

محاسبه و ارزیابی تبخیر در دریاچه پشت سدها با استفاده از مدل تبخیر و تعرق SEBAL مطالعه موردی: سد امیرکبیر

سعیده زمانی^۱

مجید رحیمزادگان^۲

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۰۵/۲۱

چکیده

تبخیر از دریاچه پشت سدها و دریاچه‌های آب شیرین از جمله روش‌های هدررفت منابع آب است. به همین دلیل اندازه‌گیری مقدار تبخیر از سطح پهنه‌های آب شیرین اهمیت بسیاری در مدیریت منابع آب دارد. روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق ارائه شده که از جمله آن‌ها الگوریتم توازن انرژی در سطح (SEBAL) است که می‌تواند با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نقشه‌های پهنه‌بندی تبخیر-تعرق تولید نماید. تا به حال، الگوریتم SEBAL بیشتر در برآورد تبخیر-تعرق از سطح خشکی‌ها و پوشش‌های گیاهی پیاده‌سازی شده و تحقیقات کمی در زمینه کاربرد آن در سطح پهنه‌های آبی شیرین انجام شده است. هدف این تحقیق، بکارگیری الگوریتم SEBAL جهت پهنه‌بندی تبخیر از سطح دریاچه‌های پشت سدها است. به همین منظور سه تصویر Landsat TM از دریاچه سد امیرکبیر (کرج) و زمین‌های کشاورزی پایین‌دست آن مربوط به ماه‌های خرداد، تیر و مرداد سال ۱۳۹۰ تهیه گردید و تصحیحات رادیومتریک و هندسی بر روی آن انجام شد. برای انجام پیاده‌سازی‌های الگوریتم SEBAL، از داده‌های ایستگاه هواشناسی کرج استفاده شد. همچنین مقدار تبخیر اندازه‌گیری شده از روش تشت تبخیر توسط شرکت آب منطقه‌ای استان تهران در نزدیکی دریاچه سد امیرکبیر به عنوان داده‌های واقعیت زمینی استفاده گردید. RMSE نتایج به دست آمده از SEBAL برای سد امیرکبیر با داده‌های زمینی، ۰/۲۷ میلی‌متر بود که مقدار قابل قبولی محسوب می‌شود. مقدار تبخیر روزانه نیز از کل سطح دریاچه در تاریخ‌های منتخب به ترتیب ۱۰/۶۴۳، ۸/۰۳۷ و ۵/۴۳۵ متر در روز به دست آمد. علاوه بر این، نتایج نشان دهنده افزایش تبخیر از سطح مخزن سد در مناطق کم‌عمق به سمت مناطق عمیق‌تر بود که این مورد می‌تواند نشان دهنده کارایی نامناسب روش‌های نقطه‌ای اندازه‌گیری تبخیر باشد. در مجموع، نتایج بیانگر کارایی الگوریتم SEBAL برای برآورد تبخیر از سطح دریاچه‌های سدها بود و می‌توان با توجه به شرایط مکانی و زمانی هر منطقه، از آن برای تعیین تبخیر پهنه‌های آبی شیرین استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم SEBAL، تبخیر-تعرق، تصاویر ماهواره‌ای، دریاچه سد، پهنه‌بندی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی zamani.saeideh@gmail.com

۲- استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (نویسنده مسئول) rahimzadegan@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

مستقیم مقدار تبخیر، به دلیل عواملی همچون نبودن ایستگاه تبخیرسنجی، عدم داده‌برداری مرتب و صحیح و هزینه‌بر بودن احداث ایستگاه‌های تبخیرسنجی مشکل است (Bastiaanssen, et al., 1998). همچنین این داده‌ها به صورت نقطه‌ای برداشت شده که امکان انجام پهنه‌بندی با دقت مناسب را فراهم نمی‌کند. علاوه بر روش تشت تبخیر، می‌توان با بکارگیری داده‌های هواشناسی در قالب معادلات تجربی یا معادلات با پایه نظری، میزان تبخیر را تخمین زد. این روش‌ها نیز بر مبنای داده‌های ایستگاهی انجام می‌گیرند که مشکلات وارد بر روش تبخیر بر آن‌ها نیز مترتب است (Zare et al., 2009).

علاوه بر روش‌های مستقیم و تجربی اندازه‌گیری تبخیر، روش‌های بیلان انرژی نیز از جمله روش‌های محاسبه تبخیر هستند. روش بیلان انرژی^۱ در تخمین میزان تبخیر که بیشتر در محاسبه تبخیر از سطح آزاد آب نظیر دریاچه‌ها به کار می‌رود، بر پایه اصل بقای انرژی استوار است (صفوی، ۱۳۹۳). در سال‌های اخیر و با پیشرفت سنجنده‌های ماهواره‌ای و روش‌های سنجنش از دور، استفاده از تصاویر تهیه شده توسط این سنجنده‌ها در تعیین میزان تبخیر-تعرق بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Bastiaanssen et al., 1998). با استفاده از سنجنش از دور می‌توان تبخیر-تعرق را در یک منطقه بدون نیاز به دانستن پیشینه‌ای در رابطه با شرایط خاک، محصول و نحوه مدیریت مزرعه برآورد نمود (Bastiaanssen et al., 2005). به کمک این دانش، توزیع مکانی عوامل مورد نیاز مدل‌های تبخیر-تعرق و تغییرات زمانی آنها بین دو تصویربرداری متوالی فراهم می‌شود (Allen et al., 2007). الگوریتم‌های بیلان انرژی بر دو نوع هستند: (۱) الگوریتم‌های تک‌منبعی^۲ و (۲) الگوریتم‌های دومنبعی^۳ (Bastiaanssen, et al., 1998). در الگوریتم‌های تک‌منبعی تبخیر و تعرق مجموعاً به صورت یک پارامتر محاسبه می‌شود، اما در الگوریتم‌های دومنبعی تبخیر و تعرق هریک به صورت یک جمله جداگانه در نظر

گمبود آب از مهمترین و بزرگترین چالش‌های قرن آینده است (Genanu et al, 2017). آب یکی از عوامل اصلی تعیین‌کننده در توسعه کشاورزی و صنعتی مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود. مصرف بی‌رویه و نادرست منابع آبی و نیز هدر رفت آن‌ها از طرق مختلف باعث ایجاد بحران‌های بسیاری شده است (برهیمی و یزدانی، ۱۳۹۲). این بحران‌ها موجب شده‌اند که نیاز به یک راه حل مناسب جهت پایش و مدیریت منابع آبی بیش از پیش احساس شود. یکی از منابع آبی مهم تأمین‌کننده نیاز آب شرب، کشاورزی و صنعت، بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک، آب ذخیره شده در دریاچه‌های پشت سدهای احداث شده بر روی رودخانه‌ها است (Sima et al., 2013). از جمله روش‌های هدر رفت آب در دریاچه‌های آب شیرین و مخازن سدها، تبخیر از سطح آن‌ها بوده و این مورد بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در مدیریت منابع آبی ایفا کند (Gao et al, 2008). در کشور ایران با بارش نسبتاً کم، تلفات تبخیر نقش مهمی در بیلان آب مخازن سدها دارد. برای اندازه‌گیری و برآورد تبخیر سطحی روش‌های مختلفی ارائه شده است. یکی از روش‌های رایج برای محاسبه تبخیر از سطح دریاچه‌ها و مخازن آبی و همچنین اندازه‌گیری تبخیر-تعرق گیاهان، استفاده از تشت‌های تبخیر است (برهیمی و یزدانی، ۱۳۹۲). تشت تبخیر به عنوان وسیله‌ای کم هزینه به طور مستقیم تبخیر را اندازه‌گیری نموده و نتایج حاصل از آن قابل تعمیم به تبخیر از سطوح دریاچه، مخازن و تبخیر-تعرق در کشاورزی است (Irmak et al., 2002). به دلایل مختلف، در مجموع مقدار تبخیری که از تشت تبخیر به دست می‌آید، بیشتر از مقدار تبخیر از سطح آزاد آب در هر منطقه بوده، لذا ضریبی به نام ضریب تشتک تعریف می‌شود تا مقدار اندازه‌گیری شده در تشت تبخیر را به مقدار واقعی تبدیل نماید (صفوی، ۱۳۹۳).

استفاده از روش تشت تبخیر، علیرغم اندازه‌گیری

1- Energy Balance

2- One-source models

3- Two-source models

گرفته می‌شود. ۱۱۷۴ میلیمتر)، منعکس کننده تغییرات قابل توجه این عامل در کاربری‌های مختلف حوضه بود (پورمحمدی و همکاران، ۱۳۹۰).

کمسیون ملی آب^۲ استرالیا (۲۰۰۹)، در گزارشی تبخیر از سطح دریاچه‌های وترل^۳ و پامامارو^۴ را با استفاده از روش الگوریتم SEBAL، به ترتیب ۱۳۳/۱ و ۱۱۸/۱ گالن، با استفاده از روش تشت تبخیر ۱۲۹/۳ و ۱۱۸/۷ گالن و با استفاده از روش تعادل آب ۱۲۵/۸ و ۱۳۲/۴ گالن، برآورد کرد. نتایج حاصل از این گزارش، کارایی و برتری روش‌های سنجش از دور را در تخمین تبخیر از سطح دریاچه‌ها نشان داد، به ویژه در مناطقی که دسترسی به داده‌های زمینی ممکن نباشد، (National Water Commission, 2009).

سیما و همکاران (۲۰۱۳)، در پژوهشی، جهت ارائه مدلی برای برآورد تبخیر از سطح آب دریاچه‌های شور با لحاظ نمودن اثرات شوری و تغییرات مکانی متغیرها، مدل توزیعی برای برآورد نرخ تبخیر روزانه بر پایه روش بیلان انرژی و استفاده از داده‌های سنجش از دور تلاش نمودند. نقشه‌های به دست آمده از نرخ تبخیر از دریاچه ارومیه، نشان داد که نرخ تبخیر از سواحل به سمت نواحی داخلی دریاچه افزایش می‌یابد. محدوده تغییرات نرخ تبخیر از سطح دریاچه نیز از ۳ تا ۷ میلیمتر در روز، طی ماه‌های مختلف برآورد شد (Sima et al., 2013).

کاوایانی و همکاران (۱۳۹۲)، در تحقیقی با استفاده از تصاویر سنجنده مادیس ۵ و الگوریتم SEBAL، تبخیر و تعرق را در دشت قزوین به دست آوردند. نتایج نشان‌دهنده کارایی مدل SEBAL در دشت قزوین بودند، این الگوریتم در برآورد تبخیر و تعرق در دشت قزوین دارای ضریب تبیین برابر ۰/۹۲ بود.

رحیمی و همکاران (۲۰۱۵)، با هدف مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم SEBAL با مقادیر محاسبه شده توسط

الگوریتم توازن انرژی سطح زمین^۱ (SEBAL) از مهمترین و پرکاربردترین روش‌های محاسبه بیلان انرژی برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجش از دور است. این الگوریتم از جمله مدل‌های تک‌منبعی می‌باشد. SEBAL تبخیر را بر اساس تعادل لحظه‌ای انرژی در سطح هر پیکسل از یک تصویر ماهواره‌ای محاسبه می‌نماید (کریمی و همکاران، ۱۳۹۰). الگوریتم SEBAL برای اولین بار توسط باستیانسن و همکاران (۱۹۹۸) برای برآورد تبخیر-تعرق از سطح پوشش‌های گیاهی ارائه شد (Bastiaanssen et al., 1998) و الگوریتم اولیه توسط آلن و همکاران (۲۰۰۲) اصلاح گردید.

باستیانسن و همکاران (۲۰۰۵)، در تحقیقی دقت تبخیر-تعرق برآورد شده در روش SEBAL را برای یک روز در مقیاس ۱۰۰ هکتار، ۸۵ درصد به دست آوردند که این دقت برای یک فصل تا ۹۵ درصد افزایش نشان داد. تحقیق مذکور نشان داد که به طور کلی، استفاده از این روش برای برآورد تبخیر-تعرق در مقیاس‌های بزرگ و دوره‌های بلند مدت نتایج بهتری می‌دهد.

ثنایی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۰)، در تحقیقی توزیع مکانی تبخیر-تعرق واقعی روزانه در زیر حوضه آبریز مشهد را با استفاده از تصاویر سنجنده مادیس و الگوریتم SEBAL به دست آوردند. نتایج نشان داد که تصاویر سنجنده مادیس و الگوریتم SEBAL قادر هستند مقدار تبخیر-تعرق واقعی را در مقیاس روزانه به خوبی برآورد کنند (ثنایی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۰).

پورمحمدی و همکاران (۱۳۸۹) در پژوهشی با بررسی یک سری زمانی از تصاویر سنجنده مادیس و به کارگیری الگوریتم SEBAL، تبخیر-تعرق واقعی در حوضه آبخیز منشاد در استان یزد را به دست آوردند. نتایج حاصل از این پژوهش، ضمن نشان دادن تغییرات مکانی تبخیر-تعرق صورت گرفته از کاربری‌های مختلف اراضی (بین ۲۷ تا

2- National Water Commission

3- Wetherell

4- Pamamaroo

5- MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

1- Surface Energy Balance Algorithm for Land

۴/۹ میلیمتر را در برمی گیرد. حداکثر مقدار تبخیر و تعرق در مناطق کشاورزی (به دلیل فصل رشد گیاهان) به دست آمد. مقایسه نتایج این مدل و اندازه گیری های تشت تبخیر، نشان دهنده عدم کارایی و بسط نتایج تشت تبخیر به کل منطقه مطالعاتی بود (Jana et al. 2016).

جانانو^۸ و همکاران (۲۰۱۷)، تبخیر و تعرق واقعی را با استفاده از الگوریتم های سبال،^۹ SSEB و^{۱۰} SSEBop برای زمین های نیشکر ونجی^{۱۱} محاسبه کردند. بر اساس نتایج این تحقیق، مقدار RMSE بین دو مدل SSEB و SSEBop برابر با ۰/۹۹ و بین مدل سبال و دو مدل دیگر در حدود ۰/۵ میلیمتر بوده است. طبق نتایج این تحقیق، در زمین های نیشکری که خوب آبیاری شده اند و در فصل رشد گیاهان، هر سه مدل تبخیر و تعرقی بالاتر از اندازه گیری های زمینی، محاسبه نمودند (Genanu et al., 2017).

تحقیقات بسیاری، کارایی روش SEBAL را برای برآورد تبخیر-تعرق مناطق کشاورزی تأیید نموده اند، اما این روش برای پهنه های آبی نیز قابلیت پیاده سازی داشته و می تواند برای تبخیر از سطح پهنه های آبی مختلف مورد استفاده قرار گیرد. هدف این تحقیق، برآورد تبخیر از سطح آب دریاچه پشت سدها با استفاده از مدل SEBAL است. بدین منظور، دریاچه سد امیرکبیر (کرج) به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده و با استفاده از تصاویر ماهواره ای Landsat پیاده سازی مربوط به مدل SEBAL انجام شد. برای ارزیابی مدل نیز از داده های تشت تبخیر جمع آوری شده توسط سازمان آب منطقه ای تهران، استفاده شد.

۲- مواد و روش ها

در این بخش ابتدا به معرفی منطقه مورد مطالعه و داده های اخذ شده، می پردازیم و در ادامه الگوریتم سبال، مرحله به مرحله تشریح می شود. الگوریتم سبال دارای سه مرحله اساسی است که در آن، ابتدا تابش کلی ورودی به

معادله پنمن-مانتیت^۱ سازمان غذا و کشاورزی^۲ (FAO)، تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز تجن در منطقه کشاورزی دشت ناز ساری را به دست آورند. در این پژوهش از تصاویر سنجنده مادیس (MODIS) استفاده شد. براساس نتایج این تحقیق، تفاوت معنی داری بین مقادیر الگوریتم SEBAL و روش پنمن-مانتیت برای تخمین تبخیر و تعرق ساعتی و روزانه وجود نداشته و همچنین می توان تبخیر و تعرق ساعتی و روزانه را به ترتیب با $RMSE=0/091$ و $RMSE=1/49$ میلیمتر به دست آورد (رحیمی و همکاران، ۲۰۱۵).

یانگ^۳ و همکاران (۲۰۱۵)، تبخیر و تعرق واقعی در مزرعه های ذرت (تابستان) و گندم (زمستان)، در دشت هوآنگ هوآبی های^۴ چین را با استفاده از مدل SEBAL به دست آوردند. تجزیه و تحلیل مکانی، رابطه ای خطی را بین تبخیر واقعی، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده^۵ (NDVI) و دمای سطح زمین، نشان داد. بر این اساس، رابطه ای قوی بین تبخیر و تعرق واقعی و شاخص NDVI در آخرین مرحله رشد گیاه یافت شد که دارای ضریب تبیین بالایی بود. همچنین ضریب تبیین بین زمین و تبخیر و تعرق واقعی، بالاتر از ضریب تبیین بین تبخیر و تعرق واقعی و شاخص NDVI بود و این رابطه معنی دار در فصل های رشد گیاه بیشتر نمود پیدا می کرد. تبخیر و تعرق واقعی گیاه ذرت در دوره رشد آن در تابستان رابطه معنی داری با طول جغرافیایی داشته در حالی که تبخیر و تعرق گیاه گندم در دوره رشد آن در زمستان، با عرض جغرافیایی رابطه داشت (Yang et al., 2015).

جانانو^۸ و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از مدل سبال و تصاویر لندست ۵، تبخیر و تعرق واقعی را در جلگه دوون^۷ کشور هندوستان، محاسبه کردند. بر اساس نتایج این تحقیق، تبخیر و تعرق واقعی در منطقه مطالعاتی، مقداری بین ۳/۳ تا

8- Genanu

9- Simplified Surface Energy Balance

10- Operational Simplified Surface Energy Balance

11- Wonji

1-Penman-Monteith

2- Food and Agriculture Organization

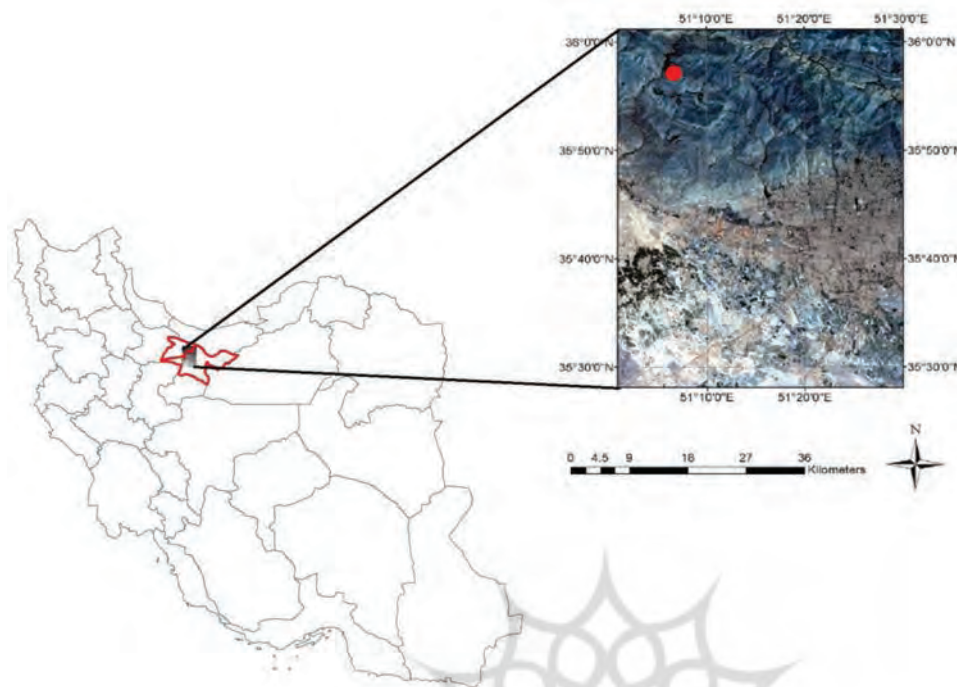
3- Yang

4- Huang-Huai-Hai

5- Normalized Difference Vegetation Index

6- Jana

7- Doon Valley



نگاره ۱: تصویر منطقه مورد مطالعه

تبخیر سالانه ۲۱۸۴ میلی متر بوده و دارای اقلیم نیمه خشک با زمستان نسبتاً سرد و تابستان نسبتاً معتدل می باشد. سرعت متوسط باد روزانه ۲/۲ متر بر ثانیه و جهت غالب آن شمال غرب به جنوب شرق می باشد. میانگین سالیانه جمع ساعات آفتابی در شهرستان کرج ۲۸۹۹ ساعت بدست آمده است. سد امیرکبیر که محدوده مورد نظر این مطالعه است، بر روی رودخانه کرج با سطح حوضه آبریزی به مساحت ۷۶۴ کیلومتر مربع احداث شده است و بخشی از نیاز آب شرب و کشاورزی استان های تهران و البرز را تأمین می کند (سایت سازمان هواشناسی ایران (۱۳۹۵)).

۲-۲- داده های مورد استفاده

جهت انجام این تحقیق از ۳ تصویر ماهواره ای LANDSAT5 TM مربوط به تاریخ های ۱۳۹۰/۳/۸، ۱۳۹۰/۴/۱۸، ۱۳۹۰/۵/۱۰ استفاده شد. تصاویر ماهواره ای از سایت erthexplorer.usgs.gov قابل دانلود هستند. زمان برداشت تصاویر به وقت محلی ساعت ۱۰:۳۰ قبل از ظهر است.

همچنین از داده های زمینی به شرح زیر در تحقیق حاضر

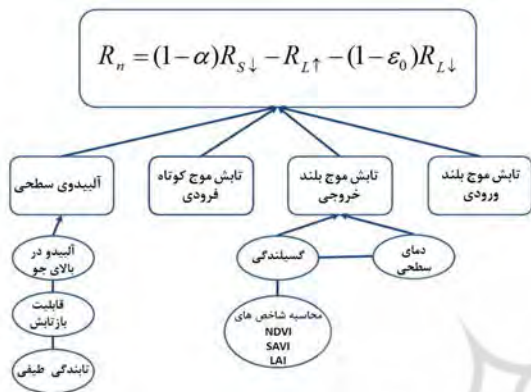
زمین، انرژی جذب شده توسط آب و خاک و انرژی انتقال همرفتی محاسبه شده و با محاسبه تفاوت دو انرژی جذب شده توسط زمین از انرژی کل دریافتی زمین، میزان انرژی مصرفی جهت تبخیر محاسبه می شود و در نهایت به مقدار تبخیر انجام شده از سطح زمین، تبدیل می گردد.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه بخشی از استان های تهران و البرز، شامل مخزن سد امیرکبیر (کرج) و مناطق کشاورزی پایین دست آن بود (نگاره ۱). سد امیرکبیر (کرج) با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۰۵ دقیقه و ۳۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۸ دقیقه و ۴۵ ثانیه شمالی، با ارتفاع ۱۲۹۷ متر از سطح دریا، در ۴۸ کیلومتری غرب تهران واقع شده است.

طبق بررسی های انجام شده بر روی آمار بلند مدت ایستگاه هواشناسی کرج، شهرستان کرج دارای بارندگی سالیانه ۲۴۷/۳ میلی متر، میانگین سالیانه دمای هوا ۱۴/۴ درجه سیلسیوس، بیشینه و کمینه مطلق به ترتیب ۴۲ و ۲۰- درجه سیلسیوس، میانگین رطوبت نسبی ۵۳ درصد،

که در آن α آلبیدوی سطح، ϵ_0 گسیلندگی ° سطح، $R_{S\downarrow}$ تابش فرودی طول موج کوتاه، $R_{L\downarrow}$ تابش فرودی طول موج بلند، $R_{L\uparrow}$ تابش خروجی طول موج بلند است. نگاره ۲ به صورت نموداری فرآیند محاسباتی تابش خالص خورشیدی را نشان می‌دهد.



نگاره ۲: روند محاسبه شار تابش خالص خورشیدی

برای محاسبه R_n ، ابتدا تصحیحات رادیومتریک بر روی تصاویر انجام شده و باندهای مختلف تصویر بسته به طول موج آن‌ها به مقادیر بازتابندگی^۶ و تابندگی^۷ تبدیل شدند. برای محاسبه شار خالص، مقدار تابش طول موج کوتاه فرودی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{S\downarrow} = G_{SC} \times \cos \theta \times dr \times \tau_{sw} \quad (۳)$$

در این رابطه، G_{SC} ثابت خورشیدی برابر با (w/m²) ۱۳۶۷، θ زاویه تابش خورشید، dr معکوس مجذور فاصله نسبی زمین تا خورشید و τ_{sw} ضریب انتقال اتمسفری است. ضریب انتقال اتمسفری با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times z \quad (۴)$$

در این رابطه، z ارتفاع از سطح دریا است. برای محاسبه تابش طول موج بلند خروجی از رابطه (۵) استفاده می‌شود.

استفاده شد:

۱- تبخیر-تعرق روزانه اندازه‌گیری شده در جنوب شرقی سد امیرکبیر (محل اندازه‌گیری در نگاره ۱ با نقطه قرمز نشان داده شده است).

۲- تابش خورشیدی اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی شهر کرج

۳- ارتفاع ایستگاه هواشناسی کرج، که این داده‌ها از سازمان آب منطقه‌ای تهران دریافت شد و

۴- دمای نقطه شبنم، فشار، سرعت باد و دمای هوای اندازه‌گیری شده در طول روز تصویربرداری که از سایت سازمان هواشناسی کشور اخذ شد (سازمان هواشناسی ایران، ۱۳۹۵).

همچنین کلیه پیاده‌سازی‌های این تحقیق در نرم‌افزارهای

Ref ET و ENVI5.1، MATLAB R2012a، Excel2007

صورت پذیرفت.

۳-۲- الگوریتم SEBAL

اساس الگوریتم SEBAL بر مبنای معادله توازن انرژی بنا نهاده شده است (رابطه ۱). در این الگوریتم با محاسبه مقدار شار لحظه‌ای گرمای نهان تبخیر به عنوان باقیمانده رابطه (۱)، برای هر پیکسل تبخیر-تعرق لحظه‌ای و روزانه محاسبه می‌گردد (Allen et al., 2002).

$$ET_{inst} = R_n - G - H \quad (۱)$$

در این معادله، λET_{inst} شار گرمای نهان تبخیر^۱ در لحظه تصویربرداری (w/m²)، R_n مقدار تابش خالص خورشیدی^۲ (w/m²)، G شار گرمای خاک^۳ (w/m²) و H شار گرمای محسوس^۴ (w/m²) است. مقدار تابش خالص خورشیدی از رابطه (۲) قابل محاسبه است.

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

1- Latent heat flux

2- Net radiation flux at the surface

3- Soil heat flux

4- Sensible heat flux to the air

5- Emissivity

6- Reflectance

7- Radiance

باشد، فاکتور L مقداری نزدیکتر به صفر خواهد داشت و در پوشش‌های کاملاً متراکم برابر با صفر خواهد بود و در پوشش‌های کم‌تراکم به ۱ نزدیک می‌شود.

سپس، هر دو مقدار گسیلندگی مذکور با توجه به شرایط LAI، با استفاده از معادله‌های تجربی زیر محاسبه می‌شوند: برای $LAI < 3$ از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\varepsilon_{NB} = 0.97 + 0.0033LAI \quad (9)$$

$$\varepsilon_0 = 0.95 + 0.01LAI \quad (10)$$

و برای $LAI > 3$ مقادیر گسیلندگی $\varepsilon_{NB} = 0.98$ و $\varepsilon_0 = 0.98$ خواهد بود.

همچنین برای آب، تحت شرایط $NDVI < 0$ و $\alpha < 0.47$ مقادیر گسیلندگی $\varepsilon_{NB} = 0.99$ و $\varepsilon_0 = 0.985$ بوده و برای برف، تحت شرایط $NDVI < 0$ و $\alpha \geq 0.47$ مقادیر گسیلندگی $\varepsilon_{NB} = 0.99$ و $\varepsilon_0 = 0.985$ خواهد بود.

در این روابط NDVI شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده است که نشان دهنده مقدار پوشش گیاهی سطح زمین بوده و با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (11)$$

مقدار این شاخص بین -۱ تا ۱ بوده و هر چه منطقه دارای پوشش گیاهی متراکم‌تر باشد، NDVI، مقدار مثبت نزدیک به ۱ اختیار کرده، برای مناطق برفی و ابری این شاخص مقدار پایینی داشته و برای سطوح آبی مقدار منفی خواهد داشت. تابش طول موج بلند فرودی $R_{L\downarrow}$ با استفاده از معادله استفان-بلمن^۴ (رابطه (۱۲)) به دست می‌آید (De Lima and Santos, 1995).

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad (12)$$

که در آن، ε_a گسیلندگی جوی، σ ثابت استفان بولتزمن و T_a دمای هوا نزدیک سطح زمین است.

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \times \sigma \times T_s^4 \quad (5)$$

که در آن، ε_0 گسیلندگی سطحی در باندهای پهن، σ ثابت استفان بولتزمن برابر با 5.67×10^{-8} و T_s دمای سطح بر حسب کلونین است. جهت محاسبه دمای سطح با استفاده از باند حرارتی از معادله جسم سیاه پلانک تصحیح شده، مطابق با رابطه (۶) استفاده می‌شود.

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} K_1}{R_c} + 1\right)} \quad (6)$$

که در این معادله، R_c تابندگی حرارتی سطحی تصحیح شده، ε_{NB} گسیلندگی سطحی و K_1 و K_2 ضرایب ثابت برای لندست TM 5 هستند که به ترتیب برابر با $607/76$ و $1260/56$ می‌باشند.

دو نوع گسیلندگی سطحی در الگوریتم SEBAL مورد استفاده قرار می‌گیرد، گسیلندگی اول نشان دهنده رفتار سطح برای تابش حرارتی در باندهای باریک (ε_{NB}) و گسیلندگی دوم نشان دهنده رفتار سطح برای تابش حرارتی در باندهای پهن (ε_0) است. برای محاسبه این مقادیر گسیلندگی می‌توان از شاخص سطح برگ^۱ (LAI) استفاده نمود. جهت محاسبه LAI می‌توان از معادلات تجربی بر مبنای شاخص‌های گیاهی استفاده نمود (رابطه ۷).

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

در این رابطه، SAVI شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده نسبت به اثر خاک^۲، شاخصی است که اثر بازتابندگی از سطح خاک در مناطق خاکی و بایر را در نظر گرفته و با استفاده از رابطه (۸) قابل محاسبه است:

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_4 - \rho_3)}{(\rho_4 + \rho_3 + L)} \quad (8)$$

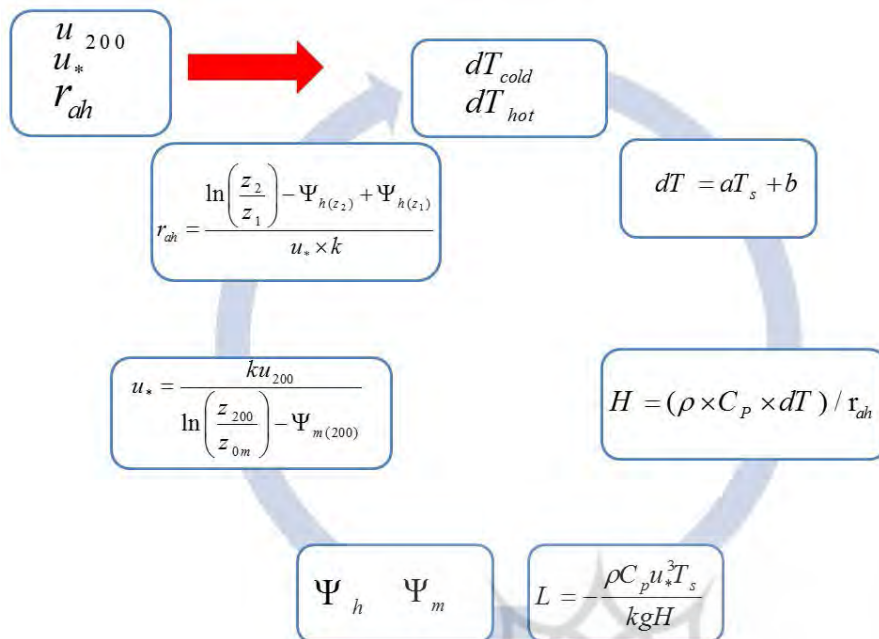
در این رابطه ρ_3 و ρ_4 ، بازتابندگی طیفی باندهای ۳ و ۴ سنجنده TM هستند. L فاکتور تصحیح اثر خاک است که مقداری بین ۰ تا ۱ است. هر چه پوشش گیاهی متراکم‌تر

3- Normalized Difference Vegetation Index

4- Stefan-Boltzmann

1- Leaf Area Index

2- Soil Adjusted Vegetation Index



نگاره ۳: روند تکراری محاسبه شار گرمای محسوس

سرد و گرم، تعیین شده، سپس شار گرمای محسوس با روند تکراری تصحیح می‌گردد. تعیین پیکسل سرد و گرم، فرآیندی تقریباً تجربی است. در این تحقیق پیکسل سرد تحت شرایطی شامل، پوشش گیاهی انبوه (LAI تقریباً بالاتر از ۳)، دمای سطحی پایین، NDVI با مقدار عددی بالا، تعیین شد. پیکسل گرم نیز تحت شرایط پوشش گیاهی کم (LAI تقریباً کمتر از ۳)، دمای سطحی بالا و NDVI با مقدار عددی پایین انتخاب گردید. نگاره ۳ نشان دهنده روند طی شده در محاسبه شار گرمای محسوس است.

پس از طی تمام مراحل و در نهایت محاسبه رابطه (۱)، با استفاده از رابطه (۱۵) تبخیر-تعرق لحظه‌ای (برای لحظه عبور ماهواره) محاسبه می‌شود.

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (15)$$

با استفاده از تبخیر لحظه‌ای، ضریب ET_{rF} طبق رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

$$ET_{rF} = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (16)$$

که در آن، ET_r تبخیر-تعرق مرجع است. این متغیر

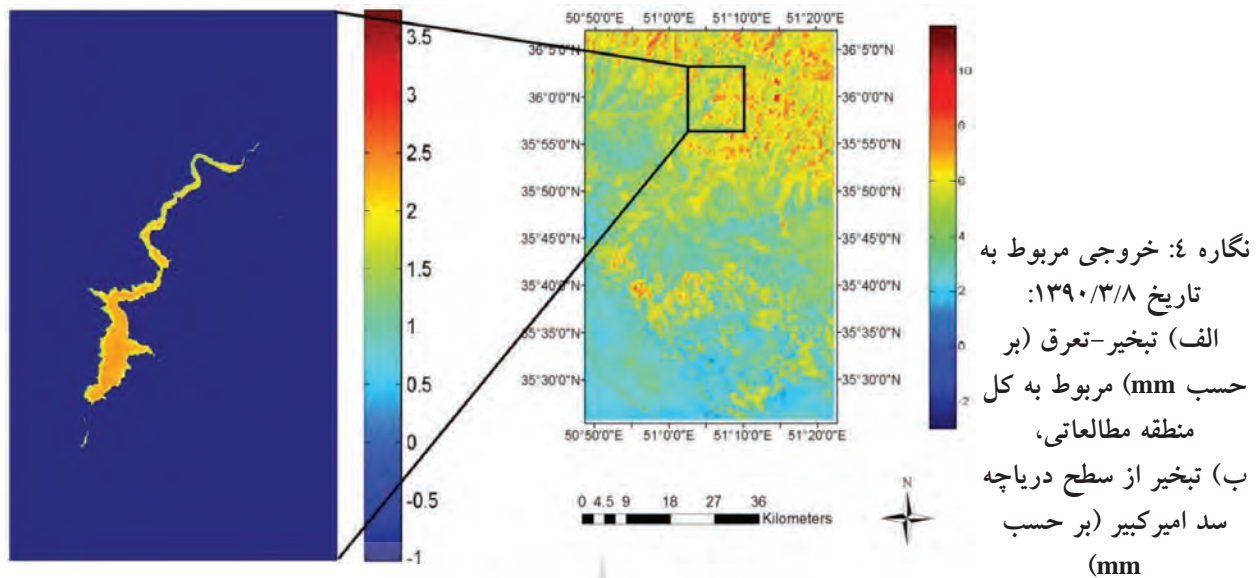
شار گرمایی خاک G میزان ذخیره‌سازی گرما در خاک و گیاه، در اثر انتقال می‌باشد. اندازه‌گیری مستقیم این فاکتور به وسیله سنجش از دور امکانپذیر نبوده و این متغیر با استفاده از رابطه بین T_s ، NDVI، G/R_n و آلبیدو قابل محاسبه است (Bastiaanssen, 2000).

$$G/R_n = T_s / \alpha(0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - 0.98NDVI^4) \quad (13)$$

شار گرمای محسوس H برابر با مقدار گرمای منتقل شده به هوا، به دلیل اختلاف دما، به صورت همرفت است. پیچیده‌ترین قسمت در الگوریتم SEBAL، تعیین شار گرمای محسوس است که به وسیله رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد.

$$H = (\rho \times C_p \times dT) / r_{ah} \quad (14)$$

در این رابطه، ρ چگالی هوا، C_p گرمای ویژه هوا برابر با $1004 \text{ J K}^{-1} \text{ g}^{-1}$ ، اختلاف دما بر حسب کلونین بین دو ارتفاع $Z_1 - Z_2$ و r_{ah} مقاومت آئرودینامیک برای انتقال گرما است. حل معادله شار گرمای محسوس به دلیل وجود دو مجهول dT و r_{ah} کمی پیچیده و مشکل است. لذا در این الگوریتم ابتدا دو پیکسل ابتدایی با نام پیکسل



که در آن N تعداد مشاهدات، \hat{x}_i مقادیر اندازه‌گیری شده و x_i مقادیر برآورده شده، هستند.

۳- نتایج و بحث

همانگونه که در بخش قبل توضیح داده شد، الگوریتم SEBAL از بخش‌های مختلفی تشکیل شده، شاخص‌ها و روابط مختلف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و در نرم‌افزار MATLAB محاسبه شده و نتایج هر بخش به تفکیک مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱ نشان دهنده خلاصه نتایج به دست آمده برای شاخص NDVI در هر سه تصویر است.

جدول ۱: آمار مربوط به شاخص NDVI

تاریخ	حدافل	حداکثر	میانگین
۱۳۹۰/۳/۸	-۰/۳۸۷۳	۰/۷۸۶۸	۰/۱۹۹۷
۱۳۹۰/۴/۱۸	-۰/۳۱۲۷	۰/۷۲۳۸	۰/۲۰۵۵
۱۳۹۰/۵/۱۰	-۰/۴۷۹۸	۰/۷۹۳۷	۰/۱۵۶۹

مقدار میانگین NDVI مربوط به تاریخ ۱۳۹۰/۴/۱۸ با مقدار ۰/۲۰۵۵ از دو تاریخ دیگر بیشتر است و دلیل آن وجود محصولات بهاره و پاییزه و مراتع است، در دو تاریخ دیگر، یا محصولات هنوز به رشد کافی نرسیده‌اند و یا برداشت محصولات و از بین رفتن مراتع آغاز شده‌اند.

با استفاده از نرم‌افزار Ref ET که در دانشگاه آیداهو^۱ به همین منظور توسعه داده شده است، محاسبه شد. نرم‌افزار REF-ET برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع به روش‌های مختلف کاربرد دارد. مزیت این نرم‌افزار، محاسبه تبخیر-تعرق به روش‌های مختلف مثل روش پنمن مانیتث، پرستلی تیلور، تست تبخیر و انواع روش‌های دیگر به انتخاب کاربر است. برای به دست آوردن تبخیر-تعرق مرجع در نرم‌افزار REF ET نیاز به داده‌های ساعتی تابش خورشید است که به دلیل عدم اندازه‌گیری این داده، با استفاده از مدل آنگستروم (Duffie and Beckman, 2013) و ساعات آفتابی روزانه، در نرم‌افزار Excel 2007 محاسبه شد. در نهایت برای محاسبه تبخیر-تعرق روزانه از رابطه (۱۷) استفاده شد.

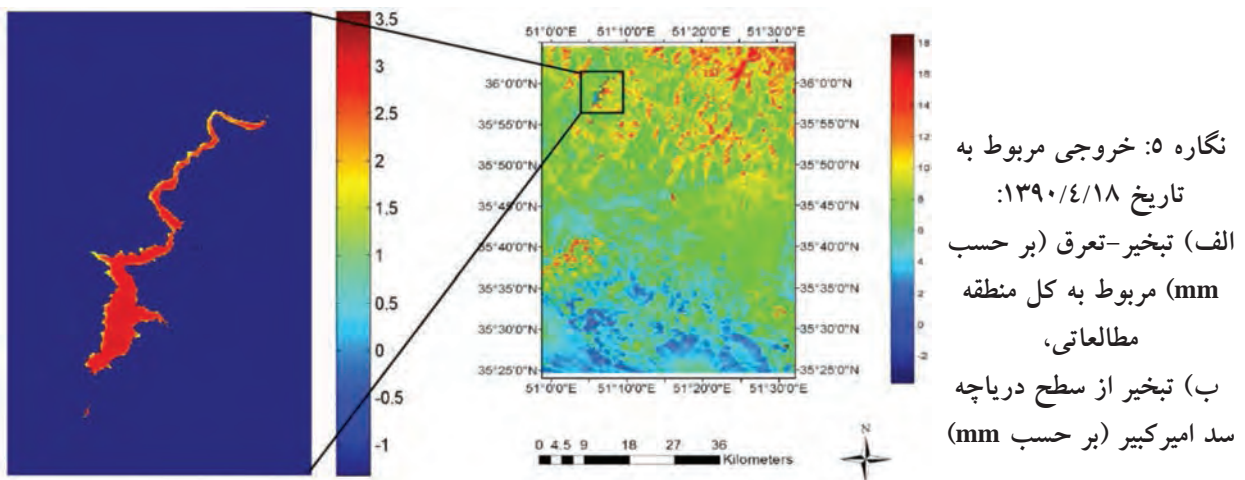
$$ET_{24} = ET_r F \times ET_{r-24} \quad (17)$$

که در آن ET_{r-24} برابر با مجموع ET_r برای یک روز است. جهت محاسبه خطا بین مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده، از خطای جذر میانگین مربعات^۲ (RMSE) مطابق با رابطه زیر استفاده شد.

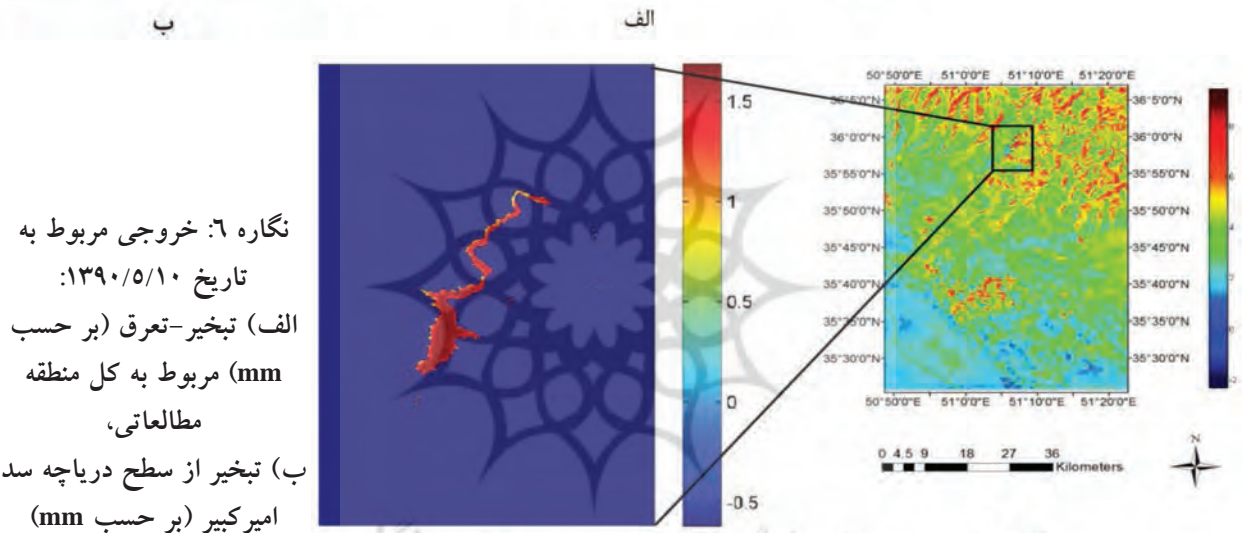
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (18)$$

1- Idaho

2- Root Mean Square Error



نگاره ۵: خروجی مربوط به تاریخ ۱۳۹۰/۴/۱۸:
 الف) تبخیر-تعرق (بر حسب mm) مربوط به کل منطقه مطالعاتی،
 ب) تبخیر از سطح دریاچه سد امیرکبیر (بر حسب mm)



نگاره ۶: خروجی مربوط به تاریخ ۱۳۹۰/۵/۱۰:
 الف) تبخیر-تعرق (بر حسب mm) مربوط به کل منطقه مطالعاتی،
 ب) تبخیر از سطح دریاچه سد امیرکبیر (بر حسب mm)

در جدول ۲، نتایج مربوط به دمای سطحی منطقه مورد مطالعه، ارائه شده است. میانگین دما در تاریخ ۱۳۹۰/۵/۱۰ ۶ نمایش داده شده است. همانطور که در نگاره‌های ۴ تا ۶ ملاحظه می‌شود، مناطق دارای پوشش گیاهی مقدار تبخیر-تعرق بیشتری را نشان داده و مناطق بدون پوشش گیاهی و مناطق شهری دارای مقادیر تبخیر کمتری هستند. همچنین، دامنه‌ها و قله‌های منطقه با توجه به تاریخ تصویربرداری و همینطور وضعیت پوشش گیاهی منطقه، دارای پوشش گیاهی بوده و مقادیر تبخیر و تعرق منطقی می‌باشند. مناطق پایین دست سد هم دارای دو منطقه متفاوت خاکی بایر و کشاورزی است که در مناطق کشاورزی و گیاهی، تبخیر و تعرق بالا بوده، اما در مناطق با پوشش خاک لخت تبخیر کمتر است. علاوه

در جدول ۲، نتایج مربوط به دمای سطحی منطقه مورد مطالعه، ارائه شده است. میانگین دما در تاریخ ۱۳۹۰/۵/۱۰ ۶ نمایش داده شده است. همانطور که در نگاره‌های ۴ تا ۶ ملاحظه می‌شود، مناطق دارای پوشش گیاهی مقدار تبخیر-تعرق بیشتری را نشان داده و مناطق بدون پوشش گیاهی و مناطق شهری دارای مقادیر تبخیر کمتری هستند. همچنین، دامنه‌ها و قله‌های منطقه با توجه به تاریخ تصویربرداری و همینطور وضعیت پوشش گیاهی منطقه، دارای پوشش گیاهی بوده و مقادیر تبخیر و تعرق منطقی می‌باشند. مناطق پایین دست سد هم دارای دو منطقه متفاوت خاکی بایر و کشاورزی است که در مناطق کشاورزی و گیاهی، تبخیر و تعرق بالا بوده، اما در مناطق با پوشش خاک لخت تبخیر کمتر است. علاوه

جدول ۲: آمار مربوط به دمای سطحی بر حسب کلونین

تاریخ	حداقل دما	حداکثر دما	میانگین دما
۱۳۹۰/۳/۸	۲۷۳	۳۲۴	۲۹۸/۵
۱۳۹۰/۴/۱۸	۲۸۱/۵۵	۳۳۲/۰۱	۳۰۶/۷۸
۱۳۹۰/۵/۱۰	۲۹۴	۳۳۰/۶	۳۱۲/۳

پس از اطمینان نسبی از درستی نتایج به دست آمده از پارامترهای مورد استفاده در تعیین تبخیر-تعرق، نتایج به دست آمده از الگوریتم SEBAL برای تصاویر منتخب

همچنین این مقادیر با نتایج به دست آمده توسط Sun و همکاران (۲۰۱۱) که مقدار متوسط تبخیر از سطح تالاب دریاچه نانس^۱ را با استفاده از مدل SEBAL، ۶۷۴ میلیمتر در روز برآورد کرده بود همخوانی دارد. علاوه بر این، Li و همکاران (۲۰۱۰) مقدار تبخیر از سطح پهنه‌های آبی را بیش از ۴ میلیمتر برآورد نمودند که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری تبخیر از سطح دریاچه‌ها و مخازن سدها، کاری زمانبر و هزینه‌بر است، می‌توان با استفاده از نتایج SEBAL، تبخیر از سطح دریاچه برای بازه زمانی یک روزه را محاسبه کرد. برای محاسبه مقدار تبخیر از کل سطح مخزن سد، تبخیر-تعرق روزانه با استفاده از تبخیر-تعرق مرجع که در نرم افزار Ref ET و بر اساس روش پنمن-مانتیت به دست آمد، محاسبه گردید و با کمک آن و معادله (۱۷) مقدار تبخیر روزانه از سطح دریاچه سد امیرکبیر (کرج) محاسبه گردید. پس از این مرحله با جداسازی سطح مخزن سد از تصویر، مقدار کل تبخیر روزانه از سطح مخزن محاسبه گردید (جدول ۴).

جدول ۴: نتایج مربوط به برآورد تبخیر از کل سطح دریاچه سد امیرکبیر (کرج)

تاریخ	تبخیر حاصل از کل سطح مخزن سد (متر بر روز)
۱۳۹۰/۳/۸	۸/۰۳۷
۱۳۹۰/۴/۱۸	۱۰/۶۴۳
۱۳۹۰/۵/۱۰	۵/۴۳۵

همانطور که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود، مقدار تبخیر به دست آمده در سه تاریخ مورد مطالعه مقدار قابل توجهی بوده که نشان دهنده هدر رفت قابل توجه آب از طریق تبخیر در این مناطق است.

اغلب داده‌های مورد نیاز در این پژوهش از سازمان آب منطقه‌ای تهران و سازمان هواشناسی کرج اخذ گردید و این سازمان‌ها تجهیزات ابزار دقیق جهت اندازه‌گیری داده‌هایی همچون تابش خورشیدی ساعتی ندارند. به همین دلیل در

بر این، محدوده‌های آبی به دلیل آنکه در آن‌ها فقط تبخیر اتفاق افتاده و تعرق ندارند، مقادیر کمتری نسبت به محیط اطراف دارند. به همین منظور در نگاره‌ها با اعمال یک فیلتر محدوده دریاچه سد امیرکبیر از سایر مناطق جدا شده و در هر سه نگاره به صورت بزرگنمایی شده در سمت چپ نمایش داده شده است.

همانطور که در نگاره‌ها مشخص است، مقدار تبخیر در نواحی نزدیک به ساحل کمتر بوده و در نواحی عمیق‌تر مقدار تبخیر بیشتر از ساحل، اما متغیر است. این مورد به دلیل تأثیر تابع باد و تأثیر مستقیم آن بر مقدار تبخیر از سطح، اتفاق می‌افتد، بطوریکه در برخی تحقیقات مانند نتایج به دست آمده در این تحقیق تبخیر در نواحی عمیق‌تر بیشتر بوده و در برخی تحقیقات تبخیر در مناطق ساحلی مقدار بیشتری داشته است. نتایج مطالعات دیگر هم نشان دهنده یکسان نبودن تغییرات میزان تبخیر از ساحل به مرکز دریاچه‌ها است. همچنین، این مورد نیز در سایر تحقیقات (Bastiaanssen et al., 1998) نیز اثبات شده است.

در ادامه، مقدار تبخیر برای پیکسل معادل با داده‌های زمینی اندازه‌گیری شده در نزدیکی دریاچه سد امیرکبیر با داده‌های لایسیمیتری زمینی مقایسه شد. جدول ۳ شامل تبخیر-تعرق به دست آمده از SEBAL برای ایستگاه اندازه‌گیری زمینی و مقدار اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر است. همانطور که مشخص می‌باشد، تفاوت نتایج SEBAL و لایسیمتر کمتر از ۰/۵ میلیمتر در روز است. همچنین، مقدار RMSE در این سه منطقه ۰/۲۷ میلیمتر محاسبه گردید که مقدار قابل قبولی است.

جدول ۳: آمار مقایسه‌ای تبخیر-تعرق نقطه‌ای ماهواره با

داده‌های زمینی بر حسب میلیمتر بر روز

تاریخ	تشت تبخیر	الگوریتم SEBAL	تفاضل مطلق
۱۳۹۰/۳/۸	۸/۷	۸/۹	۰/۲
۱۳۹۰/۴/۱۸	۱۰/۹	۱۱/۲	۰/۳
۱۳۹۰/۵/۱۰	۸/۷	۸/۴	۰/۳

پژوهش، تبخیر برآورد شده از کل سطح دریاچه سد امیرکبیر برای روزهای مورد مطالعه در ماه خرداد ۸/۰۳۷، در ماه تیر ۱۰/۶۴۳ و در ماه مرداد ۵/۴۳۵ متر در روز به دست آمد که مقدار نسبتاً قابل توجهی بود و لزوم در نظر گرفتن برنامه‌هایی برای جلوگیری از هدررفت آب از این طریق را اثبات می‌نماید. چنین نتایجی می‌تواند در مطالعات جامع برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب به کار رفته و معیار دقیق‌تر از هدر رفت آب از طریق تبخیر در سطح دریاچه‌های آب شیرین ارائه نماید.

منابع و مأخذ

۱. ابراهیمی، ح.، و یزدانی، و. (۱۳۹۲). محاسبه تبخیر و تعرق فضای سبز به روش سبال (مطالعه موردی: پارک ملت مشهد). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۰ (۳)، ۱۵۱-۱۳۳.
۲. پورمحمدی، س.، دستورانی، م.، مختاری، م. ح.، و رحیمیان، م. ح. (۱۳۸۹). تعیین و پهنه بندی تبخیر و تعرق واقعی توسط تکنیک سنجش از دور و الگوریتم سبال (مطالعه موردی: حوضه آبخیز منشاد در استان یزد). نشریه آبخیزداری ایران، ۴ (۱۳)، ۳۲-۲۳.
۳. ثنایی نژاد، ح.، نوری، س.، و هاشمی نیا، م. (۱۳۹۰). برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره ای در منطقه مشهد. نشریه آب و خاک، ۲۵ (۳)، ۵۴۷-۵۴۰. صفوی، ح. ر. (۱۳۹۳). هیدرولوژی مهندسی. انتشارات ارکان دانش، چاپ چهارم (اصفهان)، ۷۲۴ص.
۴. کاویانی، م.، ع. کاویانی، and م. طاهری، کاربرد الگوریتم SEBAL در تخمین تبخیر و تعرق واقعی در دشت قزوین و مقایسه نتایج آن با داده های لایسیمتر، in دوازدهمین همایش سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. ۱۳۹۲، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۵. کریمی، ع.، مسعودی، س.، لیاقت، ع.، و فرهادی بانسوله، ب. (۱۳۹۰). برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای با استفاده از تصاویر لندست. اولین کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب کشاورزی.

تحقیق، تابش خورشیدی با استفاده از ساعات آفتابی و روابط ریاضی محاسبه شد. بدین جهت پیش‌بینی می‌شود که اندکی با مقدار واقعی تابش متفاوت بوده و موجب عدم قطعیت‌هایی در نتایج نهایی شود. علاوه بر این، تعیین پیکسل سرد و گرم از مهم‌ترین و حساس‌ترین قسمت‌های الگوریتم SEBAL است، با توجه به اینکه تعیین این دو پیکسل فرآیندی کاملاً تجربی بوده، لذا می‌تواند موجب عدم قطعیت‌هایی در فرآیند اجرای الگوریتم و در نهایت در نتایج تحقیق شود. از دیگر منابع عدم قطعیت در این تحقیق می‌تواند خوانش اندازه‌گیری تبخیر توسط لایسیمتر در دوره‌های ۲۴ ساعته باشد که به دلیل فاصله ۲۴ ساعته، دقت اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد کاهش فاصله‌های بین هر دو خوانش متوالی لایسیمتر، دقت اندازه‌گیری‌ها را افزایش دهد.

۴- نتیجه گیری

هدف تحقیق حاضر، برآورد میزان تبخیر از سطح دریاچه سد امیرکبیر (کرج) با استفاده از الگوریتم SEBAL و تصاویر ماهواره‌ای Landsat بود. جهت انجام پیاده‌سازی‌ها، تصاویر مربوط به تاریخ‌های ۱۳۹۰/۳/۸، ۱۳۹۰/۴/۱۸، ۱۳۹۰/۵/۱۰ تهیه شده و الگوریتم SEBAL بر روی آن‌ها اعمال شد. نتایج حاصل از الگوریتم، با اندازه‌گیری‌های تشت تبخیر که به صورت نقطه‌ای در منطقه مطالعاتی جمع‌آوری شده بود، مقایسه گردید. نتایج تحقیق نشان دهنده خطای کمتر از ۰/۵ میلیمتر در روز در هر سه تاریخ مورد مطالعه و مقدار RMSE برابر با ۰/۲۷ برای هر سه تاریخ مورد نظر بود. بنابراین، نتایج کارایی الگوریتم SEBAL را برای برآورد تبخیر از سطح مخزن سد اثبات می‌نمود. علاوه بر این، نتایج نشان دهنده متغیر بودن مقدار تبخیر در سطح دریاچه بود، بطوری که تبخیر از مناطق کم‌عمق به سمت مناطق عمیق‌تر افزایش پیدا می‌نمود، که این مورد عدم کارایی در نظر گرفتن اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای و بسط آن به کل سطح دریاچه را اثبات می‌نماید. این مورد می‌تواند به عنوان یکی از نقاط قوت الگوریتم‌های اجرا شده توسط تصاویر ماهواره‌ای در نظر گرفته شود. همچنین، بر اساس نتایج

(1), 46-59.

17. Irmak, S., Haman, D., and Jones, J. (2002). Evaluation of class A pan coefficients for estimating reference evapotranspiration in humid location. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(3), 153-159.

18. Jana, C., Rawat, M., Sena, D., Alam, N., Mandal, U., Kaushal, R., and Mishra, P. (2016). Application of SEBAL model to estimate Evapotranspiration in Doon Valley, India. *Indian Journal of Soil Conservation*, 44(2), 191-197.

19. Li, S., and Zhao, W. (2010). Satellite based actual evapotranspiration estimation in the middle reach of the Heihe River Basin using the SEBAL method. *Hydrological Processes*, 24 (23), 3337-3344.

20. National Water Commission. (2009). Assessment of Evaporation Losses from the Menindee Lakes using SEBAL Remote Sensing Technology. *water watch*

21. Rahimi, S., Gholami Sefidkouhi, M.A., Raeini-Sarjaz, M., and Valipour, M. (2015). Estimation of actual evapotranspiration by using MODIS images (a case study: Tajan catchment). *Archives of Agronomy and Soil Scie*, 61(5), 695-709.

22. Sima, S., Ahmadalipour, A., and Tajrishy, M. (2013). Mapping surface temperature in a hyper-saline lake and investigating the effect of temperature distribution on the lake evaporation. *Remote Sensing of Environment*, 136, 374-385.

23. Sun Z., Wei B., Su W., Shen, W., Wang C., You D., and Liu, Z. (2011). Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. *Mathematical and Computer Modelling*, 54 (3-4), 1086-1092.

24. Yang, J.Y., Mei, X.R., Huo, Z.G., Yan, C.-., Hui, J., Zhao, F.H., and Qin, L. (2015). Water consumption in summer maize and winter wheat cropping system based on SEBAL model in Huang-Huai-Hai Plain, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 14, 2065-2076.

25. Zare, A. H., Yazdani, V., and Azhdari, K. (2009). Comparative study of four meteorological drought index based on relative yield of rain fed wheat in Hamedan province. *Physical Geography Research Quarterly*, (69), 35-49.

۶. سایت سازمان هواشناسی ایران (۱۳۹۵). <http://www.irimo.ir>.

7. Allen, R. G., Tasumi, M., and Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) Model. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133, 380.

8. Allen, R., Waters, R., Tasumi, M., Trezza, R., and Bastiaanssen, W. (2002). SEBAL, Surface energy balance algorithms for land, Idaho Implementation. *Advanced Training and Users Manual*, version 1.0.

9. Bastiaanssen, W., Menenti, M., Feddes, R., and Holtslag, A. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212, 198-212.

10. Bastiaanssen, W. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of hydrology*, 229, 87-100.

11. Bastiaanssen, W., Noordman, E., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B., and Allen, R. (2005). SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(1), 85-93.

12. Bastiaanssen, W., Plegruma, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J. F., Roerinka, G. J., and van der Wal, T. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 2. Validation. *Journal of Hydrology*, 212, 213-229.

13. De Lima, J. A. S., and Santos, J. (1995). Generalized Stefan-Boltzmann Law. *International Journal of Theoretical Physics*, 34 (1), 127-34.

14. Duffie, J. A., and Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes (Vol. 3)*: Wiley New York.

15. Gao, Y., Long, D., and Li, Z. (2008). Estimation of daily evapotranspiration from remotely sensed data under complex terrain over the upper Chao river basin in north China. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (11), 3295-3315.

16. Genanu, M., Alamirew, T., Senay, G., and Gebremichael, M. (2017). Remote Sensing Based Estimation of Evapo-Transpiration Using Selected Algorithms: The Case of Wonji Shoa Sugar Cane Estate, Ethiopia. *Journal of Environment and Earth Science*, 7



پرویشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی