

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

پذیرش نهایی: ۹۶/۴/۲۰

دریافت مقاله: ۹۵/۱۱/۲۹

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 کارایی الگوریتم متریک در تخمین تبخیر و تعرق روزانه و نیاز آبی فصلی دشت مرتفع قزوین پرداخته شد. بدین منظور از پنج تصویر با قابلیت تفکیک مکانی بالای ۳۰×۳۰ متر ماهواره لندست ۷ ETM⁺ در طول سال زراعی ۲۰۰۰ استفاده شد. بر اساس الگوریتم متریک، شار گرمای نهان تبخیر و تعرق محاسبه و نقشه تبخیر و تعرق لحظه‌ای استخراج گردید. طی دو مرحله برون‌یابی، مقادیر تبخیر و تعرق لحظه‌ای به بازه روزانه و سپس به کل دوره رشد تعمیم داده شد. به منظور ارزیابی دقت نقشه‌های نیاز آبی تولیدی (تبخیر و تعرق واقعی) از مقادیر اندازه‌گیری شده لایسیمتر یونجه و برای ارزیابی نقشه‌های ضریب گیاهی تولید شده، 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 تبخیر و تعرق روزانه برآورد شده و اندازه‌گیری شده (ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۰/۶۰ میلی‌متر در روز و $r=0/92$) 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 یک رویه کارا، دقیق و ارزان، به منظور برآورد مکانی و زمانی شدت تبخیر و تعرق واقعی اراضی مرتفع مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: تبخیر و تعرق 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، از نظر برآورد نیاز آبی، مدیریت حق‌آبه، برنامه‌ریزی آبیاری، مدل‌سازی هیدرولوژیکی، مدیریت منابع آب و مطالعات اقلیمی حائز اهمیت فراوانی است. از آنجاکه تبخیر و تعرق عمده‌ترین مصرف‌کننده آب آبیاری و بارندگی در کشاورزی است، تخمین دقیق‌تر آن می‌تواند به بهبود کارایی مصرف آب منجر شود.

در روش‌های سنتی، مقدار تبخیر و تعرق، با ضرب کردن تبخیر و تعرق مرجع در ضریب گیاهی (K_c) برآورد می‌شود و معمولاً در رابطه با اینکه 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 تبخیر و تعرق از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی (لایسیمتر) امکان‌پذیر

است. اگرچه، استفاده از آن در عمل به دلیل هزینه‌های گزاف و دشواری کار، کاربردی نیست. علاوه بر این، روش‌های مذکور مقادیر نقطه‌ای تبخیر و تعرق را به دست می‌دهند، از این رو کاربردشان محدود به گستره‌های کوچک شده و به دلیل طبیعت پویای تبخیر و تعرق، قابل تعمیم به حوضه‌های بزرگ نمی‌باشند (Li and Lyons, 2002:62). این محدودیت‌ها منجر به گرایش به سمت تکنیک سنجنش از دور شده است به طوری که از این تکنیک به عنوان کاربردی‌ترین ابزار برای برآورد و ارائه توزیع منطقه‌ای تبخیر و تعرق یاد شود (Jackson, 1984:83). از جمله مدل‌های سنجنش از دور مناسب در برآورد تبخیر و تعرق، می‌توان به مدل‌های مبتنی بر بیلان انرژی سطح زمین اشاره نمود. سبال^۱ یکی از این روش‌هاست که توسط باستیانسن^۲ (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, Bastiaanssen et al, 2002, Tasumi et al, 2000; (Tasumi et al, 2003, Ma et al, 2004).

سبال همچنین با به کارگیری تصاویر ماهواره‌های مختلف نظیر لندست، مودیس^۳ و نوآ^۴، مورد بررسی واقع شد. کارآیی تصاویر لندست در برآورد تبخیر و تعرق در تحقیقات آلن و همکاران^۵ (2003) و ترزا^۶ (2006) با استفاده از داده‌های لایسیمیتری، به ترتیب در مناطق آیداهوی ایالات متحده و ونزوئلا مورد ارزیابی قرار گرفت. علی‌اصغر زاده و ثنائی‌نژاد (۱۳۸۵) نیز با تصاویر لندست و معادله هارگریوز، تبخیر و تعرق 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.

ثنائی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۰) از سه تصویر مودیس در الگوریتم سبال در زیر حوضه آبریز مشهد استفاده نموده و نتایج حاصل را قابل قبول 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 بر شمرده و کاربرد تصاویر با تفکیک مکانی بالا و ارزیابی نتایج با داده‌های لایسیمیتری را توصیه نمودند.

تصاویر ماهواره نوآ نیز در تحقیقات چاندراپالا و ویمالاسوریا^۷ (2003)، حافیظ و همکاران^۸ (2007) و اکبری و همکاران (۱۳۹۰) در الگوریتم سبال مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این تحقیقات اگرچه عملکرد سبال را تأیید می‌نماید ولی به دلیل اندازه پیکسل‌های بزرگ مزارع قابل تشخیص نبوده لذا، استفاده از تصاویر با تفکیک مکانی بالاتر برای بهبود دقت توصیه شده است. با وجود برتری‌های الگوریتم سبال، این روش به دلیل عدم استفاده از داده‌های زمینی به منظور کالیبراسیون درونی و همچنین در تعریف پیکسل‌های سرد و گرم مورد نقد برخی از محققان بوده است. مطالعه سینگ و همکاران^۹ (2008) نشان می‌دهد زمانی که پیکسل‌هایی با شرایط تعریف شده این الگوریتم در تصویر وجود نداشته باشد، عملکرد سبال کمتر از حد قابل قبول خواهد بود. به منظور بهبود دقت پیش‌بینی تبخیر و تعرق گیاهان در مناطق خشک و برای سازگاری بهتر برآورد تبخیر و تعرق مرجع، آلن و همکاران^{۱۰} (2007 a) مدل سبال را ارتقاء داده و در نهایت مدل متریک (METRIC^{۱۱}) (تولید نقشه‌های تبخیر و تعرق 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

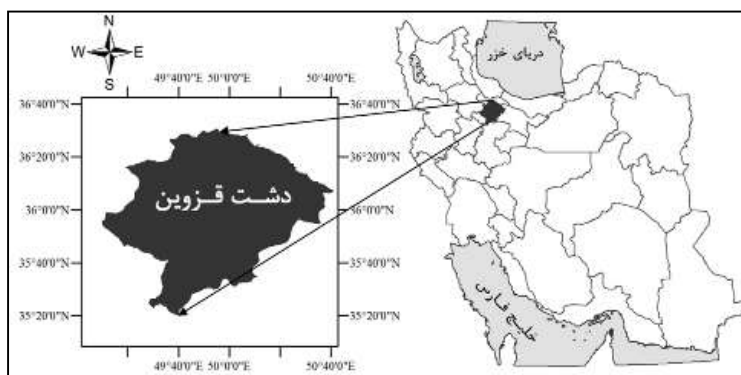
پیکسل‌های سرد و گرم و مؤلفه‌های مختلف بیلان انرژی در آن صورت گرفته است. از مقادیر ساعتی تبخیر و تعرق گیاه یونجه استفاده شده است. یک معادله هندسی برای یکپارچه‌سازی تابش خورشیدی در شرایط توپوگرافی شیب‌دار در آن گنجانده شده است و در آن به‌جای جزء تبخیر شونده، از تبخیر و تعرق مرجع استفاده می‌شود. این تغییرات امکان کالیبراسیون خودکار هر تصویر و کنترل دقت در تخمین‌ها را فراهم نموده و موجب برتری‌های قابل توجه الگوریتم متریک در مقایسه با سبال شده است. الگوریتم متریک با تصاویر لندست توسط آلن و همکاران^۱ (۲۰۰۷) در جنوب آیداهو، جنوب کالیفرنیا و نیومکزیکو و توسط فرنچ و همکاران^۲ (۲۰۱۵) در آریزونا و نوماتا و همکاران^۳ (۲۰۱۷) در برزیل به کار گرفته شد. نتایج حاکی از دقت، کارایی و مقرون به‌صرفه بودن آن در برآورد تبخیر و تعرق 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 دقت بالاتر در دشت‌های مرتفع فراهم آورد. این پژوهش با هدف بررسی کارایی الگوریتم متریک در برآورد نیاز آبی دشت قزوین با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۷ و بررسی توزیع زمانی و مکانی تبخیر و تعرق و همچنین ضریب گیاهی صورت گرفته است. ارزیابی دقت این الگوریتم از طریق مقایسه نتایج آن با مقادیر اندازه‌گیری شده لایسومترهای موجود در منطقه صورت گرفته است.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

دشت قزوین به وسعت حدود ۴۴۰ هزار هکتار در حدفاصل طول‌های $31^{\circ} 50'$ تا $36^{\circ} 16'$ شرقی و عرض‌های $22^{\circ} 36'$ تا $27^{\circ} 67'$ 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 $3^{\circ} 50'$ شرقی و عرض $25^{\circ} 36'$ 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 تبخیر و تعرق مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱- موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه

¹ Allen et al.

² French et al.

³ Numata et al.

به منظور اعتبارسنجی نتایج الگوریتم متریک، از مقادیر تبخیر و تعرق اندازه گیری شده دو لایسمتر یونجه و چمن واقع در ایستگاه اسماعیل آباد به طول جغرافیایی ۵۴° ۴۹' و عرض جغرافیایی ۱۵° ۳۶' استفاده شد. لایسمترها از نوع زهکش دار با ابعاد ۲×۱ و عمق ۲ متر در مرکز زمینی به ابعاد ۵۰×۵۰ متر مربع بوده و در داخل و اطراف آن‌ها کشت یکنواخت یونجه و چمن صورت گرفته بود. ارزیابی نتایج ضریب گیاهی برآورد شده (ET_F) توسط دو لایسمتر یونجه و چمن و ارزیابی تبخیر و تعرق الگوریتم متریک توسط لایسمتر یونجه انجام شد.

الگوریتم متریک:

در این تحقیق پیاده سازی الگوریتم متریک بر اساس روش بسط داده شده آلن و همکاران (۲۰۰۷ a) صورت گرفته است. این الگوریتم شارهای عمودی را برای محاسبه شار گرمای نهان (λET) به عنوان باقیمانده معادله بیلان انرژی در نظر می گیرد.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (1)$$

در این رابطه R_n تابش خالص، G شار گرمای خاک و H شار گرمای محسوس، همگی بر حسب ($W m^{-2}$) می باشند. محاسبه R_n و G در الگوریتم مشابه سبال می باشد. شار تابش خالص حقیقی در سطح زمین (R_n) بیانگر انرژی ساطع شده از سطح زمین بوده و با کم کردن مؤلفه های خروجی شارهای تابشی و حرارتی از مؤلفه های شار تابشی ورودی محاسبه می شود.

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (2)$$

که $R_{s\downarrow}$ تابش طول موج کوتاه ورودی است ($W m^{-2}$)؛ α آلبیدوی سطحی (بی بعد)؛ $R_{L\downarrow}$ تابش طول موج بلند ورودی ($W m^{-2}$)؛ $R_{L\uparrow}$ تابش طول موج بلند خروجی ($W m^{-2}$)؛ و ϵ_0 گسیلندی سطحی (بی بعد) است. عبارت $(1 - \epsilon_0) R_{L\downarrow}$ نشان دهنده جزء تابش طول موج بلند ورودی بازتاب شده از سطح است.

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

$$\frac{G}{R_n} = (T_s - 273.15)(0.0038 + 0.0074\alpha)(1 - 0.98NDVI^4) \quad (3)$$

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 وابسته اند، به دست آوردن این دو پارامتر به روش سعی و خطا و تکرار معادلات مربوطه صورت می گیرد. فرم کلی به دست آوردن جریان گرمای محسوس (H) به صورت معادله (۴) می باشد.

$$H = \rho_{air} \times C_p \times \frac{dT}{r_{ah}} \quad (4)$$

که در آن، ρ_{air} چگالی هوا ($kg m^{-3}$)، C_p گرمای ویژه هوا در فشار ثابت ($J kg^{-1} K^{-1}$) و R_{ah} مقاومت آیرودینامیک ($s m^{-1}$) می باشند. مقاومت آیرودینامیک به عنوان تابعی از زبری آیرودینامیک برآورد شده برای یک پیکسل خاص، بین دو ارتفاع نزدیک سطح زمین Z_1 و Z_2 (عموماً ۱/۰ و ۲ متر) محاسبه می شود. متریک جهت محاسبه R_{ah} از سرعت باد برون یابی شده در ارتفاعی بالاتر از سطح زمین (معمولاً ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر) و یک رویه تکراری برای تصحیح پایداری بر پایه توابع مانین-بوخف^۱ استفاده می کند. پارامتر dT اختلاف دمای نزدیک سطح بین Z_1 و Z_2 را نشان می دهد. شیب دمایی dT می تواند به عنوان تابع خطی تقریباً ساده از T_s توسط رابطه (۵) تخمین زده شود:

$$dT = a + bT_s \quad (5)$$

¹ Monin-Obhukov

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 به عنوان کاندید در نظر گرفته شده 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 و تعرق ساعتی (فاصله زمانی کوتاه‌تر) گیاه مرجع (یونجه) محاسبه شده توسط معادله استاندارد شده ASCE پنمن مانیتث است. تفاوت دوم، آن است که در متریک، پیکسل‌های حدی صرفاً در مناطق کشاورزی به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که پیکسل سرد دارای ویژگی‌های بیوفیزیکی مشابه گیاه مرجع (یونجه) باشد. اختلاف سوم در به کارگیری کسر تبخیر و تعرق مرجع یونجه (ET_rF) در روش متریک به جای استفاده از Λ (کسر تبخیر)، در فرآیند برون‌یابی شار LE لحظه‌ای است؛ که عبارت است از نسبت ET_i (تبخیر و تعرق لحظه‌ای حاصل از سنجش‌ازدور) به ET_r (تبخیر و تعرق مرجع به دست آمده با داده‌های ایستگاه هواشناسی در زمان گذر ماهواره). از جمله مزایای استفاده از ET_r ، کالیبراسیون خطاهای برآورد G و R_n 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 در روش متریک، توانایی لحاظ کردن تأثیرات جابجایی افقی توده‌ها در اثر تغییر درجه حرارت بر ET است.

محاسبه تبخیر و تعرق لحظه‌ای و روزانه و فصلی

تبخیر و تعرق لحظه‌ای تصویر ماهواره‌ای برای هر پیکسل مطابق رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$ET_{inst} = 3600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (6)$$

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

تبدیل تبخیر و تعرق لحظه‌ای به دست آمده از تصویر ماهواره‌ای، به مقدار روزانه، توسط جزء تبخیر و تعرق مرجع (ET_rF) انجام می‌شود (رابطه ۷).

$$ET_rF = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (7)$$

که در آن ET_{inst} برحسب ($mm h^{-1}$) از رابطه (۶) محاسبه می‌شود و ET_r تبخیر و تعرق مرجع استاندارد شده با 0.5 متر ارتفاع در زمان تصویربرداری است که با کمک داده‌های هواشناسی محاسبه می‌شود. ET_rF ، به منظور برون‌یابی تبخیر و تعرق از زمان تصویربرداری به دوره‌های ۲۴ ساعته یا بیشتر استفاده می‌شود (جنسن و همکاران، ۱۹۹۰). مقدار تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته، از طریق رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$ET_{24} = ET_rF \times ET_{r-24} \quad (8)$$

در ET_{r-24} این رابطه، مقدار محاسبه شده تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع با داده‌های هواشناسی است.

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

بررسی تغییرات مکانی و زمانی نیاز آبی دشت قزوین با به کارگیری الگوریتم متریک و تصاویر ماهواره لندست ۸۵/

$$ET_{Period} = ETrF_{Period} \sum_{i=1}^n ET_{r-24i} \quad (9)$$

که در این رابطه ET_{period} تبخیر و تعرق تجمعی در یک دوره از روز n ام تا روز n ام (میلی متر)، $ETrF_{period}$ مقدار $ETrF$ برای دوره مورد نظر و ET_{r-24i} مقدار ET_r ۲۴ ساعته برای روز n ام (میلی متر در روز) می باشد.

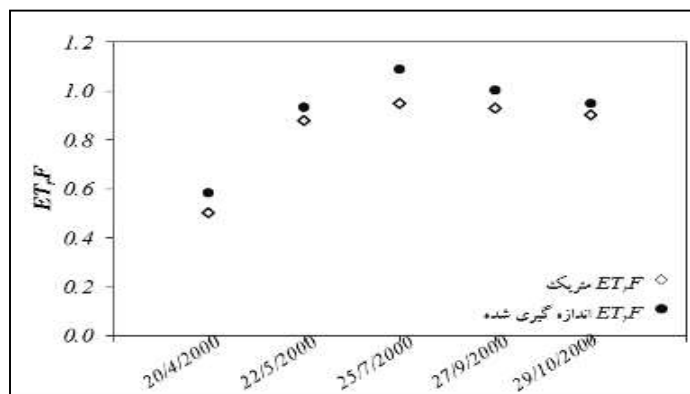
استخراج، آماده سازی و پردازش تصاویر:

در این پژوهش ۵ تصویر فاقد ابر ماهواره لندست ۷ در طی دوره رشد مورد استفاده قرار گرفت. اندازه پیکسل های 30×30 متر تصاویر لندست، جزئیات کافی را برای تولید نقشه تبخیر و تعرق در مقیاس یک مزرعه کوچک تا سطح یک حوضه وسیع را فراهم می کند. تصاویر مورد استفاده، منطقه وسیعی شامل دشت و شبکه آبیاری قزوین، بخش هایی از نوار ساحلی دریای خزر و ارتفاعات رشته کوه های البرز را پوشش می دهد. مدل سازی و محاسبات مربوطه در نرم افزارهای ArcGIS 9.3 و ERDAS 2010 و ENVI 4.8 صورت گرفت.

بحث

برآورد ضریب گیاهی منطقه

مقایسه میان مقادیر جزء تبخیر و تعرق ($ETrF$) به دست آمده از الگوریتم متریک (ضریب گیاهی با در نظر گرفتن یونجه به عنوان گیاه مرجع)، با مقادیر اندازه گیری شده (نسبت تبخیر و تعرق لایسیترها ی چمن به یونجه) در شکل ۲ نشان داده شده است.



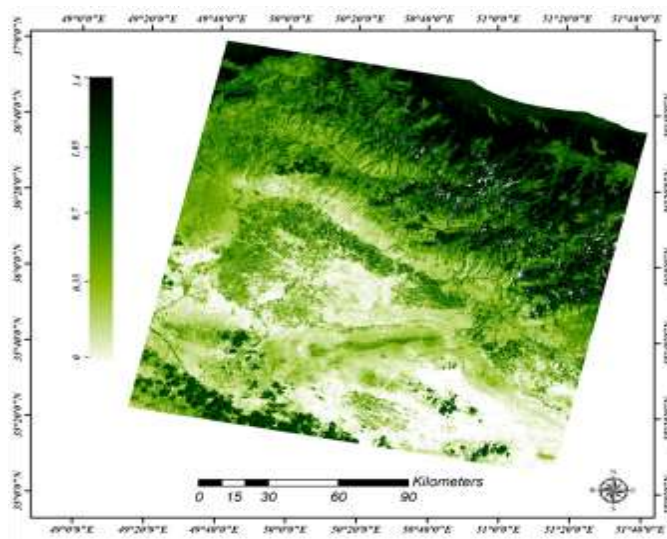
شکل ۲- جزء تبخیر و تعرق مرجع حاصل از لایسیترها و مقدار تخمینی الگوریتم متریک

مطابق شکل ۲ الگوریتم متریک در برآورد $ETrF$ در حالت کلی دچار مقداری فرو برآورد شده است. این خطا می تواند ناشی از عدم دقت کافی در برآورد ET_r به روش ACSE توسط رابطه ۷ باشد. بیشترین مقدار $ETrF$ اندازه گیری شده ($1/13$) در اواسط فصل رشد در تاریخ $25/7/2000$ و کمترین مقدار آن ($0/58$) در اوایل فصل رشد در تاریخ $20/4/2000$ مشاهده می شود (جدول ۱). کمترین میزان خطای نسبی در تاریخ $29/10/2000$ مربوط به اواخر فصل رشد با مقدار $0/053$ و بیشترین میزان آن ($0/168$) نیز مربوط به اواسط فصل رشد و تاریخ $2000/7/25$ است. مقدار متوسط خطای نسبی برآورد جزء تبخیر و تعرق $0/096$ می باشد.

جدول ۱- جزء تبخیر و تعرق مرجع به دست آمده از لایسیترها و مقادیر تخمینی الگوریتم متریک

| تاریخ عکس | ET _r F | | خطای نسبی |
|------------|-------------------|-------|-----------|
| | لایسیتر | متریک | |
| 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 |

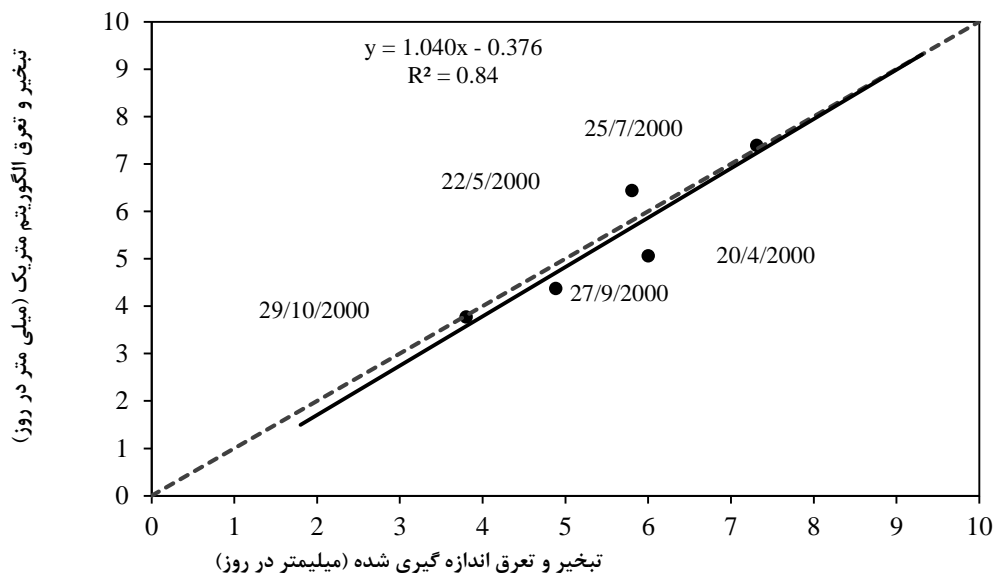
شکل ۳ نمونه‌ای از نقشه‌های جزء تبخیر و تعرق (معادل ضریب گیاهی) برآوردی را در تاریخ ۲۰۰۰/۵/۲۲ نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مقدار این ضریب از مقدار صفر (روشن) در مناطق بایر دشت تا مقادیر بیشتر از یک (رنگ تیره) در دامنه رشته کوه‌های البرز متفاوت است. تصاویر ET_rF، پایه و اساس محاسبات تبخیر و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



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

ارزیابی نتایج متریک با داده‌های لایسیتری

شکل (۴)، مقادیر تبخیر و تعرق 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 R² 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 تبخیر و تعرق به دست آمده توسط الگوریتم متریک در پیکسل مربوط به لایسیتر 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.



شکل ۴- مقایسه تبخیر و تعرق روزانه یونجه به دست آمده به روش متریک با مقادیر اندازه گیری شده

پیش تر اشاره شد که برآوردهای تبخیر و تعرق ممکن است از خطای محاسبه ET_r به روش ASCE تأثیر پذیرد. عامل دیگر می تواند ناشی از خطا در برآورد دما در هر پیکسل باشد. این خطا ممکن است به دلیل تأثیر رادیومتری پیکسل های مجاور پیکسل مربوط به لایسیتر بروز نماید. به دلیل تأثیر زیاد دما در برآورد تبخیر و تعرق، این عامل می تواند بخش عمده ای از اختلافات میان مقادیر برآورد شده و اندازه گیری شده را توجیه نماید.

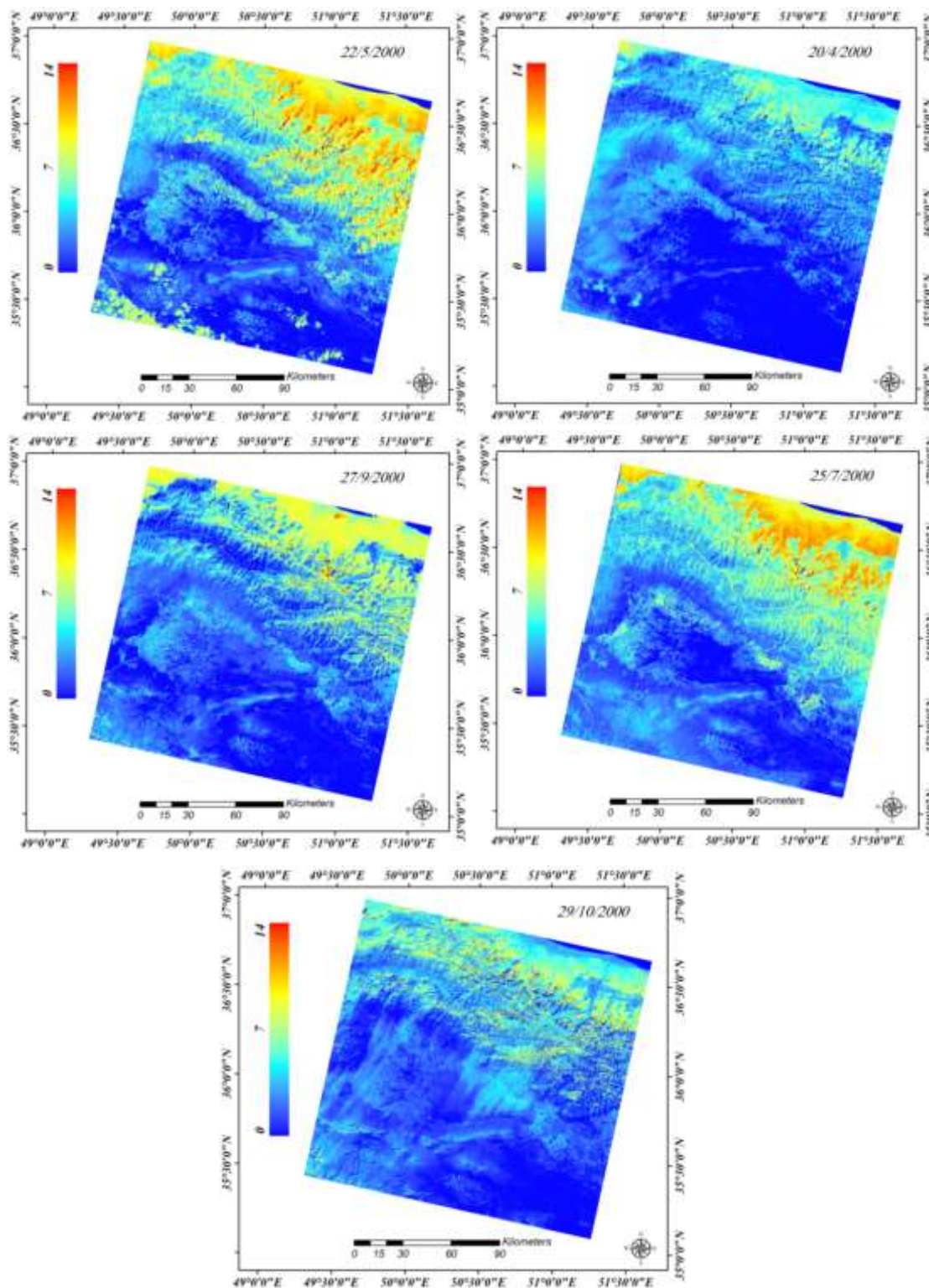
نقشه تبخیر و تعرق واقعی روزانه

شکل ۵، نقشه های تبخیر و تعرق واقعی روزانه برآورد شده توسط الگوریتم متریک در دشت قزوین را در تاریخ های تصویربرداری نشان می دهد. تصاویر دارای اطلاعات تبخیر و تعرق روزانه در هر پیکسل بوده و امکان برآورد آب مورد نیاز روزانه یک مزرعه و همچنین مقایسه تبخیر و تعرق مزارع مختلف یا بخش های مختلف مزارع بزرگ را فراهم می نمایند. همان طور که ملاحظه می گردد، مقدار تبخیر و تعرق در نقاط مختلف تصویر، بسیار متفاوت است. در قسمت های جنوب و جنوب شرق تصاویر، به علت بایر بودن زمین، مقدار تبخیر و تعرق بسیار پایین و در بعضی مناطق نزدیک به صفر است. در حالی که نوار دارای پوشش گیاهی متراکم حاشیه خزر که دارای مقادیر تبخیر و تعرق بالاتری نسبت به مناطق کشاورزی دشت قزوین می باشد، در قسمت بالایی تصویر کاملاً متمایز است. زمین های زراعی واقع در دشت قزوین که در بین طول های جغرافیایی $49/6$ تا $50/6$ درجه و عرض های جغرافیایی $35/9$ تا $36/3$ درجه بارنگ روشن تر دیده می شوند از زمین های بایر اطراف بارنگ تیره تر، قابل تفکیک اند. مقادیر تبخیر و تعرق در طول فصل رشد در نقشه های $2000/5/22$ ، $2000/7/25$ و $2000/9/27$ (به ترتیب مربوط به دوره های توسعه، میانی و پایانی دوره رشد اغلب گیاهان زراعی منطقه)، نسبت به نقشه های $2000/4/22$ و $2000/10/29$ (به ترتیب مربوط به ابتدا و انتهای دوره رشد بیشتر گیاهان زراعی منطقه)، به طور قابل توجهی بیشتر می باشد. در تصویر تاریخ $2000/4/22$ به دلیل رویداد بارشی بیش از 11 میلی متر در روزهای پیش از آن، طبق الگوریتم متریک، رطوبت پیشین خاک در محاسبه تبخیر و تعرق لحاظ گردید. همان طور که انتظار می رود، با گذشت زمان از آغاز فصل رشد، مقدار تبخیر و تعرق در تصویر مربوط به ماه پنجم (معادل اوایل خرداد) نسبت به ماه چهارم (معادل اوایل اردیبهشت) افزایش یافته است، علی رغم این موضوع، مقدار آن در تاریخ ماه هفتم (معادل اوایل مرداد) نسبت به ماه پنجم، قدری کاهش نشان می دهد.

نقشه تبخیر و تعرق فصلی

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

همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده، در دوره ابتدایی (بازه زمانی تحت پوشش تصویر ۲۰/۴/۲۰۰۰)، خطای برآورد تبخیر و تعرق نسبتاً بالاست (خطای نسبی برابر ۰/۳۲-). علت این امر می‌تواند پویایی و ویژگی‌های پوشش گیاهی در طول این دوره باشد که سبب شده این تصویر نتواند به خوبی نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه تراکم و تبخیر و تعرق در طول دوره باشد. این در حالی است که در دوره میانی رشد (دوره اوج نیاز آبی)، متریک نتایج قابل قبولی را در برآورد تبخیر و تعرق ارائه نموده، به طوری 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 قابل توجه در تراکم، ثابت بودن میزان تبخیر و تعرق و شرایط پوشش گیاهی در این دوره باشد به طوری که این تصویر به خوبی نمایانگر ویژگی‌های پوشش گیاهی در طول کل دوره بوده است.



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

جدول ۲- مقادیر تبخیر و تعرق اندازه گیری و برآورد شده یونجه

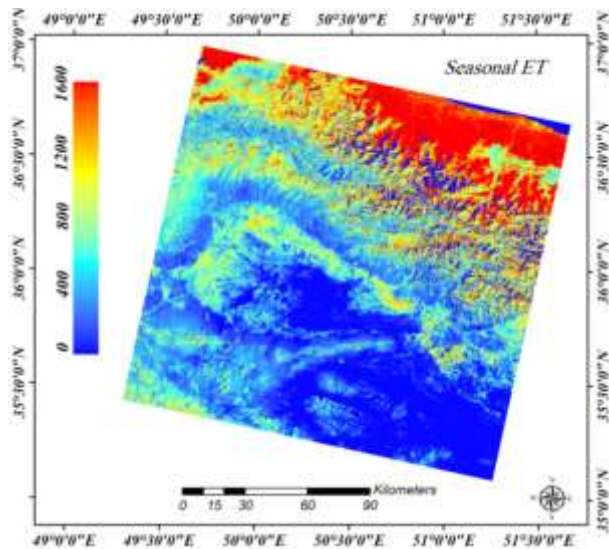
| تاریخ تصاویر | تبخیر و تعرق واقعی (میلی متر) | خطای مطلق | خطای نسبی |
|--------------|-------------------------------|--------------------|-----------|
| معرف بازه | لایسیمتر | (میلی متر در دوره) | نسبی |
| ۲۰۰۰/۴/۲۰ | ۲۷۸/۰۶ | -۸۸/۲۷ | -۰/۳۲ |
| ۲۰۰۰/۵/۲۲ | ۳۴۵/۱۱ | -۱۰/۷۰ | -۰/۰۳ |
| ۲۰۰۰/۷/۲۵ | ۴۶۳/۰۸ | -۱۱/۹۸ | -۰/۰۳ |
| ۲۰۰۰/۹/۲۷ | ۲۵۶/۷۷ | -۶۹/۶۰ | -۰/۲۷ |
| ۲۰۰۰/۱۰/۲۹ | ۱۰۶/۹۴ | -۳۷/۲۴ | -۰/۳۵ |
| کل دوره | ۱۴۴۹/۵۰ | -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 به کاررفته، 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 تبخیر و تعرق 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، به طوری که پایین بودن دمای سطح زمین (T_s) در این فصول و همچنین اهمیت بالای این پارامترها در فرآیند کالیبره نمودن مدل جهت برآورد شار گرمای محسوس، می‌تواند منجر به فروبرآورد تبخیر و تعرق گردد.

مقدار تبخیر و تعرق فصلی توسط الگوریتم متریک، در محل لایسیمتر ۱۲۳۲/۱۷ میلی‌متر برآورد شد، در حالی که مقدار اندازه‌گیری 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 قابل توجه تراکم پوشش گیاهی و تبخیر و تعرق)، دقت برآورد افزایش یابد.

شکل (۶) توزیع مکانی تبخیر و تعرق فصلی، شامل دوره‌های ابتدایی، توسعه، میانی و پایانی رشد گیاه را نشان می‌دهد. میزان تبخیر و تعرق 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 تبخیر و تعرق گاهی از ۱۲۰۰ میلی‌متر نیز تجاوز می‌کند. همان‌طور که انتظار می‌رود، مقادیر تبخیر و تعرق در بخش‌های شمالی تصویر که مربوط به حاشیه دریای خزر است، بالاتر بوده و از ۱۵۰۰ میلی‌متر نیز تجاوز می‌نماید.



شکل ۶- نقشه تبخیر و تعرق واقعی فصلی بر حسب میلی‌متر
فصل رشد سال ۲۰۰۰ منطقه مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، الگوریتم متریک با به کارگیری تصاویر ماهواره‌ای با قابلیت تفکیک مکانی بالا، به منظور تعیین دقیق نیاز آبی گیاهان و تهیه نقشه تبخیر و تعرق 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. به کارگیری 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 تبخیر و تعرق واقعی شده است. از این روش استفاده از روش فوق می‌تواند به‌عنوان گامی مؤثر در جهت توسعه و بهبود روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق منطقه‌ای به حساب آید و به منظور برآورد نیاز آبی واقعی با دقت مطلوب، برای سایر دشت‌های کشور توصیه شود. خروجی این الگوریتم، می‌تواند به‌عنوان ورودی مدل‌های برنامه‌ریزی بهره‌برداری از مخزن، مدیریت آب زیرزمینی، برنامه‌ریزی ذخیره آب آبیاری، تنظیم حق‌آبه و مطالعات هیدرولوژیک مورد استفاده قرار گیرد.

منابع و مآخذ

۱. اکبری، مهدی، سیف، زهرا، زارع ایبانه، حمید (۱۳۹۰)، برآورد میزان تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل در شرایط اقلیمی مختلف و با استفاده از سنجش‌ازدور، نشریه آب‌و خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، جلد ۲۵، شماره ۴-آبان، صص ۸۳۵-۸۴۴.
۲. ثنایی نژاد، حسین، نوری، سمیرا، هاشمی نیا، مجید (۱۳۹۰)، برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در منطقه مشهد. نشریه آب‌و خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، جلد ۲۵، شماره ۳، صص ۵۴۰-۵۴۷.
۳. علی‌اصغر زاده، حسنعلی، ثنایی نژاد، حسین (۱۳۸۵)، تخمین تبخیر و تعرق با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور اطلاعات جغرافیایی در حوضه آبخیز تنگ‌کنشت کرمانشاه، همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران.
۴. یعقوبی فشکی، مجید (۱۳۸۸)، کاربرد روش سبال در محاسبه تبخیر و تعرق 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.



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.