

Spatial Modeling of Plant Transpiration to Support Decision-making Processes in Agriculture Case Study: Western Iran

SEYED HOSSEIN MIR MOUSAVI¹, KOUHZAD RAISPOUR¹, MOHAMMAD KAMANGAR^{*1}

1- Faculty of Climatology, Faculty of Humanities, Zanjan University, Zanjan, Iran.

(Received: Jan. 6, 2021- Revised: March. 3, 2021- Accepted: March. 10, 2021)

ABSTRACT

Plant transpiration is a process through which part of the water in the plant is transferred out of the pores. The amount of plant transpiration data is useful in developing strategies for water sustainability. Field measurement of plant transpiration is pointwise and discontinuous and has some difficulties. The purpose of this study is to provide a plant transpiration map using satellite images and spatial modeling to identify the impact of environmental variables on transpiration in western Iran. First, by using the algorithm written in Google Earth cloud system, the plant vegetation translocation map was extracted as a dependent variable, and then the layers of solar radiation, water vapor pressure, wind speed and maximum temperature, vegetation index were selected as independent variables for modeling. The results showed that the prevalence of plant transpiration in the studied area range from 0 to 2.6 mm per day. Field data collected from 16 typical farms of Agricultural Research Center of Kermanshah and Kurdistan Provinces were used for validation and by comparing the map pixels and the ground data, the root mean square error and the Nash Sutcliffe coefficient were obtained to be 0.71 and 0.63, respectively. After implementing general regression and spatial regression models based on evaluation criteria, the spatial regression showed better explanatory and estimation power than the general regression. Based on this model, the coefficients of each variable were estimated spatially, making it possible to determine the spatial variation of the relationships between the variables. Also, the results of both models showed that the vegetation indices and water vapor pressure deficiency in western of Iran have the most positive effect on vegetation transpiration. Using the results of this study, areas prone to severe plant transpiration can be identified for improving the management of irrigation systems and providing intelligent agricultural services.

Keywords: Plant Transpiration, Spatial Regression, MODIS Sensor, Penman Monteith Index, West of Iran.

مدل سازی مکانی تعرق گیاهان جهت پشتیبانی فرآیندهای تصمیم‌گیری در بخش کشاورزی مطالعه موردی: غرب ایران

سید حسین میر موسوی^۱، کوهزاد رئیس پور^۱، محمد کامانگر^{*۱}

۱. گروه آب و هواشناسی، دانشکده انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۱۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۲/۲۰)

چکیده

تعرق گیاهی فرآیندی است که طی آن بخشی از آب موجود در گیاه به صورت بخار از روزنه‌های آن خارج می‌شود. آگاهی از مقدار تعرق گیاهی در توسعه راهبردها، جهت پایداری آب مفید است. اندازه‌گیری تعرق گیاهی به صورت میدانی، نقطه‌ای و ناپیوسته بوده و با مشکلاتی همراه است. هدف از این تحقیق تهیه نقشه تعرق گیاهی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل سازی مکانی جهت شناسایی میزان تأثیرگذاری متغیرهای محیطی بر تعرق در غرب ایران است. ابتدا با الگوریتم نوشته شده در سامانه ابری گوگل ارث اینجین نقشه میانه تعرق گیاهی به عنوان متغیر وابسته استخراج شد و سپس لایه‌های تابش خورشیدی، کمبود فشار بخار آب، سرعت باد و دمای حداکثر، شاخص پوشش گیاهی به عنوان متغیرهای مستقل جهت مدل سازی انتخاب شدند. نتایج نشان داد میزان پراکندگی تعرق گیاهی در محدوده مطالعه بین ۰ تا ۲/۶ میلی‌متر در روز است. جهت صحت سنجی نقشه خروجی از داده‌های میدانی برداشت شده ۱۶ مزرعه نمونه مرکز تحقیقات کشاورزی استان کرمانشاه و کردستان استفاده شد و با مقایسه پیکسل‌های نقشه و داده‌های زمینی، ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب نش ساتکلیف به ترتیب ۰/۷۱ و ۰/۶۳ به دست آمد. پس از اجرای مدل‌های رگرسیون کلی و رگرسیون مکانی بر اساس شاخص‌های ارزیابی، رگرسیون مکانی قدرت تبیین و برآورد بهتری نسبت به رگرسیون کلی را نشان داد. بر اساس این مدل ضرایب هر متغیر به صورت مکانی برآورد شد و این امکان را به وجود آورد که تغییر مکانی روابط بین متغیرها مشخص شود. همچنین نتایج اجرای هر دو مدل نشان داد شاخص‌های پوشش گیاهی^۱ و کمبود فشار بخار آب در غرب ایران بیشترین اثر مثبت را در تعرق گیاهی دارند. با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان مناطق در معرض تعرق شدید گیاهی را جهت بهبود مدیریت سیستم‌های آبیاری و ارائه خدمات هوشمندانه کشاورزی شناسایی کرد.

واژه‌های کلیدی: تعرق گیاه، رگرسیون مکانی، سنجنده مادیس، شاخص پنمن مانتیس، غرب ایران.

مقدمه

آبیاری محصول در کشاورزی است که از زمان ظهور تحقیقات زراعی مدرن، توجه جامعه علمی را به خود جلب کرده است. در کشاورزی پایش و مدل‌سازی تعرق گیاهی برای مدیریت بهتر منابع آب و بهبود کارایی مصرف آب از اهمیت زیادی برخوردار است. کمیت تبخیر- تعرق با استفاده از روش‌های میدانی (لایسیمترها، تشت‌های تبخیر، ابزارهای میکرو هواشناسی) و یا مدل‌های بیلان انرژی خاک و گیاه - جو اندازه‌گیری می‌شود (Kalma et al., 2008). تغییرات مکانی و زمانی تبخیر- تعرق بسیار متنوع است، در حال حاضر هیچ شبکه جهانی زمین مرجعی برای نظارت بر تبخیر- تعرق وجود ندارد. روش‌های میدانی برآورد تبخیر- تعرق مانند تشت تبخیر و لایسی متر در سطح محلی دقت بالایی دارند اما برای یک منطقه بزرگ، بسیار پرهزینه و زمان‌بر هستند. برای کاهش هزینه و برآوردهای سراسری می‌توان

بارش از اجزا مثبت و تبخیر- تعرق کاهش‌دهنده بیلان آبی هستند. فرآیند تبخیر- تعرق حدود ۶۰ درصد بارش را به جو بازمی‌گرداند (L'vovich and White, 1990). این فرآیند نقش مهمی در تعادل جهانی آب ایفا می‌کند (Gan et al., 2018). تبخیر و تعرق (تبخیر از سطح خاک + تعرق از پوشش گیاهی) از اجزای اصلی در چرخه آب و تبادل انرژی بین سطح زمین و جو محسوب می‌شود که بر آب در دسترس و پراکندگی شارهای انرژی سطح زمین تأثیر می‌گذارد (Schlesinger and Jasechko, 2014). تعرق فرآیندی است که در آن آب مایع به بخار آب تبدیل می‌شود. در این فرآیند مقدار زیادی از انرژی تابش‌های خورشیدی ورودی به زمین مصرف می‌شود (Zhang et al., 2016). تعرق شدید گیاهی یکی از گسترده‌ترین عامل محدود کردن بهره‌وری

از مدل‌ها و تصاویر سنجنش‌ازدور استفاده کرد. تصاویر سنجنش‌ازدور به دلیل پوشش وسیع و هزینه پایین، می‌تواند شرایط تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاهان را در بازه‌های زمانی مختلف اندازه‌گیری و پایش کند.

الگوریتم‌های مختلفی برای برآورد تبخیر- تعرق از تصاویر ماهواره‌ای اجرا شده است. برخی از این الگوریتم‌ها ساده بوده و با استفاده از تصاویر چند باندهای این کمیت را برآورد می‌کند و بعضی دیگر با در نظر گرفتن جزئیاتی همچون شار گرمایی و استفاده از مدل‌های تحلیلی به برآورد تبخیر- تعرق می‌پردازند. کلیه نقشه‌های تبخیر- تعرق جهانی با وضوح ۵۰۰ متر تا هشت کیلومتر از مدل‌های سنجنش‌ازدوری استخراج می‌شود زیرا برای تهیه آن‌ها به داده‌های مانند شاخص پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ، آلبدو، دما و یا داده‌های رطوبت خاک در سطح مکانی وسیع نیاز است. در میان این مدل‌ها، رویکردهایی که معادله پن من مانیس^۱ با سطح برگ و کمک داده‌های سنجنش‌ازدور نشان داده شده است که از نظر بیوفیزیکی نتایج بهتری را ارائه کرده‌اند (Mu et al., 2011). در حال حاضر، دو محصول تبخیر- تعرق واقعی تصاویر سنجنش‌ازدور با قدرت تفکیک مکانی متوسط در مقیاس‌های قاره‌ای و جهانی قابل‌دسترس است. این دو محصول عبارت‌اند از MOD16 مربوط به سنجنده مادیس با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر که در بازه‌های زمانی هشت‌روزه، ماهانه و سالانه در مقیاس جهانی وجود دارد و محصول LSA_SAF MSG ET_A با قدرت تفکیک مکانی پنج کیلومتر که در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه‌ای و روزانه اروپا، آفریقا و بخش‌هایی از شرق آمریکای جنوبی را پوشش می‌دهد.

صحت محصولات ماهواره‌ای تبخیر- تعرق واقعی هشت روزه MOD16 و تبخیر- تعرق روزانه LSA-SAF MSG، مربوط به اروپا را با داده‌های ۱۵ ایستگاه زمینی در انواع زیست‌بوم‌ها از جمله زمین‌های زراعی، علفزارها، بوته‌زارها، ساوانا و جنگل‌های اروپا را (Hu et al 2015) بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد گرچه محصول LSA-SAF MSG ضریب همبستگی بیشتری با داده‌های زمینی دارد اما عملکرد هر دو محصول در اکثر مناطق اروپا از جمله اقلیم‌های معتدل و مرطوب قابل‌استفاده است. مدل روند دهه‌ای تبخیر و تعرق روزانه جهانی در بازه زمانی ۱۹۸۱-۲۰۱۲ با استفاده از سه پارامتر تعرق از گیاهان (Et)، تبخیر مستقیم از خاک (Es) و تبخیر بارش‌های جذب‌شده پوشش گیاهی (Ei) را (Zhang et al. 2016) استخراج کردند. نتایج با

صحت محصولات ماهواره‌ای تبخیر- تعرق واقعی هشت روزه MOD16 و تبخیر- تعرق روزانه LSA-SAF MSG، مربوط به اروپا را با داده‌های ۱۵ ایستگاه زمینی در انواع زیست‌بوم‌ها از جمله زمین‌های زراعی، علفزارها، بوته‌زارها، ساوانا و جنگل‌های اروپا را (Hu et al 2015) بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد گرچه محصول LSA-SAF MSG ضریب همبستگی بیشتری با داده‌های زمینی دارد اما عملکرد هر دو محصول در اکثر مناطق اروپا از جمله اقلیم‌های معتدل و مرطوب قابل‌استفاده است. مدل روند دهه‌ای تبخیر و تعرق روزانه جهانی در بازه زمانی ۱۹۸۱-۲۰۱۲ با استفاده از سه پارامتر تعرق از گیاهان (Et)، تبخیر مستقیم از خاک (Es) و تبخیر بارش‌های جذب‌شده پوشش گیاهی (Ei) را (Zhang et al. 2016) استخراج کردند. نتایج با

صحت محصولات ماهواره‌ای تبخیر- تعرق واقعی هشت روزه MOD16 و تبخیر- تعرق روزانه LSA-SAF MSG، مربوط به اروپا را با داده‌های ۱۵ ایستگاه زمینی در انواع زیست‌بوم‌ها از جمله زمین‌های زراعی، علفزارها، بوته‌زارها، ساوانا و جنگل‌های اروپا را (Hu et al 2015) بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد گرچه محصول LSA-SAF MSG ضریب همبستگی بیشتری با داده‌های زمینی دارد اما عملکرد هر دو محصول در اکثر مناطق اروپا از جمله اقلیم‌های معتدل و مرطوب قابل‌استفاده است. مدل روند دهه‌ای تبخیر و تعرق روزانه جهانی در بازه زمانی ۱۹۸۱-۲۰۱۲ با استفاده از سه پارامتر تعرق از گیاهان (Et)، تبخیر مستقیم از خاک (Es) و تبخیر بارش‌های جذب‌شده پوشش گیاهی (Ei) را (Zhang et al. 2016) استخراج کردند. نتایج با

صحت محصولات ماهواره‌ای تبخیر- تعرق واقعی هشت روزه MOD16 و تبخیر- تعرق روزانه LSA-SAF MSG، مربوط به اروپا را با داده‌های ۱۵ ایستگاه زمینی در انواع زیست‌بوم‌ها از جمله زمین‌های زراعی، علفزارها، بوته‌زارها، ساوانا و جنگل‌های اروپا را (Hu et al 2015) بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد گرچه محصول LSA-SAF MSG ضریب همبستگی بیشتری با داده‌های زمینی دارد اما عملکرد هر دو محصول در اکثر مناطق اروپا از جمله اقلیم‌های معتدل و مرطوب قابل‌استفاده است. مدل روند دهه‌ای تبخیر و تعرق روزانه جهانی در بازه زمانی ۱۹۸۱-۲۰۱۲ با استفاده از سه پارامتر تعرق از گیاهان (Et)، تبخیر مستقیم از خاک (Es) و تبخیر بارش‌های جذب‌شده پوشش گیاهی (Ei) را (Zhang et al. 2016) استخراج کردند. نتایج با

کامل مواد غذایی تولید شده است.

۳ توازن انرژی در سطح زمین (Sebal)

1 Penman Monteith

۲ بهره‌وری اولیه ناخالص است که اغلب به‌عنوان GPP مخفف و آن را به سادگی مقدار

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه شامل استان‌های تبخیر-تعرق، کرمانشاه، ایلام، همدان و لرستان بین عرض‌های جغرافیایی "۳۶° ۵۱' ۳۱" تا "۴۵° ۴۹' ۳۶" شمالی تا "۱۸° ۲۷' ۴۵" تا "۵۰° ۰۴' ۲۶" شرقی (شکل ۱) با وسعت ۴۶۶/۱۲۱ کیلومتر مربع قرار گرفته است. بر اساس پهنه‌بندی آب و هوایی ایران در سیستم کوپن که توسط (Ganji, 2003) صورت گرفته است، بخش اعظم زاگرس در شمال کردستان، همدان، کرمانشاه و لرستان دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای است و در نواحی مرتفع زاگرس نیز آب‌وهوای سرد و خشک مشاهده می‌شود. بخش‌های دیگر منطقه از جمله بخش‌های جنوب غربی کرمانشاه و ایلام دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک است (Abrifam, 2001)؛ و بر اساس تقسیم‌بندی (Alijani, 2012) نیز غرب ایران به‌طور کلی دارای آب‌وهوای کوهستانی و پاکوهی است. وضعیت حرارتی ناحیه در تابستان همگن‌تر از زمستان است. این محدوده در دوره سرد سال، به علت حاکمیت بادهای غربی و نزدیکی به منبع رطوبتی دریای مدیترانه بارندگی زیادی دارد، اما دوره گرم سال نفوذ پرفشار آזור باعث کاهش بارندگی می‌شود (Mojarad and Masoompour, 2013). محدوده مورد مطالعه بیشتر تحت تأثیر سامانه مرطوب مدیترانه‌ای و اقیانوس اطلس و سامانه‌های سودانی قرار دارد که با عبور این جریان‌ها از روی محدوده و برخورد با ارتفاعات زاگرس مقدار زیادی از رطوبت خود را به‌صورت باران و برف از دست داده و عامل عمده ریزش‌های جوی کشور را نیز تشکیل می‌دهند.

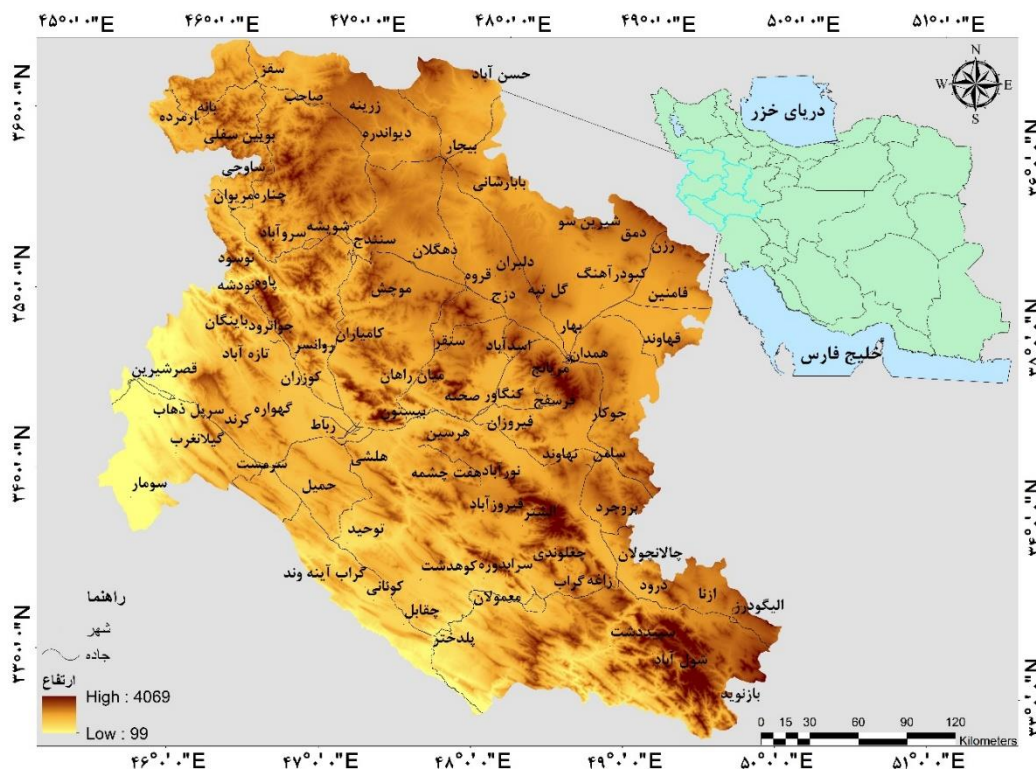
روش‌ها

در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای مادیس در بازه سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۰ بهره گرفته شد. این سنجنده دارای ۳۶ باند طیفی شامل ۱۱ باند در محدوده نور مرئی، هفت باند در محدوده نزدیک به مادون قرمز، دو باند در محدوده مادون قرمز طول موج کوتاه، هشت باند در محدوده مادون قرمز طول موج متوسط و هشت باند در محدوده مادون قرمز طول موج بلند یا حرارتی است. قدرت تفکیک مکانی باندهای یک و دو در این سنجنده برابر با ۲۵۱ متر، باندهای سه تا هفت برابر با ۵۱۱ متر و باندهای حاوی هشت تا ۳۶ برابر با یک کیلومتر است. ابتدا نقشه تبخیر و تعرق به‌عنوان متغیر وابسته با استفاده از الگوریتم پن من مانیتیس به دلیل پایه فیزیکی مناسب، پارامتر سازی نسبتاً ساده که در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته استخراج شد. برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع، ET_0 از بیلان آبیاری از رابطه یک استفاده می‌کند.

$$\gamma E = \frac{S \times A + \rho \times C_p \times (e_{sat} - e) / r_a}{s + \gamma \times (1 + r_s / r_a)} \quad (\text{رابطه ۱})$$

برآورد می‌نماید. Moshtagh *et al.* (2015) باهدف تخمین تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال و داده‌های ماهواره‌ای سنجنده TM ماهواره لندست در منطقه دامنه استان اصفهان انجام دادند. به‌منظور محاسبه تبخیر-تعرق کلیه اجزاء مدل توازن انرژی و پارامترهای مربوطه شامل تابش خالص آلبیدوی سطحی، تابش امواج کوتاه و بلند ورودی و خروجی، گسیلمندی سطح، شار گرمای خاک، شار گرمای محسوس، شاخص پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ و دمای سطحی از داده‌های سنجنده TM استخراج گردید. نتایج نشان داد که مقادیر تبخیر-تعرق در اراضی کشاورزی حدود ۷/۲ میلی‌متر در روز است که تقریباً برابر مقدار ۶/۹۹ میلی‌متر به‌دست آمده از روش پن من مانیتیس در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک داران است. Marbote *et al.* (2018) محصول تبخیر-تعرق سنجنده مادیس MOD16 را با تبخیر-تعرق واقعی محصول شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP در مزارع تحت کشت ذرت در استان قزوین مورد مقایسه قرار دادند. در این ارزیابی، مقدار میانگین مربعات خطا در دو مزرعه مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۱/۴۶ و ۱/۹۴ میلی‌متر در روز به دست آمد. همچنین مقدار R^2 نیز به ترتیب برابر با ۰/۸۶ و ۰/۸۷ محاسبه شد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد در صورت عدم دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری شده از تبخیر-تعرق واقعی، محصول MOD16 را می‌توان به‌عنوان جایگزین به کار برد.

با بررسی مطالعات انجام‌شده مشخص می‌شود که تحقیقات بیشتر بر استخراج تک‌بعدی تبخیر-تعرق و ارزیابی شاخص‌های سنجش‌ازدوری تمرکز داشته‌اند. گرچه استخراج نقشه‌های تبخیر و تعرق خاک مهم است اما مدل‌سازی تغییرات مکانی و بررسی روابط بین متغیرهای محیطی تأثیرگذار بر این فرآیند نیز اهمیت فراوانی دارد. همچنین در مطالعات پیشین تحلیل مکانی و تغییرات پراکندگی تعرق گیاهان بر اثر عامل‌های تقریباً ثابت در زمان همچون نوع خاک و یا ارتفاع و یا عامل‌های ناپایدار در زمان همچون بارش پرداخته شده است. تعیین اینکه تعرق گیاه بیشتر در کجا، چه موقع و چگونه رخ می‌دهد برای مشخص نمودن پایداری اراضی حیاتی است. هدف از این تحقیق، استخراج الگوی میانه پراکندگی تبخیر-تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و استخراج مدل رگرسیون کلی و مکانی تعرق گیاهی برای مشخص نمودن روابط مکانی متغیرهای تأثیرگذار بر فرآیند تبخیر-تعرق با استفاده از متغیرهای محیطی در غرب ایران است.



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه در ایران

نمونه ارسال می کنند استفاده شد و میانگین داده ها در بلندمدت به عنوان نمونه زمینی برای ارزیابی خروجی ها بکار گرفته شد. مقدار تبخیر- تخرق، متأثر از عوامل متعددی است که در این میان می توان به متغیرهای تشعشع خورشیدی، باد، مقدار رطوبت نسبی، فشار بخار آب، دما و پوشش گیاهی اشاره نمود. مدل سازی رگرسیونی امکان شناسایی و کمی نمودن رابطه بین متغیر مستقل به عنوان مثال تخرق گیاه و متغیرهای وابسته مانند پوشش گیاهی و فشار بخار آب را نشان می دهد. در رگرسیون های خطی و غیر خطی معمولی، فرض بر این است که متغیرهای مستقل در سراسر مکان مورد مطالعه یکسان است اما در رگرسیون مکانی ضرایب متغیر مستقل در مکان های مختلف متفاوت محاسبه می شود و فرض می شود در مکان های نزدیک عارضه وزن بیشتری داشته باشند. وظیفه رگرسیون چند متغیره این است که به تبیین واریانس متغیر وابسته کمک کند و این وظیفه را از طریق مشارکت متغیرها در این واریانس انجام می دهد (Kerlinger, 2005). در بین مدل های رگرسیونی، روش مدل رگرسیون کمترین مربعات خطا مرسوم ترین و ساده ترین روش است. در مدل سازی مکانی به روش رگرسیون کلی فرض بر این است که ضرایب یا پارامترهای مدل آماری نسبت به مکان (مختصات جغرافیایی) ثابت هستند؛ بنابراین مقدار متغیر وابسته که با این مدل تخمین زده می شود برای کل نقاط منطقه مقداری یکسان

که در آن λE شار گرمای نهان است و λ گرمای نهان تبخیر، $s = d(esat) / dT$ ، شیب منحنی مربوط به بخار آب اشباع (esat) نسبت فشار به دما، A انرژی در دسترس تقسیم شده بین گرمای محسوس، گرمای نهان و شار گرمای خاک در سطح زمین، P چگالی هوا، CP ظرفیت گرمایی خاص هوا است؛ و r_a مقاومت آئرو دینامیکی ثابت روان سنجی γ که توسط رابطه دو محاسبه می شود.

$$\gamma = C_p \times P_a \times M_a / (\lambda \times M_w) \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن M_a و M_w جرم های مولکولی هوای خشک و هوای مرطوب و P_a فشار جو هستند (Maidment, 1993). تاب آور سطح (r_s) عامل مؤثری در برابر تبخیر از سطح زمین و تخرق از گیاه است. از آنجاکه مطالعه ما در محدوده وسیع از کشور اجرا شد، تصمیم گرفته شد از گوگل ارث اینجین به عنوان یک پلت فرم متن باز استفاده شود. از مزایای این چهارچوب، کتابخانه گسترده ای از مجموعه داده های مکانی است که این امکان را می دهد به طور گسترده ای از تصاویر ماهواره ای و قدرت محاسباتی آن استفاده شود. جهت صحت سنجی خروجی محصول تخرق گیاهی مستخرج از تصاویر ماهواره ای از داده های میدانی برداشت شده از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه و کردستان که با استفاده از حس گرهای که در مزارع نمونه تحقیقاتی نصب کرده اند و هر سی دقیقه اطلاعات را از ۱۶ مزرعه

و هم‌چنین بررسی میزان افزایش شاخص تورم واریانس VIF و بررسی میزان تغییر ضرایب رگرسیونی با حذف یا اضافه کردن تک‌تک متغیرهای مستقل در یک مدل رگرسیون چند متغیره، وجود هم‌راستایی محرز گردید. از آنجاکه هدف بررسی اثرات اکثریت عوامل مکانی بر روی میزان تعرق گیاه بود، از تبدیلات مشاهده به نمره‌های معیار بهره گرفته شد تا مقیاس مقادیر یکسان شده و همبستگی بین متغیرهای مستقل از بین برود. بدین منظور با انجام حدود ۱۰ تبدیل روی داده‌ها بهترین تبدیل لگاریتم طبیعی ($\ln(x)$) تشخیص داده شد و استفاده گردید. در گام نهایی مدل را با حداقل مربعات برازش کرده تا از آن طریق ضرایب مکان (u, v) را تخمین زده شود، وزن دهی به گونه است که داده‌های نزدیک به (u, v) اهمیت و وزن بیشتری نسبت به داده‌های دورتر دریافت می‌نمایند. برای ارزیابی میزان اعتبار و کارایی مدل‌های رگرسیونی شاخص‌های متعددی وجود دارد که به چند مورد که در این پژوهش از آن‌ها بهره گرفته شد اشاره می‌شود: الف) ضریب تعیین (R^2): این ضریب میزان درصد واریانس متغیر وابسته که توسط متغیرهای مستقل تبیین می‌شود را بیان می‌کند. اگر میزان ضریب تعیین یک شود یعنی خط رگرسیون دقیقاً توانسته است تغییرات متغیر وابسته را به تغییرات متغیرهای مستقل نسبت دهد و اگر ضریب تعیین برابر صفر باشد نشان‌دهنده عدم توانایی رگرسیون در برآورد تغییرات متغیر وابسته از روی متغیرهای مستقل است (Asakereh and Razmi, 2012). ضریب تعیین از رابطه هفت به دست می‌آید.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \bar{X}_{obs})(X_{sim,i} - \bar{X}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \bar{X}_{obs})^2 (X_{sim,i} - \bar{X}_{sim})^2}} \right)^2 \quad (\text{رابطه ۷})$$

ب) روش معیار آکائیک (AIC_c): این معیار، معیاری برای سنجش میزان کارایی نسبی است و نشان می‌دهد که استفاده از یک مدل آماری به چه میزان باعث از دست رفتن اطلاعات می‌شود. به عبارتی این معیار تعادلی بین دقت مدل و پیچیدگی آن برقرار می‌کند. مقدار کم این معیار بیانگر این است که مقدار تخمین زده‌شده توسط مدل، به مقدار مشاهده‌ای یا واقعیت زمینی نزدیک‌تر است. اگر n تعداد داده‌ها و $\hat{\sigma}$ انحراف استاندارد برآورد شده مقادیر خطا باشد، معیار تصحیح‌شده آکائیک از رابطه هشت به دست می‌آید (Wang et al., 2005).

$$AIC_c = 2n \log_e(\hat{\sigma}) + n \log_e(2\pi) + n \left\{ \frac{n + \text{tr}(S)}{n - 2 - \text{tr}(S)} \right\} \quad (\text{رابطه ۸})$$

ج) ضریب نش ساتکلیف (NSE): یکی دیگر از معیارها جهت ارزیابی دقت مدل، معیار نش ساتکلیف و معیار ریشه میانگین مربعات خطا است. که بر اساس روابط نه و ده به دست

را تخمین می‌زند که به‌عنوان نقطه‌ضعف این روش در مدل‌سازی مکانی محسوب می‌شود. مدل آماری رگرسیون کمترین مربعات خطا و ماتریس تخمین ضرایب مدل، با استفاده از روابط سه و چهار بیان می‌گردد (Erfanian et al., 2014).

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن T ترانهاده ماتریس، $(X^T X)^{-1}$ معکوس ماتریس واریانس-کواریانس و X ماتریس متغیرهای مستقل است. این مدل تغییرات مکانی پارامترهای مدل را ارائه نمی‌دهد. وجود هم‌راستایی سبب پنهان شدن اطلاعات و گمراهی در استنباط آماری و عدم اطمینان به ضرایب برآوردی مدل می‌شود. از آنجاکه فرض اساسی در روش‌های رگرسیونی کلی ثابت بودن روابط در محدوده مورد مطالعه است، این روش برای متغیرهایی که دارای تغییرات مکانی زیادی هستند مناسب نیست چراکه باعث حذف عوامل مؤثر محلی می‌شود. تکنیک‌های رگرسیونی محلی متعددی برای محاسبه نا ایستایی فضایی در روابط داده‌ها وجود دارد که یکی از آن‌ها رگرسیون موزون جغرافیایی است. نا ایستایی فضایی بیانگر این است که در هر نقطه رابطه‌ای متفاوت بین متغیر وابسته و مستقل وجود دارد. در این روش برای برآورد پارامترهای مدل در هر نقطه، از مشاهدات اطراف آن نقطه استفاده می‌شود. لذا مشاهدات نزدیک‌تر اثرگذارتری بیشتری در برآورد محلی پارامترها نسبت به مشاهدات دورتر دارند این وزن دهی توسط تابع وزنی کرنال انجام می‌شود (Lu et al., 2015). برای افزایش دقت مدل در این روش، پهنای باند برای محاسبه تابع وزن دهی $w_i(u, v)$ با پراکندگی مشاهدات حول نقطه مرجع تطبیق داده می‌شود و رگرسیون موزون جغرافیایی از رابطه پنج به دست می‌آید.

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (\text{رابطه ۵})$$

در اینجا u_i, v_i بیانگر مختصات نقاط در مکان هستند. اگر $\hat{\beta}(u, v)$ برآوردی از β و ماتریس $w(u, v)$ اوزان و X ماتریس متغیرهای مستقل باشند پارامترها از طریق رابطه شش برآورد می‌شود.

$$\hat{\beta}(u, v) = (X^T W(u, v) X)^{-1} X^T W(u, v) y \quad (\text{رابطه ۶})$$

در گام بعد اگر بین متغیرهای مستقل هم خطی زیادی باشد باید آن‌ها را از مدل خارج نمود. شاخص VIF برای آگاهی از وجود یا عدم وجود هم خطی بکار می‌رود. به‌طور کلی اگر شاخص VIF بیشتر از ۷/۵ بود بین متغیرها هم خطی وجود دارد. جهت مدل‌سازی رگرسیونی ابتدا آزمون هم‌راستا بودن متغیرهای مستقل از طریق گرفتن همبستگی بین پنج متغیر مستقل موجود

می آیند.

(رابطه ۹)

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{X})^2}$$

(رابطه ۱۰)

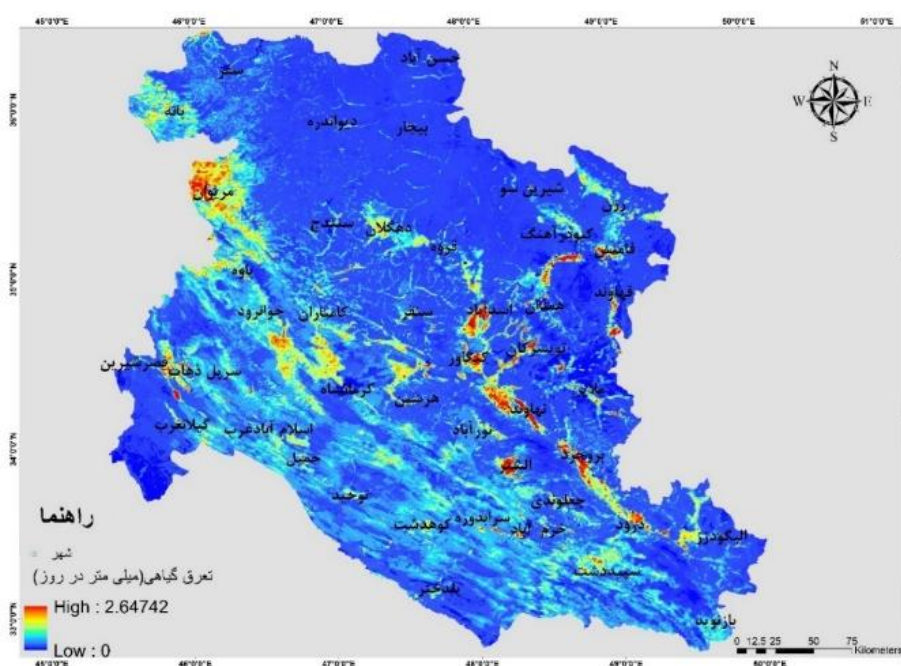
$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{sim,i} - X_{obs,i})^2 \right]^{1/2}$$

$X_{obs,i}$ داده‌های مشاهداتی، $X_{sim,i}$ داده‌های برآورد شده، \bar{X}_{obs} میانگین داده‌های مشاهداتی است. دامنه ضریب NSE بین ۱ تا $-\infty$ است. اگر دامنه این معیار بین ۰-۱ باشد، مقدار خطا از واریانس داده‌ها بیشتر نمی‌شود و بهترین حالت زمانی است که ضریب برابر یک است (Asakereh and Razmi, 2018).

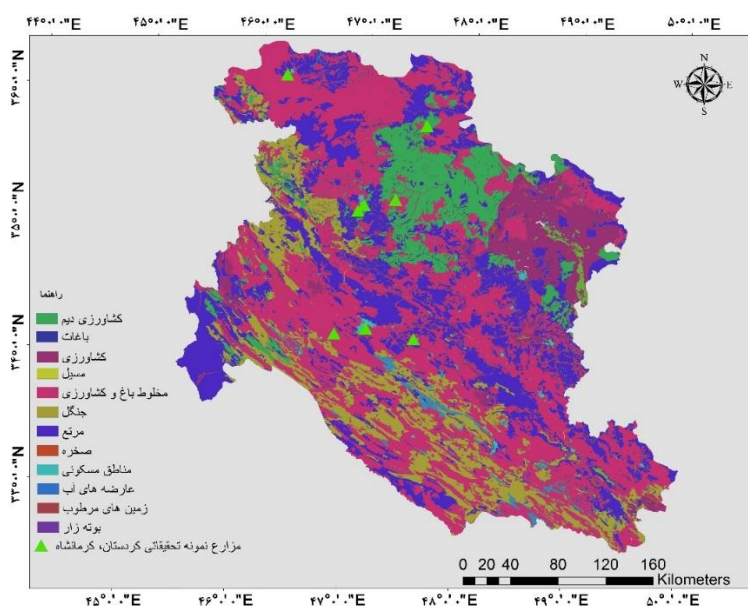
یافته‌ها

جهت استخراج تفرق گیاهی از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مادیس که شامل کلیه تصاویر موجود در بازه سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۰ در پایگاه داده سامانه گوگل ارث اینجین استفاده شد و با الگوریتم پن من مانتیس اجرا شده میانه شاخص تفرق گیاهی ایجاد گردید (شکل ۲).

جهت صحت سنجی نقشه خروجی داده‌های تفرق گیاهی از مزارع پژوهشی مرکز تحقیقات کشاورزی استان کرمانشاه و کردستان اخذ گردید. نقشه پراکندگی مزارع نمونه در شکل (۳) آورده شده است.



شکل ۲- تفرق روزانه گیاهی غرب ایران



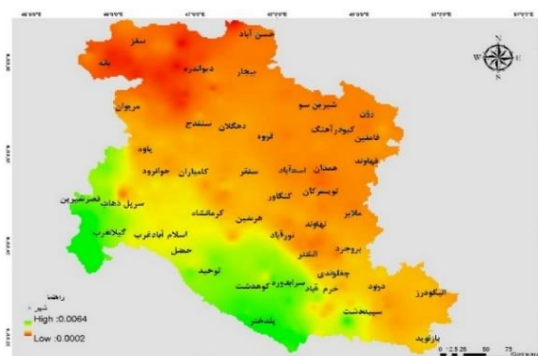
شکل ۳- کاربری‌های زمین و نقاط نمونه برداری شده مزارع پژوهشی مراکز تحقیقات کشاورزی استان کردستان و کرمانشاه

از آنجاکه مدل رگرسیون کلی تنها شمایی کلی از رفتار تعرق گیاهی در محدوده مورد مطالعه را ارائه می‌دهد لذا با بهره‌گیری از رگرسیون موزون جغرافیایی به مدل‌سازی محلی تعرق پرداخته شد تا بتوان رفتار و اهمیت هر متغیر مستقل را جداگانه در کل پهنه شناسایی کرد. چنانکه ذکر شده از پنج متغیر مکانی به‌عنوان متغیرهای مستقل استفاده شد. پس از اجرای مدل رگرسیون مکانی، ضرایب برآورد کمبود فشار بخار آب (شکل ۵)، ضرایب برآورد پوشش گیاهی (شکل ۶)، ضرایب برآورد تابش خورشیدی (شکل ۷)، ضرایب دمای حداکثر (شکل ۸)، ضرایب برآورد سرعت باد (شکل ۹) که نشان‌دهنده میزان اهمیت آن‌ها در برآورد تعرق گیاهی است به دست آمد. سپس با استفاده از شاخص‌های آماری به ارزیابی مدل استخراجی پرداخته شد که نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است.

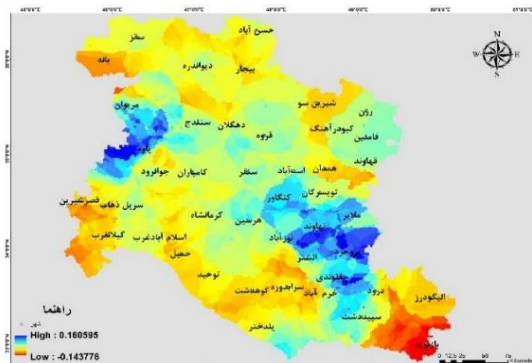
با مقایسه پیکسل‌های نقشه خروجی تعرق روزانه با داده‌های واقعی ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب نش ساتکلیف به ترتیب ۰/۷۱ و ۰/۶۳ به دست آمد. بعد از اعمال تبدیلات لگاریتمی متغیرهای مستقل، برازش رگرسیون کلی کمترین مربعات خطا (OLS) بر روی داده‌ها انجام گرفته و مدل رگرسیونی طبق رابطه ۱۱ استخراج گردید.

$$\text{Transpiration in western Iran} = 0.001768 + 0.0824\text{NDVI} + 0.005354\text{SRAD} + 0.0014\text{TMMX} + 0.0064\text{VPD} + 0.005019\text{VS}$$

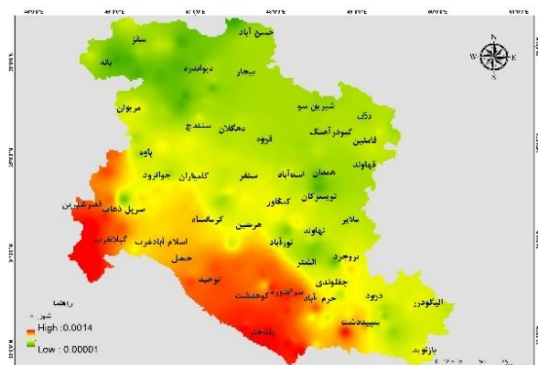
این معادله گویای یک رابطه خطی بین متغیرهای مستقل و وابسته است که بر اساس آن متغیرهای مستقل توانایی توجیه و تبیین ۸۶/۰۱ درصد از تغییرات تعرق گیاهی را دارند. همچنین نقشه پراکندگی خطای مدل مطابق شکل (۳) استخراج شد.



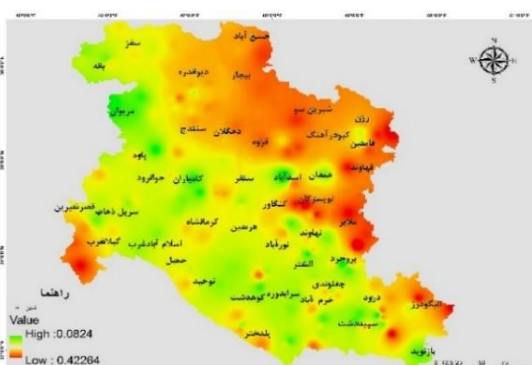
شکل ۵- ضرایب برآورد کمبود فشار بخار آب



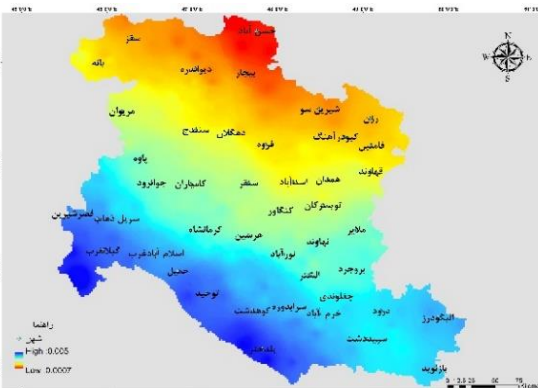
شکل ۴- پراکندگی خطای رگرسیون کلی



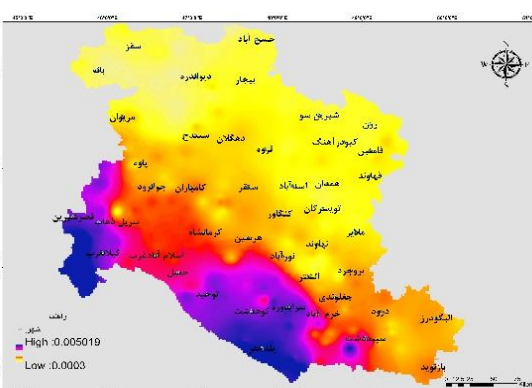
شکل ۷- ضرایب برآورد تابش خورشیدی



شکل ۶- ضرایب برآوردی پراکندگی پوشش گیاهی



شکل ۹- ضرایب برآوردی سرعت باد



شکل ۸- ضرایب برآورد دمای حداکثر

جدول ۱- ارزیابی مدل های رگرسیون کلی و رگرسیون مکانی

| شاخص خطا | مدل | |
|-----------------------|-------------|---------------|
| | رگرسیون کلی | رگرسیون مکانی |
| NSE | ۰/۴۱ | ۰/۶۷ |
| RMSE | ۱/۵۸ | ۱/۲۱ |
| R ² | ۰/۶۸۳۳ | ۰/۷۴۰۱ |
| AICc | ۲۵۵/۲ | ۱۴۳/۵۱ |
| P_value باقیمانده مدل | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۱۴ |

بحث

پایش و مدل سازی مکانی تعرق گیاه می تواند یکی از بررسی های مهم جهت برنامه ریزی های محیطی باشد. در این تحقیق با استفاده از الگوریتم پن من مانیس و پلت فرم رایگان گوگل ارث اینچین نقشه میانه پراکندگی روزانه تعرق گیاهی در غرب ایران استخراج شد. نقشه تعرق گیاهی نشان داد حداکثر تعرق گیاهی به صورت هسته ای در راستای شمال غرب و به جنوب شرق و بیشتر در ارتفاعات زیر ۲۰۰۰ متر است. داشتن اطلاعات بهنگام در مورد توزیع فضایی عوامل دخیل در تعرق گیاه برای مدیریت کشاورزی بسیار مهم است و اجازه می دهد تا اقدامات لازم برای کاهش، یا حتی جلوگیری از تلفات اقتصادی و بازگرداندن بهره وری آبیاری اجرا شود. در تحقیق حاضر به منظور شناخت روابط بین عوامل مکانی و پراکندگی رطوبت خاک، با استفاده از اطلاعات تولید شده یعنی میانگین هر عامل در هر یاخته و با توجه به مشخصه های مکانی هر یاخته، با استفاده از روش های رگرسیون معمولی و رگرسیون موزون جغرافیایی مدل سازی گردید. ابتدا جهت حذف هم راستایی و کاهش شاخص تورم واریانس تبدیل لگاریتمی بر روی داده ها انجام شده و سپس معادله رگرسیون کلی بر داده ها برازش داده شد. همچنین از طریق شاخص های ارائه شده، میزان کارایی دو مدل مورد ارزیابی قرار گرفته است. در تحلیل مدل رگرسیون کمترین مربعات خطا رابطه بین متغیرها به صورت میانگین و کلی استخراج می شود. اگر رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته در بخشی از محدوده مورد مطالعه همبستگی مثبت داشته باشد و در بخشی دیگر همبستگی منفی میانگینی از این دو را ارائه می کند و موجب کاهش دقت مدل می شود؛ اما برتری عمده روش رگرسیون وزن دار مکانی در مقابل روش رگرسیون معمولی توانایی آن در بررسی اثر مکانی متغیرهاست. ضرایب و اثر مثبت یا منفی داشتن، متغیرهای مستقل در هر نقطه از مکان مورد مطالعه با نقطه دیگر می تواند متفاوت باشد. یکی دیگر از معایب این روش این است که اگر یکی از متغیرهای مستقل، تابعی خطی از یک یا چند متغیر مستقل دیگر باشد هم راستایی ایجاد شده و موجب کاهش دقت مدل می شود. در این مدل پراکندگی خطا مطابق شکل (۳) در دامنه

مثبت و منفی یک صدم قرار گرفت و میزان خطا در محدوده های که پوشش گیاهی غنی تری داشته مانند اطراف میوان و اطراف نهالوند که بیشتر کاربری جنگل دارند نمود بیشتری از خود نشان داده است. با توجه به معادله رگرسیون کلی می توان دریافت که از میان پنج متغیر مستقل موجود، متغیر شاخص پوشش گیاهی بیشترین اثر را بر تعرق گیاهی را داشته است. به عبارتی با هر یک واحد شاخص پوشش گیاهی ممکن است به طور میانگین ۰/۰۰۸۲۴ میلی متر تعرق گیاهی در محدوده مورد مطالعه افزایش یابد. دومین متغیر اثرگذار کمبود فشار بخار آب با میزان اثرگذاری ۰/۰۰۶۴ است هرچه فشار بخار آب کمتر باشد تعرق گیاهی بیشتری از سطح پوشش گیاهی صورت می گیرد. متغیرهای دیگر به ترتیب ۰/۰۰۵۳۵۴ تابش خورشیدی، ۰/۰۰۵۰۱۹ سرعت باد و کمترین اثر مربوط به تابش خورشیدی با ضریب ۰/۰۰۱۴ تابش خورشیدی است. پس از اجرای مدل رگرسیون مکانی اهمیت و ضریب هر متغیر مستقل در هر نقطه مکانی از محدوده مورد مطالعه مشخص گردید. نقشه های اشکال شش تا نه گستره تحت پوشش ضرایب و میزان اهمیت هر کدام از متغیرهای مورد نظر را نشان می دهد. پراکندگی خطای رگرسیون کلی گویای این واقعیت است مناطقی که خطاها منفی هستند برآورد تعرق بیش از مقادیر واقعی بوده و در مناطق با خطاهای مثبت که بیشتر مناطق با پوشش گیاهی زیاد را شامل می شود مقادیر برآوردی کمتر از واقعیت بوده است؛ که بیشتر در اطراف جنگل های بلوط زاگرس و مناطق باغات نهالوند و بروجرد است و در مناطق پراکندگی خطای صفر مدل توانسته است نزدیک به واقعیت تخمین بزند. نیز نقشه باقیمانده های رگرسیون کلی گویای این واقعیت است در مناطق دشت مدل خطای کمتری دارد اما در محدوده های نزدیک به مناطق مسکونی احتمالاً به خاطر ناهمگنی کاربری ها مدل خطای بیشتری از خود نشان داده است. با بررسی شاخص های آماری مشخص شد مدل رگرسیون مکانی با ضریب همبستگی بالاتر، کمترین میزان *AICc*، بالاترین میزان *NSE* و کمترین *RMSE*، نسبت به مدل رگرسیون کمترین مربعات خطا بهترین برازش را داشته است. بر اساس نقشه پراکندگی خطا مدل و ضریب همبستگی، رگرسیون مکانی توانست بیش از ۷۴ درصد تغییرات تعرق گیاهی را با متغیرهای مستقل توجیه کند. نقشه های مانده های مدل نیز حاکی از کاهش دامنه باقیمانده های مدل رگرسیون موزون جغرافیایی نسبت به باقیمانده های مدل رگرسیون معمولی است. نتایج تحقیقات سایر محققان نظیر Usman, Brown et al. (2012), Sharma and Mondale (2006), Asakereh et al. (2015), and Razmi (2018) نیز نشان دهنده کارایی بهتر مدل رگرسیون

نمونه‌گیری در آن انجام نشده و یا با مسائلی همراه است می‌تواند بسیار کارا باشد. کاربران و اعضای ثبت‌نام‌شده پلت فرم گوگل ارث اینجین می‌توانند جهت تهیه نقشه‌های تعرق گیاهی از لینک زیر استفاده نمایند

<https://code.earthengine.google.com/d43e5a92ae1deed3>
(2a0929f57b572756).

میزان تعرق گیاهی در محدوده غرب کشور بین ۰ تا ۲/۶ میلی‌متر در روز محاسبه شد. صحت سنجی نقشه خروجی با مقایسه پیکسل‌های نقشه و داده‌های زمینی، ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب نش ساتکلیف به ترتیب ۰/۷۱ و ۰/۶۳ را نشان داد. مدل رگرسیون مکانی با ضریب همبستگی بالاتر، میزان آکائیک و ریشه میانگین مربعات خطا کمتر نسبت به مدل رگرسیون کلی برازش بهتری را در برآورد و مدل‌سازی تعرق گیاهی دارد. برتری عمده روش رگرسیون وزن‌دار مکانی در مقابل روش رگرسیون معمولی توانایی آن در بررسی اثر مکانی متغیرهاست. چنین تحقیقاتی می‌تواند موجب شناسایی مناطق در معرض شدید تبخیر- تعرق گیاه شده و در برنامه‌ریزی‌های محیطی برای پیاده‌سازی اقدامات پیشگیرانه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از نتایج این تحقیق و خروجی‌های آن برای شناسایی کانون‌های عوامل مؤثر در تعرق شدید گیاهی برای برنامه‌ریزی‌های هوشمندانه کشاورزی و تخصیص منابع و امکانات مورد استفاده قرار گیرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abrifam, M. (2001). The Synoptic Analysis of Entranced Air Masses to the West of Iran (2004-2005), Supervisor: Gholamreza Barati, Master of Science in Climatology, Razi University of Kermanshah.
- Akbari, M. Seif, Z. and Zare, H. (2012). Estimation of actual evapotranspiration and potential in different climatic conditions using remote sensing. *Water and Soil*, 25(4), 835-844. (In Farsi)
- Asakereh, H. and Sifipour, Z. (2015). Spatial modeling of annual rainfall in Iran. *Geography and Development*, 10(29), 15-30. (In Farsi)
- Asakereh, H. and Razmi, R. (2018). Spatial modeling of summer rainfall in northwestern Iran. *Applied Research Space of Geographical Sciences*, 18(50), 156-178. (In Farsi)
- Brown, S., Versace, V., Laurenson, L., Ierodiaconou, D., Fawcett, J., and Salzman, S. (2012). Assessment of spatiotemporal varying relationships between rainfall, land cover and surface water area using geographically weighted regression. *Environmental Modeling and Assessment*, 17(3), 241-254.
- Erfanian, M., Hossinkhah, M., and Alijanpor, A (2014). Introduction to Multivariate OLS Regression Methods and GWR in spatial modeling of land use effects. *Extension and Development of Watershed Management*, 1(1), 33-39. (In Farsi)
- Ganji, M. H. (2003). Climatic faults of Iran. *Bulletin of the National Center for Climatology*, 3 (1), 41. (In Farsi)
- Hu, G., Li, J., and Menent, M. (2015). Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011. *Remote Sensing of Environment*, 156, 510-526.
- Kalma, D., McVicar, R., and McCabe, F. (2008). Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in Geophysics*, 29, 421-469.
- Kerlinger, p. (2005). Multiple regression in behavioral research. Translated by Hassan sarai. *Samt Press*. (In Farsi)
- Lu, B., Harris, P., Charlton, M., and Brunson, C. (2015). Calibrating a geographically weighted regression model with parameter-specific distance metrics. *Procedia Environmental Sciences*, 26, 109-114.

- L'vovich, M. and White, F. (1990) Use and transformation of terrestrial water systems The Earth as transformed by human action Cambridge. UK. Cambridge University Press.
- Maidment, D. R. (1993) *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill.
- Marbote, B., Ashrafzadeh, A., Vazifehdoost, M., and Khaledian, M. (2018). Comparison of real evapotranspiration of MOD16 product and simulated by SWAP model (Case study: Farms under corn cultivation in Qazvin province. *Iran Water Resources Research*, 14 (2), 81-93. (In Farsi)
- Mojarad, F., and Masoompour, J. (2013). Estimation of maximum probable precipitation by synoptic method in Kermanshah province. *Geographical studies of arid regions*, 13, 1-14. (In Farsi)
- Mir Yaghoubzadeh, M., Soleimani, K., Habib Nejad, M., Kaka Shahedi, R., Abbaspour, K., and Akhavan, S. (2014). Determining and evaluating actual evapotranspiration using remote sensing data; Case study of Tamar watershed, Golestan. *Irrigation and water of Iran*, 4(3), 89-103. (In Farsi)
- Mu, Q., Zhao, M., and Running, W. (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing Environment*, 115 (8), 1781-1800.
- Schlesinger, W. and Jasechko, S. (2014). Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189, 115-119
- Sharma, C. and Mondale, A. (2006). Mapping of soil salinity and sodicity using digital image analysis and GIS in irrigated lands of the Indo-Gangetic plain. *Agropedology*, 16, 71-76.
- Usman, U., Aliyu, M., and Aminu, K. (2015). Study of the Geographically Weighted Regression Application on Climate Data. *Mathematical Theory and Modeling*, 5, 8.
- Wang, Q., Ni, J. and Tenhunen, J. (2005). Application of geographically weighted regression analysis to estimate net primary production of Chinese forest ecosystems. *Global ecology and biogeography*, 14(4), 379-393.
- Zhang, Y., Peña-Arancibia, J., McVicar, T., Chiew, F., Vaze, J., Liu, C., Zheng, H., Wang, Y., Yi, Y., Miralles D., and Pan, M. (2016). Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. *Scientific reports*, 6, 19124-1939.