

به کارگیری دمای سطح زمین مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای به منظور پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع

یونس خوشخو و سامان نیک‌مهر

دوره ۷، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، صفحات ۷۲۲-۷۰۸

Vol. 7(4), Winter 2021, 708-722

DOI: 10.22034/JEWE.2021.293156.1591

Application of Land Surface Temperature
Extracted from Satellite Images for Zoning
Reference Evapotranspiration

Khoshkhoo, Y. and Nikmehr, S.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله:

خوشخو، ی. و نیک‌مهر، س. (۱۴۰۰). به کارگیری دمای سطح زمین مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای به منظور پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع. محیط‌زیست و مهندسی آب، دوره ۷، شماره ۴، صفحات: ۷۲۲-۷۰۸.

Citing this paper: Khoshkhoo, Y. and Nikmehr, S. (2021). Application of land surface temperature extracted from satellite images for zoning reference evapotranspiration. Environ. Water Eng., 7(4), 708-722. DOI:10.22034/JEWE.2021.293156.1591

مقاله پژوهشی

به‌کارگیری دمای سطح زمین مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای به منظور پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع

یونس خوشخو^۱ و سامان نیک‌مهر^{۱*}

^۱استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

*نویسنده مسئول: s.nikmehr@uok.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۴۰۰/۰۴/۱۰]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۰/۰۴/۳۱]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۰/۰۵/۱۳]

چکیده

تبخیر و تعرق مرجع یکی از مهم‌ترین پارامترهای موردنیاز جهت تعیین نیاز آبی گیاهان، انجام مطالعات اقلیمی و هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آب است. هدف از این پژوهش، پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع با بهره‌گیری از تصاویر سنجنده MODIS بود که در حوضه سفیدرود انجام شد. برای این منظور، از بین محصولات سنجنده MODIS، دمای سطح زمین انتخاب و بر اساس آن، مقادیر دماهای حداقل و حداکثر روزانه هوا برای محدوده مطالعاتی با به‌کارگیری دو مدل رگرسیون خطی چندگانه و مدل غیرخطی مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان مدل‌سازی شد. نقشه پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع برای محدوده مطالعاتی به روش هارگریوز-سامانی تهیه شد. در ادامه با بسط یک مدل رگرسیون خطی، تبخیر و تعرق مرجع حاصل از روش هارگریوز-سامانی به تبخیر و تعرق مرجع به روش فائو-پنمن-مانتیت تبدیل و نقشه پهنه‌بندی آن برای منطقه مورد مطالعه استخراج شد. بر اساس تحلیل‌های انجام شده، مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون چندمتغیره به ترتیب برای مدل‌سازی دماهای حداقل و حداکثر انتخاب و ضریب تعیین تعدیل شده حاصل از اعتبارسنجی متقابل برای آن‌ها به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۹۲ به دست آمد. نتایج حاصله حاکی از امکان برآورد مکانی تبخیر و تعرق مرجع با دقتی مناسب بر اساس الگوریتم مبتنی بر استفاده تلفیقی از داده‌های ماهواره‌ای دمای سطح زمین و مدل‌های آماری بود. پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع می‌تواند برای هر منطقه دلخواه تنها با در دست داشتن اطلاعات هواشناسی چند نقطه ایستگاهی و با بهره‌گیری از دماهای سطح زمین حاصل از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شود.

واژه‌های کلیدی: فائو-پنمن-مانتیت؛ سنجش از دور؛ مدل رگرسیونی؛ نیاز آبی



۱- مقدمه

تبخیر و تعرق مفهومی است که از آن برای بیان مقدار آب انتقال‌یافته از سطح زمین به اتمسفر در اثر تبخیر از سطح آب‌های آزاد، سطح خاک، سطح گیاه و به‌طور کلی هر سطح دارای رطوبت استفاده می‌شود (Li et al. 2009). تبخیر و تعرق یکی از مؤلفه‌های اصلی بیلان آبی هر منطقه و از مهم‌ترین عوامل کلیدی برای برنامه‌ریزی درست و مناسب آبیاری است. برای بهبود راندمان آب مصرفی و برآورد آن یکی از گام‌های اصلی بهبود مصرف و کنترل تلفات آب در بخش کشاورزی و همچنین مطالعات مربوط به بیلان آبی و زیست‌محیطی در یک منطقه است (Esmaeili et al. 2018a). برآورد مناسب نیاز آبی به تسهیل تصمیم‌گیری برای مدیریت منابع آب و اجرای مدل‌های هیدرولوژیکی و انجام مطالعات اقلیمی کمک شایانی می‌کند (Liu et al. 2014). در تقسیم‌بندی‌های رایجی که از مفهوم تبخیر و تعرق استفاده شده است سه مفهوم کلی شامل تبخیر و تعرق واقعی، تبخیر و تعرق پتانسیل و تبخیر و تعرق گیاه مرجع از هم تفکیک شده‌اند. تبخیر و تعرق واقعی (ET_a) مقدار آب تلف‌شده از سطح خاک و گیاه تحت شرایط واقعی و موجود و تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_p) مقدار آب تلف‌شده از یک پوشش کامل گیاهی در حالت عدم وجود هیچ‌گونه عامل محدودکننده‌ای به لحاظ مقدار رطوبت موجود در خاک، مواد مغذی، آفات و امراض است. تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) هم مفهوم آن مشابه با مفهوم تبخیر و تعرق پتانسیل است با این تفاوت که برای یک نوع گیاه مشخص (به‌طور معمول چمن) بکار می‌رود. میزان تبخیر و تعرق صورت گرفته از سطحی پوشیده از چمن به ارتفاع $0/12$ m و مقاومت سطحی 70 s/m و آلبدوی $0/23$ است که سطح وسیعی را به‌طور کامل و یکنواخت و بدون کمبود آب پوشش داده باشد به گونه‌ای که تبخیر و تعرق بدون هیچ‌گونه محدودیتی در آن صورت گیرد (Allen et al. 1998). تبخیر و تعرق مرجع در واقع بیانگر توان تبخیرکنندگی اتمسفر بوده و صرفاً تابع پارامترهای اقلیمی است. از تبخیر و تعرق مرجع همچنین به‌عنوان یک پارامتر اقلیمی که وقوع شرایط تغییر اقلیم را می‌توان با آن موردسنجش و ارزیابی قرار داد نام برده شده است (Liu et al. 2019).

در بین روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع، در تحقیقات متعددی روش فائو- پنمن- مانیتث به‌عنوان یک روش استاندارد و مناسب برای شرایط اقلیمی مختلف ذکر شده است. نتایج حاصل از آن در مقایسه با روش لایسیمتری کمترین خطا را دارا بوده است (Chatzithomas and Alexandris 2015; Pereira et al. 2015). در این روش، متغیرهای هواشناسی مختلف شامل دماهای حداکثر و حداقل هوا، طول ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و سرعت باد موردنیاز هستند. استفاده از این گونه داده‌های ایستگاهی جهت تعیین تبخیر و تعرق مرجع اگرچه در مقیاس نقطه‌ای دارای دقت بسیار بالایی هستند، اما با این محدودیت مواجه هستند که نمی‌توانند بیانگر تغییرات تبخیر و تعرق مرجع در ابعاد وسیع و در مقیاس منطقه‌ای باشند. وجود چنین محدودیتی باعث ایجاد انگیزه در استفاده از فن‌سنجش‌ازدور و به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس‌های منطقه‌ای گردیده است (Firouzi Nezamabadi and Kaviani 2015). برآورد توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس منطقه‌ای برای بسیاری از مطالعات نظیر طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری، برنامه‌ریزی آبیاری، شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان و مدیریت منابع آب اهمیت بالایی دارد. به‌طور ویژه برای مناطق با توپوگرافی زیاد و متغیر تبخیر و تعرق از تغییرپذیری مکانی بالایی برخوردار است.

³Reference Evapotranspiration

⁴Land Surface Temperature

¹Actual Evapotranspiration

²Potential Evapotranspiration



از تصاویر سنجنده MODIS به جای متغیرهای دمای حداقل و دمای حداکثر در مدل هارگریوز^۱، تبخیر و تعرق گیاه مرجع را برای مزارع طرح توسعه نیشکر خوزستان برآورد کردند. نهایتاً مدل هارگریوز با هر دو نوع داده‌های ورودی (دمای سطح زمین و دمای هوا) دقت نسبتاً مشابهی داشت. Kitsara et al. (2018) نیز از داده‌های دمای سطح زمین حاصل از سنجنده MODIS به منظور پیش‌بینی دمای حداکثر و دمای حداقل در کشور یونان، مقادیر پیش‌بینی شده، تبخیر و تعرق مرجع به روش‌های هارگریوز، دروگز - آلن^۲ و REMCT^۳ را - مانیتیت^۴ مقایسه نمودند. نتایج نشان‌دهنده تطابق بیش‌تر روش REMCT با روش فائو - پنمن - مانیتیت با ضریب همبستگی ۰/۹۳ بود. ایشان استفاده از این روش را به منظور برآورد تبخیر و تعرق مرجع در نقاط بدون ایستگاه پیشنهاد نمودند.

با جمع‌بندی مطالب فوق می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که این امکان وجود دارد که از پارامترهای دمایی برآورد شده از طریق تصاویر ماهواره‌ای و جاگذاری آن‌ها در برخی معادلات تجربی مبتنی بر دمای هوا، مقدار تبخیر و تعرق مرجع را در مقیاس منطقه‌ای و برای مناطق فاقد ایستگاه‌های هواشناسی برآورد کرد. براین اساس، هدف از پژوهش حاضر برآورد توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع و پهنه‌بندی آن در مقیاس منطقه‌ای با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است که برای بخشی از حوضه سفیدرود در استان کردستان انجام شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی و داده‌ها

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش بخشی از حوضه آبخیز سفیدرود است که در محدوده استان کردستان شامل چهار شهرستان دهگلان، قروه، بیجار و دیواندره، واقع شده است (شکل ۱). این ناحیه در حدود ۲۴٪ از کل حوضه سفیدرود بزرگ را شامل می‌شود.

زمین را در واقع می‌توان پرکاربردترین محصول ماهواره‌ای برای برآورد تبخیر و تعرق به حساب آورد (Dimitriadou and Nikolakopoulos 2021). تحقیقات صورت گرفته حاکی از ارتباط قوی بین مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین دمای هوا با LST استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی است (Mildrexler et al. 2011; Lin et al. 2012; Benali et al. 2012; Urban et al. 2013; Zhu et al. 2013). براین اساس، این امکان و پتانسیل وجود دارد که براساس توزیع مکانی دمای سطح زمین که توسط تصاویر ماهواره‌ای تهیه می‌شود توزیع مکانی دمای هوا را با دقت مناسب در مقیاس منطقه‌ای برآورد کرد. به‌عنوان نمونه Shen et al. (2011) با مقایسه داده‌های برآورد شده دمای هوای حاصل از سنجنده MODIS با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی برای دو منطقه در شمال چین، همبستگی بالای بین داده‌های حاصل از این سنجنده با داده‌های هواشناسی را گزارش کردند. (Rezaei Banafsheh et al. 2014) استفاده از تصاویر ماهواره MODIS میزان تبخیر و تعرق واقعی در حوزه آبخیز سفیدرود بزرگ را محاسبه کردند. نتایج نشان داد که با افزایش دمای سطح زمین و کاهش بارندگی میزان تبخیر و تعرق پتانسیل در حوضه افزایش یافته است. (Esmaili et al. 2018b) نیز مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین دمای هوا در مقیاس‌های روزانه و ماهانه را براساس دمای سطح زمین مستخرج از سنجنده MODIS با دقت قابل قبول برای استان کردستان برآورد کردند. با توجه به اینکه مدل‌های تجربی متعددی برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع ارائه شده‌اند که داده‌های ورودی آن‌ها فقط پارامترهای دمایی هوا هستند لذا با برآورد توزیع مکانی دمای هوا توسط تصاویر ماهواره‌ای و ترکیب آن با مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق مرجع می‌توان جهت برآورد توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع در سطوح گسترده و وسیع اقدام کرد. (Maeda et al. 2011) با جاگذاری دماهای روزانه و شبانه سطح زمین به جای پارامترهای دمای هوا در سه معادله تجربی هارگریوز، تورنت وایت و بلانی کریدل، مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع را برای منطقه‌ای در کنیا برآورد و دقت مناسب و قابل قبولی را گزارش کردند. (Yarahmadi and Rahimikhoob 2014) جاگذاری پارامترهای دمایی روزانه و شبانه سطح زمین حاصل

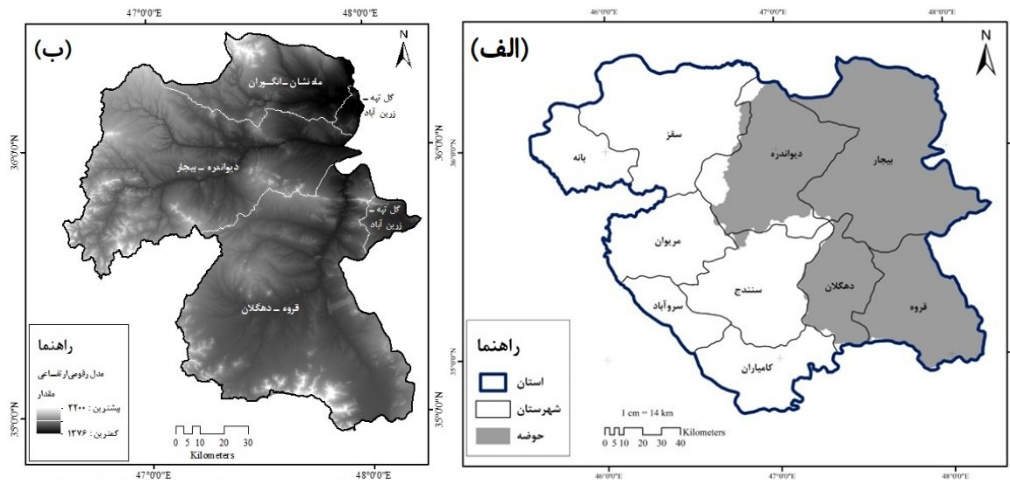
³Reference Evapotranspiration Model for Complex Terrains

⁴FAO-Penman-Monteith

¹Hargreaves

²Droogers-Allen





شکل ۱- شمای کلی منطقه مورد مطالعه در استان کردستان (الف): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، (ب) مدل رقمی ارتفاع محدوده مورد بررسی و زیرحوضه‌های آن

Fig. 1 Overall outline of the studied area in Kurdistan province: a) Geographic position of the study area, b) Digital elevation model of the studied area and its sub-basins

دو ماهواره به ترتیب در تاریخ‌های ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ و ۴ می ۲۰۰۲ توسط سازمان ملی هوا و فضای آمریکا (NASA) در مدار زمین قرار گرفته‌اند. آنها در دو مسیر مخالف، هرروز دو نوبت به دور زمین می‌گردند و محصولات متنوعی برای کاربردهای مختلف زمینی، اقیانوسی و جوی را تولید و عرضه می‌کنند (Khoshkhou et al. 2018). ماهواره Terra از سمت شمال به جنوب حرکت می‌کند. زمان‌های عبور این ماهواره از استوا حدود ۱۰:۳۰ صبح و ۲۲:۳۰ شب به وقت گرینویچ است. ماهواره Aqua در مسیری مخالف ماهواره Terra از سمت جنوب به شمال حرکت می‌کند و زمان‌های عبور آن از استوا حدود ۱:۳۰ شب و ۱۳:۳۰ بعدازظهر به وقت گرینویچ است. این سنجنده در ارتفاع ۷۰۵ km از سطح زمین و با عرض پوشش ۲۳۳۰ km بازتاب‌های دریافت شده از پدیده‌های مختلف سطح زمین را در ۳۶ باند طیفی (از ۰/۴ تا ۱۴/۴ میکرومتر) متشکل از ۱۱ باند در طیف مرئی، ۵ باند در طیف مادون قرمز نزدیک، ۱۴ باند در طیف مادون قرمز کوتاه و میانی و ۶ باند در طیف مادون قرمز بلند تهیه می‌کند. قدرت تفکیک مکانی باندهای مذکور از ۲۵۰ m تا ۱۰۰۰ m متغیر است. عامل محدودکننده در چنین اندازه‌گیری‌هایی وجود ابرناکی است که باعث می‌شود بازتاب‌های زمینی به سنجنده نرسد و اندازه‌گیری انجام نشود. از بین محصولات مختلف و متنوعی که توسط سنجنده MODIS عرضه می‌شود در این پژوهش از محصول دمای سطح زمین (LST) با کد

جهت انجام این پژوهش از داده‌های متنوعی شامل داده‌های زمینی و اطلاعات مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است. داده‌های زمینی شامل اطلاعات هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک و اقلیم‌شناسی (وابسته به سازمان هواشناسی کشور) و ایستگاه‌های تبخیرسنجی (وابسته به وزارت نیرو) می‌باشند. در جدول (۱) مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه آورده شده است. از این داده‌ها در محاسبه تبخیر و تعرق مرجع به دوروش فائو-پنمن -مانیت و هارگریوز - سامانی استفاده شد. با توجه به اینکه داده‌های موردنیاز در روش فائو - پنمن - مانیت فقط در ایستگاه‌های سینوپتیک اندازه‌گیری می‌شوند، لذا محاسبه تبخیر و تعرق مرجع به روش فائو - پنمن - مانیت فقط برای ایستگاه‌های سینوپتیک زرینه، بیجار، قروه و هزارکانیان امکان‌پذیر بود. از این میان، ایستگاه هزارکانیان نیز به دلیل عدم ثبت داده‌های ابرناکی و طول ساعات آفتابی فاقد صلاحیت لازم بوده است. نهایتاً این روش تنها برای سه ایستگاه سینوپتیک زرینه، بیجار و قروه اعمال شد. برآورد تبخیر و تعرق مرجع به روش هارگریوز - سامانی برای کلیه ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی، سینوپتیک و تبخیرسنجی جمعاً به تعداد ۱۹ ایستگاه به شرح جدول (۱) انجام شد. دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۹ جهت انجام این پژوهش و در مقیاس روزانه در نظر گرفته شد. داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این پژوهش نیز شامل برخی از محصولات سنجنده MODIS بود که بر روی دو ماهواره Aqua و Terra نصب شده است. این

استخراج مناطق ابری و دارای گردوغبار استفاده گردید. تصاویر ماهواره MODIS به صورت موزاییک‌هایی در کنار یکدیگر مناطق مختلف کره زمین را پوشش می‌دهند. کل محدوده حوضه مورد مطالعه در این پژوهش در یک موزاییک واحد به شماره ردیف ۲۱ و شماره ستون ۵ قرار گرفته است که در شکل (۲) موقعیت آن به همراه محدوده مطالعاتی در داخل آن نشان داده شده است.

MOD11A1 مربوط به ماهواره Terra و با کد MYD11A1 مربوط به ماهواره Aqua و با توان تفکیک مکانی ۱۰۰۰ m و توان تفکیک زمانی روزانه استفاده شد. بر این اساس چهار دمای سطح زمین (LST) در ساعات ۱۰:۳۰ صبح و ۲۲:۳۰ شب (مستخرج از تصاویر ماهواره Terra) و ۱:۳۰ شب و ۱۳:۳۰ بعدازظهر (مستخرج از تصاویر ماهواره Aqua) استخراج شدند. همچنین از محصول MOD09GA به منظور

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش

Table 1 the station characteristics used in this study

Station Name	Station type	Latitude (Degree)	Longitude (Degree)	Elevation (meter)
Sarab Shahrak	Climatology	35.62	47.37	1983
Hezarkanian	Climatology	35.77	46.80	1894
Ghamloo	Climatology	35.18	47.48	1910
Divandarreh	Climatology	35.87	47.07	1755
Babarashani	Climatology	35.67	47.78	1662
Dehgolan	Climatology	35.28	47.42	1815
Yasokand	Climatology	36.28	47.75	1760
Zarrineh	Synoptic	36.07	46.92	2143
Bijar	Synoptic	35.89	47.62	1883
Ghorveh	Synoptic	35.18	47.79	1906
Hezarkaniyan	Synoptic	35.75	46.80	1934
Bolbanabad	Evaporation-gauge	35.14	47.32	2032
Changizghaleh	Evaporation-gauge	35.88	47.54	2133
Khandangholi	Evaporation-gauge	35.70	47.42	1817
Dabagh	Evaporation-gauge	35.89	46.97	1991
Dosar	Evaporation-gauge	35.08	48.02	1825
Salamatabad	Evaporation-gauge	35.67	47.84	1664
Zafarabad	Evaporation-gauge	36.02	46.98	2108
Naserabad	Evaporation-gauge	35.29	47.51	1796
Nesare	Evaporation-gauge	35.87	47.10	1802
Vazir	Evaporation-gauge	36.01	47.26	1761
Sangsiah	Evaporation-gauge	35.18	47.47	1862
Ghalehfoolad	Evaporation-gauge	35.49	47.34	1916
Sooral	Evaporation-gauge	35.17	47.20	2036
Khosroabad	Evaporation-gauge	35.52	47.62	1867

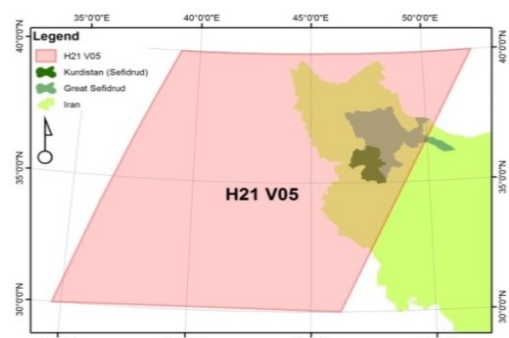
۲-۲- برآوردهای نقطه‌ای و منطقه‌ای تبخیر و تعرق

مرجع

در این پژوهش روش استاندارد فائو - پنمن - مانیتث (Allen et al. 1998) به عنوان روش منتخب جهت محاسبه تبخیر و تعرق مرجع و برآورد مکانی آن در نظر گرفته شد. اما همان‌گونه که ذکر شد این روش به دلیل نیازمند بودن به پارامترهای متعدد جوی تنها در ایستگاه‌های سینوپتیک بیجار، قروه و زرینه امکان محاسبه آن فراهم گردید. با توجه به ناکافی بودن این سه نقطه جهت مبنا قرار دادن آن‌ها برای تعمیم در مقیاس کل منطقه مورد مطالعه، برای افزایش تعداد نقاط ایستگاهی ابتدا با به‌کارگیری روش هارگریوز - سامانی

Environment and Water Engineering

Vol. 7, No. 4, 2021



شکل ۲- موزاییک حاوی منطقه مورد مطالعه در سنجنده

MODIS

Fig. 2 The mosaic including the study area in MODIS sensor

محیطزیست و مهندسی آب

دوره ۷، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰



– مانیتث (براساس داده‌های سه ایستگاه سینوپتیک) اعمال شد. در نهایت توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع به روش فائو – پنمن – مانیتث استخراج و به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی ارائه گردید.

قبل از استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، ابتدا پیش‌پردازش‌های لازم شامل تصحیحات هندسی و رادیومتریک انجام شد. سپس به جهت انجام تصحیحات اتمسفری، محل‌هایی که دارای گردوغبار یا ابر بودند مشخص و تصاویر مربوط به آن‌ها حذف شد. جهت تعیین نواحی ابرناکی از محصول MOD09GA سنجنده MODIS استفاده شد. پس از تعیین این نواحی و حذف آن‌ها، از روش آنالیز مؤلفه‌های اساسی احتمالاتی^۶ (PPCA) جهت بازسازی مقادیر حذف‌شده در محیط نرم‌افزار R استفاده شد. از الگوریتم PPCA در پژوهش‌های متعددی از جمله Chuan et al. (2020) جهت بازسازی خلأهای آماری استفاده شده است. از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های این روش امکان بازسازی متغیرهای اولیه از طریق مؤلفه‌ها است. در صورتی که برای یک داده مشاهده شده بر روی تعدادی از متغیرها، آماری ثبت نشده باشد و حداقل یک متغیر دارای مقدار باشد می‌توان از طریق مؤلفه‌ها به‌طور معکوس اقدام به عملیات فشرده‌سازی نمود. سپس فضای اعداد اولیه (مشاهده‌اید) را برای اطلاعات مفقود مجدداً بازسازی کرد. با اعمال این روش در نهایت سری‌های زمانی به‌هم‌پیوسته و طولانی‌مدت (از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۹) از مقادیر دمای سطح زمین برای تک‌تک پیکسل‌های منطقه مورد مطالعه در مقیاس زمانی روزانه استخراج شد. این سری‌ها مبنای انجام مراحل بعدی پژوهش قرار گرفتند.

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- توزیع مکانی دمای سطح زمین

به‌کارگیری محصول MOD09GA سنجنده MODIS جهت شناسایی مناطق ابری و دارای گردوغبار نشان داد که نواحی با درصد پوشش بالای ابر بیشتر در نواحی کوهستانی قسمت‌های شمال و شمال غرب و بخشی از نواحی جنوبی رخ داده‌اند. پس از شناسایی این نواحی و حذف داده‌های مربوط به آن‌ها و بازسازی مقادیر حذف شده با به‌کارگیری روش آنالیز مؤلفه‌های

(Hargreaves and Samani 1985) مقدار تبخیر و تعرق مرجع روزانه برای ۱۹ ایستگاه سینوپتیک، اقلیم‌شناسی و تبخیرسنجی محاسبه شد. سپس به جهت سوق دادن نتایج حاصل از روش هارگریوز – سامانی به سمت روش فائو – پنمن – مانیتث، مدل رگرسیون خطی بین مقدار تبخیر و تعرق مرجع بین دو روش براساس داده‌های سه ایستگاه سینوپتیک بیجار، قروه و زرینه تعیین شد. پس از برآورد توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش هارگریوز – سامانی (که با کمک داده‌های دمای سطح زمین مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای صورت می‌گیرد)، در نهایت با اعمال مدل رگرسیونی مذکور توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع به روش فائو – پنمن – مانیتث برای کل محدوده مطالعاتی استخراج شد. مقادیر حداقل و حداکثر دمای هوا در مقیاس کل منطقه براساس داده‌های دمای سطح زمین مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای برآورد شد. براساس آن توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع به روش هارگریوز – سامانی برای محدوده مطالعاتی تهیه شد. سپس از مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه (MLR) و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان^۲ (SVM) جهت مدل‌سازی ارتباط بین دماهای سطح زمین برآوردشده توسط تصاویر ماهواره‌ای با پارامترهای دمای هوا (دمای حداقل و دمای حداکثر) استفاده شد. پس از استخراج مدل‌های مناسب، این مدل‌ها به کل منطقه مورد مطالعه تعمیم داده شدند. دوره زمانی مورد استفاده جهت بسط این مدل آماری، یک بازه زمانی پیوسته از سال ۲۰۰۲ (که تصاویر ماهواره‌ای از این سال به بعد در دسترس بودند) تا سال ۲۰۱۹ بود. در این مدل آماری، تمامی ۱۹ ایستگاه اقلیم‌شناسی، سینوپتیک و تبخیرسنجی مورد استفاده قرار گرفتند. سنجش عملکرد مدل‌ها براساس شاخص‌های آماری نظیر میانگین قدر مطلق خطا^۳ (MAE) و ضریب تعیین تعدیل‌شده^۴ (R^2_{Adjust}) با به‌کارگیری روش اعتبارسنجی متقابل^۵ انجام شد. در ادامه، با به‌کارگیری روش هارگریوز – سامانی توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع روزانه در منطقه مورد مطالعه براساس مقادیر روزانه دماهای حداقل و حداکثر مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای تهیه شد. سپس توزیع مکانی، مدل رگرسیون خطی به‌دست‌آمده بین روش هارگریوز – سامانی با مدل فائو – پنمن

⁴Adjusted Coefficient of Determination

⁵Cross validation

⁶Probabilistic Principal Component Analysis
Environment and Water Engineering

¹Multiple Linear Regression

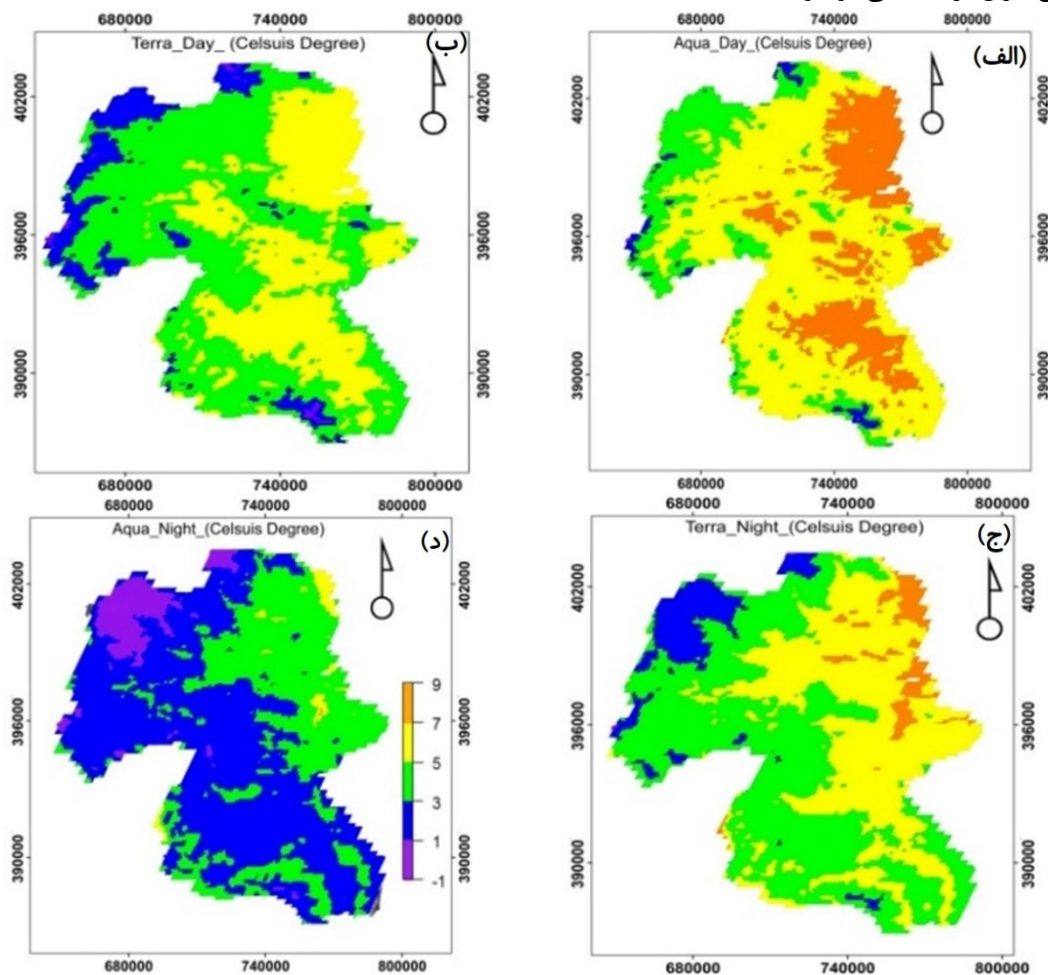
²Support Vector Machines

³Mean Absolute Error



توسط آن پایین تر می باشد. در شکل (۳) میانگین درازمدت تغییرات دمای سطح زمین در محدوده مطالعه طی دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۹ به تفکیک برای هر چهار حالت فوق نشان داده شده است. براساس این نقشه ها بالا بودن دماهای سطح زمین در طی روز و پایین تر بودن آن در طی شب در ماهواره Aqua در مقایسه با ماهواره Terra در بخش زیادی از منطقه مورد مطالعه قابل مشاهده است. وجود این تفاوت ها بین محصولات این دو ماهواره می تواند منجر به این شود که به هنگام مدل سازی دمای هوا براساس دمای سطح زمین، بخش های مختلفی از واریانس روابط منطقه ای بین دمای زمین و دمای هوا توسط این چهار محصول مختلف توجیه گردد. انتظار می رود که این امر سبب افزایش دقت معادلات حاصله گردد.

اساسی احتمالاتی ۵ (PPCA)، یک سری به هم پیوسته از مقادیر دمای سطح زمین در مقیاس روزانه طی دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۹ تهیه شد. مقادیر دمای سطح زمین شامل چهار مقدار در هر شبانه روز برای هر پیکسل (به ابعاد ۱۰۰۰ متر) بود که توسط سنجنده های MODIS که بر روی ماهواره های Aqua و Terra نصب شده اند برای کل منطقه مورد مطالعه استخراج شد. با توجه به اینکه ماهواره ها در حدود سه ساعت نسبت به همدیگر تأخیر زمانی دارند و ماهواره Aqua دیرتر به نواحی غربی ایران می رسد لذا دمایی که در طول روز توسط این ماهواره ثبت می شود به نسبت دمای ثبت شده توسط ماهواره Terra بالاتر است. همچنین برای دماهای شبانه، ماهواره Aqua به نسبت ماهواره Terra دیرتر به نواحی مرزی غربی ایران نزدیک می شود و طبیعتاً دمای ثبت شده



شکل ۳- نقشه میانگین درازمدت دمای سطح زمین در محدوده مطالعاتی برای چهار محصول مختلف سنجنده MODIS (الف) محصول Aqua در روز، (ب) محصول Aqua در شب، (ج) محصول Terra در روز، (د) محصول Terra در شب

Fig. 3 Map of long-term average of land surface temperature in the study area for four different products of MODIS sensor: a) Aqua product during the day, b) Aqua product during the night, c) Terra product during the day, d) Terra product during the night

۳-۲- توزیع مکانی دماهای حداقل و حداکثر هوا

به‌کارگیری مدل رگرسیون خطی چندگانه برابر با ۰/۷۷ و با به‌کارگیری مدل ماشین بردار پشتیبان برابر با ۰/۸۱ به دست آمد. بر اساس شاخص MAE نیز مدل ماشین بردار پشتیبان کارایی مناسب‌تری در مقایسه با مدل رگرسیون خطی چندگانه از خود نشان داد. از این‌رو مدل ماشین بردار پشتیبان به‌عنوان مدل مبنا برای تخمین دمای حداقل انتخاب شد. در رابطه با برآورد دمای حداکثر، ضریب تعیین تعدیل شده در مدل رگرسیون خطی چندگانه برابر با ۰/۹۲ و در مدل ماشین بردار پشتیبان برابر با ۰/۹۴ بوده است. Esmaeili et al. (2018b) در پژوهشی مشابه با این تحقیق، ضریب تعیین تعدیل شده برای برآورد دماهای حداکثر و حداقل را با به‌کارگیری مدل رگرسیون خطی چندگانه به‌ترتیب برابر با ۰/۹۵۶ و ۰/۸۷۲ گزارش کردند. با توجه به کارایی بالای هر دو مدل، به دلیل سادگی بیشتر، مدل رگرسیون خطی چندگانه به‌عنوان مدل مبنا جهت برآورد دمای حداکثر انتخاب شد.

برای هر دو مدل رگرسیون خطی چندگانه (MLR) و مدل غیرخطی مبتنی بر ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM)، دماهای چهارگانه سطح زمین به‌عنوان متغیرهای مستقل و دماهای حداکثر و حداقل هوا به‌عنوان متغیر وابسته انتخاب شدند. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد این مدل‌ها براساس روش اعتبارسنجی متقابل حاکی از آن بود که هر دو مدل فوق عملکرد نسبتاً مناسبی از خود نشان داده‌اند. جدول (۲) مقادیر ضریب تعیین تعدیل شده و شاخص میانگین قدر مطلق خطای (MAE) حاصل از به‌کارگیری این دو مدل جهت مدل‌سازی دمای حداکثر و دمای حداقل را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این جدول پیداست جهت برآورد دمای حداکثر، هر دو مدل از دقت بالاتری در مقایسه با دمای حداقل برخوردار بوده‌اند. در ارتباط با مقایسه دو مدل برای برآورد دمای حداقل هوا، ضریب تعیین تعدیل شده با

جدول ۲- عملکرد مدل‌های آماری در برآورد دماهای هوای حداقل و حداکثر

Table 2 Statistical models performance in estimation of Maximum and Minimum air temperatures

Model Type	Minimum Air Temperature		Maximum Air Temperature	
	R ² _{Adjust}	MAE (°C)	R ² _{Adjust}	MAE (°C)
SVM	0.81	2.65	0.94	2.03
MLR	0.77	2.91	0.92	2.24

دمای حداکثر به صورت رابطه (۱) به‌دست آمد.

مدل رگرسیون خطی چندگانه استخراج شده برای برآورد

$$T_{\max} = 0.222 \times TD + 0.302 \times TN + 0.142 \times AD + 0.191 \times AN - 226.190 \quad (1)$$

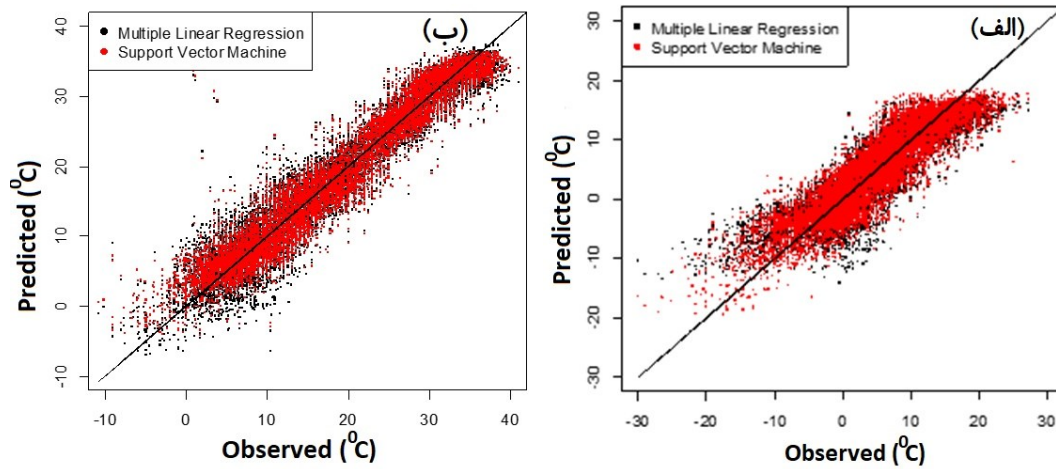
مدل‌سازی شده برای دمای حداکثر از وضعیت بهتری در مقایسه با دمای حداقل برخوردار بوده است.

با اعمال مدل‌های منتخب فوق، امکان برآورد توزیع مکانی دمای حداقل و دمای حداکثر جهت تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی روزانه آن‌ها فراهم گردید. در شکل (۵) نقشه مقادیر میانگین‌گیری شده دماهای حداقل و حداکثر هوا در پهنه محدوده مطالعاتی برای دو سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ آورده شده است. بیش‌ترین مقادیر دمای حداکثر در نواحی شمال شرقی حوضه و بخشی از قسمت میانی آن رخ داده است و کمترین مقادیر دما

که، T_{\max} دمای حداکثر برحسب °C و متغیرهای TD، TN، AD و AN به ترتیب دماهای سطح زمین مربوط به سنجنده Terra در طی روز، Terra در طی شب، Aqua در طی روز و Aqua در طی شب برحسب درجه کلوین (K) می‌باشند. شکل (۴) دیاگرام پراکنش مقادیر مشاهداتی و برآوردشده دمای حداکثر (با به‌کارگیری مدل رگرسیون خطی چندگانه) و دمای حداقل (با به‌کارگیری مدل ماشین بردار پشتیبان) را برای مجموعه کل ایستگاه‌های مورد مطالعه طی دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۹ نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود تطابق بین مقادیر مشاهداتی و

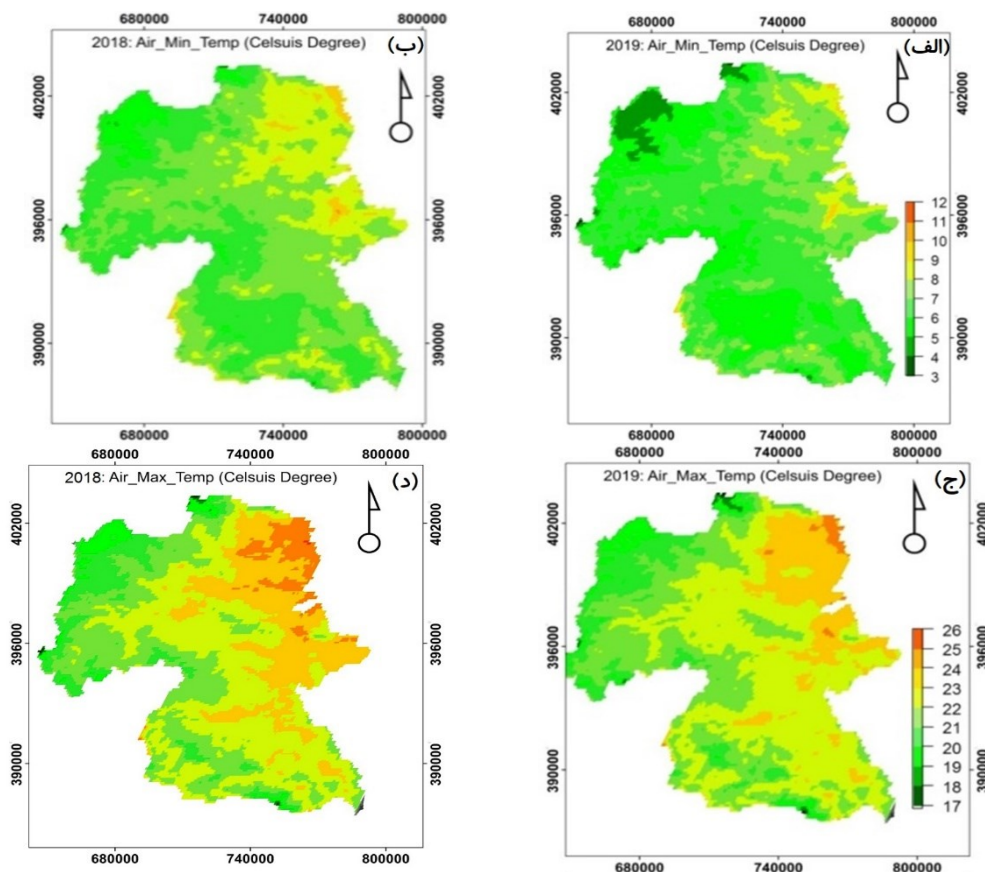


حداقل نیز در کوهستان‌های جنوبی و شمال و شمال غربی حوضه رخ داده است.



شکل ۴- دیاگرام پراکنش مقادیر مشاهداتی و برآوردشده دماهای حداقل و حداکثر در محدوده مطالعاتی طی دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۹ (الف) دمای حداقل، (ب) دمای حداکثر

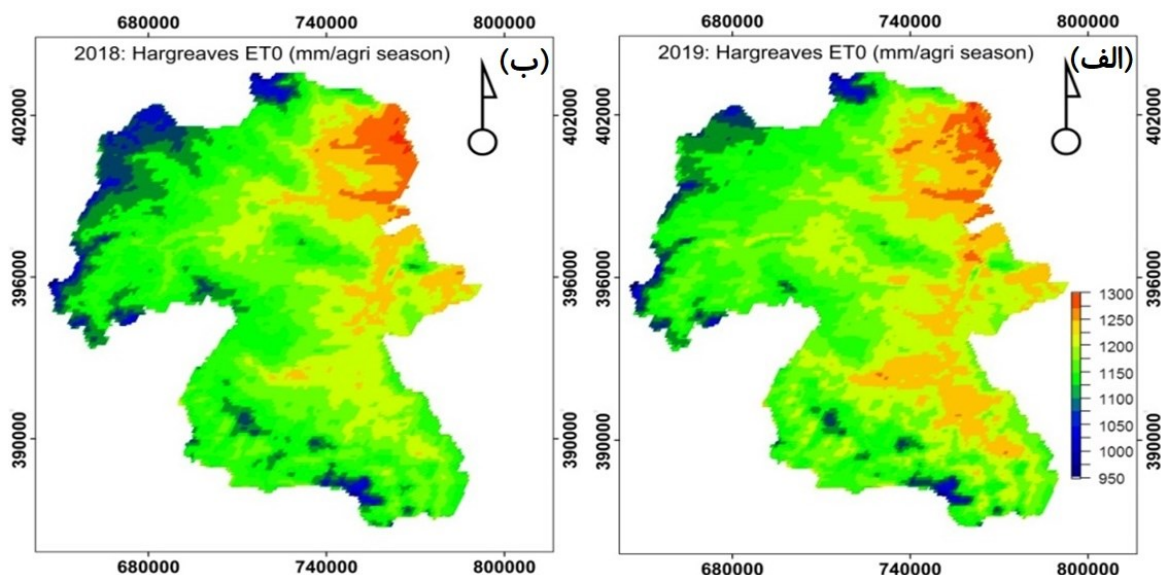
Fig. 4 Scatter diagram of observed and estimated values of diurnal minimum and maximum air temperatures in the study area during the 2002 to 2019: a) minimum temperature, b) maximum temperature



شکل ۵- توزیع مکانی میانگین دماهای حداقل و حداکثر هوا در منطقه مورد مطالعه: (الف) دمای حداقل در سال ۲۰۱۹، (ب) دمای حداقل در سال ۲۰۱۸، (ج) دمای حداکثر در سال ۲۰۱۹، (د) دمای حداکثر در سال ۲۰۱۸

Fig. 5 Spatial distribution of minimum and maximum air temperatures in the study area: a) minimum temperature at 2019, b) minimum temperature at 2018, c) maximum temperature at 2019, d) maximum temperature at 2018

به پهنه‌بندی جمع سالانه تبخیر و تعرق مرجع در محدوده مطالعاتی به‌عنوان نمونه برای دو سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ است نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل پیداست تبخیر و تعرق مرجع سالانه در منطقه مورد مطالعه در دامنه‌ای مابین ۹۵۰ تا ۱۳۰۰ mm در نوسان بوده است. الگوی کلی توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع در دو سال مذکور هم تا حدودی مشابه با هم بوده است.



شکل ۶- نقشه جمع سالانه تبخیر و تعرق مرجع در محدوده مطالعاتی با استفاده از روش هارگریوز برای دو سال (الف) ۲۰۱۹، (ب) ۲۰۱۸

Fig. 6 Map of the total amount of annual reference evapotranspiration in the study area using the Hargreaves method during: a) 2019, b) 2018

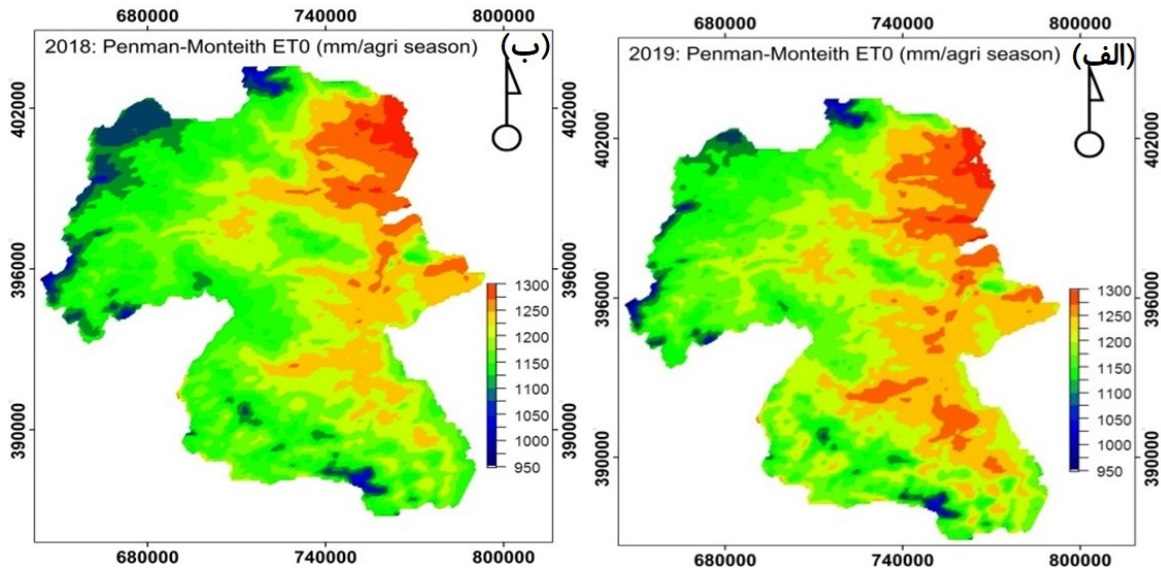
با اعمال اعتبارسنجی مدل که با روش اعتبارسنجی متقابل انجام شد ضریب تعیین تعدیل شده برای مدل رگرسیون خطی فوق برابر با ۰/۸۸۷ به دست آمد. با اعمال مدل رگرسیونی فوق به نقشه‌های پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع حاصل از روش هارگریوز، نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع در محدوده مطالعاتی به روش فائو - پنمن - مانتیت استخراج شد. در شکل (۷) نتایج حاصله که مربوط به پهنه‌بندی جمع سالانه تبخیر و تعرق مرجع در محدوده مطالعاتی به‌عنوان نمونه برای دو سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ به روش فائو-پنمن-مانتیت است نشان داده شده است. دیده می‌شود که بین نقشه‌های تبخیر و تعرق مرجع به دو روش فائو - پنمن - مانتیت و هارگریوز - سامانی وجه اشتراک‌های زیادی دیده می‌شود.

۳-۳- توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع

پس از استخراج نقشه‌های پهنه‌بندی مقادیر روزانه دماهای هوای حداقل و حداکثر، با جاگذاری دماهای حداکثر و حداقل برآورده شده فوق در فرمول محاسبه تبخیر و تعرق به روش هارگریوز، اقدام به استخراج نقشه‌های پهنه‌بندی مقادیر روزانه تبخیر و تعرق مرجع شد. در شکل (۶) نتایج حاصله که مربوط

پس از برآورد توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس منطقه‌ای به روش هارگریوز، به جهت بهبود دقت برآورد مکانی تبخیر و تعرق مرجع در منطقه مورد مطالعه، ابتدا مدل رگرسیون خطی بین دو مدل هارگریوز - سامانی و فائو - پنمن - مانتیت براساس داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک استخراج شد. سپس این مدل به کل منطقه مورد مطالعه تعمیم داده شد تا توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع برای کل منطقه به روش فائو - پنمن - مانتیت برآورد و استخراج گردد. مدل رگرسیون خطی بین میزان تبخیر و تعرق مرجع روزانه به روش هارگریوز (ET₀-Hargreaves) به‌عنوان متغیر مستقل و روش فائو - پنمن - مانتیت (ET₀-Penman) به‌عنوان متغیر وابسته به صورت زیر استخراج شد.

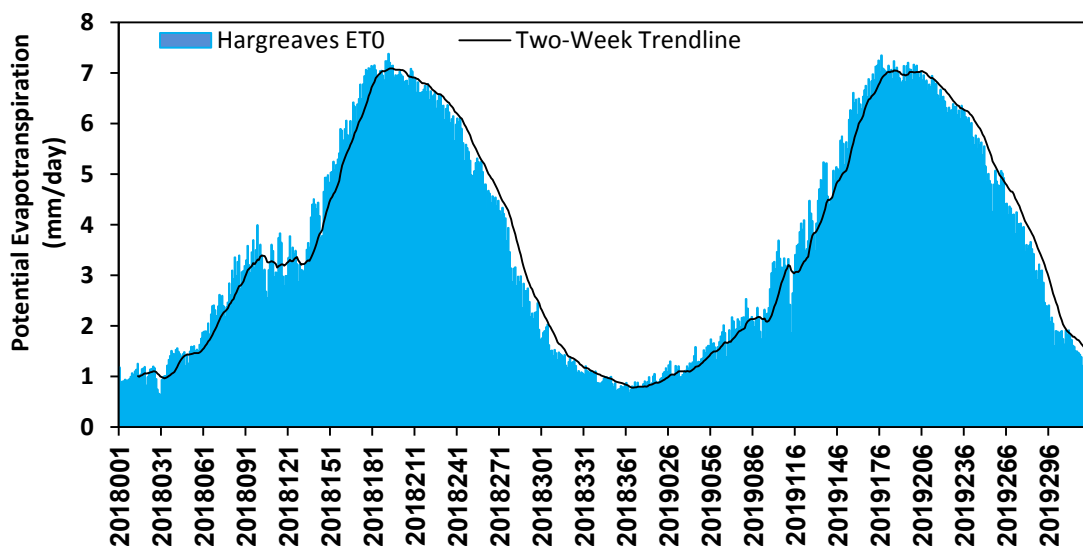
$$ET_{Penman} = 1.02 \times ET_{Hargreaves} - 0.0125 \quad (2)$$



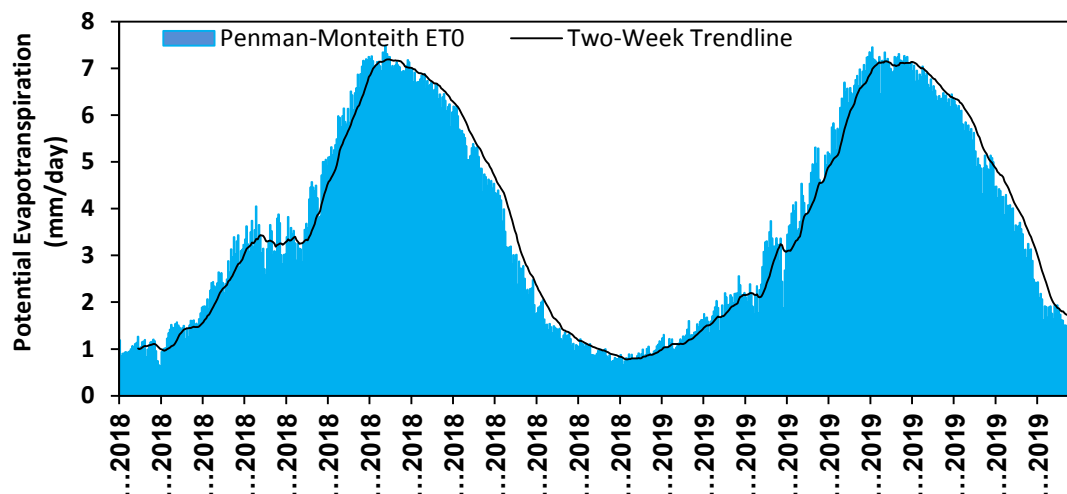
شکل ۷- نقشه جمع سالانه تبخیر و تعرق مرجع در محدوده مطالعاتی با روش فائو-پنمن-مانتیت برای دو سال (الف) ۲۰۱۹، (ب) ۲۰۱۸
 Fig. 7 Map of the total amount of annual reference evapotranspiration in the study area using the FAO-Penman-Monteith method during: a) 2019, b) 2018

روزانه به هر دو روش روند نسبتاً مشابهی داشته است به گونه‌ای که در هر دو سال ۲۰۱۹ و ۲۰۱۸ در فصل زمستان تبخیر و تعرق مرجع کم‌ترین مقدار را دارا بوده است. طی فصل بهار روند صعودی به خود گرفته و در فصل تابستان به اوج خود رسیده است که در حالت اوج خود، مقدار آن حدود ۷ mm/day بوده است. سپس روند نزولی به خود گرفته و این روند نزولی تا انتهای فصل پاییز ادامه داشته است.

در شکل‌های (۸) و (۹) نیز روند تغییرات روزانه میانگین تبخیر و تعرق مرجع در کل منطقه مورد مطالعه به دو روش هارگریوز - سامانی و فائو - پنمن - مانیتیت برای سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۱۸ که براساس نقشه‌های پهنه‌بندی شکل‌های (۶) و (۷) استخراج شده‌اند نشان داده شده است. دیده می‌شود که روند کلی تغییرات روزانه تبخیر و تعرق مرجع



شکل ۸- تغییرات میانگین تبخیر و تعرق مرجع در کل محدوده مطالعاتی با استفاده از روش هارگریوز برای سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۱۸
 Fig. 8 variations of the averaged reference evapotranspiration in the study area using the Hargreaves method during 2018 and 2019



شکل ۹- تغییرات میانگین تبخیر و تعرق مرجع در کل محدوده مطالعاتی با استفاده از روش فائو-پنمن-مانتیت برای سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹

Fig. 9 variations of the averaged reference evapotranspiration in the study area using the FAO-Penman-Monteith method during 2018 and 2019

استفاده شد. نتایج کلی حاصل از این پژوهش به شرح زیر قابل جمع‌بندی و ارائه است:

۱- امکان برآورد دماهای حداقل و حداکثر با دقتی مناسب در مقیاس روزانه براساس دماهای سطح زمین حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و به‌کارگیری مدل‌سازی، وجود دارد.

۲- با جاگذاری دماهای حداقل و حداکثر استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع را می‌توان با دقت مناسب تهیه کرد.

۳- میزان تبخیر و تعرق مرجع به هنگام حرکت از غرب به سمت شرق حوزه آبخیز سفیدرود، حاکی از وجود یک روند کلی رو به افزایش است.

سپاسگزاری

این پژوهش در قالب یک طرح تحقیقاتی به شماره قرارداد ۹۸/۱۴۰/۷۷۹۳ با شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان به انجام رسیده است. بدین‌وسیله از مساعدت‌های معاونت محترم برنامه‌ریزی شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های این پژوهش از شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان اخذ شده است که با توجه به قرارداد شماره ۹۸/۱۴۰/۷۷۹۳ بعد از اخذ مجوز از شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان قابل‌ارائه می‌باشد.

توزیع کلی تبخیر و تعرق مرجع در منطقه مورد مطالعه حاکی از آن است که در حالت کلی میزان تبخیر و تعرق مرجع طی هر دو سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ به هنگام حرکت از غرب به سمت شرق منطقه یک روند رو به افزایش داشته است. بیش‌ترین مقادیر تبخیر و تعرق مرجع در منطقه مورد مطالعه در نوار شرقی و شمال شرقی منطقه مورد مطالعه رخ داده است. روند تغییرات تبخیر و تعرق در منطقه با نتایج پژوهش‌های (Rezaei Banafsheh et al. (2014) کاملاً منطبق بوده به طوری که در شهرستان بیجار واقع در شمال شرق حوضه، بیش‌ترین تبخیر و تعرق رخ داده است. این درحالی است که دقیقاً در ارتفاعات کوهستانی دیواندره واقع در شمال غرب حوضه کمترین میزان تبخیر و تعرق پتانسیل برآورد شده است. همچنین با توجه نتایج حاصل شده می‌توان نتیجه گرفت که در هر دو سال بررسی شده، میزان تبخیر و تعرق در دشت قروه واقع در بخش جنوب شرقی حوزه آبخیز به دلیل وجود کشت محصولات زراعی آبی و همچنین شرایط توپوگرافی، مقدار تبخیر و تعرق افزایش یافته است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از دمای سطح زمین مستخرج از سنجنده MODIS جهت برآورد دماهای حداقل و حداکثر و در پی آن جهت برآورد توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع در آن بخش از حوضه سفیدرود که در استان کردستان واقع شده است

References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper FAO56, 300 P.
- Benali, A., Carvalho, A., Nunes, J., Carvalhais, N. and Santos, A. (2012). Estimating air surface temperature in Portugal using MODIS LST data. *J. Remote Sens. Environ.*, 124, 108–121.
- Chatzithomas, C. D. and Alexandris, S.G. (2015). Solar radiation and relative humidity based, empirical method, to estimate hourly reference evapotranspiration. *J. Agri. Water Manag.*, 152, 188–197.
- Chuan, Z. L., Deni, S. M., Fam, S. F. and Ismail, N. (2020). The Effectiveness of a probabilistic principal component analysis model and expectation maximization algorithm in treating missing daily rainfall data. *Asia-Pac. J. Atmospheric Sci.*, 56(1), 119-129.
- Dimitriadou, S. and Nikolakopoulos, K. G. (2021). Reference evapotranspiration (ET_o) methods implemented as ArcMap models with remote-sensed and ground-based inputs, examined along with MODIS ET, for Peloponnese, Greece. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 10, 390. <https://doi.org/10.3390/ijgi10060390>
- Esmaili, S., Khoshkhoo, Y., Babaei, K. and Asadi Oskouei, E. (2018a). Estimating rice actual evapotranspiration using METRIC algorithm in a part of the North of Iran. *J. Soil Water Conserv.* 24(6), 105-122 [In Persian].
- Firouzi Nezamabadi, F. and Kaviani, A. (2015). Introduction of energy balance algorithms to calculate the actual evapotranspiration using remote sensing techniques. The 1st Int. Conference on Earth Space and Clean Energy, Ardebil, Iran [In Persian].
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *J. Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99.
- Esmaili, S. Khoshkhoo, Y. and Abdollahi, M. (2018b). Estimating daily and monthly air temperature parameters at Kurdistan province using MODIS sensor images. *J. Soil Water Res.*, 49(2), 413-423 [In Persian].
- Kitsara, G., Papaioannou, G., Retalis, A., Paronis, D. and Kerkides, P. (2018). Estimation of air temperature and reference evapotranspiration using MODIS land surface temperature over Greece, *Int. J. Remote Sens.* 39(3), 924-948, DOI: 10.1080/01431161.2017.1395965.
- Li, Z. L., Tang, R. L., Wan, Z. M., Bi, Y. Y., Zhou, C. H., Tang, B. H. and Zhang, X. Y. (2009). A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. *J. Sens.* 9(5), 3801-3853.
- Lin, S., Moore, N. J., Messina, J. P., DeVisser, M. H. and Wu, J. (2012). Evaluation of estimating daily maximum and minimum air temperature with MODIS data in east Africa. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 18, 128-140.
- Liu, H., Zhang, R. and Li, Y. (2014). Sensitivity analysis of reference evapotranspiration (ET_o) to climate change in Beijing, China. *J. Desal. Water Treat.* 52(13), 2799-2804.
- Liu, Z., Ballantyne, A. P. and Cooper, L.A. (2019). Biophysical feedback of global forest fires on surface temperature. *Nat. Commun.*, 10.
- Maeda, E. E., Wiberg, D. A. and Pellikka, P. K. (2011). Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. *J. Appl. Geogr.* 31(1), 251-258.
- Mildrexler, D. J., Zhao, M. and Running, S. W. (2011). A global comparison between station air temperatures and MODIS and surface temperatures reveals the cooling role of forests. *J. Geophys. Res.*, 116, 1–15.
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M. and Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO 56: Past and future. *J. Agri. Water Manag.*, 147, 4–20.
- Rezaei Banafsheh, M., Jahanbakhsh, S. and Valizadeh Kerman, Kh. (2014). Estimation of actual evapotranspiration in Sefidrud basin using satellite image processing. *J. Geographical Space.* 13(44), 241-262 [In Persian].
- Shen, S. and Leptoukh, G. G. (2011). Estimation of surface air temperature over central and



- eastern Eurasia from MODIS land surface temperature. *J. Environ. Res. Let.*, 6, 1-8.
- Urban, M., Eberle, J., Huttich, C., Schmullius, C. and Herold, M. (2013). Comparison of satellite-derived land surface temperature and air temperature from meteorological stations on the Pan-Arctic scale. *J. Remote Sens.* 5, 2348–2367.
- Yarahmad, J. and Rahimikhoob, A. (2014). Adjustment of Hargreaves equation by replacing land surface temperature instead of air temperature for estimating reference crop evapotranspiration. *J. Soil Water Conserv.*, 21(6) 239-254 [In Persian].
- Zhu, W., Lu, A. and Jia, S. (2013). Estimation of daily maximum and minimum air temperature using MODIS land surface temperature products. *J. Remote Sens. Environ.*, 130, 62 – 73.



Research Paper

Application of Land Surface Temperature Extracted from Satellite Images for Zoning Reference Evapotranspiration

Younes Khoshkhoo¹ and Saman Nikmehr^{1*}

¹Assist. Professor. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Corresponding author: s.nikmehr@uok.ac.ir

Received: July 01, 2021

Revised: July 22, 2021

Accepted: August 04, 2021

Abstract

Reference evapotranspiration is one the most important climatic parameters to determine crop water requirement, climatic and hydrological studies and water resources management. The aim of this study was spatial estimating and zoning of reference evapotranspiration using the MODIS sensor images performed for Sefidroud basin. For this purpose, among the MODIS sensor products, Land Surface Temperature was selected and based on that, daily values of maximum and minimum air temperatures were modeled for studied area using Multiple Linear Regression and non-linear model of Support Vector Machines-based. Then, map of reference evapotranspiration zoning was prepared for studied area using Hargreaves-Samani method. Afterwards, by developing a linear regression model, the extracted reference evapotranspiration from Hargreaves-Samani method was converted to the FAO-Penman-Monteith method and based on that, map of reference evapotranspiration zoning on the basis of the FAO-Penman-Monteith method was extracted for the study area. Based on performed analyses, Support Vector Machine and Multiple Linear Regression models were selected to model minimum and maximum air temperatures, respectively and by applying cross validation method, the adjusted coefficient of determination for these models obtained was 0.81 and 0.92. The results showed that it is possible to make spatial estimation of reference evapotranspiration with an appropriate accuracy by considering an algorithm on the basis of combining satellite-based Land Surface Temperatures and statistical models. Zoning of reference evapotranspiration for any region can be extracted by only having some meteorological data in few point stations and by utilization from the satellite-extracted Land Surface Temperatures.

Key words: FAO-Penman-Monteith; Regression Model; Remote Sensing; Water Requirement

