‌های SPI و SPEI بیشترین همبستگی را با عملکرد دارند، اما پاسخ عملکرد گندم و جو دیم به خشکسالی ارتباط مستقیمی با منطقه مورد بررسی، دوره زمانی و مقیاس زمانی داشت (Peña-Gallardo et al., 2019b). جمع‌بندی تحقیقات گذشته در ارتباط با موضوع تحقیق نشان می‌دهد که اکثر این تحقیقات معمولاً در سطح یک منطقه انجام شده است در حالی که تحقیق حاضر در سطح کل کشور و در چند اقلیم متفاوت انجام شده است. هم‌چنین در تحقیقات گذشته معمولاً از یک شاخص خشکسالی ساده مانند SPI یا SPEI جهت ارزیابی استفاده شده است در حالی که در تحقیق حاضر از شاخص‌های خشکسالی دومتغیره (MSDI) با ترکیب‌های متفاوت از متغیرهای هواشناسی استفاده شده است.

بنابراین در این مطالعه شاخص‌های مختلف خشکسالی با استفاده از دو مجموعه داده در مقیاس‌های فضایی مختلف مقایسه شد: اطلاعات استانی ارائه‌شده توسط وزارت جهاد کشاورزی تهیه گردید. اهداف این مطالعه (۱) تعیین مناسب‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص خشکسالی در میان چهار شاخص خشکسالی مرتبط با شاخص بارش استاندارد (SPI)، شاخص استاندارد تبخیر و تعرق بارش (SPEI)، شاخص استاندارد رطوبت خاک دو لایه بالایی (SSI_1 و SSI_2)، شاخص خشکسالی استاندارد دومتغیره شامل؛ $MSDI_1$ بر اساس بارش و تبخیر و تعرق مرجع ($P\&ET_{ref}$)، $MSDI_2$ بر اساس بارش و رطوبت خاک در لایه اول خاک ($P\&SM_1$) و $MSDI_3$ بر اساس بارش و رطوبت خاک در لایه دوم خاک ($P\&SM_2$)، (۲) شناسایی واکنش زمانی (۱، ۳، ۶ و ۱۲) دو محصول استراتژیک گندم و جو دیم به خشکسالی، و (۳) در مقیاس‌های فضایی مختلف الگوهای فضایی مشترک تعیین گردد.

شده است، از جمله در سال ۲۰۰۰ که زیان کشاورزی ناشی از خشکسالی در کشور تقریباً ۱۳ میلیارد تومان بود (شرفی و همکاران، ۱۴۰۱). خشکسالی اخیر، که بیشتر اروپای و آسیا را تحت تأثیر قرار داد، باعث شد کشاورزان جهان به دلیل عملکرد پایین، دچار خسارات جبران ناپذیری گردند. (European Commission, 2018). بر همین اساس، آسیب‌پذیری تولیدات کشاورزی در برابر رویدادهای خشکسالی و تعیین کمیت تاثیرات خشکسالی بر عملکرد گیاهان زراعی به کانون توجه تبدیل شده است. در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی در جهان این مسائل را از دیدگاه‌های متعدد ارزیابی کرده‌اند. به عنوان مثال، کاپا-موروکو و همکاران ارتباط بین پیش‌بینی‌های اقلیمی فصلی و مدل‌های گیاهی در اسپانیا را بررسی کردند (Capa-Moroch et al., 2016)، لوکاس و واسیلیادس از یک رویکرد احتمالی برای ارزیابی ویژگی‌های مکانی و زمانی خشکسالی در یک منطقه دشت کشاورزی در یونان استفاده کردند (Loukas and Vasilades, 2004) و مور و لوبل اثرات پیش‌بینی‌های اقلیمی بر انواع مختلف گیاهان در سراسر اروپا برآورد کردند (Moore and Lobell, 2014). شرفی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از معادلات رگرسیونی چند متغیره، عملکرد گندم و جو دیم در اقلیم‌های مختلف ایران را پیش‌بینی کردند. نتایج آنها نشان داد که در بین ایستگاه‌های مورد بررسی فقط ۱۱/۳۶ درصد از نظر کشاورزی در شرایط مناسبی قرار داشتند و در بقیه ایستگاه‌ها وضعیت بحرانی گزارش گردید (۸۸/۶۴ درصد). هم‌چنین نتایج تحقیق ایشان تایید کرد که ضریب تبیین در عملکرد شبیه‌سازی شده گندم و جو دیم برای اقلیم‌های مرطوب‌تر به نسبت سایر اقلیم‌ها از دقت بیشتری برخوردار بود.

اندازه‌گیری و کمیت خشکسالی دشوار است (Vicente-Serrano et al., 2016)، و در نتیجه طیف گسترده‌ای از شاخص‌های خشکسالی به منظور ارائه راه‌کارهایی برای کمی کردن اثرات خشکسالی در بخش‌های مختلف توسعه یافته است (Eslamian et al., 2017). از این نظر، شاخص‌های خشکسالی پرکاربردترین روش برای پایش اثرات خشکسالی بر کشاورزی است. نمونه‌هایی از استفاده از آنها در مقالات علمی موجود عبارتند از: در اروپا (Hernandez-Barrera et al., 2017; Zuecco et al., 2018; Sepulcre-Canto et al., 2012)، ایالات متحده (McEvoy et al., 2012)، آسیا (Ebrahimpour et al., 2014; Wang et al., 2016) و در ایران (حسینی موغاری و همکاران، ۱۳۹۷؛ شرفی و همکاران، ۱۴۰۱). با این حال، اجماع کلی در مورد مناسب‌ترین شاخص‌ها برای این منظور وجود ندارد (Esfahanian et al., 2017). علیرغم مقالات علمی موجود، مطالعات بسیار کمی (Peña-Gallardo et al., 2018, 2019a; Tian et al., 2018) شاخص‌های خشکسالی را برای شناسایی مناسب بودن آنها جهت پایش اثرات خشکسالی بر کشاورزی و برای انواع مختلف گیاهان زراعی مقایسه کرده‌اند. اطلاعات مربوط

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های اقلیمی

در این پژوهش، ۳۰ حوضه آبریز درجه دوم در سراسر ایران به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند. تقسیم‌بندی حوضه‌های ۳۰ گانه بر اساس متغیرهای بارش و تبخیر-تعرق، نسبت این دو به عنوان شاخص خشکی انجام گردید. به همین منظور و به دلیل گستره وسیع فضایی، این حوضه‌ها در چهار طبقه‌بندی اقلیمی، یعنی مرطوب (حوضه‌های ۱۲، ۱۴ و ۱۵)، نیمه خشک (حوضه‌های ۱۱، ۱۳، ۱۶، ۲۱، ۲۲، ۳۰ و ۳۱)، خشک (حوضه‌های ۱۷، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۴۱، ۴۳، ۴۴ و ۵۱ و ۶۰) و خیلی خشک (حوضه‌های ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۴۵، ۴۶، ۴۸، ۴۹ و ۵۲ و ۵۳) به ترتیب از شمال و شمال غرب به جنوب و جنوب شرقی دسته‌بندی شدند. همان‌طور که در شکل ۱ نیز نشان داده شده است، امروزه استفاده از پایگاه داده‌های جهانی شبکه‌بندی شده با توجه به دسترسی آسان و کیفیت مکانی و زمانی مناسب داده‌های آنها، کاربرد وسیعی یافته است. در سال‌های اخیر استفاده از داده‌های موجود در پایگاه‌های اطلاعاتی کاربرد فراوانی در گستره‌ای وسیع از موضوعاتی مانند هوا و اقلیم‌شناسی، هیدرولوژی و به‌ویژه علوم مرتبط با آب پیدا کرده است، که تا حدی زیادی توانسته است دغدغه دسترسی به داده اولیه را برای محققین برطرف کند. از جمله مهم‌ترین پایگاه‌های اطلاعاتی که دامنه وسیعی از داده‌ها را اختیار محققین می‌گذارد، می‌توان به داده‌های سری زمانی نسخه پنجم داده‌های بازتحلیل شده (ERA5) مرکز پیش‌بینی میان مدت اروپا^۱ اشاره کرد (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۹). داده‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل؛ مشاهدات هواشناسی روزانه (۱۹۸۰-۲۰۲۰) و اطلاعات جغرافیایی بودند. ۶۲۱ نقطه شبکه‌بندی هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفت و سوابق شامل بارش، تبخیر-تعرق مرجع، رطوبت خاک در عمق اول و دوم دو لایه بالای خاک داندود شد. دامنه ارتفاع از سطح دریا از ۲۶- تا ۲۴۶۵ متر از سطح دریا بود که به‌طور کلی توپوگرافی از شمال غربی به جنوب شرقی کاهش می‌یابد (شکل ۲).

شکل ۱، محدوده تغییرات چهار پارامتر بارش، تبخیر-تعرق مرجع، رطوبت خاک در عمق اول و دوم دو لایه بالای خاک را نشان می‌دهد. تحت تأثیر اقلیم مدیترانه‌ای در شمال غرب تا اقلیم موسمی در جنوب و شرایط توپوگرافی متنوع، بارندگی در سراسر ایران دارای تنوع مکانی بالایی است و شدت آن بین شهر یور و اردیبهشت کاهش می‌یابد و تقریباً ۹۰-۷۰ درصد بارش سالانه را تشکیل می‌دهد. کمترین و بالاترین مقادیر بارش به ترتیب در اقلیم‌های بسیار خشک (۶/۷۱ میلی‌متر در متر مربع در حوضه ۵۳) و مرطوب (۱۲۷/۴۷ میلی‌متر در متر مربع در حوضه ۱۲) ثبت شد. مقادیر بارش از کویر

مرکزی تا اقلیم مرطوب روند کاهشی را نشان می‌دهد (شکل ۱- الف). شکل ۱-ب، روند کاهشی تبخیر-تعرق مرجع را از اقلیم‌های بسیار خشک (۱۷۳/۸۸ میلی‌متر در متر مربع در حوضه ۴۵) به مرطوب (۵۵/۲۹ میلی‌متر در متر مربع در حوضه ۱۴) نشان می‌دهد. رطوبت خاک در دو عمق اول و دوم خاک ۰/۲۹ و ۰/۲۳ میلی‌متر در اقلیم‌های مرطوب و نیمه خشک (بالاترین رطوبت خاک در هر دو عمق مورد بررسی ۰/۳۷ میلی‌متر در حوضه ۱۲ گزارش گردید)، در حالی که در اقلیم‌های خشک و خیلی خشک این مقادیر به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۰۳ میلی‌متر (کمترین رطوبت خاک در هر دو عمق مورد بررسی ۰/۰۵ و ۰/۰۱ میلی‌متر در حوضه‌های ۲۴ و ۲۲ گزارش گردید) بود (شکل ۱-ج و د).

داده‌های عملکرد گندم و جو دیم

تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از مجموعه داده سالانه عملکرد دو گیاه گندم و جو دیم بر حسب کیلوگرم در هکتار ایران در مقیاس فضایی انجام شد. داده‌های عملکرد سالانه استانی در هر حوضه از سازمان آمار ملی کشاورزی منتشر شده توسط وزارت جهاد کشاورزی ایران تهیه گردید (۱۹۸۰-۲۰۲۰). با توجه به اینکه مکانیزاسیون و فناوری در کشاورزی طی قرن گذشته افزایش یافته و منجر به روند افزایش عملکرد شده است (Lobell and Field, 2007)، که در داده‌های این مطالعه نیز کاملاً مشهود است. به منظور حذف اختلال ایجاد شده توسط عوامل غیراقلیمی، و امکان مقایسه عملکرد بین دو نوع گیاه، سری‌های اولیه با استفاده از معادله چند جمله‌ای درجه دوم زیر به سری‌های باقی‌مانده عملکرد استاندارد^۲ تبدیل شدند:

$$SYRS = \frac{y_d - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

y_d : نشان‌دهنده باقی‌مانده بازده بدون روند است، که با برآزش مدل رگرسیون خطی بدست می‌آید، μ : میانگین سری بدون روند است و σ : انحراف استاندارد بازده بدون روند می‌باشد. این روش در سایر مطالعات مشابه بکار گرفته شده است (Tian et al., 2018; Peña-Gallardo et al., 2019a). این روش اولین بار توسط پوتوپوا و همکاران با عنوان SYRS معرفی شده است (Potopová et al., 2015).

شاخص‌های خشکسالی

شاخص بارش استاندارد شده^۳ توسط مک‌کی و همکاران معرفی شد، که یک رویکرد جدید برای تعیین کمیت خشکسالی در مقیاس‌های زمانی متعدد ارائه کرد. این شاخص بر اساس تبدیل سری

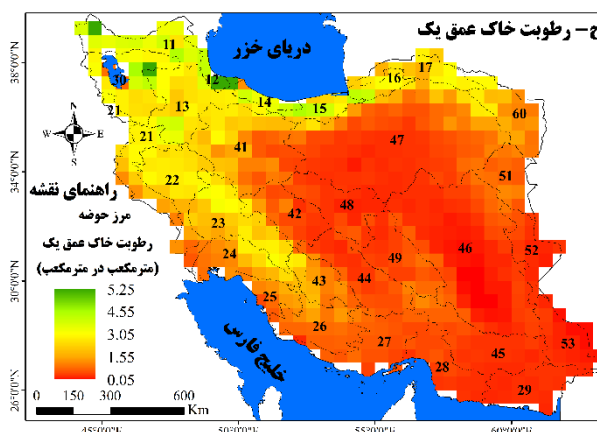
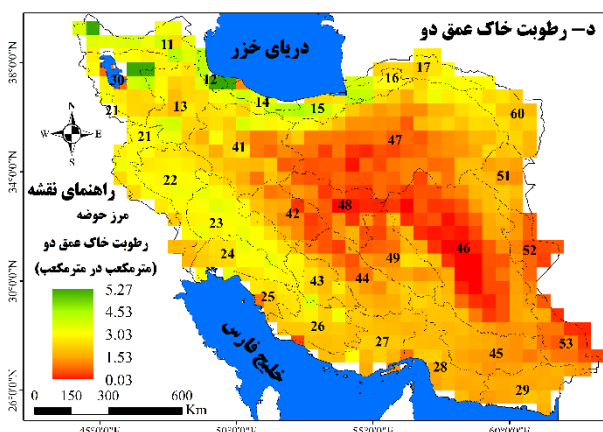
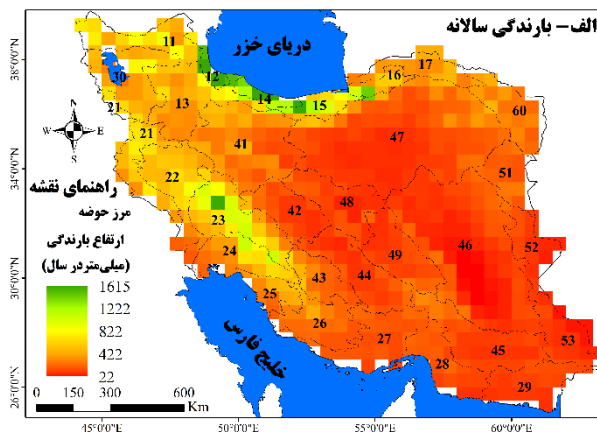
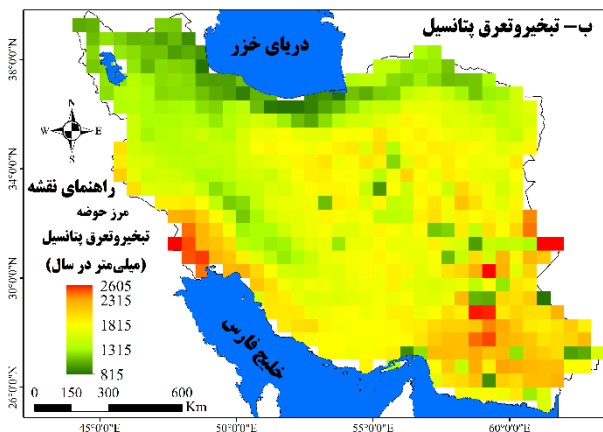
2- Standardized Yield Residuals Series (SYRS)

3- Standardized Precipitation Index (SPI)

1- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

سازمان جهانی هواشناسی (Svoboda et al., 2012) برای پیش‌بینی خشکسالی و پیش‌آگاهی اولیه توصیه می‌شود (Sharafi et al., 2016).

بارش به یک متغیر نرمال استاندارد، با میانگین برابر با صفر و واریانس برابر با یک، با توزیع گامای ناقص تنظیم شده می‌باشد (McKee et al., 1993). شاخص بارش استاندارد شده یک شاخص هواشناسی است که در سراسر جهان استفاده می‌شود و به‌ویژه توسط



شکل ۱- مکان و طبقه‌بندی اقلیمی ۶۲۱ نقطه شبکه‌بندی شده بر اساس مقادیر الف) بارش، ب) تبخیر و تعرق پتانسیل، پ) رطوبت خاک در عمق یک ت) رطوبت خاک در عمق دو

گسترده در مطالعات مرتبط با خشکسالی، از جمله برای بررسی اثرات خشکسالی بر گیاهان مختلف در سراسر جهان استفاده شده است (Chen et al., 2016; Peña-Gallardo et al., 2019b; Potopová et al., 2016).

هائو و آقاچوک شاخص خشکسالی استاندارد شده دومتغیره^۲ را بر اساس زوج‌های دو بعدی ارائه کردند تا خشکسالی‌های هواشناسی و کشاورزی را به‌طور همزمان منعکس کند (Hao and AghaKouchak, 2013). همچنین تابع copulas می‌تواند در ابعاد بالاتر برای توصیف انواع خشکسالی‌های متعدد به‌طور همزمان استفاده شود. بر همین اساس سه شاخص خشکسالی استاندارد شده

ویسته-سرانو و همکاران شاخص استاندارد شده تبخیر و تعرق بارش^۱ را به‌عنوان یک شاخص خشکسالی پیشنهاد کردند که تأثیر مقادیر تبخیر اتمسفری را بر شدت خشکسالی در نظر می‌گیرد (Vicente-Serrano et al., 2010). این توازن ماهانه اقلیمی (بارش) منهای تبخیر و تعرق مرجع) را فراهم می‌کند و مقادیر با استفاده از توزیع لجستیکی سه پارامتری به واحدهای استاندارد شده نرمال شده تبدیل می‌شوند. به مانند شاخص SPI، SPEI امکان مقایسه مشخصات خشکسالی را در مقیاس‌های زمانی مختلف در اقلیم‌های مختلف، مستقل از شرایط اقلیمی آنها ارزیابی می‌کند. SPEI به‌طور

2- Multivariate Standardized Drought Index (MSDI)

1- Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

درجه حرارت نیز می‌باشد. بر همین اساس طول دوره رشد گیاهان دیم در تعیین میزان عملکرد آن‌ها تاثیر مستقیم دارد. این موضوع می‌تواند ارتباط مستقیمی با شاخص‌های خشکسالی داشته باشد. بنابراین انتظار می‌رود شاخص‌هایی که متغیرهای اقلیمی، هیدرولوژیکی و کشاورزی بیشتری را در بر می‌گیرند (شاخص‌های خشکسالی دومتغیره) برآورد دقیق‌تری از تاثیر شاخص‌های خشکسالی بر کاهش یا افزایش عملکرد گیاهان دیم داشته باشند. بر اساس بررسی‌های نتایج شرفی و همکاران بیشترین طول دوره رشد گیاهان گندم و جو دیم به ترتیب در اقلیم‌های نیمه‌خشک (۲۶۵ و ۲۵۳ روز) مرطوب (۲۵۵ و ۲۵۳ روز)، خشک (۱۹۹ و ۱۹۷ روز) و فراخشک (۱۵۶ و ۱۵۰ روز) گزارش گردید (Sharafi et al., 2016) (شکل ۲).

از آنجایی که از قبل بیشترین همبستگی بین شاخص خشکسالی و عملکرد گیاهان مشخص نشده بود، کلیه پنج سری ماهانه برای هر شاخص با عملکرد سالانه همبستگی مشاهده شد و در نتیجه از بیشترین مقدار همبستگی استفاده گردید. در مورد شاخص‌های دومتغیره، برای هر سری ماهانه و مقیاس زمانی پنج همبستگی در نظر گرفته شد. بنابراین، ۱۰۰ همبستگی برای هر گیاه و واحد فضایی در نظر گرفته شده در تجزیه و تحلیل آماری استفاده شد (فقط همبستگی معنی دار در سطح پنج درصد در نظر گرفته شد). علاوه بر این، از مقیاس زمانی (در مورد شاخص‌های خشکسالی دومتغیره) و ماهیانه که در آن بیشترین همبستگی یافت شد، استفاده گردید. به‌منظور تعیین شباهت یا تفاوت معنی‌دار بین شاخص‌ها، از آزمون t جهت ارزیابی سطوح معنی‌داری تفاوت‌ها در ضرایب همبستگی رگرسیون چند جمله‌ای حاصل از روابط خشکسالی-عملکرد گیاه، استفاده شد.

نتایج و بحث

رابطه عملکرد گندم و جو دیم با بارش و تبخیر و تعرق مرجع

نتایج نشان داد که پراکندگی بارش ارتباط مستقیمی با افزایش عملکرد گندم و جو دیم در اقلیم‌های مختلف ایران دارد. در صورتی که مقادیر تبخیر و تعرق مرجع در طی سال‌های مورد بررسی در این مطالعه تقریباً روند مشابهی دارد. نکته مهم دیگری که در این مطالعه نمایان گردید روند کاهشی عملکرد گندم و جو دیم بود، که از سال ۲۰۰۰ روند کاهشی معنی‌دار بوده است. بر اساس نتایج شرفی و قلعه‌نی طی نیم قرن گذشته خشکسالی در تمامی اقلیم‌ها و فصل‌های ایران مشاهده شده است. به‌عنوان مثال، نقطه تغییر^۳ در اقلیم‌های مرطوب در نوامبر ۱۹۸۸ شروع شده است. نقطه تغییر در اقلیم‌های دیگر از نوامبر ۱۹۹۸ مشاهده شده و تقریباً در تمام فصل‌های سال

دومتغیره بر اساس مقادیر بارش و تبخیر و تعرق مرجع ($MSDI_1$)، بارش و رطوبت خاک در لایه اول خاک ($MSDI_2$) و بارش و رطوبت خاک در لایه دوم خاک ($MSDI_3$) تعریف گردید (Sharafi and Ghalehi, 2022).

شاخص استاندارد رطوبت خاک^۱ به مانند شاخص بارش استاندارد شده می‌باشد که بر اساس سایر متغیرهای اقلیمی، مانند رطوبت خاک، رواناب، ذوب برف، آب‌های زیرزمینی و بارش منهای تبخیر و تعرق مرجع، برای توصیف خشکسالی استفاده شده است (Hao and Singh, 2015). با توجه به ماهیت استاندارد شده، مقادیر شاخص بارش استاندارد شده برای مقیاس‌های زمانی مختلف را می‌توان در مکان‌ها و فصل‌های مختلف مقایسه کرد، که ویژگی مطلوب شاخص‌های خشکسالی برای ارزیابی و پایش خشکسالی است. بر همین اساس دو شاخص استاندارد رطوبت خاک در لایه بالایی خاک یعنی ۰-۷ سانتی‌متر (SSI_1) و ۷-۲۸ سانتی‌متر سطح خاک (SSI_2) تعیین گردید.

همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی و عملکرد گندم و جو

دیم

رابطه بین شاخص‌های خشکسالی و SYRS برای هر داده با محاسبه ضرایب همبستگی چند جمله‌ای^۲ ارزیابی شد (Baten and Frame, 1959). با توجه به رابطه وجود غیرخطی بین شاخص‌های خشکسالی و عملکرد گیاهان از یک مدل رگرسیون چند جمله‌ای درجه دوم استفاده شد (Páscoa et al., 2017; Zipper et al., 2016). از این پس، ارجاعات انجام شده به همبستگی‌ها به نتایج بدست آمده با استفاده از رویکرد چند جمله‌ای اشاره دارد. در این تحقیق ماه‌های مرداد و شهریور در اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌خشک، و ماه‌های تیر، مرداد، شهریور و مهر در اقلیم‌های خشک و خیلی خشک به دلیل مطابقت با دوره پس از برداشت از تجزیه و تحلیل حذف شدند و فقط طول دوره رشد در نظر گرفته شد (برای مطالعه بیشتر به مقاله شرفی و همکاران، ۱۳۹۵ رجوع گردد). شکل ۲، طول دوره رشد گندم و جو دیم را در اقلیم‌های مختلف ایران نشان می‌دهد.

متوسط طول دوره رشد گندم و جو دیم در اقلیم‌های مختلف کشور متفاوت است، به‌گونه‌ای هر قدر از اقلیم‌های سرد و مرطوب به سمت اقلیم‌های گرم و خشک کشور پیش می‌رویم طول دوره رشد این گیاهان کاهش می‌یابد. از مقایسه بین اقلیم‌ها مشخص گردید که در اقلیم فراخشک طول دوره رشد گندم و جو دیم به ترتیب حدود ۱۰۰ و ۱۱۰ روز از اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌خشک کوتاه‌تر است. عامل این اختلاف در رسیدگی محصول علاوه بر بارندگی، کاهش

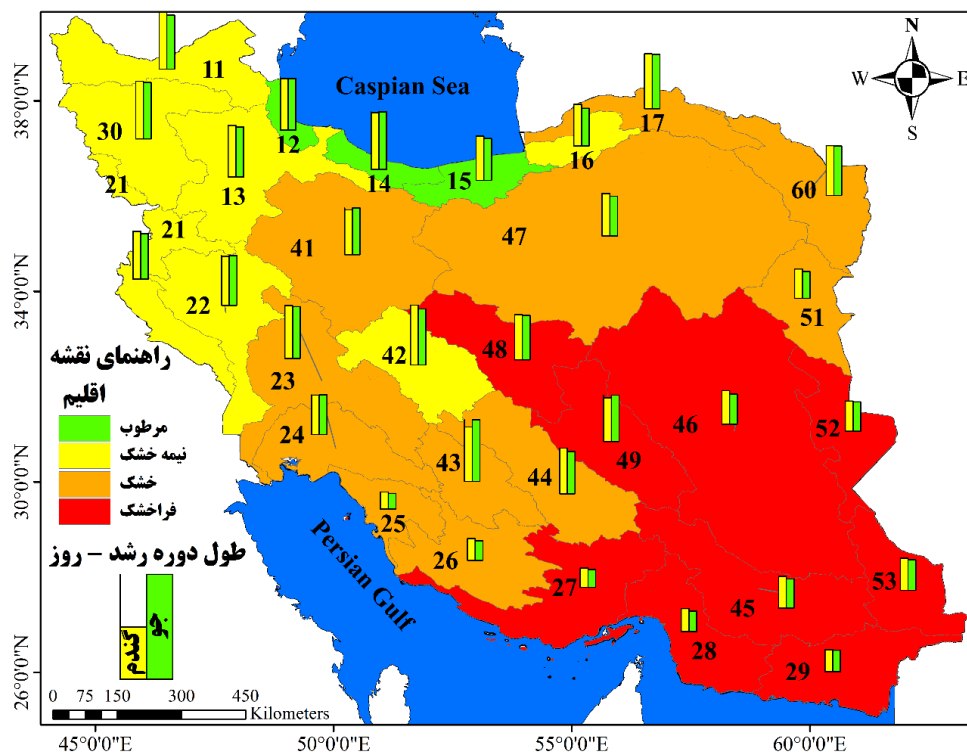
1- Standardized Soil Moisture index (SSI)

2- Polynomial Correlation Coefficients (PCC)

3- Changing point (CP)

اقلیم‌های نیمه‌خشک) و احداث بی رویه سدها در این دوره و سال‌های قبل از وقوع خشکسالی‌های پی‌درپی تأثیر مستقیمی بر وقوع آن داشته است (Sharafi and Ghalehi, 2022).

یکسان بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که تغییرات این اقلیم‌ها ناشی از تأثیرات انسانی سال‌های گذشته بوده است. عواملی مانند تخریب جنگل‌ها و مراتع (تبدیل به مزارع کشاورزی به‌ویژه در



شکل ۲- میانگین طول دوره رشد گندم و جو دیم در اقلیم‌های مختلف ایران

در اقلیم مرطوب شدیدتر بوده است. این در حالی است که در اقلیم‌های خشک و خیلی خشک روند کاهش عملکرد به سمت صفر میل می‌کند. این نتایج مطابق با نتایج دهقانی‌سرگزی و همکاران (۱۴۰۰) بود. نتایج ایشان نیز تایید کرد که روند عملکرد گندم دیم فاقد روند معنی‌دار بوده، هرچند که روند آن کاهش‌ی گزارش شده است.

رابطه خشکسالی با عملکرد گندم و جو دیم

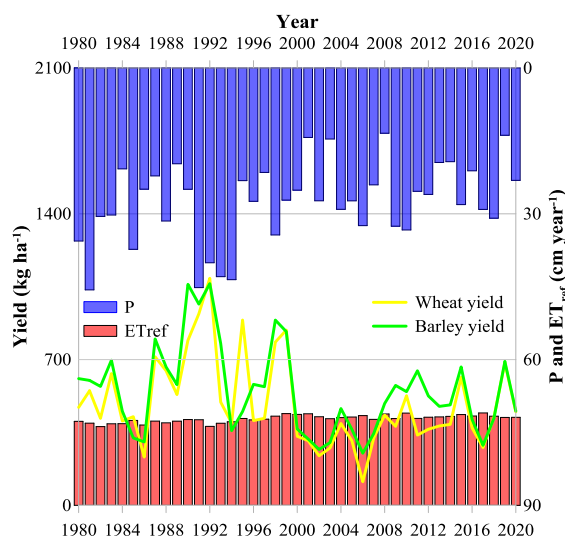
شکل ۴ بهترین همبستگی بین عملکرد گندم و جو دیم و شاخص‌های خشکسالی ماهانه را نشان می‌دهد. همبستگی‌ها بین دو گروه شاخص تفاوت اساسی داشت. مستقل از نوع گیاه، ماه سال یا مقیاس زمانی خشکسالی در نظر گرفته شده، ضرایب همبستگی برای شاخص‌های دومتغیره پایین‌تر از شاخص‌های تک متغیره بود. در هر دو مورد همبستگی ضعیف تری برای جو در مقایسه با گندم مشاهده شد. این مورد در تمامی اقلیم‌ها مشاهده و بیانگر پیچیدگی بیشتر شاخص‌های دومتغیره می‌باشد. همبستگی کلیه شاخص‌های مورد

بر اساس نتایج تحقیقات طبری و همکاران، تقریباً تمام اقلیم‌های ایران خشکسالی شدید را تجربه کردند. نقطه تغییر وقایع خشکسالی عمدتاً بین سال‌های ۱۹۹۸-۲۰۰۹ رخ داده است و سال‌های هیندروولوژیکی ۱۹۹۹-۱۹۹۸، ۲۰۰۰-۱۹۹۹ و ۲۰۰۱-۲۰۰۰ خشک‌ترین سال‌ها در طول دوره مورد مطالعه بوده‌اند (Tabari et al., 2013).

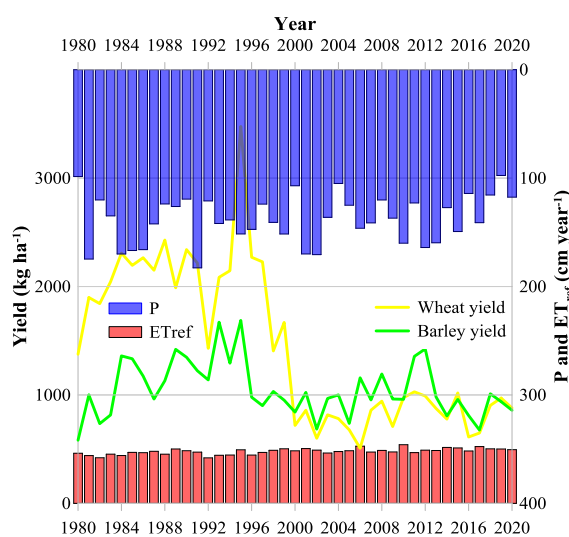
هم‌چنین در طی دوره زمانی مورد بررسی و با توجه به مقادیر سری‌های باقی‌مانده عملکرد استاندارد، عملکرد گندم و جو دیم در اقلیم مرطوب به ترتیب ۱۰۲۸ و ۵۵۰ کیلوگرم در هکتار (شکل ۳- الف) و در اقلیم نیمه‌خشک به ترتیب ۱۵۰ و ۱۴۸ کیلوگرم در هکتار (شکل ۳- ب) طی دوره مورد مطالعه کاهش یافته است. این در حالی است که روند کاهش عملکرد به‌طور مشابه برای گندم و جو دیم در اقلیم‌های خشک و خیلی خشک به ترتیب معادل ۱۷۵ و ۲۲۹ کیلوگرم در هکتار در طول دوره مورد مطالعه بوده است (شکل ۳- پ و ت). بنابراین نتایج نشان می‌دهد که تأثیر روند کاهش در مقادیر بارش و روند افزایشی در مقادیر تبخیر و تعرق مرجع بر عملکرد گندم و جو دیم

روی مقدار عملکرد دیم در اقلیم‌های فراخشک بارندگی می‌باشد، همبستگی بین شاخص‌های SPI و SPEI در اقلیم‌های فراخشک نسبت به سایر اقلیم‌ها بیشتر است. این با مطالعات مقایسه‌ای قبلی در مناطق مختلف مطابقت دارد که شاخص‌های خشکسالی دومتغیره (SPEI و SPI) را برای پایش اثرات خشکسالی بر زمین‌های کشاورزی موثر گزارش کرده بودند (Potopová et al., 2016; Tian et al., 2018; Zhu et al., 2016; Zipper et al., 2016).

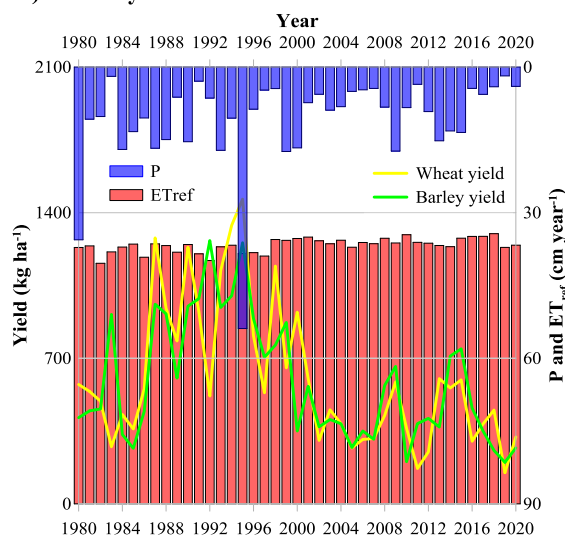
بررسی در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. مقادیر همبستگی برای سه شاخص خشکسالی دومتغیره مشابه بود. در مقیاس اقلیم، بیشترین مقادیر همبستگی گندم و جو دیم با شاخص خشکسالی SPI و SPEI در اقلیم‌های نیمه‌خشک و مرطوب گزارش گردید. به این ترتیب بیشترین همبستگی بین شاخص SPI و SPEI در اقلیم نیمه‌خشک برای گندم دیم ۰/۶۳، و برای جو دیم ۰/۶۸ و ۰/۶۵ گزارش گردید. در حالی که همبستگی بین شاخص SPI و SPEI در اقلیم مرطوب برای گندم دیم ۰/۶۲ و ۰/۵۳، و برای جو دیم ۰/۵۲ و ۰/۴۲ گزارش گردید (شکل ۴). از آنجایی که تأثیرگذارترین متغیر هواشناسی



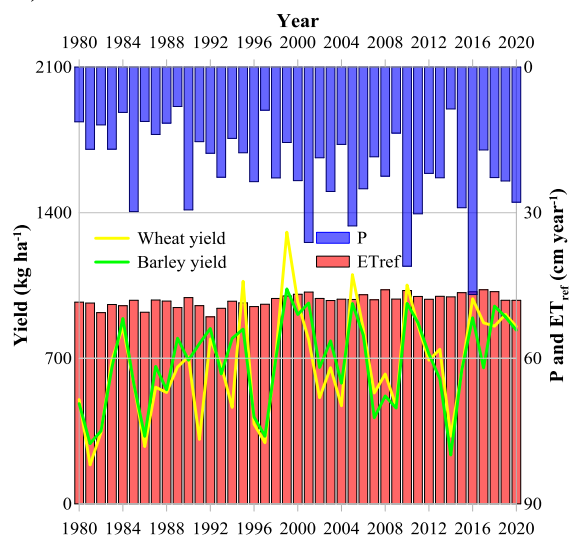
b) Semi dry climate



a) Humid climate



d) Very dry climate



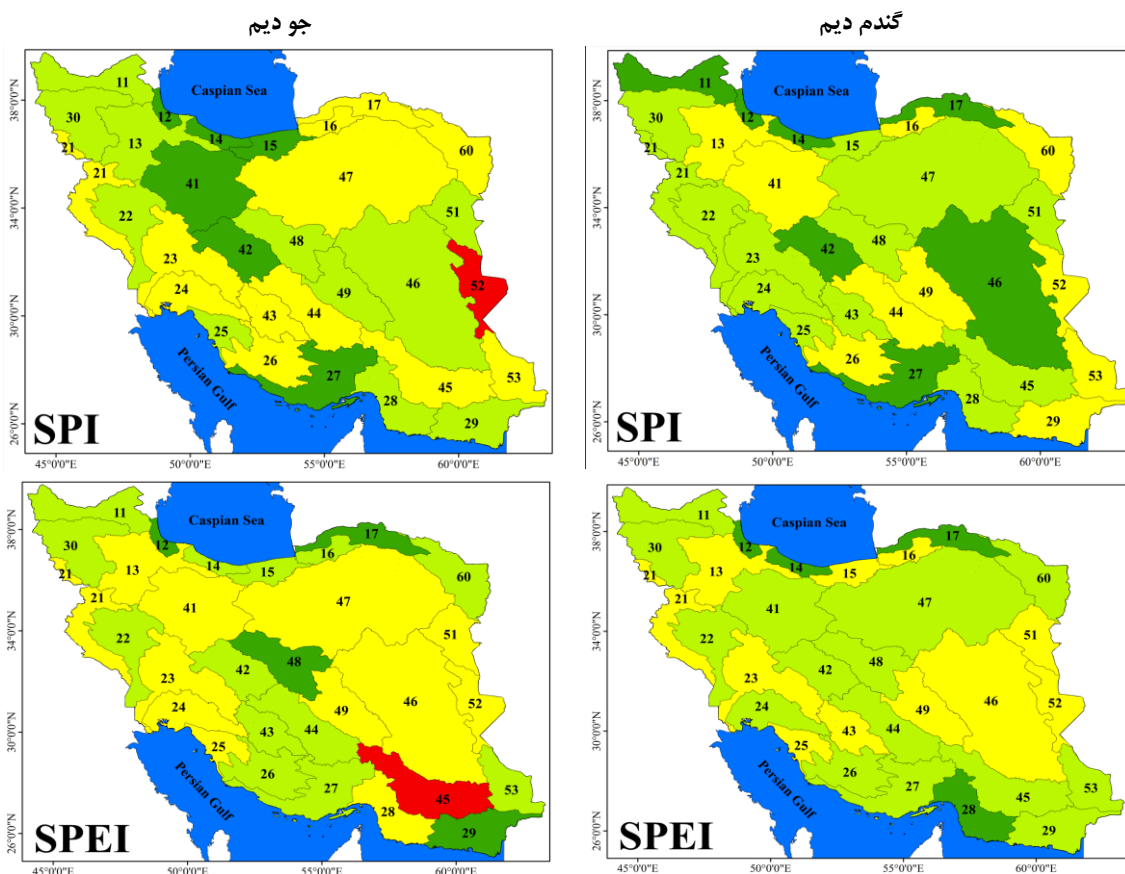
c) Dry climate

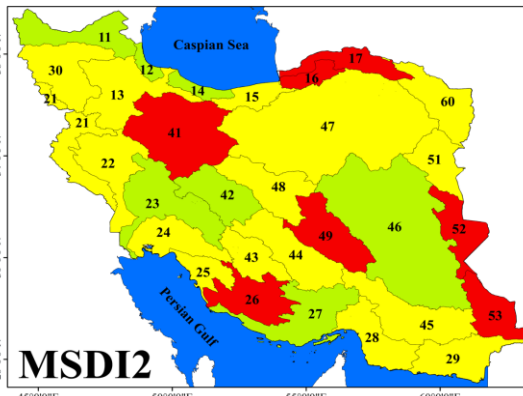
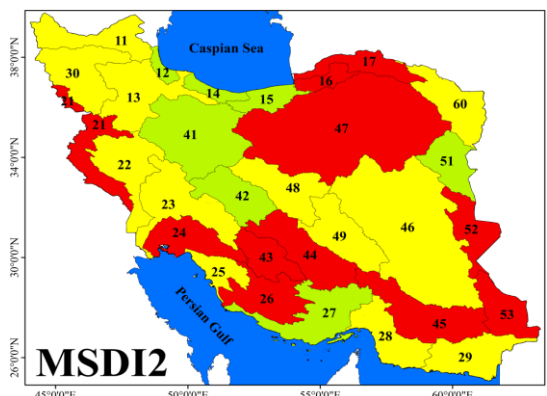
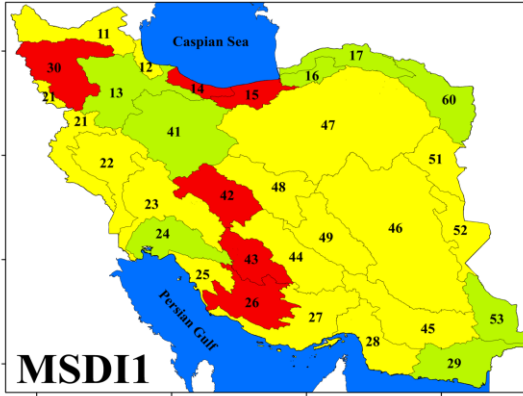
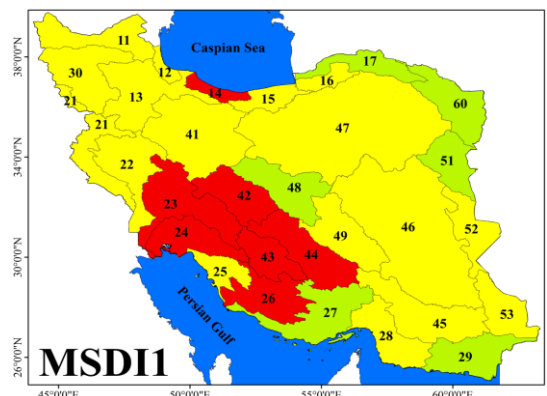
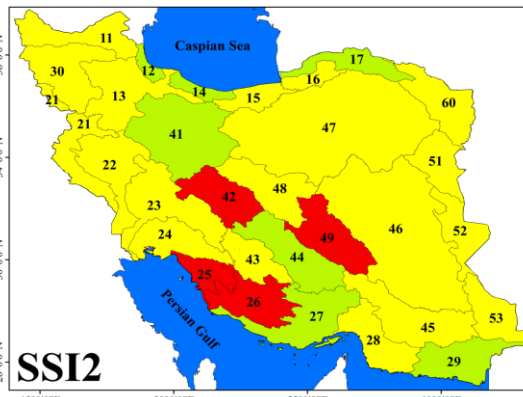
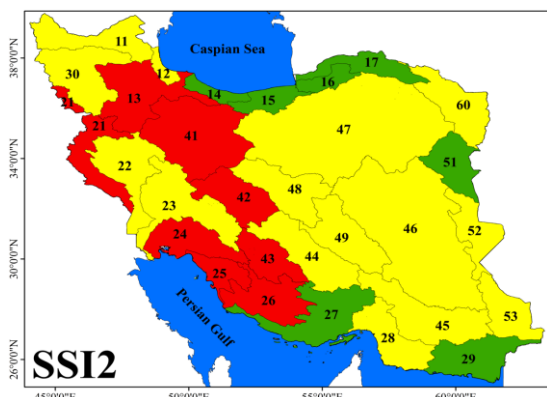
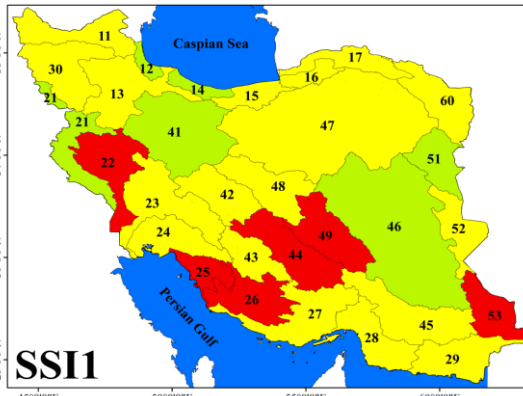
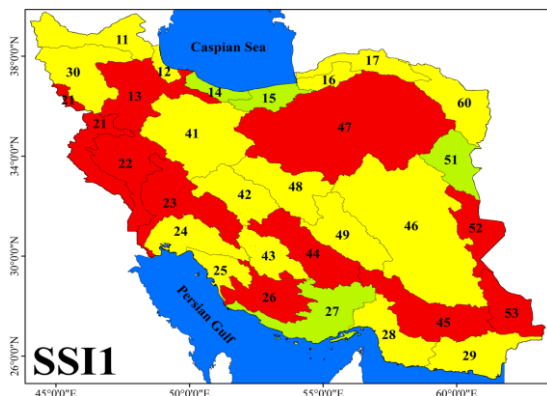
شکل ۳- مقایسه روند عملکرد گندم و جو دیم، بارش و تبخیر و تعرق مرجع در اقلیم‌های الف) مرطوب، ب) نیمه‌خشک، پ) خشک، و ت) خیلی خشک ایران (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

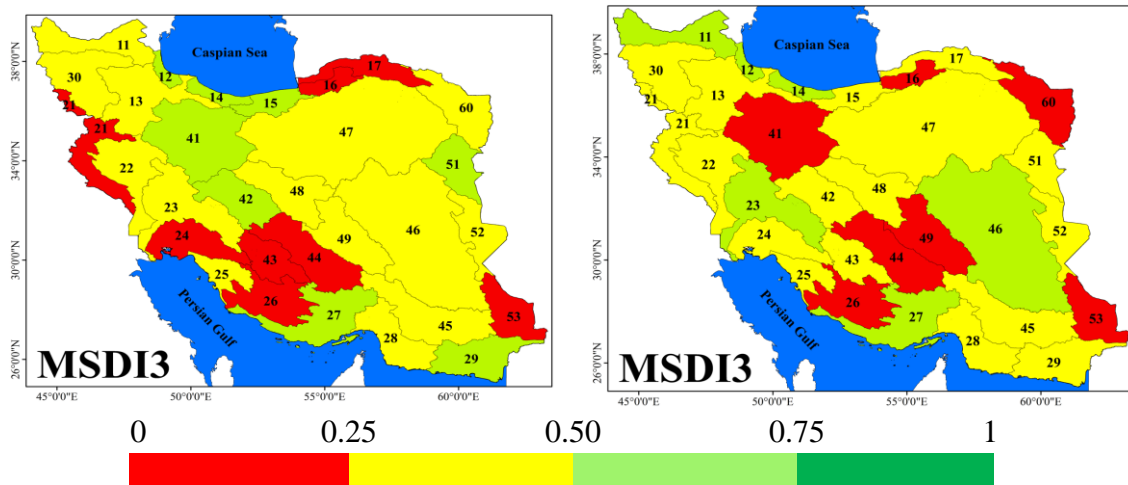
انعکاس اثرات منفی خشکسالی در محدوده‌ای از مناطق با ویژگی‌های بسیار متفاوت می‌باشد (Vicente-Serrano et al., 2016). این موضوع به‌ویژه در کشاورزی اهمیت دارد، زیرا اجزای پوشش گیاهی به‌طور یکسان به کمبود آب پاسخ نمی‌دهند. حساسیت و آسیب‌پذیری هر گیاه در برابر خشکسالی و ویژگی‌های اقلیمی خاص در پاسخ به خشکسالی تأثیر می‌گذارد (Contreras and Hunink, 2015). با این وجود، نتایج ارزیابی عملکرد شاخص‌های خشکسالی نشان داد که همبستگی‌ها به‌طور قابل توجهی در بین آنها متفاوت است، هرچند استثناهایی نیز مشاهده شد، که ممکن است بر راندمان آنها برای اهداف پایش خشکسالی تأثیر بگذارد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که $MSDI_1$ ضعیف‌ترین رابطه را با عملکرد گیاهان را داشت و پس از آن $SSI_{1&2}$ و $MDSI_{3&1}$ قرار گرفتند. نتایج این تحقیق با نتایج مطالعات سایرین که اثرات خشکسالی کشاورزی بر عملکرد گیاهان را در مقیاس جهانی (Vicente-Serrano et al., 2014) و منطقه‌ای (Peña-Gallardo et al., 2019a) ارزیابی کردند، مطابقت دارد.

توزیع همبستگی‌ها بین شاخص‌های چند متغیره بسیار مشابه بود. بیشترین همبستگی مناطق کشاورزی در حوضه ۳۰ و ۴۹ برای گندم و حوضه ۳۰ و ۴۳ برای جو دیده مشاهده شد. همبستگی‌های مشابهی بین شمال و شمال غربی ایران یافت شد. دلیل این مشابهت می‌تواند اقلیم نزدیک این مناطق به یکدیگر باشد. بر همین اساس یک شیب منطقی در همبستگی‌ها از شمال به جنوب وجود دارد. علاوه بر این، در برخی از مناطق جنوب شرقی، که گسترش سطح زیر کشت گندم زیاد نبوده است، رابطه قوی بین شاخص‌های خشکسالی و عملکرد گیاه وجود دارد. نتایج برای جو دیم نیز تقریباً نشان دهنده یک رابطه فضایی مشابه برای شاخص‌های مختلف خشکسالی بود.

مستقل از نوع گیاه و مقیاس زمانی در نظر گرفته شده، نتایج نشان داد که شاخص‌های خشکسالی محاسبه‌شده در مقیاس‌های زمانی مختلف (SPEI و SPI) ظرفیت بیشتری برای انعکاس تأثیرات اقلیمی بر عملکرد گیاهان، به نسبت یکسان دارند. عملکرد بهتر شاخص‌های خشکسالی دومتغیره عمدتاً به دلیل انعطاف‌پذیری آنها در







شکل ۴- همبستگی شاخص‌های خشکسالی با عملکرد گندم و جو در اقلیم‌های مختلف ایران

دیم، برای ۶۳/۷۴ درصد از مناطق کشاورزی عملکرد بیشترین همبستگی با هر دو شاخص خشکسالی در مقیاس زمانی ۱ و ۳ ماه نشان داد. این مقدار برای جو دیم در مورد ۴۹/۰۹ درصد مشاهده شد. در اقلیم‌های مورد بررسی که گندم کشت می‌شود، بیشترین همبستگی‌ها عمدتاً در مقیاس یک ماهه به‌ویژه برای SPI (۱۶/۷۶٪) بود، در حالی که این مقدار برای جو دیم ۱۶/۵۱ درصد گزارش گردید (جدول ۱).

رابطه شاخص‌های خشکسالی با عملکرد گیاهان: پاسخ‌های زمانی

جدول ۱ مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه را که در آن بیشترین همبستگی‌ها برای هر یک از دو شاخص SPI و SPEI یافت شد، بیان می‌دارد. بیشترین همبستگی‌ها برای مقیاس‌های زمانی کوتاه (۱ تا ۳ ماه) برای هر دو گیاه گندم و جو دیم مشاهده شد (به‌طور کلی تفاوت کمی بین شاخص‌ها گزارش گردید). برای گندم

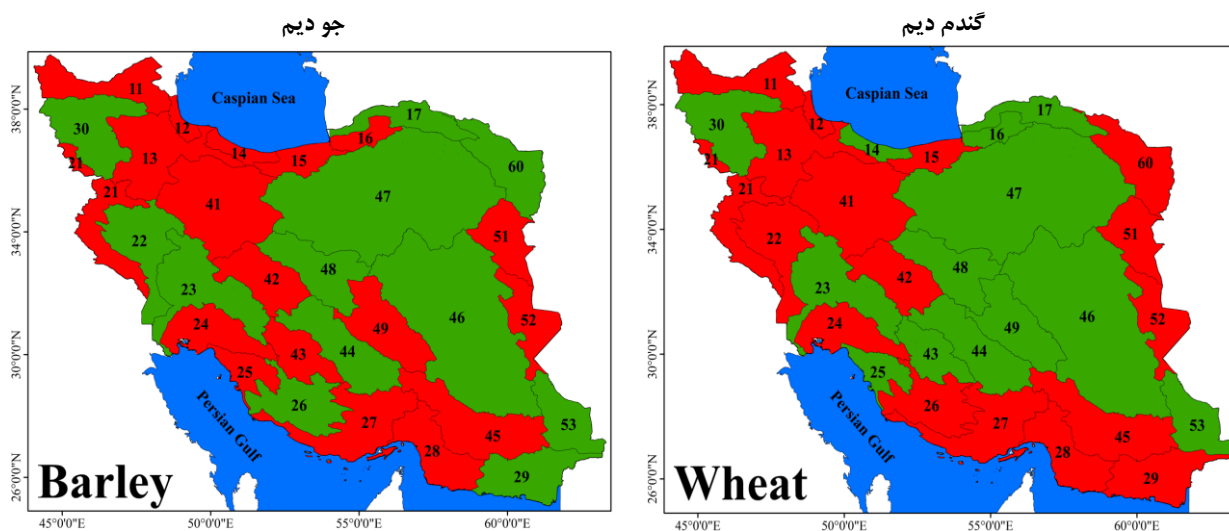
جدول ۱- درصد اقلیم‌های کشاورزی مورد تجزیه و تحلیل، که حداکثر همبستگی در مقیاس زمانی با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI یافت شد

سری زمانی				شاخص	اقلیم	گیاه
۱۲	۶	۳	۱			
۲/۱۴	۷/۶۵	۱۵/۵۳	۱۹/۳۹	SPI	مرطوب	۳
۳/۳۰	۶/۶۱	۱۴/۹۶	۱۷/۷۶	SPEI		
۴/۲۵	۹/۹۶	۱۸/۷۹	۲۱/۲۲	SPI	نیمه‌خشک	
۴/۱۱	۸/۱۴	۱۸/۰۵	۲۰/۱۳	SPEI		
۲/۲۶	۶/۲۳	۱۲/۶۵	۱۴/۶۵	SPI	خشک	
۱/۸۵	۶/۲۲	۱۳/۳۲	۱۴/۳۳	SPEI		
۱/۰۲	۵/۵۱	۱۲/۸۹	۱۳/۵۵	SPI	خیلی خشک	
-۰/۸۳	۴/۹۶	۱۱/۹۹	۱۳/۰۹	SPEI		
۲/۴۷	۶/۹۹	۱۴/۷۷	۱۶/۷۶		میانگین کل (%)	
۲/۱۲	۶/۸۱	۱۴/۲۱	۱۸/۴۵	SPI	مرطوب	
۱/۶۵	۶/۶۳	۱۳/۱۳	۱۶/۵۲	SPEI		
۳/۵۹	۷/۷۴	۱۶/۴۵	۲۲/۲۵	SPI	نیمه‌خشک	
۳/۶۴	۸/۸۰	۱۵/۶۳	۲۱/۸۷	SPEI		
-۰/۶۳	۶/۱۶	۱۱/۴۷	۱۳/۶۵	SPI	خشک	
-۰/۷۵	۶/۲۳	۱۱/۲۵	۱۳/۰۱	SPEI		
-۰/۲۳	۵/۹۶	۱۱/۰۳	۱۳/۳۶	SPI	خیلی خشک	
-۰/۰۹	۳/۳۶	۱۰/۱۹	۱۲/۹۶	SPEI		
۱/۵۸	۶/۴۶	۱۲/۹۲	۱۶/۵۱		میانگین کل (%)	

الگوهای فضایی همبستگی شاخص خشکسالی در مقیاس ماهانه

شکل ۵ توزیع فضایی بیشترین همبستگی شاخص‌های خشکسالی را در حوضه‌های اصلی کشور نشان می‌دهد. برای اکثر حوضه‌ها شاخص SPI بیشترین همبستگی را با عملکرد گندم و جو داریم. بر همین اساس برای مناطق کشاورزی تنوع فضایی قابل توجهی وجود داشت و همراه با نتایج حوضه‌ها، هیچ الگوی فضایی تعریف شده‌ای وجود نداشت که مناطق خاصی را که برای آنها یک شاخص در پایش خشکسالی مؤثرتر بود، متمایز کند. به‌عنوان مثال برای گندم و جو دییم، SPI بهترین همبستگی را با عملکرد در شمال، شمال غرب و جنوب کشور نشان داد، در حالی که در مرکز کشور، شاخص SPEI بهترین همبستگی را نشان داد. شباهت‌ها در میزان همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی چند مقیاسی و عملکرد گیاهان

از نظر آماری معنی‌دار بود. برای این منظور از آزمون t برای تعیین اینکه آیا تفاوت معنی‌داری در میزان همبستگی‌های به‌دست‌آمده با استفاده از شاخص‌های مختلف خشکسالی چند مقیاسی وجود دارد یا خیر، استفاده شد. این تفاوت‌های قابل‌توجهی را بین SPEI و MSDI در ۲۵ درصد از مناطق کشاورزی که در آن گندم دییم کشت می‌شد، نشان داد. این نواحی مناطقی بودند که همبستگی پایین‌تری بین عملکرد با شاخص‌های خشکسالی نشان دادند. نتایج نشان داد که برای مناطق با همبستگی بالا بین شاخص‌های خشکسالی و عملکرد گیاهان، این دو شاخص به یک اندازه مفید بودند. از طرف دیگر نسبت کمتری از مناطقی که جو دییم کاشته می‌شود، نشان داد که تفاوت‌های آماری بین شاخص‌ها وجود دارد. به‌طور کلی، این نشان دهنده مناسب بودن استفاده از هر یک از این شاخص‌های چند مقیاسی است (شکل ۵).



شکل ۵- توزیع مکانی شاخص‌های خشکسالی با بیشترین همبستگی با گندم و جو (رنگ قرمز SPI و رنگ سبز SPEI)

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف تاثیر شاخص خشکسالی SPI، SPEI، SSI_1 و SSI_2 ، $MSDI_1$ ، $MSDI_2$ و $MSDI_3$ در مقیاس زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه بر عملکرد گندم و جو دییم در اقلیم‌های مختلف ایران صورت گرفته است. ارزیابی اثربخشی شاخص‌های خشکسالی برای پایش تأثیر اقلیم بر عملکرد گیاهان، نمایش بهتر شاخص‌های دومتغیره را نشان داد. توانایی محاسبه این شاخص‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف باعث می‌شود که اثرات خشکسالی با دقت بیشتری نسبت به استفاده از شاخص‌های فاقد این ویژگی تعریف شود. شاخص‌های خشکسالی دومتغیره داده‌های اقلیمی کمتری نیاز داشتند (به‌ویژه SPI و SPEI) که در هنگام انجام تحلیل‌ها بر اساس عدم

دسترسی به داده‌های اقلیمی مورد توجه قرار می‌گیرد. نتایج ارزیابی کمی رابطه شاخص‌های خشکسالی با عملکرد گیاهان دییم، مشخص کرد که هر دو شاخص خشکسالی دومتغیره در کشور عملکرد بهتری نشان دادند. با این حال، SPI همبستگی بهتری داشت و برای این هدف بسیار توصیه می‌شود. همچنین با افزایش از سمت مقیاس زمانی ۱ به ۱۲ ماهه میزان همبستگی شاخص‌های خشکسالی کاهش یافت. در ایران مهم‌ترین دلیل افزایش تعداد پدیده خشکسالی با تداوم یکساله به دلیل وقوع بارش‌ها مربوط به فصل‌های پاییز و زمستان است. بر همین اساس بالاترین همبستگی‌های ثبت شده بین عملکرد گندم و جو دییم با شاخص‌های SPI و SPEI به ترتیب در اقلیم‌های نیمه‌خشک (۰/۱۷ و ۰/۱۷۷)، خشک (۰/۱۶۸ و ۰/۱۶۴)، خیلی خشک (۰/۱۶۳)

۵۱(۱۱): ۲۹۵۱-۲۹۳۷.

- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P. and Rötter, R. P. et al. 2014. Rising temperatures reduce global wheat production, *Nature Climate Change*. 5: 143-147.
- Baten, W. D. and Frame, J. S. 1959. The Polynomial Correlation Coefficient. *The American Mathematical Monthly*. 66(4): 283-287.
- Capa-Morocho, M., Ines, A. V. M., Baethgen, W. E., Rodríguez-Fonseca, B., Han, E. and Ruiz-Ramos, M. 2016. Crop yield outlooks in the Iberian Peninsula: Connecting seasonal climate forecasts with crop simulation models. *Agricultural systems*. 149: 75-87.
- Chen, T., Xia, G., Liu, T., Chen, W. and Chi, D. 2016. Assessment of drought impact on main cereal crops using a standardized precipitation evapotranspiration index in Liaoning Province, China. *Sustainability*. 8(10): 1069.
- Contreras, S. and Hunink, J. E. 2015. Drought effects on rainfed agriculture using standardized indices: A case study in SE Spain. *Drought: research and science-policy interfacing*. London: CRC Press, Taylor & Francis. 65-70.
- Ebrahimipour, M., Rahimi, J., Nikkiah, A. and Bazrafshan, J. 2014. Monitoring agricultural drought using the standardized effective precipitation index. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 141(1): 04014044.
- Esfahanian, E., Nejadhashemi, A. P., Abouali, M., Adhikari, U., Zhang, Z., Daneshvar, F. and Herman, M. R. 2017. Development and evaluation of a comprehensive drought index. *Journal of environmental management*. 185: 31-43.
- Eslamian, S., Ostad-Ali-Askari, K., Singh, V. P., Dalezios, N. R., Ghane, M., Yihdego, Y. and Matouq, M. 2017. A review of drought indices. *International Journal of Civil Engineering*. 3: 48-66.
- European Environment Agency (EEA). 2017. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016, An indicator-based report, Luxembourg, 424 pp.
- Forzieri, G., Feyen, L., Russo, S., Vousdoukas, M., Alfieri, L., Outten, S., Migliavacca, M., Bianchi, A., Rojas, R. and Cid, A. 2016. Multi-hazard assessment in Europe under climate change. *Climatic Change*. 137(1): 105-119.
- Hanjra, M. A. and Qureshi, M. E. 2010. Global water crisis and future food security in an era of climate

و ۰/۶۱) و مرطوب (۰/۶۴ و ۰/۵۲) مشاهده گردید.

بر اساس نتایج این پژوهش تعریف فضایی واکنش‌های عملکرد گیاهان به خشکسالی‌ها در مقیاس اقلیمی نمایان‌تر بود، یعنی در مکان‌هایی که وضوح فضایی مشخص‌تر باشد، الگوهای پاسخ‌ها را دقیق‌تر نشان می‌دهد، زیرا تنوع اقلیمی هر منطقه در این مقیاس بهتر به تصویر کشیده می‌شود. هم‌چنین بر اساس نتایج عملکرد گندم و جو در فصل بهار، هم در مقیاس زمانی کوتاه (۱ تا ۳ ماه) و هم متوسط (۶ ماه) نسبت به خشکسالی آسیب پذیرتر بودند. شرایط رطوبتی در اواخر پاییز و زمستان نیز بر عملکرد گیاهان موثر بود. هم‌چنین بیشترین رابطه بین شاخص‌های خشکسالی و عملکرد گیاهان در اقلیم‌های نیمه خشک و مرطوب یافت شد. روابط برای مناطق جنوبی و جنوب شرقی به دلیل دشواری توصیف اثرات خشکسالی در قلمرو متنوع و پیچیده ضعیف‌تر بود. شرایط اقلیمی و کشاورزی در ایران بسیار متنوع است. تنوع فضایی زیاد و پیچیدگی خشکسالی‌ها نیاز به ایجاد شاخص‌های دقیق و موثر برای پایش خشکسالی در مناطق آسیب‌پذیر کشاورزی را برجسته می‌کند. تغییرات اقلیمی به دلیل افزایش تنش خشکی روی گیاهان به احتمال زیاد منجر به از دست دادن عملکرد آن‌ها می‌شود، بنابراین در این زمینه ابزارهای مطالعاتی موثر از اهمیت بالایی برخوردار هستند.

منابع

- حسینی موغاری، س. م.، عراقی‌نژاد، ش. و ابراهیمی، ک. ۱۳۹۷. معرفی پایگاه‌های بارش شبکه‌بندی شده جهانی، نشریه آب و توسعه پایدار. ۵(۲): ۱۶۲-۱۵۳.
- دهقانی سرگزی، ه.، بذرافشان، ا. و زمانی، ح. ۱۴۰۰. بررسی اثرات خشکسالی هواشناسی-کشاورزی بر عملکرد گندم دیم در ایران با استفاده از شاخص SPEI. نیوار. ۴۵(۱۱۵-۱۱۴): ۲۶-۱۵.
- شرفی، س.، رمودی، م.، نصیری‌محللاتی، م.، گلوی، م. و کمالی، غ. ر. ۱۳۹۵. بررسی وضعیت رطوبتی و تولید گیاهان زراعی در اقلیم‌های مختلف ایران، نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار. ۲۷(۱): ۱۲۰-۱۰۳.
- شرفی، س.، صادقی، س.، نحوی‌نیا، م. ج.، عبدالهی‌پور، م. ۱۴۰۱. ارزیابی معادلات رگرسیونی چند متغیره در تخمین عملکرد گندم و جو دیم در اقلیم‌های مختلف ایران. مدیریت آب و آبیاری. ۱۲(۱): ۲۱۱-۲۰۱.
- عزیزی، ج.، رسول‌زاده، ع.، رحمتی، ا.، شایقی، ا. و باختر، آ. ۱۳۹۹. ارزیابی عملکرد داده‌های بازتحلیل شده Era-5 در تخمین بارش روزانه و ماهانه در استان اردبیل، تحقیقات آب و خاک ایران.

- Meng, Q., Chen, X., Lobell, D. B., Cui, Z., Zhang, Y., Yang, H. and Zhang, F. 2016. Growing sensitivity of maize to water scarcity under climate change. *Scientific reports*.6(1): 1-7.
- Moore, F. C. and Lobell, D. B. 2014. Adaptation potential of European agriculture in response to climate change. *Nature Climate Change*. 4(7): 610-614.
- Páscoa, P., Gouveia, C. M., Russo, A. and Trigo, R. M. 2017. The role of drought on wheat yield interannual variability in the Iberian Peninsula from 1929 to 2012. *International Journal of Biometeorology*. 61(3): 439-451.
- Peña-Gallardo, M., Qiring, S., Svoboda, M., Hannaford, J., Tomas- Burguera, M., Martín-Hernández, N., Domínguez-Castro, F. and El Kenawy, A. 2019a. Response of crop yield to different time-scales of drought in the United States: Spatio-temporal patterns and climatic and environmental drivers. *Agricultural and Forest Meteorology*. 264: 40-55.
- Peña-Gallardo, M., Vicente-Serrano, S. M., Domínguez-Castro, F. and Beguería, S. 2019b. The impact of drought on the productivity of two rainfed crops in Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 19(6): 1215-1234.
- Peña-Gallardo, M., Vicente-Serrano, S. M., Domínguez-Castro, F., Qiring, S., Svoboda, M., Beguería, S. and Hannaford, J. 2018. Effectiveness of drought indices in identifying impacts on major crops across the USA. *Climate Research*. 75(3): 221-240.
- Potopová, V., Boroneanț, C., Boincean, B. and Soukup, J. 2016. Impact of agricultural drought on main crop yields in the Republic of Moldova. *International Journal of Climatology*. 36(4): 2063-2082.
- Potopová, V., Štěpánek, P., Možný, M., Türkott, L. and Soukup, J. 2015. Performance of the standardised precipitation evapotranspiration index at various lags for agricultural drought risk assessment in the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology*. 202: 26-38.
- Sepulcre-Canto, G., Horion, S. M. A. F., Singleton, A., Carrao, H. and Vogt, J. 2012. Development of a Combined Drought Indicator to detect agricultural drought in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 12(11): 3519-3531.
- Sharafi, S. and Mir Karim, N. 2020. Investigating trend change. *Food policy*. 35(5): 365-377.
- Hao, Z. and AghaKouchak, A. 2013. Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model. *Advances in Water Resources*, 57: 12-18.
- Hao, Z. and Singh, V. P. 2015. Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology*. 527: 668-678.
- Hernandez-Barrera, S., Rodriguez-Puebla, C. and Challinor, A. J. 2017. Effects of diurnal temperature range and drought on wheat yield in Spain. *Theoretical and Applied Climatology*. 129(1): 503-519.
- IPCC. 2014. *Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel, T. and Minx, J. C., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, 1454 pp., USA.
- Liu, B., Asseng, S., Müller, C., Ewert, F., Elliott, J., Lobell, D. B. et al. 2016. Similar estimates of temperature impacts on global wheat yield by three independent methods. *Nature Climate Change*. 6(12): 1130-1136.
- Lobell, D. B., Schlenker, W. and Costa-Roberts, J. 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*. 333(6042): 616-620.
- Lobell, D. B. and Field, C. B. 2007. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming, *Environmental Research Letters*. 2(1): 014002.
- Loukas, A. and Vasiliades, L. 2004. Probabilistic analysis of drought spatiotemporal characteristics inThessaly region, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 4(5/6): 719-731.
- McEvoy, D. J., Huntington, J. L., Abatzoglou, J. T. and Edwards, L. M. 2012. An evaluation of multiscalar drought indices in Nevada and Eastern California. *Earth Interactions*. 16(18): 1-18.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. 17(22): 179-183.

- Vicente-Serrano, S. M., Lopez-Moreno, J.-I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J. M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F. and Espejo, F. 2014. Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*. 9(4): 044001.
- Wang, H., Vicente-serrano, S. M., Tao, F., Zhang, X., Wang, P., Zhang, C., Chen, Y., Zhu, D. and Kenawy, A. El. 2016. Monitoring winter wheat drought threat in Northern China using multiple climate-based drought indices and soil moisture during 2000–2013. *Agricultural and Forest Meteorology*. 228: 1–12.
- Webber, H., Ewert, F., Olesen, J. E., Müller, C., Fronzek, S., Ruane, A. C., Bourgault, M., Martre, P., Ababaei, B., Bindi, M., Ferrise, R., Finger, R., Fodor, N., Gabaldón-Leal, C., Gaiser, T., Jabloun, M., Kersebaum, K.-C., Lizaso, J. I., Lorite, I. J., Manceau, L., Moriondo, M., Nendel, C., Rodríguez, A., Ruiz-Ramos, M., Semenov, M. A., Siebert, S., Stella, T., Stratonovitch, P., Trombi, G. and Wallach, D. 2018. Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe. *Nature communications*. 9(1): 1-10.
- Zhu, Y., Wang, W., Singh, V. P. and Liu, Y. 2016. Combined use of meteorological drought indices at multi-time scales for improving hydrological drought detection. *Science of the Total Environment*. 571: 1058-1068.
- Zipper, S. C., Qiu, J. and Kucharik, C. J. 2016. Drought effects on US maize and soybean production: spatiotemporal patterns and historical changes. *Environmental Research Letters*. 11(9): 094021.
- Zuecco, G., Penna, D. and Borga, M. 2018. Runoff generation in mountain catchments: long-term hydrological monitoring in the Rio Vauz Catchment, Italy. *Cuadernos de investigación geográfica/Geographical Research Letters*. (44): 397-428.
- changes of annual mean temperature and precipitation in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 13(16): 1-11.
- Sharafi, S. and Mohammadi Ghaleni, M. 2022. Spatial assessment of drought features over different climates and seasons across Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 147(3–4): 941–957.
- Sharafi, S., Ramroudi, M., Nassiri, M., Galavi, M. and Kamali, G. 2016. Role of early warning systems for sustainable agriculture in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 9(734): 1-17.
- Svoboda, M., Hayes, M. and Wood, D. 2012. *Standardized precipitation index: user guide*.
- Spinoni, J., Vogt, J. V., Naumann, G., Barbosa, P. and Dosio, A. 2018. Will drought events become more frequent and severe in Europe? *International Journal of Climatology*. 38(4): 1718–1736.
- Tabari, H., Nikbakht, J. and Talaei, P. H. 2013. Hydrological drought assessment in Northwestern Iran based on streamflow drought index (SDI). *Water resources management*. 27(1): 137-151.
- Tack, J., Barkley, A., and Nalley, L. L. 2015. Effect of warming temperatures on US wheat yields. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 112 (22): 6931–6936.
- Tian, L., Yuan, S. and Quiring, S. M. 2018. Evaluation of six indices for monitoring agricultural drought in the south-central United States. *Agricultural and forest meteorology*. 249: 107-119.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S. and López-Moreno, J. I. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*. 23(7): 1696-1718.
- Vicente-Serrano, S. M., Camarero, J. J., Olano, J. M., Martín-Hernández, N., Peña-Gallardo, M., Tomás-Burguera, M., Gazol, A., Azorin-Molina, C., Bhuyan, U. and El Kenawy, A. 2016. Diverse relationships between forest growth and the Normalized Difference Vegetation Index at a global scale. *Remote Sensing of Environment*. 187: 14–29.

Impact of Drought on the Yield of Rainfed Wheat and Barley across Different Climates of Iran

S. Sharafi^{1*}, M. Mohammadi Ghaleni²

Received: Aug.27, 2022

Accepted: May.09, 2022

Abstract

Drought events in dry and semi dry climates are of great importance due to the extensive and costly effects they have on various economic and environmental sectors. In recent years, the effects of this natural phenomenon have been very evident, especially on rainfed crops. In this study, the effects of drought on two strategic rainfed crops of Iran (wheat and barley) were evaluated. Since the agricultural sector is vulnerable to climate change, it is very important to identify the most appropriate tools to monitor the impact of climate on the productivity of agricultural products. Therefore, evaluating the effects of drought indicators is the most effective tool. Various drought indicators have been used to evaluate the impact of drought on rainfed wheat and barley yields across different climates of Iran, which include; Standard Precipitation Index (SPI), Standard Precipitation Evaporation and Transpiration Index (SPEI), Standard Soil Moisture Index of the upper two layers (SSI₁ and SSI₂), Standard Multivariate Drought Index including; MSDI₁ was based on precipitation and reference evapotranspiration (P&ET_{ref}), MSDI₂ was based on precipitation and soil moisture in the first soil layer (P&SM₁), and MSDI₃ was based on precipitation and soil moisture in the second soil layer (P&SM₂). Two sets of crop performance data at different spatial scales and time periods were used in the analysis. The results showed that the drought indices calculated in different time scales of SPI and SPEI had the highest correlation with rainfed wheat and barley yields in semi dry (0.7 and 0.77), dry (0.68 and 0.64), very dry (0.63 and 0.61) and humid (0.64 and 0.52) climates, respectively. Also, the results showed that different patterns of response of crops to drought occur depending on the climate type, the period of the year and the time scale of the drought. The different responses across the country were related to the season and the values of different climate variables.

Keywords: Climate change, Multivariate indicators, Rainfed farming, Reference evapotranspiration, Yield gap

1- Assistant Professor, Department of Environment Science and Engineering, Arak University, Arak, Iran

2- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Arak University, Arak, Iran

(*- Corresponding Author Email: s-sharafi@araku.ac.ir)