



نخستین از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (سال پانزدهم / شماره دوم) تابستان ۱۴۰۳

نمایه شده در سایت: پایگاه استنادی علوم جهان اسلام، جهاد دانشگاهی، مگ ایران، نورمگز، سیولیکا، گوگل اسکولار

آدرس وب سایت: <http://girs.iaubushehr.ac.ir>



مقاله
پژوهشی

تخمین تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم مثلثی و داده‌های لندست ۸ (مطالعه موردی: دشت مشهد-استان خراسان رضوی)

مژده سلیمی فرد، سید حسین ثنائی نژاد، علیرضا راشکی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۷ / پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۹ / دسترسی اینترنتی: ۱۴۰۳/۰۷/۰۸

چکیده

یکی از چالش‌های منطقه‌ای مهم در بحث مدیریت آب برآورد صحیح تغییرات مکانی تبخیر-تعرق واقعی می‌باشد. اکثر روش‌های محاسبه تبخیر-تعرق واقعی که بر مبنای ضرایب گیاهی (K_e) هستند، به صورت تخمین نقطه‌ای هستند که به منظور استفاده در سطح حوزه و یا منطقه‌ای نیازمند بزرگ‌نمایی مکانی هستند. در این میان، روش‌های متنوع سنجش از دوری با پیچیدگی‌های متنوع به منظور بررسی پارامتر تبخیر-تعرق واقعی در سطوح منطقه‌ای بزرگ بر اساس رابطه بیلان انرژی و شرایط پوشش گیاهی توسعه یافته‌اند. روش الگوریتم مثلثی که بر پایه رابطه میان دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) است از جمله روش‌های تخمین تبخیر-تعرق واقعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است.

در این مطالعه از داده‌های تصاویر لندست ۸ در سال ۲۰۲۰ و الگوریتم مثلثی به منظور محاسبه تبخیر-تعرق واقعی در دشت مشهد استفاده شد.

نتایج حاصل از الگوریتم مثلثی با نتایج تبخیر-تعرق واقعی حاصل از روش فائو - پنمن - مانیت و ضریب گیاهی (K_e) در سطح مزارع گندم و ذرت علوفه‌ای صحت سنجی شدند. نتایج صحت سنجی حاکی از صحت و دقت بالای روش الگوریتم مثلثی در تخمین پارامتر تبخیر-تعرق واقعی داشت به طوری که میزان ضریب تبیین (R^2) در این مطالعه بالای ۰/۷ و بیشترین میزان جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا مطلق (MAE) به ترتیب: ۱/۶۷ و ۱/۴۸ میلی‌متر در روز مشاهده شد.

پیشینه و هدف: حدود ۴۵ درصد از مساحت کره زمین را اراضی خشک و نیمه‌خشک تشکیل داده‌اند که ۳۵ درصد از جمعیت جهان در این مناطق ساکن هستند. از آنجایی که آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله محدودیت‌های عمده برای رفاه اقتصادی و توسعه پایدار می‌باشد، از این رو برآورد دقیق مکانی پدیده تبخیر - تعرق که موجب خارج شدن بیش از ۸۰ درصد از آب قابل دسترس سالیانه در این مناطق می‌شود، در مباحث هیدرولوژی، هواشناسی و کشاورزی اهمیت ویژه دارد. افزایش دقت و صحت تخمین تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای موثر بر فرایند تبخیر-تعرق، موجب

مژده سلیمی فرد^۱✉، سید حسین ثنائی نژاد^۲، علیرضا راشکی^۳

۱. دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

۲. استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

۳. دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

DOI: 10.30495/girs.2022.695287

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: [mzhdehsalimi18@gmail.com](mailto:mozhdehsalimi18@gmail.com)

استفاده از زبان برنامه‌نویسی JAVA در محیط سامانه (GEE) Google Earth Engine code صورت پذیرفت. کلیه تصاویر ماهواره لندست ۸ برای بازه زمانی سال ۲۰۲۰ جستجو شد و تصاویری که در منطقه مورد مطالعه دارای ابرناکی کمتر از ۱۰ درصد بود انتخاب گردید. همچنین داده‌های هواشناسی شامل دمای هوا، دمای نقطه شبنم، رطوبت نسبی، فشار هوا، طول روز، ساعت آفتابی و سرعت باد برای تاریخ تصاویر انتخاب شده از ایستگاه سینوپتیک مشهد استخراج شد. الگوریتم مثلثی بر مبنای پراکندگی فضایی داده‌های نرمال شده شاخص گیاهی (NDVI) و نرمال شده دمای سطح زمین (LST) در محیطی دوبعدی استوار است. در این مطالعه داده‌های دمای سطح زمین و داده‌های NDVI با استفاده از داده‌های باند ۱۰، ۵ و ۴ ماهواره لندست ۸ در تاریخ‌های انتخابی در محیط GEE محاسبه گردیدند، و به منظور شناسایی لبه خشک و مرطوب مدل مثلثی نرمال‌سازی شدند. مقادیر نرمال شده وضعیت پوشش گیاهی و دمای سطح زمین برای هر یک از روزهای مورد مطالعه وارد نرم‌افزار مطلب شد و لبه خشک و مرطوب برای هر یک از روزهای مورد مطالعه و ضریب ϕ برای هر یک از پیکسل‌ها محاسبه گردید. پس از محاسبه پارامتر ترکیبی (ϕ) در گام بعدی میزان کسر از تبخیر لحظه‌ای (EF) محاسبه شد. مقادیر تابش خالص، شار گرمای خاک و میزان گرمای نهان تبخیر نیز با استفاده از داده‌های سنجنش‌زدوری محاسبه شد. به منظور صحت سنجی داده‌های الگوریتم مثلثی در این مطالعه، ابتدا ۴ مزرعه کشاورزی با اطلاعات زراعی دقیق در سطح دشت مشهد انتخاب شدند. این مزارع کمترین فاصله را با ایستگاه سینوپتیک مشهد داشتند. در این مزارع به منظور محاسبه تبخیر-تعرق مرجع از روش فائو-پنمن-مانتیت در نرم‌افزار REF-ET استفاده شد. سپس مقادیر ضریب گیاهی K_c با توجه به روش فائو ۵۶، برای دوره‌های رشد مختلف دو گیاه گندم زمستانه و ذرت علوفه‌ای به دست آمد و مقادیر تبخیر-تعرق واقعی برای هر یک از روزهای دوره رشد محاسبه شد. در نهایت ضریب تبیین R^2 و ضرایب خطا، میانگین مربعات خطا RMSE و میانگین قدر مطلق خطا MAE به منظور ارزیابی و بررسی نتایج محاسبه شد.

نتایج و بحث: ابتدا مقادیر دمای سطح زمین (LST) و شاخص نرمال شده تغییرات پوشش گیاهی (NDVI) برای هر یک از روزهای مورد مطالعه محاسبه و نرمال‌سازی شدند. پس از آن مقادیر در یک فضای دوبعدی به منظور محاسبه لبه خشک و تر در مقابل هم ترسیم

افزایش صحت برآورد این پدیده می‌شود. این در حالی است که در بسیاری از کشورها به منظور برآورد میزان تبخیر-تعرق از روش‌های توصیه شده توسط فائو استفاده می‌گردد، که در این روش‌ها محاسبه تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای مؤثر بر روی تبخیر-تعرق از صحت بالایی برخوردار نیست. در مقابل این روش‌ها تکنولوژی سنجنش‌زدور مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای قادر است تبخیر-تعرق را در مقیاس مکانی متفاوت تخمین بزند. تخمین تبخیر-تعرق بر مبنای روش‌های تجربی و بالانس انرژی معمولاً در مقیاس‌های وسیع مکانی به دلیل بافت ناهمگن محیط، تغییر خصوصیات توپوگرافی و پوشش گیاهی و غیره دچار خطا می‌شوند. همچنین این مدل‌ها علاوه بر داده‌های ماهواره‌ای به داده‌های ایستگاهی مانند: دمای سطح زمین، سرعت باد و غیره نیازمندند که معمولاً به علت کمبود این داده‌ها و یا پراکنش نامناسب ایستگاه‌های هواشناسی، برای مقیاس‌های بزرگ این روش‌ها توصیه نمی‌شود. از این رو به منظور غلبه بر این مشکلات و افزایش صحت تخمین تبخیر-تعرق در مقیاس‌های وسیع مکانی باید از روش‌هایی استفاده نمود که تنها متکی بر داده‌های ماهواره‌ای باشند، که از جمله این روش‌ها می‌توان به روش مثلثی اشاره کرد. با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران و ضرورت استفاده صحیح از منابع آبی در بخش کشاورزی و همچنین نبود ابزار مناسب جهت اندازه‌گیری مستقیم (مانند: نسبت باون، برج شار ادی کوواریانس و غیره) پدیده تبخیر-تعرق، استفاده از مدل‌های سنجنش‌زدوری با دقت و کارایی مناسب جهت تخمین این پدیده به‌خصوص در مناطق فاقد ایستگاه‌های برداشت کننده پارامترهای هواشناسی اهمیت می‌یابد. هدف از این مطالعه تخمین تبخیر-تعرق در مقیاس مکانی گسترده و بالا بردن دقت مکانی و برآورد صحیح این پارامتر در مناطق با پوشش گیاهی متفاوت با استفاده از الگوریتم مثلثی و تصاویر ماهواره لندست ۸ است.

مواد و روش‌ها: با توجه به هدف این مطالعه که محاسبه تبخیر-تعرق است و اهمیت این پارامتر در بخش کشاورزی، منطقه مورد مطالعه باید طوری انتخاب گردد که علاوه بر پوشش‌های طبیعی گیاهی بخش وسیعی از اراضی کشاورزی را نیز شامل گردد. از این رو با توجه موقعیت جغرافیایی اراضی کشاورزی در استان خراسان رضوی، دشت مشهد به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در این پژوهش انتخاب گردید. در این مطالعه از داده‌های ماهواره لندست ۸ استفاده شد. کلیه محاسبات مربوط به داده‌های سنجنش‌زدور در این مطالعه با

نتیجه‌گیری: الگوریتم مثلی به‌خوبی می‌تواند تأثیرات تغییرات سطح زمین و استرس آب بر روی تبخیر-تعرق واقعی به‌خصوص در مناطق نیمه‌خشک نشان دهد. از جمله مزیت‌های این الگوریتم، ساختار ساده و داده‌های ورودی کم است که می‌توان از این روش به‌خصوص در مناطقی که کمبود داده جهت محاسبه تبخیر-تعرق واقعی دارند استفاده نمود. نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه این روش با مقادیر تبخیر-تعرق واقعی به‌دست‌آمده در سطح مزارع مورد مطالعه، حاکی از صحت قابل قبول این روش در تخمین پارامتر تبخیر-تعرق واقعی به‌خصوص در سطح مناطق کشاورزی دارد. الگوریتم مثلی موجب بالارفتن قدرت تفکیک مکانی تخمین پارامتر تبخیر-تعرق می‌شود، و روش مناسبی جهت برآورد پارامتر تبخیر-تعرق در سطح یک منطقه وسیع است. استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در کنار استفاده از ابزارهای محاسباتی به‌روز مانند سامانه تحت وب (GEE) موجب بالابردن سرعت محاسبات در این مطالعه شد.

واژگان کلیدی: تبخیر-تعرق واقعی، الگوریتم مثلی، لندست ۸ دشت مشهد

شدند. مقدار ضریب تبیین معادلات رگرسیونی لبه خشک در کلیه روزهای مورد مطالعه بالای ۰/۸ محاسبه شد. مناطقی که دارای پوشش گیاهی انبوه‌تر بودند دارای دمای سطحی کمتر و میزان ضریب کسر از تبخیر در این مناطق نیز بیشتر شد. در مناطق کشاورزی دشت مشهد که از لحاظ جغرافیایی در مرکز دشت قرار دارند با توجه به بالا بودن آب قابل دسترس و میزان رطوبت خاک میزان بالاتری از ضریب کسر از تبخیر لحظه‌ای مشاهده شد. میزان شار تابش خالص لحظه‌ای برای منطقه مورد مطالعه بازه بین ۲۰۰ تا ۷۰۰ وات بر مترمربع و شار تابش خالص روزانه بازه بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ وات بر مترمربع برای روزهای مورد مطالعه به دست آمد. در نهایت میزان تبخیر-تعرق واقعی در بازه رشد گیاهان زراعی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم مثلی محاسبه شد. نتایج حاصل از الگوریتم مثلی با نتایج تبخیر-تعرق واقعی حاصل از روش فائو-پنمن-مانیت و ضریب گیاهی (K_p) در سطح مزارع گندم و ذرت علوفه‌ای صحت سنجی شدند. نتایج صحت سنجی حاکی از صحت و دقت بالای روش الگوریتم مثلی در تخمین پارامتر تبخیر-تعرق واقعی داشت به‌طوری‌که میزان ضریب تبیین (R^2) در این مطالعه بالای ۰/۷ و بیشترین میزان جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا مطلق (MAE) به ترتیب: ۱/۶۷ و ۱/۴۸ میلی‌متر در روز مشاهده شد.

مقدمه:

حدود ۴۵ درصد از مساحت کره زمین را اراضی خشک و نیمه‌خشک تشکیل داده‌اند که ۳۵ درصد از جمعیت جهان در این مناطق ساکن هستند (۲۲). از آنجایی که آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله محدودیت‌های عمده برای رفاه اقتصادی و توسعه پایدار است، از این رو برآورد دقیق مکانی پدیده تبخیر-تعرق که موجب خارج شدن بیش از ۸۰ درصد از آب قابل‌دسترس سالیانه در این مناطق می‌شود، در مباحث هیدرولوژی، هواشناسی و کشاورزی اهمیت ویژه دارد (۲۴، ۲۶). افزایش دقت و صحت تخمین تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای مؤثر بر فرآیند تبخیر-تعرق، موجب افزایش صحت برآورد این پدیده می‌شود. این در حالی است که در بسیاری از کشورها به‌منظور برآورد میزان تبخیر-تعرق از روش‌های توصیه‌شده توسط فائو استفاده می‌گردد که در این روش‌ها محاسبه تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای مؤثر بر روی تبخیر-تعرق از صحت بالایی برخوردار نیست (۱۹). در مقابل این روش‌ها فناوری سنجش‌ازدور مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای قادر است تبخیر-تعرق را در مقیاس مکانی متفاوت تخمین بزند. مزایای روش‌های مبتنی بر داده‌های سنجش‌ازدور شامل: ۱- دید گسترده و پوشش مکانی پیوسته ۲- داده‌برداری از نقاط فاقد ایستگاه‌های هواشناسی و یا نقاطی که احداث ادوات اندازه‌گیری مشکل می‌باشد ۳- دسترسی رایگان به حجم بالایی از داده‌های موردنیاز برای برآورد تبخیر-تعرق است (۲۰). این روش‌ها معمولاً بر اساس رابطه توازن انرژی سطح زمین هستند که می‌توان پارامترهای موردنیاز را با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای به دست آورد (۱۵).

گودا و همکاران (۷)، مروری بر انواع الگوریتم‌های تخمین تبخیر-تعرق داشتند. آن‌ها در این مطالعه میزان صحت هر یک از روش‌ها را بررسی و نشان دادند که میزان دقت روش‌های مختلف در تخمین تبخیر-تعرق روزانه بین ۶۷ تا ۹۷ درصد و در مقیاس ماهانه بیش از ۹۴ درصد است. مرشدی و همکاران (۱۶)، امکان استفاده از دو مدل سبال و متریک را برای برآورد و مقایسه تبخیر-تعرق گیاه مرجع یونجه در مقیاس منطقه‌ای

با استفاده از داده‌های ماهواره لندست ETM+ در مقایسه با برآوردهای حاصل از مدل‌های تجربی- ترکیبی مانند: فائو-پنمن-مانتیت، پنمن-مانتیت استاندارد شده انجمن مهندسی عمران آمریکا، بلانی کریدل، هارگریوز-سامانی و تشک تبخیر در دشت شهرکرد انجام دادند. به‌طورکلی نتایج این مطالعه نشان داد برآوردهای مدل سبال در مقایسه با برآوردهای مدل هارگریوز-سامانی و داده‌های لایسیمتری موجود از صحت بیشتری نسبت به مدل متریک برخوردار است و در شرایط مشابه با مطالعه قابل توصیه می‌باشد. تخمین تبخیر-تعرق بر مبنای روش‌های تجربی و بالانس انرژی معمولاً در مقیاس‌های وسیع مکانی به دلیل بافت ناهمگن محیط، تغییر خصوصیات توپوگرافی و پوشش گیاهی و غیره دچار خطا می‌شوند. همچنین این مدل‌ها علاوه بر داده‌های ماهواره‌ای به داده‌های ایستگاهی مانند: دمای سطح زمین، سرعت باد و غیره نیازمندند که معمولاً به علت کمبود این داده‌ها و یا پراکنش نامناسب ایستگاه‌های هواشناسی، برای مقیاس‌های بزرگ این روش‌ها توصیه نمی‌شود. از این رو به‌منظور غلبه بر این مشکلات و افزایش صحت تخمین تبخیر-تعرق در مقیاس‌های وسیع مکانی باید از روش‌هایی استفاده نمود که تنها متکی بر داده‌های ماهواره‌ای باشند که از جمله این روش‌ها می‌توان به روش مثلثی اشاره کرد (۲۴). برای اولین بار روش مثلثی در سال ۱۹۸۵ به‌منظور بررسی تغییرات رطوبت خاک، پوشش گیاهی و کاربری اراضی و همچنین پایش خشک‌سالی پیشنهاد شد. در این روش فرض می‌شود که میزان تغییرات پوشش گیاهی در سطح زمین، رابطه مستقیمی با دمای سطحی و تابش‌های گرمایی دارد (۸). روش مثلثی TS-VI بر مبنای رابطه پرستلی-تیلور و بر اساس روابط فیزیکی میان پارامتر کسرتبخیر و پارامترهای سطحی مانند: دمای سطح زمین، رطوبت خاک و میزان پوشش گیاهی می‌باشد (۱۰).

لو و همکاران (۱۴)، در آمریکا از روش مثلثی به‌منظور تخمین تبخیر-تعرق استفاده نمودند. آن‌ها نتایج حاصل از این الگوریتم را با نتایج داده‌های به‌دست‌آمده از روش‌های مستقیم اندازه‌گیری مقایسه کردند. در این مطالعه میزان درجه

همبستگی (R^2) ۵۴/۵ تا ۶۹/۶ درصد به دست آمد. تانگ و همکاران (۲۴)، میزان ET را در مناطق خشک و نیمه‌خشک با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس محاسبه نمودند. آن‌ها در این مطالعه به منظور صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده، خروجی‌های روش مثلثی را با داده‌های حاصل از دستگاه ادی کوواریانس در طی ۴ سال در دو سایت تحقیقاتی مورد مطالعه ارزیابی قراردادند. نتایج این مطالعه حاکی از پتانسیل بالای روش مثلثی در تخمین تبخیر-تعرق به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک بود به طوری که میزان ریشه مربعات خطا به‌دست‌آمده برای گرمای محسوس و گرمای نهان تبخیر در این مطالعه برابر ۵۴ وات بر مترمربع بود.

استایسن و همکاران (۲۳)، میزان تبخیر-تعرق واقعی را در حوزه رودخانه سنگال با استفاده از الگوریتم مثلثی محاسبه کردند. در این مطالعه آن‌ها میزان کسر از تبخیر (Evaporative Fraction) و تبخیر-تعرق به‌دست‌آمده را با استفاده از مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌های مستقیم برای یکی از فصول بارانی سال ۲۰۰۵ صحت‌سنجی نمودند. نتایج این مطالعه برای کسر از تبخیر میزان RMSE، ۰/۱۳ و میزان R^2 ۰/۶۳ و R^2 ۰/۶۶ را برای تبخیر - تعرق واقعی نشان داد. علاوه بر موارد ذکرشده، مطالعات مختلفی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان نیز به بررسی توانایی این الگوریتم در تخمین تبخیر-تعرق پرداختند. از جمله این مطالعات که دارای نتایج قابل‌قبولی نیز بودند می‌توان به مطالعات (۹، ۱۲ و ۲۱) اشاره نمود. در برخی از مطالعات نیز روش مثلثی بر اساس فرضیات جدید مورد اصلاح قرار گرفت. به طور مثال، ژانگ و همکاران (۲۶)، روش مثلثی جدیدی را در اردن جهت تخمین تبخیر-تعرق واقعی ارائه دادند. آن‌ها در این روش ابتدا منطقه مورد مطالعه را بر اساس نقشه توپوگرافی به نواحی ارتفاعی همگن تقسیم‌بندی نمودند و سپس میزان تبخیر-تعرق واقعی را در هر منطقه بر اساس میزان شاخص NDVI و دمای سطح زمین تخمین زدند. استفاده از این روش بسیاری از خطاهای ناشی از تغییرات دمای سطح زمین که بر اساس تغییرات خصوصیات توپوگرافی در منطقه رخ می‌دهد را کاهش داد.

باتوجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران و ضرورت استفاده صحیح از منابع آبی در بخش کشاورزی و همچنین نبود ابزار مناسب جهت اندازه‌گیری مستقیم (مانند: نسبت باون، برج شار ادی کوواریانس و غیره) پدیده تبخیر-تعرق، استفاده از مدل‌های سنجش‌ازدوری بادقت و کارایی مناسب جهت تخمین این پدیده به‌خصوص در مناطق فاقد ایستگاه‌های برداشت‌کننده پارامترهای هواشناسی اهمیت می‌یابد. هدف از این مطالعه تخمین تبخیر-تعرق در مقیاس مکانی گسترده و بالابردن دقت مکانی و برآورد صحیح این پارامتر در مناطق با پوشش گیاهی متفاوت با استفاده از الگوریتم مثلثی و تصاویر ماهواره لندست ۸ است.

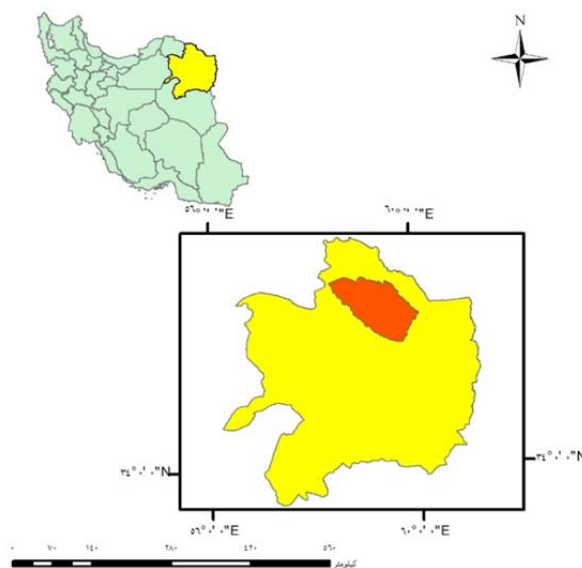
روش تحقیق:

منطقه مورد مطالعه:

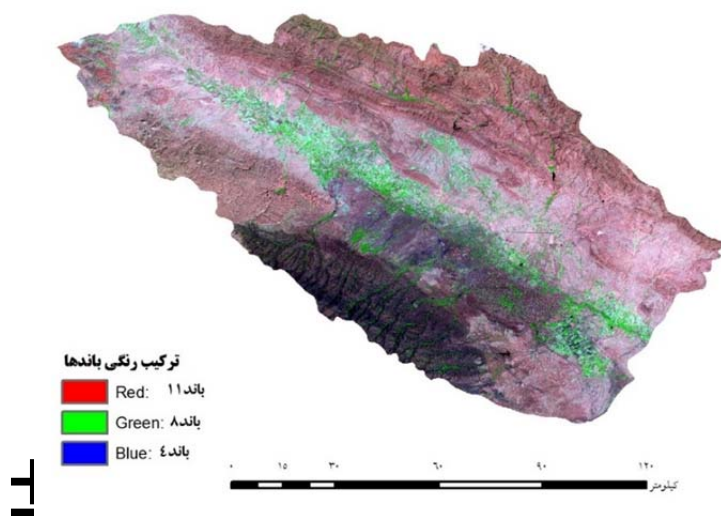
باتوجه به هدف این مطالعه که محاسبه تبخیر-تعرق واقعی است و اهمیت این پارامتر در بخش کشاورزی، منطقه مورد مطالعه باید طوری انتخاب گردد که علاوه بر پوشش‌های طبیعی گیاهی بخش وسیعی از اراضی کشاورزی را نیز شامل گردد. از این رو با توجه موقعیت جغرافیایی اراضی کشاورزی در استان خراسان رضوی، دشت مشهد به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در این پژوهش انتخاب گردید. دشت مشهد با مساحت ۶۱۳۱ کیلومترمربع در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه ۵۹ دقیقه تا ۳۷ درجه ۰۴ دقیقه شمالی و طول ۵۸ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۰۷ دقیقه شرقی در استان خراسان رضوی واقع گردیده است (شکل ۱). این دشت دارای طول ۱۶۰ کیلومتر و ارتفاع بین ۹۰۰ تا ۱۵۰۰ متر است. این منطقه دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک با متوسط بارندگی ۲۲۲/۱ میلی‌متر در سال و میانگین دمای سالانه ۱۵/۸ درجه سلسیوس است. کاربری اصلی اراضی این منطقه شامل اراضی کشاورزی آبی در اطراف رودخانه کشف رود هست (۱۷). شکل (۲) پراکندگی مناطق کشاورزی (مناطق سبزرنگ) در دشت مشهد را بر اساس تصاویر ماهواره سنتینل ۲ با قدر تفکیک مکانی ۱۰ متر نشان می‌دهد.

روش تحقیق:

باتوجه به هدف این پژوهش که بالابردن صحت تخمین تبخیر-تعرق در مناطق دارای پوشش گیاهی و مناطق فاقد پوشش با استفاده از الگوریتم مثلی است، باید از داده‌های ماهواره‌ای استفاده شود که علاوه بر دارا بودن باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک، و حرارتی دارای رزولوشن مکانی نسبتاً بالایی نیز باشند. از این رو در این مطالعه از داده‌های ماهواره لندست ۸ استفاده شد. کلیه محاسبات مربوط به داده‌های سنجنش‌ازدور در این مطالعه با استفاده از زبان برنامه‌نویسی JAVA در محیط سامانه (GEE) Google Earth Engine صورت پذیرفت.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (دشت مشهد)
Fig1. Location of study area (Mashhad plain)



شکل ۲. کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه بر اساس تصاویر ماهواره سنتینل ۲، ترکیب باندی (باندهای ۱۱، ۸ و ۴).
Fig2. Land use of study area based on Sentinel2 data, RGB (11, 8 and 4) composition.

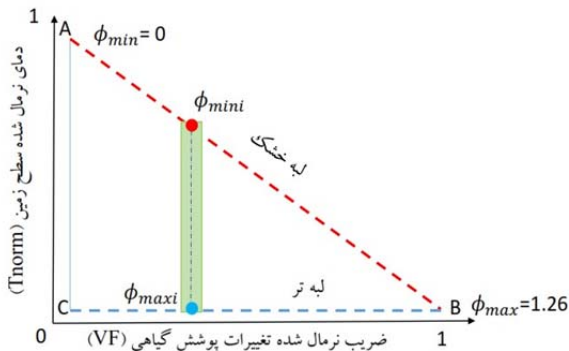
الگوریتم مثلی:

الگوریتم مثلی مانند سایر الگوریتم‌های سنجنش‌ازدوری بر پایه حل رابطه بیلان انرژی رابطه ۱ است.

$$LE = R_n - G - H \quad [1]$$

کلیه تصاویر ماهواره لندست ۸ برای بازه زمانی سال ۲۰۲۰ جستجو شد و تصاویری که در منطقه مورد مطالعه دارای ابرناکی کمتر از ۱۰ درصد بود انتخاب گردید. همچنین داده‌های هواشناسی شامل دمای هوا، دمای نقطه شبنم، رطوبت نسبی، فشار هوا، طول روز، ساعت آفتابی و سرعت باد برای تاریخ تصاویر انتخاب شده از ایستگاه سینوپتیک مشهد استخراج شد.

دمای سطح زمین مشاهده می‌گردد. در این حالت در لبه خشک، خاک نیازمند رطوبت و در لبه مرطوب به دلیل وجود رطوبت کافی حداکثر میزان تبخیر-تعرق رخ می‌دهد.



شکل ۳. نمودار شماتیک الگوریتم مثلثی که بر مبنای رسم داده‌های نرمال شده NDVI و LST در فضای دوبعدی استوار است. ϕ_{min} مقدار ضریب ϕ در لبه خشکو ϕ_{max} مقدار ضریب ϕ در لبه تر برای هر پیکسل می‌باشد.

Fig3. The schematic diagram of the triangular algorithm based on normalized NDVI and LST data in two-dimensional space. ϕ_{min} is the value of the coefficient of ϕ in the dry edge and ϕ_{max} is the value of the coefficient of ϕ in the wet edge for each pixel.

در این مطالعه داده‌های دمای سطح زمین (LST) و داده‌های NDVI با استفاده از داده‌های باند ۱۰، ۵ و ۴ ماهواره لندست ۸ در تاریخ‌های انتخابی در محیط GEE محاسبه گردیدند، و با استفاده از دو رابطه ۳ و ۴ به منظور شناسایی لبه خشک و مرطوب مدل مثلثی نرمال‌سازی شدند (۲۶).

$$T_{norm} = \frac{T_s - T_{smin}}{(T_s)_{max} - T_{smin}} \quad [3]$$

در رابطه ۳، T_{norm} میزان نرمال شده دمای سطح زمین برای هر پیکسل، T_s دمای سطح زمین در هر پیکسل، T_{smin} کمترین دمای سطح زمین در منطقه مورد مطالعه و $(T_s)_{max}$ بیشترین دمای سطح زمین در کل منطقه مورد مطالعه. (واحد محاسبه دمای سطح زمین در این مطالعه درجه سانتی‌گراد است.)

در این رابطه LE گرمای نهان تبخیر، R_n تابش خالص جذب شده توسط سطح زمین، H شار گرمای محسوس، G شار گرمای خاک هستند. واحدهای انرژی در این رابطه همگی بر مبنای $(W.m^2)$ هستند. تبخیر-تعرق با استفاده از این رابطه و میزان گرمای نهان تبخیر در فشار و دمای خاص محاسبه می‌گردد (۶).

الگوریتم مثلثی بر مبنای داده‌های شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) و دمای سطح زمین (LST) است. دو فرض اصلی این روش شامل: ۱- تمام پیکسل‌های تشکیل دهنده منطقه مورد مطالعه، دارای شرایط رطوبت خاک و پوشش گیاهی متنوعی می‌باشند. این فرض برای مشخص نمودن لبه‌های خشک و تر در این الگوریتم ضروری می‌باشد. ۲- تمامی پیکسل‌های تشکیل دهنده منطقه مورد مطالعه دارای ارتفاع یکسانی هستند. این فرض موجب می‌شود که تغییرات دمای سطح زمین بر مبنای میزان تبخیر از سطح خاک به جای تغییرات توپوگرافی در نظر گرفته شود (۳).

در روش مثلثی میزان گرمای نهان تبخیر بر اساس رابطه ۲ محاسبه می‌گردد:

$$LE = \phi \left[(R_n - G) \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] \quad [2]$$

در این رابطه، LE میزان گرمای نهان تبخیر، R_n میزان تابش خالص خورشیدی، G شار گرمای خاک بر حسب (W/m^2) ، ϕ پارامتر ترکیبی تأثیر که برای مقاومت آئرودینامیکی (۱۳)، Δ شیب فشار بخار آب اشباع و γ ضریب سایکرومتری بر حسب $(kpa/^\circ C)$ است.

روش مثلثی بر مبنای پراکندگی فضایی داده‌های نرمال شده شاخص گیاهی (NDVI) و نرمال شده دمای سطح زمین (LST) در محیطی دوبعدی استوار است (شکل ۳).

شکل (۳) نموداری شماتیک از روش مثلثی را نمایش می‌دهد. در این شکل خطوط AB و CB به ترتیب لبه خشک و لبه مرطوب را نمایش می‌دهد. در لبه خشک میزان پوشش گیاهی برابر صفر و میزان دمای سطح زمین حداکثر است و برعکس در لبه مرطوب حداکثر میزان پوشش گیاهی و کمترین

(۶) برقرار شد (۲۴). در رابطه (۶)، T_{maxi} حداکثر دمای سطحی برای هر بازه، a و b ضرایب رگرسیونی و V_f مقادیر نرمال شده NDVI که در هر بازه ۰/۰۲ قرار می‌گیرد.

$$T_{maxi} = a + bV_f \quad [۶]$$

پس از محاسبه پارامتر ترکیبی (ϕ) در گام بعدی میزان کسر تبخیر لحظه‌ای (EF) محاسبه می‌شود. این پارامتر که به صورت نسبت شار گرمای نهان به انرژی در دسترس تعریف می‌شود از طریق رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$EF = \phi \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] \quad [۷]$$

در این مطالعه ثابت ضریب سایکرومتری برابر با ۰/۰۶ و برای محاسبه شیب فشار بخار اشباع نیز از رابطه (۸) استفاده شد (۵).

$$\Delta = 0.2(0.00738T + 0.8072)^7 - 0.000116 \quad [۸]$$

در رابطه (۸)، T میانگین دمای هوا برحسب درجه سلسیوس می‌باشد.

باتوجه به زمان گذر ماهواره لندست ۸ از روی منطقه مورد مطالعه این پژوهش که در ساعت ۱۱ صبح می‌باشد و همچنین نتایج سایر مطالعات، می‌توان میزان پارامتر کسر از تبخیر لحظه‌ای در زمان گذر ماهواره را به میانگین روزانه این پارامتر تعمیم داد (۱۸).

در نهایت در گام آخر میزان تبخیر-تعرق واقعی در هر پیکسل با استفاده از رابطه (۹) محاسبه شد.

$$AET = [EF(R_n - G)]/L \quad [۹]$$

در رابطه (۹)، AET مقدار تبخیر-تعرق واقعی برحسب میلی‌متر در روز، EF میزان کسر از تبخیر، R_n مقدار تابش خالص روزانه برحسب وات بر مترمربع، G مقدار شار گرمای خاک روزانه برحسب مگا ژول بر مترمربع در روز و L میزان گرمای نهان تبخیر برحسب مگا ژول بر کیلوگرم است.

$$V_f = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad [۴]$$

در رابطه ۴ به ترتیب:

V_f ، میزان کسر از پوشش گیاهی NDVI، میزان شاخص گیاهی برای هر پیکسل، $NDVI_{min}$ ، کمترین میزان شاخص گیاهی در کل منطقه مورد مطالعه و $NDVI_{max}$ ، بیشترین میزان شاخص گیاهی در کل منطقه مورد مطالعه است.

شناسایی دقیق لبه خشک و مرطوب و محاسبه صحیح ضریب ϕ برای هر کدام از پیکسل‌های منطقه مورد مطالعه از جمله مهم‌ترین بخش محاسبات این مطالعه است.

در این مطالعه مقادیر نرمال شده VF و Tnorm برای هر یک از روزهای مورد مطالعه وارد نرم‌افزار مطلب شد و لبه خشک و مرطوب برای هر یک از روزهای مورد مطالعه و ضریب ϕ برای هر یک از پیکسل‌ها مطابق با رابطه (۵) محاسبه گردید. همان‌طور که در شکل (۲) نیز مشاهده می‌شود حداقل میزان این پارامتر برابر صفر (دمای سطح زمین حداکثر و میزان پوشش گیاهی حداقل) و حداکثر آن برابر ۱/۲۶ (دمای سطح زمین حداقل و میزان پوشش گیاهی حداکثر) است. این پارامتر به صورت خطی با میزان نرمال شده شاخص NDVI تغییر می‌یابد (۲۴).

$$\phi_i = \frac{T_{maxi} - T_{normi}}{T_{maxi} - T_{mini}} (\phi_{maxi} - \phi_{mini}) + \phi_{mini} \quad [۵]$$

که در آن:

$$\begin{aligned} T_{mini} &= T_{smin} \\ \phi_{mini} &= 1.26V_f \\ \phi_{maxi} &= \phi_{max} = 1.26 \end{aligned}$$

برای به دست آوردن دمای ماکزیمم در هر پیکسل، بعد از رسم داده‌های نرمال شده VF و Tnorm در فضای دوبعدی، داده‌های شاخص گیاهی نرمال شده به بازه‌هایی بافاصله ۰/۰۲ تقسیم شد و در هر یک از این بازه‌ها میزان حداکثر دما سطحی شناسایی شد. سپس بین کلیه دماهای حداکثری و شاخص نرمال شده گیاهی رابطه رگرسیونی خط ساده مطابق با رابطه

برج شار ادی کوواریانس، نسبت باون، لایسیمتر در منطقه مورد مطالعه انجام می‌شود. اما در ایران باتوجه به نبود امکانات اندازه‌گیری مستقیم، صحت سنجی داده‌های حاصل از مدل‌ها بر اساس مقایسه این داده‌ها با داده‌های حاصل از معادلات تجربی مانند: فائو - پنمن - مانیت، هارگریوز - سامانی، و... که بر پایه اطلاعات هواشناسی نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به منطقه مورد مطالعه است، انجام می‌شود. نکته قابل توجه در مورد این مدل صحت سنجی این است که باید این مقایسه معمولاً در مناطق کشاورزی و در سطح مزارعی انجام گیرد که نوع محصول کشت‌شده، تاریخ کشت و برداشت، طول دوره‌های رشد گیاه و سایر پارامترهای مورد نیاز در آن به صورت کاملاً شفاف مشخص باشد. سپس می‌توان با استفاده از رابطه (۱۴) میزان تبخیر-تعرق را برای سطح مزرعه مورد مطالعه به دست آورد (۱۱).

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad [14]$$

به منظور صحت سنجی داده‌های الگوریتم مثلی در این مطالعه، ابتدا ۴ مزرعه کشاورزی با اطلاعات زراعی دقیق در سطح دشت مشهد انتخاب شدند. این مزارع کمترین فاصله را با ایستگاه سینوپتیک مشهد داشتند. در سه مزرعه، گندم از نوع رقم پیشگام و در یک مزرعه ذرت علوفه‌ای از رقم ۷۰۴ کشت شده بود. در این مزارع به منظور محاسبه تبخیر-تعرق مرجع از روش فائو-پنمن-مانیت در نرم‌افزار REF-ET استفاده شد. سپس مقادیر ضریب گیاهی K_c با توجه به روش فائو ۵۶ (۱)، برای دوره‌های رشد مختلف دو گیاه گندم زمستانه و ذرت علوفه‌ای به دست آمد و با توجه به رابطه (۱۴) مقادیر تبخیر-تعرق واقعی برای هر یک از روزهای دوره رشد محاسبه شد. در نهایت ضریب تبیین R^2 و ضرایب خطا، میانگین مربعات خطا RMSE و میانگین قدر مطلق خطا MAE به منظور ارزیابی و بررسی نتایج، مطابق با رابطه‌های (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) محاسبه شد. در این معادلات X_{est} میزان داده‌های برآورد شده حاصل از الگوریتم مثلیو X_{obs} میزان داده‌های اندازه‌گیری شده بر اساس رابطه (۱۴) می‌باشد.

در این مطالعه مقادیر تابش خالص، شار گرمای خاک و میزان گرمای نهان تبخیر نیز با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدوری محاسبه شد. میزان تابش خالص، ابتدا با استفاده از رابطه (۱۰) به صورت لحظه‌ای در زمان گذر ماهواره محاسبه شد (۴). و سپس میزان تابش خالص روزانه با استفاده از رابطه (۱۱) برای روزهای مورد مطالعه محاسبه شد (۲).

$$R_{n,over} = (1 - \alpha)R_{SW} - R_{emi} + \varepsilon_0 R_{LW} \quad [10]$$

در رابطه (۱۰)، $R_{n,over}$ میزان تابش خالص لحظه‌ای بر حسب وات بر مترمربع، α میزان آلبیدو سطحی، R_{SW} تابش طول‌موج کوتاه رسیده به سطح زمین بر حسب وات بر مترمربع، R_{emi} تابش طول‌موج بلند خروجی از سطح زمین بر حسب وات بر مترمربع، ε_0 گسیلمندی حرارتی سطحی و R_{LW} تابش طول‌موج بلند رسیده به سطح زمین است.

$$\frac{R_{DANR}}{R_{n,over}} = \frac{2}{\pi \sin \left[\pi \left(\frac{T - 2a}{2T} \right) \right]} \quad [11]$$

در رابطه (۱۱) مقدار تابش خالص روزانه بر حسب وات بر مترمربع، T طول روز، a فاصله زمانی بین زمان گذر ماهواره و زمان دریافت حداکثر تابش خالص توسط سطح زمین که به طور معمول در ساعت ۱۲:۳۰ ظهر به وقت محلی صورت می‌گیرد (۲).

شار گرمای خاک و میزان گرمای نهان تبخیر نیز با استفاده از معادلات (۱۲) و (۱۳) محاسبه شد (۵، ۲۵). در معادلات (۱۲) و (۱۳) به ترتیب R_n میزان تابش خالص روزانه بر حسب وات بر مترمربع، α میزان آلبیدو سطحی و T میزان میانگین دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس است.

$$G = R_n \times (LST - 273.16) \times (0.0038 + 0.0074 \cdot \alpha) \times (1 - 0.98 \times NDVI^4) \quad [12]$$

$$L = 2.51 - 2.361 \times 10^{-3} \cdot T \quad [13]$$

به منظور صحت سنجی داده‌های حاصل از مدل‌های سنجش‌ازدوری در سراسر دنیا، معمولاً مقایسه این داده‌ها با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری مستقیم متغیر تبخیر-تعرق مانند:

مورد مطالعه محاسبه و نرمال سازی شدند. پس از آن مقادیر در یک فضای دوبعدی به منظور محاسبه لبه خشک و تر در مقابل هم ترسیم شدند. شکل (۴) نمودار دوبعدی میزان شاخص گیاهی نرمال شده در برابر دمای سطح زمین برای روز ۶۷ را نشان می دهد. جدول (۱) تاریخ روزهای مورد مطالعه و رابطه خط رگرسیون (لبه خشک) را نشان می دهد. مقدار ضریب تبیین معادلات رگرسیونی لبه خشک در کلیه روزهای مورد مطالعه بالای ۰/۸ محاسبه شد.

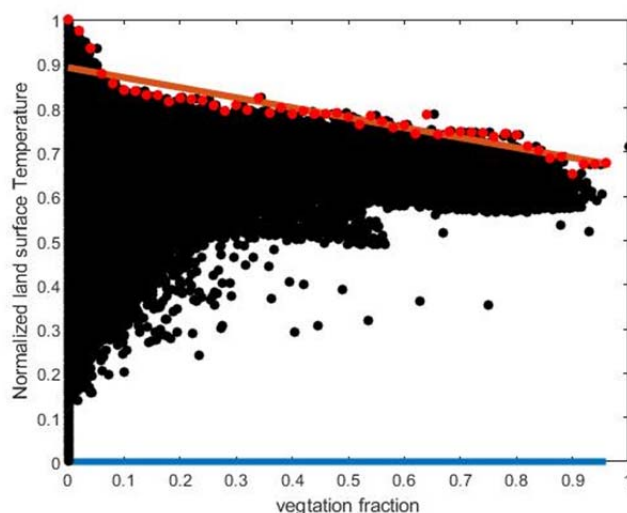
$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (X_{est} - \bar{X})(X_{obs} - \bar{X})]^2}{\sum_{i=1}^N (X_{est} - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (X_{obs} - \bar{X})^2} \quad [15]$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (X_{est} - X_{obs})^2}{N} \right]^{1/2} \quad [16]$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_{est} - X_{obs}| \quad [17]$$

نتایج:

ابتدا مقادیر دمای سطح زمین (LST) و شاخص نرمال شده تغییرات پوشش گیاهی (NDVI) برای هر یک از روزهای



شکل ۴. نمودار دوبعدی الگوریتم مثلثی برای روز ۶۷ سال ۲۰۲۰. دایره های سیاه رنگ؛ پیکسل های تشکیل دهنده منطقه مورد مطالعه هستند. خط قرمز لبه خشک و خط آبی لبه تر را نشان می دهد.

Fig4. Two-dimensional diagram of the triangular algorithm for DOY 67. Black points indicate observed pixels over the study area. The red line shows the dry edge and the blue line shows the wet edge.

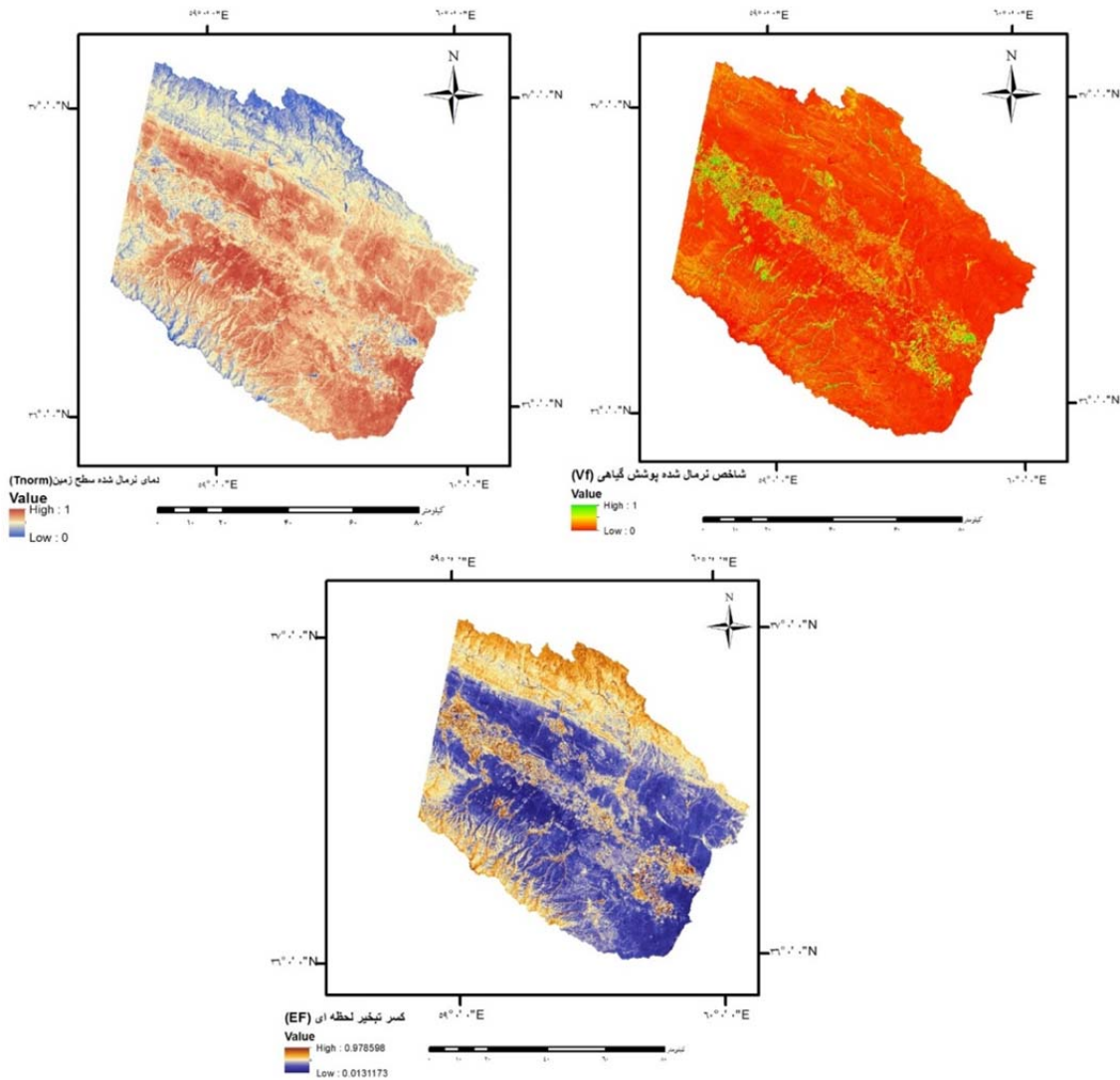
تنها تصاویر مربوط به یک روز نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۵) مشاهده می شود مناطقی که دارای پوشش گیاهی انبوه تر هستند دارای دمای سطحی کمتر و میزان ضریب کسر از تبخیر در این مناطق نیز بیشتر است. در مناطق کشاورزی دشت مشهد که از لحاظ جغرافیایی در مرکز دشت قرار دارند با توجه به بالا بودن آب قابل دسترس و میزان رطوبت خاک میزان بالاتری از ضریب کسر از تبخیر لحظه ای مشاهده شد.

پس از محاسبه لبه تر و خشک برای هر یک از روزهای مورد مطالعه، مقادیر پارامتر ترکیبی ϕ برای هر یک از پیکسل های منطقه مورد مطالعه محاسبه شد و ضریب کسر از تبخیر لحظه ای محاسبه گردید. شکل (۵) مقادیر نرمال شده دمای سطح زمین (Tnorm)، پوشش گیاهی (Vf) و ضریب کسر از تبخیر لحظه ای (EF) را برای روز ۱۴۷ نشان می دهد. با توجه به حجم بالای داده های خروجی و همچنین یکسان بودن روند تغییرات پارامترهای مورد مطالعه در این پژوهش،

جدول ۱. تاریخ روزهای مورد مطالعه و رابطه لبه خشک برای هر یک از روزها.

Table1. Selected days in 2020 and dry edge equation for each DOY.

رابطه خط رگرسیون (لبه خشک)	روز ژولیوسی	تاریخ روزهای مورد مطالعه به شمسی	تاریخ روزهای مورد مطالعه به میلادی
$T_{maxi} = -0.2265 * V_f + 0.8912$	۶۷	۱۳۹۹-۱۲-۱۸	۲۰۲۰-۰۳-۰۸
$T_{maxi} = -0.1979 * V_f + 0.9865$	۱۳۱	۱۳۹۹-۰۲-۲۲	۲۰۲۰-۰۵-۱۱
$T_{maxi} = -0.4319 * V_f + 0.9966$	۱۴۷	۱۳۹۹-۰۳-۰۷	۲۰۲۰-۰۵-۲۷
$T_{maxi} = -0.4219 * V_f + 0.9583$	۱۶۳	۱۳۹۹-۰۳-۲۳	۲۰۲۰-۰۶-۱۲
$T_{maxi} = -0.5238 * V_f + 0.9336$	۱۷۹	۱۳۹۹-۰۴-۰۸	۲۰۲۰-۰۶-۲۸
$T_{maxi} = -0.2550 * V_f + 0.9828$	۲۱۱	۱۳۹۹-۰۵-۰۹	۲۰۲۰-۰۷-۳۰
$T_{maxi} = -0.4132 * V_f + 0.8561$	۲۲۷	۱۳۹۹-۰۵-۲۵	۲۰۲۰-۰۸-۱۵
$T_{maxi} = -0.3026 * V_f + 0.9365$	۲۵۹	۱۳۹۹-۰۶-۲۶	۲۰۲۰-۰۹-۱۶

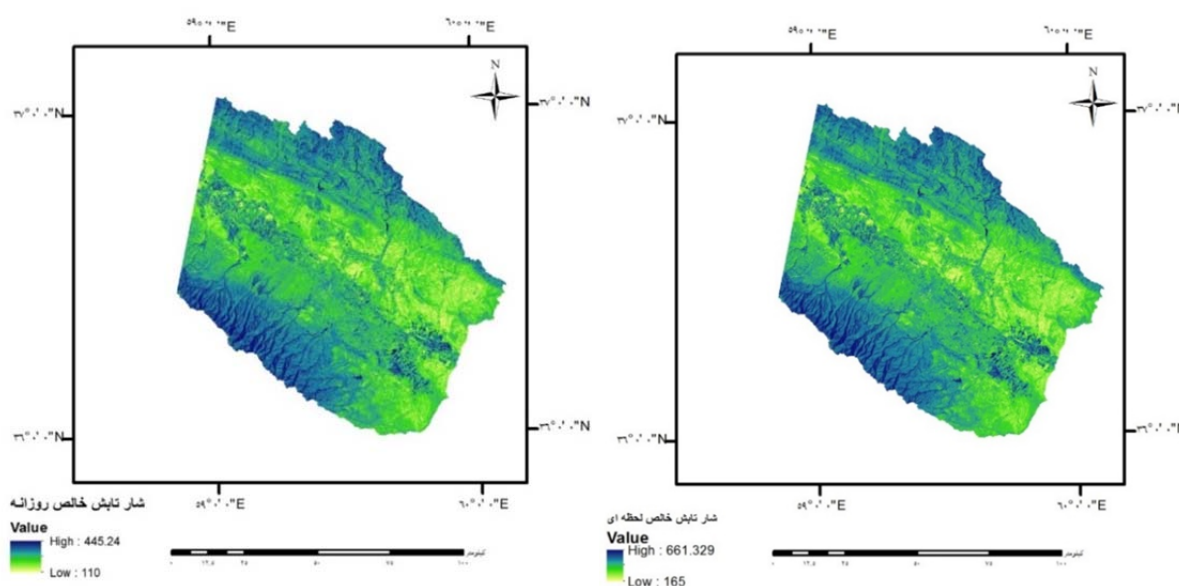


شکل ۵. مقادیر نرمال شده پوشش گیاهی، نرمال شده دمای سطح زمین و میزان کسر تبخیر لحظه‌ای برای روز ۱۴۷ سال ۲۰۲۰.

Fig5. Vegetation fraction, Normalized land surface temperature & Instantaneous Evaporative fraction (EF) for DOY

به دست آمده در مطالعات پیشین (۴، ۱۵) قابل قبول است. همان طور که در شکل (۶) مشاهده می شود میزان شار تابش خالص در مناطق دارای پوشش گیاهی و مناطق کشاورزی نسبت به مناطق بدون پوشش و خاک بایر بیشتر است. زیرا در این مناطق بیشتر تابش رسیده به سطح زمین جذب شده و کمتر انعکاس می یابد. همچنین وجود رطوبت در این مناطق نیز موجب بالا رفتن سطح جذب امواج رسیده از اتمسفر به سطح زمین می گردد.

به منظور محاسبه میزان تبخیر-تعرق واقعی، مقادیر تابش خالص لحظه ای و تابش خالص روزانه، شار گرمای خاک و گرمای نهان تبخیر نیز با استفاده از داده های ماهواره ای محاسبه شد. شکل (۶) شار تابش خالص لحظه ای و روزانه را برای روز ۱۴۷ نشان می دهد. میزان شار تابش خالص لحظه ای برای منطقه مورد مطالعه بازه بین ۲۰۰ تا ۷۰۰ وات بر مترمربع و شار تابش خالص روزانه بازه بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ وات بر مترمربع برای روزهای مورد مطالعه به دست آمد که باتوجه به نتایج

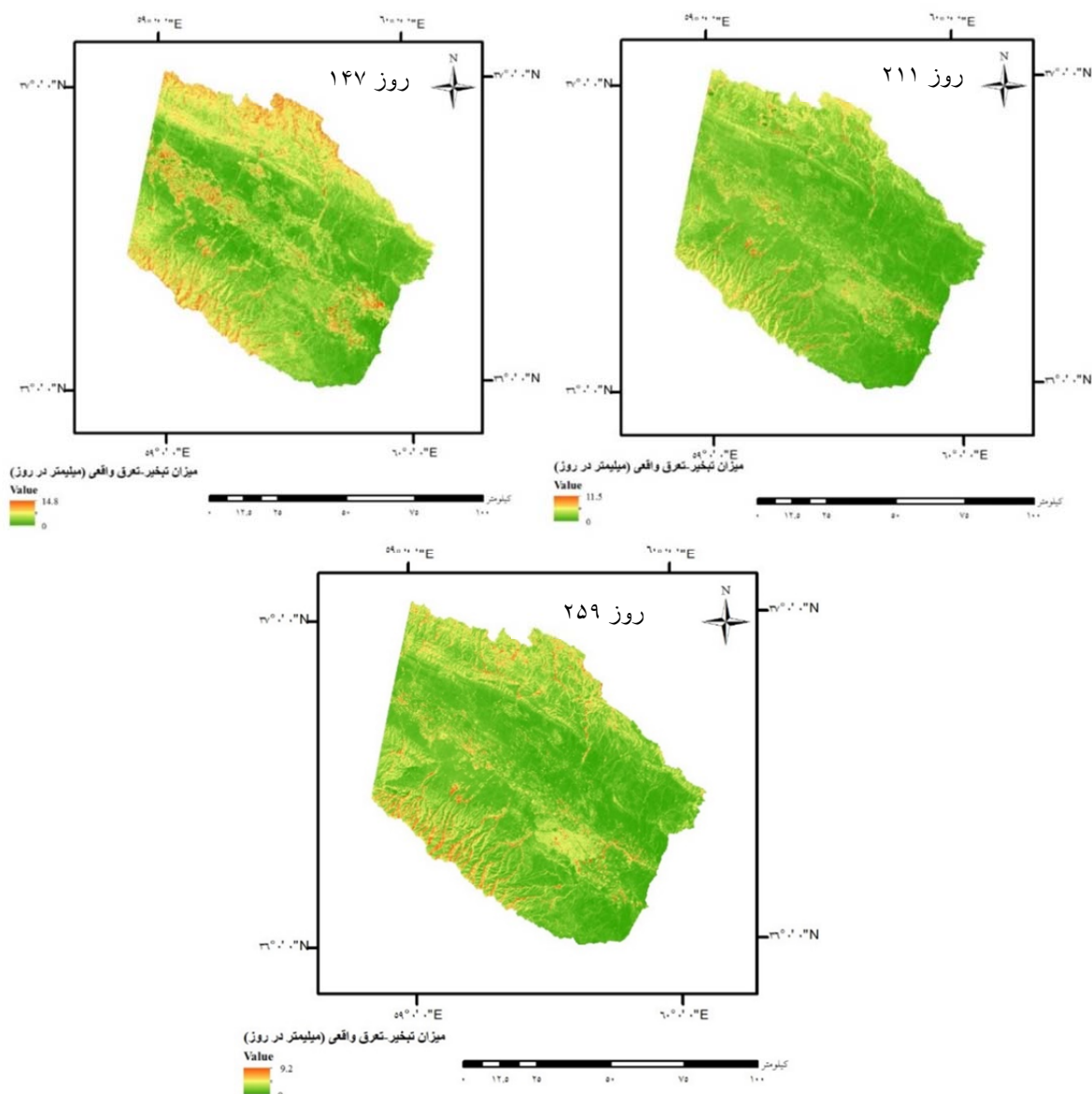


شکل ۶. مقادیر شار تابش خالص لحظه ای برحسب (W/m^2) و شار تابش خالص روزانه برحسب (W/m^2) در روز ۱۴۷ سال ۲۰۲۰.

Fig6. Instantaneous net radiation in (W/m^2) and Daily net radiation in (W/m^2) for 147 DOY.

همچنین باتوجه به بازه رشد گیاهان زراعی مشاهده می شود که هر چه به پایان بازه رشد گیاهی نزدیک می شویم طبق انتظار میزان تبخیر-تعرق واقعی کاهش یافته است به طوری که در روز ۱۴۷، میزان حداکثر روزانه تبخیر-تعرق واقعی $14/8$ میلی متر در روز، و در روز ۲۵۹ سال میزان حداکثر تبخیر-تعرق روزانه $9/2$ میلی متر در روز محاسبه شد.

در نهایت میزان تبخیر-تعرق واقعی در بازه رشد گیاهان زراعی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم مثلی محاسبه شد. شکل (۷) مقادیر تبخیر-تعرق واقعی را برای ۳ روز ۱۴۷، ۲۱۱ و ۲۵۹ از سال نشان می دهد. همان طور که در شکل (۷) مشاهده می شود، میزان تبخیر-تعرق واقعی در مناطق کشاورزی نسبت به سایر مناطق دارای میزان بالاتری است.



شکل ۷. مقادیر تبخیر-تعرق واقعی برحسب (mm/day) بر اساس الگوریتم مثلثی در روزهای ۱۴۷، ۲۱۱ و ۲۵۹ سال ۲۰۲۰.
 Fig7. Actual evapotranspiration in (mm/day) based on triangle algorithm for DOY 147, 211 & 259.

در تاریخ روزهای مورد مطالعه نشان می‌دهد. تاریخ کشت ذرت علوفه‌ای بازه بین ۱۵ تا ۳۰ خردادماه ۱۳۹۹ و تاریخ کشت گیاه گندم برای مزارع بازه میان ۱۵ تا ۳۰ مهرماه ۱۳۹۸ بوده است. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود روند تغییرات مقادیر تبخیر-تعرق واقعی حاصل از الگوریتم مثلثی با روند تغییرات تبخیر-تعرق واقعی حاصل از رابطه (۱۴) کاملاً مشابه است.

به‌منظور صحت سنجی الگوریتم مثلثی مقادیر تبخیر-تعرق واقعی به‌دست‌آمده از این روش در سطح مزارع انتخابی در منطقه مورد مطالعه با مقادیر تبخیر-تعرق واقعی حاصل از رابطه (۱۴) مقایسه شد. جدول (۲) مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین تبخیر-تعرق واقعی (AET) حاصل از الگوریتم مثلثی برای مزارع کشت گندم (مزارع ۲، ۳ و ۴) و ذرت علوفه‌ای (مزرعه ۱) و میزان تبخیر-تعرق واقعی (ET_c) حاصل از رابطه (۱۴) را

جدول ۲. مقادیر تبخیر-تعرق واقعی محاسبه شده با الگوریتم مثلثی (AET) بر حسب (mm/day) و مقادیر تبخیر-تعرق واقعی (ETc) حاصل از رابطه (۱۴) بر حسب (mm/day) برای مزارع کشت گندم و ذرت علوفه‌ای.

Table 2. Actual evapotranspiration (AET), based on triangle algorithm in (mm/day) and actual evapotranspiration (ETc) based on equation (14) in (mm/day) for wheat and maize farms.

مقادیر تبخیر-تعرق واقعی حاصل از الگوریتم مثلثی (AET)									مقادیر تبخیر-تعرق واقعی ETc		نوع گیاه	روز		
مزرعه ۴			مزرعه ۳			مزرعه ۲			مزرعه ۱					
میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل			
۳/۹۵	۵/۰۷	۲/۴۳	۴/۱۶	۶/۴۳	۱/۴۳	۵/۳۳	۶/۷۸	۲/۱۷	۲/۷۳			گندم	۶۷	
۸/۱۲	۸/۸۲	۶/۲۱	۷/۶۷	۸/۵۹	۲/۸۷	۷/۴۲	۸/۶۴	۲/۳۴	۷/۱۴				۱۳۱	
۸/۵۹	۹/۹	۵/۳۵	۷/۸۶	۹/۳۱	۳/۵۸	۷/۰۹	۸/۵۵	۲/۹۵	۵/۷۷				۱۴۷	
۴/۸	۵/۹	۲/۸۹	۴/۶۷	۵/۳۳	۲/۱۹	۴/۵۵	۵/۸۳	۱/۹۹	۳/۸۹				۱۶۳	
									۴/۴۷	۵/۹۷	۲/۷۲	۵/۸۰	ذرت	۱۷۹
									۷/۳۳	۸/۲۶	۵/۳۳	۱۰/۱۰		۲۱۱
									۹/۱۵	۹/۸۷	۷/۹۸	۱۰/۰۴		۲۲۷
									۶/۱۶	۶/۸۳	۵/۲۱	۵/۷۳		۲۵۹

تخمین تبخیر-تعرق واقعی به‌خصوص در مناطق کشاورزی دارد. کمترین میزان ضرایب خطا در مزرعه شماره ۳ کشت گندم به میزان جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۱/۳۴ میلی‌متر در روز و میانگین خطا مطلق (MAE) ۱/۲۰ میلی‌متر در روز و بیشترین ضرایب خطا در مزرعه شماره ۴ کشت گندم با RMSE ۱/۶۷ میلی‌متر در روز و MAE ۱/۴۸ میلی‌متر در روز مشاهده شد.

در مورد ضرایب خطا توجه به این نکته ضروری است که هر چه میزان ضرایب خطا محاسبه شده در میان مدل‌ها و داده‌های مشاهداتی کمتر باشد، حاکی از دقت مناسب مدل‌ها در پیش‌بینی پارامترها دارد. اما موضوع قابل بحث در مورد داده‌های مشاهداتی این است که این داده‌ها باید از صحت قابل توجهی برخوردار باشند. به طور مثال در مورد پارامتر تبخیر-تعرق در بیشتر مطالعاتی که در خارج از ایران صورت گرفته است به طور معمول داده‌های حاصل از مدل‌های سنجش‌ازدور با داده‌های مشاهداتی حاصل از ابزارهای اندازه‌گیری مستقیم تبخیر-تعرق مانند لایسیمتر، برج شار کوواریانس که قابلیت نصب در مکان منطقه مورد مطالعه را دارند، مقایسه می‌شوند. این در حالی است که در ایران باتوجه به کمبود و در اکثر مواقع نبود تجهیزات اندازه‌گیری مستقیم در اکثر مطالعات به‌منظور صحت

به‌منظور مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از دو روش مذکور ضریب تبیین (R^2) و ضرایب خطا (RMSE) و (MAE) محاسبه شد. جدول (۳) نتایج حاصل از مقایسه روش‌ها را در سطح مزارع مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۳. مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق واقعی حاصل از الگوریتم مثلثی و داده‌های تبخیر-تعرق واقعی حاصل از رابطه (۱۴) در سطح مزارع کشت گندم و ذرت علوفه‌ای.

Fig3. Comparison of AET estimated from triangle algorithm with actual evapotranspiration measured by equation (14) in wheat & maize farms.

	MAE	RMSE	R^2
مزرعه ۱	۱/۳۶	۱/۶۲	۰/۷۲
مزرعه ۲	۱/۲۱	۱/۴۹	۰/۷۵
مزرعه ۳	۱/۲۰	۱/۳۴	۰/۸۷
مزرعه ۴	۱/۴۸	۱/۶۷	۰/۸۵

بیشترین ضریب همبستگی در مزرعه شماره ۳ کشت گندم به میزان ۸۷ درصد، و کمترین میزان همبستگی در مزرعه شماره ۱ که دارای ذرت علوفه‌ای بود به میزان ۷۲ درصد مشاهده شد. ضریب همبستگی بیش از ۷۰ درصد در میان مزارع مورد مطالعه حاکی از توانایی بالا الگوریتم مثلثی در

تبخیر-تعرق به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک دارد. از جمله مزیت های این الگوریتم، ساختار ساده و داده های ورودی کم است که می توان از این روش به خصوص در مناطقی که کمبود داده جهت محاسبه تبخیر-تعرق واقعی دارند استفاده نمود. استفاده از داده های ماهواره ای در کنار استفاده از ابزارهای محاسباتی به روز مانند سامانه تحت وب (GEE) موجب بالابردن سرعت محاسبات در این مطالعه شد.

محاسبه لبه خشک در این الگوریتم از جمله منابع ایجاد خطا در این روش است. جهت محاسبات لبه خشک در مناطق بزرگ تر با توپوگرافی متفاوت توصیه می شود ابتدا منطقه مورد مطالعه بر اساس توپوگرافی به مناطق همگن تقسیم شود و سپس برای هر زیر منطقه لبه خشک و تر محاسبه گردد. همچنین به منظور بالابردن سطح اطمینان نتایج به دست آمده توصیه می شود خروجی های حاصل از الگوریتم با داده های مشاهداتی مستقیم مقایسه گردد. با توجه به اینکه در این مطالعه امکان برداشت داده های مشاهداتی مستقیم نبود، داده های حاصل از الگوریتم بیش از ۱ میلی متر بیش برآورد نشان دادند. در نهایت جهت بالابردن سطح اطمینان توصیه می شود در این روش از داده های ماهواره ای با قدرت تفکیک مکانی کمتر استفاده شود که میزان تغییرات پوشش گیاهی و همچنین رطوبت خاک بادقت بالاتری تخمین زده شود. این امر موجب محاسبه دقیق لبه خشک و تر در الگوریتم مثلثی و در نهایت بالارفتن صحت تخمین پارامتر تبخیر-تعرق واقعی می شود.

سنجی مدل های برآورد تبخیر-تعرق از فرمول های تجربی مانند فائو-پنمن یا هارگریوز-سامانی استفاده می شود که این مدل ها نیز با توجه پارامترهای هواشناسی مورد مطالعه معمولاً مقادیر تبخیر-تعرق را با خطا محاسبه می کنند.

به منظور کاهش خطا در این مطالعه سعی شد تا نزدیک ترین مزارع به ایستگاه هواشناسی مشهد انتخاب شود تا تغییرات پارامترهای هواشناسی مورد نیاز برای روش تجربی فائو-پنمن-مانیتث به حداقل برسد. با این وجود میزان ضرایب خطا در این مطالعه بیش از ۱ میلی متر محاسبه شد که با توجه به شرایط صحت سنجی، این مقادیر قابل قبول است.

بحث و نتیجه گیری:

در این مطالعه از الگوریتم مثلثی و داده های ماهواره ای جهت برآورد تبخیر-تعرق واقعی در سطح دشت مشهد استفاده شد. نتایج به دست آمده از مقایسه این روش با مقادیر تبخیر-تعرق واقعی به دست آمده در سطح مزارع مورد مطالعه، حاکی از صحت قابل قبول این روش در تخمین پارامتر تبخیر-تعرق واقعی به خصوص در سطح مناطق کشاورزی دارد. الگوریتم مثلثی موجب بالارفتن قدرت تفکیک مکانی تخمین پارامتر تبخیر-تعرق می شود، و روش مناسبی جهت برآورد پارامتر تبخیر-تعرق واقعی در سطح مناطق وسیع جغرافیایی است. نتایج به دست آمده از استفاده این الگوریتم در سایر مطالعات (۲۴ و ۲۶) نشان از قابلیت این الگوریتم در تخمین پارامتر

منابع مورد استفاده:

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. "Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements- FAO Irrigation and drainage paper 56." *Fao, Rome* 300 (9): D05109.
- Bisht G, Venturini V, Islam S, Jiang L. 2005. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sens Environ.* 97(1):52-67.
- Carlson T. 2007. An Overview of the "Triangle Method" for Estimating Surface Evapotranspiration and Soil Moisture from Satellite Imagery. *Sensors*, 7(8):1612-1629.
- da Silva BB, Braga AC, Braga CC, de Oliveira LMM, Montenegro SMGL, Barbosa Junior B. 2016. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Rev Bras Eng Agric e Ambient*, 20(1):3-8.
- Gad HE, El-Gayar SM. 2010. Climate parameters used to evaluate the evapotranspiration in delta central zone of Egypt. *Fourteenth Int Water Technol Conf IWTC14*, (February):529-548.
- Glenn EP, Nagler PL, Huete AR. 2010. Vegetation Index Methods for Estimating Evapotranspiration by Remote Sensing. *Surv Geophys*, 31(6):531-555.
- Gowda PH, Chavez JL, Colaizzi PD, Evett SR, Howell TA, Tolck JA. 2008. ET mapping for

- agricultural water management: Present status and challenges. *Irrig Sci*,26(3):223-237.
8. Hassan QK, Bourque CPA, Meng FR, Cox RM. 2007. A wetness index using terrain-corrected surface temperature and normalized difference vegetation index derived from standard MODIS products: An evaluation of its use in a humid forest-dominated region of Eastern Canada. *Sensors*,7(10):2028-2048.
 9. Hoedjes JCB, Chehbouni A, Jacob F, Ezzahar J, Boulet G. 2008. Deriving daily evapotranspiration from remotely sensed instantaneous evaporative fraction over olive orchard in semi-arid Morocco. *J Hydrol*, 354(1-4):53-64.
 10. Jiang L, Islam S. 1999. A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations. *Geophys Res Lett*,26(17):2773-2776.
 11. Kumar U, Sahoo B, Chatterjee C, Raghuwanshi NS. 2020. Evaluation of Simplified Surface Energy Balance Index (S-SEBI) Method for Estimating Actual Evapotranspiration in Kangsabati Reservoir Command Using Landsat 8 Imagery. *J Indian Soc Remote Sens*, 48(10):1421-1432.
 12. Li Z, Jia L, Lu J. 2015. On uncertainties of the Priestley-Taylor/LST-Fc feature space method to estimate evapotranspiration: Case study in an arid/semiarid region in northwest China. *Remote Sens*, 7(1):447-466.
 13. Long D, Singh VP. 2012. A Two-source Trapezoid Model for Evapotranspiration (TTME) from satellite imagery. *Remote Sens Environ*,121:370-388.
 14. Luo T, Jutla A, Islam S. 2015. Evapotranspiration estimation over agricultural plains using MODIS data for all sky conditions. *Int J Remote Sens*,36(5):1235-1252.
 15. Moqbeli Damaneh M, Sanaeinejad S.H. 2018. Estimate of potential evapotranspiration in Freiman using the priestley-taylor method and remote sensing technique. *Journal of RS & GIS for Natural Resources*, 9(3): 72-84. (In Persian)
 16. Morshedi A, Naderi M, Tabatabaei S H, Mohammadi J. 2017. Estimation of Actual Evapotranspiration at Regional Scale using Remote sensing data in Shahrekord Plain (II) Comparing SEBAL and METRIC to Some Mathematical Models of Evapotranspiration. *Journal Water and Soil Sci (Sci. & Technol. Agric. & Natur. Resour.)*, 21 (3):1-13 (In Persian)
 17. Paymard P. Assessment of Land Capability for Different Irrigation Systems by Parametric and Fuzzy Approaches in the Mashhad Plain, Northeast Iran Assessment of Land Capability for Different Irrigation Systems by Parametric and Fuzzy Approaches in the Mashhad Plain. 2015; (May).
 18. Peng J, Borsche M, Liu Y, Loew A. 2013. How representative are instantaneous evaporative fraction measurements of daytime fluxes? *Hydrol Earth Syst Sci*,17(10):3913-3919.
 19. Pourmohamad Y, Ghandehari A, Davary K, Shirazi P. 2020. Multicriteria Decision-Making Approach to Enhance Automated Anchor Pixel Selection Algorithm for Arid and Semi-Arid Regions. *J Hydrol Eng*,25(11):04020049.
 20. Rango A. 1994. Application of remote sensing methods to hydrology and water resources. *Hydrol Sci J*, 39(4):309-320.
 21. Rasmussen MO, Srensen MK, Wu B, Yan N, Qin H, Sandholt I. 2014. Regional-scale estimation of evapotranspiration for the North China Plain using MODIS data and the triangle-approach. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*. 2014;31(1):143-153.
 22. Reynolds JF, Stafford Smith DM, Lambin EF, et al. 2007. Ecology: Global desertification: Building a science for dryland development. *Science* (80-),316(5826):847-851.
 23. Stisen S, Sandholt I, Nørgaard A, Fensholt R, Jensen KH. 2008. Combining the triangle method with thermal inertia to estimate regional evapotranspiration - Applied to MSG-SEVIRI data in the Senegal River basin. *Remote Sens Environ*,112(3):1242-1255.
 24. Tang R, Li ZL, Tang B. 2010. An application of the Ts-VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation. *Remote Sens Environ*,114(3):540-551.
 25. Teixeira AH d. C, Bastiaanssen WGM, Ahmad MD, Bos MG. 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. Part A: Calibration and validation. *Agric For Meteorol*,149(3-4):462-476.
 26. Zhang H, Gorelick SM, Avissé N, Tilmant A, Rajsekhar D, Yoon J. 2016. A new temperature-vegetation triangle algorithm with Variable Edges (TAVE) for satellite-based actual evapotranspiration Estimation. *Remote Sens*,8(9).



Actual evapotranspiration estimation by Triangle algorithm and landsat8 data (case study: Mashhad plain-Khorasan Razavi province)

Mojdeh Salimifard, Hosein Sanaei Nejad, Alireza Rashki

Received: 2022-08-08 / Accepted: 2022-10-01 / Published: 2024-09-29

Abstract

The estimation of spatially-variable actual evapotranspiration (AET) is a critical challenge to regional water resources management. Most of the available crop coefficient based ET computation methods provide point-scale estimates which need up-scaling to apply at the catchment or command area scale. A variety of remote sensing methods with varying complexity have been developed to generate regional AET estimates based on surface energy balance or vegetation status. The triangle method is used to estimate regional evapotranspiration (ET) in arid and semi-arid regions. In this study, for estimation actual evapotranspiration was used triangle algorithm with Landsat 8 data in 2020 in Mashhad plain.

The results of the triangle algorithm were verified with the evapotranspiration obtained from the FAO Penman-Monteith coupled crop coefficient in wheat and maize farms. The validation results showed high accuracy of the triangle algorithm in actual evapotranspiration estimation so that the correlation coefficient observed more than 0.7 and the maximum Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE) was 1.67 and 1.48 mm per day, respectively.

Background and Objective: Dry and semi-arid lands cover about 45% of the earth's area, and 35% of the world's population lives in these areas, where water in arid and semi-arid regions is one of the major limitations for economic welfare and sustainable development, evapotranspiration is the largest component of water loss from the earth's land surface, accounting for the consumption of more than 80% of the annual available water in semi-arid environments, the accurate spatial estimation of evapotranspiration is important in hydrology, meteorology, and agriculture. The FAO method is commonly recommended and utilized in several countries. However, the spatial and temporal variations of the surface characteristics cannot be taken into account with high accuracy by

Mojdeh Salimifard¹ (✉), Hosein Sanaei Nejad², Alireza Rashki³

1. The Ferdowsi University of Mashhad- Faculty of Agriculture-Department of water engineering

2. Professor, Ferdowsi University of Mashhad Faculty of Agriculture-Department of water engineering

3. Associated Professor of Ferdowsi university-Department of desert and arid area management-Faculty of Natural Resource and Environment.

DOI: 10.30495/girs.2022.695287

E-mail: mozhdehsalimi18@gmail.com

this method. In contrast to FAO method, remote sensing technology based on satellite data is able to estimate evapotranspiration at a different spatial scale. Evapotranspiration estimation based on experimental methods and energy balance usually has errors in the extended area due to the heterogeneous texture of the environment, changes in topography and vegetation, etc. In addition, some of these models need station data like (land surface temperature, wind speed, etc.) , which are not recommended for large-scale areas. In order to overcome the latter problem, attempts have been made to develop a parameterization of regional ET with only satellite-derived surface parameters, such as the triangle method. Considering the arid and semi-arid climate of Iran and the necessity of proper use of water resources in the agricultural area, as well as the lack of suitable tools for direct measurement (such as Bowen ratio, Eddy covariance flux tower, etc.) the ET estimation by using RS models with appropriate accuracy and efficiency is important, especially in areas without meteorology stations. The purposes of this study include ET estimation by triangle algorithm and Landsat 8 satellite images on large-scale areas. And increase the accuracy of the ET spatial analysis in different vegetation coverage areas.

Material and Methods: Considering the purpose of this study, which is evapotranspiration estimation, and the importance of this parameter in the agricultural lands, the studied area should include agricultural lands and natural plant covers. Therefore, according to the location of agricultural lands in Khorasan Razavi province, Mashhad Plain was selected as the study area in this research. Landsat 8 satellite data was used in this study. All calculations related to remote sensing data in this study were done using JAVA programming language in the Google Earth Engine code (GEE) system environment. All Landsat 8 satellite images for 2020 were collected and the images with less than 10% cloudiness were selected. Also, meteorological data including air temperature, dew point temperature, relative humidity, air pressure, day length, sunshine hours, and wind speed were collected from Mashhad synoptic station. A triangular algorithm is based on the spatial distribution in the two-dimensional space of normalized vegetation index (NDVI) and normalized land surface temperature (LST) data. In this study, land surface temperature and NDVI data were calculated using Landsat 8 band 10, 5, and 4 in the GEE and, in order to identify the dry and

wet edges of the triangular algorithm were normalized. In order to wet and dry edges calculation for each day, normalized NDVI and LST were used. All calculation related to the wet and dry edges was done in MATLAB software. After that ϕ coefficient was estimated for each pixel. In the next step, the instantaneous evaporation fraction (EF) was estimated for each pixel. Net radiation, soil heat flux, and latent heat of evaporation values were also estimated using remote sensing data. For validation of the triangular algorithm in this study, four farms were selected that have exact data on crop growth stages. These farms had the shortest distance from Mashhad synoptic station. Reference evapotranspiration is computed by the Fao-Penman-Monteith method using the REF-ET software for each farm. After that, coefficient Kc was obtained based on the FAO-56 method for different growth periods of two plants (winter wheat, and maize), and the actual ET values were calculated for each day of the growth period. For the result validation, the correlation coefficient R^2 and root mean squared error RMSE, and mean absolute error MAE was calculated.

Result and Discussion: First, the values of land surface temperature (LST) and normalized vegetation change index (NDVI) were calculated and normalized for each of the studied days. After that, the values were plotted in a two-dimensional space to calculate the dry and wet edges. The correlation coefficient of dry edge regression equations was above 0.8 on all studied days. Areas with dense vegetation covers had a low land surface temperature and the EF was high in these areas. In the agricultural areas of Mashhad plain, which are located in the center of the plain, due to the high availability of water and soil moisture, a higher amount of EF was observed. The instantaneous net radiation flux for the study area was between 200 and 700 W/m² and the daily net radiation flux was between 100 and 400 W/m² for the studied days. Finally, the actual evapotranspiration during the growing period of agricultural plants was estimated using the triangular algorithm. The results of the triangle algorithm were verified with the evapotranspiration obtained from the Fao-Penman-Monteith coupled crop coefficient in wheat and maize farms. The validation results showed high accuracy of the triangle algorithm in actual evapotranspiration estimation. The correlation coefficient observed more than 0.7 and

the maximum Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE) was 1.67 and 1.48 mm per day, respectively.

Conclusion: The triangle algorithm can effectively address the combined influence of terrain and water stress on AET estimates in semi-arid environments. As the triangle algorithm has a simple structure and low data requirements, it provides an efficient solution to the increasing need for evapotranspiration estimation in data-scarce areas. The results obtained from the

comparison of the triangle algorithm with the actual ET values obtained from farms indicate the acceptable accuracy of this method in estimating the actual ET parameter, especially in agricultural areas. The triangular algorithm increases the spatial resolution of ET estimating and it is a suitable method for use in extended areas. The use of satellite data and the web-based system (GEE) increased the speed of calculations in this study.

Keywords: Actual evapotranspiration, Triangle algorithm, Landsat8, Mashhad plain.