

مقاله علمی-پژوهشی

رابطه شاخص‌های خشکسالی با انتشار گازهای گلخانه‌ای بخش کشاورزی ایران

فائزه حیدری<sup>۱</sup>، سعید شرفی<sup>۲\*</sup>، مهدی محمدی قلعه‌نی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸

چکیده

ارزیابی رابطه بین رخداد‌های خشکسالی و انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از فعالیت‌های کشاورزی به دلیل تأثیرات گسترده‌ای که در محیط زیست و اقتصاد دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. هدف از این مطالعه بررسی رابطه بین انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از تولید ۱۸ گیاه زراعی اصلی در قالب پنج دسته غالب شامل: غلات (گندم، جو، برنج و ذرت)، بقولات (یونجه، لوبیا، نخود و عدس)، دانه‌های روغنی (سویا، آفتابگردان، کلزا، گلرنگ، کرچک، کنجد و بادام‌زمینی)، غده‌ای (سیب‌زمینی و چغندرقد) و الیافی (پنبه) با شاخص‌های خشکسالی شامل: شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)، شاخص رطوبت خاک استاندارد شده در دو لایه بالایی خاک (SSI<sub>1</sub> و SSI<sub>2</sub>)، شاخص خشکسالی استاندارد دومتغیره شامل: MSDI<sub>1</sub> بر اساس بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل (P&ET<sub>ref</sub>)، MSDI<sub>2</sub> بر اساس بارش و رطوبت خاک در لایه اول خاک (P&SM<sub>1</sub>) و MSDI<sub>3</sub> بر اساس بارش و رطوبت خاک در لایه دوم خاک (P&SM<sub>2</sub>) در اقلیم‌های مختلف ایران (مرطوب ساحلی، کوهستانی، نیمه کوهستانی، نیمه بیابانی، بیابانی و بیابان ساحلی) طی سال‌های ۲۰۲۰-۱۹۸۰ بود. نتایج نشان داد که متغیر اقلیمی بارش ارتباط معنی‌داری با افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در اقلیم‌های مختلف ایران ندارد. در صورتی که مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل در طی سال‌های مورد بررسی در این مطالعه روند معنی‌داری را نشان داد. همچنین بیشترین انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال ۲۰۱۹ معادل ۴۴۳ میلیون تن گزارش شد، که بیشترین انتشار گازهای گلخانه‌ای به ترتیب مربوط به انرژی برق (۴۷/۱٪) و کود نیتروژن (۲۵/۷۵٪) بود. همچنین ارزیابی اثر بخشی شاخص‌های خشکسالی برای پایش تأثیر اقلیم بر انتشار گازهای گلخانه‌ای، نمایش بهتر شاخص‌های SPI، SPEI و MSDI<sub>1</sub> 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. این شاخص‌ها داده‌های اقلیمی کمتری نیاز داشتند، که این موضوع در هنگام انجام تحلیل‌ها بر اساس عدم دسترسی به داده‌های اقلیمی مورد توجه قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: امنیت غذایی، انتشار کربن، شاخص‌های چندمتغیره، معیارهای آماری.

مقدمه

این ۵۰ درصد، حدود ۷۷ درصد برای دام، چه به‌عنوان زمین برای چرا یا برای کشت خوراک دام استفاده می‌شود (FAO, 2020). بنابراین تولید غذا و بخش کشاورزی بزرگترین مصرف‌کننده آب نیز هستند، که به‌طور متوسط ۸۰ درصد از مصرف آب در دنیا صرف فعالیت‌های بخش کشاورزی می‌گردد (ERS, 2019). وانگهی ایران یکی از کشورهای است که در معرض آسیب‌های ناشی از تغییرات اقلیمی گسترده قرار دارد. انتظار می‌رود بسیاری از میزان تولید محصولات کشاورزی به‌ویژه در اقلیم‌های کوهستانی، نیمه کوهستانی، نیمه بیابانی، بیابانی و ساحل بیابانی کشور به دلیل کاهش بارندگی و افزایش نوسانات بارندگی بین سالانه و درون سالانه، و کاهش در دسترس بودن آب به شدت کاهش یابد. همچنین انتظار می‌رود که تغییرات آبی در رژیم بارش، همراه با افزایش درجه حرارت، رویدادهای وخیم اقلیمی را به‌همراه داشته باشد (Webber et al., 2018; )

بدون شک در مقیاس جهانی، سیستم‌های تامین کننده مواد غذایی (بخش کشاورزی)، بزرگترین نیروی کار هستند و بنابراین سهم زیادی در انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) دارند. به‌عنوان مثال، در سال ۲۰۱۹، ۱۴/۴۴ میلیون نفر شاغل در ایران مربوط به بخش‌های کشاورزی و مواد غذایی بوده که ۱۷/۴ درصد از کل اشتغال کشور را شامل می‌گردند (MAJ, 2019). از طرفی نیز، تقریباً نیمی از زمین‌های قابل سکونت در جهان برای کشاورزی استفاده می‌شود. از

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی محیط‌زیست (گرایش آلودگی‌های محیطی) دانشگاه اراک، اراک، ایران.

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران  
(\*) ایمیل نویسنده مسئول: (Email: s-sharafi@araku.ac.ir)

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

سیلاب سالانه (Arora, 2002) استفاده شوند. تا آنجا که به انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط می‌شود، یک رابطه بین درجه‌حرارت یا رطوبت خاک و انتشار گازهای گلخانه‌ای در مطالعات قبلی گزارش شده است (Amos et al., 2005; Mancinelli et al., 2010; Parkin and Kaspar, 2003).

در مطالعات اقلیمی، اثرات عوامل مختلف مربوط به خاک، اقلیم و سیستم‌های زراعی را می‌توان با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر مدل‌های کاربردی تحلیل کرد. از طرف دیگر چنین شاخص‌هایی هنوز تعریف نشده‌اند، به‌ویژه برای ارزیابی تأثیر وقوع خشکسالی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای که عمدتاً در کشاورزی پایدار مطرح می‌گردد (Bocktaller et al., 2008). به‌عنوان مثال در مطالعه‌ی مانسینلی و همکاران ویژگی‌های شیمیایی و بیوشیمیایی خاک، تولید و کیفیت زی‌توده و عوامل اقلیمی به‌منظور شناسایی شاخص‌های خشکسالی در سطح مزرعه برای ارزیابی زود هنگام نتایج عملکرد گیاه، اندازه‌گیری شده از نظر انتشار گازهای گلخانه‌ای در اقلیم مدیترانه‌ای انجام شد (Mancinelli et al., 2013). نتایج آنها نشان داد که مقادیر شاخص خشکی، در زمان کشت گیاه ممکن است باعث افزایش مقادیر ماده آلی خاک شده باشد و کانی‌سازی خاک را در طول فصل رشد محصولات سبزی را ارتقا دهد. در نهایت، هیچ مدرکی بین انتشار گازهای گلخانه‌ای و شاخص خشکی یافت نکردند. بنابراین هدف این مطالعه بررسی و شناسایی مشخصات شاخص‌های خشکسالی در مقیاس‌های ۱، ۳، ۹ و ۱۲ ماهه، (۲) ارزیابی مکانی شاخص‌های خشکسالی در اقلیم‌های ساحلی مرطوب، کوهستانی، نیمه کوهستانی، نیمه بیابانی، بیابانی و ساحلی بیابانی، و (۳) تحلیل آماری شاخص‌های خشکسالی مورد بررسی با آلاینده‌ی ناشی از بخش کشاورزی در مقیاس کشور ایران طی سال‌های ۲۰۲۰-۱۹۸۰ بود.

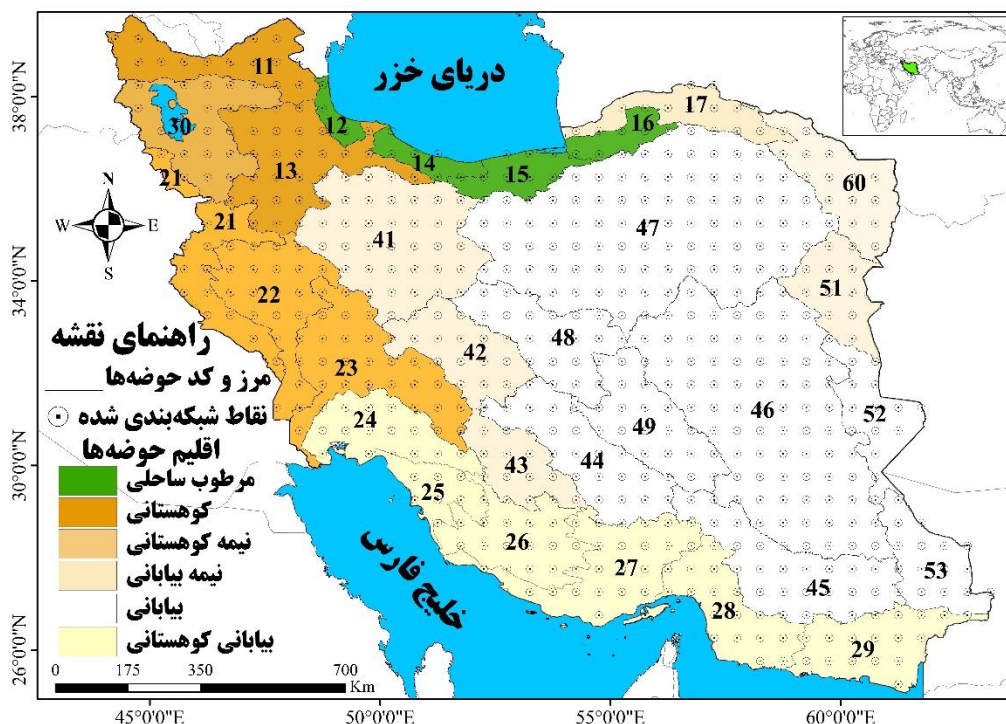
## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه و داده‌های اقلیمی

در این پژوهش، ۳۰ حوضه آبریز درجه دوم در سراسر ایران به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند. تقسیم‌بندی حوضه‌های ۳۰ گانه بر اساس متغیرهای بارش و تبخیر-تعرق، نسبت این دو به‌عنوان شاخص خشکسالی انجام گردید. به همین منظور و به‌دلیل گستره وسیع فضایی، این حوضه‌ها به‌ترتیب در شش اقلیم شامل: مرطوب ساحلی (حوضه‌های ۱۲، ۱۴، ۱۵ و ۱۶)، کوهستانی (حوضه‌های ۱۱، ۱۳ و ۳۰)، نیمه کوهستانی (حوضه‌های ۱۷، ۲۱، ۲۲ و ۲۳)، نیمه بیابانی (حوضه‌های ۴۱، ۴۲، ۴۳، ۵۱ و ۶۰) بیابانی (حوضه‌های ۴۴، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۴۸، ۴۹، ۵۲ و ۵۳) و ساحل بیابانی (حوضه‌های ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸ و ۲۹) طبقه‌بندی شدند (شکل ۱).

(Sharafi and Ghalehi, 2022) که مدیریت کشاورزی را تحت تأثیر قرار خواهند داد (Asseng et al., 2014; Tack et al., 2015). مطالعات نشان داده است که تغییرات بارش و درجه‌حرارت در مناطق خشک منجر به رویدادهای خشکسالی شدیدتر و طولانی‌تر در دهه‌های آینده خواهد شد (Vicente-Forzieri et al., 2016; Spinoni et al., 2018; Sharafi and Serrano et al., 2014; Mir Karim, 2020; Sharafi and Ghalehi, 2022). بنابراین با توجه به آنکه کشاورزی نقش کلیدی در امنیت غذایی دارد، این موضوع از اهمیت بسیاری برخوردار است. به‌طور کلی اقلیم‌های خشک، مناطقی را توصیف می‌کنند که در معرض کمبود دائمی یا فصلی آب هستند. بر همین اساس مناطق مزبور در حال حاضر ۴۲ درصد از سطح زمین را در بر دارند. زیست‌بوم‌های موجود در اقلیم‌های خشک نقش مهمی در چرخه جهانی کربن دارند و بر روند و تغییرپذیری انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای، به‌دلیل حساسیت بالای آنها به تغییرات آب‌وهوایی بین سالانه، تأثیر دارند (Lian et al., 2021).

ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از محصولات کشاورزی بدون شک به امنیت غذایی نسل‌های آینده کمک خواهد کرد (Yan et al., 2019). در همین راستا، بررسی رابطه بین متغیرهای اقلیمی (به منظور ارزیابی شاخص‌های خشکسالی کشاورزی و هیدرولوژیکی) با انتشار گازهای گلخانه‌ای در استراتژی‌های بلندمدت برای تعیین راه‌حل‌های پایدار بهینه و شناسایی حساس‌ترین («ضعیف‌ترین حلقه‌ها») اجزای سیستم ضروری است. مطالعه بلندمدت تغییرات متغیرهای اقلیمی در چارچوب ارزیابی شاخص‌های خشکسالی و مقادیر دی‌اکسید کربن انتشار یافته از محصولات کشاورزی هم‌چنین می‌تواند به پیش‌بینی تولید محصول (Sarauskis et al., 2019) و انتشار گازهای گلخانه‌ای (Khoshnevisan et al., 2013) کمک نماید. بسیاری از مطالعات انتشار گازهای گلخانه‌ای و شاخص‌های خشکسالی را طی چند هفته تا چند ماه تجزیه و تحلیل کرده‌اند که به طور قابل توجهی توانایی تعیین اثرات بلندمدت تصمیمات بر پتانسیل خالص گرمایش جهانی را محدود می‌کند (Snyder et al., 2009; Sarauskis et al., 2019). نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که انتشار گازهای گلخانه‌ای تحت یک چرخه خشکسالی و ترسالی مجدد ممکن است قابل استنادتر باشد (von Gómez-Gener et al., 2014; Jin et al., 2016, 2016)، اما تا کنون چنین اثراتی به‌طور دقیق ارزیابی نشده‌اند (Kosten et al., 2018). از طرف دیگر تاکنون متغیرهای بارش و درجه‌حرارت هوا به‌عنوان شاخص خشکی اغلب برای طبقه‌بندی اقلیم به‌منظور شناسایی حساسیت به شرایط خشکسالی استفاده شده‌اند. از طرف دیگر مدل‌های پیشرفته‌تر و چندمتغیره می‌توانند برای ساخت مدل‌های آب و هوایی (Oury, 1965) یا برای ارزیابی اثرات تغییرات آب و هوایی بر رواناب و



شکل ۱- موقعیت مکانی ۶۲۱ نقطه شبکه‌بندی شده در ۳۰ حوضه مطالعاتی در اقلیم‌های مختلف ایران

متنوع، بارش در سراسر ایران دارای تنوع مکانی بالایی است و شدت آن بین شهر یور و اردبیهشت کاهش می‌یابد و تقریباً ۹۰-۷۰ درصد بارش‌های سالانه را تشکیل می‌دهد. کمترین و بیشترین مقادیر بارش به ترتیب در اقلیم‌های بیابانی (۶/۷۱ میلی‌متر در متر مربع در حوضه ۵۳) و مرطوب ساحلی (۱۲۷/۴۷ میلی‌متر در متر مربع در حوضه ۱۲) ثبت شده است. هم‌چنین روند کاهشی تبخیر و تعرق پتانسیل از اقلیم‌های بیابانی (۱۷۳/۸۸ میلی‌متر در متر مربع در حوضه ۴۵) به مرطوب ساحلی (۵۵/۲۹ میلی‌متر در متر مربع در حوضه ۱۴) ملاحظه می‌گردد (شکل ۲-الف). مقادیر رطوبت خاک در لایه اول و دوم خاک از  $2/9 < 2/6$  و  $2/3$  مترمکعب بر مترمکعب در اقلیم مرطوب ساحلی، کوهستانی و نیمه کوهستانی (بالاترین رطوبت خاک در لایه اول و دوم خاک گزارش شده با مقدار  $3/7$  میلی‌متر در حوضه ۱۲)، نیمه بیابانی، بیابانی ساحلی و بیابانی به ترتیب به کمتر از  $1/1$ ،  $0/6$  و  $0/3$  میلی‌متر (کمترین رطوبت خاک در لایه اول و دوم خاک گزارش شده با مقدار  $0/1$  و  $0/05$  میلی‌متر به ترتیب در حوضه‌های ۲۴ و ۲۲) (شکل ۲-ب).

#### داده‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای

ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از تولید گیاهان بر اساس میانگین عملکرد در هکتار و ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای نهاده‌های کشاورزی فهرست شده در جدول ۱ انجام شد. سپس داده‌ها

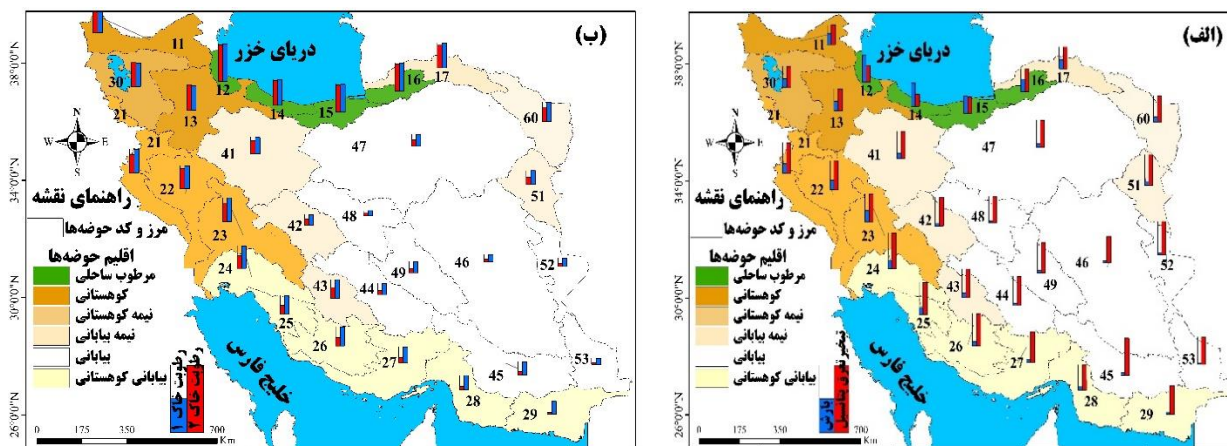
در این پژوهش از پایگاه داده‌های جهانی شبکه‌بندی شده (با توجه به دسترسی آسان و کیفیت مکانی و زمانی مناسب داده‌های آنها) استفاده گردید. از جمله مهم‌ترین پایگاه‌های اطلاعاتی که دامنه وسیعی از داده‌ها را اختیار محققین می‌گذارد، می‌توان به داده‌های سری زمانی نسخه پنجم داده‌های بازتحلیل شده (ERA5) مرکز پیش‌بینی میان مدت اروپا<sup>۱</sup> اشاره کرد (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۹؛ شرفی و همکاران، ۱۴۰۱). داده‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل؛ مشاهدات هواشناسی روزانه (۲۰۲۰-۱۹۸۰) و اطلاعات جغرافیایی بودند. ۶۲۱ نقطه شبکه‌بندی هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفت و سوابق شامل؛ بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل، رطوبت خاک در عمق اول و دوم دو لایه بالایی خاک دانلود شد (شکل ۱).

شکل ۲، مقادیر میانگین متغیرهای بارش (میلی‌متر در سال)، تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر در سال)، رطوبت خاک در لایه اول و رطوبت خاک در لایه دوم خاک (مترمکعب در مترمکعب) به تفکیک حوضه‌های ۳۰ گانه را در اقلیم‌های مختلف کشور نشان می‌دهد. دامنه ارتفاع از ۲۶- تا ۲۴۶۵ متر از سطح دریا از شمال غربی به جنوب شرقی کاهش می‌یابد (شکل ۲). تحت تأثیر اقلیم مدیترانه‌ای در شمال غربی تا آب و هوای موسمی در جنوب و شرایط توپوگرافی

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

گیاه زراعی اصلی کشور و در قالب پنج دسته غالب شامل؛ غلات (گندم، جو، برنج و ذرت)، بقولات (یونجه، لوبیا، نخود و عدس)، دانه‌های روغنی (سویا، آفتابگردان، کلزا، گلرنگ، کرچک، کنجد و بادام‌زمینی)، غده‌ای (سیب‌زمینی و چغندرقد) و الیافی (پنبه) استفاده شد.

با ضرایب مورد نظر (به‌عنوان مثال لیتر سوخت دیزل) برای تولید هر یک از گیاهان زراعی (به‌عنوان مثال تن عملکرد) ارزیابی و محاسبه شد. مقادیر هر دسته ورودی فهرست شده در جدول ۱ آمده است. در نهایت، ضرایب انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از تولید گیاهان زراعی جهت محاسبه، استفاده شد. در این مطالعه از مقادیر میانگین عملکرد سالانه در هکتار از دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ در ایران برای ۱۸



شکل ۲- میانگین مقادیر الف) بارش (میلی‌متر در سال) و تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر در سال) و ب) رطوبت لایه اول و دوم خاک (متر مکعب در متر مکعب) در حوضه‌ها و اقلیم‌های مختلف ایران

جدول ۱- ضرایب انتشار گازهای گلخانه‌ای نهاد های کشاورزی

نهاد ورودی	واحد	ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای (kgCO <sub>2eq</sub> . unit <sup>-1</sup> )	رفرنس
ماشین‌آلات	مگاژول	۷۱	Dyer and Desjardins, 2006
سوخت دیزل	لیتر	۲/۷۶	Dyer and Desjardins, 2003
نیروی برق*	کیلووات‌ساعت	۰/۶۰۸	Karan and Asadi, 2018
نیتروژن	کیلوگرم	۱/۳	Lal, 2004
فسفر	کیلوگرم	۰/۲	Lal, 2004
پتاسیم	کیلوگرم	۰/۲	Lal, 2004
آفت‌کش	کیلوگرم	۵/۱	Lal, 2004

\* سوخت LNG در نیروگاه‌ها

### شاخص‌های خشکسالی

شاخص بارش استاندارد شده<sup>۱</sup> 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 بارش به یک متغیر نرمال استاندارد، با میانگین برابر با صفر و واریانس برابر با یک، با توزیع گامای ناقص تنظیم شده است (McKee et al., 1993). شاخص بارش استاندارد شده یک شاخص هواشناسی است که در سراسر جهان استفاده می‌شود و به‌ویژه توسط

سازمان جهانی هواشناسی (Svoboda et al., 2012) برای پیش‌بینی خشکسالی و پیش‌آگاهی اولیه توصیه می‌شود (Sharafi et al., 2016; Salehnia et al., 2018).

ویسنه-سرانو و همکاران شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده<sup>۲</sup> 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 پتانسیل) را فراهم می‌کند و مقادیر با استفاده از

2- Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

1- Standardized Precipitation Index (SPI)

برای محاسبه  $ET_{ref}$  معرفی شده‌اند و برخی از محققان اثربخشی این روش‌ها را مقایسه کرده‌اند (Sheffield et al., 2012; Yahya et al., 2020). تعیین اختلاف تجمعی بین بارندگی و  $ET_{ref}$  در بازه‌های زمانی مختلف (۲-، ۶-، ۲۴-، ۴۸- ماهه) به شرح رابطه ۳، است:

$$X_{s,j}^n = \sum_{t=13-n+j}^{12} D_{s-1,t} + \sum_{t=1}^j D_{s,j} \text{ if } j \geq n \quad (3)$$

$$X_{s,j}^n = \sum_{s=j-n+1}^{12} D_{s-1} \text{ if } j \geq n$$

که در آن  $X_{s,j}^n$  انباشت تفاوت بین  $P$  و  $ET_{ref}$  در مقیاس زمانی ماه  $n$  در ماه  $j$  ام سال سال  $s$  ام است،  $D_{s,t}$  تفاوت بین  $P$  و  $ET_{ref}$  ماهانه در ماه  $t$  ام و سال  $s$  ام است. با توجه به این واقعیت که نسخه اصلی ممکن است حاوی مقادیر منفی باشد،  $SPEI$  از سه پارامتر توزیع احتمال لجستیک پیشنهاد شده توسط ویسنته-سرانو و همکاران استفاده می‌کند (Vicente-Serrano et al., 2010). برای توالی داده‌های همه مقیاس‌های زمانی، تابع تجمعی توزیع احتمال لجستیک ( $G$ ) به صورت رابطه ۴، ارائه می‌گردد:

$$F(G) = \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{g - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (4)$$

که در آن  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  به ترتیب مقادیر پارامترهای مقیاس، شکل و مبدأ هستند. محاسبات را می‌توان با استفاده از معادلات معرفی شده توسط ویسنته-سرانو و همکاران انجام داد (Vicente-Serrano et al., 2010). احتمال یک مقدار معین  $X_{s,j}^n$  برابر با مقدار  $p$  است (رابطه ۵).

$$p = 1 - F(G) \quad (5)$$

$$\text{if } p \leq 0.5, \quad w = \sqrt{-2 \ln p} \quad (6)$$

$$SPEI = W - \left[ \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \right] \quad (7)$$

$$\text{if } p > 0.5 \quad w = \sqrt{-2 \ln(1-p)} \quad (8)$$

$$SPEI = W - \left[ \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \right] \quad (9)$$

$$C_0 = 2.515517, d_1 = 1.432788$$

$$C_1 = 0.802853, d_2 = 0.189269$$

$$C_2 = 0.010328, d_3 = 0.001308$$

مقادیر محاسبه شده  $SPEI$  و  $SPI$  در جدول ۱، دسته‌بندی شده

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 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).

$SPI$  یک شاخص اصلی محاسبه خشکسالی هواشناسی است، که به دلیل سادگی محاسبات کمی‌سازی مقادیر خشکسالی، تشخیص و ارزیابی خشکسالی هواشناسی، یک شاخص شناخته شده و پرکاربرد است. شاخص  $SPI$  اولین بار توسط مک‌کی و همکاران معرفی شد (McKee et al., 1993). محاسبه مشخصات مختلف خشکسالی مانند فراوانی، شدت و مدت زمان در مقیاس‌های زمانی مختلف شناسایی و پایش خشکسالی را در یک منطقه خاص امکان‌پذیر می‌سازد. استفاده از  $SPI$  برای اندازه‌گیری تغییر خشکسالی مرتبط با تغییرات آب و هوایی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این شاخص توسط سازمان جهانی هواشناسی<sup>۱</sup> به‌عنوان یکی از بهترین ابزارها در در پایش رخدادهای خشکسالی توصیه شده است. لازم به یادآوری است که یک رویداد خشکسالی زمانی شروع می‌شود که مقدار  $SPI$  به کمتر از صفر برسد و زمانی پایان می‌یابد که مقدار  $SPI$  دوباره به حالت مثبت برگردد. در این مطالعه مقادیر  $SPI$  با استفاده از رابطه ۱، محاسبه شد:

$$SPI = \left( \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \right) \quad (1)$$

که در آن  $X_i$  مقادیر بارش در ماه  $i$  ام،  $\bar{X}$  مقادیر میانگین بارش در طولانی‌مدت و  $\sigma$  انحراف معیار بارش‌ها برای دوره تعیین شده می‌باشد.  $SPEI$ ، تکامل یافته  $SPI$  به‌خوبی تثبیت شده و به رسمیت شناخته شده توسط سازمان جهانی هواشناسی، اولین بار توسط ویسنته-سرانو و همکاران توسعه یافت (Vicente-Serrano et al., 2010). این شاخص بر اساس داده‌های ورودی بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل<sup>۲</sup> برای محاسبه تعادل آب‌وهوایی است که آن را از  $SPI$  متفاوت می‌کند. معادله تعادل آب اقلیمی بر اساس رابطه ۲، است:

$$D_i = P_i - ET_{ref} \quad (2)$$

که در آن  $P$  و  $ET_{ref}$  به ترتیب نشان دهنده بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل است،  $D$  نشان دهنده تفاوت بین  $P$  و  $ET_{ref}$  و  $i$  نشان دهنده تعداد ماه‌های شمارش شده می‌باشد. روش‌های متعددی

1- World Meteorological Organization (WMO)

2- Reference Evapotranspiration ( $ET_{ref}$ )

اولیه آزمون همبستگی مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و متغیرهای بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل نشان داد که همبستگی مثبت و معنی‌داری بین مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و تبخیر و تعرق پتانسیل در کلیه اقلیم‌ها وجود دارد. بر همین اساس بیشترین همبستگی به ترتیب در اقلیم‌های مرطوب ساحلی (۰/۸۴)، کوهستانی (۰/۷۷) و نیمه بیابانی (۰/۶۱) مشاهده گردید. از طرف دیگر بین مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و رطوبت خاک در لایه‌های بالایی خاک در کلیه اقلیم‌های مورد بررسی منفی و معنی‌دار گزارش گردید. به طوری که بیشترین همبستگی به ترتیب در اقلیم‌های نیمه بیابانی (به ترتیب -۰/۸۵ و -۰/۷۹) و بیابانی (-۰/۷ و -۰/۶۵) مشاهده گردید. هم‌چنین کمترین همبستگی بین مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و رطوبت خاک در دو لایه بالایی خاک در اقلیم نیمه کوهستانی (به ترتیب -۰/۳ و -۰/۲۶) گزارش گردید.

## نتایج و بحث

### رابطه انتشار گازهای گلخانه‌ای با متغیرهای بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل

نتایج نشان داد که پراکندگی بارش ارتباط معنی‌داری با افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در اقلیم‌های مختلف ایران ندارد. در صورتی که مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل در طی سال‌های مورد بررسی در این مطالعه روند معنی‌داری را نشان داد. نکته مهم دیگری که در این مطالعه نمایان گردید روند افزایشی انتشار گازهای گلخانه‌ای بود، که از سال ۱۹۹۸ میلادی روند افزایشی و 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<sup>۴</sup> در اقلیم‌های مرطوب‌تر از سال ۱۹۹۸ شروع شده است و تقریباً در تمام فصل‌های سال 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 اقلیم‌های نیمه‌خشک) و احداث بی‌رویه سدها در این دوره و سال‌های قبل از وقوع خشکسالی‌های پی‌درپی تأثیر مستقیمی بر وقوع آن داشته است (Sharafi and Ghalehi, 2022). 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 (مشابه با روند افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای) و سال‌های هیدرولوژیکی ۱۹۹۹-۱۹۹۸، ۲۰۰۰-۱۹۹۹ و ۲۰۰۱-۲۰۰۰ خشک‌ترین سال‌ها در طول دوره مورد مطالعه بوده‌اند (Tabari et al., 2013).

است که برای ارزیابی وضعیت خشکسالی در اقلیم‌های مورد مطالعه از نظر ویژگی‌های خشکسالی مانند فراوانی، دوام، مجموع مقادیر شدت خشکسالی (S) و میانگین مقادیر شدت خشکسالی (I) استفاده می‌شود. تعداد ماه‌های متوالی که در طی آن مقادیر SPI و SPEI برابر یا کمتر از یک سطح آستانه هستند. در این تحقیق، سطح آستانه برای نشان دادن رخداد خشکسالی، هم مقادیر SPI و SPEI کوچکتر یا مساوی منفی یک لحاظ شده است.

هائو و آقاچوکچک شاخص خشکسالی استاندارد شده دومتغیره<sup>۱</sup> 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 دومتغیره بر اساس مقادیر بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل (MSDI<sub>1</sub>)، بارش و رطوبت خاک در لایه اول خاک (MSDI<sub>2</sub>) و بارش و رطوبت خاک در لایه دوم خاک (MSDI<sub>3</sub>) تعریف گردید (Sharafi and Ghalehi, 2022).

شاخص استاندارد رطوبت خاک<sup>۲</sup> 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 پتانسیل، برای توصیف خشکسالی استفاده شده است (Hao and Singh, 2015). با توجه به ماهیت 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 ۷-۰ سانتی‌متر (SSI<sub>1</sub>) و ۲۸-۷ سانتی‌متر سطح خاک (SSI<sub>2</sub>) تعیین گردید.

### همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی و انتشار گازهای گلخانه‌ای

به‌منظور بررسی وجود رابطه بین شاخص‌های خشکسالی و مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای برای هر داده از آزمون همبستگی چند جمله‌ای<sup>۳</sup> استفاده شد (Baten and Frame, 1959). هم‌چنین با توجه به وجود رابطه غیرخطی بین شاخص‌های خشکسالی و مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای از یک مدل رگرسیون چند جمله‌ای و درجه دوم استفاده شد (Páscoa et al., 2017; Zipper et al., 2016). بنابراین کلیه محاسبات و مقادیر بدست آمده، براساس مقادیر نتایج آزمون همبستگی و با استفاده از رویکرد چند جمله‌ای انجام گردید. نتایج

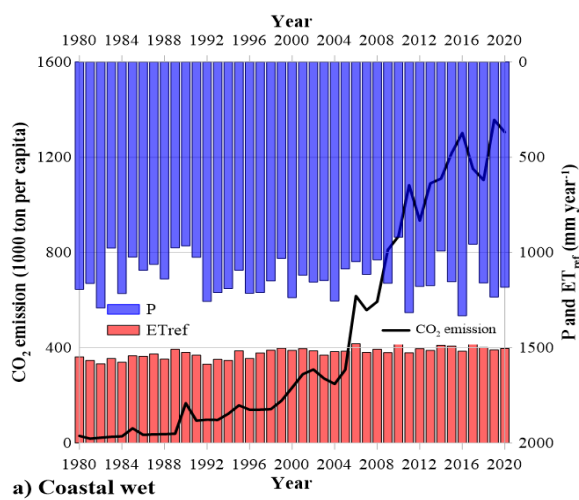
1- Multivariate Standardized Drought Index (MSDI)

2- Standardized Soil Moisture index (SSI)

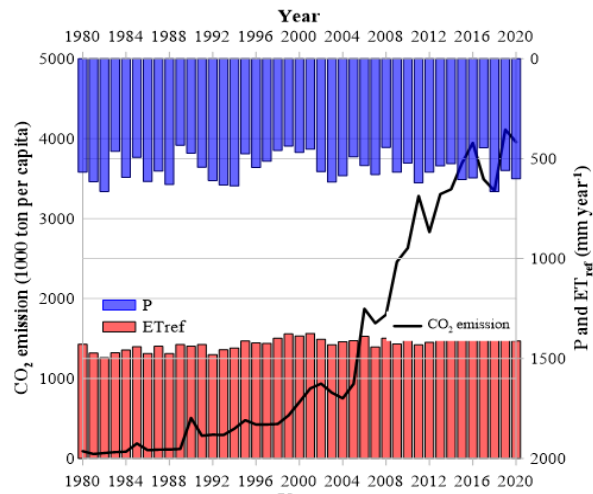
3- Polynomial Correlation Coefficients (PCC)

4- Changing point (CP)

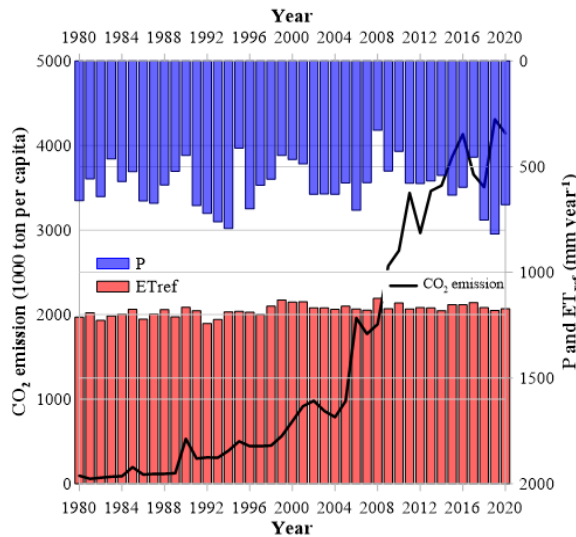




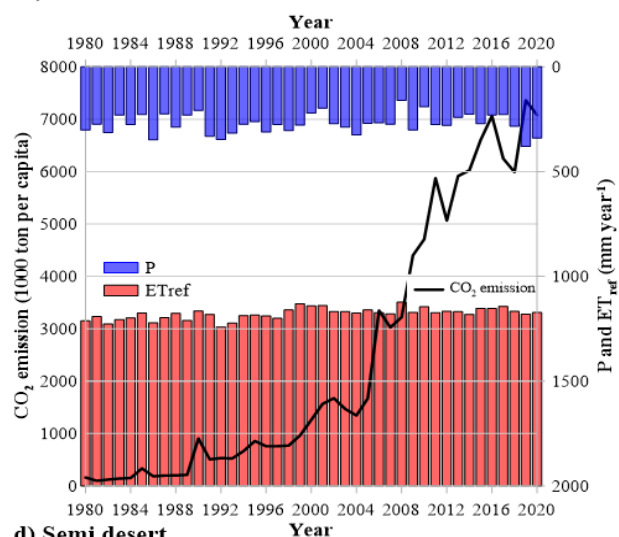
a) Coastal wet



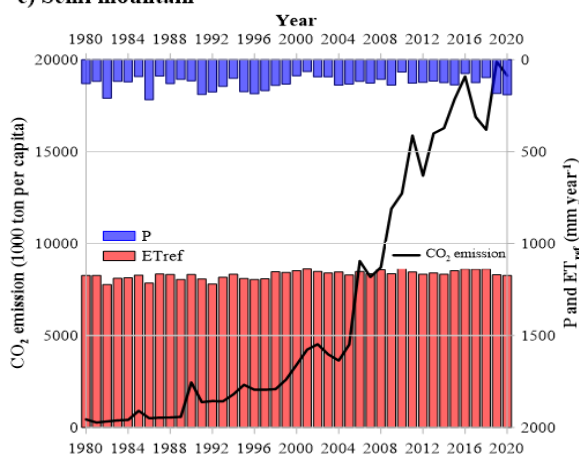
b) Mountain



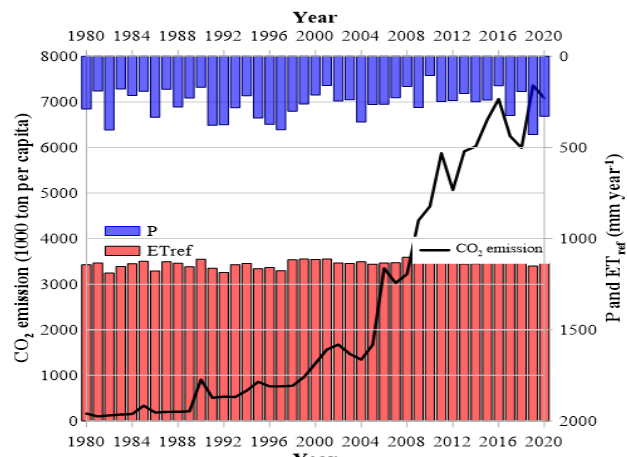
c) Semi mountain



d) Semi desert



e) Desert



f) Coastal desert

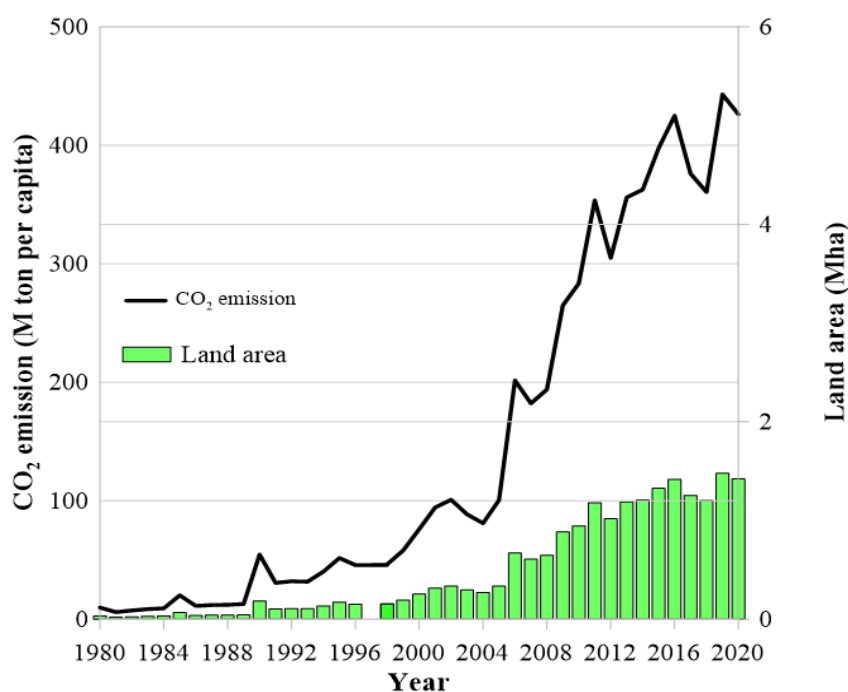
شکل ۳- مقایسه روند انتشار گازهای گلخانه‌ای، بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل در اقلیم‌های الف) مرطوب ساحلی، ب) کوهستانی، پ) نیمه کوهستانی، ت) نیمه بیابانی، ث) بیابانی و ج) بیابان ساحلی ایران (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

مورد بررسی در شکل ۴ ارائه شده است. در سال‌های اخیر، بیشترین سطح زیر کشت مربوط به سال ۲۰۱۹ و کمترین آن مربوط به سال ۲۰۰۵ بوده است (به ترتیب ۱۱/۶ و ۸/۲ میلیون هکتار)، که ارتباط وقایع خشکسالی را در طی این سال‌ها نشان می‌دهد. بنابراین تاثیر خشکسالی در روند افزایش و یا کاهش مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای معنی‌دار بوده است. در همین راستا بیشترین انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال ۲۰۱۹ معادل ۴۴۳ میلیون تن گزارش شده است که نسبت به سال ۱۹۸۱ (۵/۹۷ میلیون هکتار) ۹۸/۶ درصد رشد را نشان می‌دهد. این افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی علاوه بر اینکه رابطه مستقیمی با روند افزایش سطح زیر کشت دارد با مصرف نهاده‌های کشاورزی (به ترتیب سوخت، آفتکش‌ها، ماشی‌آلات، کودهای شیمیایی (نیترژن، فسفر و پتاسیم) و جریان برق) نیز ارتباط معنی‌داری دارد (شکل ۴).

هم‌چنین در طی دوره زمانی مورد بررسی و با توجه وسعت حوضه‌ها، مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای در اقلیم بیابان ساحلی و نیمه بیابانی به ترتیب ۲۴۳۸ و ۲۴۰۶ هزار تن (شکل ۳-ت و چ) و در اقلیم‌های نیمه کوهستانی، کوهستانی، بیابانی و مرطوب ساحلی به ترتیب ۱۴۲۷، ۱۳۶۳، ۶۱۰۲ و ۴۴۹ هزار تن (شکل ۳-پ، ب، ت و الف) طی دوره مورد مطالعه گزارش گردید. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که تأثیر تغییرات در مقادیر بارش و نوسانات در مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل بر انتشار گازهای گلخانه‌ای در اقلیم‌های خشک‌تر شدیدتر بوده است. این در حالی است که در اقلیم مرطوب ساحلی روند افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای با شیب کمتری صورت پذیرفته است.

#### رابطه انتشار گازهای گلخانه‌ای با سطح زیر کشت

روند سطح زیر کشت و انتشار گازهای گلخانه‌ای در طی سال‌های



شکل ۴- روند سطح زیر کشت گیاهان زراعی مهم و سهم انتشار گازهای گلخانه‌ای بخش کشاورزی ایران (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

کل انتشار گازهای گلخانه‌ای) دارد. مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی (به‌ویژه نیترژن) و سموم دفع آفات به میزان مورد نیاز مزارع نیز به میزان زیادی به انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کرده است (Feng et al., 2022; Zhang et al., 2022).

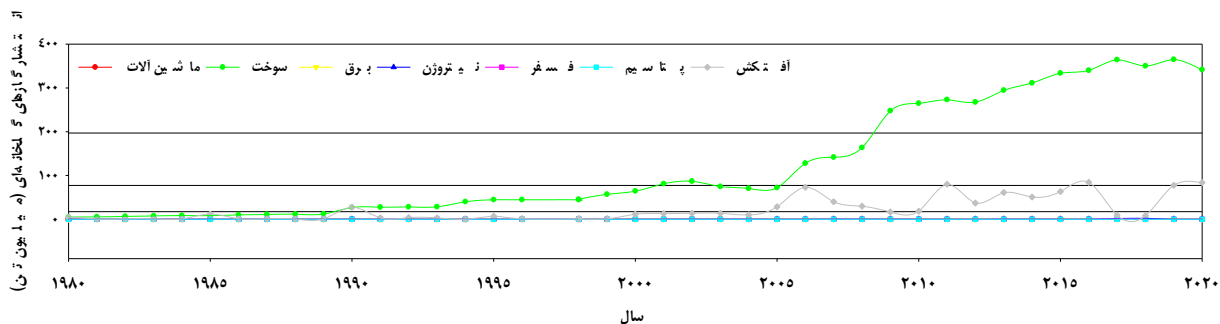
بر اساس نتایج شکل ۶ به‌طور متوسط سهم مصرف سوخت در انتشار گازهای گلخانه‌ای ۸۵/۷۷ درصد، آفت‌کش ۱۳/۵۴ درصد،

نتایج انتشار کل گازهای گلخانه‌ای تولید محصولات عمده در شکل ۵، نشان داده شده است. انتشار کل گازهای گلخانه‌ای از ۱/۳۹ میلیون تن در سال ۱۹۷۰ به ۴۸۵ میلیون تن دی‌اکسیدکربن در سال ۲۰۱۹ افزایش یافته است. بیشترین انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط به انرژی الکتریکی بوده است، با سهم ۴۷/۱ درصد از کل انتشار، و کود نیترژن رتبه دوم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای (۲۵/۷۵ درصد از



۹۹/۲۶، ۹۸/۵۴، ۹۵/۸۱، ۷۲/۸۲، ۳۰/۰۴، ۹۲/۷۹ و ۹۴/۳۶ درصد رشد داشته است. با توجه به نتایج شکل ۶، مشخص گردید که به‌طور متوسط بیشترین سهم انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ترتیب به غلات (۲۱۰ میلیون تن)، بقولات (۱۹ میلیون تن)، دانه‌های روغنی (۸/۲ میلیون تن)، غده‌ای (۵/۹ میلیون تن) و لیفی (۲/۶ میلیون تن) اختصاص دارد.

ماشین‌آلات ۱/۷۸ درصد، کود نیتروژن‌دار ۰/۴۱ درصد، برق ۰/۲۱ درصد بوده است. هم‌چنین مقایسه مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای سال ۲۰۲۰ با سال ۱۹۸۰ نشان داد که سهم مصرف سوخت ۷ درصد کاهش و مصرف آفت‌کش ۸ درصد افزایش یافته است. این در حالی است که مصرف نهاده‌های ماشین‌آلات، سوخت، برق، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و آفت‌کش‌ها در سال ۲۰۲۰ در مقایسه به سال ۱۹۸۰ به‌ترتیب



شکل ۵- سهم انتشار گازهای گلخانه‌ای هر یک از نهاده‌های کشاورزی ایران (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

جدول ۲- درصد اقلیم‌های مختلف با حداکثر همبستگی با شاخص‌های SPI، SPEI و MSDI<sub>1</sub> در مقیاس‌های زمانی مختلف

اقلیم	شاخص	مقیاس زمانی		
		۱	۳	۶
مرطوب ساحلی (۴)	SPI	۱۶/۵۷	۱۴/۳۲	۸/۶۱
	SPEI	۱۹/۴۶	۱۶/۵۵	۶/۱۷
	MSDI <sub>1</sub>	۱۸/۵۲	۱۷/۰۸	۶/۷۶
کوهستانی (۳)	SPI	۱۸/۱۷	۱۵/۵۴	۹/۹۱
	SPEI	۲۲/۳۵	۱۴/۴۱	۸/۳۶
	MSDI <sub>1</sub>	۱۹/۵۰	۱۵/۰۶	۹/۲۹
نیمه کوهستانی (۳)	SPI	۲۰/۱۱	۱۳/۲۴	۸/۰۱
	SPEI	۱۶/۲۲	۱۴/۴۹	۷/۱۱
	MSDI <sub>1</sub>	۱۹/۹۶	۱۴/۵۲	۸/۶۵
نیمه بیابانی (۶)	SPI	۲۲/۲۳	۱۳/۳۸	۸/۴۸
	SPEI	۲۳/۱۵	۱۲/۶۶	۷/۱۶
	MSDI <sub>1</sub>	۲۴/۲۱	۱۳/۳۷	۷/۴۲
بیابانی (۸)	SPI	۲۰/۲۹	۱۴/۴۵	۸/۶۹
	SPEI	۲۳/۶۳	۱۳/۹۶	۸/۸۸
	MSDI <sub>1</sub>	۲۲/۵۲	۱۴/۷۲	۸/۴۷
بیابان ساحلی (۶)	SPI	۱۸/۲۲	۱۴/۳۶	۸/۴۲
	SPEI	۲۰/۶۵	۱۳/۵۴	۹/۶۵
	MSDI <sub>1</sub>	۱۹/۶۱	۱۵/۸۳	۹/۸۷
میانگین کل (%)		۲۰/۲۹	۱۴/۵۲	۸/۹۶

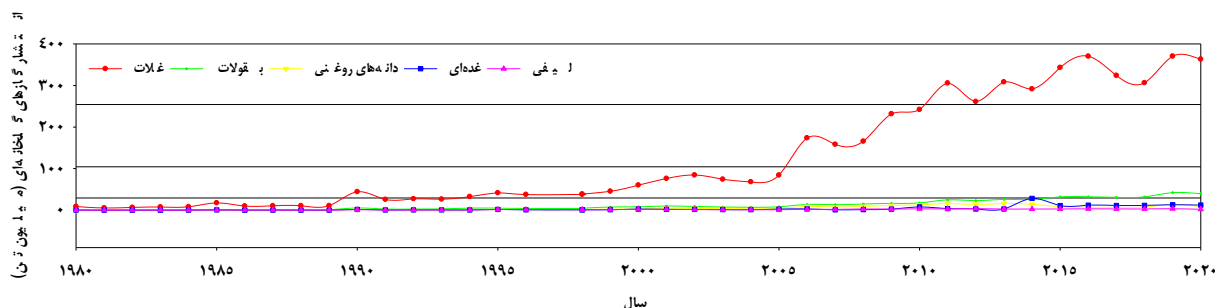
انتشار گازهای گلخانه‌ای

توسعه اراضی زیر کشت و توسعه تجهیزات کشاورزی، و سیستم‌های آبیاری توجیه نمود. به همین روی، الگوی انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌واسطه تولید محصولات مختلف کشور برای نشان دادن روند انتشار

مطالعه سری‌های زمانی گازهای گلخانه‌ای ساطع شده از تولید دسته‌های عمده محصولات زراعی نشان داد که به‌طور مداوم در طول زمان افزایش می‌یابد. این موضوع را می‌توان تا حدی با سیاست‌های

است. تعدادی از مطالعات قبلی گزارش کردند که افزایش تولید مستلزم افزایش ورودی است و بنابراین منابع بیشتری استفاده می‌شود و انتشار گازهای گلخانه‌ای افزایش می‌یابد (Haberl et al. 2020, Vasylieva et al. 2019).

استفاده شد (شکل ۶). نوسانات مشاهده شده در شکل ۶ ممکن است در نتیجه و یا به علت دوره‌های خشکسالی و تغییرات در کاربری زمین باشد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، رشد تولید محصولات زراعی به معنای افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای صرفاً به‌دلیل افزایش تولید



شکل ۶- سهم انتشار گازهای گلخانه‌ای هر یک از خانواده‌های مهم گیاهان زراعی ایران (۱۹۸۰-۲۰۲۰)

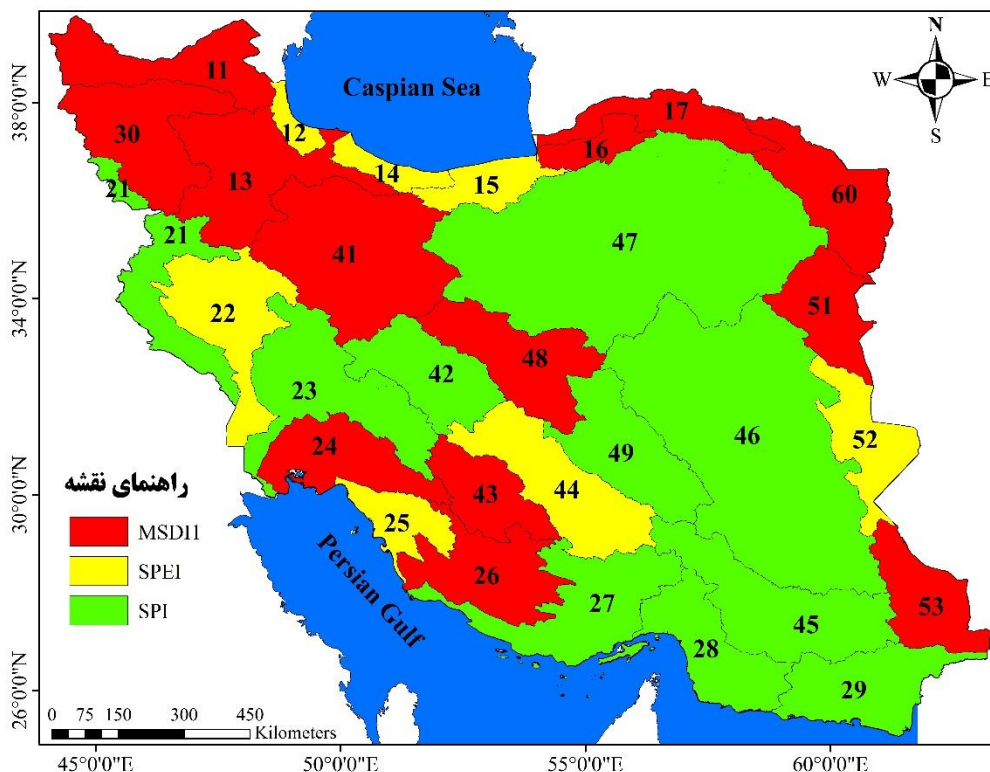
خشکسالی را در حوضه‌های اصلی کشور نشان می‌دهد. برای اکثر حوضه‌ها شاخص SPEI بیشترین همبستگی را با انتشار گازهای گلخانه‌ای داشت. بر همین اساس برای مناطق کشاورزی تنوع فضایی قابل توجهی وجود داشت و همراه با نتایج حوضه‌ها، هیچ الگوی فضایی تعریف شده‌ای وجود نداشت که مناطق خاصی را که برای آنها یک شاخص در پایش خشکسالی مؤثرتر بود، متمایز کند. به‌عنوان مثال، SPEI بهترین همبستگی را با فرایند انتشار گازهای گلخانه‌ای در اقلیم‌های نیمه بیابانی و بیابانی مناطق مرکزی و جنوب شرق کشور نشان داد، در حالی که در اقلیم‌های مرطوب ساحلی و کوهستانی کشور، شاخص SPEI بهترین همبستگی را نشان داد. شباهت‌ها در میزان همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی چند مقیاسی و انتشار گازهای گلخانه‌ای 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<sub>2&3</sub> در ۲۱ درصد از مناطق کشاورزی نشان داد. این نواحی مناطقی بودند که همبستگی پایین‌تری بین انتشار گازهای گلخانه‌ای با شاخص‌های خشکسالی نشان دادند. نتایج نشان داد که برای مناطق با همبستگی بالا بین شاخص‌های خشکسالی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، سه شاخص SPEI، SPEI و MSDI<sub>1</sub> به یک اندازه مفید بودند. از طرف دیگر نسبت کمتری از اقلیم نیمه بیابانی، بیابانی و بیابان ساحلی، نشان داد که تفاوت‌های آماری بین شاخص‌ها وجود دارد. به‌طور کلی، این نشان دهنده تأثیر عوامل محیطی بر استفاده از هر یک از این شاخص‌های چند مقیاسی است (شکل ۷).

### رابطه شاخص‌های خشکسالی با انتشار گازهای گلخانه‌ای: پاسخ‌های زمانی

جدول ۲، مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه را که در آن بیشترین همبستگی‌ها برای هر یک از شاخص‌های SPEI، SPI و MSDI<sub>1</sub> یافت شد، بیان می‌دارد. بیشترین همبستگی‌ها برای مقیاس‌های زمانی کوتاه (۱ تا ۳ ماه) برای انتشار گازهای گلخانه‌ای مشاهده شد (هر چند که تفاوت کمی بین شاخص‌ها گزارش گردید). همچنین طی فرایند انتشار گازهای گلخانه‌ای، برای ۷۱ درصد از مناطق کشاورزی بیشترین همبستگی با هر سه شاخص خشکسالی در مقیاس زمانی ۱ و ۳ ماه مشاهده شد. در اقلیم‌های مورد بررسی، بیشترین همبستگی‌ها عمدتاً در مقیاس یک ماهه به‌ویژه برای SPEI در اقلیم‌های بیابانی و نیمه‌بیابانی (به‌ترتیب ۲۳/۶۳ و ۲۳/۱۵٪) گزارش گردید (جدول ۲). با این حال، نوع پوشش گیاهی و چرخه مواد غذایی به‌طور مستقیم با مقدار و توزیع فصلی بارش و تبخیر و تعرق مرتبط است. به‌طور ویژه، در زیست‌بوم‌های اقلیم‌های نیمه‌بیابانی و بیابانی نرخ این فرایندها عمدتاً توسط ورودی‌های بارندگی نابجا، نامنظم و ناپیوسته کنترل می‌شود (Mancinelli et al., 2013). چندین مطالعه نوسانات فصلی فرایندهای مربوط به خاک (به‌عنوان مثال تنفس میکروبی و فعالیت‌های آنزیمی) را که در نتیجه تغییرات شرایط آب‌وهوایی است گزارش کرده‌اند (Kabba and Aulakh, 2004; Manzoni and Porporato, 2009; Mancinelli et al., 2013).

### الگوهای فضایی همبستگی شاخص خشکسالی در مقیاس ماهانه

شکل ۷، توزیع فضایی بیشترین همبستگی شاخص‌های



شکل ۷- توزیع مکانی شاخص‌های خشکسالی با بیشترین همبستگی با انتشار گازهای گلخانه‌ای

### نتیجه‌گیری

مدیریت تولید توجیه شود. نتایج نشان داد که مصرف انرژی (به‌ویژه برق) با سهم تقریباً ۵۰ درصدی منبع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای است. استفاده از کود نیتروژن دومین منبع بزرگ است که تقریباً یک چهارم آن را تشکیل می‌دهد. علاوه بر این، تقاضای بیشتر برای آب و هوای پاک از سوی مصرف‌کنندگان و افزایش تقاضای رفاه عمومی جامعه ممکن است حجم کودهای مصرفی را نیز کاهش دهد. بنابراین تقویت سیاست‌های کشاورزی ارگانیک و بهبود کیفیت کودهای آلی می‌تواند برای کاهش نهاده‌های انرژی فشرده مورد تاکید قرار گیرد. از طرف دیگر تغییر تولیدات کشاورزی فعلی به محصولاتی که سازگاری بهتری دارند می‌تواند برنامه‌ریزی شود.

هم‌چنین ارزیابی اثربخشی شاخص‌های خشکسالی برای پایش تأثیر اقلیم بر انتشار گازهای گلخانه‌ای، نمایش بهتر شاخص‌های SPEI، SPI و MSDI<sub>1</sub> 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. این شاخص‌ها داده‌های اقلیمی کمتری نیاز داشتند، که این موضوع در هنگام انجام تحلیل‌ها بر اساس عدم دسترسی به داده‌های اقلیمی مورد توجه قرار می‌گیرد. نتایج ارزیابی کمی رابطه شاخص‌های خشکسالی با انتشار گازهای گلخانه‌ای، مشخص کرد که هر سه شاخص خشکسالی مذکور در کشور عملکرد بهتری نشان دادند. با این

تحقیق حاضر با هدف تأثیر شاخص خشکسالی SPEI، SPI، SSI<sub>1</sub> و SSI<sub>2</sub>، MSDI<sub>1</sub>، MSDI<sub>2</sub> و MSDI<sub>3</sub> در مقیاس زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه بر انتشار گازهای گلخانه‌ای در اقلیم‌های مختلف ایران صورت گرفت. بر همین اساس نتایج بدست آمده از این مطالعه تغییرات انتشار گازهای گلخانه‌ای در واحد سطح را تشریح می‌نماید و هم‌چنین سهم انتشار هر یک از دسته‌های گیاهان شامل؛ غلات، بقولات، دانه‌های روغنی، لیفی و غده‌ای را ترسیم کند. بنابراین این نتایج می‌تواند توسط سیاست‌مداران و سازمان‌های مربوطه برای بهبود بهره‌وری محصولات، کاهش استراتژیک مسائل مربوط به گرمایش جهانی، مدیریت سیستم‌های کشاورزی و فناوری‌های نوین و افزایش معیشت کشاورزان مورد استفاده قرار گیرد. در همین راستا نتایج نشان داد که استفاده از کودهای شیمیایی (مانند کودهای نیتروژنی) و آفت‌کش‌ها در مزارع به طور قابل توجهی باعث افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. این عوامل به‌تنهایی منجر به تولید ۹۷ درصد از سهم انتشار گازهای گلخانه‌ای شامل؛ (۴۷/۱٪)، کود نیتروژن (۲۷/۷۵٪)، ماشین‌آلات (۱۱/۳۷٪)، و آفت‌کش‌ها (۱۰/۷۷٪) می‌گردد. بر اساس نتایج انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش قابل توجهی در میزان مصرف سوخت دیزل و برق در طول ۴۰ سال گذشته مشاهده شده است که می‌تواند با اثرات پیشرفت‌های فناوری و

- sustainable development, 28(1): 139-149.
- Dyer, J. A. and Desjardins, R. L. 2003. Simulated farm fieldwork, energy consumption and related greenhouse gas emissions in Canada. *Biosystems Engineering* 85(4): 503-513.
- Dyer, J. A. and Desjardins, R. L. 2006. Carbon dioxide emissions associated with the manufacturing of tractors and farm machinery in Canada. *Biosystems Engineering*, 93(1): 107-118.
- ERS. 2019. "Irrigation and Water Use." <<https://www.ers.usda.gov/topics/farm-practices-management/irrigation-water-use/>>. (September 23, 2019).
- ERS. 2020. "Ag and Food Sectors and the Economy." <<https://www.ers.usda.gov/data-products/ag-and-food-statistics-charting-the-essentials/>>. (May 4, 2020).
- FAO. 2020. "Sustainability and Organic Livestock." <<http://www.fao.org/nr/sustainability/sustainability-and-livestock>>. (September 22, 2020).
- Feng, S., Gu, X., Luo, S., Liu, R., Gulakhmadov, A., Slater, L. J. and Kong, D. 2022. Greenhouse gas emissions drive global dryland expansion but not spatial patterns of change in aridification. *Journal of Climate*, 1: 1-43.
- 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.
- Gómez-Gener, L., Obrador, B., Marcé, R., Acuña, V., Catalán, N., Casas-Ruiz, J. P. and von Schiller, D. 2016. When water vanishes: magnitude and regulation of carbon dioxide emissions from dry temporary streams. *Ecosystems*, 19(4): 710-723.
- Gómez-Gener, L., Obrador, B., von Schiller, D., Marcé, R., Casas-Ruiz, J. P., Proia, L. and Koschorreck, M. 2015. Hot spots for carbon emissions from Mediterranean fluvial networks during summer drought. *Biogeochemistry*, 125(3): 409-426.
- Haberl, H., Wiedenhofer, D., Virág, D., Kalt, G., Plank, B., Brockway, P. and Creutzig, F. 2020. A systematic review of the evidence on decoupling of GDP, resource use and GHG emissions, part II: synthesizing the insights. *Environmental Research Letters*, 15(6): 065003
- Jin, H., Yoon, T. K., Lee, S. H., Kang, H., Im, J. and Park, J. H. 2016. Enhanced greenhouse gas emission from exposed sediments along a hydroelectric reservoir during an extreme drought event. *Environmental Research Letters*, 11(12): 124003.
- حال، SPEI همبستگی بهتری داشت و برای این هدف بسیار توصیه می‌شود. بر اساس نتایج این پژوهش تعریف فضایی واکنش‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای به خشکسالی‌ها در مقیاس اقلیمی نمایان‌تر بود، یعنی در مکان‌هایی که وضوح مکانی 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 انتشار گازهای گلخانه‌ای، هم در مقیاس زمانی کوتاه (۱ تا ۳ ماه) و هم متوسط (۶ ماه) نسبت به خشکسالی همبستگی بیشتری داشتند. شرایط رطوبت نسبی در اقلیم‌های مرطوب ساحلی و حتی بیابان ساحلی نیز بر انتشار گازهای گلخانه‌ای موثر بود. بر اساس نتایج تحقیق حاضر، همچنین بیشترین رابطه بین شاخص‌های خشکسالی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در اقلیم‌های نیمه بیابانی و بیابانی یافت شد. روابط برای مناطق جنوبی و جنوب شرقی به دلیل دشواری توصیف اثرات خشکسالی در قلمرو متنوع و پیچیده ضعیف‌تر بود، زیرا شرایط اقلیمی و مدیریت کشاورزی در ایران بسیار متنوع است. تنوع فضایی زیاد و پیچیدگی خشکسالی‌ها نیاز به ایجاد شاخص‌های دقیق و موثر برای پایش خشکسالی در سطح کشور را برجسته می‌کند.

## منابع

- 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، ۲۰۱-۲۱۱: (۱)۱۲.
- 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، ۲۹۳۷-۲۹۵۱: (۱۱)۵۱.
- Amos, B., Arkebauer, T. J. and Doran, J. W. 2005. Soil surface fluxes of greenhouse gases in an irrigated maize-based agroecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 69(2): 387-395.
- Arora, V. K. 2002. The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff. *Journal of hydrology*, 265(1-4): 164-177.
- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D. and Zhu, Y. 2015. Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature climate change*, 5(2): 143-147.
- Bockstaller, C., Guichard, L., Makowski, D., Aveline, A., Girardin, P. and Plantureux, S. 2008. Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. *Agronomy for*

- Parkin, T. B. and Kaspar, T. C. 2003. Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux: Implications for estimating soil carbon loss. *Soil Science Society of America Journal*, 67(6): 1763-1772.
- Salehnia, N., Zare, H., Kolsoumi, S., Bannayan, M. 2018. Predictive value of Keetch-Byram Drought Index for Cereal Yields in Semi-arid Iran. *Theoretical and Applied Climatology Journal*. 134(3-4): 1005-1014.
- Šarauskis, E., Masilionytė, L., Juknevičius, D., Buragienė, S. and Kriaučiūnienė, Z. 2019. Energy use efficiency, GHG emissions, and cost-effectiveness of organic and sustainable fertilisation. *Energy*, 172: 1151-1160.
- Sharafi, S. and Mir Karim, N. 2020. Investigating trend 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., Ghaleni, M. M. and Sadeghi, S. 2022. Spatial and temporal analysis of drought in various climates across Iran using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Arabian Journal of Geosciences*, 15(14): 1-14.
- 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.
- Sheffield, J., Wood, E. F. and Roderick, M. 2012. Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*.
- Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L. and Fixen, P. E. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 133(3-4): 247-266.
- 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.
- Svoboda, M., Hayes, M. and Wood, D. 2012. Standardized precipitation index: user guide.
- 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. *Kabba, B. S. and Aulakh, M. S. 2004. Climatic conditions and crop-residue quality differentially affect N, P, and S mineralization in soils with contrasting P status. Journal of Plant Nutrition and soil science*, 167(5): 596-601.
- Karan, E. and Asadi, S. 2018. Quantitative modeling of interconnections associated with sustainable food, energy and water (FEW) systems. *Journal of Cleaner Production*, 200: 86-99.
- Khoshnevisan, B., Rafiee, S., Omid, M. and Yousefi, M. 2013. Modeling of energy consumption and GHG (greenhouse gas) emissions in wheat production in Esfahan province of Iran using artificial neural networks. *Energy*, 52: 333-338.
- Kosten, S., van den Berg, S., Mendonça, R., Paranaíba, J. R., Roland, F., Sobek, S. and Barros, N. 2018. Extreme drought boosts CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from reservoir drawdown areas. *Inland waters*, 8(3): 329-340.
- Lal, R. 2004. Carbon emission from farm operations. *Environment international*, 30(7): 981-990.
- Lian, X., Piao, S., Chen, A., Huntingford, C., Fu, B., Li, L. Z. and Roderick, M. L. 2021. Multifaceted characteristics of dryland aridity changes in a warming world. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(4): 232-250.
- MAJ (Ministry of Agriculture of the IR of Iran). 2019. Planning and Economics Department, Statistics Bank of Iranian Agriculture; <http://www.maj.ir>; 2018 (Accessed August 2019).
- Mancinelli, R., Campiglia, E., Di Tizio, A. and Marinari, S. 2010. Soil carbon dioxide emission and carbon content as affected by conventional and organic cropping systems in Mediterranean environment. *Applied Soil Ecology*, 46(1): 64-72.
- Mancinelli, R., Marinari, S., Di Felice, V., Savin, M. C. and Campiglia, E. 2013. Soil property, CO<sub>2</sub> emission and aridity index as agroecological indicators to assess the mineralization of cover crop green manure in a Mediterranean environment. *Ecological indicators*, 34: 31-40.
- Manzoni, S. and Porporato, A. 2009. Soil carbon and nitrogen mineralization: theory and models across scales. *Soil Biol. Biochem.* 41: 1355-1379.
- 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.
- Oury, B. 1965. Allowing for weather in crop production model building. *American Journal of Agricultural Economics*, 47(2): 270-283.

- 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.
- Yahya, M. D., Yohanna, I., Auta, M. and Obayomi, K. S. 2020. Remediation of Pb (II) ions from Kagara gold mining effluent using cotton hull adsorbent. *Scientific African*, 8: e00399.
- Yan, Z., Li, W., Yan, T., Chang, S. and Hou, F. 2019. Evaluation of energy balances and greenhouse gas emissions from different agricultural production systems in Minqin Oasis, China. *Journal of Life and Environmental Sciences*, 7: e6890.
- Zhang, L., Qin, R., Chai, N., Wei, H., Yang, Y., Wang, Y. and Zhang, F. 2022. Optimum fertilizer application rate to ensure yield and decrease greenhouse gas emissions in rain-fed agriculture system of the Loess Plateau. *Science of The Total Environment*, 823: 153762.
- Proceedings of the National Academy of Sciences, 112 (22): 6931–6936.
- Vasylieva, T., Lyulyov, O., Bilan, Y. and Streimikiene, D. 2019. Sustainable economic development and greenhouse gas emissions: The dynamic impact of renewable energy consumption, GDP, and corruption. *Energies*, 12(17): 3289.
- 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., 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.
- 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.,



## The relationship between drought indicators and greenhouse gas emissions in Iran's agricultural sector

F. Heydari<sup>1</sup>, S. Sharafi<sup>2\*</sup>, M. Mohammadi Ghaleni<sup>3</sup>

Received: Nov.02, 2022

Accepted: Jan.08, 2023

### Abstract

Evaluating the relationship between drought events and greenhouse gas emissions from agricultural activities is of particular importance due to their wide-ranging effects on the environment and economy. The purpose of this study is to investigate the relationship between the emission of GHGs resulting from the production of 18 main crops in the form of five dominant categories including; cereals (wheat, barley, rice and maize), legumes (alfalfa, bean, pea and lentil), oil seeds (soybean, sunflower, canola, safflower, castor, sesame and peanut), tubers (potato and sugar beet) and fiber (cotton) with drought indices including; Standard Precipitation Index (SPI), Standard Precipitation Evaporationtranspiration Index (SPEI), Standard Soil Moisture Index of the two upper soil layers (SSI<sub>1</sub> and SSI<sub>2</sub>), Standard multivariable Drought Index including; MSDI<sub>1</sub> based on precipitation and reference evapotranspiration (P&ET<sub>ref</sub>), MSDI<sub>2</sub> based on precipitation and soil moisture in the first soil layer (P&SM<sub>1</sub>) and MSDI<sub>3</sub> based on precipitation and soil moisture in the second soil layer (P&SM<sub>2</sub>) in different climates of Iran (coastal wet, mountain, semi mountain, semi desert, desert and coastal desert) during the years 1980-2020. The results showed that the climatic variables of precipitation have no significant relationship with the increase in GHG emissions in different climates of Iran. If the ET<sub>ref</sub> values during the years investigated in this study showed a significant trend. Also, the highest GHG emissions in 2019 were reported as equal to 443 million tons, and the highest GHG emissions were related to electric energy (47.1%) and nitrogen fertilizer (25.75%), respectively. Also, the evaluation of the effectiveness of drought indices for monitoring the effect of climate on GHG emissions showed a better display of SPI, SPEI and MSDI<sub>1</sub> indices. The ability to calculate these indices in different time scales makes the effects of drought to be defined more accurately than using indices without this feature. These indicators required fewer climate data, considered when performing analyses based on the lack of access to climate data.

**Key words:** Carbon emission, Food security, Multivariate indices, Statistical criteria.

1- M.S. Student, Department of Environment Science and Engineering, Arak University, Arak, Iran.

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

(\*- Corresponding author Email: [s-sharafi@araku.ac.ir](mailto:s-sharafi@araku.ac.ir)).

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