



دانشگاه گوارن و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و چهارم، شماره ششم، ۱۳۹۶

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2017.12528.2723

## برآورد تبخیر و تعرق واقعی محصول برنج با به‌کارگیری الگوریتم METRIC در بخشی از شمال ایران

سرور اسمعیلی<sup>۱</sup>، \* یونس خوشخو<sup>۲</sup>، خالد بابایی<sup>۳</sup> و ابراهیم اسعدی اسکویی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه کردستان، استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه کردستان،

<sup>۲</sup>کارشناس ارشد اداره آب منطقه‌ای استان کردستان، <sup>۳</sup>رییس اداره هواشناسی کشاورزی، سازمان هواشناسی کشور

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۹

### چکیده

**سابقه و هدف:** با توجه به این‌که کمبود منابع آب در سال‌های اخیر در کشور ایران به چالش عمده‌ای تبدیل شده است و در این میان، بیش‌ترین مصرف آب در بخش کشاورزی و مربوط به پدیده تبخیر و تعرق است مدیریت بهینه و پایدار منابع آب مستلزم شناخت و برآورد صحیح تبخیر و تعرق می‌باشد. در بین روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق، تکنیک سنجش از دور به دلیل پوشش مکانی و زمانی مناسب، گزینه مناسبی برای برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس منطقه‌ای است و با استفاده از این تکنیک می‌توان تبخیر و تعرق یک منطقه را بدون نیاز به دانستن پیشینه‌ای از وضعیت خاک، محصول و نحوه مدیریت مزرعه با دقت مناسب برآورد کرد. از بین الگوریتم‌های گوناگون ارائه شده مبتنی بر سنجش از دور، در این پژوهش از الگوریتم نسبتاً جدید متریک جهت برآورد تبخیر و تعرق محصول برنج در شهرستان رشت استفاده شد.

**مواد و روش‌ها:** جهت برآورد تبخیر و تعرق محصول برنج در شهرستان رشت، از داده‌های هواشناسی ایستگاه هواشناسی کشاورزی رشت که شامل متغیرهای دمای هوا، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، بارندگی و سرعت باد در مقیاس زمانی ۳ ساعته برای ۸ روز بدون ابر در مردادماه ۱۳۹۳، تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس و داده‌های لایسِمتری استفاده شد و با استفاده از داده‌ها و تصاویر مذکور و با به‌کارگیری الگوریتم مبتنی بر بیلان انرژی متریک، مقدار تبخیر و تعرق روزانه محصول برنج برآورد گردید و جهت اعتبارسنجی نتایج حاصل از الگوریتم متریک، از داده‌های لایسِمتری اندازه‌گیری شده در شالیزار مؤسسه تحقیقات برنج رشت که در فصل تابستان سال ۱۳۹۳ در شالیزار کار گذاشته شده‌اند استفاده شد.

**یافته‌ها:** نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با پیاده‌سازی الگوریتم متریک با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس می‌توان مقدار تبخیر و تعرق واقعی محصول برنج را در مقیاس روزانه با دقت قابل‌قبولی برآورد نمود. مقایسه مقادیر برآورد شده تبخیر و تعرق محصول برنج توسط الگوریتم متریک با مقادیر اندازه‌گیری شده لایسِمتری نشان داد که مقادیر شاخص‌های MAE، RMSE و MBE به ترتیب برابر با ۱/۲۱، ۱/۱۴ و ۱/۱۷- میلی‌متر در روز به دست آمد که

\* مسئول مکاتبه: [y.khoshkho@uok.ac.ir](mailto:y.khoshkho@uok.ac.ir)

نشان‌دهنده دقت قابل قبول الگوریتم متریک جهت برآورد تبخیر و تعرق روزانه محصول برنج است اما در حالت کلی، این الگوریتم تمایل به کم‌برآورد کردن مقدار تبخیر و تعرق محصول برنج دارد به گونه‌ای که میانگین مقادیر تبخیر و تعرق در ۸ روز مورد مطالعه با استفاده از داده‌های لایسیمیتری و الگوریتم متریک به ترتیب ۹/۲ و ۸ میلی‌متر در روز به دست آمد.

**نتیجه‌گیری:** به‌طور کلی استفاده از تکنیک سنجش از دور و الگوریتم متریک و تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان روشی جدید جهت برآورد تبخیر و تعرق دارای دقت قابل قبول و مناسبی است و منشأ وجود اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی و همچنین کم‌برآورد کردن الگوریتم متریک را می‌توان به عواملی از جمله پایین بودن قدرت تفکیک مکانی تصاویر مودیس و نحوه انتخاب پیکسل‌های گرم و سرد در این الگوریتم نسبت داد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم متریک، تبخیر و تعرق، سنجنده مودیس، شالیزار برنج، شمال ایران

### مقدمه

نمی‌توانند بیانگر تغییرات تبخیر و تعرق در ابعاد وسیع و در مقیاس منطقه‌ای باشند. وجود چنین محدودیتی باعث ایجاد انگیزه در استفاده از تکنیک سنجش از دور و به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای برای تعیین تبخیر و تعرق در سطوح وسیع گردیده است (۸). تصاویر ماهواره‌ای ابزاری عالی برای تهیه نقشه‌های مکانی و زمانی تبخیر و تعرق واقعی و در نتیجه ارتقاء مدیریت منابع آب در مناطق وسیع به حساب می‌آیند (۱۷). همچنین با استفاده از تکنیک سنجش از دور می‌توان تبخیر و تعرق یک منطقه را بدون نیاز به دانستن پیشینه‌ای از وضعیت خاک، محصول و نحوه مدیریت مزرعه با دقت بالا برآورد کرد (۵). الگوریتم‌های مبتنی بر تکنیک سنجش از دور متعددی برای برآورد تبخیر و تعرق ارائه شده‌اند. یکی از الگوریتم‌های نسبتاً جدید و کاربردی مبتنی بر سنجش از دور جهت برآورد میزان تبخیر و تعرق که بر پایه مفهوم بیلان انرژی در سطح بنا نهاده شده است الگوریتم متریک (METRIC) (به‌دست آوردن تبخیر و تعرق با قدرت تفکیک مکانی بالا با کالیبراسیون داخلی) می‌باشد که توسط آلن و همکاران در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است و با حداقل استفاده از داده‌های

بدون شک موضوع آب و آبیاری به‌عنوان اصلی‌ترین مسأله در بخش کشاورزی در کشور ما و بسیاری از نقاط خشک و نیمه‌خشک جهان مطرح است. استفاده بهینه از آب و یا مصرف آب براساس نیاز آبی گیاهان، ابزاری سودمند برای جلوگیری از هدررفت آب می‌باشد. تبخیر و تعرق یکی از مؤلفه‌های اصلی بیلان آبی هر منطقه و از مهم‌ترین عوامل کلیدی برای برنامه‌ریزی درست و مناسب آبیاری برای بهبود راندمان آب مصرفی در اراضی فاریاب است (۱۱) و برآورد آن یکی از گام‌های اصلی برای طراحی، مدیریت و برنامه‌ریزی سیستم‌های آبیاری و سایر سیستم‌های توزیع و کاربرد آب، اجرای مدل‌های هیدرولوژیکی و آگروهیدرولوژیکی، انجام مطالعات اقلیمی و مطالعات مربوط به بیلان آبی و زیست‌محیطی در یک منطقه است. روش‌ها و تکنیک‌های متعددی برای تعیین میزان تبخیر و تعرق ارائه شده‌اند که در زمره مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان از اندازه‌گیری مستقیم به روش لایسیمیتری، روش‌های مبتنی بر داده‌های هواشناسی و روش‌های متکی بر تکنیک سنجش از دور نام برد. استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی جهت تعیین تبخیر و تعرق اگرچه دارای دقت نسبتاً بالا در مقیاس نقطه‌ای هستند اما

زمینی، میزان تبخیر و تعرق را در مقیاس‌های زمانی لحظه‌ای، روزانه و فصلی محاسبه می‌کند (۱). پایه و اساس این روش را ارتباط بین تشعشعات دریافتی توسط ماهواره‌ها از سطح زمین در باندهای مرئی و مادون قرمز حرارتی و همچنین تفاوت هیدرولوژیکی سطوح زمین تشکیل می‌دهد. آلبیدی سطح، دمای سطح و شاخص پوشش گیاهی مؤلفه‌های کلیدی در این الگوریتم هستند که به وسیله داده‌های ماهواره‌ای چندطیفی قابل برآورد هستند و با به‌کارگیری برخی اطلاعات هواشناسی از جمله دمای هوا، طول ساعات آفتابی، سرعت باد، فشار بخار اشباع، رطوبت خاک و محاسبه شارهای انرژی، میزان تبخیر و تعرق تعیین می‌گردد. این مدل بسیار قوی بر استفاده از روابط تئوری و فیزیکی تکیه دارد و نیازی به نقشه کاربری اراضی ندارد و در صورت فقدان آن نیز می‌توان به اجرای الگوریتم پرداخت (۱). تاکنون مطالعاتی گوناگونی در سطح جهانی و داخلی در خصوص به‌کارگیری الگوریتم‌های مختلف مبتنی بر سنجش از دور جهت برآورد تبخیر و تعرق صورت گرفته است. چاوز و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست (LANDSAT) و با به‌کارگیری دو الگوریتم سنجش از دوری متریک و سبال (SEBAL) جهت برآورد تبخیر و تعرق روزانه گیاه یونجه در شرق کلرادو، به مقایسه نتایج حاصل از این دو مدل با داده‌های لایسمتری پرداختند و نتیجه گرفتند که خطای حاصل از به‌کارگیری الگوریتم متریک نسبت به الگوریتم سبال کم‌تر است (۶). مختاری و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست و الگوریتم متریک مقدار تبخیر و تعرق روزانه یک باغ پسته در شهرستان یزد را برآورد و مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که این الگوریتم نسبت به پارامترهای دمای سطح، شاخص NDVI و شار گرمای محسوس بسیار حساس است و چنین گزارش کردند که برآورد تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از الگوریتم متریک وابسته به

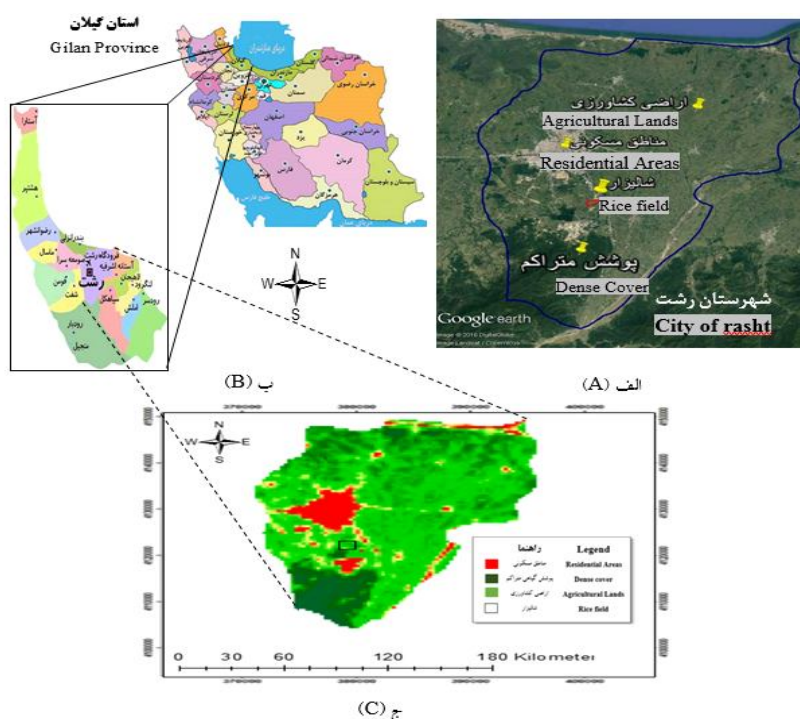
دقت برآورد سه پارامتر مذکور است (۱۶). پوکس و همکاران (۲۰۱۴) طی پژوهشی با به‌کارگیری تصاویر ماهواره لندست و الگوریتم متریک در یک بازه زمانی دوساله برای یک باغ زیتون و مقایسه نتایج حاصله با داده‌های مشاهداتی تبخیر و تعرق، دقت مناسب این الگوریتم را گزارش کردند (۲۰). لیاقت و همکاران (۲۰۱۵) با به‌کارگیری مدل متریک جهت برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره لندست در چهار منطقه مطالعاتی مختلف در شمال شرقی آسیا، پارامترهای معادله بیلان انرژی شامل تابش خالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس را برای تمام مناطق مطالعاتی مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که میزان خطای ناشی از به‌کارگیری این مدل جهت برآورد پارامترهای مذکور بسیار کم است. در ادامه نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان داد که انتخاب پیکسل سرد و گرم تأثیر به‌سزایی بر میزان دقت مدل متریک جهت برآورد تبخیر و تعرق دارد (۱۴). لیان و همکاران (۲۰۱۶) مقدار تبخیر و تعرق حاصل از سه روش SSEB، متریک و TS-VI را مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که الگوریتم متریک نسبت به دو روش دیگر دقت بالاتری در برآورد تبخیر و تعرق دارد. ایشان دقت نتایج حاصل از الگوریتم متریک را وابسته به انتخاب دقیق پیکسل‌های گرم و سرد دانستند (۱۲). در ایران نیز امیدوار و همکاران (۱۳۹۱) کارایی مدل متریک را در برآورد تبخیر و تعرق واقعی با به‌کارگیری تصاویر ماهواره آستر مورد بررسی قرار دادند و مدل متریک را مدلی مناسب جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس محلی معرفی کردند (۱۸). باقری‌هارونی و همکاران (۱۳۹۱) طی پژوهشی مدل‌های تک‌منبعی سبال و متریک، مدل‌های دومنبعی (STSEB) و TSEB و مدل تک‌منبعی - دومنبعی (SETEB) را جهت برآورد تبخیر و تعرق با به‌کارگیری تصاویر سنجنده مودیس مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج

به سابقه نسبتاً کم یک دهه پژوهش در این زمینه، هنوز این ضرورت احساس می‌شود که پژوهش‌های نوینی تحت شرایط متنوع‌تر اقلیمی و گیاهی به انجام برسد. بر این اساس، در این تحقیق قابلیت به‌کارگیری الگوریتم متریک در یک اقلیم مرطوب و برای محصول برنج مورد بررسی قرار گرفته است.

### مواد و روش‌ها

**معرفی منطقه مورد مطالعه:** محدوده مورد مطالعه شهرستان رشت با مساحت ۱۸۰ کیلومتر مربع است که در عرض‌های جغرافیایی  $37^{\circ} 37'$  تا  $37^{\circ} 27'$  شمالی و طول‌های جغرافیایی  $48^{\circ} 35'$  تا  $49^{\circ} 33'$  شرقی واقع شده است. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ ارائه شده است.

حاصله را با داده‌های لایسیمیتری مقایسه کردند. نتایج بیانگر عملکرد منطقی و قابل قبول کل مدل‌ها بود اما به لحاظ مقایسه‌ای، مدل SETEB و TSEB به ترتیب بهترین و بدترین عملکرد را از خود نشان دادند و مدل‌های سبال و متریک هم با وجود این‌که از فرضیات پیچیده بهره نگرفته بودند اما نتایج مطلوبی ارائه و برای سطوح وسیع مناسب تشخیص داده شدند (۴). قربانی و همکاران (۱۳۹۳) با به‌کارگیری دو مدل سبال و متریک در محدوده شهرستان ملایر، شارهای سطحی و مقدار تبخیر و تعرق واقعی را برآورد کردند. نتایج کلی نشان داد که هر دو مدل می‌توانند مقدار تبخیر و تعرق واقعی را متناسب با توزیع مکانی منطبق با شرایط توپوگرافیکی و پوشش گیاهی شهرستان برآورد نمایند (۹). اگرچه پژوهش‌های متعددی در ارتباط با برآورد مقدار تبخیر و تعرق با به‌کارگیری الگوریتم متریک انجام شده‌اند اما با توجه



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی (الف) تصویر ماهواره‌ای منطقه (ب) موقعیت منطقه در کشور (ج) کاربری‌های مختلف منطقه مورد مطالعه.  
 Figure 1. Geographical location (A), Satellite image area (B) Location in the country (C) Land uses of the study area.

وقت گرینویچ است. از میان سنجنده‌های مختلف موجود، انتخاب تصاویر سنجنده مودیس که دارای قدرت تفکیک زمانی روزانه هستند بر این مبنا بوده است که از یک سو بازه زمانی داده‌های لایسمتری اندازه‌گیری شده، بازه نسبتاً کوتاهی بوده (از ۱۳۹۳/۴/۳ تا ۱۳۹۳/۵/۲۵) و از سوی دیگر تحت شرایط اقلیم منطقه رشت در فصل تابستان، تعداد روزهای ابری نسبتاً زیاد است به گونه‌ای که در بازه زمانی موردنظر، فقط ۸ روز دارای تصویر بدون ابر و مناسب برای انجام پژوهش بودند. مشخصات تصاویر مورد استفاده (در مجموع ۸ تصویر بدون ابر) در جدول ۱ آورده شده است. تصاویر ذکر شده از مجموعه محصولات Level 1B سنجنده مودیس هستند که مشخصات جغرافیایی و زمین مرجع شدن به آن‌ها ضمیمه شده است (۱۰).

داده‌های مورد استفاده: داده‌های مورد استفاده جهت انجام این بخش از پژوهش شامل داده‌های هواشناسی، داده‌های لایسمتری و تصاویر ماهواره‌ای هستند. داده‌های هواشناسی مورد استفاده شامل متغیرهای دمای هوا، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، بارندگی و سرعت باد در مقیاس زمانی ۳ ساعته در روزهای اخذ تصویر هستند که از ایستگاه هواشناسی کشاورزی رشت واقع در ۳۷° ۳۷' عرض شمالی و ۴۹° ۳۹' طول شرقی تهیه شدند. جهت اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل متریک، از داده‌های لایسمتری اندازه‌گیری شده در شالیزار مؤسسه تحقیقات برنج رشت که در فصل تابستان سال ۱۳۹۳ در شالیزار کار گذاشته شده‌اند استفاده شد (۳). تصاویر ماهواره‌ای به کار گرفته شده برای انجام این پژوهش، تصاویر سنجنده مودیس بر روی ماهواره ترا (Terra) است که زمان عبور آن از روی منطقه مورد مطالعه حدود ساعت ۷:۳۰ صبح به

جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده.

Table 1. Characteristics of the used satellite images.

ردیف Number	تاریخ تصویر Image Date	ساعت تصویربرداری (گرینویچ) Imaging hours (Greenwich)	ساعت تصویربرداری (وقت محلی) Imaging hours (Local Time)
1	1393/05/01	7:35	12:05
2	1393/05/03	7:25	11:05
3	1393/05/05	7:10	11:40
4	1393/05/14	7:05	11:35
5	1393/05/15	7:50	12:20
6	1393/05/17	7:35	12:05
7	1393/05/19	7:25	11:55
8	1393/05/21	7:10	11:40

تبخیر و تعرق به‌عنوان باقی‌مانده‌ای از معادله بیلان انرژی در سطح زیر محاسبه می‌شود:

الگوریتم بیلان انرژی متریک: همان‌گونه که ذکر شد الگوریتم متریک، یک الگوریتم مبتنی بر بیلان انرژی در سطح است و در آن، انرژی مصرف شده توسط

که از طریق فرایند هدایت، صرف گرم کردن اعماق خاک می‌شود. برای محاسبه شار گرمای خاک (G) ابتدا نسبت  $\frac{G}{R_n}$  با استفاده از معادله تجربی زیر که توسط تاسومی (۲۰۰۳) ارائه شده است محاسبه می‌گردد سپس با ضرب کردن این نسبت در مقدار تابش خالص، شار گرمای خاک به دست می‌آید (۲۱):

$$\frac{G}{R_n} = 0.05 + 0.18e^{-0.521LAI} \quad LAI \geq 0.5 \quad (۴)$$

$$\frac{G}{R_n} = \frac{1.8(T_s - 273.15)}{R_n} + 0.084 \quad LAI < 0.5 \quad (۵)$$

که در آن،  $T_s$  دمای سطح زمین بر حسب  $^{\circ}k$ ، LAI شاخص سطح برگ و  $R_n$  تابش خالص بر حسب  $w.m^{-2}$  است. دمای سطح زمین علاوه بر نقش مهم آن در محاسبه مؤلفه‌های مختلف بیلان انرژی در سطح مثل تابش خالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس، از آن در انتخاب پیکسل سرد و پیکسل گرم نیز استفاده می‌شود. در این پژوهش برای محاسبه دمای سطح زمین از روش ارائه شده توسط کول و کاسیلیس (۱۹۹۷) استفاده شد (۷):

$$T_s = 0.39T_{31}^2 + 2.34T_{31} - 0.78T_{31}T_{32} - 1.34T_{32} + 0.39T_{32}^2 + 0.56 \quad (۶)$$

که در آن،  $T_{31}$  و  $T_{32}$  دمای روشنایی بر حسب  $^{\circ}k$  برای باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده مودیس است. مقدار شاخص LAI نیز با استفاده از رابطه زیر برآورد می‌گردد:

$$LAI = -\frac{\left(\ln\left(\frac{0.69 - SAVI}{0.59}\right)\right)}{0.91} \quad (۷)$$

$$LE = R_n - G - H \quad (۱)$$

که در آن، LE شار گرمای نهان،  $R_n$  شار تابش خالص، G شار گرمای خاک و H شار گرمای محسوس می‌باشد و تمام پارامترها بر حسب  $w.m^{-2}$  بیان می‌شوند. در ادامه به نحوه محاسبه مؤلفه‌های بیلان انرژی پرداخته می‌شود.

**تابش خالص ( $R_n$ ):** مقدار تابش خالص از موازنه شارهای تابشی خروجی و ورودی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (۲)$$

که در آن،  $R_{S\downarrow}$ ،  $R_{L\downarrow}$  و  $R_{L\uparrow}$  به ترتیب تابش با طول موج کوتاه ورودی به سطح زمین، تابش با طول موج بلند ورودی به سطح زمین و تابش خروجی با طول موج بلند گسیل شده از سطح زمین بر حسب  $w.m^{-2}$  هستند.  $\alpha$  و  $\epsilon$  هم به ترتیب آلبیدوی سطح و انتشار حرارتی سطح هستند و عبارت  $(1 - \epsilon_0)$  معرف کسری از تابش با طول موج بلند ورودی است که از سطح منعکس می‌شود (۱۵). محاسبه مقادیر  $R_{S\downarrow}$ ،  $R_{L\downarrow}$  و  $R_{L\uparrow}$  براساس مقادیر پارامترهایی مانند ضریب شفافیت اتمسفری، گسیلمندی سطح، شاخص LAI و غیره صورت می‌گیرد. برای برآورد آلبیدوی سطح در تصاویر مودیس، لیانگ، رابطه زیر را پیشنهاد و نشان داده که این رابطه از دقت بسیار بالایی برخوردار است (۱۳):

$$\alpha = 0.16\rho_1 + 0.291\rho_2 + 0.243\rho_3 + 0.116\rho_4 + 0.112\rho_5 + 0.081\rho_7 - 0.0015 \quad (۳)$$

که در آن،  $\rho$  انعکاس طیفی باندهای ۱ تا ۷ سنجنده مودیس است.

**شار گرمای خاک (G):** شار گرمای خاک، آن بخش از تابش خالص دریافت شده توسط سطح خاک است

انتخاب می‌شود. در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم، از عواملی مانند دمای سطحی، آلبیدوی سطح و شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده می‌شود. به این ترتیب که پیکسل سرد باید دارای دمای پایین، آلبیدویی در حدود ۰/۲۲ تا ۰/۲۴ مطابق با زمین یونجه و مقدار NDVI بالا باشد در حالی که پیکسل گرم باید دارای دمای بالا، آلبیدویی بالا مشابه با سایر زمین‌های خشک و بدون پوشش گیاهی و مقدار NDVI پایین باشد. در این پژوهش، پیکسل سرد از مزارع با پوشش گیاهی کامل و کاملاً آبیاری شده انتخاب شده است که در آن دمای سطحی و دمای هوای نزدیک سطح برابر فرض می‌شوند و پیکسل گرم هم از اراضی کشاورزی بدون پوشش انتخاب شده است. سپس با بررسی مقادیر NDVI، آلبیدو و دمای سطحی، دو پیکسل سرد و گرم انتخاب شده است. برای محاسبه شاخص NDVI از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (10)$$

که در آن،  $\rho_1$  انعکاس طیفی باند ۱ (باند قرمز) و  $\rho_2$  انعکاس طیفی باند ۲ (باند مادون قرمز نزدیک) در سنجنده مودیس می‌باشد. مقدار این شاخص بین -۱ تا +۱ متغیر است به طوری که مقدار آن برای سطح خاک لخت برابر با صفر، برای سطوح کاملاً پوشیده از گیاه برابر با ۱ و برای سطح حاوی آب و ابرها مقدار آن معمولاً کم‌تر از صفر است (۱۹).

پس از آن که مقدار شار گرمای محسوس بر اساس شرایط جوی تصحیح شد، مقدار لحظه‌ای شار گرمای نهان تبخیر مطابق با رابطه ۱ برای هر پیکسل محاسبه می‌شود. از آنجا که مقادیر محاسباتی شار تابش خالص ( $R_n$ )، شار گرمای محسوس (H) و شار گرمای خاک (G)، مقادیر لحظه‌ای و برای زمان گذر

که در آن، پارامتر SAVI<sup>۱</sup> شاخصی بدون بعد است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_3 - \rho_2)}{L + \rho_3 + \rho_2} \quad (8)$$

که در آن، L فاکتور تصحیح بدون بعد است و مقدار آن برای پوشش‌های گیاهی متراکم، متوسط و ضعیف به ترتیب ۰، ۰/۵ و ۱ می‌باشد. مقدار معمول برای این پارامتر ۰/۵ است (۲).

**شار گرمای محسوس (H):** شار گرمای محسوس، آن بخش از تابش خالص دریافت‌شده توسط سطح خاک است که از طریق فرآیندهای همرفت و هدایت صرف گرم کردن هوا می‌شود و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$H = \frac{\rho_{air} \cdot C_p \cdot dT}{r_{ah}} \quad (9)$$

که در آن،  $\rho_{air}$  چگالی هوا بر حسب  $kg \cdot m^{-3}$ ،  $C_p$  گرمای ویژه هوا بر حسب  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ،  $dT$  اختلاف دمای بین دو ارتفاع  $Z_1$  و  $Z_2$  بر حسب  $^{\circ}K$  و  $r_{ah}$  مقاومت آنرودینامیکی هوا در برابر انتقال گرما بر حسب  $s \cdot m^{-1}$  است. حل معادله فوق به دلیل وجود دو مجهول  $r_{ah}$  و  $dT$  مشکل می‌باشد. به منظور تسهیل محاسبات، از دو پیکسل سرد و گرم (که در آن‌ها می‌توان مقادیر قابل اعتمادی برای H پیش‌بینی نمود و در نتیجه برآوردی از  $dT$  داشت) و سرعت باد در ارتفاع معین استفاده می‌شود. پیکسل سرد از مزارع با پوشش گیاهی کامل و کاملاً آبیاری شده انتخاب می‌شود که در آن دمای سطحی و دمای هوای نزدیک به سطح، برابر فرض می‌شوند و پیکسل گرم از اراضی کشاورزی بایر (بدون پوشش گیاهی) و خشک

1- Soil Adjusted Vegetation Index

که در آن،  $ET_{r-24}$  مجموع  $ET_r$  در طی ۲۴ ساعت برای روز تصویربرداری توسط ماهواره است و مقدار آن با جمع کردن مقادیر ساعتی  $ET_r$  با یکدیگر در روز عبور ماهواره از محل به دست می‌آید. در این پژوهش، برای مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم متریک، مقادیر تبخیر و تعرق به دست آمده با این الگوریتم با مقادیر تبخیر و تعرق حاصل از لایسیتر نصب شده در شالیزار مؤسسه تحقیقات برنج رشت در ۸ روز تصویربرداری منتخب، از سه شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و میانگین اریبی خطا (MBE) استفاده شد. فرمول محاسباتی این سه شاخص به شرح زیر است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - O_i)^2}{n}} \quad (15)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |C_i - O_i|}{n} \quad (16)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i - O_i)}{n} \quad (17)$$

که در آن،  $C_i$  مقادیر محاسباتی،  $O_i$  مقادیر مشاهداتی و  $n$  تعداد کل مشاهدات است.

### نتایج و بحث

انتخاب پیکسل گرم و سرد: همان‌گونه که قبلاً نیز عنوان شد یکی از مهم‌ترین مراحل الگوریتم متریک، انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم است و انتخاب درست آن‌ها بر دقت محاسبه میزان تابش خالص و میزان گرمای محسوس اثر قابل‌توجهی دارد. در این پژوهش، برای انتخاب این پیکسل‌ها از سه پارامتر دمای سطح، شاخص پوشش گیاهی NDVI و

ماهواره می‌باشند بنابراین مقدار شار گرمای نهان (LE) نیز به صورت لحظه‌ای به دست خواهد آمد. مقدار تبخیر و تعرق واقعی در زمان عبور ماهواره برای هر پیکسل با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$ET_{inst} = 3600 \frac{LE}{\lambda \rho_w} \quad (11)$$

که در آن،  $ET_{inst}$  تبخیر و تعرق لحظه‌ای بر حسب  $\text{mm.h}^{-1}$  گرمای نهان تبخیر  $\lambda$   $\text{kg}^{-1}$  چگالی آب بر حسب  $\text{kg.m}^{-3}$  و عدد  $3600$  ضریب تبدیل زمان از ثانیه به ساعت می‌باشد. مقدار گرمای نهان تبخیر نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\lambda = (2.501 - 0.00236)(T_s - 273.15) \times 10^6 \quad (12)$$

کسر تبخیر و تعرق مرجع  $ET_r F$  و تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته: کسر تبخیر و تعرق مرجع  $ET_r F$  به صورت نسبت تبخیر و تعرق لحظه‌ای ( $ET_{inst}$ ) محاسبه شده برای هر پیکسل به تبخیر و تعرق مرجع ( $ET_r$ ) محاسبه شده از اطلاعات هواشناسی برای زمان برداشت تصویر تعریف می‌شود که با استفاده از رابطه زیر قابل برآورد است:

$$ET_r F = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (13)$$

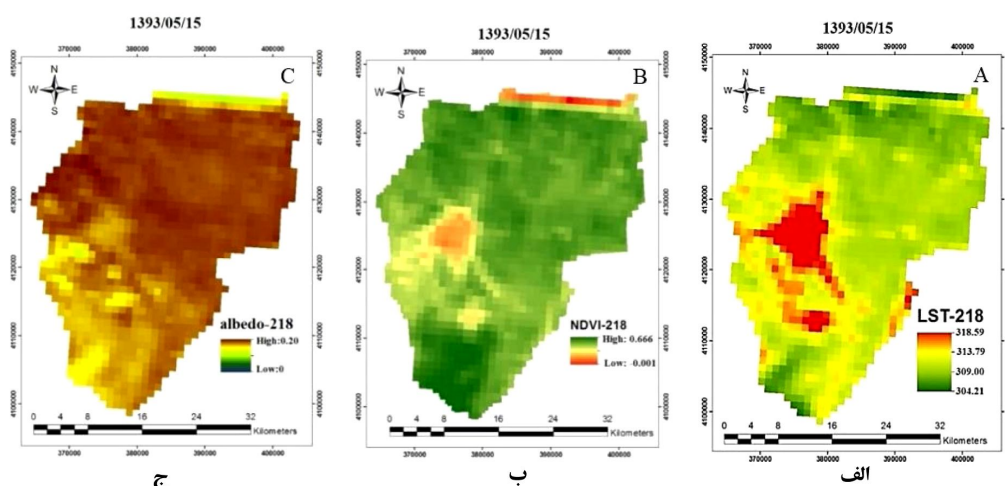
با توجه به این‌که مقادیر روزانه تبخیر و تعرق ( $ET_{24}$ ) کاربرد بیش‌تری نسبت به مقادیر لحظه‌ای دارند الگوریتم متریک تبخیر و تعرق روزانه را با این فرض که  $ET_r F$  لحظه‌ای در زمان برداشت تصویر مشابه با میانگین  $ET_r F$  در میانگین ۲۴ ساعته است با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌کند:

$$ET_{24} = ET_r F \times ET_{r-24} \quad (14)$$



محدوده مورد مطالعه در ۸ روز مورد مطالعه پرداخته می‌شود. شکل ۲ نحوه تغییرپذیری این سه پارامتر را به‌عنوان نمونه برای تاریخ ۱۳۹۳/۵/۱۵ نشان می‌دهد.

آبیدوی سطح استفاده شد. نظر به نقش پررنگ این پارامترها در نتایج حاصل از الگوریتم متریک، قبل از بررسی تبخیر و تعرق روزانه حاصل از الگوریتم، به بررسی این سه پارامتر و نحوه تغییرات آن‌ها برای



شکل ۲- نقشه تغییرپذیری الف) دمای سطح بر حسب  $^{\circ}k$ ، ب) شاخص پوشش گیاهی NDVI و ج) آبیدوی سطح در تاریخ ۱۳۹۳/۵/۱۵ در محدوده مورد مطالعه.

Figure 2. Variability map of A) Surface temperature ( $^{\circ}k$ ), B) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and C) Surface albedo at 6/08/2014 in the study area.

۲- ج مقادیر بالای آبیدوی سطح (اراضی کشاورزی و مزارع و شالیزارهای برنج) با رنگ قهوه‌ای، مقادیر متوسط آبیدوی سطح (اراضی جنگلی با پوشش گیاهی متراکم) به رنگ زرد و مقادیر آبیدوی سطح پایین (مناطق پوشیده از آب در قسمت شمالی تصویر) به رنگ سبز نمایش داده شده است. در نهایت پس از تهیه نقشه سه پارامتر مؤثر بر انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم برای ۸ روز تصویربرداری، پیکسل‌های گرم و سرد برای هر روز تصویربرداری انتخاب شدند. در جدول ۲ مقادیر پارامترهای مؤثر در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم انتخاب شده در روزهای موردنظر در منطقه مطالعاتی ارائه شده است.

در شکل ۲- الف، مناطق با دمای سطح بالا (مناطق مسکونی و مناطق فاقد پوشش گیاهی) با رنگ قرمز، مناطق با دمای متوسط با رنگ زرد و مناطق با دمای سطح پایین (سطوح آزاد آب در قسمت شمالی تصویر و مناطق با پوشش گیاهی حداکثر در قسمت جنوبی تصویر) با رنگ سبز مشخص گردیده است. در شکل ۲- ب، حداکثر مقدار NDVI (مناطق جنگلی با پوشش گیاهی متراکم) با رنگ سبز، مناطق با مقدار متوسط NDVI (مناطق با پوشش گیاهی جزئی) با رنگ زرد و حداقل مقدار NDVI (مناطق مسکونی و اراضی فاقد پوشش گیاهی) با رنگ قرمز مشخص گردیده است. در شکل

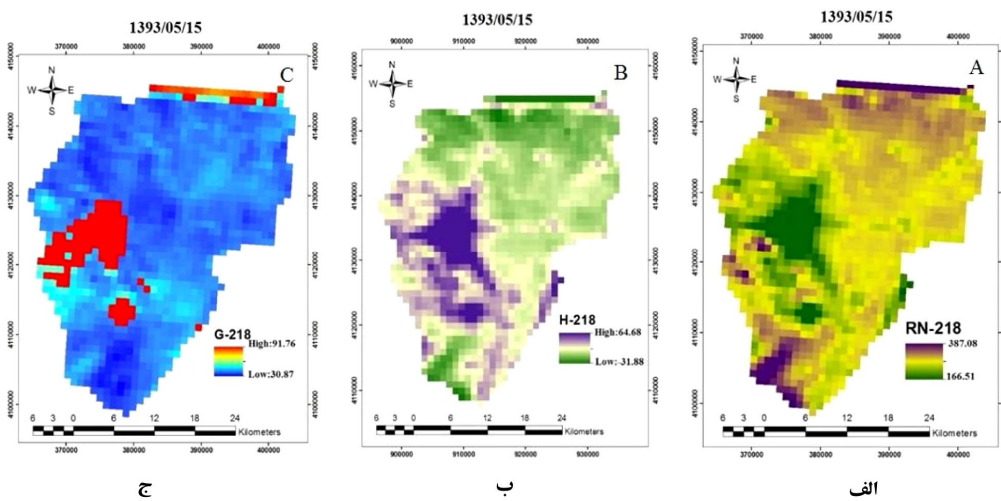
جدول ۲- مقادیر پارامترهای مؤثر در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم در روزهای مورد مطالعه.

Table 2. Values of effective parameter in selecting cold and warm pixels during the study days.

تاریخ Date	نوع پیکسل Pixel type	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی latitude	دمای سطح (°k) Surface temperature	شاخص پوشش گیاهی Vegetation Index	آلبدو Albedo
1393/05/01	پیکسل سرد (cold pixel)	374333	4136463	305.13	0.61	0.198
	پیکسل گرم (hot pixel)	379299	4126434	315.58	0.28	0.215
1393/05/03	پیکسل سرد (cold pixel)	376381	4132317	306.43	0.58	0.186
	پیکسل گرم (hot pixel)	378339	4125493	318.73	0.21	0.239
1393/05/05	پیکسل سرد (cold pixel)	384552	4127641	305.89	0.57	0.213
	پیکسل گرم (hot pixel)	377843	4126148	316.19	0.22	0.243
1393/05/14	پیکسل سرد (cold pixel)	384807	4128131	306.11	0.56	0.212
	پیکسل گرم (hot pixel)	378778	4126017	315.73	0.28	0.242
1393/05/15	پیکسل سرد (cold pixel)	385696	4127273	307.49	0.61	0.181
	پیکسل گرم (hot pixel)	378444	4123772	315.37	0.23	0.196
1393/05/17	پیکسل سرد (cold pixel)	385788	4127524	308.18	0.56	0.192
	پیکسل گرم (hot pixel)	376827	4120665	315.82	0.31	0.205
1393/05/19	پیکسل سرد (cold pixel)	385296	4127831	307.33	0.54	0.216
	پیکسل گرم (hot pixel)	379339	4124747	314.08	0.29	0.232
1393/05/21	پیکسل سرد (cold pixel)	381528	4125483	308.72	0.53	0.227
	پیکسل گرم (hot pixel)	375878	4123170	314.92	0.21	0.245

مشخص گردیده است. در شکل ۳- ب نیز مناطق با مقدار شار گرمای محسوس پایین (اراضی جنگلی با پوشش متراکم) با رنگ سبز، مناطق با شار گرمای محسوس متوسط با رنگ زرد و مناطق با شار گرمای محسوس بالا (مناطق فاقد پوشش گیاهی و مناطق مسکونی) با رنگ بنفش مشخص گردیده است. در شکل ۳- ج، مناطق با مقدار شار گرمای خاک پایین (اراضی جنگلی با پوشش متراکم) با رنگ آبی، مناطق با شار گرمای خاک متوسط با رنگ زرد و مناطق با شار گرمای خاک بالا (مناطق مسکونی و سطوح آزاد آب) با رنگ قرمز مشخص گردیده است.

با توجه به این که الگوریتم متریک مبتنی بر بیلان انرژی در سطح است بنابراین دقت محاسبه میزان تبخیر و تعرق در این الگوریتم وابسته به دقت محاسبه سایر مؤلفه‌های بیلان انرژی شامل تابش خالص، شار گرمای محسوس و شار گرمای خاک است. در شکل ۳ نقشه تغییرپذیری این سه مؤلفه به عنوان نمونه برای تاریخ ۹۳/۵/۱۵ آورده شده است. در شکل ۳- الف مناطق با تابش خالص پایین (مناطق مسکونی) با رنگ سبز، مناطق با تابش خالص متوسط با رنگ زرد و مناطقی با تابش خالص بالا (سطوح آزاد آب و مناطق جنگلی با پوشش گیاهی متراکم) با رنگ بنفش

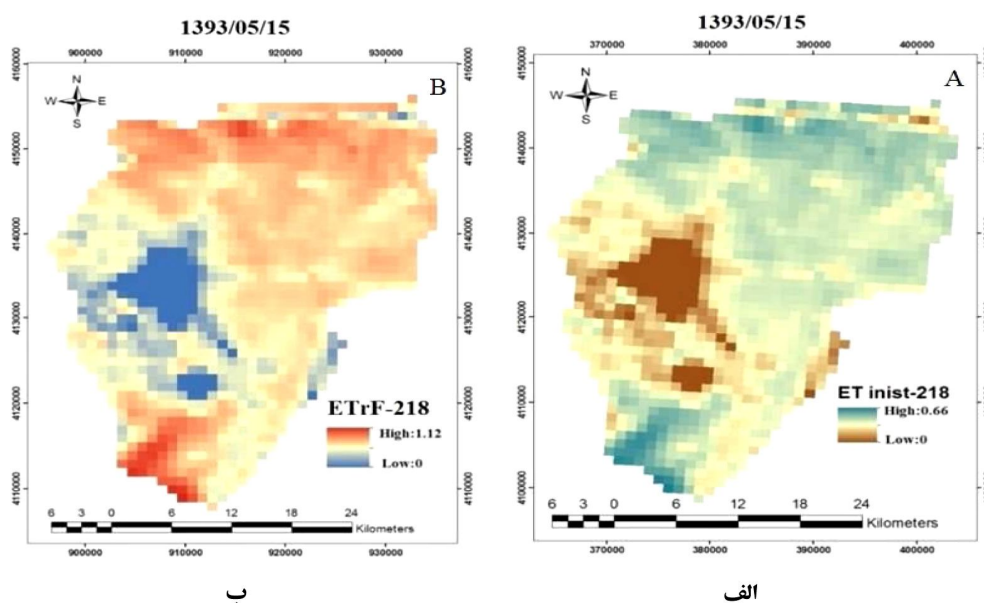


شکل ۳- نقشه تغییرپذیری الف) تابش خالص ب) شار گرمای محسوس و ج) شار گرمای خاک در تاریخ ۱۳۹۳/۵/۱۵ در محدوده مورد مطالعه.

Figure 3. Variability map of A) Net radiation, B) Sensible heat flux and C) Soil heat flux at 6/08/2014 in the study area.

تعرق روزانه ( $ET_{24}$ ) برای روزهای مورد مطالعه محاسبه شد. در شکل ۴ نقشه تغییرپذیری مقدار تبخیر و تعرق لحظه‌ای و کسر تبخیر و تعرق، به‌عنوان نمونه در تاریخ ۱۳۹۳/۵/۱۵ ارائه شده است و نشان می‌دهد که هم برای تبخیر و تعرق لحظه‌ای و هم برای کسر تبخیر و تعرق، حداقل مقدار آنها مربوط به مناطق مسکونی (قسمت مرکزی تصویر) و حداکثر مقدار آنها مربوط به سطوح آزاد آب و مناطق جنگلی با پوشش گیاهی متراکم (قسمت شمالی و جنوبی تصویر) بوده است.

پس از محاسبه مقادیر لحظه‌ای شار تابش خالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس، مقدار شار گرمای نهان تبخیر با استفاده از رابطه ۱ برای هر پیکسل از منطقه مورد مطالعه در ۸ روز منتخب استخراج شد و بر اساس رابطه ۱۱ مقدار تبخیر و تعرق واقعی لحظه‌ای ( $ET_{inst}$ )، که مربوط به زمان تصویربرداری ماهواره از منطقه مورد مطالعه می‌باشد، محاسبه شد. در ادامه با محاسبه کسر تبخیر و تعرق ( $ET_rF$ ) بر اساس رابطه ۱۳ و دخالت دادن مقدار محاسبه شده آن در رابطه ۱۴، مقدار تبخیر و

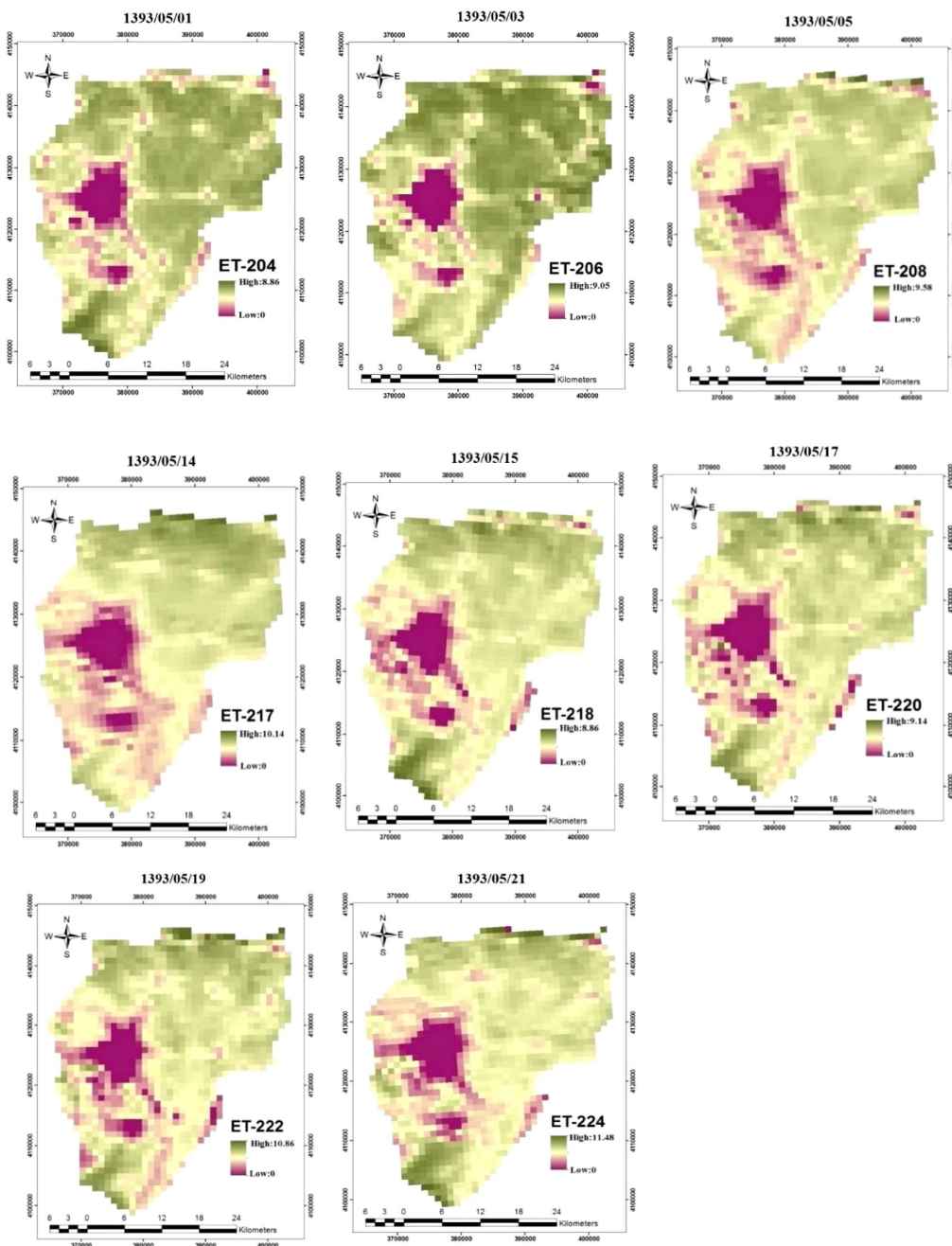


شکل ۴- پهنه‌بندی تغییرپذیری الف) تبخیر و تعرق لحظه‌ای و ب) کسر تبخیر و تعرق در تاریخ ۱۳۹۳/۵/۱۵ در محدوده مورد مطالعه.

Figure 4. Variability map of A) instantaneous Evapotranspiration and B) Fraction of Evapotranspiration at 6/08/2014 in the study area.

در خاتمه، مقادیر تبخیر و تعرق روزانه استخراج شده از نقشه فوق برای مزرعه تحقیقاتی (ET-METRIC) با مقادیر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده محصول برنج در ایستگاه لایسمتری (ET-Lysimeter) در ۸ روز تصویربرداری با هم مورد مقایسه قرار گرفتند که نتایج حاصل از انجام این مقایسه با به‌کارگیری سه شاخص RMSE، MAE و MBE در جدول ۳ منعکس شده است.

در شکل ۵ هم نقشه تغییرپذیری تبخیر و تعرق روزانه در منطقه مورد مطالعه برای ۸ روز تصویربرداری ارائه شده است. در این شکل، مقادیر پایین تبخیر و تعرق روزانه که مربوط به مناطق مسکونی در مرکز تصاویر است با رنگ بنفش، مقادیر متوسط تبخیر و تعرق روزانه با رنگ زرد و مقادیر بالای تبخیر و تعرق روزانه که مربوط به سطوح آزاد آب (قسمت شمالی) و مناطق جنگلی با پوشش گیاهی متراکم (قسمت جنوبی تصاویر) است با رنگ سبز مشخص گردیده است.



شکل ۵- نقشه تغییرپذیری تبخیر و تعرق روزانه در ۸ روز تصویربرداری در محدوده مورد مطالعه.  
 Figure 5. Variability map of daily evapotranspiration at 8 Imaging days in the study area.

جدول ۳- مقادیر برآورد شده توسط الگوریتم متریک و مقادیر لایسیمتری تبخیر و تعرق برنج بر حسب  $\text{mm.day}^{-1}$  در ایستگاه تحقیقاتی برای ۸ روز تصویربرداری منتخب همراه با مقادیر شاخص‌های سنجش خطا.

**Table 3. Estimated values by METRIC algorithm and lysimetry evapotranspiration values of rice ( $\text{mm.day}^{-1}$ ) in the research station for 8 days of imaging with the amounts of the error indicators.**

تاریخ	تبخیر و تعرق الگوریتم متریک	تبخیر و تعرق لایسیمتر	اختلاف تبخیر و تعرق متریک و لایسیمتر	ریشه میانگین مربعات خطا	میانگین قدرمطلق خطا	میانگین اریبی خطا
Date	ET-METRIC ( $\text{mm.day}^{-1}$ )	ET-Lysimeter ( $\text{mm.day}^{-1}$ )	ETM - ETL ( $\text{mm.day}^{-1}$ )	RMSE ( $\text{mm.day}^{-1}$ )	MAE ( $\text{mm.day}^{-1}$ )	MBE ( $\text{mm.day}^{-1}$ )
93/05/01	7.82	9.4	-1.58			
93/05/03	7.64	9.1	-1.46			
93/05/05	7.72	9.1	-1.38			
93/05/14	8.58	9.5	-0.92			
93/05/15	8.22	9.4	-1.18	1.21	1.14	-1.17
93/05/17	7.73	9	-1.27			
93/05/19	8.62	9.7	-1.08			
93/05/21	8.06	8.6	-0.54			

شاخص MBE هم که عددی منفی به دست آمده است نشان می‌دهد که الگوریتم متریک، مقدار تبخیر و تعرق محصول برنج را کم‌تر از مقدار واقعی برآورد کرده است و بنابراین تمایل به کم‌برآورد کردن آن دارد. با مراجعه به اعداد خود جدول برای تک‌تک روزها هم دیده می‌شود که الگوریتم متریک در تمامی روزها، مقدار تبخیر و تعرق را نسبت به مقادیر لایسیمتری کم‌تر برآورد کرده است به گونه‌ای که میانگین مقادیر تبخیر و تعرق در ۸ روز مورد مطالعه مذکور با استفاده از داده‌های لایسیمتری و الگوریتم متریک به ترتیب  $9/2$  و  $8$  میلی‌متر در روز بوده است. منشأ وجود اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی و همچنین کم‌برآورد کردن الگوریتم متریک را می‌توان به مجموعه عوامل زیر نسبت داد:

۱- یکی از دلایل وجود خطا در الگوریتم متریک می‌تواند وجود شرایط ایده‌آل برای لایسیمتر جهت

طبق جدول ۳ دیده می‌شود که مقادیر شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و میانگین اریبی خطا (MBE) برای ۸ روز تصویربرداری به ترتیب برابر با  $1/21$ ،  $1/14$  و  $-1/17$  میلی‌متر در روز به دست آمده‌اند. شاخص RMSE نشان‌دهنده این است که مقادیر محاسباتی تا چه حد به مقادیر مشاهداتی نزدیک بوده‌اند. هرچه مقدار این شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده وجود خطای کم‌تر در مدل است. مقدار به دست آمده برای این شاخص، بیانگر اختلاف قابل قبول الگوریتم متریک جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی محصول برنج است. شاخص MAE حاصله نشان می‌دهد که به طور متوسط و در مقیاس روزانه، الگوریتم متریک نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر و تعرق محصول برنج به میزان  $1/21$  میلی‌متر اختلاف داشته است که مقداری قابل قبول است.

### نتیجه‌گیری کلی

وجود الگوریتم‌ها و روش‌های متعدد و متفاوت برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و همچنین تولید روش‌های جدید که برخی دارای تفاوت‌های بسیار با الگوریتم‌های پیشین می‌باشند، نشان می‌دهد تکنولوژی سنجنش از دور اگرچه با سرعت زیادی در حال پیشرفت است اما هنوز راه زیادی تا تکامل در پیش‌رو دارد. بنابراین، ضروری است تا روش‌های موجود به دقت مورد بررسی قرار گرفته و روش‌های جدیدتر همراه با دقت برآورد بهتری ارائه شوند. در پژوهش حاضر دقت الگوریتم متریک در برآورد مقدار تبخیر و تعرق واقعی روزانه در ۸ روز مشخص برای محصول برنج در محدوده شهرستان رشت مورد ارزیابی قرار گرفت و مقدار تبخیر و تعرق ساعتی و روزانه به صورت پیکسل به پیکسل با استفاده از الگوریتم متریک برای روزهای تصویربرداری محاسبه شد و برای ارزیابی دقت نتایج حاصل از این الگوریتم، از داده‌های لایسیمیتر استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوریتم متریک، مقدار تبخیر و تعرق روزانه را با دقت قابل قبول برآورد می‌کند اما تا حدودی تمایل به کم برآورد کردن آن دارد. با توجه به این‌که منشأ بخشی از خطای حاصله می‌تواند ناشی از تفکیک مکانی پایین تصاویر سنجنده مودیس باشد پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات و پژوهش‌های آتی، تحت شرایط اقلیمی و گیاهی انتخاب شده در پژوهش حاضر از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا مانند آستر و لندست نیز استفاده شود و نتایج حاصله با پژوهش فعلی مورد مقایسه قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود جهت بالاتر بردن دقت نتایج حاصله با به‌کارگیری این الگوریتم، در صورت امکان از داده‌های با مقیاس زمانی ساعتی استفاده شود.

تبخیر و تعرق و عدم وجود این شرایط در مناطق هم‌جوار آن باشد. زیرا از آنجایی که ابعاد پیکسل‌های تصاویر ماهواره‌ای به‌طور قابل توجهی بزرگ‌تر از ابعاد لایسیمیتر است زمان و مقدار آبیاری در مزارع هم‌جوار با آبیاری در خود لایسیمیتر اگرچه تا حدودی همسان بوده است اما لزوماً به‌طور دقیق هماهنگ نبوده است.

۲- در این پژوهش به دلیل عدم وجود داده‌های ساعتی، از داده‌های سه‌ساعته ایستگاه هواشناسی کشاورزی رشت جهت برآورد تبخیر و تعرق مرجع ۲۴ ساعته استفاده شد و چون دقت داده‌های سه‌ساعته نسبت به داده‌های ساعتی کم‌تر است بنابراین مقدار تبخیر و تعرق مرجع ۲۴ ساعته حاصله از داده‌های سه‌ساعته ممکن است دارای مقداری خطا باشد.

۳- با توجه به این‌که کیفیت محاسبات تبخیر و تعرق در الگوریتم متریک به انتخاب دقیق دو پیکسل گرم و سرد وابسته است در تصاویر سنجنده مودیس که دارای قدرت تفکیک مکانی پایینی هستند انتخاب منطقه‌ای با حداکثر پوشش گیاهی و حداقل دما به‌عنوان پیکسل سرد و انتخاب منطقه‌ای با حداقل دما پوشش گیاهی و حداکثر دما به‌عنوان پیکسل گرم کمی دشوار است و انجام این امر ممکن است با مقداری خطا همراه بوده باشد.

۴- در ارتباط با کم برآورد کردن مقدار تبخیر و تعرق با به‌کارگیری الگوریتم متریک، این امکان وجود دارد که در ساختار برخی از معادلات تجربی در الگوریتم متریک، به‌هنگام تسهیم مقدار تابش خالص به سه مؤلفه اصلی آن (شار گرمای محسوس، شار گرمای نهان تبخیر و شار گرمای خاک)، سهم کم‌تری به شار گرمای نهان تبخیر داده شده باشد و برخی از این روابط تجربی ممکن است نیاز به بازنگری و تصحیح داشته باشند.

### منابع

1. Allen, R., Waters, R., Tasumi, M., Trezza, R., and Bastiaanssen, W. 2002. SEBAL, Surface energy balance algorithms for land, Idaho Implementation. Advanced Training and User's Manual, version 1.0.
2. Allen, R.G., Tasumi, M., and Trezza, R. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) Model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133: 380-394.
3. Asadi Oskoi, A. 2016. Partitioning evaporation and transpiration in different irrigation managements and its effect on determination of rice water requirement methods. Thesis Ph.D. In the field of agricultural meteorology. Mashhad Ferdowsi University. (In Persian)
4. Bagheri Haroni, M., Arshad, S., Majnoni, A., and Morid, S. 2012. Comparison of remote sensing models Single source and dual sources Energy flux in the estimation of real evapotranspiration In Tabriz plain. *Remote Sensing Society and GIS Iran.* 4: 1. 81-96. (In Persian)
5. Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B.P., and Allen, R.G. 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *ASCE J. Irrig. Drain.* 131: 85-93.
6. Chavez, J.L., and Mkhwanazi, M.M. 2013. Mapping evapotranspiration with the remote sensing ET algorithms METRIC and SEBAL under advective and non-advective conditions: accuracy determination with weighing Lysimeters. Civil and Environmental Engineering Department Colorado State University Fort Collins, Pp: 67-72.
7. Coll, C., and Caselles, V. 1997. A split-window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data: Validation and algorithm comparison. *J. Geophysic. Res.* 102: 14. 16697-16713.
8. Ferozi Nezam Abadi, F., and Kavyani, A. 2015. Introduction of energy balance algorithms to calculate the actual evapotranspiration using remote sensing techniques. The 1<sup>st</sup> International Congress on Earth. Space & Clean Energy, Pp: 1-8. (In Persian)
9. Gorbani, A., Faramarzi, M., Karami, J., and Golami, N. 2014. Evaluation and Comparison to evapotranspiration estimation: Case Study Malayer city. *J. Spat. Plan.* 19: 2. 153-184. (In Persian)
10. King, M.D. 2003. EOS data products handbook (Vol. 1): NASA Goddard Space Flight Center.
11. Li, Y.L., Cui, J.Y., Zhang, T.H., and Zhao, H.L. 2003. Measurement of evapotranspiration of irrigation spring wheat and maize in a semi-arid region of North china. *Agricultural Water Management.* 61: 1-12.
12. Lian, J., and Huang, M. 2016. Comparison of three remote sensing based models to estimate evapotranspiration in an oasis-desert region. *Agricultural Water Management.* 165: 153-162.
13. Liang, S. 2001. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms. *Remote Sensing of Environment.* 76: 2. 213-238.
14. Liaqat, U.W., and Choi, M. 2015. Surface energy fluxes in the Northeast Asia ecosystem: SEBS and METRIC models using Landsat satellite images. *Agricultural and Forest Meteorology.* 214: 60-79.
15. Liou, Y.A., and Kar, S.K. 2014. Evapotranspiration Estimation with Remote Sensing and Various Surface Energy Balance Algorithms-A Review. *Energies.* 5: 2821-2849.
16. Mokhtari, M.H., Ahmad, B., Hoveidi, H., and Busu, I. 2013. Sensitivity Analysis of METRIC-Based Evapotranspiration Algorithm. *Inter. J. Environ. Res.* 7: 2. 407-422.
17. Omidvar, J. 2011. Estimation of actual evapotranspiration using ASTER imagery and metric models. Thesis, Department of Water Engineering, Mashhad Ferdowsi University. (In Persian)
18. Omidvar, J., Davari, K., Arshad, S., Mosavi baegi, M., Akbari, M., and Hosaini, E. 2012. Estimation of Actual Evapotranspiration Using Aster Sensor and Metric Model. *J. Irrig. Water.* 3: 9. 38-49. (In Persian)



19. Parodi, G.N. 2002. AHAS, AVHRR Hydrological Analysis System. Software developed by Institute for Remote Sensing and Earth Sciences-Water Resources Division. The Netherlands.
20. Pôças, I., Paoç, T., Cunha, M., Andrade, J., Silvestre, J., Sousa, A., Santos, F., and Pereira, L. 2014. Satellite-based evapotranspiration of a super-intensive olive orchard: Application of METRIC algorithm. Biosystem engineering, Pp: 1-13.
21. Tasumi, M. 2003. Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. ProQuest Dissertations and Theses. Thesis Ph.D. University of Idaho. Source: Dissertation Abstracts International. Section: B., 357p.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 24(6), 2018*

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2017.12528.2723

## **Estimating rice actual evapotranspiration using METRIC algorithm in a part of the North of Iran**

**S. Esmaeili<sup>1</sup>, \*Y. Khoshkoo<sup>2</sup>, Kh. Babaei<sup>3</sup> and E. Asadi Oskouei<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>M.Sc. Graduate, Dept. Irrigation and Drainage, University of Kurdistan,

<sup>2</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, University of Kurdistan,

<sup>3</sup>M.Sc. Kurdistan Regional Water Authority,

<sup>4</sup>Head of Agro-Meteorology Office, Iran Meteorological Organization

Received: 03/16/2017; Accepted: 12/30/2017

### **Abstract**

**Background and Objectives:** With respect to that water resources shortage in recent years in Iran has become a major challenge and the major water losses are in the agriculture section and due to evapotranspiration, sustainable management of water resources requires identification and correct estimation of evapotranspiration. Among the different methods to estimate evapotranspiration, the remote sensing technique is an appropriate option for evapotranspiration estimating because of appropriate coverage of place and time in regional scale and using this technique, it is possible to appropriately estimate the regional evapotranspiration without requiring the historical information about soil, crop and type of farm management. Among the various algorithms based on remote sensing, in this research, relatively new METRIC algorithm has been used for estimating rice evapotranspiration in the Rasht city.

**Materials and Methods:** To estimating the rice evapotranspiration in the Rasht city, meteorological data of agricultural weather station of Rasht including variables of air temperature, relative humidity, sunshine hours, rainfall and wind speed in the 3-hour time scale, MODIS Satellite images and Lysimeter data were used for 8 non-clouds days of the August, 2014. Using the mentioned data and images and by adopting the energy balance based algorithms of METRIC, The rice crop evapotranspiration was estimated and for validation the results of the METRIC algorithm, the Lysimeter measured data at the Rasht Rice Research Institute in the summer of 2014 were used.

**Results:** The results of this study showed that by an implementation of the METRIC algorithm and by using MODIS satellite images, it is possible to estimate the actual rice daily evapotranspiration with a reasonable accuracy. Comparing between the estimated amounts of rice evapotranspiration by the METRIC algorithm and the measured Lysimeter values showed that the amounts of three applied error indices including RMSE, MAE and MBE were respectively 1.21, 1.14 and -1.17 mm/day. These extents represent an acceptable accuracy of the METRIC algorithm for estimating rice evapotranspiration, but in general, this algorithm tends to underestimate the amount of rice evapotranspiration so that the mean of evapotranspiration at the 8 mentioned days using Lysimetry data and the METRIC algorithm were 9.2 and 8 mm, respectively.

**Conclusion:** In general, use of remote sensing technique and METRIC algorithm as a new method for estimating evapotranspiration have an appropriate and acceptable accuracy and the source of errors between calculated and measured values of evapotranspiration and underestimating of METRIC algorithm as well can be attributed to some factors such as low spatial resolution of MODIS images and selecting procedure of hot and cold pixels.

**Keywords:** METRIC algorithm, Evapotranspiration, MODIS, Rice field, North of Iran

---

\* Corresponding Author; Email: [y.khoshkho@uok.ac.ir](mailto:y.khoshkho@uok.ac.ir)