

## پهنه‌بندی شدت خشکی در ایران با استفاده از مدل تبخیر و تعرق هارگریوز-سامانی

### بر مبنای توپوگرافی رقومی DEM

تقی طاوسی - دانشیار اقلیم‌شناسی گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه سیستان بلوچستان  
محمدرضا منصوری دانشور\* - دانشجوی دکترای اقلیم‌شناسی، دانشگاه سیستان بلوچستان  
علیرضا موقری - دانشجوی دکترای اقلیم‌شناسی، دانشگاه سیستان بلوچستان

پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۰۱/۳۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۱/۰۵/۲۰

#### چکیده

در مناطق خشک به علت دوری از منابع رطوبت و دریافت تابش بیشتر، میزان تبخیر و تعرق، بیشتر از بارندگی سالانه است؛ لذا میزان تبخیر و تعرق، می‌تواند شاخص خوبی برای برآورد شدت خشکی یک منطقه باشد. از آنجا که بسیاری از پارامترهای اقلیمی لازم برای محاسبه شدت تبخیر و تعرق به وسیله سایر روش‌ها در بسیاری از ایستگاه‌های سینوپتیک ایران، ثبت نمی‌گردد و نتایج بسیاری از پژوهش‌ها، بیانگر خطای کمتر در روش هارگریوز-سامانی می‌باشد، از این روش برای ارزیابی تبخیر و تعرق برای ۴۸ ایستگاه سینوپتیک کشور استفاده شد. در گام بعدی، تحلیل فضایی توزیع مکانی نتایج حاصله بر مبنای توپوگرافی رقومی DEM در محیط GIS به منظور تولید نقشه‌های شدت تبخیر و تعرق انجام و در پایان به تلفیق یافته‌ها برای تولید نقشه پهنه‌بندی، شدت خشکی ایران اقدام شد. نتایج نشان داد که در مقیاس فصلی و ماهانه، شدت تبخیر و تعرق، انطباق قابل قبولی با سیستم‌ها و توده‌های هوای حاکم بر ایران در طی فصول مختلف سال، نشان می‌دهد. تلفیق نقشه‌های تولید شده تبخیر و تعرق به روش هارگریوز-سامانی برای میانگین ۱۲ ماه در طی دوره آماری ۳۰ ساله، نشان‌دهنده قرارگیری تمامی قلمرو ایران در شرایط اقلیمی خشک است؛ چرا که حداقل در طی سه ماه از سال، میزان بارش در همه نقاط ایران از میزان تبخیر و تعرق کمتر بوده است. بر این اساس، شدت خشکی محاسبه شده برای سواحل شمالی و جنوبی کشور و همچنین برای فلات مرکزی، البته با شدت بیشتری، صدق می‌کند.

کلیدواژه‌ها: پهنه‌بندی خشکی ایران، مدل هارگریوز، تبخیر و تعرق، GIS، DEM

## مقدمه

خشکی یک پدیده اقلیمی است که در اثر نبود یا کمبود رطوبت حادث می‌شود. نبود و یا کمبود رطوبت از روی خاک، پوشش گیاهی و پستی و بلندی مناطق خشک، مشخص می‌شود، از این‌رو شناخت مناطق خشک، هم ممکن است از طریق مطالعات خاک‌شناسی، گیاه‌شناسی و ژئومورفولوژیکی انجام پذیرد که برای مثال می‌توان به کارهای اسفندیاری و حکیم‌زاده (۱۳۸۹) با تأکید بر تخریب منابع خاک، محمد قاسمی و همکاران (۱۳۸۷) با تأکید بر معیار آب و منابع آبی، نجفی و همکاران (۱۳۸۷) با تأکید بر جنبه پوشش گیاهی، غلامپور و همکاران (۱۳۸۷) با تأکید بر جنبه ژئومورفولوژی تعیین قلمروهای بیابانی، فخری و همکاران (۱۳۸۶) با تأکید بر عوامل زمین‌شناختی در تشکیل بیابان‌ها و زهتابیان و همکاران (۱۳۸۶) با تأکید بر فرسایش آبی در گسترش قلمروهای بیابانی، اشاره کرد؛ اما پایه و مشخصه اصلی، شناخت مناطق خشک ارزیابی اقلیم است، به طوری که خسروشاهی و همکاران (۱۳۸۸) برای تهیه نقشه قلمرو بیابان‌های اقلیم‌شناسی ایران بر استفاده از شاخص بارش و ضرایب تغییرپذیری و تمرکز آن، برای ایستگاه‌های باران‌سنجی کشور بهره برده است.

از دیگر شاخص‌های مورد استفاده برای تعیین مرز قلمرو مناطق خشک، برآورد تبخیر و تعرق<sup>۱</sup> است. تبخیر و تعرق، نه تنها به تابش خورشیدی، بلکه به دیگر عوامل اقلیمی، مانند دمای هوا، رطوبت و باد بستگی دارد. از آنجا که مقادیر تابش و دیگر پارامترهای اقلیمی از محلی به محل دیگر و با زمان، تغییر می‌کند، میزان تبخیر و تعرق نیز دارای تغییرات و توزیع مکانی و زمانی است. در مناطق خشک به علت خشکی و وزش باد، میزان تبخیر و تعرق بیشتر از بارندگی سالانه است؛ لذا میزان تبخیر و تعرق، می‌تواند شاخص خوبی برای برآورد شدت خشکی یک منطقه باشد. روش‌های بسیاری برای محاسبه شدت تبخیر و تعرق وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به چهار روش فائو، پنمن-مانتیث، بلانی-کریدل و هارگریوز-سامانی اشاره کرد. روش هارگریوز-سامانی از جمله روش‌هایی است که به دو پارامتر درجه حرارت و تابش وابسته است و با توجه به اینکه تعیین سایر پارامترهای اقلیمی مشکل می‌باشد، استفاده از این روش مناسب‌تر است و درصد خطای کمتری دارد (Burman and Pochop, 1994).

هارگریوز<sup>۲</sup> و سامانی در تحقیقات خود برای منطقه آریزونا در سال ۱۹۸۲ نتیجه گرفته‌اند که روش پیشنهادی‌شان نسبت به روش پنمن، جنسن-هیز اصلاح شده و بلانی-کریدل-فائو نتایج بهتری را حاصل می‌سازد و با توجه به اینکه احتمال خطا در آن کمتر است؛ لذا استفاده از آن را توصیه می‌کنند (Hargreaves and Samani, 1982). این مدل، توسط هارگریوز و همکارانش طی دو مقاله در سال ۱۹۸۵ توسعه داده شدند (Hargreaves and Samani, 1985; Hargreaves et al., 1985) صراحت و قابلیت دسترسی

1. Evapotranspiration; ET

2. Hargreaves

به داده‌ها برای انجام مدل به همراه نتایج قابل اطمینان در این مدل، توسط آلن و همکارانش نیز تأیید شده است (Allen et al., 1998).

سامانی هم در سال ۲۰۰۰ پس از بررسی‌های خود در نقاط مختلف بیان می‌کند، با توجه به آن که دسترسی به اطلاعات دقیق هواشناسی حاصل از ایستگاه‌های سینوپتیک در بسیاری از نقاط، دشوار است و رابطه پنمن - مانیتث به اطلاعات گوناگون هواشناسی، متکی است، از این رو بیشتر مطالعات در نقاط مختلف جهان به روش هارگریوز - سامانی، انجام شده است. دروگر و آلن با اشاره به قابلیت اجرایی مدل برای اکثر ایستگاه‌ها در دنیا به اعتبار بالا و میزان خطای پایین محاسبه تبخیر و تعرق در این روش نسبت به روش پنمن - مانیتث اشاره کرده‌اند (Droogers and Allen, 2002).

لوپز و همکارانش هم در کار تحقیقاتی خود برای یک منطقه اقلیمی نیمه‌خشک در اسپانیا به درجه بالای درستی و صحت نتایج این مدل، اشاره کرده‌اند (Lopez et al., 2006).

در تحقیق حاضر که با هدف پهنه‌بندی شدت خشکی در قلمرو ایران انجام می‌شود، به طور مشخص ارزیابی تبخیر و تعرق با استفاده از مدل هارگریوز - سامانی برای ۴۸ ایستگاه سینوپتیک، محاسبه می‌گردد. خاطر نشان می‌شود از آنجا که بسیاری از پارامترهای اقلیمی لازم برای محاسبه شدت تبخیر و تعرق به وسیله سایر روش‌ها در بسیاری از ایستگاه‌های سینوپتیک کشور، ثبت نمی‌گردد و از آنجا که نتایج بسیاری از تحقیقات، حاکی از خطای کمتر در روش هارگریوز - سامانی می‌باشد، در این پژوهش از این روش استفاده گردید.

تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه برآورد و ارزیابی تبخیر و تعرق و تعیین پهنه‌های مناطق خشک در داخل و خارج کشور صورت گرفته است؛ اما بیشتر تحقیقات داخلی، توسط متخصصین کشاورزی، آبیاری و بیابان و عموماً جهت تعیین میزان نیاز آبی گیاه و آن هم به صورت موردی و نه برای تمام ایران به انجام رسیده است. شاید بتوان گفت پژوهش حاضر، اولین تحقیق اقلیمی در کشور است که با تکیه بر میزان شدت تبخیر و تعرق خروجی از مدل هارگریوز - سامانی به پهنه‌بندی مناطق خشک کشور، به صورت ماهانه می‌پردازد. از کارهای مشابه در این زمینه به لحاظ موضوع پهنه‌بندی تبخیر و قلمرو تحقیقی ایران، می‌توان به کار زارع ابیانه و همکاران (۱۳۸۹) اشاره کرد که داده‌های ۶۱ ایستگاه تبخیرسنجی ایران بر مبنای مدل‌های تبخیر برآورد شده و در نهایت، مدل ایوانف به عنوان مدل بهینه، پیشنهاد شده است.

از کارهایی که برای تعیین مکانی گسترش مناطق خشک در مقیاس ایران و یا بخش‌هایی از آن انجام شده، می‌توان به فعالیت طاوسی و همکاران (۱۳۸۸) و فتاحی و همکاران (۱۳۸۹) اشاره کرد که با استفاده از مدل یونینپ سازمان ملل متحد به انجام رسیده‌اند. در این میان به طور ویژه از مدل تبخیر و تعرق هارگریوز در ایران تاکنون جهت ارزیابی قلمرو مناطق خشک استفاده چندانی نشده است و مانند کارهای علیزاده و

همکاران (۱۳۸۰)، نجفی (۱۳۸۵) و سبزی‌پرور و همکاران (۱۳۹۰) به استفاده از آن در مطالعات اقلیم کشاورزی و تعیین نیاز آبی گیاهان مرجع، بسنده شده است. رحیمی خوب در کاری که برای محاسبهٔ تبخیر و تعرق در استان خوزستان انجام داده از این مدل استفاده کرده است و نتیجه گرفته است که پاسخ مدل در مقیاس محلی مناسب است؛ اما در مقیاس منطقه‌ای نیاز به کالیبراسیون دارد (Rahimi Khoob, 2008).

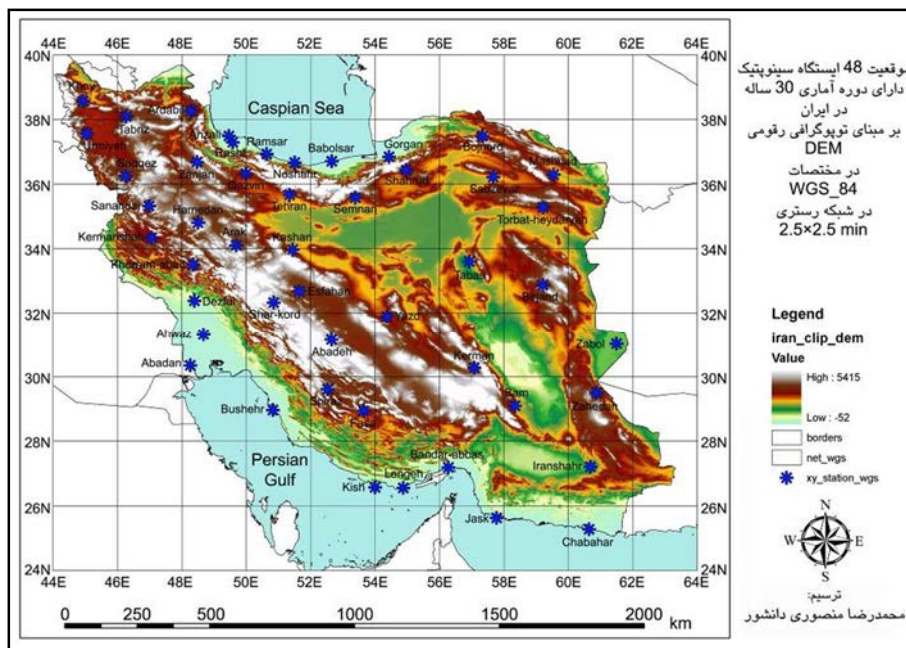
طبری ضمن استفاده از مدل هارگریوز برای محاسبهٔ تبخیر و تعرق مرجع گیاهی در ایران تأیید کرده است که این روش، کمترین خطای محاسباتی را داشته و بیشترین قابلیت انطباق و استفاده را برای مناطق دارای حاکمیت اقلیم نیمه‌خشک دارد (Tabari 2010).

به هر حال آنچه دیده می‌شود، در این تحقیقات خوب انجام شده از مدل هارگریوز برای آشکارسازی قلمروهای فضایی خشک ایران، استفاده نشده است، چیزی که مورد نظر و هدف اصلی تحقیق حاضر است. در تحقیقات جهانی می‌توان به تحقیقاتی هم‌چون کارهای Hargreaves et al. (1985), Samani (2000), Allen et al. 1998, Xu and Singh (1998), Abtew (1996), Jensen et al. (1990), Sethi et al. (2002), Droogers and Allen (2002), Lopez et al. (2006), Weiß and Menzel (2008) و Silva et al. (2010) اشاره کرد که از مدل هارگریوز استفاده گسترده‌ای برای برآورد تبخیر و تعرق به عمل آورده‌اند. در این پژوهش سعی می‌شود تا علاوه بر پهنه‌بندی ایران از لحاظ شدت تبخیر و تعرق با مدل مورد نظر، به شناسایی مناطق دارای حاکمیت اقلیم خشک، پرداخته شود و تحلیل اقلیمی علل وقوع آن نیز بیان شود.

## مواد و روش‌ها

### محدودهٔ مطالعاتی

به منظور تعیین شدت تبخیر و تعرق و به دنبال آن، پهنه‌بندی شدت خشکی در قلمرو ایران، داده‌های مربوط به عناصر دما، بارش، رطوبت نسبی و فشار بخار آب ماهانه ۴۸ ایستگاه سینوپتیک کشور برای یک دورهٔ آماری ۳۰ ساله (۱۹۷۶-۲۰۰۵) از سایت سازمان هواشناسی ایران، دریافت گردید. در شکل (۱) پراکنش این ایستگاه‌ها بر مبنای وضعیت توپوگرافیک آنها در سطح ایران برای موقعیت ۴۴° ۰۰' تا ۶۴° ۰۰' عرض شمالی و ۲۴° ۰۰' تا ۴۰° ۰۰' طول شرقی در مختصات جغرافیایی WGS\_84 نشان داده شده است. توجه شود به منظور برخورداری از یک دوره نرمال آماری ۳۰ ساله و با توجه به نبود این سابقهٔ آماری ناچار به استفاده از ۴۸ ایستگاه پراکنده در کشور اکتفا شد.



شکل ۱. پراکنش و موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی در سطح ایران

## روش‌شناسی

روش‌شناسی تحقیق حاضر در گام اول، شامل محاسبه و برآورد تبخیر و تعرق برای ۴۸ ایستگاه سینوپتیک مورد مطالعه در دوره زمانی ۱۹۷۶-۲۰۰۵ بود. در گام دوم از تحلیل فضایی CoKriging برای توزیع مکانی نتایج حاصله بر مبنای توپوگرافی رقومی DEM در محیط GIS استفاده شد که به تولید نقشه‌های پهنه‌بندی شدت تبخیر و تعرق انجامید و در گام سوم به ترکیب و همپوشانی یافته‌ها برای تولید نقشه پهنه‌بندی شدت خشکی ایران اقدام شد. به طور هم‌زمان داده‌های رستری NCEP/NCAR برای رطوبت نسبی از سایت مرکز ملی هوا- اقیانوس‌شناسی آمریکا<sup>۱</sup> برای دوره آماری، مورد تحقیق استخراج شد و در نرم‌افزار Grads مورد پردازش و باز تولید قرار گرفت.

## برآورد تبخیر و تعرق به روش هارگریوز- سامانی

برای برآورد شدت تبخیر و تعرق، جهت شناسایی و تعیین مناطق خشک و مرطوب از بین روش‌های موجود به دلیل خطای کمتر و در دسترس بودن پارامترهای مورد نیاز از مدل هارگریوز- سامانی استفاده گردید. این مدل از رابطه (۱) به دست می‌آید (Hargreaves and Samani, 1985):

$$ET = 0.0023 (Ra) (T + 17.8) \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} \quad \text{رابطه (۱)}$$

1. NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.pressure.html>)

که در رابطه فوق ET شدت تبخیر و تعرق، Ra تابش فرازمینی ماهانه، T میانگین دمای متوسط ماهانه، Tmax میانگین دمای حداکثر ماهانه و Tmin میانگین دمای حداقل ماهانه در دوره آماری ۳۰ ساله (۲۰۰۵-۱۹۷۶) می‌باشد. لازم به ذکر است که اختلاف دمای حداکثر و حداقل ماهانه (Tmax-Tmin) در رابطه فوق همان (TD) می‌باشد. همچنین برای محاسبه Ra از رابطه‌ای به شکل رابطه (۲) استفاده می‌شود (Hargreaves and Samani, 1985):

$$Ra = \frac{24(60)G_{sc}}{\pi} [1 + 0.033 \cos(2\pi \frac{n}{365})] \times [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (2)$$

که در رابطه فوق Gsc ثابت خورشیدی معادل ۱۳۷۰ وات بر متر مربع (۱.۹۶ لانگلی در دقیقه)، n شماره روز که بر مبنای اول ژانویه، محاسبه می‌شود، δ زاویه میل خورشید که بنا بر حرکت لحظه‌ای زمین در هر عرض جغرافیایی برای هر روز متغیر است، φ عرض جغرافیایی محل و ωs زاویه ساعتی غروب خورشید که با توجه به فصل تابش و عرض جغرافیایی متغیر می‌باشد. این محاسبات بر اساس میانگین ماهانه برای هر ایستگاه به طور مجزا در نرم افزار SPSS محاسبه گردید.

### تحلیل فضایی شدت تبخیر و تعرق در GIS

برای این منظور، ابتدا توپوگرافی رقومی DEM برای ایران بر مبنای شبکه‌سازی داده‌های برداری خطوط تراز توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ ایران در مقیاس سلول‌های ۵×۵ کیلومتری و منطبق بر مختصات شبکه‌ای ۲۵×۲۵ دقیقه در شبکه مختصات WGS\_84 تولید شد. سپس موقعیت جغرافیایی و مکان مرجع هر ایستگاه بر مبنای نقشه توپوگرافی رقومی وارد گردید. نقشه تولید شده DEM پایه درونیابی زمین آمار CoKriging برای داده‌های ایستگاه مبنای در GIS قرار گرفت. ابتدا محاسبه آماری میانگین دمای حداقل ماهانه، میانگین دمای حداکثر ماهانه، میانگین دمای متوسط ماهانه و تابش ماهانه فرازمینی برای برآورد تبخیر و تعرق، طبق رابطه هارگریوز-سامانی، در نرم افزار SPSS ارزیابی شدند. آنگاه نتایج حاصله، تبخیر و تعرق به طور ماهانه برای ۴۸ ایستگاه و بر مبنای روابط آمار فضایی در GIS توزیع مکانی پیدا کردند. سپس برای دخالت دادن موانع فضایی و توپوگرافیک، داده‌های تبخیر و تعرق هر ایستگاه، با لحاظ کردن مختصات طول و عرض جغرافیایی و مبنای ارتفاعی توپوگرافی رقومی DEM در هر شبکه ۲۵×۲۵ دقیقه‌ای، با استفاده از روش درونیابی CoKriging نقشه‌های پهنه‌بندی شدت تبخیر و تعرق ایران، به تفکیک ماه‌های سال تولید شدند.

### تولید پهنه‌بندی شدت خشکی ایران

برای این منظور، نقشه‌های میانگین شدت تبخیر و تعرق ماهانه ایران در دوره آماری ۳۰ ساله (۲۰۰۵-۱۹۷۶)

هرکدام به طور جداگانه با میزان بارش در همین دوره آماری بر مبنای DEM در GIS مورد مقایسه فضایی قرار گرفتند. به این صورت که با استفاده از عملگر آمار فضایی<sup>۱</sup> پهنه‌هایی که در هر ماه به طور میانگین دارای بارش کمتری از میزان تبخیر و تعرق محاسبه شده بودند، مشخص شدند. آن‌گاه ۱۲ نقشه مقایسه شده تبخیر و تعرق ماهانه با بارش ماهانه در دوره آماری تحقیق، در GIS بر مبنای عملگر جمع با هم تلفیق شدند. نتیجه تلفیق، نقشه پهنه‌بندی شدت خشکی ایران بود، به طوری که نشان می‌داد چه بخش‌هایی از ایران دارای تبخیر و تعرق بیشتر از بارش در بیشترین حالت آن در طول ۱۲ ماه می‌باشند (بیشترین شدت خشکی) و چه پهنه‌هایی دارای تبخیر و تعرق بیشتر از بارش در کمترین حالت آن در طول ۵-۳ ماه (کمترین شدت خشکی) هستند.

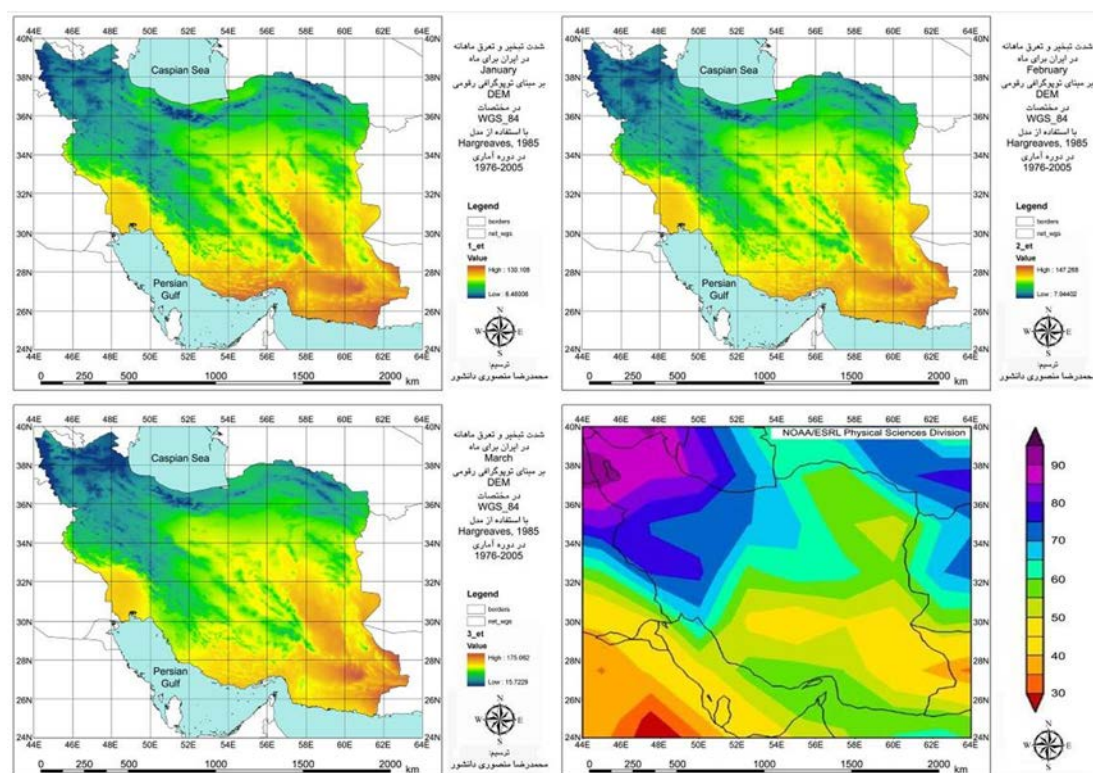
### یافته‌های پژوهش

پس از محاسبه و برآورد شدت تبخیر و تعرق ماهانه ایران به تفکیک ماهانه، با استفاده از فنون تحلیل سینوپتیک، تحلیل علل وقوع شدت‌های مختلف تبخیر و تعرق در سطح ایران به طور فصلی از نظر می‌گذرد که برای این منظور از داده‌های رطوبت نسبی مرکز ملی هوا- اقیانوس‌شناسی آمریکا برای دوره آماری مورد تحقیق استفاده شده است. در پایان هم پهنه‌بندی شدت خشکی ایران با تلفیق یافته‌های تبخیر و تعرق مورد بحث قرار می‌گیرد.

### تحلیل وقوع شدت تبخیر و تعرق در فصل زمستان

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، در شروع فصل زمستان در ماه ژانویه که اوج تسلط بادهای غربی و سیستم‌های مهاجر بر روی کشور است، در بخش وسیعی از کشور از جمله شمال غرب و غرب و شمال و شمال شرق کشور که تحت سیطره سیستم‌های فوق قرار دارند، شدت تبخیر و تعرق هارگریوز پایین بوده که حاکی از مرطوب بودن هوا در این نواحی است؛ زیرا این مناطق در این ماه از سال از روزهای بارانی و ابری بیشتری نسبت به سایر مناطق کشور برخوردارند که باعث افزایش رطوبت هوا و در نتیجه کاهش تبخیر و تعرق می‌گردد. بخش‌های جنوبی و جنوب شرقی کشور که در این موقع از سال، دور از حیطه فعالیت موج‌های کوتاه می‌باشند و همچنین به دلیل واقع شدن در دوره سرد سال که هنوز سیستم مونسونی فعالیت خود را آغاز ننموده از بیشترین میزان تبخیر و تعرق و در نتیجه خشکی هوا برخوردارند. در ماه فوریه، تفاوت چندانی نسبت به ماه ژانویه مشاهده نمی‌شود. فقط شدت تبخیر و تعرق در قسمت‌های مرکزی و جنوب - شرقی کشور نسبت به ماه گذشته، افزایش اندکی داشته که حاکی از عقب‌نشینی تدریجی بادهای غربی در

این ماه است. در ماه مارس باز هم شدت تبخیر و تعرق هارگریوز در مرکز و حتی غرب کشور افزایش یافته و کمترین میزان این شاخص در شمال غرب کشور مشاهده می‌شود که حاکی از جابه‌جایی موج بادهای غربی در این موقع از سال، به عرض‌های بالاتر می‌باشد. با مقایسه نقشه میانگین رطوبت نسبی فصل زمستان با نقشه‌های شدت تبخیر و تعرق ماهانه، می‌توان به انطباق میزان شدت تبخیر و تعرق و رطوبت نسبی ایران پی برد.



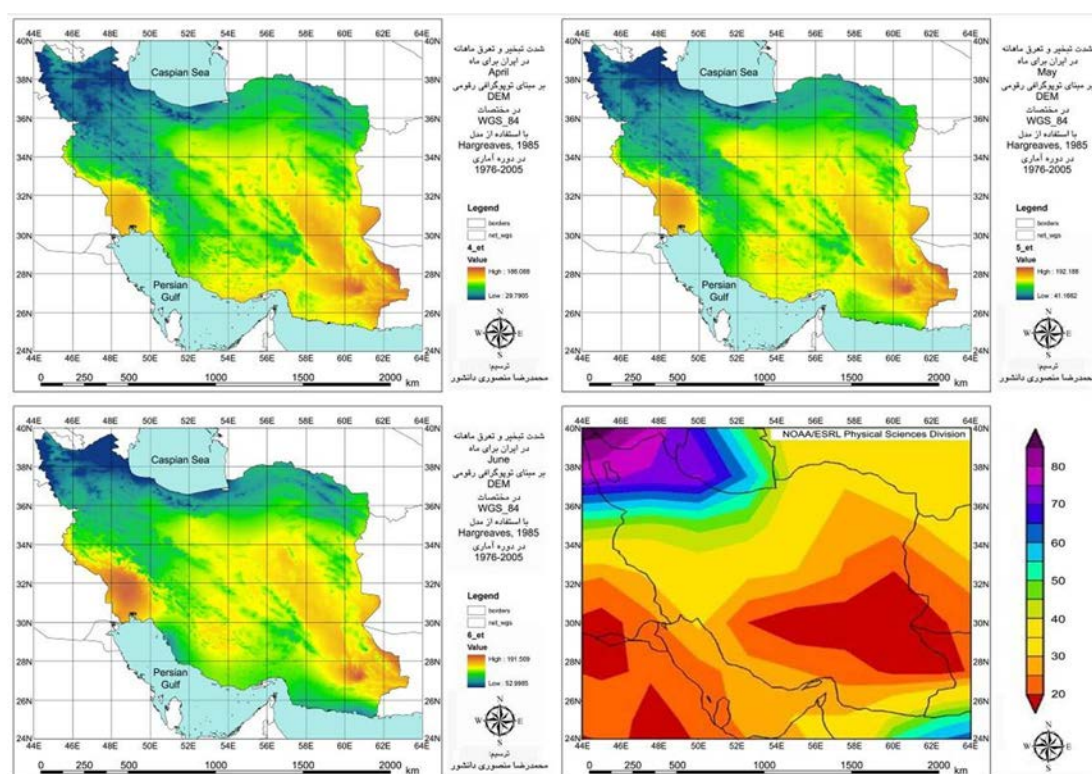
شکل ۲. نقشه‌های شدت تبخیر و تعرق و میانگین رطوبت نسبی فصل زمستان

### تحلیل وقوع شدت تبخیر و تعرق در فصل بهار

طبق شکل (۳) در ابتدای بهار و ماه آوریل برخلاف بخش‌هایی از غرب و شمال‌غرب کشور که با افزایش میزان شاخص تبخیر و تعرق هارگریوز مواجه بوده که حاکی از خروج کشور از قلمرو موج بادهای غربی است، مناطقی، مانند شمال‌غرب و شمال کشور با کاهش میزان تبخیر و تعرق روبه‌رو بوده‌اند که دلیل آن آغاز بارش‌های همرفتی بهاره در این مناطق از کشور می‌باشد. همچنین سواحل خلیج فارس و دریای عمان نیز با کاهش میزان شاخص هارگریوز مواجه بوده‌اند که حاکی از آغاز فعالیت سامانه‌های کم فشار جنوبی بر روی منطقه است. در ماه می، کمترین میزان تبخیر و تعرق متعلق به استان آذربایجان شرقی است که زمان اوج



فعالیت بارش‌های همرفتی در این ناحیه است. به خشکی غرب کشور افزوده شده؛ اما با کاهش محسوس میزان شاخص هارگریوز در تمام طول سواحل جنوبی کشور از بوشهر تا چابهار روبه‌رو هستیم که نشان از افزایش رطوبت و در نتیجه، کاهش خشکی بر روی این مناطق به دلیل انتقال رطوبت دریاهای جنوب، توسط سامانه کم‌فشار عربستان و ورود تدریجی زبانه‌های کم فشار خلیج بنگال به منطقه دارد. در ماه ژوئن، میزان شاخص تبخیر و تعرق هارگریوز در اکثر قسمت‌های کشور افزایش یافته که نشان دهنده افزایش خشکی هوا در این مناطق است؛ اما سواحل جنوبی دریای خزر به دلیل آغاز فعالیت جبهه نسیم دریا نسبت به ماه قبل، از تبخیر و تعرق کمتری برخوردار شده است. سواحل جنوبی کشور نیز همزمان با تقویت سامانه مونسونی کاهش چشمگیر تبخیر و تعرق را نسبت به ماه‌های قبل نشان می‌دهد. مقایسه نقشه میانگین رطوبت نسبی فصل بهار با نقشه‌های شدت تبخیر و تعرق ماهانه، همچنان حاکی از انطباق میزان شدت تبخیر و تعرق با رطوبت نسبی است.

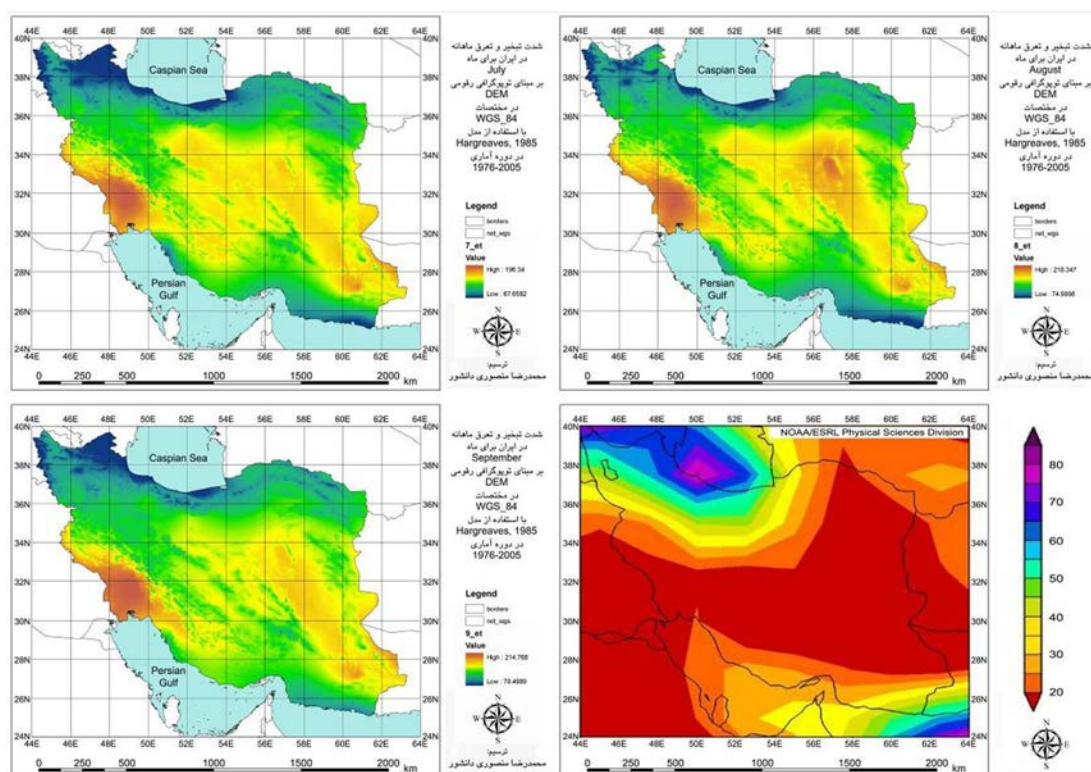


شکل ۳. نقشه‌های شدت تبخیر و تعرق و میانگین رطوبت نسبی فصل بهار

### تحلیل وقوع شدت تبخیر و تعرق در فصل تابستان

شکل (۴) شدت تبخیر و تعرق ماه‌های تابستان را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شدت تبخیر در ماه ژوئای نسبت به ماه گذشته باز هم افزایش یافته و این امر در غرب کشور، مشهودتر است. تنها در

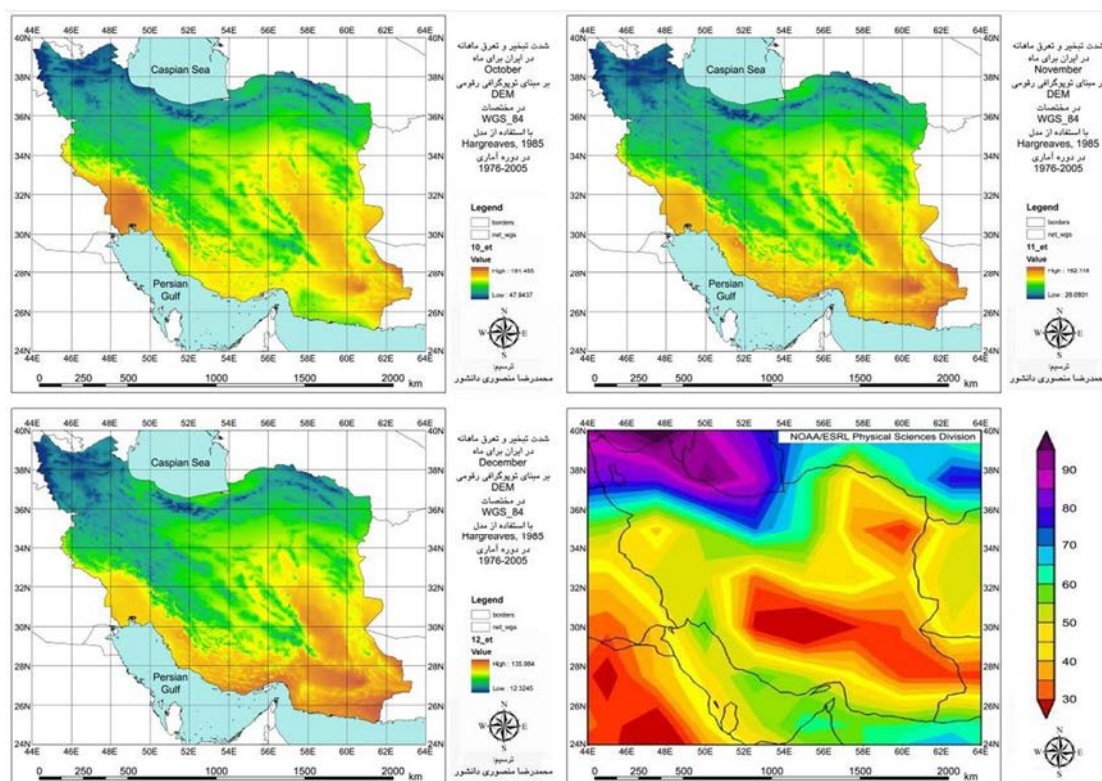
استان‌های آذربایجان شرقی و غربی که در عرض‌های بالا واقع شده‌اند و از دمای کمتری برخوردارند، شدت تبخیر و تعرق همچنان در پایین‌ترین حد قرار دارد. سواحل جنوبی دریای خزر نیز هم‌زمان با آغاز فصل تابستان و در نتیجه تشدید فعالیت جبهه نسیم دریا و افزایش نم نسبی از تبخیر و تعرق کمتری نسبت به ماه گذشته برخوردار شده است. کل سواحل جنوبی کشور نیز با کاهش محسوس شدت تبخیر و تعرق روبه‌رو شده است که این امر در جنوب شرقی‌ترین نقطه کشور که محل ورود زبان‌های مونسونی کم فشار خلیج بنگال می‌باشد، مشهودتر است. با مشاهده نقشه شدت تبخیر و تعرق ماه آگوست متوجه می‌شویم که ماه آگوست خشک‌ترین ماه در تمام کشور به جزء سواحل جنوبی دریای خزر و سواحل جنوب شرقی کشور است. حتی شمال غرب کشور نیز با افزایش چشمگیر تبخیر و تعرق نسبت به ماه‌های قبل روبه‌رو شده است. با آغاز ماه سپتامبر از شمال غرب کشور با کاهش شدت تبخیر و تعرق مواجه هستیم که حاکی از عقب‌نشینی تدریجی پرفشار جنب حاره و جابه‌جایی موج بادهای غربی به عرض‌های پایین است. سواحل جنوب شرقی کشور نیز هم‌زمان با عقب‌نشینی کم فشار مونسونی از روی منطقه با افزایش خشکی همراه بوده است. نقشه میانگین رطوبت نسبی فصل تابستان، همانند نقشه‌های شدت تبخیر و تعرق هارگریوز بخش‌های شمالی، شمال غربی و شمال شرقی و همچنین سواحل جنوبی کشور را مرطوب‌ترین نواحی در این ماه نشان می‌دهد.



شکل ۴. نقشه‌های شدت تبخیر و تعرق و میانگین رطوبت نسبی فصل تابستان

## تحلیل وقوع شدت تبخیر و تعرق در فصل پاییز

طبق شکل (۵) در ماه اکتبر و آغاز پاییز همزمان با خروج کامل سامانه مونسونی از جنوب شرق کشور بر شدت تبخیر و تعرق و در نتیجه خشکی هوا در تمامی خط ساحلی جنوب افزوده شده است. با پایان فعالیت جبهه نسیم دریا به دلیل کاهش اختلاف دمای دریا و خشکی در این فصل از سال شاهد خشکی بیشتر هوا در سواحل جنوبی دریای خزر نسبت به ماه گذشته هستیم. از سوی دیگر با شروع دوره سرد سال و جابه‌جایی پرفشار جنب حاره به عرض‌های پایین‌تر، موج بادهای غربی نیمه شمالی کشور را تحت سیطره فعالیت خود قرار داده و به تدریج شاهد کاهش شدت تبخیر و تعرق و افزایش رطوبت بر روی قسمت‌های غربی و شمال غربی و شمال شرقی کشور هستیم. در ماه نوامبر همچنان با کاهش شدت تبخیر و تعرق در نیمه شمالی و مخصوصاً غرب کشور که محل ورود سامانه‌های مهاجر می‌باشد، مواجه هستیم؛ اما بر شدت تبخیر و تعرق و در نتیجه خشکی هوا بر روی نیمه جنوبی و مخصوصاً جنوب شرق کشور افزوده شده است. در ماه دسامبر، تفاوت چندانی نسبت به ماه‌های گذشته مشاهده نمی‌شود، فقط بر شدت خشکی جنوب شرق کشور افزوده شده است. مقایسه نقشه میانگین رطوبت نسبی فصل پاییز با نقشه‌های شدت تبخیر و تعرق ماهانه هارگریوز همچنان حاکی از انطباق میزان شدت تبخیر و تعرق با رطوبت نسبی است.

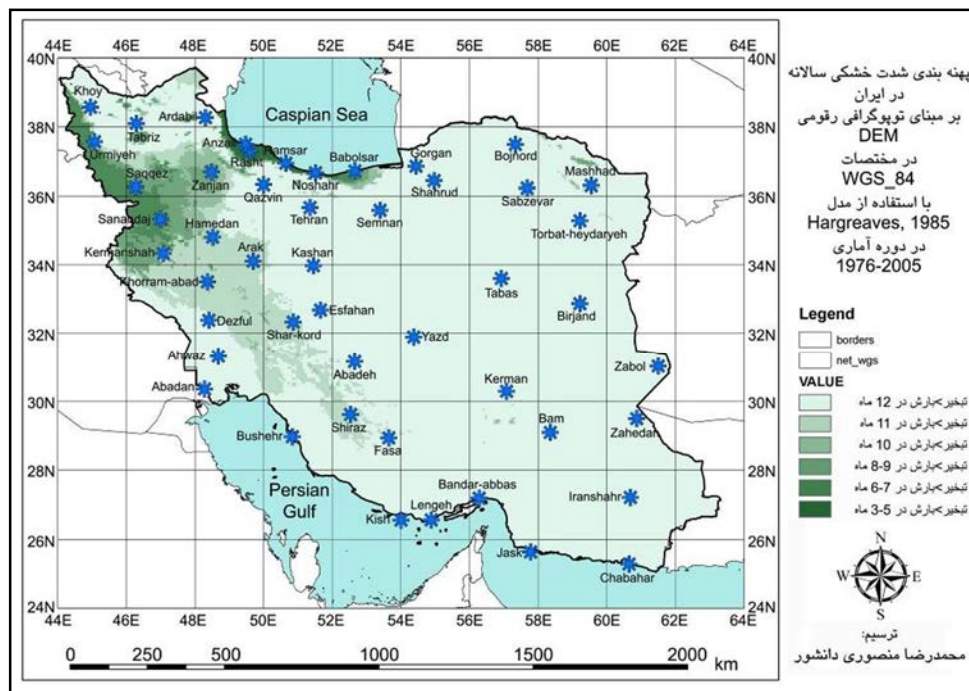


شکل ۵. نقشه‌های شدت تبخیر و تعرق و میانگین رطوبت نسبی فصل پاییز

## پهنه‌بندی شدت خشکی ایران

نقشه‌های تولید شده تبخیر و تعرق به روش هارگریوز- سامانی برای میانگین ۱۲ ماه در طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۷۶-۲۰۰۵) با میزان بارش ماهانه در همین دوره آماری برای ایران، مقایسه شد. به این صورت که با استفاده از عملگر آمار فضایی پهنه‌هایی که در هر ماه به طور میانگین دارای بارش کمتری از میزان تبخیر و تعرق محاسبه شده بودند، مشخص شدند. آن‌گاه ۱۲ نقشه مقایسه شده تبخیر و تعرق ماهانه با بارش ماهانه در دوره آماری تحقیق، در GIS بر مبنای عملگر جمع، با هم تلفیق شدند. نتیجه تلفیق، نقشه پهنه‌بندی شدت خشکی ایران بود که در شکل (۶) نمایش داده شده است. بر طبق این نقشه، بخش‌هایی از ایران دارای تبخیر و تعرق بیشتر از بارش در بیشترین حالت آن در طول ۱۲ ماه می‌باشند (بیشترین شدت خشکی) و پهنه‌هایی دارای تبخیر و تعرق بیشتر از بارش در کمترین حالت آن در طول ۵-۳ ماه (کمترین شدت خشکی) می‌باشند. این نقشه نشان می‌دهد که تمامی قلمرو ایران در شرایط اقلیمی خشک قرار دارد؛ چرا که حداقل در طی ۳ ماه از سال، میزان بارش در نقاط مختلف از میزان تبخیر و تعرق در همان نقاط کمتر می‌باشد. این موضوع هم برای سواحل شمالی و جنوبی کشور و هم برای فلات مرکزی ایران صدق می‌کند. با طبقه‌بندی فضایی کشور پهنه‌هایی که کمترین شدت خشکی را در طی ۵-۳ ماه تجربه کرده‌اند، منطبق بر نوار ساحلی شمال ایران و نیز ارتفاعات زاگرس کردستان در شمال غرب می‌باشد؛ یعنی کمترین میزان شدت تبخیر و تعرق محدود به سواحل جنوبی دریای خزر، به خصوص سواحل جنوب غربی آن در استان گیلان و هم‌چنین حاشیه مرزی شمال غربی و غرب ایران تا جنوب استان کرمانشاه می‌باشد. به عبارتی، می‌توان گفت مرطوب‌ترین نقاط کشور در میانگین سالانه، استان‌های گیلان، مازندران و بخش غربی استان‌های آذربایجان غربی، کردستان، کرمانشاه و بعضی قسمت‌های آذربایجان شرقی می‌باشد. در کلاس‌های پایین‌تر، می‌توان به نواحی زاگرس میانی و مناطق مرتفع آذربایجان که استان‌های لرستان، همدان، چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد و بخش‌های شمالی استان هرمزگان را شامل می‌شود، اشاره کرد که در طی ۹-۶ ماه از سال، دارای میزان بارش کمتر از تبخیر و تعرق می‌باشند. در بخش‌هایی از ارتفاعات، کپه داغ خراسان در شمال شرق و کوه‌های کرمان در مرکز ایران هم این شدت خشکی در طی ۱۱-۱۰ ماه مشاهده می‌شود. سایر بخش‌های ایران بدون استثنا در تمامی طول سال، تبخیر و تعرق بیشتری از خشکی و به عبارتی بیشترین شدت خشکی را دارا می‌باشند. این موضوع با واقعیت‌های مورفواقلیمی مناطق یاد شده نیز قابل انطباق است که مهر تأییدی است بر این واقعیت که ایران کشوری خشک و بیابانی است.





شکل ۶. پهنه‌بندی شدت خشکی سالانه در سطح ایران

## بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور برآورد شدت تبخیر و تعرق در ایران از مدل هارگریوز-سامانی استفاده شد. این نتایج به تفکیک ماه‌های سال، برای ۴۸ ایستگاه سینوپتیک کشور و در یک دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۷۶-۲۰۰۵) مورد ارزیابی قرار گرفت و آن‌گاه توزیع فضایی آنها بر مبنای توپوگرافی رقومی DEM برای ایران و بر مبنای شبکه‌سازی داده‌های برداری خطوط تراز توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ ایران در مقیاس سلول‌های ۵×۵ کیلومتری و منطبق بر مختصات شبکه‌ای ۲.۵×۲.۵ دقیقه در شبکه مختصات WGS\_84 تولید شد. این یافته‌ها به تفکیک چهار فصل با میانگین رطوبت نسبی در همین دوره آماری مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفت که نشان دهنده انطباق آنها با وضعیت توده‌های هوایی حاکم در ایران به تفکیک این فصول می‌باشد. همچنین نقشه‌های تولید شده تبخیر و تعرق به روش هارگریوز-سامانی برای میانگین ۱۲ ماه در طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۷۶-۲۰۰۵) با میزان بارش ماهانه در همین دوره آماری برای ایران مقایسه شد تا بدین طریق پهنه-بندی شدت خشکی ایران نیز به طور میانگین در دوره آماری، مورد تحقیق محاسبه شود. نتایج این مقایسه هم نشان داد که تمامی قلمرو ایران در شرایط اقلیمی خشک قرار دارد؛ چرا که حداقل در طی ۳ ماه از سال، میزان بارش در نقاط مختلف از میزان تبخیر و تعرق در همان نقاط، کمتر می‌باشد و این موضوع هم برای سواحل شمالی و جنوبی کشور البته با شدت کمتر و هم برای فلات مرکزی ایران صدق می‌کند.

## منابع

- اسفندیاری، مطهره؛ حکیمزاده؛ محمدعلی. ۱۳۸۹، ارزیابی وضعیت بالفعل بیابانزایی، با تأکید بر تخریب منابع خاک براساس مدل IMDPA: مطالعه موردی: آبادیه طشک فارس. فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۷، شماره ۴، صص ۶۳۱-۶۲۴.
- خسروشاهی، محمد؛ کاشکی، محمدتقی؛ انصافی مقدم، طاهره. ۱۳۸۸، قلمرو بیابان های اقلیم شناسی ایران. فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۶، شماره ۱، صص ۹۶-۱۱۳.
- زارع ابیانه، حمید؛ مقدم نیا، علیرضا؛ بیات، مریم؛ قاسمی، عادل؛ شادمانی، مجتبی. ۱۳۸۹، تغییرات مکانی تبخیر از تشت و مقایسه آن با مدل های برآورد تبخیر در ایران. دانش آب و خاک، شماره ۴، صص ۱۳۰-۱۱۳.
- زهتابیان، غلامرضا؛ جوادی، محمدرضا؛ احمدی، حسن؛ آذرنبوند، حسین؛ یزدان پناه، احمد. ۱۳۸۶، ارزیابی وضعیت فعلی بیابانزایی و ارائه یک مدل منطقه ای در حوزه آبخیز ماهان با تأکید بر فرسایش آبی. نشریه دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، دوره ۶۰، شماره ۲، صص ۴۳۷-۴۱۹.
- سبزی پرور علی اکبر؛ میرمسعودی، شقایق؛ ناظم السادات، محمدجعفر. ۱۳۹۰، بررسی تغییرات درازمدت تبخیر و تعرق گیاه مرجع در چند نمونه اقلیمی گرم کشور. پژوهش های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۳، شماره ۷۵، صص ۶۳-۷۸.
- طاوسی، تقی؛ محمودی، پیمان؛ سرگلزایی، فرزانه. ۱۳۸۹، مقایسه گسترش مکانی اقلیم های خشک و نیمه خشک در ایران طی دوره ۲۰۰۵-۱۹۷۶. فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۷، شماره ۱، صص ۹۴-۱۰۵.
- علیزاده، امین؛ میرشاهی، بابک؛ هاشمی نیا، مجید؛ ثنایی نژاد، حسین. ۱۳۸۰، بررسی دقت و عملکرد تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شده به روش هارگریوز - سامانی و تشتک تبخیر در ایستگاه های سینوپتیک استان خراسان. مجله نیوار، شماره ۴۳-۴۲، صص ۷۰-۵۱.
- غلامپور، محمد؛ خسروشاهی، محمد؛ برخوردار، جلال. ۱۳۸۷، تعیین قلمرو مناطق بیابانی استان هرمزگان از جنبه ژئومورفولوژی. فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۵، شماره ۴، صص ۴۹۲-۴۸۵.
- فتاحی، محمد مهدی؛ درویش، محمد؛ جاوید کیا، حمیدرضا؛ ادنانی، مهدی. ۱۳۸۹، ارزیابی و تهیه نقشه خطر کل بیابانزایی با روش فائو-یونپ؛ مطالعه موردی: حوزه آبخیز قمرود. فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۷، شماره ۴، صص ۵۸۸-۵۷۵.

فخری، فرهاد؛ جعفری، محی الدین؛ خسروشاهی، محمد. ۱۳۸۶، بررسی عوامل زمین شناختی مؤثر در تشکیل بیابان‌های استان بوشهر و تعیین قلمرو آن. فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۴، شماره ۳، صص ۴۰۲-۳۹۱.

محمدقاسمی، سیلوانا؛ زهتابیان، غلامرضا؛ احمدی، حسن. ۱۳۸۷، ارزیابی شدت بیابان‌زایی منطقه زابل از منظر معیار آب با استفاده از مدل مدالوس. پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، شماره ۸۰، صص ۶۷-۵۹.

نجفی، پیام. ۱۳۸۵، کاربرد حالت‌های هارگریوز - سامانی و جنسن - هیز در ارزیابی تبخیر - تعرق گیاه مرجع یونجه در اصفهان. مجله دانش نوین کشاورزی، سال ۳، شماره ۵، صص ۶۸-۵۷.

نجفی، کیان؛ خسروشاهی، محمد؛ غلامپور، محمد. ۱۳۸۷، قلمرو مناطق بیابانی استان هرمزگان از جنبه پوشش گیاهی. فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۵، شماره ۱، صص ۱۱۳-۹۵.

Abtew W (1996). **Evapotranspiration measurement and modeling for three wetland systems in South Florida**. American Water Resources Association, 32:465-473.

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998). **Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements**. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome.

Burman RD, Pochop LO (1994). **Evaporation, evapotranspiration and climatic data**. Elsevier, The University of California, 278 pp.

Droogers P, Allen RG (2002). **Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions**. Irrigation and Drainage Systems, 16:33-45.

Hargreaves GH, Samani ZA (1982). **Estimation of potential evapotranspiration**. Journal of Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 108:225-230.

Hargreaves GH, Samani ZA (1985). **Reference crop evapotranspiration from temperature**. Applied Engineering in Agriculture, 1(2):96-99.

Hargreaves LG, Hargreaves GH, Riley JP (1985). **Irrigation water requirements for Senegal River Basin**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 111(3):265-275.

Jensen ME, Burman RD, Allen RG (1990). **Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements**. American Society of Civil Engineers: New York. 360 pp.

Lopez R, Martin F, Fabeiro C, Moratalla A (2006). **Testing evaporation equations using lysimeters observations in a semi arid climate**. Agricultural Water Management, 85:15-26.

NOAA (2012). National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory; <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

Rahimi Khoob A (2008). **Comparative study of Hargreaves's and artificial neural network's methodologies in estimating reference evapotranspiration in a semiarid environment**. Irrigation Science, 26:253-259.

- Samani Z (2000). **Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 126(4):265–67.
- Sethi LN, Kumar DN, Panda SN, Mal BC (2002). **Optimal crop planning and conjunctive use of water resources in a coastal river basin**. Water resources management, 16:145–169.
- Silva DY, Meza F, Varas E (2010). **Estimating reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) using numerical weather forecast data in central Chile**. Journal of Hydrology, 382:64–71.
- Tabari H (2010). **Evaluation of Reference Crop Evapotranspiration Equations in Various Climates**. Water resources management, 24:2311–2337.
- Weiβ M, Menzel L (2008). **A global comparison of four potential evapotranspiration equations and their relevance to stream flow modeling in semi-arid environments**. Advanced Geosciences, 18:15–23.
- Xu CY, Singh VP (1998). **Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and inter comparison of estimation methods**. Hydrological Processes, 12:429–442.