

## Correlation Analysis of large-scale Teleconnection Indices with Monthly Reference Evapotranspiration of Iran Synoptic Stations

EBRAHIM ASADI OSKOEI<sup>1</sup>, JALIL HELALI<sup>2\*</sup>

1. Atmospheric Science and Meteorology Research Center (ASMERC), Tehran, Iran

2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: Apr. 28, 2021- Revised: May. 25, 2021- Accepted: May. 29, 2021)

### ABSTRACT

Reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) is considered as an important component in the hydrological cycle and determination of water requirement. In this study, an attempt was made to investigate the effect of large-scale teleconnection indices (LSTIs) on estimation of monthly reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) in Iran. For this purpose, daily and monthly ET<sub>o</sub> using Penman–Monteith FAO (PMF-56) equation was calculated in 123 synoptic stations of Iran for the period of 1990-2019 and its correlation with 37 LSTIs with lag time of 0 to 12 months was obtained using the Pearson correlation method and the Significant Correlation Frequencies (SCF) was also calculated. Finally, the correlation coefficient was performed in Iran using the Kriging method in the ArcGIS 10.4 software package. The results show that the highest positive correlation belongs to AMO, CO<sub>2</sub>, NTA, TNA, and TSA indices and the highest negative correlation belongs to MEI and SST3.4 indices in different lag times. The highest SCF with ET<sub>o</sub> belongs to AMO, CO<sub>2</sub>, NTA, TNA, and WHWP indices, which include 35, 58, 23, 23, and 21% of the studied stations, respectively. The widest spatial distribution of SCF belongs to the CO<sub>2</sub> obtained in all lag times and all months studied until November and December. The results of this study showed that the LSTIs and CO<sub>2</sub> could have a good correlation in lag times of 0 to 12 months and could be used for prediction of monthly ET<sub>o</sub>, if an appropriate machine learning model is used.

**Keywords:** Iran, Reference evapotranspiration, Large Scale Teleconnection Indices, CO<sub>2</sub>, Pearson Correlation.

## تحلیل همبستگی شاخص‌های پیوند از دور بزرگ‌مقیاس با تبخیر و تعرق مرجع ماهانه ایستگاه‌های همدید ایران

ابراهیم اسعدی اسکویی<sup>۱</sup>، جلیل هلالی<sup>۲\*</sup>

۱. پژوهشکده هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۸ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۴ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۳/۸)

### چکیده

تبخیر و تعرق مرجع به‌عنوان مؤلفه مهم در چرخه هیدرولوژی و تعیین نیاز آبی به‌حساب می‌آید. در این مطالعه تلاش شد تأثیرگذاری شاخص‌های پیوند از دور بزرگ‌مقیاس بر تبخیر و تعرق مرجع ماهانه در گستره ایران مورد واکاوی قرار گیرد. به این منظور، تبخیر و تعرق مرجع روزانه و سپس ماهانه با معادله PMF-56 در ۱۲۳ ایستگاه همدید ایران در دوره ۲۰۱۹-۱۹۹۰ محاسبه شده و همبستگی آن با ۳۷ شاخص پیوند از دور با تأخیرهای زمانی هم‌زمان تا ۱۲ ماه با روش همبستگی پیرسون به دست آمد و فراوانی نوع همبستگی‌ها نیز محاسبه گردید. در نهایت ضریب همبستگی در پهنه ایران با روش کریجینگ در محیط نرم افزار ArcGIS 10.4 انجام شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد بیشترین همبستگی مثبت متعلق به شاخص‌های AMO، CO<sub>2</sub>، NTA، TNA و TSA و بیشترین همبستگی منفی متعلق به شاخص‌های MEI و SST3.4 در تأخیرهای زمانی مختلف است. بیشترین فراوانی همبستگی‌های معنادار با تبخیر و تعرق متعلق به شاخص‌های AMO، CO<sub>2</sub>، NTA و WHWP است که به ترتیب ۵۸، ۳۵، ۲۳، ۲۳ و ۲۱ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه را شامل می‌شوند. گسترده‌ترین پراکنش مکانی همبستگی‌های معنادار متعلق به غلظت دی‌اکسید کربن است که در همه تأخیرهای زمانی و همه ماه‌های مورد مطالعه به جر نوامبر و دسامبر به دست آمده است. نتایج این مطالعه نشان داد شاخص‌های پیوند از دور و غلظت دی‌اکسید کربن می‌توانند در تأخیرهای زمانی صفر تا ۱۲ ماهه همبستگی مناسب داشته باشند و به شرط استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین مناسب در جهت پیش‌بینی مقدار تبخیر و تعرق مرجع ماهانه مورد استفاده قرار گیرند.

**واژه‌های کلیدی:** ایران، تبخیر و تعرق مرجع، شاخص‌های پیوند از دور، دی‌اکسید کربن، همبستگی پیرسون.

### مقدمه

ایران یکی از کشورهای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد که هر ساله با محدودیت‌های گسترده منابع آب به خصوص در بخش کشاورزی مواجه است که با عدم دسترسی به منابع آب تشدید نیز می‌شود. در بخش کشاورزی تأمین نیاز آبی محصولات برای بالاتر بردن کارایی استفاده از آب و جلوگیری از مصرف مازاد آن و دسترسی به عملکرد حداکثر ضروری است (Tabari et al., 2014a). مهم‌ترین بخش تعیین نیاز آبی گیاهان تبخیر و تعرق (ET) است. تبخیر و تعرق مؤلفه مهمی از چرخه هیدرولوژی است که عوامل اقلیمی مختلفی از جمله دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و شدت تابش بر روی آن تأثیر می‌گذارند (Allen et al., 1998). تبخیر و تعرق سومین فاکتور اقلیمی است که عامل کنترل انرژی بین اکوسیستم‌ها و اتمسفر بوده (Shenbin et al., 2006) و نوسانات آن در برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب، کنترل زمان آبیاری و تولیدات کشاورزی نیز اهمیت دارد (Allen et al., 1998; Wang et al., 2012; Lopez-Urrea et al., 2006). در مطالعاتی

که در چند دهه اخیر انجام شده است روند کاهشی ۵-۱ میلی‌متر در سال تبخیر و تعرق اثبات شده است (Peterson et al., 1995; Yin & Hobbins et al., 2004; Brutsaert and Parlange, 1998; Tabari et al., 2012a; Liu et al., 2011; et al., 2010; Stephens et al., 2018; Hosseinzadeh Talaee et al., 2014). شدت و نرخ تبخیر و تعرق علاوه بر متغیرهای اقلیمی (IPCC, Yin et al., 2010; Roderick and Farquhar, 2002) Cao and Zhou, Xu et al., 2015; Yan et al., 2013; 2013) به عوامل دیگری چون خصوصیات بیوفیزیکی گیاه و خاک (2006; Yuan et al., 2012; Dirmeyer et al., 2006) و شاخص‌های پیوند از دور (2010; Sbazarparvar et al., 2014 b; Tabari et al., 2014) Dong et al., 2021) وابسته است که نوسان طبیعی یا غیرطبیعی آن‌ها نیز می‌تواند موجب نوسان تبخیر و تعرق گردد. در مطالعات انجام شده روند افزایشی تبخیر و تعرق مرجع (Dinpashoh et al., 2011; 2012 a, b; Tabari et al., 2012 a, b; Nouri and Bannayan, 2019) و یا کاهشی (2019; Rahman et al., 2019; Cao and Zhou, 2019)

می‌گذارند. مطالعات متعدد تلاش کرده‌اند تاثیرگذاری این شاخص‌ها را بر متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی (Richard Nazemosadat and Lyon and Camargo, 2009; *et al.*, 2000؛ Helali *et al.*, 2021؛ Helali *et al.*, 2020 a,b؛ Cordery, 2000؛ Heino *et al.*، Gonsamo *et al.*, 2016) عملکرد محصولات (2020)، تبخیر (Miralles *et al.*, 2013؛ Martens *et al.*, 2018) و تبخیروتعرق (Sabziparvar *et al.*, 2011؛ Meza, 2005)؛ Dong *et al.*, 2021؛ Tabari *et al.*, 2014) نیز مورد بررسی قرار دهند.

Sabziparvar *et al.* (2010) همبستگی و تأثیر فازهای مختلف ENSO را بر تغییرات ETO در اقلیم‌های گرم ایران با لحاظ نمودن سناریوی همبستگی با تأخیر و بدون تأخیر مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند در بیش از ۵۴ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه همبستگی معنادار بین ENSO (SOI) و نوسانات ETO فصلی وجود دارد. از سوی دیگر، تأثیر ENSO بر تغییرات ETO به مقیاس زمانی تحلیل‌ها حساسیت دارد به طوری که نوسانات ETO ایستگاه‌های مناطق گرم به شاخص ENSO حساس‌تر از ایستگاه‌های مرطوب است. Tabari *et al.* (2014a) رابطه آماری بین شاخص Arctic Oscillation و تبخیروتعرق ماهانه و سالانه را بررسی نمودند و نشان دادند که همبستگی معنادار در تعداد کمی از ایستگاه‌های ایران وجود دارد و به طور کلی در مناطقی که این همبستگی معنادار دیده می‌شود با تأخیر ۵ ماهه خواهد بود. در مطالعه دیگری تبخیروتعرق مرجع زمستانه اکثر ایستگاه‌های ایران همبستگی منفی با شاخص NAO نشان داده است که مقدار آن در فاز منفی ۳ درصد بیشتر از مقدار آن در فاز مثبت است (Tabari *et al.*, 2014b).

Chai *et al.* (2018) در چین نشان دادند که تبخیروتعرق مرجع فصلی و سالانه همیشه با شاخص‌های AO، NAO، PDO و ENSO همبستگی‌های معنادار با تأخیرهای زمانی مختلف دارد. به عقیده Chen *et al.* (2018) عامل اصلی مؤثر بر تبخیروتعرق جنگل‌های evergreen needleleaf آمریکای شمالی در اقلیم‌های مختلف متغیر است به طوری که در همه اقلیم‌ها دمای هوا و غلظت دی اکسیدکربن، در اقلیم مدیترانه‌ای و جنب قطبی دی اکسیدکربن و تابش خالص، و در اقلیم‌های گرم تابستانی مناطق قاره‌ای (continental) دی اکسیدکربن و دمای خاک موثرترین عامل اصلی هستند. Fang *et al.* (2018) شاخص ENSO و Nino1.2 را به‌عنوان شاخص‌های پیش‌بینی کننده مناسب تبخیروتعرق منطقه‌ای پیشنهاد کردند. نتایج بررسی Dong *et al.* (2021) نشان می‌دهد تبخیروتعرق مرجع در کشور چین در دوره ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۷ سه دوره روند متفاوت تجربه کرده است که در

دیده می‌شود که عوامل هواشناسی به ویژه عامل سرعت باد، رطوبت نسبی و تابش بر این روند مؤثر بوده‌اند. تحلیل نوسانات تبخیروتعرق خشکی‌ها در دوره ۳۰ ساله ۲۰۱۱-۱۹۸۲ در مقیاس جهانی و اثر پدیده ENSO نشان می‌دهد که در وهله اول رابطه خطی افزایشی ۴/۶ میلیمتر در دهه دیده می‌شود و همبستگی معنادار بین آن و متغیرهای کنترل‌کننده آن یعنی بارش، شاخص مساحت سطح برگ و تبخیر پتانسیل وجود دارد و از طرف دیگر فاز El Nino باعث بهبود بارش و در نتیجه افزایش تبخیر شده است (Yan *et al.*, 2013).

بررسی روند تبخیر از تشت در ایران نشان می‌دهد که در دوره ۳۰ ساله از ۲۰۱۶-۱۹۸۷ ایستگاه‌های واقع در عرض‌های پایین‌تر از ۳۲ درجه روند کاهشی معنادار و بالاتر از ۳۲ درجه روند افزایش تبخیر از تشت نشان می‌دهد و در همه مقیاس‌های زمانی افزایش معنادار دما، ساعات آفتابی و سرعت باد افزایش قابل مشاهده است که مهمترین عامل مؤثر در تبخیر از تشت دمای حداقل، حداکثر، متوسط و ساعات آفتابی است (Soroush *et al.*, 2020). همچنین در اقلیم آینده تحت سناریوی RCP تبخیروتعرق روندی افزایشی خواهد داشت (Hejabi, 2021).

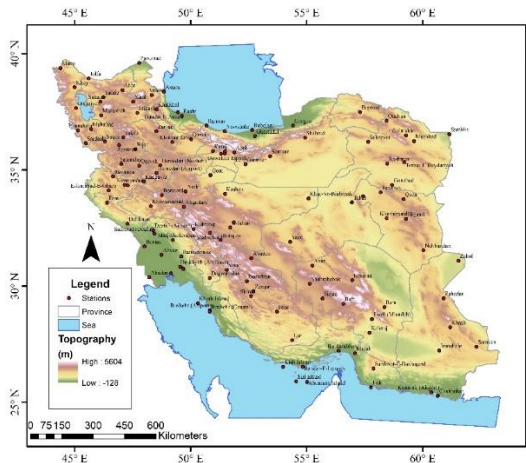
درک علل و ماهیت تغییرات اقلیمی مهمترین هدف جمع‌آوری و پایش پدیده‌های اقلیمی است که یکی از عوامل مؤثر بر آن شاخص‌های پیوندازدور هستند (GhavidelRahimi *et al.*, 2015). بنابراین اقلیم هر منطقه صرفاً تحت تأثیر پدیده‌های محلی قرار نداشته و تحت تأثیر پدیده‌های بزرگ مقیاس از جمله شاخص‌های پیوندازدور نیز می‌باشند (Ahmadi, 2014). واژه پیوندازدور به ارتباط همزمان بین تغییرات عناصر اقلیمی یک مکان با تغییرات الگوهای فشار و دمای سطح دریا در نقاط جغرافیایی دیگر تعریف می‌شود (GhavidelRahimi *et al.*, 2014). این شاخص‌ها در مقیاس‌های مکانی و زمانی متغیر رخ می‌دهند که تغییراتشان در دما یا فشار سطح آب‌های آزاد با توجه به ظرفیت گرمایی بالای این سیال موجب تغییرات بزرگی در درجه حرارت هوای مناطق مجاور شده و سبب جابجایی توده‌های هوا گردد (Karamouz *et al.* 2006). بنابراین، این شاخص‌ها می‌توانند بر مولفه‌های اقلیمی و تبخیروتعرق مؤثر باشند (Yan *et al.*, 2013؛ Chai *et al.*, 2018؛ Tabari *et al.*, 2014 a,b؛ Fang *et al.*, 2018؛ Dong *et al.*, 2021). به عقیده محققین شاخص‌های پیوندازدور بر محرک‌های مهم تبخیری مثل دمای سطحی (Thirumalai؛ Sun *et al.*, 2016؛ Arora *et al.*, 2016)؛ بارش (Hejabi, 2021؛ Dai and Wigley, 2000)، رطوبت خاک (Nicolai-Shaw *et al.*, 2016)، رطوبت نسبی (Hegerl *et al.*, 2015) و سرعت باد (Hurrell *et al.*, 2003) تأثیر

گرفت.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

کشور ایران در بخش خشک و نیمه خشک جهان و غرب آسیا در عرض ۲۵ تا ۳۹ شمالی و طول جغرافیایی ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی با مساحت ۱,۶۴۸,۰۰۰ کیلومتر مربع به‌عنوان هجدهمین کشور از نظر مساحت قرار گرفته است که متوسط بارش سالانه آن کمتر از یک سوم متوسط جهانی است (Salehi *et al.*, 2019)؛ جهان است که تحت سلطه رشته کوه‌های ناهموار از جمله زاگرس و البرز قرار گرفته است که حوضه‌ها یا فلات‌های مختلف را از یکدیگر جدا می‌کند. موقعیت جغرافیایی این رشته کوه‌ها باعث ایجاد دو کویر بزرگ دشت لوت و دشت کویر شده که به طرز چشمگیری بر آب و هوای ایران تأثیر می‌گذارند. اقلیم بخش شمالی ایران از نوع مدیترانه‌ای و مرطوب است اما بخش اعظم آن بر اساس طبقه‌بندی‌های مختلف اقلیمی در طبقه‌بندی خشک یا نیمه خشک قرار می‌گیرد (Tabari *et al.*, 2014). در این مطالعه از داده‌های اقلیمی ۱۲۳ ایستگاه همدید بدون خلاء آماری ۳۰ ساله از ۱۹۹۰-۲۰۱۹ به منظور محاسبه تبخیر و تعرق مرجع استفاده شد که موقعیت جغرافیایی آن‌ها در شکل (۱) مشخص شده است. در این مطالعه تلاش شد پراکنش جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه‌های مورد استفاده کل گستره ایران را پوشش داده و در عین حال از جدیدترین داده‌های موجود استفاده شود. داده‌های اقلیمی مورد استفاده شامل دمای متوسط روزانه در ارتفاع ۲ متری (درجه سلسیوس)، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)،  $e_s$  فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)،  $e_a$  فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)، و ساعات آفتابی (ساعت) هستند.



شکل ۱- پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه در گستره ایران

### محاسبه تبخیر و تعرق

محاسبه تبخیر و تعرق مرجع بر اساس معادله Penman-

دوره سوم از ۱۹۹۷ به بعد افزایش معناداری دارد. نتیجه دیگر این مطالعه وجود همبستگی بین تبخیر و تعرق مرجع با ۸ شاخص پیونداز دور است که شاخص‌های AO و AMO و شاخص تابستانی دریای چین جنوبی بیشترین پتانسیل در پیش‌بینی تبخیر و تعرق سالانه را دارند. دلیل تأثیرگذاری این شاخص‌ها بر تبخیر و تعرق مرجع تأثیرگذاری آن بر عوامل اقلیمی مؤثر بر تبخیر و تعرق است. Le and Bae (2020) واکنش تبخیر جهانی را به الگوهای اقلیمی اصلی در اقلیم پایه و آینده شبیه‌سازی شده CMIP5 بررسی کردند. در این مطالعه واکنش تبخیر جهانی به شاخص‌های پیونداز دور IOD، NAO و ENSO بررسی شد و مشخص گردید شاخص ENSO در مناطق اقیانوس آرام حاره‌ای، شاخص IOD در بخش غربی اقیانوس هند حاره‌ای و شاخص NAO روی مناطق اقیانوس اطلس شمالی نزدیک اروپا محرک اصلی تبخیر هستند. از سوی دیگر، تبخیر از خشکی‌ها نسبت به مناطق اقیانوسی به شاخص‌های پیونداز دور حساسیت کمتری داشته‌اند و تأثیر مکانی شاخص‌های پیونداز دور بر تبخیر جهانی در دوره ۱۹۰۶-۲۰۰۰ در مقایسه با دوره ۲۰۰۶-۲۱۰۰ برای NAO و IOD تا حدودی معنادارتر و برای ENSO غیرمعنادار است. بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که بررسی ارتباط شاخص‌های پیونداز دور با تبخیر و تعرق در ایستگاه‌های محدود (Tabari *et al.*, 2014, a,b)، اقلیم‌های خاص (Sabziparvar *et al.*, 2011) و با شاخص‌های محدود (Meza, 2005؛ Sabziparvar *et al.*, 2011؛ Chai *et al.*, 2018؛ Dong *et al.*, 2021) انجام شده است. وجود این خلأها نشان می‌دهد بررسی همبستگی بین شاخص‌های پیونداز دور با تبخیر و تعرق که تنوع فرکانس داشته و از نظر پوشش مکانی پوشش کافی باشد انجام نشده است. از سوی دیگر، استفاده از روش همبستگی وجود ارتباط بین شاخص‌های پیونداز دور به عنوان متغیرهای پیش‌بینی کننده را ممکن می‌سازد (Yu *et al.*, 2015؛ Grainger *et al.*, 2016؛ Li *et al.*, 2017؛ Zappa *et al.*, 2018؛ Helali *et al.*, 2021). بنابراین هدف اصلی و نوآوری این مطالعه بررسی وجود همبستگی بین شاخص‌های پیونداز دور متعدد با فرکانس و تأخیرهای زمانی مختلف با تبخیر و تعرق ماهانه با پوشش مکانی مترام که عمده مناطق ایران را پوشش دهد است. مزیت اصلی این نوع مطالعه امکان‌سنجی استفاده از شاخص‌های پیونداز دور به عنوان عامل مهم در تبخیر و تعرق مرجع مناطق مختلف جغرافیایی ایران است. در نتیجه این مطالعه می‌توان برنامه‌ریزی‌های زمانی ماهانه و همچنین کوتاه، میان و بلندمدت نیاز آبی عمده مناطق ایران را بر مبنای شاخص‌های پیونداز دور انجام داد. از طرف دیگر، به عنوان مطالعه پایه در استفاده از شاخص‌های پیونداز دور در مدل‌سازی و پیش‌بینی تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین در نظر

استفاده از مقادیر روزانه تابش خالص، ساعات آفتابی، دمای حداقل و حداکثر و فشار بخار در محیط نرم افزارهای R و Excell برآورد گردید. کنترل کیفی داده‌های اقلیمی با استفاده از تحلیل منحنی جرم مضاعف که روشی گرافیکی است نشان می‌دهد داده‌های مورد استفاده از همگنی برخوردار هستند (Kohler, 1949).

#### شاخص‌های پیوندازدور

مطالعات انجام شده در ایران به تأثیرگذاری بیشتر این شاخص‌ها از جمله شاخص‌های مرتبط با ENSO، NAO، AO و SST ها بر متغیرهای اقلیمی (Amirmoradi et al., 2015؛ Ahmadi et al., 2019؛ Ahmadi et al., 2015)، و از جمله تبخیروتعرق اشاره کرده‌اند (Tabari et al., 2014 a,b؛ Sabziparvar et al., 2010). در این مطالعه داده‌های مربوط به ۳۷ نوع از این شاخص‌ها از تارنمای مرکز ملی اقیانوس و جوی ایالات متحده آمریکا (NCEP/NCAR) دریافت شد که مشخصات آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

PMF-) Monteith-Food and Agriculture Organization 56 (56) در مقیاس روزانه (میلیمتر در روز) و سپس ماهانه (میلیمتر در ماه) انجام شد که معادله آن به صورت زیر است (Allen et al., 1998؛ Allen, 2000):

(رابطه ۱)

$$ET_o = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma 900 / T_a + 273 U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)}$$

که در آن  $R_n$  تابش خالص خورشید (مگاژول بر مترمربع در روز)،  $G$  چگالی شار حرارت خاک (مگاژول بر مترمربع در روز)،  $T_a$  دمای متوسط روزانه در ارتفاع ۲ متری (درجه سلسیوس)،  $U_2$  سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)،  $e_s$  فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)،  $e_a$  فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس) و  $\gamma$  ضریب ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس) است. در این مطالعه مقدار  $G$  به دلیل قابل کوچک بودن در دوره ۳۰ روزه قابل اغماض بوده و صفر در نظر گرفته شده است (Allen et al., 1994). مقدار  $R_n$  برای هر ایستگاه با روش FAO-56 (Allen, 2000) با

جدول ۱- شاخص‌های پیوندازدور مورد استفاده

ردیف	نام شاخص	تعریف	ردیف	نام شاخص	تعریف
۱	AMM	Atlantic Meridional Mode	۲۰	POL	Polar/Eurasia patterns
۲	AMO	Atlantic Multidecadal Oscillation	۲۱	QBO	Quasi Biannual Oscillation at 30 hPa
۳	AO	Arctic Oscillation	۲۲	SCN	Scandinavia Index
۴	CO2	Carbon Dioxide Concentration	۲۳	SFlux	Solar Flux
۵	EA	East Atlantic	۲۴	SOI	Southern Oscillation Index
۶	EAWR	East Atlantic-West Russian	۲۵	SSPOT	Sun Spot
۷	IOD	Indian Oceanic Dipole	۲۶	SST1.2	Polar/Eurasia patterns
۸	MEI	Multi ENSO Index	۲۷	SST3	Quasi Biannual Oscillation at 30 hPa
۹	NAO	North Atlantic Oscillation	۲۸	SST3.4	Scandinavia Index
۱۰	Niño1.2	Extreme Eastern Tropical Pacific SST	۲۹	SST4	Solar Flux
۱۱	Niño3	Tropical Pacific SST	۳۰	SSTas	Southern Oscillation Index
۱۲	Niño3.4	East Central Tropical Pacific SST	۳۱	SSTs	Sun Spot
۱۳	Niño4	Central Tropical Pacific SST	۳۲	TNA	Sea Surface Temperature in Niño 1.2 regional
۱۴	NP	North Pacific Index	۳۳	TNA-TSA	Sea Surface Temperature in Niño 3 regional
۱۵	NTA	North Tropical Atlantic SST Index	۳۴	TNI	Sea Surface Temperature in Niño 3.4 regional
۱۶	ONI	Oceanic Nino Index	۳۵	TNli	Sea Surface Temperature in Niño 4 regional
۱۷	PDO	Pacific Decadal Oscillation	۳۶	TSA	Sea Surface Temperature in 4 region of Niño
۱۸	PNA	Pacific North American	۳۷	WHWP	Sea Surface Temperature in all Niño regional
۱۹	POI	SST Differ of East Pacific from West Pacific			

شاخص‌های پیوندازدور با تبخیروتعرق مرجع ماهانه با تأخیرهای زمانی همزمان تا ۱۲ ماهه با روش همبستگی پیرسون و با کمک ماتریس همبستگی به صورت معادله زیر به دست آمد:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2)}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

#### بررسی ضریب همبستگی

به منظور تحلیل همبستگی از روش پیرسون استفاده شده است. به منظور محاسبه ضریب همبستگی از بسته نرم افزاری R استفاده شده است. تحلیل همبستگی پیرسون عمدتاً برای تحلیل همبستگی دو سری داده مورد استفاده قرار می‌گیرد (Zhong et al., 2017؛ Ding et al., 2019). در این مطالعه همبستگی

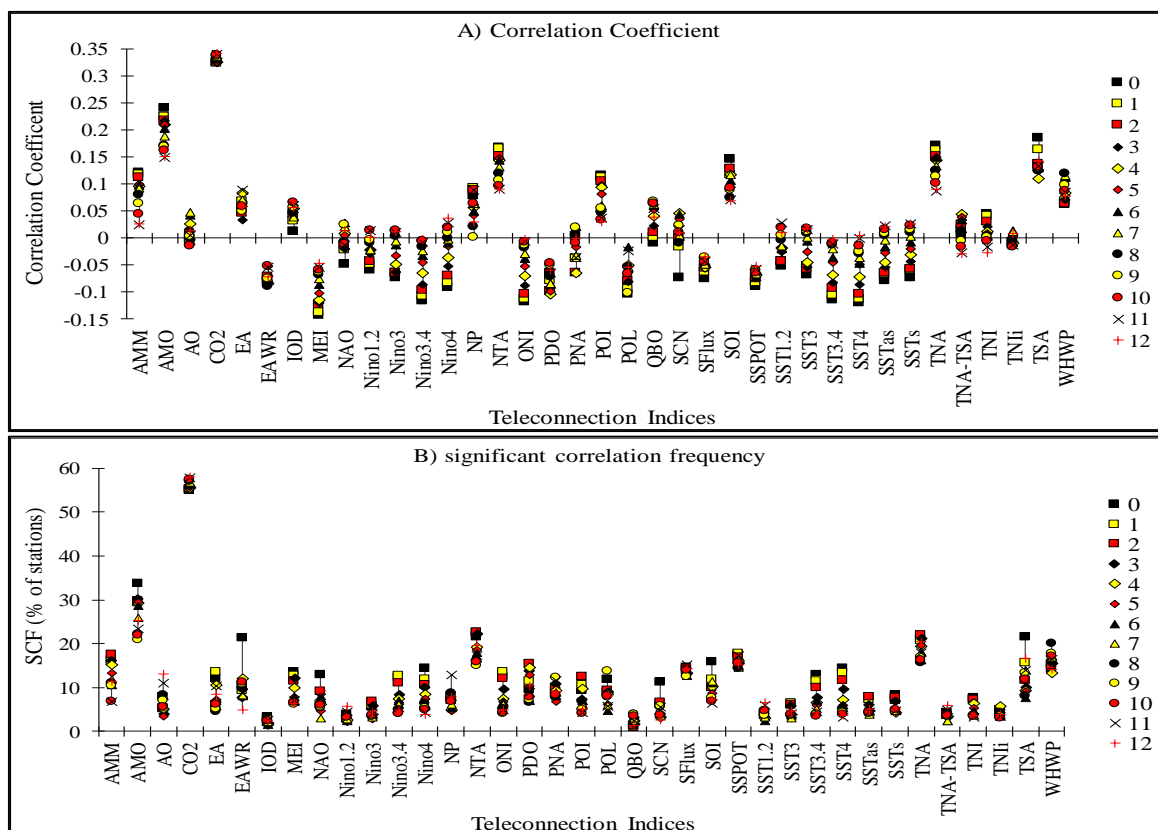
و 2B نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد شاخص‌های AMO، AMM، CO2، EA، IOD، NTA، POI، SOI، TNA، TSA و WHWP در همه تأخیرهای زمانی تنها همبستگی مثبت با تبخیر و تعرق دارند که بیشترین مقدار این همبستگی را می‌توان در شاخص‌های AMO، CO2، NTA، TNA و TSA مشاهده نمود که حداقل مقدار آن بین ۰/۰۷ تا ۰/۳۴ متغیر است. شاخص‌هایی چون EAWR، MEI، Nino3.4، ONI، PDO، POL، SFlux، SSPOT و SST3.4 در همه تأخیرهای زمانی همبستگی منفی با تبخیر و تعرق دارند که بیشترین مقدار همبستگی منفی متعلق به شاخص‌های MEI و SST3.4 بوده است. نوع همبستگی سایر شاخص‌ها بسته به گام زمانی بین مقادیر مثبت و منفی متغیر است (شکل 2A). نتایج نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی همبستگی‌های معنادار با تبخیر و تعرق متعلق به شاخص‌های AMO، CO2، NTA، TNA و WHWP بوده و به ترتیب تا ۳۵، ۵۸، ۲۳، ۲۳ و ۲۱ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه را شامل می‌شوند (شکل 2B).

که در آن  $x_i$  متغیر مستقل (شاخص‌های پیوندازدور) و  $y_i$  متغیر وابسته (تبخیر و تعرق مرجع ماهانه)،  $\bar{x}$  و  $\bar{y}$  متوسط متغیرهای مستقل و وابسته می‌باشد. معناداری نوع همبستگی بر اساس آماره p-value در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد به ترتیب  $\pm 0.36$  و  $\pm 0.46$  به دست آمده و فراوانی همبستگی‌های معنادار (درصد ایستگاه‌ها) نیز استخراج شدند. در بررسی‌های انجام شده روش کریجینگ برای درون‌یابی و پهنه‌بندی تغییرات زمانی-مکانی تبخیر و تعرق مرجع بهترین روش بوده است (Wang et al., 2014). بنابراین در این مطالعه نیز جهت پهنه‌بندی ضرایب همبستگی از بسته نرم‌افزاری ArgGIS 10.4 با روش کریجینگ استفاده گردید.

## نتایج و بحث

### بررسی همبستگی بر اساس تأخیر زمانی

نتایج همبستگی و فراوانی همبستگی‌های معنادار شاخص‌های دورپیوندی مختلف بر مبنای تأخیر زمانی به ترتیب در شکل 2A



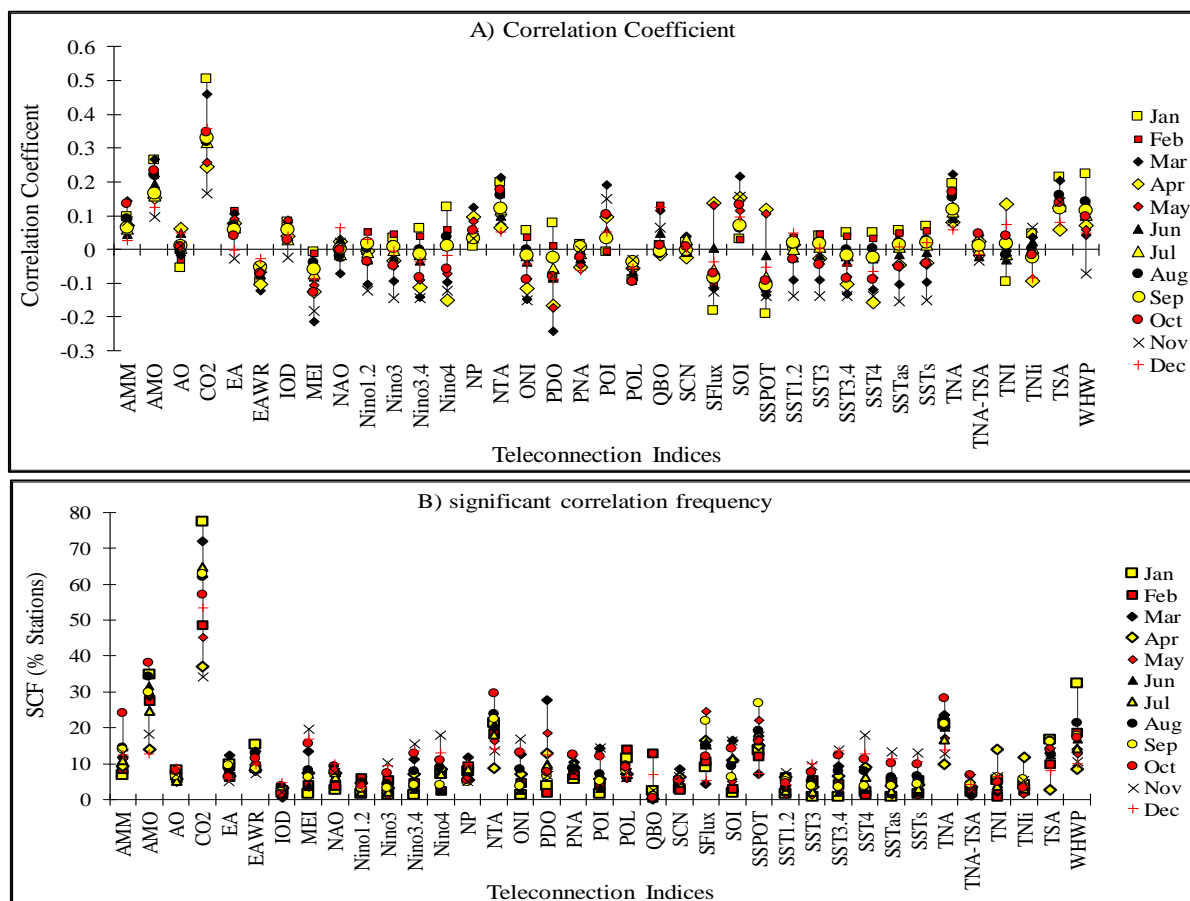
شکل ۲- (A) مقدار ضریب همبستگی و (B) فراوانی همبستگی‌های معنادار بین الگوهای پیوندازدور با تبخیر و تعرق بر مبنای تأخیر زمانی (شماره‌ها بیانگر تأخیرهای زمانی از همزمان تا ۱۲ ماه است)

شاخص‌ها صرفاً همبستگی مثبت با تبخیر و تعرق دارند که می‌توان از آن جمله به شاخص‌های AMO، AMM، CO2، EA، IOD، NTA، POI، SOI، TNA و TSA اشاره کرد که بیشترین مقدار متعلق به شاخص‌های

بررسی همبستگی بر اساس مقیاس ماهانه  
بررسی نوع و فراوانی همبستگی‌های معنادار در هر ماه به ترتیب در شکل 3A و 3B ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند بعضی از

WHWP به مقدار  $-0.09$  تا  $0.24$  در ماه‌های نوامبر و ژانویه مشاهده نمود (شکل 3A). بررسی نتایج نشان می‌دهد بیشترین فراوانی همبستگی‌های معنادار در ماه‌های مختلف متعلق به شاخص‌های AMO (۱۲ تا ۳۸ درصد ایستگاه‌ها در ماه‌های دسامبر و اکتبر)،  $CO_2$  (۳۴ تا ۷۸ درصد ایستگاه‌ها در ماه‌های نوامبر و ژانویه)، NTA (۱۰ تا ۲۹ درصد ایستگاه‌ها در ماه‌های آوریل و اکتبر)، SSPOT (۹ تا ۲۶ درصد ایستگاه‌ها در ماه‌های دسامبر و سپتامبر)، TNA (۱۰ تا ۲۸ درصد ایستگاه‌ها در ماه‌های آوریل و اکتبر) و WHWP (۸ تا ۳۲ درصد ایستگاه‌ها در ماه‌های آوریل و ژانویه) را به خود اختصاص داده‌اند (شکل 3B).

AMO و  $CO_2$  می‌باشد. از طرف دیگر، دامنه تغییرات ضریب همبستگی مثبت شاخص  $CO_2$  بسته به ماه مورد نظر بیشتر است که کمترین و بیشترین مقدار آن در ماه نوامبر و ژانویه به ترتیب  $0.17$  و  $0.52$  می‌باشد. شاخص‌هایی که در همه ماه‌ها همبستگی منفی دارند تنها به شاخص‌های EAWR، MEI و POL محدود شده‌اند. نوع همبستگی سایر شاخص‌ها در ماه‌های مختلف بین مقادیر مثبت و منفی تغییر می‌کند که بیشترین تغییرات را می‌توان در شاخص‌های Nino4 به مقدار  $-0.18$  تا  $0.16$  در ماه‌های آوریل و ژانویه، PDO به مقدار  $-0.27$  تا  $0.1$  در مارس و ژانویه؛ SFlux به مقدار  $-0.21$  تا  $0.15$  در ماه‌های ژانویه و آوریل؛ و SSPOT به مقدار  $-0.23$  تا  $0.12$  در ماه‌های ژانویه و آوریل؛



شکل ۳- (A) مقدار ضریب همبستگی و (B) فراوانی همبستگی‌های معنادار بین الگوهای پیوندازدور با تبخیروتعرق بر مبنای ماه‌های سال

می‌کند به طوری که بیشترین مقدار آن در ماه‌های زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب در تأخیرهای ۵ تا ۱۲، ۳ تا ۶، ۳ تا ۵ و ۱ تا ۴ ماهه به مقدار  $0.37$  می‌باشد (شکل 4A). تأثیرگذاری با تأخیر شاخص AMO را می‌توان به فاصله مکانی آن از منطقه مورد مطالعه و همچنین فرکانس رخداد آن مرتبط دانست. Dong *et al.* (2021) در بخش غیر موسمی چین نیز نشان دادند که شاخص AMO با تبخیروتعرق سالانه بیشتر ایستگاه‌ها همبستگی

بررسی ضریب همبستگی مهم‌ترین شاخص‌ها همان‌طور که در بخش قبل مشخص گردید شاخص‌های AMO،  $CO_2$ ، NTA، SOI، TNA، TSA، MEI و PDO بالاترین ضریب همبستگی و همچنین بیشترین فراوانی همبستگی‌های معنادار را با تبخیروتعرق ماهانه در تأخیرهای زمانی مختلف نشان دادند. تحلیل نتایج نشان می‌دهد همبستگی شاخص AMO با تبخیروتعرق ماهانه عمدتاً مثبت و بین  $-0.05$  تا  $0.37$  نوسان

معنادار داشته‌اند.

است ولی در سایر ماه‌ها از ۰/۲۳ تجاوز نمی‌کند (شکل 4F). ضریب همبستگی بین شاخص MEI و تبخیر و تعرق ماهانه عمدتاً منفی است که حداکثر آن ۰/۳۲- است که بیشترین مقدار آن در ماه‌های فوریه، مارس و دسامبر دیده می‌شود. نوع همبستگی شاخص PDO با تبخیر و تعرق نیز در ماه‌های ژانویه، فوریه، ژوئن تا اکتبر و دسامبر ترکیبی از همبستگی‌های مثبت و منفی (۰/۱۹- تا ۰/۱۳+) نوسان می‌کند، ولی در سایر ماه‌ها در همه تأخیرهای زمانی بین ۰/۳۰- تا ۰/۴۴- متغیر است که در ماه مارس اتفاق افتاده است (شکل 4H). این تنوع تأثیرگذاری شاخص PDO بر تبخیر و تعرق ماهانه به دلیل فرکانس رخداد آن که دهه‌ای است می‌باشد.

#### توزیع مکانی ضرایب همبستگی

با توجه به اینکه بیشترین مقدار تبخیر و تعرق در ماه‌های جولای- سپتامبر اتفاق می‌افتد پراکنش ضرایب همبستگی ۶ شاخص مهم در این دوره بررسی شده و به‌عنوان نمونه پراکنش ماه جولای به صورت شماتیک در شکل (۵) ارائه شده است. بررسی پراکنش ضریب همبستگی نشان می‌دهد همبستگی معنادار عمدتاً در شاخص CO<sub>2</sub> بیشتر مناطق کشور در همه تأخیرهای زمانی در بخش شمال غربی، شمالی، شمال شرقی، مرکز ایران و بخش جنوبی فلات مرکزی را پوشش داده است در حالی که در شاخص‌های AMO، NTA و TNA در تأخیر ۳ و ۴ ماهه بیشترین پراکنش همبستگی‌های مثبت معنادار دیده می‌شود. در ماه آگوست نیز شاخص مربوط به CO<sub>2</sub> در همه تأخیرهای زمانی بیشترین پراکنش همبستگی‌های معنادار را نشان می‌دهند در حالی که شاخص‌های AMO، NTA و TNA در تأخیرهای ۱ تا ۳ ماهه بیشترین پراکنش همبستگی‌های معنادار را به ویژه در مناطق شمال غربی، بخش غربی رشته کوه البرز و بخش جزئی جنوب شرق نشان می‌دهد ولی شاخص SOI و TSA در مناطق جزئی همبستگی معنادار نشان داده است.

بررسی پراکنش ضریب همبستگی شاخص‌های پیوندزودتر با تبخیر و تعرق ماه سپتامبر نشان می‌دهد تنها شاخص CO<sub>2</sub> و به طور جزئی AMO و NTA بیشتر ایستگاه‌ها را به ویژه در بخش شمال غربی، شمالی، شمال شرقی، بخش مرکزی ایران و جنوب شرق پوشش داده است. بررسی ضرایب همبستگی شاخص‌های مورد بررسی با تبخیر و تعرق ماه جولای پراکنش گسترده‌تر شاخص CO<sub>2</sub> را به ویژه در بخش شمال غربی، شمال شرقی، سواحل جنوبی دریای کاسپین، بخش عمده فلات مرکزی ایران، بخش جزئی جنوب غربی و جنوب شرقی نشان می‌دهد (شکل ۵) که در همه تأخیرهای زمانی تقریباً یکنواخت است. بر این اساس

ضریب همبستگی شاخص CO<sub>2</sub> با تبخیر و تعرق ماهانه در اکثر ماه‌ها بین ۰/۳۲ تا ۰/۵۲ در ماه‌های مختلف نوسان دارد. مقدار ضریب همبستگی در همه تأخیرهای زمانی مقدار بالایی در حدود ۰/۵۰ دارد که بیانگر تأثیرگذاری CO<sub>2</sub> بر تبخیر و تعرق در کلیه ماه‌ها و تأخیرهای زمانی است که می‌توان آن را به نوسانات موضعی و فعالیت‌های گرمایشی زمین مرتبط دانست (شکل 4B). همبستگی شاخص NTA با تبخیر و تعرق ماهانه در ماه‌های مختلف هم مثبت و هم منفی است. بر این اساس ضریب همبستگی در ماه‌های زمستان و تابستان کاملاً مثبت (۰/۰۵ تا ۰/۳۵) و سایر ماه‌ها هم مثبت و هم منفی است که دامنه نوسان آن بین ۰/۱۵- تا ۰/۲۵ تغییر می‌کند. از سوی دیگر، دامنه تغییرات ضریب همبستگی NTA و تبخیر و تعرق در همه ماه‌ها و تأخیرهای زمانی زیاد بوده و بین ۰/۱۵- تا ۰/۳۸+ نوسان می‌کند (شکل 4C) به طوری که بیشترین مقدار این ضریب در زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب در تأخیرهای ۸ تا ۱۲، ۳ تا ۷، ۱ تا ۴ و ۱۰ تا ۱۲ ماهه دیده می‌شود.

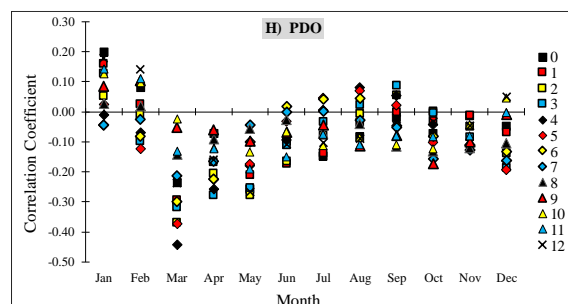
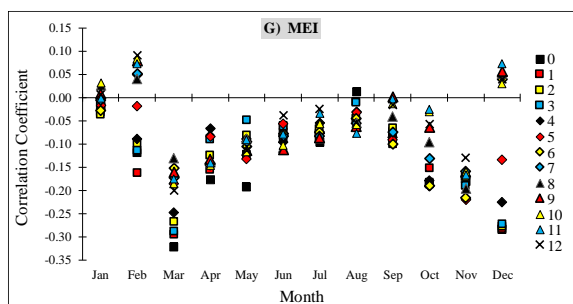
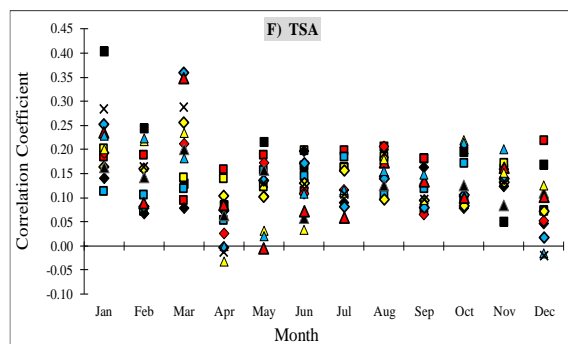
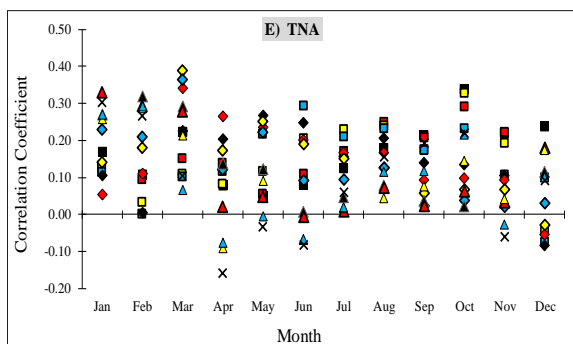
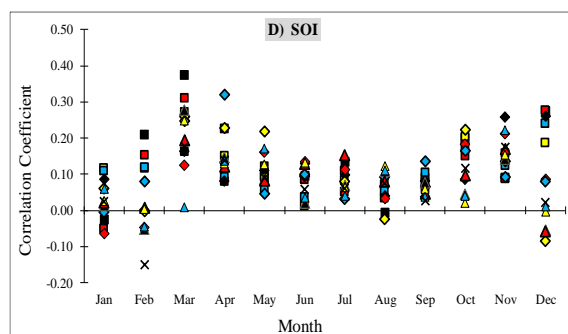
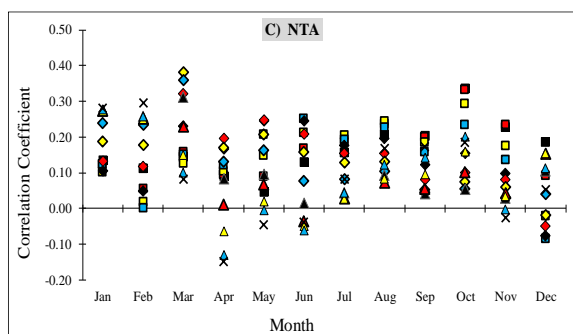
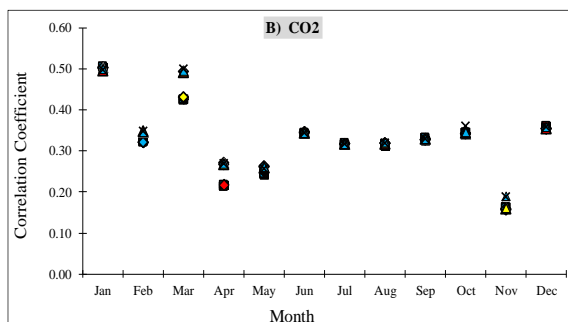
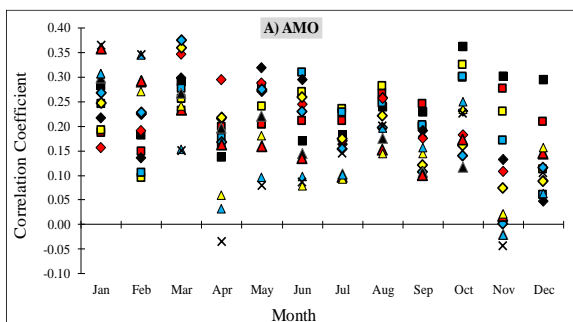
همبستگی شاخص SOI با تبخیر و تعرق ماهانه عمدتاً مثبت است ولی در ماه‌های ژانویه، فوریه، اوت و دسامبر مقادیر منفی نیز دیده می‌شود (شکل 4D) به طوری که بیشترین ضریب همبستگی در فصل‌های زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب در تأخیرهای همزمان تا ۳، ۵ تا ۷، ۷ تا ۱۱ و ۲ تا ۶ ماهه دیده می‌شود. این نتایج می‌تواند به دلیل تأخیر رخداد پدیده SOI در منطقه اقیانوس آرام و فاصله مکانی آن با منطقه مورد مطالعه باشد. بر اساس مطالعه Sabziparvar et al. (2011) شاخص ENSO (SOI) با تبخیر و تعرق فصلی و ماهانه اقلیم‌های گرم ایران همبستگی معنادار نشان داده است که تا حدودی با نتایج مطالعه کنونی تطابق دارد هر چند تنها در اقلیم‌های گرم بررسی شده است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند همبستگی معنادار شاخص SOI با بارش ایران نیز با تأخیر زمانی چند ماهه همراه است (Helali et al., 2020 a,b). در مطالعه Yan et al. (2013) مشخص شده است شاخص‌های SOI و MEI می‌توانند با تبخیر و تعرق همبستگی داشته باشند به طوری که در فاز سرد ENSO (La Nina) افزایش تبخیر رخ خواهد داد.

تغییرات همبستگی شاخص TNA با تبخیر و تعرق در ماه‌های مختلف بین ۰/۱۵- تا ۰/۳۹+ نوسان می‌کند که بالاترین مقادیر در ماه‌های زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب در تأخیرهای ۶ تا ۱۲، ۳ تا ۶، ۱ تا ۳، و ۱ تا ۳ ماهه به مقدار ۰/۲۷ تا ۰/۳۸+ است (شکل 4E). این در حالی است که مقدار همبستگی شاخص TSA با تبخیر و تعرق در ماه‌های زمستان تا ۰/۴۰ رسیده

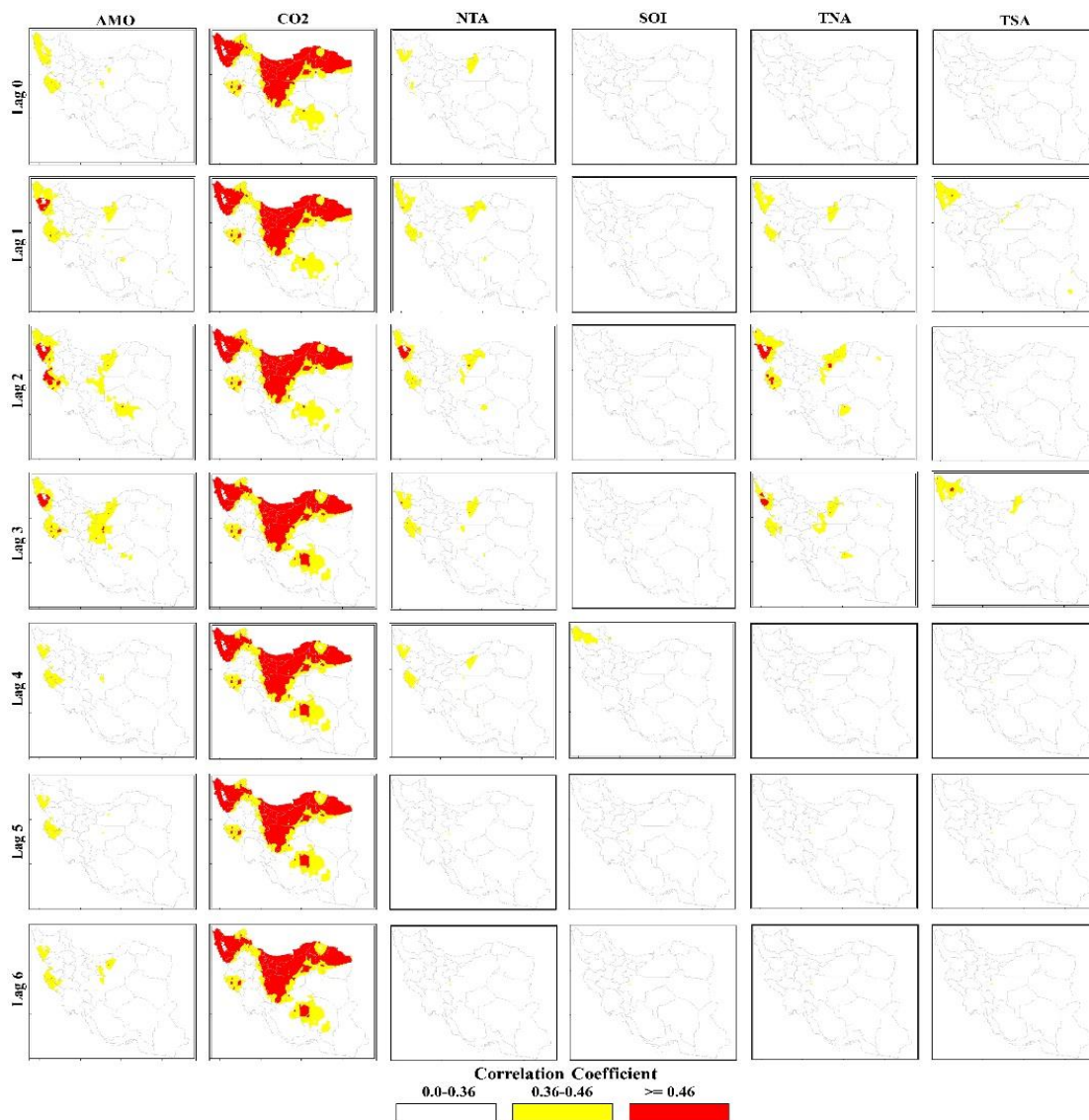


تأثیرگذاری آن بر گرمایش جهانی و در نتیجه افزایش تبخیر و تعرق نسبت داد ولی ممکن است موجب کاهش تبخیر و تعرق نیز گردد. این موضوع می‌تواند به دلایل فیزیولوژیکی گیاهان از جمله بسته شدن روزنه‌های گیاهی باشد

می‌توان گفت شاخص  $CO_2$  توانسته است هم بیشترین مقدار همبستگی مثبت و هم بیشترین پراکنش همبستگی‌های معنادار را در اکثر ماه‌های سال با تبخیر و تعرق مرجع به خود اختصاص دهد. دلیل همبستگی مثبت شاخص  $CO_2$  را می‌توان به



شکل ۴- مقدار ضریب همبستگی بهترین شاخص‌های پیوندازدور موثر بر تبخیر و تعرق در ماه‌های مختلف و تاخیر زمانی متفاوت (اعداد بیانگر تأخیر زمانی، محور عمودی مقدار ضریب همبستگی، محور افقی بیانگر ماه‌های سال)



شکل ۵- توزیع مکانی ضرایب همبستگی معنادار مهم‌ترین شاخص‌های پیوندازدور در ماه جولای

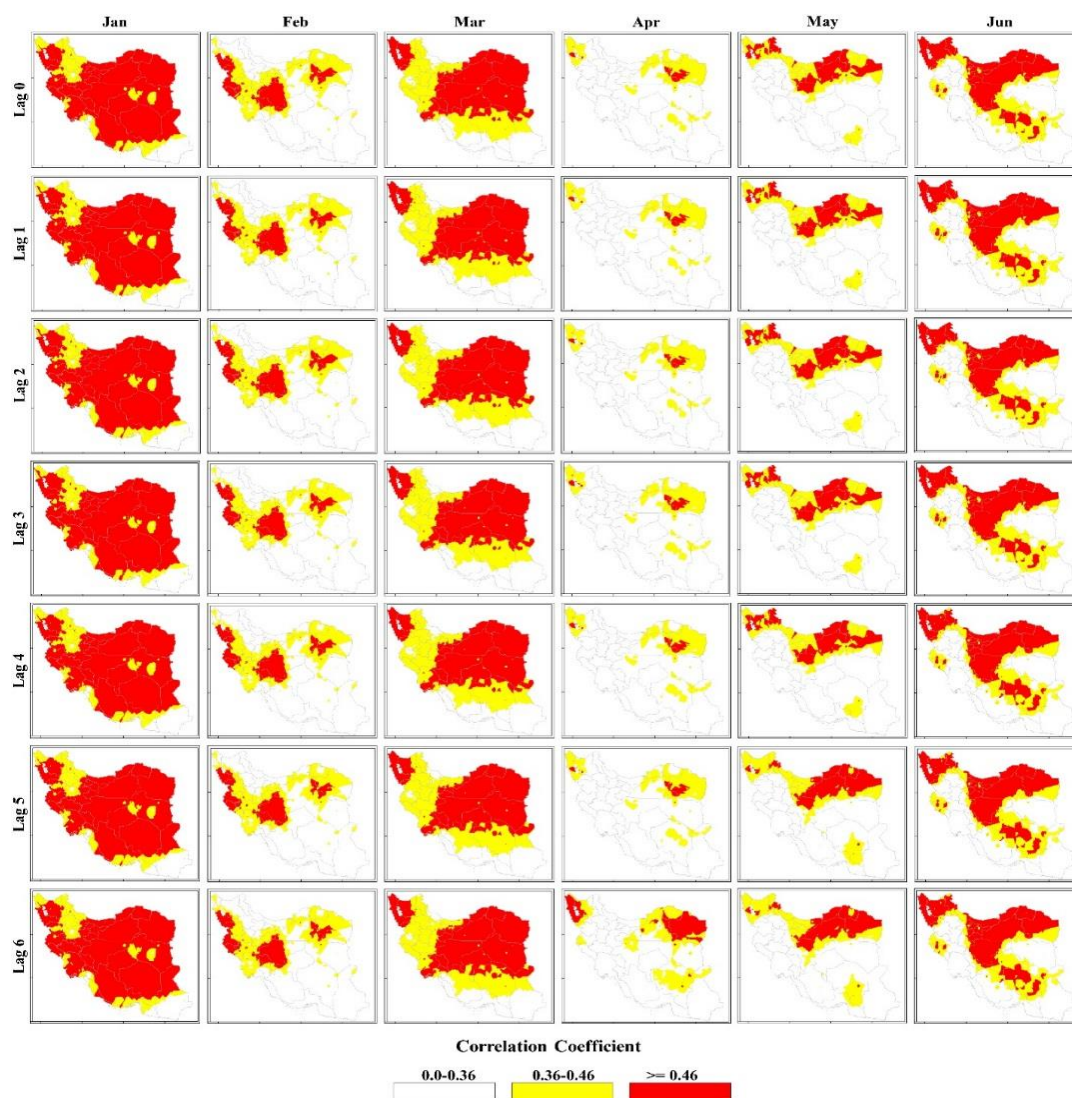
#### توزیع مکانی همبستگی شاخص CO<sub>2</sub> با تبخیر و تعرق

اکثر مطالعات آزمایشگاهی و مزرعه‌ای نشان داده‌اند افزایش غلظت دی اکسید کربن در شرایطی که وضعیت رطوبتی محدودیتی نداشته باشد می‌تواند باعث تأثیر بر مقاومت روزنه‌ای و در نتیجه تبخیر و تعرق و همچنین عملکرد محصولات زراعی گردد (Shams *et al.*, 2012؛ Chen *et al.*, 2018؛ Hejabi, 2021). با توجه به بالا بودن ضریب همبستگی و همچنین فراوانی همبستگی‌های معنادار تبخیر و تعرق مرجع با شاخص CO<sub>2</sub> پراکنش و توزیع آن در تأخیرهای زمانی همزمان تا ۶ ماه در فصل زمستان و بهار در شکل (۶) و فصول تابستان و پاییز در شکل (۷) نشان داده شده است. بر اساس شکل (۶) مشاهده می‌شود همبستگی شاخص CO<sub>2</sub> در ماه ژانویه در اکثر مناطق ایران در تمام تأخیرهای موجود مثبت و معنادار است. این همبستگی معنادار در ماه فوریه به بخش شمال غربی، غربی و شمال شرقی محدود شده است. همبستگی

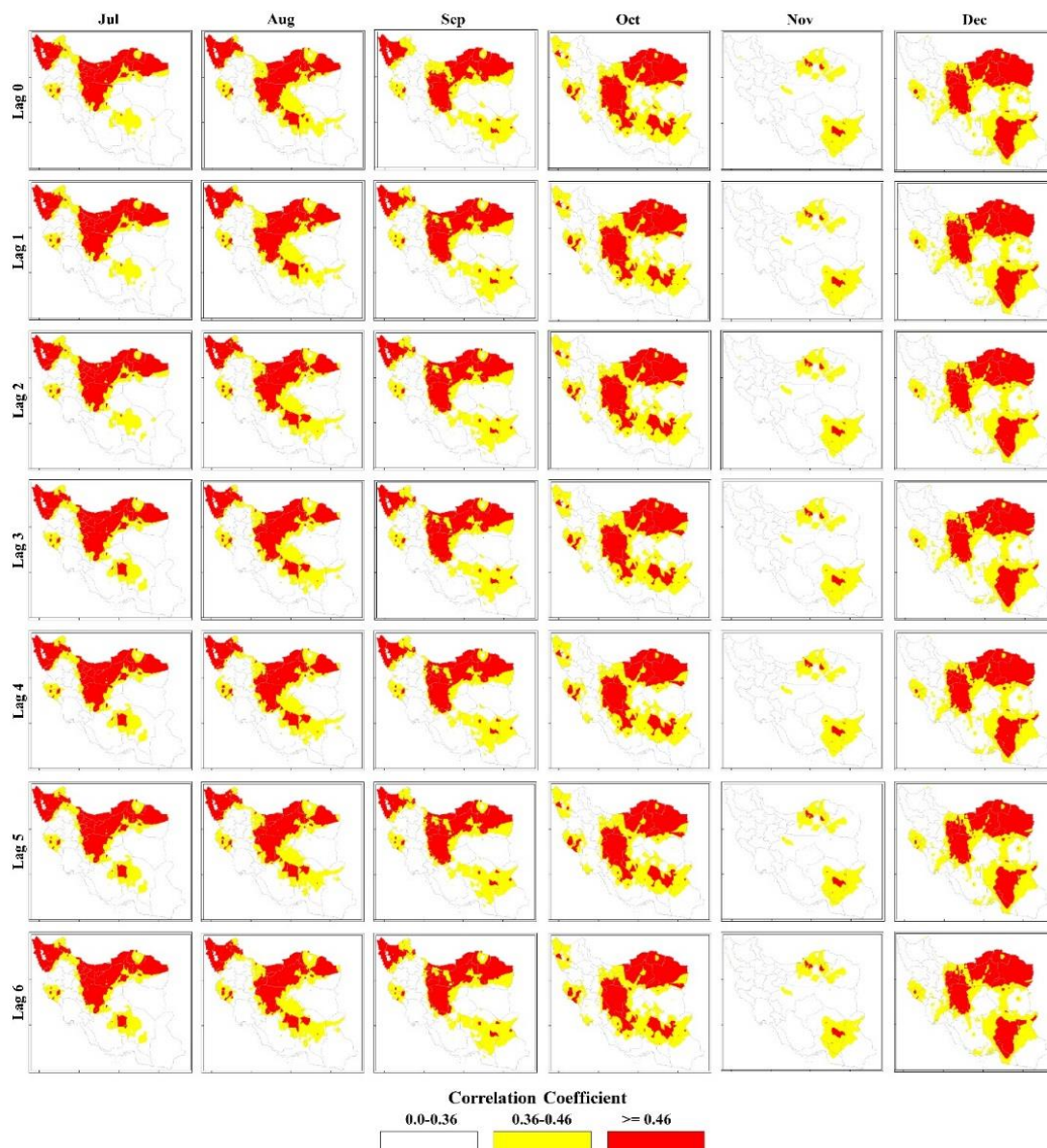
معنادار در ماه مارس در اکثر مناطق ایران به استثناء سواحل شمالی خلیج فارس-دریای عمان دیده می‌شود. در ماه آوریل دیده می‌شود که تنها در بخش‌هایی از شمال شرق و شمال غرب همبستگی معنادار دارند که در تأخیر ۶ ماهه این معنادار در بخش جنوب شرقی نیز دیده می‌شود. پراکنش همبستگی معنادار بین شاخص CO<sub>2</sub> و تبخیر و تعرق در ماه مه بیشتر شده و نیمه شمالی، شمال شرقی، شمال غربی، بخش مرکزی و شرقی رشته کوه البرز و گاهی بخش جزئی جنوب ایران را پوشش می‌دهد. پراکنش همبستگی معنادار در ماه ژوئن نسبت به دو ماه آوریل و مه گسترده‌تر شده و علاوه بر بخش‌های شمال شرقی، شمالی، شمال غربی، تا بخش‌های مرکزی، جنوبی، شرقی و تا حدی غربی گسترش یافته است. با توجه به این نتایج می‌توان گفت در بخش‌های گفته شده شاخص CO<sub>2</sub> با تأخیرهای مختلف به‌عنوان متغیر پیش‌بینی کننده تبخیر و تعرق ماهانه زمستان و بهار مورد

در مطالعه Shams *et al.* (2012) افزایش CO<sub>2</sub> موجب کاهش تبخیروتعرق گیاه لوبیا شده است که با نتایج این مطالعه که اثر CO<sub>2</sub> بر تبخیروتعرق مرجع متفاوت است. Chen *et al.* (2018) عامل اصلی مؤثر بر تبخیروتعرق جنگل‌های evergreen needleleaf آمریکای شمالی در اقلیم‌های مختلف را به دمای هوا، خاک، تابش خالص و غلظت CO<sub>2</sub> مرتبط می‌داند. مطالعه Hejabi (2021) نیز تاثیرگذاری متغیرهای اقلیمی و همچنین غلظت CO<sub>2</sub> بر تبخیروتعرق مرجع حوضه دریاچه ارومیه را نشان داده است. در مطالعه کنونی همبستگی تبخیروتعرق مرجع ماهانه با شاخص CO<sub>2</sub> در اکثر ماه‌ها و تأخیرهای زمانی معنادار و مثبت است (به جز نوامبر و دسامبر). بنابراین استفاده از شاخص غلظت کربن در ایستگاه موناوالوآ می‌تواند به‌عنوان شاخص پیش‌بینی‌کننده تبخیروتعرق بخش‌های گسترده‌ای از ایران مورد استفاده قرار گیرد.

استفاده قرار گیرد. الگوی پراکنش ضریب همبستگی معنادار بین شاخص CO<sub>2</sub> و تبخیروتعرق ماهانه در فصل تابستان تغییرات زیادی نشان نمی‌دهد به طوری که این معناداری در بخش شمال غربی، شمالی، شمال شرقی، بخش مرکزی و تا حدودی جنوب و جنوب غرب ایران به وضوح قابل مشاهده است (شکل ۷). مقدار تبخیروتعرق در ماه‌های تابستان حداکثر مقدار خود را دارد و بررسی همبستگی شاخص CO<sub>2</sub> با تبخیروتعرق آن می‌تواند در پیش‌بینی و برنامه‌ریزی مدیریت آبیاری بهره‌برداری نمود. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دید تبخیروتعرق فصل تابستان بخش‌های زیاد ایران با CO<sub>2</sub> همبستگی زیاد و مثبت داشته که قابلیت استفاده از آن را برای پیش‌بینی تبخیروتعرق ممکن می‌سازد. پراکنش همبستگی‌های معنادار بین شاخص CO<sub>2</sub> و تبخیروتعرق در فصل پاییز در دو ماه اکتبر و نوامبر در اکثر بخش‌های ایران به وضوح دیده می‌شود ولی در ماه نوامبر این توزیع مکانی همبستگی‌های معنادار خیلی محدود شده است.



شکل ۶- توزیع مکانی ضرایب همبستگی شاخص CO<sub>2</sub> با تبخیروتعرق در فصول زمستان و بهار



شکل ۷- توزیع مکانی ضرایب همبستگی شاخص CO<sub>2</sub> با تبخیر و تعرق در فصول تابستان و پاییز

## بحث و نتیجه‌گیری

تبخیر و تعرق به‌عنوان یکی از مولفه‌های مهم چرخه هیدرولوژی است که بر کنترل انرژی بین اکوسیستم‌ها و اتمسفر مؤثر است (Shenbin *et al.*, 2006). بنابراین بررسی تأثیر متغیرهای بزرگ‌مقیاس اقلیمی از قبیل شاخص‌های پیوندازدور و همچنین نوسانات و پیش‌بینی آن می‌تواند در برنامه‌ریزی، مدیریت و زمان‌بندی آبیاری به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک مثل ایران اهمیت زیادی داشته باشد (Hosseinzadeh Talaee *et al.*, 2014). عمده مطالعات صورت گرفته در زمینه تبخیر و تعرق به بررسی روند (Dinpashoh *et al.*, 2011؛ Tabari *et al.*, 2012) و تأثیرگذاری شاخص‌های بزرگ‌مقیاس (Cao *et al.*, 2019؛ Nouri and Bannayan, 2019؛ Rahman *et al.*, 2019) و تأثیرگذاری شاخص‌های بزرگ‌مقیاس اقلیمی محدود با ایستگاه‌های محدود و اقلیم‌های خاص ایران

معطوف بوده است (Tabari *et al.*, 2014 a,b؛ Sabziparvar *et al.*, 2011). بنابراین در مطالعه کنونی سعی گردید در گستره کل ایران از یک طرف و اثرگذاری شاخص‌های پیوندازدور متعدد با فرکانس‌های مختلف بر تبخیر و تعرق ماهانه در تأخیرهای زمانی مختلف مورد بررسی قرار گیرد. خروجی نهایی این مطالعه امکان استفاده از شاخص‌های پیوندازدور در مدلسازی تبخیر و تعرق مرجع به منظور برنامه‌ریزی‌های زمانی ماهانه و همچنین کوتاه، میان و بلندمدت نیاز آبی فراهم می‌کند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد شاخص‌های پیوندازدور می‌توانند ارتباط و همبستگی زیادی با تبخیر و تعرق ماهانه ایستگاه‌های ایران داشته باشند که به طور متوسط در کل ایستگاه‌های هم‌دید ایران بین ۰/۳۲- تا ۰/۵۷ می‌باشد ولی در مقیاس ایستگاهی بین ۰/۳۷۱- تا ۰/۹۱۹ در تأخیرهای زمانی مختلف و شاخص‌های پیوندازدور مختلف به

تبخیر و تعرق مرجع را می‌توان به تأثیر آن بر افزایش دما نسبت داد هر چند در تعدادی از مطالعات انجام شده افزایش CO<sub>2</sub> باعث کاهش تبخیر و تعرق شده است (Chen et al., 2012; Shams et al., 2018; Hejabi, 2021). این نتیجه به دلیل بسته شدن روزنه‌های گیاهی در هنگام افزایش غلظت دی اکسید کربن و افزایش دما است.

نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد شاخص‌های پیوندازدور مورد استفاده به خصوص غلظت دی اکسید کربن در اکثر مناطق ایران به خصوص در بخش‌های شمال غربی، شمالی، شمال شرقی، بخش مرکزی و تا حدودی جنوب و جنوب غرب ایران در همه ماه‌ها و تأخیرهای زمانی پتانسیل پیش-بینی تبخیر و تعرق مرجع را دارند. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص می‌شود تأثیر غلظت دی اکسید کربن در منطقه مونالوآی هاوایی بر تبخیر و تعرق مرجع اکثر ایستگاه‌های ایران در اکثر ماه‌ها و تأخیرهای همزمان تا ۱۲ ماه همبستگی مثبت معنادار داشته و پتانسیل مناسبی جهت پیش‌بینی و مدلسازی تبخیر و تعرق مرجع و در نتیجه نیاز آبی خواهد داشت. این در حالی است که شاخص‌های دیگر از جمله SOI، NTA، AMO، TSA و TNA در تأخیرها و ماه‌های محدود در مناطق کمی از ایران به ویژه بخش شمالی غربی همبستگی‌های معنادار با تبخیر و تعرق ماهانه نشان می‌دهند و نمی‌توانند قابلیت تعمیم دادن به عمده مناطق کشور داشته باشند. بر اساس این نتایج می‌توان در مطالعات آتی استفاده از این شاخص‌ها را در امر مدلسازی و پیش‌بینی تبخیر و تعرق ماهانه در گام‌های زمانی مختلف به شرط استفاده از مدل‌های مناسب مورد استفاده قرار داد. به عبارت دیگر می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد شاخص‌های پیوندازدور می‌توانند در برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب و نیاز آبی مناطق مختلف ایران در همه ماه‌ها کاربرد داشته و مورد استفاده قرار گیرند.

### تشکر و قدردانی

به این وسیله از سازمان هواشناسی جمهوری اسلامی ایران به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز، تشکر و قدردانی می‌گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

دست آمده است. با توجه به نتایج حاصله شاخص‌های AMO، CO<sub>2</sub>، NTA، TNA، TSA (بیشترین همبستگی مثبت)، و شاخص‌های MEI و SST3.4 (بیشترین مقدار همبستگی منفی) را در تأخیرهای زمانی مختلف با تبخیر و تعرق دارند. از سوی دیگر، بیشترین فراوانی تعداد ایستگاه‌های دارای همبستگی‌های معنادار با تبخیر و تعرق متعلق به شاخص‌های AMO، CO<sub>2</sub>، NTA، TNA و WHWP است که به ترتیب ۵۸، ۳۵، ۲۳، ۲۳ و ۲۱ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه را شامل می‌شوند. همچنین گسترده‌ترین پراکنش همبستگی‌های معنادار متعلق به غلظت CO<sub>2</sub> مونالوآی هاوایی است که در همه تأخیرهای زمانی و همه ماه‌های مورد مطالعه به جر نوامبر و دسامبر دیده می‌شود. این در حالی است که مطالعات انجام شده در ایران شاخص‌های SOI (Tabari et al., 2011)، AO و NAO (Chai et al., 2018)، ENSO و PDO (Fang et al., 2018)، ENSO و Nino 1.2 (Dong et al., 2021)، AO و AMO (Sun et al., 2016; Arora et al., 2016)، بارش (Dai and Wigley, 2000)، رطوبت خاک (Hegerl et al., 2015) و سرعت باد (Hurrell et al., 2003) نسبت داد که نیازمند مطالعات بیشتر از دیدگاه هواشناسی دینامیکی و همدیدی است.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد با توجه به قابلیت پیش‌بینی پذیری شاخص‌های پیوندازدور و غلظت دی اکسید کربن می‌توان از آن‌ها به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی کننده استفاده کرد (Yu et al., 2015; Grainger et al., 2016; Li et al., 2017; Zappa et al., 2018; Helali et al., 2021). در این مطالعه بهترین شاخص که بالاترین ضریب همبستگی را در اکثر ایستگاه‌ها و تأخیرهای زمانی و ماه‌های مختلف به دست می‌دهد CO<sub>2</sub> در منطقه هاوایی است. دلیل همبستگی مثبت بین غلظت دی اکسید کربن و

### REFERENCES

Ahmadi, M. (2014). Analyzing on the relationship among Teleconnection Patterns (TP) and Iran's Precipitation Characteristics (IPC). *PhD Thesis, Geographical and Remote sensing Department,*

*Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University.*

Ahmadi, M., Salimi, S., Hosseini, S.A., Poorantiyosh., H. Aand Bayat, A. (2019). Iran's precipitation

- analysis using synoptic modeling of major teleconnection forces (MTF), *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 85, 41-56. DOI:10.1016/j.dynatmoce.2018.12.001
- Ahmadi, M., Fathniya, A. and Abkharabat. S. (2015). Trend Analysis of Iran's Precipitation and Its Relation to the Teleconnection Forces, *Journal of Climate Research*, 23, 19-32.
- Allen, R.G., (2000). REF-ET: Reference Evapotranspiration Calculation Software for FAO and ASCE Standardized Equations. Version 2 for Windows [Computer Software]. Univ. of Idaho Research and Extension Center, Kimberly, ID. <http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et>.
- Allen, R.G., Periera, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: guideline for computing crop water requirement. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*. FAO: Rome, Italy.
- Amirmoradi, K., Sabziparvar, A.A., Deihimi, A., 2015. Analysis of the Relationship between Seasonal Streamflow Variations and some Teleconnection Indices by Wavelet Analysis Method (Case study: Northwest Rivers), *Water and Soil Science Journal*, 4(1):269-284.
- Arora, A., Rao, S. A., Chattopadhyay, R., Goswami, T., George, G., and Sabeerali, C. T. (2016). Role of Indian Ocean SST variability on the recent global warming hiatus, *Global Planet. Change*, 143, 21-30. DOI:10.1016/j.gloplacha.2016.05.009
- Biabanaki, M., Eslamian, S.S., Koupai, J.A., Cañón, J., Boni, G. and Gheysari, M. (2013). A principal components/singular spectrum analysis approach to ENSO and PDO influences on rainfall in western Iran. *Hydrol. Res.*, 45, 250-262. DOI:10.2166/nh.2013.166
- Brutsaert, W. and Parlange, M.B. (1998). Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, 396(6706), 30. DOI:10.1038/23845
- Cao, L. and Zhou, Z. (2019). Variations of the Reference Evapotranspiration and Aridity Index over Northeast China: Changing Properties and Possible Causes, *Advances in Meteorology*, Article ID 7692871, 13 pages. DOI:10.1155/2019/7692871
- Chai, R., Sun, S., Chen, H. and Zhou, S. (2018). Changes in reference evapotranspiration over China during 1960-2012: attributions and relationships with atmospheric circulation. *Hydrological Processes*, 32(19), 3032-3048. DOI:10.1002/hyp.13252
- Chen, Y., Xue, Y. and Hu, Y. (2018). How multiple factors control evapotranspiration in North America evergreen needleleaf forests, *Science of the Total Environment*, 622-623, 1217-1224. DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.12.038
- Dai, A. and Wigley, T. M. L. (2000). Global patterns of ENSO-induced precipitation. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1283-1286. DOI:10.1029/1999GL011140
- Ding, Z., Lu, R. and Wang, Y. (2019). Spatiotemporal variations in extreme precipitation and their potential driving factors in non-monsoon regions of China during 1961-2017. *Environmental Research Letters*, 14(2), 024005. DOI:10.1088/1748-9326/aaf2ec
- Dinpashoh, Y., Jhajharia, D., Fakheri-Fard, A., Singh, V.P. and Kahya, E. (2011). Trends in reference crop evapotranspiration over Iran, *Journal of Hydrology*, 399, 422-433. DOI:10.1016/j.jhydrol.2011.01.021
- Dirmeyer, P.A., GAO, X., Zhao, M., Guo, Z., Oki, T. and Hanasaki, N., (2006). GSWP-2: Multimodel analysis and implications for our perception of the land surface. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 87, 1381-1397. DOI:10.1175/BAMS.87.10.1381
- Dong, Y., Zhao, Y., Zhai, J., Zhao, J., Han, J., Wang, Q., He, G. and Chang, H. (2021). Changes in reference evapotranspiration over the nonmonsoon region of China during 1961-2017: Relationships with atmospheric circulation and attributions, *International Journal of Climatology*, 41, 734-751. DOI:10.1002/joc.6722
- Fang, W., Huang, S., Huang, Q., Huang, G., Meng, E. and Luan, J. (2018). Reference evapotranspiration forecasting based on local meteorological and global climate information screened by partial mutual information, *Journal of Hydrology*, 561, 764-779. DOI:10.1016/j.jhydrol.2018.04.038
- Gonsamo, A., Chen, J.M., and Lombardozi, D. (2016). Global vegetation productivity response to climatic oscillations during the satellite era. *Glob. Chan. Biol.*, 22, 3414-3426. DOI:10.1111/gcb.13258
- Grainger, S., Frederiksen, C.S. and Zheng, X. (2016). Projections of Southern Hemisphere atmospheric circulation interannual variability. *Climate Dynamics*, 48(3-4), 1187-1211. DOI:10.1007/s00382-016-3135-2
- Hegerl, G. C., Black, E., Allan, R. P., Ingram, W. J., Polson, D., Trenberth, K. E., Chadwick, R. S., Arkin, P. A., Sarojini, B. B., Becker, A., Dai, A., Durack, P. J., Easterling, D., Fowler, H. J., Kendon, E. J., Huffman, G. J., Liu, C., Marsh, R., New, M., Osborn, T. J., Skliris, N., Stott, P. A., Vidale, P.-L., Wijffels, S. E., Wilcox, L. J., Willett, K. M., and Zhang, X. (2015). Challenges in Quantifying Changes in the Global Water Cycle, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 96, 1097-1115. DOI:10.1175/BAMS-D-13-00212.1
- Heino, M., Guillaume, J.H.A., Müller, C., Iizumi, T. and Kummu, M. (2020). A multi-model analysis of teleconnected crop yield variability in a range of cropping systems. *Earth Syst. Dynam.*, 11, 113-128. DOI:10.5194/esd-11-113-2020
- Hejabi, S. (2021). Estimation of the Reference Evapotranspiration Using the Projections of CORDEX Project and Investigation of the Meteorological Variables Contribution in its Changes (Case Study: Lake Urmia Basin), *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 6(14), 1920-1938.
- Helali, J., Hosseinzadeh, T., Cheraghalizadeh, M. and Mohammadi Ghaleni, M. (2021). Feasibility study

- of using Climate Teleconnection Indices in prediction of spring precipitation in Iran Basins, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(3), 749-769. DOI:10.22059/IJSWR.2021.316387.668857
- Helali, J., Pishdad, E., Alidadi, M., Loukzadeh, S., Asadi Oskoei, E. and Norooz Valashedi, R. (2020b). Investigating the relationship between climate Teleconnection Indices and Autumnal Rainfall in Iran Watersheds, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(8), 1921-1936. DOI:10.22059/IJSWR.2020.294238.668434
- Helali, J., Salimi, S., Lotfi, M., Hosseini, S.A., Bayat, A., Ahmadi, M. and Naderizarneh, S. (2020a). Investigation of the effect of large-scale atmospheric signals at different time lags on the autumn precipitation of Iran's watersheds, *Arabian Journal of Geosciences*, 13 (18), 1-24. DOI:10.1007/s12517-020-05840-7
- Hobbins, M.T., Ramírez, J.A. and Brown, T.C. (2004) Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous U.S.: paradoxical or complementary? *Geophysical Research Letters*, 31(13), L13503. DOI:10.1029/2004GL019846
- Hosseinzadeh Talaei, P., Shifteh Some'e, B. and Sobhan Ardakani, S. (2014). Time trend and change point of reference evapotranspiration over Iran, *Theoretical and Applied Climatology*, 116, 639-647. DOI:10.1007/s00704-013-0978-x
- Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottersen, G., and Visbeck, M. (2003). An overview of the North Atlantic Oscillation, in Geophysical Monograph American Geophysical Union, *American Geophysical Union*, 1-35. DOI:10.1029/GM134
- IPCC. (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York, NY: Cambridge University Press.
- Kohler, M.A. (1949). Double-mass analysis for testing the consistency of records and for making adjustments. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 30,188-189. DOI:10.1175/1520-0477-30.5.188
- Le, T. and Bae, D.H. (2020). Response of global evaporation to major climate modes in historical and future Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 simulations, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 1131-1143. DOI:10.5194/hess-24-1131-2020
- Li, G., Xie, S.P., He, C. and Chen, Z. (2017). Western Pacific emergent constraint lowers projected increase in Indian summer monsoon rainfall. *Nature Climate Change*, 7(10), 708-712. DOI:10.1038/nclimate3387
- Liu, X., Luo, Y., Zhang, D., Zhang, M. and Liu, C. (2011). Recent changes in pan-evaporation dynamics in China. *Geophysical Research Letters*, 38(13), L13404. DOI:10.1029/2011GL047929
- Lopez-Urrea, R., Martín de Santa Olalla, F., Fabeiro, C., Moratalla, A. (2006). Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, 85, 15-26. DOI:10.1016/j.agwat.2006.03.014
- Lyon, B.V. and Camargo, S.J. (2009). The seasonally-varying influence of ENSO on rainfall and tropical cyclone activity in the Philippines. *Climate Dynamics*, 32, 125-141. DOI:10.1007/s00382-008-0380-z
- Martens, B., Waegeman, W., Dorigo, W. A., Verhoest, N. E. C., and Miralles, D. G. (2018). Terrestrial evaporation response to modes of climate variability, *npj Clim. Atmos. Sci.*, 1, 43. DOI:10.1038/s41612-018-0053-5
- Miralles, D. G., van den Berg, M. J., Gash, J. H., Parinussa, R. M., de Jeu, R. A. M., Beck, H. E., Holmes, T. R. H., Jiménez, C., Verhoest, N. E. C., Dorigo, W. A., Teuling, A. J., and Johannes Dolman, A. (2013). El Niño-La Niña cycle and recent trends in continental evaporation, *Nat. Clim. Chang.*, 4, 1-5. DOI:10.1038/nclimate2068
- Nazemosadat, M.J. and Cordery, I. (2000). On the relationships between ENSO and autumn rainfall in Iran. *International Journal of Climatology*, 20, 47-61. DOI:10.1002/(SICI)1097-0088(200001)20:1<47::AID-JOC461>3.0.CO;2-P
- Nicolai-Shaw, N., Gudmundsson, L., Hirschi, M., and Seneviratne, S. I. (2016). Long-term predictability of soil moisture dynamics at the global scale: Persistence versus large-scale drivers, *Geophys. Res. Lett.*, 43:8554-8562. DOI:10.1002/2016GL069847
- Nouri, M. and Bannayan, M. (2019). Spatiotemporal changes in aridity index and reference evapotranspiration over semi-arid and humid regions of Iran: trend, cause, and sensitivity analyses, *Theoretical and Applied Climatology*, 136, 1073-1084. DOI:10.1007/s00704-018-2543-0
- Peterson, T.C., Golubev, V.S. and Groisman, P.Y. (1995). Evaporation losing its strength. *Nature*, 377(6551), 687-688. DOI:10.1038/377687b0
- Rahman, M.A., Yunsheng, L., Sultana, N. and Ongoma, V. (2019). Analysis of reference evapotranspiration (ETO) trends under climate change in Bangladesh using observed and CMIP5 data sets, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131, 639-655. DOI:10.1007/s00703-018-0596-3
- Richard, Y., Trzaska, S., Roucou, P. and Rouault, M. (2000). Modification of the southern Africa rainfall variability/ENSO relationship since the late 1960s. *Climate Dynamics*, 16, 883-895. DOI:10.1007/s003820000086
- Roderick, M.L. and Farquhar, G.D. (2002). The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 298(5597), 1410-1411. DOI:10.1126/science.1075390-a
- Sabziparvar A.A., Tabari, H., Aeni, A. and Ghafouri, M. (2010). Evaluation of class A pan coefficient models for estimation of reference crop evapotranspiration in cold semi-arid and warm

- arid climates. *Water Resource Management*, 24(5), 909-920. DOI:10.1007/s11269-009-9478-2
- Sabziparvar, A.A., Mirmasoudi, S.H., Tabari, H., Nazemosadat, M.J. and Maryanaji, Z. (2011). ENSO teleconnection impacts on reference evapotranspiration variability in some warm climates of Iran, *Int. J. Climatol.*, 31 (11), 1710-1723. DOI:10.1002/joc.2187
- Salehi, S., Dehghani, M., Mortazavi, S.M. and Singh, V.P. (2019). Trend analysis and change point detection of seasonal and annual precipitation in Iran. *Int. J. Climatol.*, 40(1), 308-323. DOI:10.1002/joc.6211
- Shams, S., Nazemosadat, S.M.J., Haghighi, A. A. K. and Parsa, S. Z. (2012). Effect of carbon dioxide concentration and irrigation level on evapotranspiration and yield of red bean, *Journal of Science and Technology of Greenhouse*, 12 (8), 1-10.
- Shenbin, C., Yunfeng, L. and Thomas, A. (2006). Climatic change on the Tibetan Plateau: potential evapotranspiration trends from 1961-2000. *Clim Chang*, 76, 291-319. DOI:10.1007/s10584-006-9080-z
- Soroush, F., Fathian, F., Hasheminasab Khabisi, F.S. and Kahya, E. (2020). Trends in pan evaporation and climate variables in Iran, *Theoretical and Applied Climatology*, 142, 407-432. DOI:10.1007/s00704-020-03262-9
- Stephens, C.M., McVicar, T.R., Johnson, F.M. & Marshall, L.A. (2018). Revisiting pan evaporation trends in Australia a decade on. *Geophysical Research Letters*, 45(20), 11164-11172. DOI:10.1029/2018GL079332
- Sun, C., Li, J., and Ding, R. (2016). Strengthening relationship between ENSO and western Russian summer surface temperature, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 843-851. DOI:10.1002/2015GL067503
- Tabari, H. (2010). Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. *Water Resource Management*, 24, 2311-2337. DOI:10.1007/s11269.009.95538
- Tabari, H., Aeini, A., Hosseinzadeh Talaei, P. and Shifteh Some'e, B. (2012a). Spatial distribution and temporal variation of reference evapotranspiration in arid and semi-arid regions of Iran, *Hydrological Prossecc*, 26(4), 500-512. DOI:10.1002/hyp.8146
- Tabari, H., Hosseinzadeh Talaei, P. and Willems, P. (2014a). Links between Arctic Oscillation (AO) and inter-annual variability of Iranian evapotranspiration, *Quaternary International*, 345, 148-157. DOI:10.1016/j.quaint.2014.02.011
- Tabari, H., Hosseinzadeh Talaei, P., Shifteh Some'e, B. and Willems, P. (2014b). Possible influences of North Atlantic Oscillation on winter reference evapotranspiration in Iran, *Global and Planetary Change*, 117, 28-39. DOI:10.1016/j.gloplacha.2014.03.006
- Tabari, H., Nikbakht, J. and Hosseinzadeh Talaei, P. (2012b). Identification of Trend in Reference Evapotranspiration Series with Serial Dependence in Iran, *Water Resour Manage*, 26, 2219-2232. DOI:10.1007/s11269-012-0011-7
- Thirumalai, K., DInezio, P. N., Okumura, Y., and Deser, C. (2017). Extreme temperatures in Southeast Asia caused by El Niño and worsened by global warming, *Nat. Commun.*, 8, 1-8. DOI:10.1038/ncomms15531
- Wang, J., Lv, X., Wang, J. and Lin, H. (2014). Spatiotemporal Variations of Reference Crop Evapotranspiration in Northern Xinjiang, China, *The Scientific World Journal*, Article ID 931515, 10 pages, DOI:10.1155/2014/931515
- Wang, P., Yamanaka, T. and Qiu, G.Y. (2012). Causes of decreased reference evapotranspiration and pan evaporation in the Jinghe River catchment, northern China. *Environmentalist*, 32, 1-10. DOI:10.1007/s10669-011-9359-0
- Xu, L., Shi, Z., Wang, Y., Zhang, S., Chu, X., Yu, P., Xiong, W., Zuo, H. and Wang, Y. (2015). Spatiotemporal variation and driving forces of reference evapotranspiration in Jing River basin, northwest China. *Hydrological Processes*, 29(23), 4846-4862. DOI:10.1002/hyp.10541
- Yan, H., Yu, Q., Zhu, Z.C., Myneni, R.B., Yan, H.M., Wang, S.Q. and Shugart, H.H. (2013). Diagnostic analysis of interannual variation of global land evapotranspiration over 1982-2011: Assessing the impact of ENSO, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 8969-8983. DOI:10.1002/jgrd.50693
- Yin, Y., Wu, S. and Dai, E. (2010). Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971-2008. *Chinese Science Bulletin*, 55(29), 3329-3337. DOI:10.1007/s11434-010-3289-y
- Yu, L., Zhong, S., Bian, X. and Heilman, W.E. (2015). Temporal and spatial variability of wind resources in the United States as derived from the climate forecast system reanalysis. *Journal of Climate*, 28(3), 1166-1183. DOI:10.1175/JCLI-D-14-00322.1
- Yuan, W., Liu, S., Liang, S., Tan, Z., Liu, H. and Young, C. (2012). Estimations of evapotranspiration and water balance with uncertainty over the Yukon River basin. *Water Resour Manag.*, 26, 2147-2157. DOI:10.1007/s11269.012.0007.3
- Zappa, G., Pithan, F. and Shepherd, T.G. (2018). Multimodel evidence for an atmospheric circulation response to Arctic sea ice loss in the CMIP5 future projections. *Geophysical Research Letters*, 45(2), 1011-1019.