فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال سی و دوم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۶، شماره پیاپی ۱۲۵

صفر معروفی، استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان **Dr. S. Marofi**
رویا سادات موسوی، دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان **R. Mousavi**
امید نصیری قیداری، دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان **O. Nasiri-Gheidari**
smarofi@yahoo.com

بررسی تغییرات مکانی و زمانی نیاز آبی دشت قزوین با به‌کارگیری الگوریتم متریک و تصاویر ماهواره لندست

دریافت مقاله:۹۵/۱۱/۲۹ پذیرش نهایی:۹۶/۴/۲۰

چکیده

اطلاع از پراکنش مکانی و زمانی نیاز آبی موجبات ارتباط بین کاربری اراضی، تخصیص و استفاده از آب را فراهم نموده است که می‌تواند منجر به مدیریت بهتر منابع آب گردد. در این پژوهش، با هدف تولید نقشه‌های زمانی و مکانی نیاز آبی، به بررسی کارآیی الگوریتم متریک در تخمین تبخیروتعرّق روزانه و نیاز آبی فصلی دشت مرتفع قزوین پرداخته شد. بدین‌منظور از پنج تصویر باقابلیت تفکیک مکانی بالای ۳۰×۳۰ متر ماهواره لندست ۷ ETM^+ در طول سال زراعی ۲۰۰۰ استفاده شد. بر اساس الگوریتم متریک، شار گرمای نهان تبخیروتعرّق محاسبه و نقشه تبخیروتعرّق لحظه‌ای استخراج گردید. طی دو مرحله برون‌یابی، مقادیر تبخیروتعرّق لحظه‌ای به بازه روزانه و سپس به‌کل دوره رشد تعمیم داده شد. به‌منظور ارزیابی دقّت نقشه‌های نیاز آبی تولیدی (تبخیروتعرّق واقعی) از مقادیر اندازه‌گیری شده لایسیمتر یونجه و برای ارزیابی نقشه‌های ضریب گیاهی تولیدشده، از داده‌های دو لایسیمتر یونجه و چمن، استفاده شد. نتایج نشان داد که خطای نسبی برآورد ضریب گیاهی در تاریخ‌های مورد ارزیابی از مقدار ۰/۰۵۳ تا ۰/۱۳۸ تغییر می‌نماید. مقایسه تبخیروتعرّق روزانه برآورد شده و اندازه‌گیری شده (ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۰/۶۰ میلی‌متر در روز و r=۰/۹۲) نشان از انطباق مناسب نتایج داشت. مقدار نیاز آبی در پیکسل مربوط به لایسیمتر یونجه در کل دوره بررسی ۱۲۳۲ میلی‌متر برآورد شد. یافته‌های تحقیق نشان داد که الگوریتم متریک می‌تواند به‌عنوان یک‌رویه کارا، دقیق و ارزان، به‌منظور برآورد مکانی و زمانی شدّت تبخیروتعرّق واقعی اراضی مرتفع مناطق خشک و نیمه‌خشک مورداستفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: تبخیر و تعرّق لحظه‌ای، دشت قزوین، لندست ۷، متریک، نیاز آبی منطقه‌ای

مقدمه

داشتن اطلاعات دقیق از چگونگی پراکنش مکانی و زمانی نیاز آبی در مناطق مختلف، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ازنظر برآورد نیاز آبی، مدیریت حق‌آبه، برنامه‌ریزی آبیاری، مدل‌سازی هیدرولوژیکی، مدیریت منابع آب و مطالعات اقلیمی حائز اهمیت فراوانی است. ازآنجاکه تبخیروتعرّق عمده‌ترین مصرف‌کننده آب آبیاری و بارندگی در کشاورزی است، تخمین دقیق‌تر آن می‌تواند به بهبود کارآیی مصرف آب منجر شود.

درروش‌های سنتی، مقدار تبخیروتعرّق، با ضرب کردن تبخیروتعرّق مرجع در ضریب گیاهی (K_c) برآورد می‌شود و معمولاً در رابطه بااینکه آیا مقادیر ارائه شده ضریب گیاهی معرف شرایط واقعی رشد و پوشش گیاهی به‌خصوص در شرایط کم‌آبی هست یا خیر، ابهاماتی وجود دارد. دست‌یابی به مقدار دقیق تبخیروتعرّق از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی (لایسیمتر) امکان‌پذیر

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-10-17]
[DOI: 10.18869/acadpub.geores.32.2.80]

است. اگرچه، استفاده از آن در عمل به دلیل هزینه‌های گزاف و دشواری کار، کاربردی نیست. علاوه‌براین، روش‌های مذکور مقادیر نقطه‌ای تبخیروتعرّق را به دست می‌دهند، ازاین‌رو کاربردشان محدود به گستره‌های کوچک‌شده و به دلیل طبیعت پویای تبخیروتعرّق، قابل‌تعمیم به حوضه‌های بزرگ نمی‌باشند (Li and Lyons, 2002:62). این محدودیت‌ها منجر به گرایش به سمت تکنیک سنجش‌ازدور شده است به‌طوری که از این تکنیک به‌عنوان کاربردی‌ترین ابزار برای برآورد و ارائه توزیع منطقه‌ای تبخیروتعرّق یاد شود (Jackson, 1984:83). از جمله مدل‌های سنجش‌ازدور مناسب در برآورد تبخیروتعرّق، می‌توان به مدل‌های مبتنی بر بیلان انرژی سطح زمین اشاره نمود. سبال[1] یکی از این روش‌هاست که توسط باستیانسن[2] (1998) توسعه داده شد و در مناطق مختلف جهان از جمله اسپانیا، ایتالیا، ترکیه، پاکستان، سریلانکا، مصر، نیجریه و چین مورد ارزیابی قرار گرفت (Bastiaanssen et al, 1998, Bastiaanssen,Bos, 1999, Bastiaanssen, 2000, Bastianssen et al, 2002, Tasumi et al, 2000; Tasumi et al, 2003, Ma et al, 2004).

سبال همچنین با به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌های مختلف نظیر لندست، مودیس[3] و نوآ[4]، مورد بررسی واقع شد. کارآیی تصاویر لندست در برآورد تبخیروتعرّق در تحقیقات آلن و همکاران[5] (2003) و ترزا[6] (2006) با استفاده از داده‌های لایسیمتری، به ترتیب در مناطق آیداهوی ایالات‌متحده و ونزوئلا مورد ارزیابی قرار گرفت. علی‌اصغر زاده وثنائی‌نژاد (۱۳۸۵) نیز با تصاویر لندست و معادله هارگریوز، تبخیروتعرّق و ضریب گیاهی را در حوضه آبریز تنگ کنشت کرمانشاه برآورد و استفاده از این روش را برای سایر مناطق و حوضه‌های بزرگ توصیه کردند.

ثنایی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۰) از سه تصویر مودیس در الگوریتم سبال در زیر حوضه آبریز مشهد استفاده نموده و نتایج حاصل را قابل‌قبول ارزیابی کردند. یعقوبی فشکی و همکاران (۱۳۸۸)، پایین بودن قابلیت تفکیک مکانی تصاویر مودیس، تفاوت ابعاد پیکسل در باندهای مختلف، عدم امکان یافتن نقاط کنترل زمینی و خطای ناشی از انتخاب پیکسل‌های شاخص را از اشکالات کاربرد تصاویر مودیس در الگوریتم سبال برشمرده و کاربرد تصاویر با تفکیک مکانی بالا و ارزیابی نتایج با داده‌های لایسیمتری را توصیه نمودند.

تصاویر ماهواره نوآ نیز در تحقیقات چاندراپالا و ویمالاسوریا[7] (2003)، حافیظ و همکاران[8] (2007) واکبری و همکاران (۱۳۹۰) در الگوریتم سبال مورداستفاده قرار گرفت. نتایج این تحقیقات اگرچه عملکرد سبال را تأیید می‌نماید ولی به دلیل اندازه پیکسل‌های بزرگ مزارع قابل‌تشخیص نبوده لذا، استفاده از تصاویر با تفکیک مکانی بالاتر برای بهبود دقت توصیه‌شده است.

باوجود برتری‌های الگوریتم سبال، این روش به دلیل عدم استفاده از داده‌های زمینی به‌منظور کالیبراسیون درونی و همچنین در تعریف پیکسل‌های سرد و گرم موردنقد برخی از محققان بوده است. مطالعه سینگ و همکاران[9] (2008) نشان می‌دهد زمانی که پیکسل‌هایی با شرایط تعریف‌شده این الگوریتم در تصویر وجود نداشته باشد، عملکرد سبال کمتر از حد قابل‌قبول خواهد بود. به‌منظور بهبود دقّت پیش‌بینی تبخیروتعرّق گیاهان در مناطق خشک و برای سازگاری بهتر برآورد تبخیروتعرّق مرجع، آلن و همکاران[10] (2007 a) مدل سبال را ارتقاء داده و درنهایت مدل متریک (METRIC[11]) (تولید نقشه‌های تبخیروتعرّق با تفکیک مکانی بالا با کالیبراسیون درونی) را ارائه نمودند. مفاهیم پایه این روش مشابه سبال است، با این تفاوت‌ها که اصلاحاتی در

[1] SEBAL
[2] Bastiaanssen
[3] MODIS
[4] NOAA
[5] Allen et al.
[6] Trezza
[7] Chandrapala and Wimalasuriya
[8] Hafeez *et al.*
[9] Singh *et al.*
[10] Allen et al.
[11] Mapping EvapoTranspiration with high Resolution and Internalized Calibration

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-10-17]
[DOI: 10.18869/acadpub.geores.32.2.80]

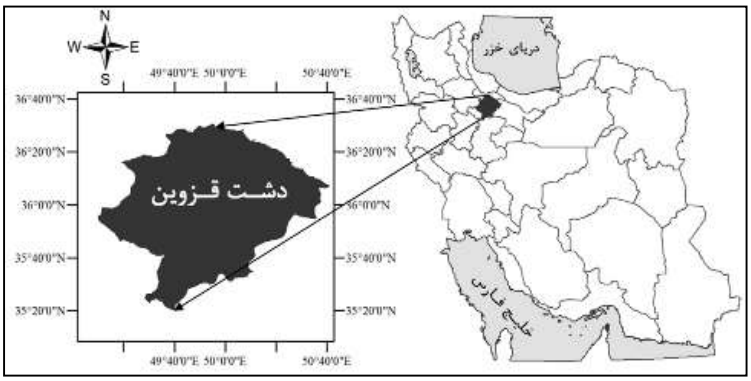
پیکسل‌های سرد و گرم و مؤلفه‌های مختلف بیلان انرژی در آن صورت گرفته است. از مقادیر ساعتی تبخیروتعرّق گیاه یونجه استفاده شده است. یک معادله هندسی برای یکپارچه‌سازی تابش خورشیدی در شرایط توپوگرافی شیب‌دار در آن گنجانده‌شده است و در آن به‌جای جزء تبخیر شونده، از تبخیروتعرّق مرجع استفاده می‌شود. این تغییرات امکان کالیبراسیون خودکار هر تصویر و کنترل دقّت در تخمین‌ها را فراهم نموده و موجب برتری‌های قابل‌توجه الگوریتم متریک در مقایسه با سبال شده است. الگوریتم متریک با تصاویر لندست توسط آلن و همکاران[1] (2007) در جنوب آیداهو، جنوب کالیفرنیا و نیومکزیکو و توسط فرنچ و همکاران[2] (2015) در آریزونا و نوماتا و همکاران[3] (2017) در برزیل به کار گرفته شد. نتایج حاکی از دقّت، کارآیی و مقرون به‌صرفه بودن آن در برآورد تبخیروتعرّق واقعی طی فصل رشد بود.

با توجه به نقاط ضعف ذکر شده برای الگوریتم سبال، به نظر می‌رسد به‌کارگیری الگوریتم متریک بتواند موجبات تولید نقشه‌های نیاز آبی را با دقّت بالاتر در دشت‌های مرتفع فراهم آورد. این پژوهش با هدف بررسی کارآیی الگوریتم متریک در برآورد نیاز آبی دشت قزوین با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۷ و بررسی توزیع زمانی و مکانی تبخیروتعرّق و همچنین ضریب گیاهی صورت گرفته است. ارزیابی دقّت این الگوریتم از طریق مقایسه نتایج آن با مقادیر اندازه‌گیری شده لایسمترهای موجود در منطقه صورت گرفته است.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورداستفاده

دشت قزوین به وسعت حدود ۴۴۰ هزار هکتار در حدفاصل طول‌های ′۳۱ °۵۰ تا ′۱۶ °۴۹ شرقی و عرض‌های ′۲۲ °۳۶ تا ′۶۷ °۳۵ شمالی، بخشی از استان قزوین را شامل می‌شود که محدوده آن از شمال به دامنه‌های رشته‌کوه البرز، از شرق به رودخانه زیاران، از غرب به دامنه رشته‌کوه‌های زاگرس و از جنوب به سمت شوره‌زارهای جنوب امتداد می‌یابد (شکل ۱). بر اساس طبقه‌بندی دومارتن، بیشترین پهنه اقلیمی این دشت از نوع نیمه‌خشک سرد می‌باشد. اطلاعات زمینی مورد استفاده در الگوریتم متریک، داده‌های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک قزوین واقع در طول جغرافیایی ′۳ °۵۰ شرقی و عرض ′۲۵ °۳۶ شمالی بوده است. پنج تصویر فاقد ابر ماهواره لندست ۷ در تاریخ‌های ۲۰ آوریل، ۲۲ می، ۲۵ جولای، ۲۷ سپتامبر و ۲۹ اکتبر سال ۲۰۰۰ به‌منظور تهیه نقشه‌های تبخیروتعرّق مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱- موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه

[1] Allen et al.
[2] French et al.
[3] Numata et al.

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-10-17]
[DOI: 10.18869/acadpub.geores.32.2.80]

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج الگوریتم متریک، از مقادیر تبخیروتعرّق اندازه‌گیری شده دو لایسیمتر یونجه و چمن واقع در ایستگاه اسماعیل‌آباد به طول جغرافیایی ′۵۴ °۴۹ و عرض جغرافیایی ′۱۵ °۳۶ استفاده شد. لایسیمترها از نوع زهکش‌دار با ابعاد ۱×۲ و عمق ۲ متر در مرکز زمینی به ابعاد ۵۰×۵۰ مترمربع بوده و در داخل و اطراف آن‌ها کشت یکنواخت یونجه و چمن صورت گرفته بود. ارزیابی نتایج ضریب گیاهی برآورد شده (ET_rF) توسط دو لایسیمتر یونجه و چمن و ارزیابی تبخیروتعرّق الگوریتم متریک توسط لایسیمتر یونجه انجام شد.

الگوریتم متریک:

در این تحقیق پیاده‌سازی الگوریتم متریک بر اساس روش بسط داده‌شده آلن و همکاران (a ۲۰۰۷) صورت گرفته است. این الگوریتم شارهای عمودی را برای محاسبه شار گرمای نهان (λET) به‌عنوان باقیمانده معادله بیلان انرژی در نظر می‌گیرد.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (۱)$$

در این رابطه R_n تابش خالص، G شار گرمای خاک و H شار گرمای محسوس، همگی برحسب ($W\ m^{-2}$) می‌باشند. محاسبه R_n و G در الگوریتم مشابه سبال می‌باشد. شار تابش خالص حقیقی در سطح زمین (R_n) بیانگر انرژی ساطع‌شده از سطح زمین بوده و باکم کردن مؤلفه‌های خروجی شارهای تابشی و حرارتی از مؤلفه‌های شار تابشی ورودی محاسبه می‌شود.

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1-\varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (۲)$$

که $R_{s\downarrow}$ تابش طول‌موج کوتاه ورودی است ($W\ m^{-2}$)؛ α آلبیدوی سطحی (بی‌بعد)؛ $R_{L\downarrow}$ تابش طول‌موج بلند ورودی ($W\ m^{-2}$)؛ $R_{L\uparrow}$ تابش طول‌موج بلند خروجی ($W\ m^{-2}$)؛ و ε_0 گسیلندی سطحی (بی‌بعد) است. عبارت $(1-\varepsilon_0)R_{L\downarrow}$ نشان‌دهنده جزء تابش طول‌موج بلند ورودی بازتاب شده از سطح است.

برای محاسبه شار گرمای خاک از نسبت G/R_n استفاده می‌شود. باستیانسن (۲۰۰۰) یک رابطه تجربی برای محاسبه این نسبت برحسب دمای سطح زمین، آلبیدو و NDVI ارائه نموده است. با داشتن R_n، مقدار G توسط رابطه (۳) قابل‌محاسبه است.

$$\frac{G}{R_n} = (T_s - 273.15)(0.0038 + 0.0074\alpha)(1 - 0.98NDVI^4) \quad (۳)$$

که در آن T_s دمای سطحی (K) و NDVI شاخص پوشش گیاهی است.

به دلیل آنکه محاسبه مقاومت آیرودینامیک و جریان گرمای محسوس (H) به یکدیگر وابسته‌اند، به دست آوردن این دو پارامتر به روش سعی و خطا و تکرار معادلات مربوطه صورت می‌گیرد. فرم کلی به دست آوردن جریان گرمای محسوس (H) به صورت معادله (۴) می‌باشد.

$$H = \rho_{air} \times C_p \times \frac{dT}{r_{ah}} \quad (۴)$$

که در آن، ρ_{air} چگالی هوا ($kg\ m^{-3}$)، C_p گرمای ویژه هوا در فشارثابت ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$) و R_{ah} مقاومت آیرودینامیک ($s\ m^{-1}$) می‌باشند. مقاومت آیرودینامیک به‌عنوان تابعی از زبری آیرودینامیک برآورد شده برای یک پیکسل خاص، بین دو ارتفاع نزدیک سطح زمین z_1 و z_2 (عموماً ۰/۱ و ۲ متر) محاسبه می‌شود. متریک جهت محاسبه r_{ah} از سرعت باد برون‌یابی‌شده در ارتفاعی بالاتر از سطح زمین (معمولاً ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر) و یک‌رویه تکراری برای تصحیح پایداری بر پایه توابع مانین-ابوخف[1] استفاده می‌کند. پارامتر dT اختلاف دمای نزدیک سطح بین z_1 و z_2 را نشان می‌دهد. شیب دمایی dT می‌تواند به‌عنوان تابع خطی تقریباً ساده از T_s توسط رابطه (۵) تخمین‌زده شود:

$$dT = a + bT_s \quad (۵)$$

[1] Monin-Obhukov

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.18869/acadpub.geores.32.2.80]

که T_s دمای سطح و a و b ضرایب تجربی برای هر تصویر ماهواره‌ای هستند. الگوریتم متریک نیز مشابه سبال، از دو پیکسل شاخص تحت عنوان سرد و گرم برای تعریف شرایط مرزی معادله بیلان انرژی استفاده می‌کند. انتخاب پیکسل‌های شاخص برای هر تاریخ، توسط تصاویر تولیدشده دمای سطح خاک انجام شد. بدین ترتیب که چند پیکسل دارای بیشترین و کمترین دما به‌عنوان کاندید در نظر گرفته‌شده و سپس با لحاظ نمودن چند پارامتر دیگر از جمله نزدیکی به ایستگاه هواشناسی معرف منطقه، واقع بودن در مزارع کشاورزی و کنترل مقادیر LAI و NDVI، پیکسل‌های موردنظر انتخاب شدند.

تفاوت اصلی بین الگوریتم‌های سبال و متریک آن است که در متریک، فرض H=0 (همان $LE=R_n-G$) صورت نمی‌گیرد. برای پیکسل سرد، $LE=1.05\lambda ET_r$ استفاده می‌شود که در آن، ET_r تبخیر تعرق ساعتی (فاصله زمانی کوتاه‌تر) گیاه مرجع (یونجه) محاسبه‌شده توسط معادله استانداردشده ASCE پنمن مانتیث است. تفاوت دوّم، آن است که در متریک، پیکسل‌های حدّی صرفاً در مناطق کشاورزی به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که پیکسل سرد دارای ویژگی‌های بیوفیزیکی مشابه گیاه مرجع (یونجه) باشد. اختلاف سوّم در به‌کارگیری کسر تبخیروتعرّق مرجع یونجه (ET_rF) درروش متریک به‌جای استفاده از Λ (کسر تبخیر)، در فرآیند برون‌یابی شار LE لحظه‌ای است؛ که عبارت است از نسبت ET_i (تبخیروتعرّق لحظه‌ای حاصل از سنجش‌ازدور) به ET_r (تبخیروتعرّق مرجع به‌دست‌آمده با داده‌های ایستگاه هواشناسی در زمان گذر ماهواره). از جمله مزایای استفاده از ET_r، کالیبراسیون خطاهای برآورد Rnو G در حدود بالا و پایین بازه دمایی (در پیکسل‌های سرد و گرم) همانند کالیبراسیون خطاها در برآورد T_s است. برتری دیگر استفاده از ET_r و ET_rF درروش متریک، توانایی لحاظ کردن تأثیرات جابجایی افقی توده‌هوا در اثر تغییر درجه حرارت بر ET است.

محاسبه تبخیروتعرّق لحظه‌ای و روزانه و فصلی

تبخیروتعرّق لحظه‌ای تصویر ماهواره‌ای برای هر پیکسل مطابق رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$ET_{inst} = 3600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda} \qquad (۶)$$

در این رابطه λET مقدار لحظه‌ای شارگرمای نهان تبخیر در زمان گذر ماهواره ($W\ m^{-2}$)، ET_{inst} تبخیروتعرّق لحظه‌ای ($mm\ hr^{-1}$)، λ گرمای نهان بخارآب ($J\ Kg^{-1}$) و عدد ۳۶۰۰ ضریب تبدیل زمان از ثانیه به ساعت می‌باشد.

تبدیل تبخیروتعرّق لحظه‌ای به‌دست‌آمده از تصویر ماهواره‌ای، به مقدار روزانه، توسط جزء تبخیروتعرّق مرجع (ET_rF) انجام می‌شود (رابطه ۷).

$$ET_rF = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \qquad (۷)$$

که در آن ET_{inst} برحسب ($mm\ h^{-1}$) از رابطه (۶) محاسبه می‌شود و ET_r تبخیروتعرّق یونجه مرجع استانداردشده با ۰/۵ متر ارتفاع در زمان تصویربرداری است که با کمک داده‌های هواشناسی محاسبه می‌شود. ET_rF، به‌منظور برون‌یابی تبخیروتعرّق از زمان تصویربرداری به دوره‌های ۲۴ ساعته یا بیشتر استفاده می‌شود (جنسن و همکاران، ۱۹۹۰). مقدار تبخیروتعرّق ۲۴ ساعته، از طریق رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$ET_{24} = ETrF \times ET_{r-24} \qquad (۸)$$

ET_{r-24} در این رابطه، مقدار محاسبه‌شده تبخیروتعرّق روزانه گیاه مرجع با داده‌های هواشناسی است.

اطلاعات خاص هر پیکسل از طریق ET_rF حفظ می‌شود و ET_r تنها به‌عنوان یک شاخص تغییرات نسبی آب و هوا به کار می‌رود، تبخیروتعرّق تجمعی هر دوره (ماه، فصل یا سال) توسط رابطه (۹) قابل‌محاسبه است.

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.18869/acadpub.geores.32.2.80]

$$ET_{Period} = ETrF_{Period} \sum_{i=1}^{n} ET_{r-24i} \quad (۹)$$

که در این رابطه ET_{period} تبخیروتعرّق تجمعی در یک دوره از روز ۱اُم تا روز nاُم (میلی‌متر)، ET_rF_{period} مقدار ET_rF برای دوره موردنظر و ET_{r-24i} مقدار ET_r ۲۴ ساعته برای روز iاُم (میلی‌متر در روز) می‌باشد.

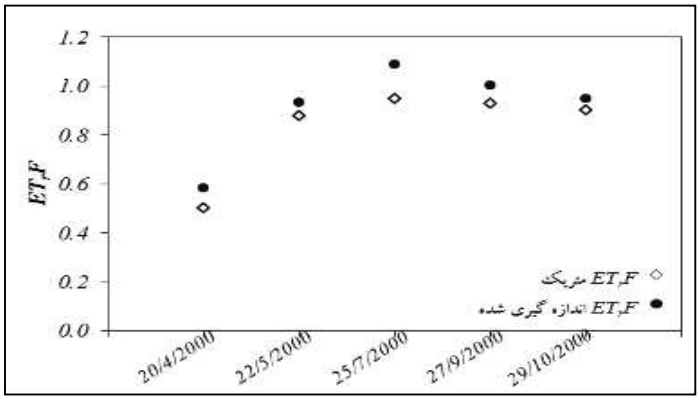
استخراج، آماده‌سازی و پردازش تصاویر:

در این پژوهش ۵ تصویر فاقد ابر ماهواره لندست ۷ در طی دوره رشد مورد استفاده قرار گرفت. اندازه پیکسل‌های ۳۰×۳۰ متر تصاویر لندست، جزئیات کافی را برای تولید نقشه تبخیروتعرّق در مقیاس یک مزرعه کوچک تا سطح یک حوضه وسیع را فراهم می‌کند. تصاویر مورد استفاده، منطقه وسیعی شامل دشت و شبکه آبیاری قزوین، بخش‌هایی از نوار ساحلی دریای خزر و ارتفاعات رشته‌کوه‌های البرز را پوشش می‌دهد. مدل‌سازی و محاسبات مربوطه در نرم‌افزارهای ArcGIS 9.3 و ERDAS 2010 و ENVI 4.8 صورت گرفت.

بحث

برآورد ضریب گیاهی منطقه

مقایسه میان مقادیر جزء تبخیروتعرّق (ET_rF) به‌دست‌آمده از الگوریتم متریک (ضریب گیاهی با در نظر گرفتن یونجه به‌عنوان گیاه مرجع)، با مقادیر اندازه‌گیری شده (نسبت تبخیروتعرّق لایسیمترهای چمن به یونجه) در شکل ۲ نشان داده‌شده است.



شکل ۲- جزء تبخیروتعرّق مرجع حاصل از لایسیمترها و مقدار تخمینی الگوریتم متریک

مطابق شکل ۲ الگوریتم متریک در برآورد ET_rF در حالت کلی دچار مقداری فرو برآورد شده است. این خطا می‌تواند ناشی از عدم دقّت کافی در برآورد ET_r به روش ACSE توسط رابطه۷ باشد. بیشترین مقدار ETrF اندازه‌گیری شده (۱/۱۳) در اواسط فصل رشد در تاریخ ۲۰۰۰/۷/۲۵ و کمترین مقدار آن (۰/۵۸) در اوایل فصل رشد در تاریخ ۲۰۰۰/۴/۲۰ مشاهده می‌شود (جدول ۱). کمترین میزان خطای نسبی در تاریخ ۲۰۰۰/۱۰/۲۹ مربوط به اواخر فصل رشد با مقدار ۰/۰۵۳ و بیشترین میزان آن (۰/۱۶۸) نیز مربوط به اواسط فصل رشد و تاریخ ۲۰۰۰/۷/۲۵ است. مقدار متوسط خطای نسبی برآورد جزء تبخیروتعرّق ۰/۰۹۶ می‌باشد.

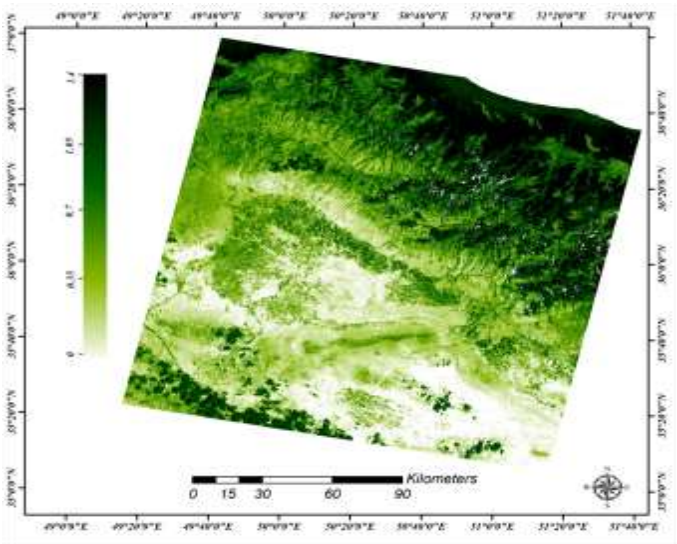
[Downloaded from georesearch.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.18869/acadpub.geores.32.2.80]

جدول ۱-جزء تبخیر و تعرّق مرجع به‌دست‌آمده از لایسیمترها و مقادیر تخمینی الگوریتم متریک

تاریخ عکس	ET_rF لایسیمتر	متریک	خطای نسبی
۲۰/۴/۲۰۰۰	۰/۵۸	۰/۵	۰/۱۳۸
۲۲/۵/۲۰۰۰	۰/۹۳	۰/۸۸	۰/۰۵۴
۲۵/۷/۲۰۰۰	۱/۱۳	۰/۹۵	۰/۱۲۸
۲۷/۹/۲۰۰۰	۱	۰/۹۳	۰/۰۷۰
۲۹/۱۰/۲۰۰۰	۰/۹۵	۰/۹۰	۰/۰۵۳

شکل ۳ نمونه‌ای از نقشه‌های جزء تبخیروتعرّق (معادل ضریب گیاهی) برآوردی را در تاریخ ۲۰۰۰/۵/۲۲ نشان می‌دهد. همان طورکه ملاحظه می‌گردد، مقدار این ضریب از مقدار صفر (روشن) در مناطق بایر دشت تا مقادیر بیشتر از یک (رنگ تیره) در دامنه رشته‌کوه‌های البرز متفاوت است. تصاویر ET_rF، پایه و اساس محاسبات تبخیروتعرّق در یک دوره خاص یا یک‌فصل می‌باشند.



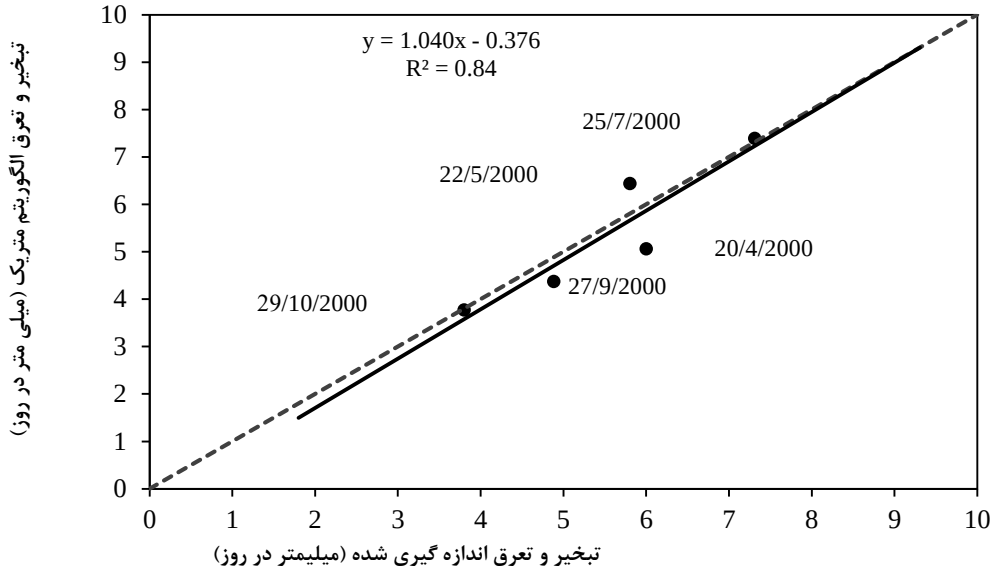
شکل ۳- توزیع مکانی جزء تبخیروتعرّق یونجه در تاریخ ۲۰۰۰/۵/۲۲ برای منطقه مورد مطالعه

ارزیابی نتایج متریک با داده‌های لایسیمتری

شکل (۴)، مقادیر تبخیروتعرّق تخمینی و اندازه‌گیری شده یونجه را در مقابل هم نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که خط برازش داده‌شده رابطه رگرسیونی به خط ۱:۱ (قطر مربع) نزدیک است. مقدار R^2 معادل ۰/۸۴ و نیز مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای متوسط (MBE) و قدر مطلق آن (MAE) که به ترتیب برابر ۰/۵۶، ۰/۱۵۲- و ۰/۴۴۰ میلی‌متر در روز بود، نشان از توافق مناسب میان مقادیر تبخیروتعرّق به‌دست‌آمده توسط الگوریتم متریک در پیکسل مربوط به لایسیمتر یونجه با مقادیر اندازه‌گیری شده داشت. برآوردهای روش متریک در تاریخ‌های ۴/۲۰ و ۹/۲۷ با فرو برآورد و ۵/۲۲ با فرابرآورد همراه بوده است.

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.18869/acadpub.geores.32.2.80]



شکل ٤- مقایسه تبخیروتعرّق روزانه یونجه به‌دست‌آمده به روش متریک با مقادیر اندازه‌گیری شده

پیش‌تر اشاره شد که برآوردهای تبخیروتعرّق ممکن است از خطای محاسبه ET_r به روش ASCE تأثیر پذیرد. عامل دیگر می‌تواند ناشی از خطا در برآورد دما در هر پیکسل باشد. این خطا ممکن است به دلیل تأثیر رادیومتری پیکسل‌های مجاور پیکسل مربوط به لایسیمتر بروز نماید. به دلیل تأثیر زیاد دما در برآورد تبخیروتعرّق، این عامل می‌تواند بخش عمده‌ای از اختلافات میان مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده را توجیه نماید.

نقشه تبخیروتعرّق واقعی روزانه

شکل ۵، نقشه‌های تبخیروتعرّق واقعی روزانه برآورد شده توسط الگوریتم متریک در دشت قزوین را در تاریخ‌های تصویربرداری نشان می‌دهد. تصاویر دارای اطلاعات تبخیروتعرّق روزانه در هر پیکسل بوده و امکان برآورد آب موردنیاز روزانه یک مزرعه و همچنین مقایسه تبخیر و تعرق مزارع مختلف یا بخش‌های مختلف مزارع بزرگ را فراهم می‌نمایند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مقدار تبخیروتعرّق در نقاط مختلف تصویر، بسیار متفاوت است. در قسمت‌های جنوب و جنوب شرق تصاویر، به علت بایر بودن زمین، مقدار تبخیروتعرّق بسیار پایین و در بعضی مناطق نزدیک به صفر است. درحالی‌که نوار دارای پوشش گیاهی متراکم حاشیه خزر که دارای مقادیر تبخیروتعرّق بالاتری نسبت به مناطق کشاورزی دشت قزوین می‌باشد، در قسمت بالایی تصویر کاملاً متمایز است. زمین‌های زراعی واقع در دشت قزوین که در بین طول‌های جغرافیایی ۴۹/۶ تا ۵۰/۶ درجه و عرض‌های جغرافیایی ۳۵/۹ تا ۳۶/۳ درجه بارنگ روشن‌تر دیده می‌شوند از زمین‌های بایر اطراف بارنگ تیره‌تر، قابل‌تفکیک‌اند.

مقادیر تبخیروتعرّق در طول فصل رشد در نقشه‌های ۲۰۰۰/۵/۲۲، ۲۰۰۰/۷/۲۵ و ۲۰۰۰/۹/۲۷ (به ترتیب مربوط به دوره‌های توسعه، میانی و پایانی دوره رشد اغلب گیاهان زراعی منطقه)، نسبت به نقشه‌های ۲۰۰۰/۴/۲۲ و ۲۰۰۰/۱۰/۲۹ (به ترتیب مربوط به ابتدا و انتهای دوره رشد بیشتر گیاهان زراعی منطقه)، به‌طور قابل‌توجهی بیشتر می‌باشد. در تصویر تاریخ ۲۰۰۰/۴/۲۲ به دلیل رویداد بارشی بیش از ۱۱ میلی‌متر در روزهای پیش از آن، طبق الگوریتم متریک، رطوبت پیشین خاک در محاسبه تبخیروتعرّق لحاظ گردید. همان‌طور که انتظار می‌رود، باگذشت زمان از آغاز فصل رشد، مقدار تبخیروتعرّق در تصویر مربوط به ماه پنجم (معادل اوایل خرداد) نسبت به ماه چهارم (معادل اوایل اردیبهشت) افزایش‌یافته است، علی‌رغم این موضوع، مقدار آن در تاریخ ماه هفتم (معادل اوایل مرداد) نسبت به ماه پنجم، قدری کاهش نشان می‌دهد.

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.18869/acadpub.geores.32.2.80]

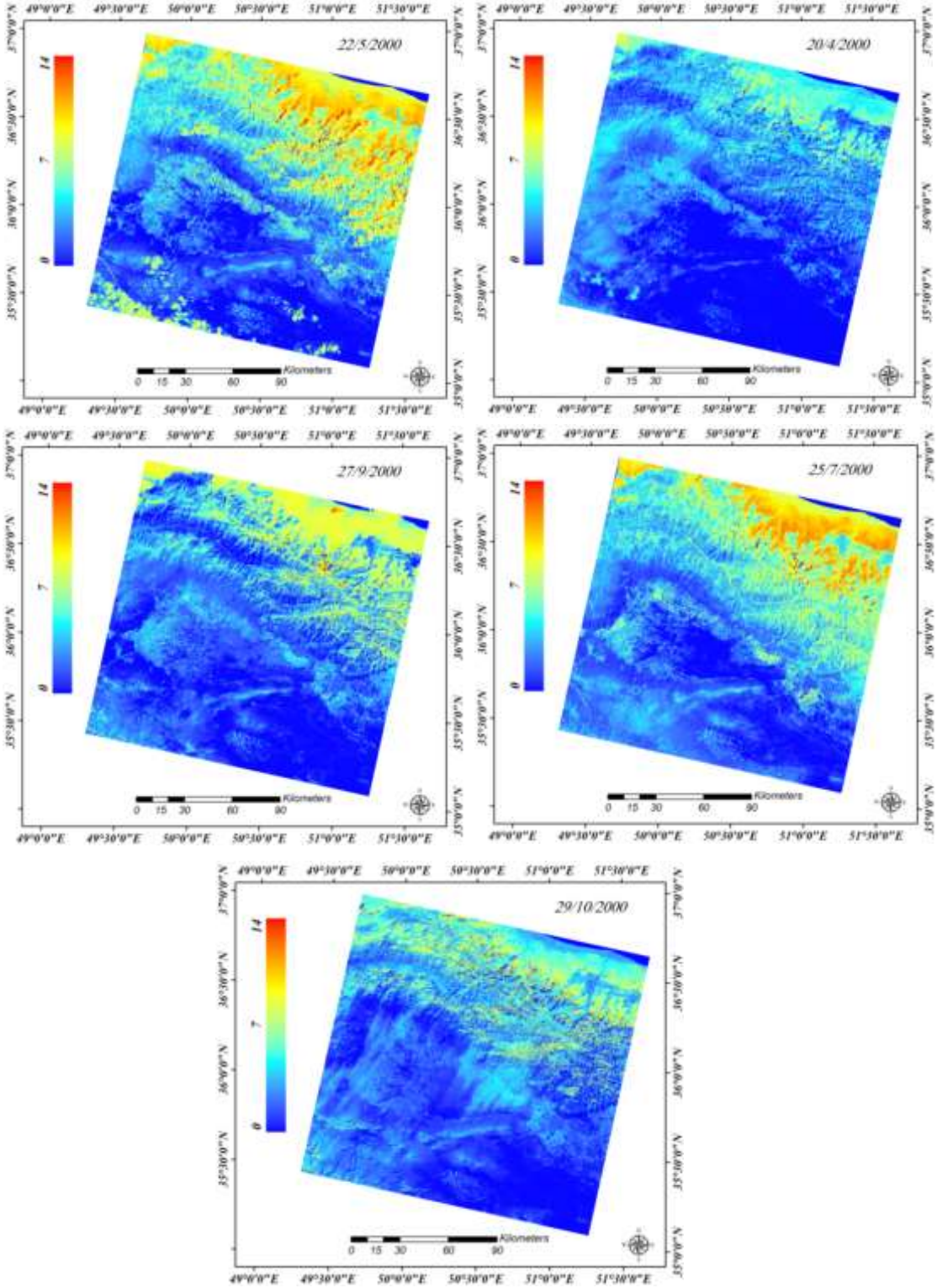
نقشه تبخیر و تعرق فصلی

مقادیر تبخیروتعرّق به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای، به‌منظور تولید نقشه تبخیروتعرّق فصلی، به بازه‌های زمانی بزرگ‌تری برون‌یابی شد. جدول (۲) مقادیر تبخیروتعرّق برون‌یابی شده توسط تصاویر ماهواره‌ای (الگوریتم متریک) و مقادیر اندازه‌گیری شده لایسیمتر یونجه را به همراه مقادیر خطاهای (مطلق و نسبی) برآورد، نشان می‌دهد. در حالت کلی، ملاحظه می‌گردد که مقادیر تبخیروتعرّق برآورد شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده دارای فرو برآورد است.

همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده‌شده، در دوره ابتدایی (بازه زمانی تحت پوشش تصویر ۲۰۰۰/۴/۲۰)، خطای برآورد تبخیر و تعرّق نسبتاً بالاست (خطای نسبی برابر ۰/۳۲-). علت این امر می‌تواند پویایی ویژگی‌های پوشش گیاهی در طول این دوره باشد که سبب شده این تصویر نتواند به‌خوبی نشان‌دهنده تغییرات قابل‌توجه تراکم و تبخیروتعرّق در طول دوره باشد. این در حالی است که در دوره میانی رشد (دوره اوج نیاز آبی)، متریک نتایج قابل قبولی را در برآورد تبخیروتعرّق ارائه نموده، به‌طوری که در بازه‌های تحت پوشش تصاویر ۵/۲۲ و ۷/۲۵ میزان خطای نسبی ۰/۰۳- بود. ناچیز بودن خطا در دوره میانی رشد می‌تواند به دلیل عدم تغییرات قابل‌توجه در تراکم، ثابت بودن میزان تبخیروتعرّق و شرایط پوشش گیاهی در این دوره باشد به‌طوری‌که این تصویر به خوبی نمایانگر ویژگی‌های پوشش گیاهی در طول کل دوره بوده است.

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.18869/acadpub.geores.32.2.80]



شکل ۵- نقشه‌های تبخیروتعرّق روزانه مربوط به پنج تصویر ماهواره لندست در طی سال ۲۰۰۰ دشت قزوین

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.18869/acadpub.geores.32.2.80]

جدول ۲- مقادیر تبخیروتعرّق اندازه‌گیری و برآورد شده یونجه

تاریخ تصاویر	تبخیروتعرّق واقعی (میلی‌متر)		خطای مطلق	خطای
معرف بازه	لایسیمتر	متریک	(میلی‌متر در دوره)	نسبی
۲۰۰۰/۴/۲۰	۲۷۸/۰۶	۱۸۹/۷۹	-۸۸/۲۷	-۰/۳۲
۲۰۰۰/۵/۲۲	۳۴۵/۱۱	۳۳۴/۴۱	-۱۰/۷۰	-۰/۰۳
۲۰۰۰/۷/۲۵	۴۶۳/۰۸	۴۵۱/۱۰	-۱۱/۹۸	-۰/۰۳
۲۰۰۰/۹/۲۷	۲۵۶/۷۷	۱۸۷/۱۷	-۶۹/۶۰	-۰/۲۷
۲۰۰۰/۱۰/۲۹	۱۰۶/۹۴	۶۹/۷۰	-۳۷/۲۴	-۰/۳۵
کل دوره	۱۴۴۹/۵۰	۱۲۳۲/۱۷	-۲۱۷/۳۳	-۰/۱۵

همچنین در دوره‌های پایانی فصل رشد (بازه‌های زمانی تحت پوشش تصاویر ۹/۲۷ و ۱۰/۲۹) خطای نسبی برآورد به ترتیب ۰/۲۷- و ۰/۳۵- بوده که مقدار نسبتاً بالایی است. در این دوره، به دلیل رسیدن و یا برداشت برخی محصولات، ویژگی پوشش گیاهی متغیر بوده و تصاویر به‌کاررفته، نمایانگر ویژگی‌های پوشش گیاهی در کل بازه زمانی تصویر نبوده است.

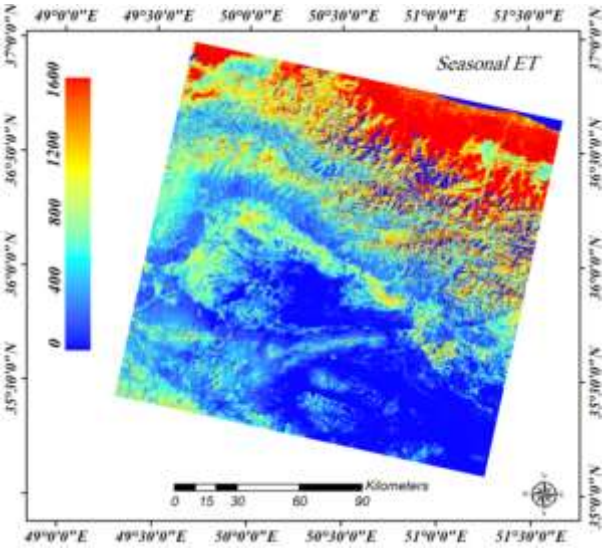
در تاریخ ۹/۲۷ سرعت باد نسبت به میانگین بازه زمانی تحت پوشش آن تصویر نسبتاً زیاد (۱۶ نات) بوده و به دلیل تأثیر این پارامتر در محاسبه سرعت اصطکاکی و در نتیجه در برآورد ET_r، این عامل می‌تواند سبب بروز خطا در مقدار تبخیروتعرّق این بازه زمانی و کل دوره باشد. بعلاوه، شرایط دمایی و رطوبتی خاک در دوره‌های ابتدایی و انتهایی فصل رشد (اوایل فصول بهار و پاییز)، می‌تواند در فرو برآورد آن تأثیرگذار باشد، به‌طوری‌که پایین بودن دمای سطح زمین (T_s) در این فصول و همچنین اهمیت بالای این پارامترها در فرآیند کالیبره نمودن مدل جهت برآورد شارگرمای محسوس، می‌تواند منجر به فروبرآورد تبخیروتعرّق گردد.

مقدار تبخیروتعرّق فصلی توسط الگوریتم متریک، در محل لایسیمتر ۱۲۳۲/۱۷ میلی‌متر برآورد شد، درحالی‌که مقدار اندازه-گیری شده آن ۱۴۴۹/۵ میلی‌متر بود؛ بنابراین، مقدار تبخیر و تعرق یونجه در طول دوره رشد توسط متریک به میزان ۲۱۷/۳۳ میلی‌متر (معادل خطای نسبی ۰/۱۵-) کم برآورد شد. البته بیشترین مقادیر خطا مربوط به دوره‌های ابتدایی و انتهایی رشد بوده و به نظر می‌رسد در صورت وجود تعداد بیشتری تصویر فاقد ابر (خصوصاً در دوره‌های با تغییرات قابل‌توجه تراکم پوشش گیاهی و تبخیروتعرّق)، دقّت برآورد افزایش یابد.

شکل (۶) توزیع مکانی تبخیروتعرّق فصلی، شامل دوره‌های ابتدایی، توسعه، میانی و پایانی رشد گیاه را نشان می‌دهد. میزان تبخیروتعرّق در مناطق بایر، زمین‌های غیر زراعی و زمین‌های کشاورزی خالی از محصول (آیش)، کمترین مقدار بوده و به رنگ آبی تیره دیده می‌شود. این در حالی است که در زمین‌های زراعی تحت آبیاری دشت قزوین که به رنگ زرد روشن در میانه تصویر دیده می‌شوند میزان تبخیروتعرّق گاهی از ۱۲۰۰ میلی‌متر نیز تجاوز می‌کند. همان‌طور که انتظار می‌رود، مقادیر تبخیروتعرّق در بخش‌های شمالی تصویر که مربوط به حاشیه دریای خزر است، بالاتر بوده و از ۱۵۰۰ میلی‌متر نیز تجاوز می‌نماید.

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.18869/acadpub.geores.32.2.80]



شکل ٦–نقشه تبخیروتعرّق واقعی فصلی برحسب میلی‌متر
فصل رشد سال ۲۰۰۰ منطقه مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، الگوریتم متریک با به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای باقابلیت تفکیک مکانی بالا، به‌منظور تعیین دقیق نیاز آبی گیاهان و تهیه نقشه تبخیروتعرّق دشت قزوین به کار گرفته و توسط داده‌های لایسیمتری ارزیابی شد. یافته‌های تحقیق نشان از توافق مناسب مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده داشت. به‌کارگیری تصاویر ماهواره لندست، موجب کاستن خطاهای مربوط به تفکیک مکانی و همچنین رفع مشکل عدم تطابق پیکسل‌ها در باندهای مختلف می‌شود. الگوریتم استفاده شده همچنین قابلیت ارائه نقشه‌های ضریب گیاهی منطقه‌ای را دارا بوده و به دلیل نیاز به داده‌های ورودی اندک، قابلیت اجرای بالایی دارد. همچنین عدم وابستگی به مرحله رشد و نوع گیاه، باعث برتری معنی‌داری این روش در مقایسه با روش‌های مرسوم برآورد تبخیروتعرّق واقعی شده است. ازاین‌رو استفاده از روش فوق می‌تواند به‌عنوان گامی مؤثر در جهت توسعه و بهبود روش‌های محاسبه تبخیروتعرّق منطقه‌ای به‌حساب آید و به‌منظور برآورد نیاز آبی واقعی با دقّت مطلوب، برای سایر دشت‌های کشور توصیه شود. خروجی این الگوریتم، می‌تواند به‌عنوان ورودی مدل‌های برنامه‌ریزی بهره‌برداری از مخزن، مدیریت آب زیرزمینی، برنامه-ریزی ذخیره آب آبیاری، تنظیم حق‌آبه و مطالعات هیدرولوژیک مورد استفاده قرار گیرد.

منابع و مآخذ

۱. اکبری، مهدی، سیف، زهرا، زارع ابیانه، حمید (۱۳۹۰)، برآورد میزان تبخیروتعرّق واقعی و پتانسیل در شرایط اقلیمی مختلف و با استفاده از سنجش‌ازدور، نشریه آب‌وخاک، دانشگاه فردوسی مشهد، جلد ۲۵، شماره ۴-آبان، صص ۸۳۵-۸۴۴.

۲. ثنایی نژاد، حسین، نوری، سمیرا، هاشمی نیا، مجید (۱۳۹۰)، برآورد تبخیروتعرّق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در منطقه مشهد. نشریه آب‌وخاک، دانشگاه فردوسی مشهد، جلد ۲۵، شماره ۳، صص ۵۴۰-۵۴۷.

۳. علی‌اصغر زاده، حسنعلی، ثنایی نژاد، حسین (۱۳۸۵)، تخمین تبخیروتعرّق با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور اطلاعات جغرافیایی در حوضه آبخیزتنگ‌کنشت‌کرمانشاه، همایش ملّی مدیریت شبکه‌های آبیاری‌وزهکشی، دانشگاه شهید چمران.

۴. یعقوبی فشکی، مجید (۱۳۸۸)، کاربرد روش سبال در محاسبه تبخیروتعرّق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی.

5. Allen, R., Morse, A., Tasumi, M. (2003), Application of SEBAL for Western US water rights regulation and planning, ICID Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions. 17.

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.18869/acadpub.geores.32.2.80]

6. Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R. (2007a), Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. J. Irrig. Drain Eng., 133(4), pp. 380–394, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380).

7. Allen, R., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J., Bastiaanssen, W., Kramber, W., Lorite, I., Robison, C. (2007b), Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Applications. J. Irrig. Drain Eng., 133(4), pp. 395–406.d

8. Bastiaanssen, W. (2000), SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey, J. Hydrol., 229, pp. 87–100.

9. Bastiaanssen, W., Ahmad, M., Chemin, Y. (2002), Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. Water Resources Research 38 (12), pp. 91–99.

10. Bastiaanssen, W., Bos, M. (1999), Irrigation performance indicators based on remotely sensed data A review of literature, Irrigation and Drainage Systems 13, pp. 291–311.

11. Bastiaanssen, W., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J., Roerink, G., Van Der Wal, T. (1998), A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL), II validation. Journal of Hydrology 212–213 (1998b), pp. 213–229.

12. Chandrapala, L., Wimalasuriya, M. (2003), Satellite measurements supplemented with meteorological data to operationally estimate actual evapotranspiration over Sri Lanka, Agri. Water Management.

13. French, A. N., Hunsaker, D. J., Thorp, K. R. (2015), Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. Remote Sensing of Environment, 158, pp. 281–294.

14. Hafeez, M., Andreini, M., Liebe, J., Friesen, J., Marx, A., van de Giesen, N. (2007), Hydrological parameterization through remote sensing in Volta Basin West Africa. Intl. J. River Basin Manage. 5(1)

15. Jackson, R. (1984), Remote sensing of vegetation characteristics for farm management, SPIE, 475 81-96.

16. Jensen, M., Burman, R., Allen, R. (1990), Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice. No. 70, New York, NY. pp. 332

17. Li, F., Lyons, T. (2002), Remote estimation of regional evapotranspiration, Environmental Modelling and Software, 17, pp. 61-75.

18. Ma, Y., Mneneti, M., Tsukamoto, O., Ishikawa, H., Wang, J., Gao, Q. (2004), Remote sensing parameterization of regional land surface heat fluxes over arid area in northwest China. Journal of Arid Environments, 57 (2), pp. 257–273.

19. Numata, I., Khand, K., Kjaersgaard, J., Cochrane, M. A., Silva, S. S. (2017), Evaluation of Landsat-Based METRIC Modeling to Provide High-Spatial Resolution Evapotranspiration Estimates for Amazonian Forests. Remote Sens. 9(1), 46; DOI: 10.3390/rs9010046

20. Singh, R., Irmak, A., Irmak, S., Martin, D. (2008), Application of SEBAL Model for Mapping Evapotranspiration and Estimating Surface Energy Fluxes in South-Central Nebraska, J. Irrig, Drain Eng., 134(3). 273–285. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:3(273)

21. Tasumi, M., Bastiaanssen, W., Allen, R. (2000), Application of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and stream flow depletion in the River Basin of Idaho through Remote Sensing, Appendix C,A step-by-step guide to running SEBAL. EOSDIS Project Final Report. The Raytheon Systems Company and the University of Idaho.

22. Tasumi, M., Trezza, R., Allen, R., Wright, J. (2003), Validation tests on the SEBAL model for evapotranspiration via satellite, Proceedings of 54th IEC Meeting of the International Commission on Irrigation and Drainage. ICID, France, 17 September 2003.

23. Trezza, R. (2006), Evapotranspiration from a remote sensing model for water management in an irrigation system in Venezuela. Association Interciencia Caracas, Venezuela, pp. 417-423.

[Downloaded from georesearch.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.18869/acadpub.geores.32.2.80]