



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۱ | فروردین ۱۴۰۱ (ص ۱۲۷-۱۱۳)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.333835.669129>

(مقاله علمی - پژوهشی)

Estimation of Actual Evapotranspiration Using Automatic Calibration in PYSEBAL and METRIC Algorithms in Qazvin Plain

MOHADESE SADAT FAKHAR¹, ABBAS KAVIANI^{*}

1. Water Sciences and Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

(Received: Nov. 12, 2021- Revised: Feb. 5, 2022- Accepted: Feb. 9, 2022)

ABSTRACT

Estimation of actual evapotranspiration over large areas with appropriate time intervals is important in the optimal management of water resources. The constant need for evapotranspiration data has led to the development of several methods for estimating it. In recent years, the use of remote sensing method to estimate the rate of evapotranspiration in large areas with the desired spatial and temporal resolution has been proposed. In this study, the automatic calibration efficiency of two common mono-source evapotranspiration algorithms estimated from PYSEBAL and METRIC were compared with the results of a drainage lysimeter planted with grass in the Qazvin plain. In this regard, 15 images TM, 22 images ETM+ and 24 images MODIS without cloud and snow during the years 2000 to 2003 were used, which in total 122 outputs were obtained from both algorithms. The results of this study showed that the METRIC algorithm in all three sensors with RMSE (0.42, 0.42 and 1.05 mm / day) respectively had better performance than the PYSEBAL model. Also, the studies performed from the three sensors showed that the MODIS sensor with standard error value (0.15 mm / day) and correlation coefficient (0.98) compared to the two ETM and TM sensors with correlation coefficient values (0.97 and 0.92), standard error (0.17 and 0.59 mm/day) have been able to produce better results. The executive applications of this study can be used to determine the exact amount of evapotranspiration in irrigated lands for water allocation planning, optimization of crop production, irrigation management and assessment of land use change on water efficiency.

Keywords: Drainage Lysimeter, Remote Sensing, Daily Evapotranspiration, MODIS ,Landsat-5 و Landsat-7

تخمین تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از کالیبراسیون خودکار در الگوریتم‌های PYSEBAL و METRIC در دشت قزوین

محدثه السادات فخار^۱، عباس کاویانی^{*۱}

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ع)، قزوین، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۲۱ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۱/۲۰)

چکیده

برآورد تبخیر - تعرق واقعی در پهنه‌های وسیع و با فاصله زمانی مناسب، امری مهم در مدیریت بهینه منابع آب است. نیاز مداوم به داده‌های تبخیر - تعرق، موجب ابداع روش‌های متعددی برای برآورد آن شده است. در سال‌های اخیر استفاده از روش سنجش‌ازدور به‌منظور برآورد میزان تبخیر - تعرق در نواحی وسیع و با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مطلوب ارائه شده است. در این پژوهش کارایی کالیبراسیون خودکار دو الگوریتم رایج تبخیر - تعرق تک منبعی برآورد شده از PYSEBAL و METRIC با نتایج یک لایسیمتر زهکش‌دار کشت‌شده با چمن در محدوده دشت قزوین مورد مقایسه قرار گرفتند. در همین راستا از ۱۵ تصویر TM، ۲۲ تصویر ETM+ و ۲۴ تصویر MODIS بدون ابر و برف در طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۲ استفاده شد که در مجموع از هر دو الگوریتم ۱۲۲ خروجی حاصل شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که الگوریتم METRIC در هر سه سنجنده به ترتیب با مقدار RMSE (۰/۴۲، ۰/۴۲ و ۱/۰۵ میلی‌متر بر روز) عملکرد بهتری را نسبت به مدل PYSEBAL داشته است. همچنین بررسی‌های صورت‌گرفته از سه سنجنده مورد بررسی نشان داد که سنجنده MODIS با مقدار خطای استاندارد (۰/۱۵ میلی‌متر بر روز) و ضریب همبستگی (۰/۹۸) در مقایسه با دو سنجنده ETM+ و TM با مقدار ضریب همبستگی به ترتیب (۰/۹۷ و ۰/۹۲)، خطای استاندارد (۰/۱۷ و ۰/۵۹ میلی‌متر بر روز) توانسته است نتایج بهتری را ایجاد کند. از کاربرد اجرایی این پژوهش می‌توان به برآورد مقدار دقیق تبخیر - تعرق در اراضی تحت آبیاری برای برنامه‌ریزی تخصیص آب، بهینه‌سازی تولید محصول، مدیریت آبیاری و ارزیابی اثر تغییر کاربری روی راندمان آب اشاره نمود.

واژه‌های کلیدی: لایسیمتر زهکش‌دار، سنجش‌ازدور، تبخیر - تعرق روزانه، MODIS، Landsat-5 و Landsat-7.

مقدمه

فیزیک جو و هیدرولوژی برای محاسبه تبخیر - تعرق توسعه یافته است که مقایسه و ارزیابی آن‌ها در تحقیقات مختلف ارائه شده است (Kustas & Norman, 1996; Lee et al., 2004). مبنای اکثر روش‌های ارائه‌شده بر پایه روابط بین پارامترهای هواشناسی می‌باشد که باتوجه به کمبود و یا نقصان داده‌های هواشناسی استفاده از این روش‌ها در عمل با محدودیت مواجه است (Ayenew, 2003). وجود چنین محدودیتی باعث ایجاد انگیزه در استفاده از فناوری سنجش‌ازدور و به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای برای برآورد تبخیر - تعرق مرجع در مقیاس‌های منطقه‌ای گردیده است (Firouzi Nezamabadi & Kaviani 2015). استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور و تصاویر ماهواره‌ای یکی از روش‌های جدید در تعیین نیاز آبی گیاهان می‌باشد (Zhang et al., 2016). باتوجه به اینکه اندازه‌گیری‌های تبخیر و تعرق فقط در مقیاس نقطه‌ای و مکانی کوچک در دسترس است، داده‌های سنجش‌ازدور می‌تواند یکی از بهترین روش‌ها برای برآورد دقیق تبخیر و تعرق

تبخیر و تعرق مفهومی است که از آن برای بیان مقدار آب انتقال یافته از سطح زمین به اتمسفر در اثر تبخیر از سطح آب‌های آزاد، سطح خاک، سطح گیاه و به‌طور کلی هر سطحی که دارای رطوبت باشد، استفاده می‌شود (Li et al., 2009). تبخیر و تعرق یکی از مؤلفه‌های اصلی بیلان آبی هر منطقه و از مهم‌ترین عوامل کلیدی برای برنامه‌ریزی درست و مناسب آبیاری است. برای بهبود راندمان آب مصرفی و برآورد آن یکی از گام‌های اصلی بهبود مصرف و کنترل تلفات در بخش کشاورزی و همچنین مطالعات مربوط به بیلان آبی و زیست‌محیطی در یک منطقه است (Khoshkhoo et al., 2018). برآورد دقیق و به‌موقع تبخیر - تعرق تأثیر به‌سزا و حیاتی در حفظ منابع آب و کشاورزی و هیدرولوژی داشته که از این امر در تخمین آب موردنیاز محصولات، به‌منظور برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت خشک‌سالی استفاده می‌شود (Raziei & Pereira, 2013). روش‌های متعددی نیز بر مبنای

تصاویر MODIS پرداختند (dos Santos et al., 2020). نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مدل SEBAL به طور دقیق جریان آب را در فصل مرطوب نشان می‌دهد اما نه فصل خشک، که علت آن محدوده باریک بین پیکسل‌های سرد و گرم در یک تصویر بود. زیرا الگوریتم برای پارامترهای ورودی و به‌ویژه در فصل خشک، به این محدوده باریک متکی بود. الگوریتم SEBAL علی-رغم موفقیت بالایی که محاسبه تبخیر - تعرق داشته است متکی به فردی متخصص برای انتخاب پیکسل سرد و گرم بوده است و قابل استفاده برای کاربرانی کم تجربه نخواهد بود. PYSEBAL نسخه‌ای از الگوریتم SEBAL است که در محیط پایتون توسعه یافته است (Hessels et al., 2017). از جمله ویژگی‌های این مدل انتخاب تمام خودکار پیکسل‌های سرد و گرم در میان بسیاری از ویژگی‌های دیگر همچون جداسازی تبخیر از تعرق و برآورد نقشه‌های خروجی از مقدار رطوبت خاک و غیره از جمله ویژگی‌های ارزشمند این الگوریتم محسوب می‌شود. با توجه به دقت بالای این الگوریتم در برآورد تبخیر - تعرق، پژوهش‌های مختلفی در همین راستا در کشورهای مختلف به انجام رسیده است به طوری که در پژوهشی به بررسی عملکرد تبخیر - تعرق در حوضه آبریز Makanya واقع در کشور آفریقا با استفاده از الگوریتم PYSEBAL و توسط تصاویر Landsat 8 و Sentinel-2 بررسی شد. نتایج PYSEBAL با توجه به اطلاعات محلی در مورد عملکرد محصول، تخصیص آب و شیوه‌های مدیریت کشاورزی در مناطق مختلف کشاورزی و اکولوژیکی در حوضه آبریز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد عملکرد شبیه‌سازی شده با عملکرد محصول گزارش شده مطابقت دارد (Nyolei et al., 2019). در پژوهشی بر روی منطقه Bekka Valley در لبنان از اطلاعات سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۷ تصاویر Landsat و روش‌های METRIC و PYSEBAL استفاده شده است. برآورد میانگین سالیانه ET در دوره کشت در این ۳۴ سال 652 ± 53 میلی‌متر بود که این نتیجه مشترکاً از دو روش METRIC و PYSEBAL به دست آمده است. بیشترین میزان ET برابر با ۶۴٪ از تبخیر از سطح آب و خاک در فصل خشک (ماه‌های می و اکتبر) به دست آمده است و ET در فصل مرطوب بیش از ۷۰ درصد بارش در Bekaa Valley است و روش METRIC، ۱۵ درصد برآورد بیشتری را نسبت به PYSEBAL برای زمین‌های غیر کشاورزی در تابستان نشان می‌دهد (Jaafar & Ahmad, 2020). در پژوهشی به بررسی میزان تبخیر - تعرق در منطقه Burkina Faso به وسعت ۱۲۰۰ هکتار پرداخته شد.

در مناطق بزرگ باشد (Kazamias & Sapountzis, 2017). با توجه به اینکه اکثر مطالعات در مقیاس منطقه‌ای صورت می‌گیرند تعمیم این اطلاعات از حالت نقطه‌ای به منطقه‌ای از ضرورت بالایی برخوردار است. در این راستا، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای دارای مزایایی از جمله پایین تر بودن هزینه جمع‌آوری داده‌ها، امکان برداشت داده‌های بهنگام از تمام سطح منطقه، مرتفع کردن مشکل دسترسی به محل و حضور فیزیکی در آن، نیاز به نیروی انسانی کم و عملیات زمینی بسیار محدود می‌باشد (Khoshkhou & Nikmehr, 2021). سالیان اخیر الگوریتم‌های متعددی برای برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از سنجش از دور ارائه شده است. این مدل‌ها که بر رابطه‌ی بیلان انرژی استوار هستند، روش‌های توازن انرژی سطحی، نام دارند از جمله آن‌ها می‌توان به الگوریتم‌هایی همچون SEBS^۱، SEBAL^۲ و METRIC^۳ اشاره کرد که هر کدام نرخ تبخیر - تعرق را با دقت‌های مختلفی محاسبه می‌کند. مدل‌های بیلان انرژی عمدتاً به دمای سطح زمین بستگی دارد. این مدل‌ها اطلاعاتی در زمینه جریان انرژی در مناطق را ارائه می‌دهد (Gowda et al., 2008). در حالی که اندازه‌گیری مستقیم تبخیر - تعرق با استفاده از لایسیمترها و یا روش‌های آترودینامیکی (همچون نسبت بوون^۴ و ادی کوواریانس^۵) امکان‌پذیر است، نوع مکانی-زمانی تبخیر - تعرق زمین در مقیاس منطقه‌ای را می‌توان از طریق مدل‌های مبتنی بر سنجش از دور و با استفاده از سنسور-های حرارتی ماهواره‌ها، برآورد کرد (Yilmaz et al., 2014). برآورد سری زمانی تبخیر - تعرق در مقیاس منطقه‌ای به منظور مدل‌سازی در پایداری منابع آب زیرزمینی و اکوسیستم‌های آبیاری شده ضروری است (Senay et al., 2016). تاکنون پژوهش‌های مختلفی در سرتاسر جهان در زمینه الگوریتم‌های بیلان انرژی روی سطح انجام شده است. به طوری که در مطالعه‌ای به بررسی الگوریتم SEBAL به وسیله تصاویر Landsat7-ETM+ با استفاده از شاخص‌های آماری به مقایسه آن با داده‌های لایسیمتری مزرعه تحقیقاتی در کشور هند پرداخت (Bala et al., 2016). نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که الگوریتم SEBAL با مقدار $RMSE=0.56$ میلی‌متر بر روز از دقت خوبی برخوردار است همچنین طبق بررسی شاخص R-RMSE نشان داد که می‌توان از الگوریتم SEBAL برای برآورد تبخیر - تعرق در اراضی با وسعت بالا استفاده کرد. در پژوهشی دیگر به بررسی الگوهای مکانی-زمانی بیلان انرژی و تبخیر - تعرق در طول خشک‌سالی شدید برای مناطق خشک در برزیل با استفاده از

که نشان از دقت بالای مدل در محاسبه تبخیر- تعرق دارد. در پژوهشی دیگر محققان با به‌کارگیری الگوریتم METRIC به‌منظور برآورد تبخیر - تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat 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 به‌منظور برآورد پارامترهای مذکور بسیار کم است. در ادامه نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان داد که انتخاب پیکسل سرد و گرم تأثیر بسزایی بر میزان دقت الگوریتم METRIC به‌منظور برآورد تبخیر - تعرق دارد (Liaquat & Choi, 2015). در پژوهشی دیگر مقدار تبخیر - تعرق حاصل از سه روش S5EB، METRIC و VI-TS در حوضه رودخانه Heihe دومین رودخانه بزرگ در شمال غرب کشور چین مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت نتایج حاصل از آن نشان داد که الگوریتم METRIC نسبت به دو روش دیگر دقت بالاتری در برآورد تبخیر - تعرق دارد. ایشان دقت نتایج حاصل از الگوریتم METRIC را وابسته به انتخاب دقیق پیکسل‌های گرم و سرد دانستند (Lian & Huang, 2016).

مدل‌های SEBAL و METRIC علی‌رغم اینکه گسترش و موفقیت بالایی در برآورد تبخیر - تعرق داشته است به‌منظور برآورد مقادیر، همواره نیاز به فردی متخصص و آشنا با منطقه خواهد داشت. به همین منظور در پژوهشی به‌منظور تعیین پیکسل‌های سرد و گرم، فیلترهایی را بر روی تصاویر موردنظر اعمال نمودند و سپس با استفاده از روش‌های آماری، پیکسل‌های سرد و گرم را انتخاب کردند این روش به‌صورت نیمه اتوماتیک بوده و از میانگین دمای پیکسل‌های سرد و گرم منتخب برای انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم استفاده کردند که این امر منجر به ایجاد خطا و از دست رفتن خصوصیات واقعی هر پیکسل خواهد شد و به همین منظور نمی‌توان این مورد را به‌عنوان معیاری مناسب برای انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم در نظر گرفت (Allen et al., 2013). در پژوهشی در سال ۲۰۱۷ روشی کاملاً اتوماتیک برای تعیین پیکسل‌های سرد و گرم ارائه شد که برخلاف روش‌های قبلی دیگر نیازی به انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم توسط کاربر نخواهد داشت (Bhattarai et al., 2017). در تحقیقی دیگر در قسمت غربی حوضه دریاچه ارومیه (Tasumi, 2019)، به بررسی تبخیر - تعرق با استفاده از الگوریتم METRIC در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ میلادی و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پرداخت. الگوریتم برآورد شده به‌منظور ارزیابی دقت با روش FAO-56 مقایسه شد. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان از همبستگی بالا بین مقادیر مقایسه شده داشت و برآورد تبخیر -

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مقدار تبخیر - تعرق در طول فصل رشد به‌طور متوسط با مقادیر روزانه‌ی (۷/۷ تا ۴/۰۹) میلی‌متر بر روز توانسته است رضایت‌بخش باشد و استفاده از مدل PYSEBAL در محیط‌های نیمه‌خشک می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه استراتژی‌ها برای بهبود مدیریت آب آبیاری در کشور-هایی با اقلیم خشک باشد (Sawadogo, Gundogdu, et al., 2020). در پژوهشی در آدانا ترکیه به برآورد تبخیر - تعرق واقعی با مدل PYSEBAL و مقایسه آن با تبخیر - تعرق واقعی اندازه‌گیری شده به‌وسیله لایسیمتر پرداختند. در این پژوهش از پنج تصویر Landsat5-TM استفاده کردند. نتایج نشان داد که رابطه خوبی بین تبخیر - تعرق برآورد شده و مقدار اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر مشاهده شده است. به‌طوری‌که ضریب همبستگی $RMSE=0.51$ و 0.73 میلی‌متر بر روز شد. در نتیجه تبخیر - تعرق واقعی محصول سوپا را می‌توان با دقت بالا در آدانا ترکیه تخمین زد (Sawadogo, Hessels, et al., 2020). همچنین در پژوهشی در لبنان با توجه به تغییرات آب‌وهوایی به بررسی تبخیر - تعرق فصلی در فصل‌های بهار و تابستان با استفاده از الگوریتم PYSEBAL و مقایسه مقادیر محاسبه‌شده با استفاده از روش FAO-56 پرداختند که مقدار $RMSE$ در فصل بهار و تابستان به ترتیب برابر با 0.38 و 1.93 میلی‌متر در روز شد. همچنین مقدار MAE برآورد شده بین الگوریتم و روش FAO-56 به ترتیب 0.33 و 1.64 میلی‌متر در روز برآورد شد (Caiserman & Faour, 2021). الگوریتم METRIC توسط (Allen et al., 2007) ارائه شده است. فرآیند محاسبات تبخیر - تعرق در مدل METRIC مشابه با مدل SEBAL می‌باشد و در موارد بسیار محدودی دارای اختلافات جزئی هستند. اختلاف مدل METRIC با مدل SEBAL یکی در برآورد مقدار شار تابش خالص و دیگری در برآورد مقدار شار گرمای خاک است. پایه و اساس این روش را ارتباط بین تشعشعات دریافتی توسط ماهواره‌ها از سطح زمین در باندهای مرئی و مادون‌قرمز حرارتی و همچنین تفاوت هیدرولوژیکی سطوح زمین را تشکیل می‌دهد. آلبیدوی سطح، دمای سطح و شاخص پوشش گیاهی مؤلفه‌های کلیدی در این الگوریتم هستند که به‌وسیله داده‌های ماهواره‌ای چند طیفی قابل برآورد هستند. این مدل به استفاده از روابط تئوری و فیزیکی تکیه دارد و نیازی به نقشه کاربری اراضی ندارد. تاکنون مطالعات گوناگونی در سطح جهانی و داخلی در خصوص به‌کارگیری الگوریتم METRIC صورت گرفته است به‌طوری‌که (Allen et al., 2007) در پژوهشی با معرفی و کاربرد الگوریتم METRIC میزان تبخیر - تعرق ماهانه و فصلی را در حوضه رودخانه Bear و دشت شرقی رودخانه Snake در ایالات متحده محاسبه نمودند، نتایج حاصل از الگوریتم با نتایج به‌دست‌آمده از لایسیمتر مقایسه شد،

محدوده مطالعاتی ارائه شده است. دشت قزوین یکی از مهم‌ترین دشتهای کشاورزی در کشور محسوب می‌شود به همین دلیل برای هدف این پژوهش انتخاب شده است.

داده‌های هواشناسی و مشخصات لایسیمتر

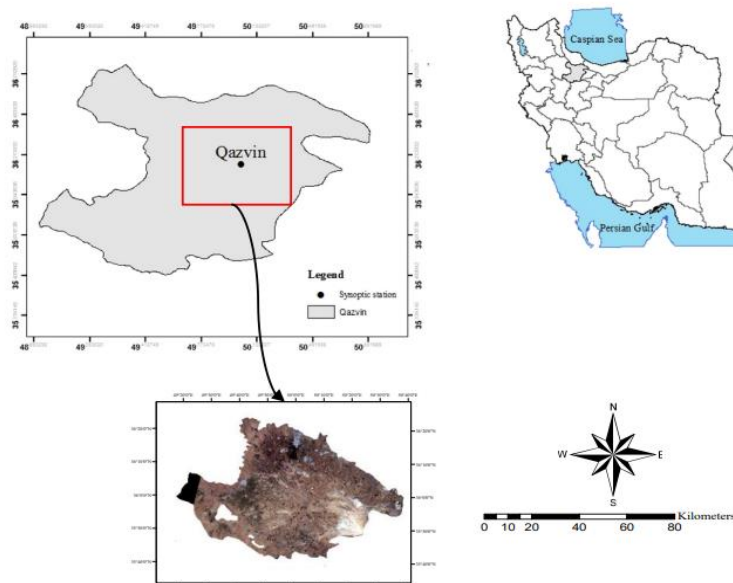
انجام مطالعات مبتنی بر سنجش از دور مستلزم استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی است. در این مطالعه از داده‌های ثبت شده توسط ایستگاه سینوپتیک قزوین در سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۲ استفاده شده است که این داده‌ها عبارت‌اند از دمای هوا (برحسب سانتی‌گراد) به صورت دمای کمینه و بیشینه و دمای متوسط روزانه، سرعت باد در ارتفاع ده متری (برحسب متر بر ثانیه) که در محاسبات به ارتفاع ۲ متری تبدیل می‌گردد و رطوبت نسبی (برحسب درصد). لایسیمتر یکی از معتبرترین روش‌های اندازه‌گیری مستقیم تبخیر - تعرق است. داده‌های مرتبط با تبخیر - تعرق توسط لایسیمتر زهکش‌دار در منطقه‌ای واقع در ایستگاه تحقیقاتی آب‌و‌خاک اسماعیل‌آباد قزوین با ابعاد ۱×۲ و به عمق ۱/۵ متر مساحتی برابر با ۲ مترمربع را می‌پوشاند. باتوجه به اینکه ابعاد لایسیمتر برابر با ۲ مترمربع می‌باشد به منظور ایجاد یکنواختی پوشش گیاهی علاوه بر کشت داخل لایسیمتر، در اطراف آن به ابعاد ۵۰×۵۰ متر (۲۵۰۰ مترمربع) کشت انجام گرفت و از تاریخ کاشت تا پایان دوره مورد بررسی، مراتب لازم از قبیل کوتاه کردن به موقع، آبیاری مداوم و منظم باتوجه به اندازه‌گیری، صورت گرفت؛ بنابراین تمام شرایط مزرعه با شرایط لایسیمتر یکسان بود (Ebrahimi pak, 2000).

تعرق توسط الگوریتم METRIC در اراضی بدون پوشش گیاهی با بیش‌برآورد همراه بوده است. با جمع‌بندی مطالب فوق می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که این امکان وجود دارد که کالیبراسیون خودکار پیکسل‌های سرد و گرم الگوریتم تأثیر بسزایی در برآورد صورت گرفته خواهد داشت. بر این اساس هدف از پژوهش حاضر ارزیابی کالیبراسیون خودکار الگوریتم PYSEBAL و METRIC با استفاده از تصاویر MODIS، Landsat-5-TM و Landsat-7-ETM+ در طول سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۲ و مقایسه آن با استفاده از داده‌های لایسمتری منطقه به منظور ارزیابی الگوریتم‌ها و مقایسه خروجی‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه و داده‌های تحقیق

منطقه مورد مطالعه دشت قزوین با عرض جغرافیایی $35^{\circ}43'6.0''N$ تا $36^{\circ}23'46.8''N$ و طول جغرافیایی $49^{\circ}25'10.0''E$ تا $50^{\circ}38'11.4''E$ در دامنه جنوبی رشته‌کوه‌های البرز واقع شده است. این دشت با مساحت ۵۰۶۲۱۸ هکتار محدوده مرکزی و شرق استان را تشکیل می‌دهد که شیب آن از شمال غرب به جنوب شرق امتداد دارد. مطابق با نقشه DEM (SRTM) پایین‌ترین و بالاترین نقاط ارتفاعی استان به ترتیب برابر با ۲۴۵ و ۴۱۱۹ متر می‌باشد که میانگین ارتفاع از سطح دریا برابر با ۱۲۹۰ متر در نظر گرفته می‌شود. از نظر آب‌وهوایی منطقه مورد مطالعه در اقلیم سرد و نیمه‌خشک قرار می‌گیرد که متوسط بارش سالیانه در منطقه تقریباً ۳۱۰ میلی‌متر است (Hedayati and Kakavand, 2012). در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت قزوین

داده‌های ماهواره‌ای

و Landsat-7-ETM+ استفاده شد که جزئیات آن در جدول (۱) نشان داده شده است.

در این مطالعه از تصاویر سه سنجنده MODIS، Landsat-5-TM،

جدول ۱- داده‌های سنجنده‌های ورودی به همراه مشخصات هر یک از آن‌ها به منظور اجرای الگوریتم

تصاویر استفاده شده	نام سنجنده	قدرت تفکیک مکانی (متر)	قدرت تفکیک زمانی
نقشه رقومی ارتفاعی (DEM)	SRTM	۳۰	-
بازتاب سطحی (Albedo)	MOD09GA	۵۰۰	روزانه
دمای سطح زمین (LST)	MOD11A1	۱۰۰۰	روزانه
شاخص پوشش گیاهی (NDVI)	MOD13Q1	۲۵۰	۱۶ روز
باند های ۱ الی ۵ و ۷	LANDSAT-TM	۳۰	۱۵ روز
باند های ۱ الی ۷	LANDSAT-ETM+	۳۰	۱۵ روز

پیکسل استفاده شد و مشخصات ظاهری تصاویر با یکدیگر ترکیب شده است که این امر موجب افزایش دقت مکانی و زمانی در سنجنده MODIS می‌شود.

روش تحقیق
الگوریتم PYSEBAL

در PYSEBAL محیط پایتون توسعه پیدا کرده است که الگوریتم SEBAL را با پردازش نیمه خودکار تصاویر ماهواره‌ای اجرا می‌کند. PYSEBAL انتقال انرژی از تابش خورشید به انتقال آب به اتمسفر را تخمین می‌زند. این مدل پیکسل‌های سرد و گرم را به صورت خودکار محاسبه کرده به طوری که باتوجه به کدهای نوشته شده در محیط پایتون و ایجاد یکسری فاکتورها و شرایط از پیش تعیین شده برای انتخاب پیکسل این امکان به صورت خودکار انجام می‌شود. در الگوریتم SEBAL خود شخص به صورت دستی این کار را انجام می‌داد ولی امروزه با استفاده از نرم‌افزار پایتون امکان کد نویسی برای این حالت وجود دارد. از جمله ویژگی‌های این مدل می‌توان به تخمین زیست‌توده و رطوبت خاک نیز اشاره کرد. اساس این مدل استفاده از معادله بیلان انرژی و محاسبه مقدار شار گرمای نهان تبخیر به عنوان باقی‌مانده این معادله برای هر پیکسل می‌باشد.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این معادله λET شار گرمای نهان تبخیر (W/m^2)، R_n میزان تابش خالص خورشیدی (W/m^2)، G شار گرمای خاک (W/m^2) و H شار گرمای محسوس (W/m^2) می‌باشد. انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم، شامل تعیین یک معیار از پیش تعیین شده است. معیارهای از پیش تعیین شده شامل دمای سطح (T_s)،

در این پژوهش علاوه بر دو سنجنده LANDSAT_TM و LANDSAT_ETM+، از برخی از محصولات سنجنده MODIS استفاده شد که بر روی دو ماهواره Terra و Aqua نصب شده است. این دو ماهواره در تاریخ‌های ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ توسط سازمان ملی هوا و فضای آمریکا (NASA) در مدار زمین قرار گرفته‌اند. آن‌ها در دو مسیر مخالف، هر روز دو نوبت به دور زمین می‌گردند و محصولات متنوعی برای کاربردهای مختلف زمینی، اقیانوسی و جوی را تولید و عرضه می‌کنند (Khoshkhou et al., 2018). ماهواره Terra از سمت شمال به جنوب حرکت می‌کند. زمان‌های عبور این ماهواره از استوا حدود ۱۰:۳۰ صبح و ۲۲:۳۰ به وقت گرینویچ است. این سنجنده در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتری از سطح زمین و با عرض پوشش ۲۳۳۰ کیلومتر بازتاب‌های دریافت شده از پدیده‌های مختلف سطح زمین را در ۳۶ باند طیفی (از ۰/۴ تا ۱۴/۴ میکرومتر) متشکل از ۱۱ باند در طیف مرئی، ۵ باند در طیف مادون قرمز نزدیک، ۱۴ باند در طیف مادون قرمز کوتاه و میانی و ۶ باند در طیف مادون قرمز بلند تهیه می‌کند. باتوجه به اینکه تفکیک مکانی آن از ۲۵۰ متر تا ۱۰۰۰ متر متغیر است. عامل محدودکننده در چنین اندازه‌هایی وجود ابرناکی است که باعث می‌شود بازتاب‌های زمینی به سنجنده نرسد. و اندازه‌گیری انجام نشود. در این پژوهش از محصول دمای سطح زمین (LST) با کد MOD11A1، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، با کد MOD13Q1) و همچنین از محصول MOD09GA به منظور استخراج مناطق ابری و دارای گردوغبار استفاده گردید که تفکیک مکانی و زمانی تمامی سنجنده‌ها در جدول (۱) اشاره شده است. باتوجه به اینکه تفکیک مکانی تصاویر MODIS با یکدیگر یکسان نیست در این پژوهش از فرآیند تلفیق کردن در سطح و واحد

حدود بالا و پایین بیلان انرژی در سطح استفاده می‌کند. پارامتر-هایی نظیر G ، R_n ، H ، dT ، C_p و ρ تماماً همان پارامترهایی هستند که در الگوریتم PYSEBAL معرفی شده‌اند. الگوریتم METRIC همانند الگوریتم PYSEBAL در محیط پایتون انجام می‌شود ولی با این تفاوت که علاوه بر شاخص‌هایی که در الگوریتم PYSEBAL به کار گرفته شده شاخص LAI و Z_{om} نیز استفاده شده به عبارتی تعداد فاکتورهایی که به منظور انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم به کار گرفته شده‌اند در الگوریتم METRIC بیشتر بوده، انتخاب این پیکسل‌ها تأثیر عمده‌ای بر دقت محاسبات صورت گرفته خواهد داشت به طوری که یکی از اساسی‌ترین بخش‌های اجرای این مدل‌ها، انتخاب پیکسل سرد و گرم می‌باشد. روش محاسبه H لحظه‌ای در الگوریتم METRIC مشابه الگوریتم PYSEBAL است. در هر دو الگوریتم یک رابطه خطی بین T_s و dt فرض می‌شود و با این حال تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین این دو الگوریتم وجود دارد. به طوری که اختلاف الگوریتم METRIC با الگوریتم PYSEBAL یکی در برآورد مقدار شار تابش خالص و دیگری در برآورد مقدار شار گرمای خاک است. به عنوان مثال در الگوریتم METRIC ($H_{cold}=0$) نخواهد بود. در پیکسل‌های گرم فرض می‌شود که نرخ تبخیر - تعرق واقعی برابر صفر است؛ بنابراین با استفاده از رابطه ۱ و ۴ مقدار dT در پیکسل گرم (dT_{hot}) محاسبه می‌شود. مقدار H و dt در پیکسل‌های سرد نیز به ترتیب مطابق روابط ۸ و ۹ قابل محاسبه می‌باشد.

$$H_{cold} = R_n - G - 1.05\lambda ET_{ref} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$dt_{cold} = \frac{H_{cold} \times r_{drcold}}{\rho_{cold} \times C_p} \quad (\text{رابطه ۹})$$

در فرمول (۸)، λET_{ref} شار گرمای نهان در پیکسل سرد برابر با $1/0.5 \times ET_r$ در نظر گرفته می‌شود، زیرا تبخیر - تعرق گیاه مرجع در مناطقی با پوشش گیاهی بالا، حدوداً ۵ درصد بیشتر از سایر مناطق است (Tasumi et al., 2005). به منظور محاسبه شار گرمای خاک در مدل METRIC، (Tasumi, 2003) معادله (۱۰) را پیشنهاد داد که در این تحقیق نیز از آن‌ها استفاده شده است. (رابطه ۱۰)

$$\begin{cases} G = [0.05 + 0.18e^{-0.521 \times LAI}] \times R_n \\ G = [1.8(T_{s,datum} - 273.15)R_n + 0.084]R_n \end{cases}$$

در الگوریتم METRIC مقدار تابش خالص همانند رابطه (۲) محاسبه خواهد شد و تنها اختلاف در برآورد مقدار تابش خالص در مقدار ضریب شفافیت اتمسفر (τ_{sw}) است که سبب ایجاد اختلاف در مقادیر خروجی تابش طول موج کوتاه ورودی ($R_{s\downarrow}$)، تابش طول موج بلند ورودی از اتمسفر ($R_{L\downarrow}$) و در نتیجه مقادیر تابش خالص (R_n) می‌شود. از معادلات (۱۱) و (۱۲) به

شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، طول زبری برای انتقال مومنتوم (Z_{om}) و آلبیدو سطح (α) است. مقدار R_n با کسر تمام جریان‌های تابشی خروجی از همه شارهای تابشی ورودی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} + \varepsilon_0 R_{L\downarrow} - \varepsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در این معادله R_s طول موج کوتاه ورودی (W/m^2)، R_L طول موج بلند ورودی (W/m^2)، ε_0 انتشار سطحی، σ ثابت استفان بولتزمن ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$) و T_s دمای سطح زمین (برحسب کلون) است. G به عنوان کسری از R_n محاسبه می‌شود و PYSEBAL از معادله تجربی G توسعه داده شده توسط باستیانسن استفاده می‌کند (Bastiaanssen, 1995).

(رابطه ۳)

$$G = T_{s,datum} (0.0038 + 0.007\alpha)(1 - 0.98NDVI^4) \times R_n$$

$T_{s,datum}$ دمای تصحیح شده از سطح زمین است و T_s بر اساس Dem منطقه مورد نظر و با در نظر گرفتن شیب به دست می‌آید. یک کالیبراسیون داخلی H در PYSEBAL اعمال می‌شود بنابراین نیازی به تصحیح اتمسفری T_s نخواهد بود. H در مدل PYSEBAL با استفاده از مقاومت آئرو دینامیکی مطابق معادله (۴) محاسبه می‌شود.

$$H = \frac{\rho \times C_p \times dT}{r_{ah}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن ρ چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه در فشار معین [$1004 J kg^{-1} K^{-1}$]، r_{ah} مقاومت آئرو دینامیکی در برابر انتقال حرارت بین Z_1 و Z_2 (m/s) است. پارامتر dT اختلاف دما بین دو ارتفاع نزدیک به سطح است ($Z_1 = 0.1 m$ و $Z_2 = 2 m$) بالای لایه کنوپی (K)، که به عنوان یک تابع خطی از دمای سطحی اصلاح شده $T_{s,datum}$ ، تخمین زده می‌شود (معادله ۵). ضرایب (a) و (b) در معادله (۵) برای پیکسل‌های سرد و گرم به صورت تکراری تعیین می‌شود؛ بنابراین برای هر تصویر ماهواره‌ای یا منطقه خاص مقداری متفاوت است.

$$dT = a + b \times T_{s,datum} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$a = \frac{dT_{hot} - dt_{cold}}{T_{s,datum,hot} - T_{s,datum,cold}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$b = \frac{dT_{hot} - a}{T_{s,datum,hot}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

الگوریتم METRIC

الگوریتم METRIC همانند الگوریتم SEBAL به منظور برآورد نرخ تبخیر - تعرق واقعی، از دو پیکسل سرد و گرم برای تعیین

الگوریتم PYSEBAL و METRIC و داده‌های ورودی در آن‌ها نشان داده شده است. ورودی‌های این الگوریتم به ۴ دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شود که دسته اول شامل ورود تصاویر و مشخص کردن محل خروجی هر یک از آن‌ها، دسته دوم شامل ورود داده‌های ایستگاه هواشناسی همچون: سرعت باد، دمای هوا، ساعت آفتابی و رطوبت نسبی است. دسته سوم معرفی نقشه طبقات ارتفاعی و اعمال تصحیحات هندسی و اتمسفری باتوجه به تعداد باندها به‌ویژه باند مادون قرمز و حرارتی و نوع سنجنده معرفی شده در الگوریتم‌ها خواهد بود و نهایت دسته چهارم فرآیند اجرایی مدل شامل معرفی خودکار پیکسل‌هایی که شرایط انتخاب به‌عنوان پیکسل‌های سرد و گرم، را دارا بوده معرفی می‌کند و در نهایت کالیبراسیون خودکار مقدار شار حرارتی محسوس به‌منظور برآورد تبخیر - تعرق در منطقه مورد مطالعه خواهد بود.

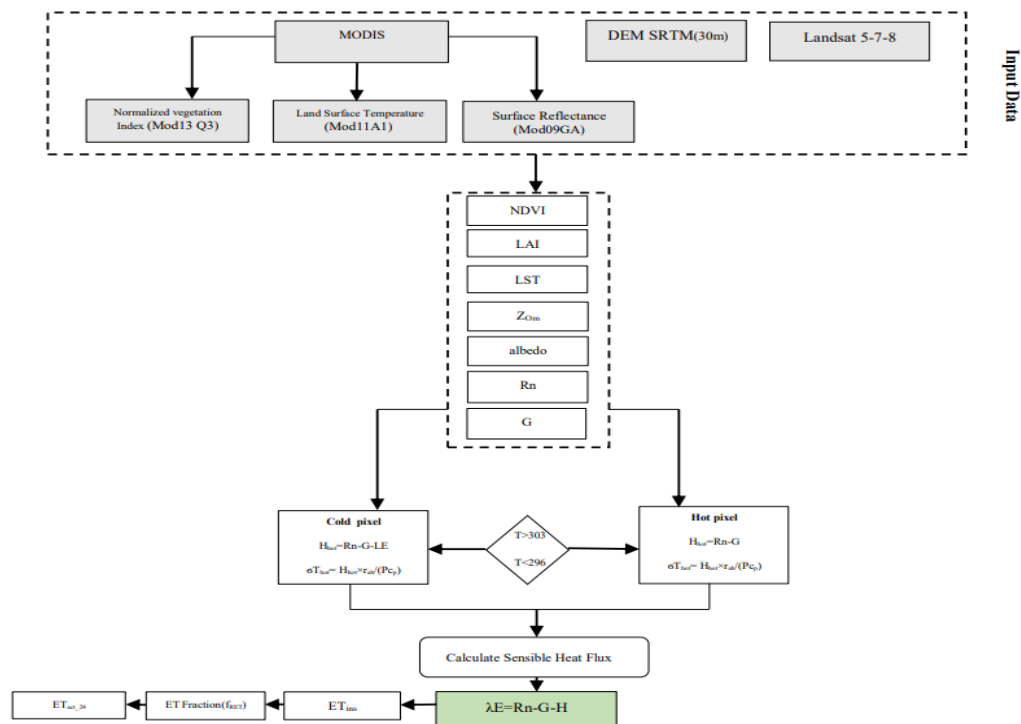
ترتیب به‌منظور محاسبه (τ_{sw}) در الگوریتم PYSEBAL و METRIC استفاده می‌شود.

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times Z \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

(رابطه ۱۲)

$$\tau_{sw} = 0.35 + 0.627 \times \exp \left[\frac{-0.00146p}{k_t \cos \theta_{hor}} - 0.75 \left(\frac{\omega}{\cos \theta_{hor}} \right)^{0.4} \right]$$

در این پژوهش، محاسبه نرخ محاسبه تبخیر - تعرق واقعی در الگوریتم METRIC همانند الگوریتم PYSEBAL در محیط پایتون انجام شده است که همچون الگوریتم PYSEBAL، قابلیت اجرا در سیستم‌عامل‌های مختلف را دارد. الگوریتم‌های PYSEBAL و METRIC در قالب نزدیک به ۳۱۰۰ خط کد نوشته شده است که در شکل ۲ نمایی از مراحل کلی اجرای



شکل ۲- نمای کلی از کالیبراسیون خودکار الگوریتم PYSEBAL و METRIC با استفاده از تصاویر MODIS و LANDSAT

حدی، می‌توانست سبب ایجاد خطای قابل توجه در برآورد تبخیر - تعرق شود.

مهم‌ترین عوامل بهبودیافته در الگوریتم PYSEBAL و METRIC شامل، بهبود در انتخاب خودکار پیکسل‌های سرد و گرم، امکان اعمال محدوده خاص در مجاورت ایستگاه هواشناسی به‌منظور انتخاب پیکسل‌های حدی، امکان انتخاب پیکسل‌های سرد بر روی پهنه‌های آبی و یا مزارعی که به‌خوبی آبیاری شده و

از جمله مزایای الگوریتم PYSEBAL و METRIC نسبت به سایر مدل‌های موجود، کالیبراسیون کاملاً خودکار الگوریتم و انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم به‌صورت خودکار می‌باشد. به‌طوری‌که در مدل‌های قبلی این کار به‌صورت دستی و توسط کاربر انجام می‌شد و در صورت نداشتن شناخت کافی نسبت به منطقه، به سبب تراکم و ناهمگنی پوشش کاربری اراضی در دشت و همچنین تغییر در دمای متوسط برای مجموعه پیکسل‌های

طبقات ارتفاعی (30 m) SRTM اصلاح شده‌اند و همچنین پیکسل‌هایی که دارای حداکثر مقدار NDVI هستند، به دست می‌آید. در مدل METRIC علاوه بر NDVI، از شاخص سطح برگ (LAI) نیز استفاده شده در حالی که پیکسل‌های گرم در هر دو الگوریتم بر اساس پراکندگی NDVI و همچنین پیکسل‌هایی که در آن‌ها دمای سطح با توجه به پوشش گیاهی دارای حداکثر مقدار باشند، انتخاب می‌شوند. در جدول (۳) خصوصیات از پیکسل‌هایی که به‌عنوان سرد و گرم انتخاب می‌شوند، اشاره شده است

هیچ‌گونه تنشی بر آن‌ها وارد نشده است، امکان انتخاب پیکسل گرم بر روی مناطق بایر و یا مناطق با پوشش گیاهی فقیر و در نهایت امکان تغییر آستانه‌های شاخص‌های پوشش گیاهی برای انتخاب پیکسل‌های حدی می‌باشد. که تمامی موارد مطرح شده از جمله تفاوت‌های این دو الگوریتم نسبت به مدل‌های قبل تر خود دارا می‌باشد.

در مدل PYSEBAL و METRIC پیکسل‌های سرد بر اساس پراکندگی پیکسل‌های دمای سطح و با استفاده از نقشه

جدول ۳- شرایط انتخاب پیکسل سرد و گرم در مدل PYSEBAL و METRIC

مقدار	شاخص	مقدار	شاخص		
۳۰۳-۳۲۰	T_s (K)	۲۹۶-۲۷۸	T_s (K)		
۰ - ۰/۴	NDVI	۰/۶۵ - ۰/۹	NDVI	پیکسل‌های سرد	PYSEBAL
۰/۰۱ - ۰/۳	albedo	۰/۱ - ۰/۳	albedo		
۲۱۷۷-۱۱۳۳	تغییرات ارتفاعی (m)	۲۱۷۷-۱۱۳۳	تغییرات ارتفاعی (m)		
۳۲۰-۳۰۳	T_s (K)	۲۹۶-۲۷۸	T_s (K)		
۰ - ۰/۴	NDVI	۰/۶۵ - ۰/۹	NDVI		
۰/۰۱ - ۰/۳	albedo	۰/۱ - ۰/۳	albedo	پیکسل‌های سرد	METRIC
<۳	LAI	۶-۳	LAI		
۲۱۷۷-۱۱۳۳	تغییرات ارتفاعی (m)	۲۱۷۷-۱۱۳۳	تغییرات ارتفاعی (m)		
<۰/۰۰۵	Z_{om}	۰/۰۳ - ۰/۰۸	Z_{om}		

MODIS بدون ابر و برف استفاده شده است که در مجموع در هر دو الگوریتم ۱۲۲ خروجی در این پژوهش اجراء شده است.

شاخص‌های آماری

باهداف مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم PYSEBAL و METRIC با مقادیر مشاهداتی از لایسیمتر در منطقه مورد مطالعه از آماره-هایی متداول همچون میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین جذر مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد (SE) خطای اربیب میانگین (MBE) و ضریب همبستگی (r) استفاده شده است. که در آن‌ها ET_{mod} مقدار تبخیر - تعرق برآورد شده از هر یک از مدل‌ها، ET_L مقدار تبخیر - تعرق مشاهده شده از لایسیمتر، $\overline{ET_L}$ میانگین تبخیر - تعرق مشاهده شده از لایسیمتر و $\overline{ET_{mod}}$ میانگین تبخیر - تعرق برآورد شده از هر یک از مدل‌ها و همچنین n تعداد داده‌ها می‌باشد.

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mod} - ET_L)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |ET_{mod} - ET_L|}{n} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mod} - ET_L)}{n} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$SE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mod} - ET_L)^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

$$r = \frac{|\sum (ET_L - \overline{ET_L})(ET_{mod} - \overline{ET_{mod}})|}{\sqrt{\sum (ET_L - \overline{ET_L})^2 \sum (ET_{mod} - \overline{ET_{mod}})^2}} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

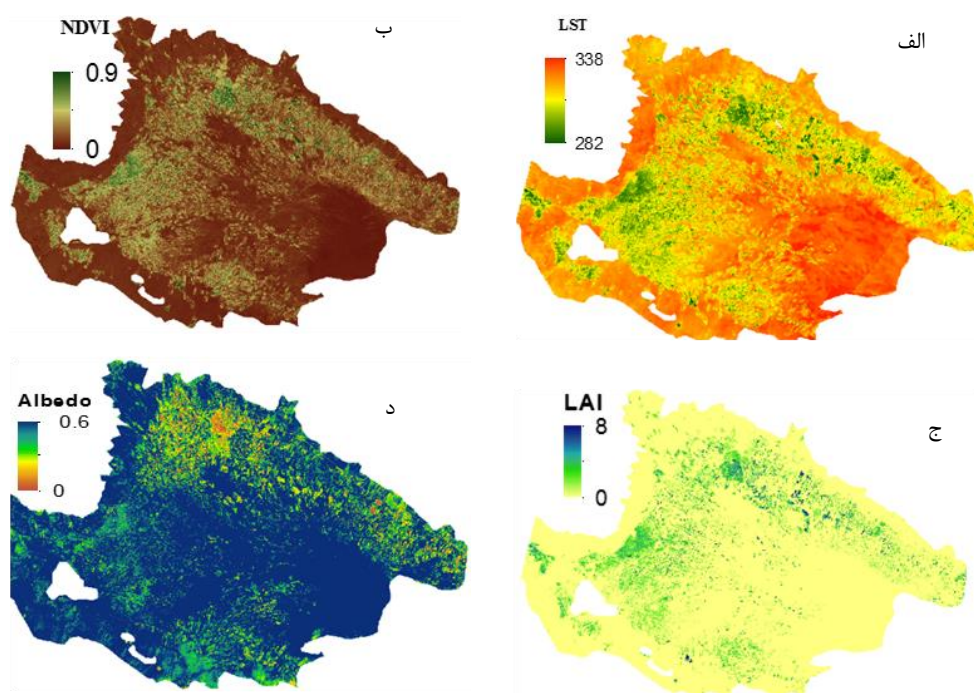
الگوریتم PYSEBAL و METRIC به منظور برآوردهای نسبتاً صحیح‌تر تبخیر - تعرق در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها و محاسبه نمودن اثرات حرکت افقی توده هوای منطقه‌ای ایجاد شده است. به همین منظور در این پژوهش برای محاسبه تبخیر - تعرق واقعی در منطقه مورد مطالعه از سه نوع سنجنده MODIS، LANDSAT-TM+ و LANDSAT-ETM+ استفاده شد. به دلیل آنکه قدرت تفکیک مکانی سنجنده MODIS برابر با 1(Km) است پیدا کردن چنین پیکسل سردی در اکثر مناطق امری مشکل خواهد بود به همین منظور (Allen et al., 2007) پیشنهاد کردند در زمان خارج از فصل رشد گیاه و یا در صورت استفاده از سنجنده‌هایی همچون MODIS به جای استفاده از ضریب ۱/۰۵ برای برآورد تبخیر - تعرق واقعی، می‌توان نسبت تبخیر - تعرق پیکسل سرد به تبخیر - تعرق مرجع را تابعی از شاخص NDVI در نظر گرفت. در این پژوهش اندازه‌گیری تبخیر - تعرق در شش ماه نخست (بازه زمانی فروردین تا شهریورماه) سال‌های مورد مطالعه صورت گرفت که دلیل نوسانات موجود در تبخیر - تعرق برآورد شده، مقادیر متفاوت آن در طی سال‌های مختلف است. با توجه به تفکیک زمانی و مکانی سنجنده‌های LANDSAT-TM، LANDSAT-ETM+ و MODIS و همچنین وجود ابر و برف بر روی تصاویر در برخی از ماه‌های سال، در این پژوهش از ۱۵ تصویر TM، ۲۲ تصویر ETM+ و ۲۴ تصویر

نتایج و بحث

یکی از موارد بسیار مهم در هر دو الگوریتم ارزیابی شده، انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم است. انتخاب درست آن‌ها بر دقت محاسبه میزان تابش خالص و میزان گرمای محسوس، اثر قابل توجهی خواهد داشت. در این پژوهش مطابق با جدول (۳) برای هر یک از الگوریتم‌ها، شرایط خاص و دامنه مشخص در نظر گرفته شد؛ لذا نظر به نقش پررنگ این پارامترها در نتایج حاصل از الگوریتم‌ها، قبل از بررسی تبخیر - تعرق روزانه به بررسی شاخص‌های NDVI، LAI و Ts پرداخته می‌شود.

باتوجه به نحوه محاسبه مشابه این چهار شاخص در هر دو الگوریتم، در ابتدا توضیحاتی در این زمینه مطرح خواهد شد. نتایج برآورد تبخیر - تعرق روزانه به دور روش PYSEBAL و METRIC نشان می‌دهد در مکان‌هایی که دارای پوشش گیاهی انبوه و مقادیر NDVI دارای ارزش زیاد است، دمای سطحی کمتری مشاهده می‌شود و برعکس مناطقی که مقادیر NDVI کمتری دارند و در نتیجه دارای پوشش تنک و خاک لخت هستند، دمای سطحی بالاتر است که این شرایط به دلیل نبود منبعی برای تبخیر

- تعرق است. این جریان نشان‌دهنده مقادیر تبخیر - تعرق زیاد در نواحی با NDVI زیاد و مقادیر تبخیر - تعرق کم در نواحی با مقادیر NDVI کم است؛ بنابراین چارچوب محاسبات و روند ارزشی پیکسل‌ها در نقشه تولید شده صحیح است. برآورد دقیق این شاخص‌ها در تعیین مناطق مستعد پیکسل‌های سرد و گرم بسیار حائز اهمیت خواهد بود. زیرا وجود عدم برآورد صحیح در هر یک از این پارامترها باعث ایجاد خطا در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم خواهد شد که به سبب آن محاسبه مقدار شار حرارت محسوس با خطا و برآورد نادرست روبه‌رو خواهد شد. در ادامه، باید صحت نتایج و ارزش مقدار تبخیر - تعرق برآورد شده در هر پیکسل تأیید و اختلاف‌ها تشریح شود. نتایج آنالیز آماری مدل‌ها با استفاده از سنجنده‌های مختلف در جدول (۴) نشان داده شده است. از آنجاکه هدف از مقایسه این مدل‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور، تخمین تبخیر - تعرق واقعی به‌صورت روزانه برای برنامه‌ریزی آبیاری است، به همین منظور بین مدل‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده تمرکز بالایی بر روی شاخص‌های آماری قرار گرفت.



شکل ۳- نقشه تغییرات (الف) دمای سطح زمین (LST) با توجه به نقشه (SRTM) برحسب کلونین، (ب) شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، (ج) شاخص سطح برگ (LAI) و (د) مقدار آلبیدو

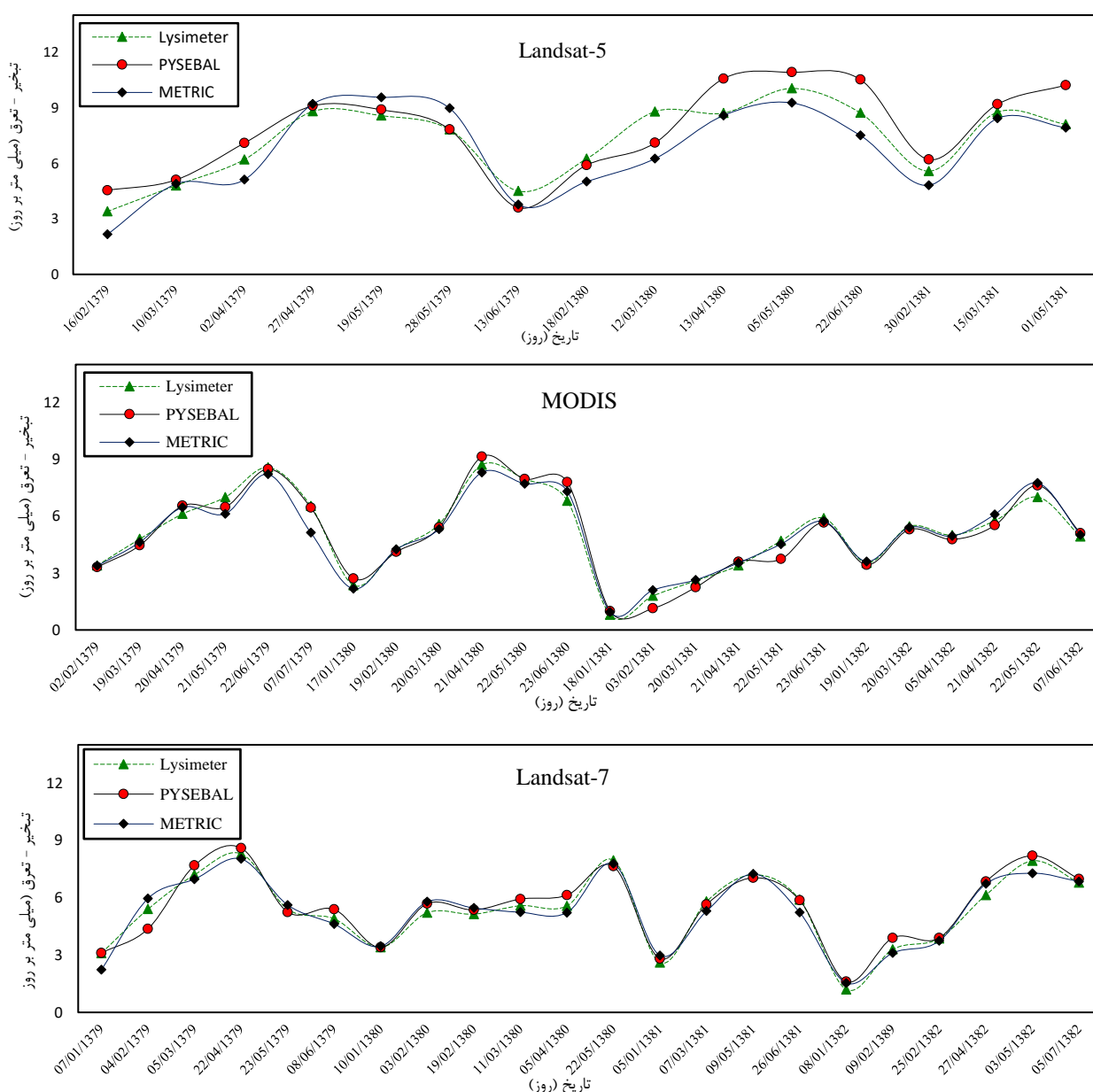
جدول ۴- مقایسه نتایج تبخیر - تعرق تخمین زده شده با استفاده از دو الگوریتم PYSEBAL و METRIC توسط سه سنجنده

SE(mm/day)	R(-)	RMSE(mm/day)	MBE	MAE(mm/day)		
۰/۱۵	۰/۹۸	۰/۴۵	-۰/۰۲	۰/۳۶	PYSEBAL	MODIS
۰/۱۷	۰/۹۸	۰/۴۲	-۰/۰۷	۰/۲۸	METRIC	
۰/۱۷	۰/۹۷	۰/۴۶	-۰/۲۱	۰/۳۵	PYSEBAL	Landsat-7
۰/۱۷	۰/۹۷	۰/۴۲	-۰/۰۷	۰/۳۵	METRIC	

۲/۲۶	۰/۵۳	۲/۰۲	-۰/۱۷	۱/۸۱	PYSEBAL	Landsat-5
۰/۵۹	۰/۹۲	۱/۰۵	۰/۵۱	۱/۰۷	METRIC	

سنجنده TM، مقدار خطای استاندارد بالایی را توصیف می‌کند. البته می‌توان به این موضوع اشاره کرد که علت اینکه سنجنده TM نسبت به سنجنده ETM+ برآورد ضعیف‌تری را داشته، بهبود و توان تفکیک زمینی بالاتر باند حرارتی در سنجنده ETM+ است. از این رو محتوای اطلاعاتی و نقش باند حرارتی در تکمیل اطلاعات باندهای انعکاسی بالاتر و بیشتر خواهد بود.

طبق نتایج آماری از بین دو الگوریتم مورد بررسی، الگوریتم METRIC با کمترین مقدار جذر خطای میانگین مربعات در هر سه سنجنده MODIS، TM و ETM+ (۰/۴۲، ۰/۴۲ و ۱/۰۵ میلی‌متر بر روز) به‌عنوان الگوریتم برتر در منطقه معرفی شده است. طبق بررسی‌های انجام‌شده سنجنده MODIS و ETM+ در هر دو الگوریتم همبستگی بالایی با مقادیر لایسیمتری دارد. درحالی‌که نتیجه به‌دست‌آمده در الگوریتم PYSEBAL از



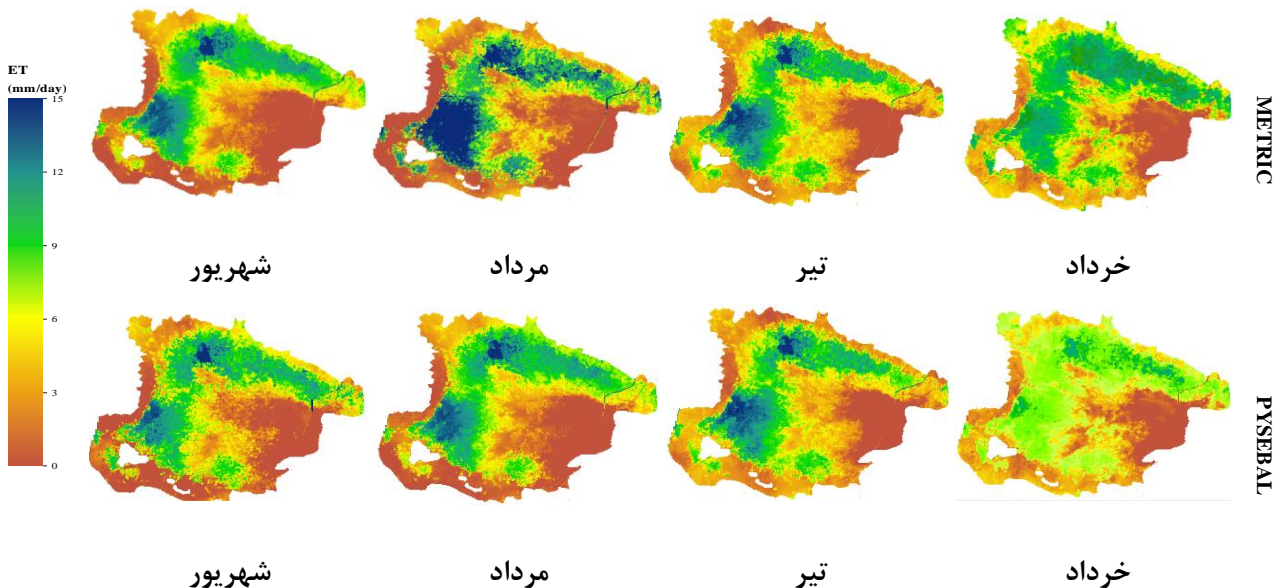
شکل ۴- مقادیر تبخیر - تعرق تخمین زده با استفاده از دو الگوریتم PYSEBAL و METRIC توسط سه سنجنده در دشت قزوین

نتایج بررسی علل تفاوت در مقادیر برآورد شده تبخیر - تعرق به دو روش PYSEBAL و METRIC می‌توان به تفاوت این

که علت این امر را می‌توان تفاوت در زمان تصویربرداری، ارتفاع، آزیموت متفاوت خورشید و همچنین تفاوت در ضرایب کالیبراسیون دانست. سنجنده ETM+ برآورد بسیار بهتری را نسبت به سنجنده TM داشته است به طوری که مقدار شاخص خطای استاندارد در سنجنده ETM+ در هر دو الگوریتم بررسی شده مقاداری برابر با ۰/۱۷ را دارا بوده است. در حالی که در سنجنده TM در الگوریتم PYSEBAL مقاداری برابر با ۲/۲۶ میلی‌متر بر روز برخوردار است. به طور کلی شاخص خطای استاندارد در دو مدل از سنجنده‌های MODIS و ETM+ مقاداری کمتر از یک برآورد شده است که نشان‌دهنده نزدیک بودن و پراکندگی کم داده‌های برآورد شده نسبت به اندازه‌گیری‌های صورت گرفته از لایسیمتر است. همان‌طور که در شکل (۴) نیز قابل ملاحظه است سنجنده MODIS بهترین برآورد را نسبت به دو سنجنده دیگر در منطقه داشته است، به طوری که مقدار ضریب همبستگی در این سنجنده در هر دو مدل PYSEBAL و METRIC به ترتیب مقاداری برابر با (۰/۹۸ و ۰/۹۸) همراه بوده است. مقادیر منفی پارامتر MBE در بررسی‌های صورت گرفته از خروجی‌های به دست آمده نشان از کم‌برآورد بودن الگوریتم محاسبه شده دارد.

دو الگوریتم در چگونگی محاسبه ضریب شفافیت اتمسفری اشاره کرد که در استفاده از دو الگوریتم PYSEBAL و METRIC به این تفاوت اشاره شده است. در روش PYSEBAL، مقدار ضریب شفافیت اتمسفری در تمام ماه‌های سال ثابت است زیرا تنها به ارتفاع منطقه بستگی دارد اما در روش METRIC پارامترهایی همچون مقدار بخار اتمسفر، فشار هوا و زاویه زنیت خورشیدی نیز دخیل‌اند که این پارامترها مطابق بازمان تغییر خواهند کرد؛ بنابراین به نظر می‌رسد مقدار برآورد تابش خالص سطح زمین با استفاده از این روش در تمام زمان‌ها برآورد یکسان و ثابتی نداشته باشد. باتوجه به شکل (۴) نتایج و بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که هرچه به ماه‌های گرم سال نزدیک می‌شود، با افزایش دما مقدار تبخیر - تعرق افزایش می‌یابد. این عامل در دو سنجنده ETM+ و MODIS در تمامی ماه‌ها از روند برآورد یکسانی برخوردار بود. در حالی که نتایج حاصل از سنجنده TM نشان داد در ماه‌های گرم سال این سنجنده برآورد بهتری را نسبت به سایر ماه‌ها خواهد داشت.

نتایج شاخص‌های آماری در جدول (۴) نشان می‌دهد سنجنده TM در مدل‌های PYSEBAL و METRIC با مقدار RMSE به ترتیب ۲/۰۲ و ۱/۰۵ میلی‌متر بر روز) و مقدار ضریب همبستگی (۰/۵۳ و ۰/۹۲) ضعیف‌ترین نتایج را از خود نشان داد



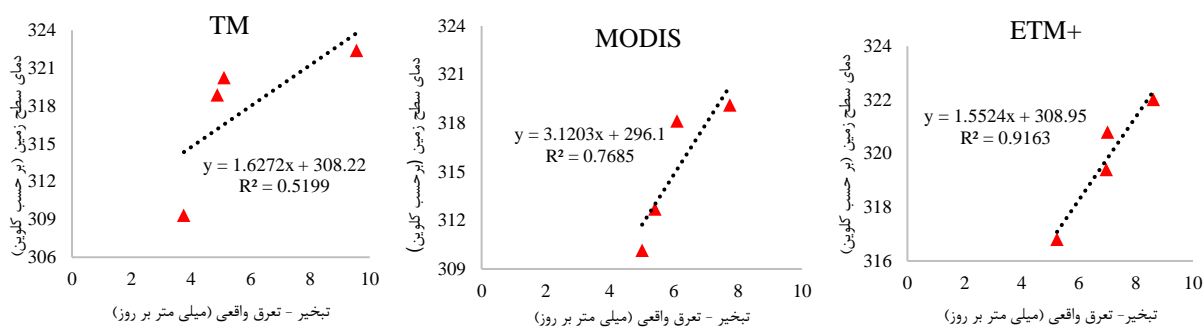
شکل ۵- نقشه تبخیر - تعرق واقعی برآورد شده توسط سنجنده MODIS در دو الگوریتم PYSEBAL و METRIC در سال ۱۳۸۲

هر دو مدل به حداکثر خود رسیده است. که از جمله دلایل این موضوع می‌توان به افزایش دمای سطح زمین اشاره کرد که لازم است به بررسی کامل از نحوه تأثیر آن بر مقدار تبخیر - تعرق پرداخته شود. مقایسه مقدار تبخیر - تعرق محصول و دمای سطح زمین می‌تواند بینشی در زمینه کیفیت مقادیر ET حاصل از

در شکل (۵) روند تغییرات تبخیر - تعرق منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی حداکثر رشد گیاه به خوبی قابل ملاحظه است. مقدار تبخیر - تعرق در گیاه چمن در یک سال زراعی در زمانی که با افزایش شاخص‌های پوشش گیاهی همراه باشد به شدت افزایش می‌یابد مقدار تبخیر - تعرق در ماه مردادماه در

طول یک سال از دوره مورد مطالعه پرداخته شد.

سنجنده‌های مختلف ارائه دهد به همین منظور به تجزیه و تحلیل و همبستگی بین ET_a و LST برای ماه‌های خرداد تا مردادماه در



شکل ۶- رابطه بین ET-LST در ماه‌های خرداد تا شهریور سال ۱۳۷۹ در منطقه مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

وجود الگوریتم‌ها و روش‌های متعدد و متفاوت برآورد تبخیر - تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و همچنین تولید روش‌های جدید که برخی شامل تفاوت‌های بسیار با الگوریتم‌های پیشین بوده است، نشان می‌دهد که تکنولوژی سنجنش‌آزودر اگرچه با سرعت بسیاری در حال پیشرفت است اما هنوز راه زیادی تا تکامل در پیش‌رو دارد تا روش‌های موجود به‌دقت مورد بررسی قرار گرفته و روش‌های جدیدتر با دقت بیشتر و در زمان کمتر، بتواند برآورد بهتری را ارائه دهد. زیرا برآورد دقیق تبخیر - تعرق اهمیت قابل توجهی در تخمین نیاز آبی گیاه در مرحله طراحی پروژه‌های آبیاری و تعیین وسعت قابل کشت، انتخاب الگوی کشت و تقویم آبیاری دارد. در این تحقیق حاضر سعی شد تا با استفاده از تصاویر سنجنده‌های MODIS، TM و ETM+ و اجرای دو الگوریتم بیلان انرژی سطحی بهترین مدل و سنجنده به‌منظور کاهش انجام فرآیندهای محاسبه تبخیر - تعرق که با صرف هزینه و زمان زیادی همراه خواهد بود، انتخاب شود. بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که الگوریتم‌های مذکور در مقادیر به‌دست‌آمده تطابق بالایی با مقادیر تبخیر - تعرق واقعی در طول دوره مورد مطالعه داشته و همچنین بررسی مقادیر شاخص‌های آماری مختلف نشان داد که استفاده از الگوریتم METRIC توسط سنجنده MODIS، در برآورد تبخیر - تعرق در مقیاس منطقه‌ای توانسته است نتایج رضایت‌بخشی را ارائه کند و مقادیر تبخیر - تعرق را به‌خوبی برآورد کند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

علت اصلی بررسی این موضوع در این بازه زمانی از فصل رشد، این است که در این بازه زمانی محصول از تراکم بیشتری برخوردار بوده و به‌جای دمای خاک و تبخیر از خاک تنک، توسط رشد پوشش گیاهی و فرآیند تعرق هدایت می‌شود. مقایسه نتایج حاصل از آن نشان داد در بین سه سنجنده مورد بررسی سنجنده ETM+ با مقدار $R^2 = 0.91$ توانسته است عملکرد بهتری را داشته باشد که یکی از دلایل این موضوع می‌تواند ابعاد کوچک‌تر پیکسل‌ها نسبت به سنجنده MODIS باشد. به‌طوری‌که در ETM+ و TM قدرت تفکیک مکانی هر پیکسل ۳۰ متری بوده و درحالی‌که در MOD11A1 برابر با ۱۰۰۰ متر می‌باشد. از دیگر دلایلی که MOD11A1 توانسته نتایج بهتری را نسبت به TM ایجاد کند می‌توان به قدرت تفکیک زمانی روزانه آن اشاره کرد درحالی‌که در دو سنجنده دیگر تفکیک زمانی ۱۵ روزه است.

در یک بررسی کلی، سنجنده MODIS نتایج قابل‌قبول‌تری را نسبت به دو سنجنده دیگر نشان می‌دهد. در صورتی‌که مطالعات برآورد تبخیر - تعرق برای محاسبه اراضی با وسعت زیاد مدنظر باشد استفاده از سنجنده MODIS در الگوریتم METRIC با توجه به حجم کمتر تصاویر مورد استفاده به‌منظور برآورد تبخیر - تعرق، می‌تواند برآورد کلی و قابل‌قبول‌تری از الگوی تغییرات مکانی تبخیر - تعرق نسبت به تصاویر حاصل از سنجنده‌های Landsat داشته باشد. همچنین نتایج نشان داد که نواحی دارای شاخص پوشش گیاهی بالا دارای دمای پایین‌تری می‌باشند و سایر نواحی که دارای شاخص پوشش گیاهی پایین‌تری می‌باشند (در صورت مرطوب نبودن خاک) دمای سطحی بالاتری را نشان می‌دهند. زیرا میزان تبخیر - تعرق در مناطقی که مقدار شاخص پوشش گیاهی بالاتر بود، با مقادیر بیشتری همراه بود.

REFERENCE

Allen, Richard G, Burnett, B., Kramber, W.,

Huntington, J., Kjaersgaard, J., Kilic, A., Kelly,



- C., & Trezza, R. (2013). Automated calibration of the metric-landsat evapotranspiration process. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 49(3), 563–576.
- Allen, Richard G, Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380–394.
- Ayenew, T. (2003). Evapotranspiration estimation using thematic mapper spectral satellite data in the Ethiopian rift and adjacent highlands. *Journal of Hydrology*, 279(1–4), 83–93.
- Bala, A., Rawat, K. S., Misra, A. K., & Srivastava, A. (2016). Assessment and validation of evapotranspiration using SEBAL algorithm and Lysimeter data of IARI agricultural farm, India. *Geocarto International*, 31(7), 739–764.
- Bastiaanssen, W. G. M. (1995). Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. Wageningen University and Research.
- Bhattarai, N., Quackenbush, L. J., Im, J., & Shaw, S. B. (2017). A new optimized algorithm for automating endmember pixel selection in the SEBAL and METRIC models. *Remote Sensing of Environment*, 196, 178–192.
- Caiserman, A., & Faour, G. (2021). Spatial variability of evapotranspiration and pressure on groundwater resources: remote sensing monitoring by crop type in the Bekaa plain, Lebanon. *Journal of Applied Remote Sensing*, 15(1), 14517.
- dos Santos, C. A. C., Mariano, D. A., Francisco das Chagas, A., Dantas, F. R. da C., de Oliveira, G., Silva, M. T., da Silva, L. L., da Silva, B. B., Bezerra, B. G., & Safa, B. (2020). Spatio-temporal patterns of energy exchange and evapotranspiration during an intense drought for drylands in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 85, 101982.
- Ebrahimi pak N.A. (2000). Determination of evapotranspiration potential of reference plant (grass) by lysimeter method and comparison with experimental methods in Qazvin. Ministry of Agricultural Jihad, Agricultural Research, Education and Promotion Organization, Qazvin Agricultural and Natural Resources Research Center. (In Persian).
- Firouzi Nezamabadi, F. and Kaviani, A. (2015). Introduction of energy balance algorithms to calculate the actual evapotranspiration using remote sensing techniques. The 1st Int. Conference on Earth Space and Clean Energy, Ardebil, Iran (In Persian).
- Gowda, P. H., Chavez, J. L., Colaizzi, P. D., Evett, S. R., Howell, T. A., & Tolk, J. A. (2008). ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. *Irrigation Science*, 26(3), 223–237.
- Hessels, T., van Opstal, J., Trambauer, P., Bastiaanssen, W., Faouzi, M., Mohamed, Y., & ErRaji, A. (2017). *pySEBAL Version 3.3. 7*.
- Hedayati, A., & Kakavand, R. (2012). Climatic zoning of Qazvin Province. *Nivar*, 36(77–76), 59–66. (In Persian).
- Jaafar, H. H., & Ahmad, F. A. (2020). Time series trends of Landsat-based ET using automated calibration in METRIC and SEBAL: The Bekaa Valley, Lebanon. *Remote Sensing of Environment*, 238, 111034.
- Kazamias, A. P., & Sapountzis, M. (2017). Spatial and temporal assessment of potential soil erosion over Greece. *Water*, 59, 315–321.
- Khoshkhou, Y., Babaei, K., & AsadiOskouei, E. (2018). Estimating Rice Actual Evapotranspiration Using METRIC Algorithm in a part of the North of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(6), 105–122.
- Khoshkhou, Y., & Nikmehr, S. (2021). Application of Land Surface Temperature Extracted from Satellite Images for Zoning Reference Evapotranspiration. *Environment and Water Engineering*, 7(4), 708–722 (In Persian).
- Kustas, W. P., & Norman, J. M. (1996). Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal*, 41(4), 495–516.
- Lee, T. S., Najim, M. M. M., & Aminul, M. H. (2004). Estimating evapotranspiration of irrigated rice at the West Coast of the Peninsular of Malaysia.
- Li, Z.-L., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., Yan, G., & Zhang, X. (2009). A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. *Sensors*, 9(5), 3801–3853.
- Lian, J., & Huang, M. (2016). Comparison of three remote sensing based models to estimate evapotranspiration in an oasis-desert region. *Agricultural Water Management*, 165, 153–162.
- Liaqat, U. W., & 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.
- Nyolei, D., Nsaali, M., Minaya, V., van Griensven, A., Mbilinyi, B., Diels, J., Hessels, T., & Kahimba, F. (2019). High resolution mapping of agricultural water productivity using SEBAL in a cultivated African catchment, Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 112, 36–49.
- Raziei, T., & Pereira, L. S. (2013). Estimation of ETo with Hargreaves–Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. *Agricultural Water Management*, 121, 1–18.
- Sawadogo, A., Gundogdu, K. S., Traoré, F., Kouadio, L., & Hessels, T. (2020) Estimate in season actual evapotranspiration over a large-scale irrigation scheme in resource-limited conditions. *Comptes Rendus de l'Académie Bulgare Des Sciences*, 73(10).
- Sawadogo, A., Hessels, T. I. M., Gündoğdu, K. S.,

- Demir, A. O., Mustafa, Ü., & Zwart, S. J. (2020). Comparative analysis of the pysebal model and lysimeter for estimating actual evapotration of soybean crop in adana, turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 5(2), 60–65.
- Senay, G. B., Friedrichs, M., Singh, R. K., & Velpuri, N. M. (2016). Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. *Remote Sensing of Environment*, 185, 171–185.
- Tasumi, M. (2003). Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. University of Idaho.
- Tasumi, M. (2019). Estimating evapotranspiration using METRIC model and Landsat data for better understandings of regional hydrology in the western Urmia Lake Basin. *Agricultural Water Management*, 226, 105805.
- Tasumi, M., Allen, R. G., Trezza, R., & Wright, J. L. (2005). Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 94–109.
- Yilmaz, M. T., Anderson, M. C., Zaitchik, B., Hain, C. R., Crow, W. T., Ozdogan, M., Chun, J. A., & Evans, J. (2014). Comparison of prognostic and diagnostic surface flux modeling approaches over the Nile River basin. *Water Resources Research*, 50(1), 386–408.
- Zhang, K., Kimball, J. S., & Running, S. W. (2016). A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(6), 834–853.