نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال یازدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۲

Vol.11, No.4, Winter 2024

۱-۲۰

مقاله پژوهشی

ارزیابی مدل‌های سبال و متریک در برآورد تبخیر از آب‌های شور و شیرین (مطالعه موردی: دریاچه ارومیه، سد کرخه و سد دز)

رامین قهرمان[۱]، مجید رحیم‌زادگان[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۷

چکیده

تبخیر از سطح پهنه‌های آبی یکی از منابع مهم هدررفت آب است. مدل‌های مختلفی بر اساس تصاویر ماهواره‌ای برای برآورد تبخیر توسعه داده شده است. درک صحیح از نحوه عملکرد هر کدام از مدل‌ها در پهنه‌های آبی در برآورد تبخیر یکی از موضوعات مهم در مدیریت منابع آب و بیلان آب می‌باشد. از این رو، هدف این مطالعه، پیاده‌سازی و ارزیابی نسخه اصلی الگوریتم بیلان انرژی برای سطح زمین *(SEBAL)* و الگوریتم تهیه نقشه تبخیر-تعرق با قدرت تفکیک بالا و واسنجی داخلی *(METRIC)* در دریاچه ارومیه، سد کرخه و سد دز بود. این کار با استفاده از ۲۵ تصویر اسپکترورادیومتر تصویربردار با قدرت تفکیک متوسط *(MODIS)* در سال ۲۰۲۰ انجام شد. همچنین، با توجه به محدودیت پارامترهای هواشناسی لازم برای پیاده‌سازی مدل‌های مربوطه در کشور ایران، تاثیر استفاده از داده‌های چندین ایستگاه هواشناسی نزدیک به دریاچه در نتایج هر یک از مدل‌ها بررسی شد. نتایج به دست آمده از محاسبه میانگین ماهانه تبخیر حاکی از آن بود که مدل *METRIC* در آب شور با ضریب تعیین ۰/۹۸ و ریشه میانگین مربعات خطا *(RMSE)* ۰/۱۳ میلیمتر و در آب شیرین با ضریب تعیین ۰/۸۹ و *RMSE* ۰/۷ میلیمتر در روز عملکرد خوبی در برابر مقادیر مشاهداتی داشت. با این وجود، خطای مدل *METRIC* در آب شیرین نسبت به آب شور کمتر بود. این درحالی است که طبق نتایج به دست آمده به دلیل عدم دسترسی به مقادیر دقیق تابش خالص روزانه، نسخه اصلی مدل *SEBAL* در سطح آب شور و شیرین نسبت به مقادیر مشاهداتی خطای زیادی داشته و نتایج قابل قبولی ارائه نمی‌دهد. همچنین، بررسی نتایج نشان‌دهنده آن بود که به دلیل قرار گرفتن دو سد کرخه و دز در یک موقعیت جغرافیایی و نزدیکی این دو سد به همدیگر، نتایج به دست آمده از تبخیر دو سد مقادیری نزدیک به هم بودند.

کلید واژه‌ها : بیلان انرژی، دریاچه ارومیه، تبخیر تعرق پتانسیل، تبخیر ، سنجش از دور.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، روبروی ساختمان اسکان، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

تلفن: ۰۲۱۸۸۷۷۹۴۷۴

Email: rahimzadegan@kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

۱- مقدمه

تبخیرتعرق از سطح گیاهان یکی از عوامل مهم در بیلان آب و بیلان انرژی می‌باشد. همچنین، تبخیر یکی از عوامل مهم در از دست رفتن آب شیرین در دسترس در پهنه‌های آبی[۱]است و نقش مهمی در بیلان آب از سطح پهنه‌های آبی ایفا می‌کند [۱]. تبخیر از سطح آب به دلیل ماهیت آن معمولا بوسیله روش‌های غیر مستقیم، شامل تشت تبخیر، بیلان آب، بیلان انرژی، انتقال جرم و روش‌های ترکیبی برآورد می‌شود [۲]. با توسعه فناوری سنجش از دور، مدل‌های مختلفی بر مبنای بیلان انرژی برای محاسبه تبخیر سطوح آبی و تبخیرتعرق از سطح گیاهان توسعه یافته است که دقت برآورد آن‌ها در زمینه برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی کشور می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد.

با استفاده از فناوری سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای تولید شده، توزیع مکانی عوامل مورد نیاز و تغییرات آن‌ها در دو یا چند تصویر متوالی تهیه می‌شود [۳]. تبخیرتعرق را می‌توان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بدون در نظر گرفتن شرایط رطوبت خاک، محصول و مدیریت مزرعه برآورد کرد [۴]. از الگوریتم‌های سنجش از دوری پرکاربرد برای برآورد تبخیر تعرق می‌توان به الگوریتم بیلان انرژی برای سطح زمین[۲] *(SEBAL)* [۵]، الگوریتم تهیه نقشه تبخیر-تعرق با قدرت تفکیک بالا و واسنجی داخلی[۳] *(METRIC)* [۶] و سیستم بیلان انرژی سطح[۴] *(SEBS)* [۷] اشاره کرد. مدل سبال ابتدا توسط باستیانسن[۵](۱۹۹۸) به منظور برآورد تبخیر تعرق از سطح پوشش گیاهی، معرفی شد[۵]. نسخه دوم سبال توسط آلن وهمکاران[۶](۲۰۰۲) در منطقه آیداهو[۷]اجرا شد و نتیجه آن بصورت یک دفترچه راهنما[۸]منتشر شد[۳]. این نسخه از مدل سبال شباهت بسیار زیادی به مدل متریک داشته و در تبدیل تبخیر از مقیاس لحظه‌ای به روزانه مطابق مدل متریک عمل می‌کند. مدل متریک توسط آلن و همکاران (۲۰۰۵) بر مبنای مدل سبال ارائه شد که عمده‌ترین تفاوت این دو مدل در نحوه تعیین پیکسل گرم و سرد و در تبدیل تبخیر از مقیاس لحظه گذر ماهواره به مقیاس روزانه می‌باشد[۶]. یکی دیگر از الگوریتم‌های معروف برآورد تبخیرتعرق، مدل سبس می‌باشد که توسط سو و همکاران[۹](۲۰۰۲) برای تخمین تبخیرتعرق روزانه، ماهانه و سالانه در محیطی نیمه خشک و برای پایش خشکسالی ارائه گردید[۷]. مطالعات متعددی با استفاده از این مدل‌ها توسط محققان مختلف در نقاط مختلف جهان انجام شده است که در ادامه به برخی از مهم-ترین آن‌ها اشاره شده است.

در مطالعه‌ای تغییرات زمانی و مکانی نرخ تبخیر در دریاچه سطح آب آزاد کاراون[۱۰]با استفاده از الگوریتم متریک طی ۳۴ سال از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۸ ارزیابی شد که در آن از تصاویر ماهواره *Landsat*۴،۵،۷و۸[۱۱] استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده آن بود که نرخ تبخیر از سال ۲۰۱۵ به بعد افزایش یافته و میانگین تبخیر بین سال ۱۹۸۵ و ۲۰۱۸ برابر ۲٫۲۴ میلی‌متر بر روز بوده است [۸]. در مطالعه‌ای دیگر آلن و همکاران (۲۰۰۳)، نتایج تبخیر-تعرق حاصل از روش سبال را با نتایج لایسیمتری در دو منطقه در آیداهو مورد مقایسه قرار دادند[۹]. نتایج مطالعات نشان داد که برآوردهای

---

[۱] *Water bodies*

[۲] *Surface Energy Balance Algorithm for Land*

[۳] *Mapping Evapotranspiration at high Resolution and with Internalized Calibration*

[۴] *Surface Energy Balance System*

[۵] *Bastiaanssen*

[۶] *Allen et all*

[۷] *Idaho*

[۸] *Manual*

[۹] *Z.Su et all*

[۱۰] *Karaoun open-water lake*

[۱۱] *Land Remote-Sensing Satellite*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

تبخیر-تعرق حاصل از الگوریتم سبال با نتایج اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر برای محصولات کشاورزی در اقلیم‌های نیمه خشک انطباق مناسبی دارد. همچنین، سبال برای تبخیر تجمعی در یک بازه چهار ماهه، دارای خطایی فقط در حدود ۴٫۳ درصد بود. باستیانسن و همکاران (۲۰۰۵) در تحقیقی دیگر دقت تبخیر-تعرق برآورد شده در روش سبال را برای یک روز در مقیاس هکتار، ۸۵ درصد به دست آوردند که این دقت برای یک فصل تا ۹۵ درصد افزایش نشان داد[۱۰]. 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. در مطالعه‌ای دیگر مدل سبال با تصاویر لندست۸ برای باغ پسته توسط رحیم زادگان و جنانی (۲۰۱۹) در ایران پیاده سازی شد و نتایج با داده‌های ET[۱] اندازه‌گیری شده درجا مقایسه گردید که نتایج حاکی از آن بود که مدل سبال کارایی خوبی در تخمین ET محصول پسته دارد[۱۱]. در طی مطالعه‌ای، موهبزاده و فلاح (۲۰۱۹) اجزای بیلان آب را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای سطح دریاچه شور ارومیه و حوضه دریاچه در شمال غربی ایران محاسبه کرد و تبخیرتعرق ماهانه را با استفاده از الگوریتم سبال و سری زمانی تصاویر اسپکترورادیومتر تصویربردار با قدرت تفکیک متوسط *(MODIS)*[۲] و داده هواشناسی محاسبه کرد[۱۲]. طبق نتایج به دست آمده مشخص شد که بیلان آب سالانه دریاچه ارومیه ۳۴۴۳- $MCM.yr^{-1}$ می‌باشد. چینیپه[۳](۲۰۱۲) مدل سبس را برای تخمین تبخیر از سطح دریاچه موتیریکوی[۴] با استفاده از تصاویر مادیس در زیمباوه اصلاح کرد [۱۳]. او نتیجه گرفت که نتایج سبس اندکی بیشتر از اندازه‌گیری‌های تشت تبخیر می‌باشد، اما این اختلاف قابل چشم پوشی است. علاوه بر این تایید شد که سبس به عنوان روشی قابل اعتماد برای تخمین تبخیرتعرق در مقیاس وسیع می‌باشد. آبدلردی[۵] (۲۰۱۳) مدل سبس را به منظور تبخیر از آبهای شور و شیرین با استفاده از تصاویر *AASTR/Envisat*[۶] اصلاح کرد[۱۴]. او ضریب تعیین (R^2) را برای تبخیر آب شیرین و شور به ترتیب ۰٫۹۸ و ۰٫۸۸ محاسبه کرد. زمانی و رحیم زادگان (۲۰۱۸) علاوه بر مدل سبال ، دو روش بیلان انرژی دیگر متریک و سبس را مقایسه نمودند[۱۵]. بر طبق این نتایج، الگوریتم سبس با داشتن بیشترین همبستگی ۰٫۹۳ و کمترین میزان ریشه میانگین مربعات خطا[۷] *(RMSE)* ۰٫۶۲ میلی‌متر نسبت به سایر الگوریتم‌ها، دارای عملکرد بهتری بود. نتایج تحقیق آن‌ها به طور کلی کارایی تمامی مدل‌های بیلان انرژی را تایید کرد و بر طبق پیشنهاد تحقیق آن-ها می‌توان از این مدل‌ها در مناطقی که داده‌های کافی اندازه گیری در دسترس نیست، استفاده نمود. ژائو و گائو[۸](۲۰۱۹) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و پایگاه-های داده‌های جهانی، در سطح بسیار وسیع چهارچوبی جهت برآورد تبخیر واقعی در راستای برنامه‌ریزی منابع آب کشور ایالات متحده، توسعه دادند[۱۶]. در این پژوهش کاربردی، میزان تبخیر ۷۲۱ مخزن آب شیرین واقع در سراسر این کشور، در بازه زمانی ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۵ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق مبین این نکته بود که اگرچه محدودیت‌های زیادی در به-کارگیری الگوریتم‌های بیلان انرژی در این گستره زمانی و مکانی وسیع وجود دارد، اما این رویکرد توانایی بالقوه خود را برای پشتیبانی از اجرای برنامه‌های

[۱] *Evapotranspiration*
[۲] *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*
[۳] *Chinyepe*
[۴] *Mutirikwi*
[۵] *Abdelrady*
[۶] *Advanced Along-Track Scanning Radiometer*
[۷] *Root Mean Square Error*
[۸] *Zhao and Gao*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

کاربردی جهت مدیریت پایدارتر منابع آب، در محیط متغیر، نمایان ساخت. سیما و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از یک شکل اصلاح شده معادله بیلان انرژی به نام روش بیلان-انرژی نسبت-باون[1] *(BREB)* و داده‌های سنجنده مادیس میزان تبخیر از سطح دریاچه ارومیه را برآورد نمودند [۱۷]. در تحقیق ذکر شده از داده‌های اندازه‌گیری مستقیم جهت اعتبارسنجی و ارزیابی مدل مذکور استفاده گردید. بر اساس نتایج تحقیق آن‌ها، در صورت استفاده از دمای سطح دریاچه حاصله از سنجنده مادیس، تبخیر در سال ۲۰۰۹ به میزان ۱۰۳۳ (میلی‌متر بر سال) برآورد گردید. این درحالی است که اگر دمای نقطه‌ای اندازه‌گیری شده توسط شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان غربی به عنوان دمای سطح دریاچه استفاده شود، میزان تبخیر ۸۸۵ (میلی‌متر بر سال) خواهد بود. با توجه به مساحت این دریاچه اختلافی در حدود ۵۱۵ میلیون متر مکعب در سال بین داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های برآورد شده از معادله بیلان انرژی وجود دارد که عدد قابل توجهی است. بر طبق پیشنهادهای این پژوهش، برای رفع این مشکل بایستی ایستگاهی برروی این دریاچه واقع گردد که مجهز به سنجنده‌های پیشرفته از جمله سنجنده اندازه‌گیری دمای سطح آب، شار تابش و غیره باشد و بتواند پارامتر مختلف را در زمان گذر ماهواره اندازه‌گیری نماید تا بتوان از روش *BREB* در راستای برآورد تبخیر واقعی، استفاده نمود.

انواع روش‌های بیلان انرژی در سطح آب و گیاهان توسط محققان مختلف بررسی شده است. بیشتر محققان نسخه اجرا شده‌ی سبال در آیداهو را برای برآورد تبخیر مورد استفاده قرار داده‌اند [۳]. این نسخه از مدل سبال را می‌توان با مدل متریک تقریبا یکی دانست، اما در نسخه اصلی مدل سبال از مقدار تابش خالص روزانه برای تبدیل تبخیر لحظه‌ای به تبخیر روزانه استفاده شده است [۴و ۱۸]. این نحوه از تبدیل مقیاس اگر با مقادیر دقیق اندازه‌گیری شده انجام نشود، ممکن است در دقت مدل تاثیر بسزایی داشته باشد. از سوی دیگر، تحقیقات کمی به ارزیابی کارایی مدل‌های بیلان انرژی سبال و متریک در سطح آب‌های شور و شیرین و مقایسه کارایی آن‌ها پرداخته‌اند. از این‌رو، هدف این مطالعه، در نظر گرفتن فقدان اندازه‌گیری‌های مقدار تابش خالص روزانه در ایستگاه‌های هواشناسی کشور و بررسی نسخه ابتدایی مدل سبال و متریک و مقایسه نتایج این دو مدل برای سال ۲۰۲۰ در سطح آب شور و شیرین با استفاده از تصاویر مادیس است.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش مشخصات منطقه مطالعاتی و داده‌های استفاده شده از قبیل تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی مورد نیاز تشریح می‌شود.

۲-۱- منطقه مطالعاتی

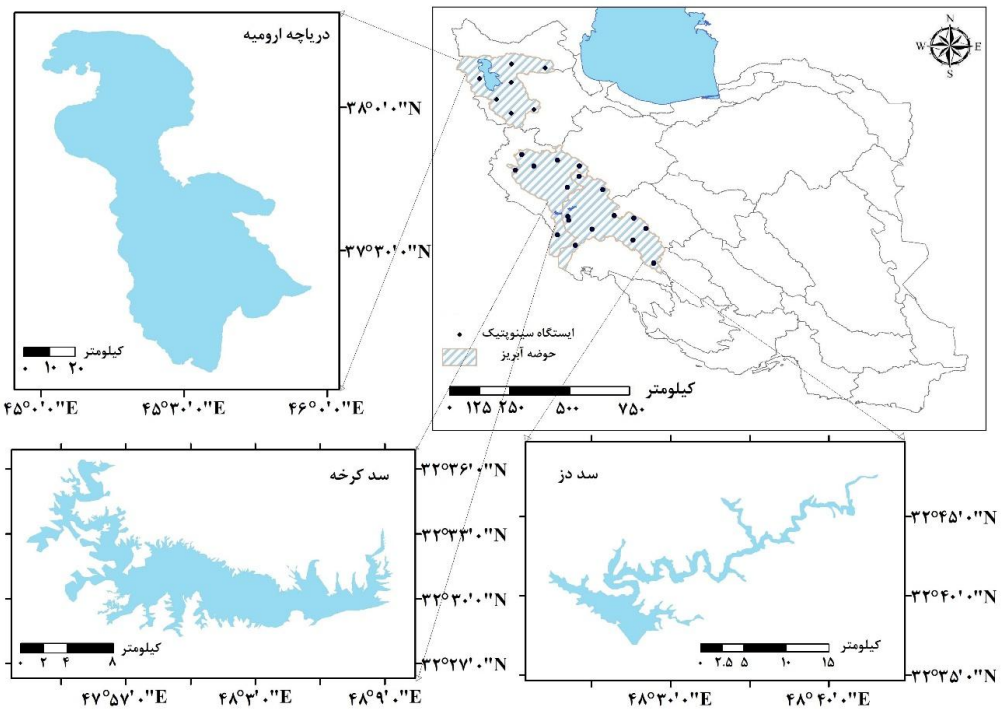
در این مطالعه دریاچه ارومیه واقع در حوضه دریاچه ارومیه به عنوان پهنه آب شور و دریاچه پشت دو سد کرخه و دز واقع در حوضه کرخه و کارون بزرگ به عنوان پهنه‌های آب شیرین مورد بررسی قرار گرفته است (شکل (۱)). حوضه دریاچه ارومیه بین طول‌های جغرافیایی ′۷ ° ۴۴ و ′۴۷ ° ۵۳ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ′۴۰ ° ۳۵ و ′۳۰ ° ۳۸ شمالی قرار گرفته و در سه استان آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و کردستان واقع شده و وسعتی حدود ۵۹۱۲۳ کیلومترمربع دارد. میانگین سالانه‌ی بارندگی در این حوضه از ۳۵۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر متغیر می‌باشد. دریاچه ارومیه واقع در این حوضه، دارای حداکثر مساحت و عمق به ترتیب ۶۱۰۰ کیلومترمربع و ۱۶ متر می‌باشد [۱۹]، اما به دلیل کاهش جریانات ورودی مساحت دریاچه در مرداد سال ۱۳۹۰ به ۲۳۶۶ کیلومتر کاهش یافته است[۲۰].

حوضه آبریز کرخه با طول جغرافیایی ′۶ ° ۴۶ تا ′۱۰ ° ۴۹ شرقی و عرض جغرافیایی ′۵۸ ° ۳۰ تا ′۵۶ ° ۳۴ شمالی یکی از حوضه‌های مهم در غرب کشور است. این

[1] *Bowen-ratio energy-balance*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

حوضه به لحاظ تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی جزیی از حوضه خلیج فارس به شمار می‌رود که از غرب به حوضه رودخانه‌های مرزی ایران و عراق و از شرق به رودخانه دز محدود می‌شود. مساحت این حوضه در خاک ایران حدود ۵۰۷۶۴ کیلومترمربع است که ۴۲۱۷۵ کیلومترمربع در بالادست سد کرخه و ۸۵۸۹ کیلومترمربع در پایین دست سد قرار دارد و دارای میانگین بارندگی ۵۳۹ میلی‌متر است. طول آبراهه اصلی این حوضه از سرچشمه گاماسیاب تا سد کرخه ۷۰۰ کیلومتر می‌باشد. سد کرخه در این حوضه بر روی رودخانه کرخه تاسیس شده است و در ۲۲ کیلومتری شمال غربی شهرستان اندیمشک در استان خوزستان احداث شده است. این سد با حجم مخزن ۷میلیارد و ۳۰۰ میلیون مترمکعب و طول تاج ۳۰۳۰ متر از لحاظ حجم بدنه، بزرگترین سد ایران محسوب می‌شود [۲۱]. علاوه بر سد کرخه، تبخیر از سطح سد دز نیز در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. این سد در حوضه کارون بزرگ واقع شده و در ۲۵ کیلومتری شمال شهرستان دزفول و بر روی رودخانه دز ساخته شده است. حجم مخزن دز در حدود ۳٫۵ میلیارد مترمکعب و سطح آن در بالاترین تراز ۱۷۰۰۰ کیلومترمربع بوده و طول دریاچه آن ۶۵ کیلومتر است. نمایی از منطقه مورد بررسی در شکل (۱) نمایش داده شده است [۲۲].



شکل۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و دریاچه‌های ارومیه و سد کرخه و دز

۲-۲- داده مورد استفاده

در این مطالعه، از ۲۵ تصویر سنجنده مادیس برای ماه‌های غیر یخبندان سال ۲۰۲۰ استفاده شد که اطلاعاتی از قبیل بازتابندگی طیفی و زاویه تابش خورشید از تصاویر *MOD09A1* و اطلاعات مربوط به دمای سطح از تصاویر *MOD11A2* استخراج گردید. تصاویر انتخابی از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده به آدرس *www.usgs.gov* تهیه شدند. همچنین، داده‌های ایستگاه سینوپتیک ارومیه، تبریز، سلماس و سقز به‌عنوان پارامترهای ورودی به مدل‌ها

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

برای محاسبه تبخیر دریاچه ارومیه و ایستگاه‌های اهواز، سفی‌آباد، حسینیه و لالی برای محاسبه تبخیر از سد کرخه و دز مورد استفاده قرار گرفتند. دلیل استفاده از این ایستگاه‌ها نزدیکی به پهنه‌های آبی مورد مطالعه بود. داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک شامل داده‌های تابش خورشیدی، ساعت آفتابی، رطوبت نسبی، دمای بیشینه، کمینه، متوسط، سرعت باد و دمای نقطه شبنم بودند. داده‌ها به‌صورت سه ساعته دریافت شدند و با استفاده از مقادیر آن‌ها تبخیرتعرق مرجع روزانه و تابش خالص روزانه محاسبه شد. همچنین، مقادیر تبخیر اندازه‌گیری شده توسط تشت تبخیر در ایستگاه‌های یاد شده برای ارزیابی تبخیرتعرق مرجع مورد استفاده قرار گرفت. تشت تبخیر مورد استفاده کلاس A بوده و دقت اندازه‌گیری تبخیر توسط آن $0/1\ mm$ می‌باشد. تبخیر تشت روزانه یک بار در ساعت ۶ به وقت ساعت هماهنگ جهانی[1](*UTC*) با استفاده از روش حجمی برداشت می‌شود.

۳- روش شناسی

در مرحله اول این مطالعه، تصاویر از لحاظ کیفیت مورد بررسی قرار گرفتند. از آنجایی که در فصل‌های یخبندان داده‌های داده‌های تشت تبخیر برداشت نمی‌شود و اکثر تصاویر ابری هستند، مدل‌های متریک و سبال در فصل‌های غیر یخبندان و در روزهایی که مقادیر هواشناسی موجود بودند، اجرا شد. از این جهت ۲۵ تصویر ماهواره مادیس از ماه آوریل تا اکتبر انتخاب شد. از آنجایی که تصاویر مادیس با دوره زمانی ۸ روزه مورد استفاده قرار گرفت، میانگین داده‌های هواشناسی برای دوره مورد نظر محاسبه و مورد استفاده قرار گرفت. سپس، نمودارهای تبخیر میانگین ماهانه و تجمعی برای هر کدام از مدل‌ها تولید شد. از داده‌های هواشناسی ثبت شده در ۴ ایستگاه سینوپتیک ارومیه، تبریز، سلماس و سقز به عنوان ورودی به مدل‌ها برای محاسبه تبخیر دریاچه ارومیه به صورت مجزا استفاده و نتایج به دست آمده از هر کدام به طور مجزا تجزیه و تحلیل شد. از آنجایی که داده‌ها هر ۳ ساعت یکبار در ایستگاه‌های سینوپتیک کشور برداشت می‌شوند و طبق مدل متریک نیاز به داده های ساعتی برای محاسبه تبخیرتعرق گیاه مرجع در ۲۴ ساعت می‌باشد، بنابراین داده‌های دریافتی از ایستگاه هواشناسی با تقریب مناسب به ۲۴ ساعت تبدیل گردید. همچنین، داده‌های ۴ ایستگاه سینوپتیک سفی‌آباد، اهواز، حسینیه و لالی نیز برای محاسبه تبخیر از سدهای دز و کرخه با استفاده از مدل‌های سبال و متریک به کار گرفته شد و نتایج به دست آمده برای هر کدام از ایستگاه‌ها تجزیه و تحلیل شد. این ایستگاه‌ها به دلیل نزدیکی به مخزن سد و ثبت داده‌های ساعت آفتابی انتخاب شدند. علاوه براین، ایستگاه‌های سینوپتیک دیگری وجود دارد که با وجود نزدیکی به مخزن سد داده‌های ساعت آفتابی در آن ایستگاه‌ها ثبت نمی‌شود اما در این مطالعه به دلیل نیاز به مقادیر ساعت آفتابی، اطلاعات ایستگاه‌های دارای مقادیر ساعت آفتابی از سازمان هواشناسی دریافت شد. همچنین، به دلیل آنکه دو سد دز و کرخه از لحاظ موقعیت جغرافیایی نزدیک هم هستند، از داده‌های ثبت شده در ۴ ایستگاه یاد شده به طور مجزا برای هر دو سد استفاده شد.

همانطور که قبلا گفته شد، یکی از موارد تاثیرگذار در نتیجه هر کدام از مدل‌ها، تبدیل تبخیر از مقیاس لحظه‌ای به مقیاس روزانه می‌باشد. در مدل متریک از تبخیرتعرق گیاه مرجع و در نسخه اصلی مدل سبال از تابش خالص روزانه برای این امر استفاده می‌شود. به همین دلیل، دقت و صحت در محاسبه تبخیرتعرق گیاه مرجع و تابش خالص روزانه می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای در نتیجه به دست آمده بگذارد. از طرفی به دلیل اینکه داده‌های تابش خالص در ایستگاه‌های هواشناسی کشور ثبت نمی‌شود، مقدار این پارامتر از روابط موجود طبق نشریه فائو۵۶ محاسبه و ارزیابی شد. علاوه بر این به دلیل اینکه یکی از پارامترهای مهم در برآورد تابش خالص

[1] *Universal time coordinated*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

مقدار تابش خورشیدی رسیده به زمین می‌باشد و با اینکه مقدار تابش خورشیدی در برخی ایستگاه‌های سینوپتیک کشور ثبت می‌شود، ولی به دلیل کالیبره نکردن این مقدار توسط سازمان هواشناسی استفاده از آن مقادیر منجر به خطا خواهد شد. بنابراین، در این مطالعه برای محاسبه تابش خورشیدی از داده‌های ساعت آفتابی استفاده شد [۲۳].

به دلیل بررسی کارایی دو مدل سبال و متریک در این مطالعه، در ادامه هر یک از مدل های مذکور تشریح شده‌اند.

۳-۱- مدل سبال

الگوریتم سبال تبخیرتعرق واقعی را در لحظه گذر ماهواره با استفاده از رابطه بیلان انرژی محاسبه می‌کند. رابطه بیلان انرژی به‌صورت رابطه (۱) می‌باشد [۵]:

$$\lambda ET = R_n - G - H$$ رابطه(۱)

در رابطه(۱)، λET شار گرمای نهان (W/m^2)، R_n شار تابش خالص بر حسب (W/m^2)، G شار گرمای خاک یا آب (W/m^2) و H شار گرمای محسوس (W/m^2) می‌باشد. در ادامه روش محاسبه هریک از پارامترهای مربوطه شرح داده شده است.

مقدار تابش خالص در لحظه گذر ماهواره با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید:

رابطه(۲)

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

در رابطه(۲)، α آلبیدو سطح، $R_{s\downarrow}$ شار تابش موج کوتاه ورودی (W/m^2) و $R_{L\downarrow}$ تابش طول موج بلند ورودی $(W.m^{-2})$ است، که با استفاده از رابطه استفان-بولتزمن[۱] همراه با گذردهی جوی و دمای سطح به عنوان پیکسل سرد حساب می‌شود [۴]. $R_{L\uparrow}$ تابش طول موج بلند خروجی می‌باشد $(W.m^{-2})$، که با استفاده از دمای سطح و گسیلندگی سطح محاسبه می شود. جمله $(1-\varepsilon_0)R_{L\downarrow}$ نمایانگر نسبتی از تابش طول موج بلند ورودی است که به دلیل بازتابندگی از سطح از دست رفته است.

شار گرمای خاک نسبتی از شار تابش خالص بوده که [۴] رابطه (۳) را برای آن پیشنهاد داد:

رابطه(۳)

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha}(0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - NDVI^4)$$

در رابطه(۳)، T_s دمای سطح بوده و از اطلاعات تصاویر *MOD11A2* با واحد کلوین استخراج شده، *NDVI*[۲] شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده می‌باشد که از اطلاعات باند ۱ و ۲ تصاویر *MOD09A1* محاسبه می‌شود. این رابطه برای سطوح آبی مناسب نیست. در این مطالعه، طبق پیشنهاد [۳] رابطه $G=0.5R_n$ برای محاسبه شار گرمای آب مورد استفاده قرار گرفت.

مهمترین پارامتری که بیشتر مدل‌های بیلان انرژی را از یکدیگر جدا می‌کند، تفاوت در محاسبه شار گرمای محسوس می‌باشد. از آنجایی که برای محاسبه شارگرمای محسوس نیاز به اختلاف دمای نزدیک سطح و دمای هوا در ارتفاع ۲ متری در هر پیکسل است، بنابراین محاسبه گرادیان دمای نزدیک سطح (dT) چالشی برای محققان بوده است. در مدل سبال، شار گرمای محسوس طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$H = \frac{\rho_a \times c_p \times dT}{r_{ah}}$$ رابطه(۴)

در رابطه(۴)، H شار گرمای محسوس، ρ_a چگالی هوا، c_p گرمای مخصوص هوا و r_{ah} مقاومت آیرودینامیک در برابر انتقال گرما می‌باشد. علت استقبال بیشتر محققان از مدل سبال و متریک در نحوه محاسبه dT می‌باشد بطوری که در این دو مدل رابطه خطی بین گرادیان دما و دمای سطح برای محاسبه dT طبق رابطه(۵)تولید می‌شود:

$$dT = aT_s + b$$ رابطه(۵)

در رابطه(۵)، a و b ضرایب کالیبراسیون می‌باشند که

[۱] *Stefan Boltzmann*

[۲] *Normalized Difference Vegetation Indexes*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

برای هر منطقه به صورت مستقل محاسبه می‌شود. برای محاسبه این ضرایب پیکسل‌های حدی تعریف می‌شود که به‌صورت پیکسل گرم و پیکسل سرد بیان می‌شوند. دلیل انتخاب این دو پیکسل مشخصات آن‌ها می‌باشد که با توجه به آن‌ها مشخصات گرمای محسوس در این دو پیکسل محاسبه می‌شود که با توجه به رابطه(۴) با وجود مقدار گرمای محسوس، مقدار dT قابل تعیین می‌باشد. بنابراین دو معادله و دو مجهول تشکیل شده و ضرایب a و b محاسبه می‌شود. مقاومت آیرودینامیک ابتدا با فرض شرایط هوای خنثی محاسبه می‌شود، سپس با توجه به معادلات شرایط پایداری نظریه مونین-آبوخوو[1] اصلاح می‌گردد. این روند به‌صورت تکراری انجام می‌پذیرد تا نتایج پایدار گردد.

پیکسل گرم پیکسلی است که در آن دمای سطح بیشتر و گرمای نهان تبخیر صفر است $(\lambda ET=0)$. پیکسل سرد، پیکسلی است که بیشترین تبخیر را داشته و شار گرمای کمتری دارد. در نسخه ابتدایی مدل سبال، پیکسل سرد عمدتا در سطح آب در نظر گرفته می‌شود و شار گرمای آن صفر در نظر گرفته می‌شود $(H_{cold}=0)$. بعد از محاسبات شار گرمای محسوس، شار تابش خالص و شار گرمای خاک، طبق رابطه(۱) شار گرمای نهان محاسبه می‌شود. با تقسیم شار گرمای نهان به گرمای نهان تبخیر، مقدار تبخیر در لحظه گذر ماهواره محاسبه شده و سپس طبق رابطه (۶) تبدیل به تبخیر در ساعت مربوط به گذر ماهواره می‌شود:

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

در رابطه(۶)، ET_{inst} تبخیر در ساعت گذر ماهواره و λ گرمای نهان تبخیر می‌باشد. تبخیر معمولا به صورت روزانه بیان شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، نیاز است که تبخیر ساعتی به تبخیر روزانه تبدیل شود. برای این موضوع پارامتری به نام کسر تبخیر طبق رابطه(۷) تعریف می‌شود:

رابطه(۷)
$$EF = \frac{ET_{inst}}{R_n - G}$$

در رابطه(۷)، ET_{inst}، R_n و G هم واحد هستند. سرانجام تبخیر روزانه در نسخه ابتدایی سبال با استفاده از تابش خالص روزانه به‌صورت رابطه (۸) محاسبه می‌شود [۴و ۱۸]:

رابطه(۸)
$$E_{daily} = EF \times R_{n24}$$

شار تابش خالص معمولا با واحد $MJ/m^2/d$ یا $W/m2$ بیان می‌شود که باید به میلی‌متر تبدیل شود. تبدیل واحدهای مورد نیاز برای این موضوع در نشریه شماره ۵۶ مربوط به فائو[2] (FAO) ارائه شده است [۲۳].

۳-۲- مدل متریک

مدل متریک شباهت زیادی به مدل سبال دارد و فقط به تفاوت‌های این مدل با مدل ابتدایی سبال پرداخته می‌شود.

نحوه تعیین شار تابش خالص لحظه‌ای مطابق روش سبال می‌باشد، اما شار گرمای خاک در مدل متریک مطابق رابطه (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شود [۲۴].

رابطه(۹)
$$\frac{G}{R_n} 0.05 + 0.18e^{-0.521LAI} \qquad (LAI \geq 0.5)$$

رابطه(۱۰)
$$\frac{G}{R_n} = 1.8(T_s - 273.15)/R_n + 0.084 \qquad (LAI<0.5)$$

در رابطه (۹) و (۱۰)، LAI[3] شاخص سطح برگ است.

تفاوت مدل متریک و سبال در محاسبه شار گرمای محسوس در تعیین پیکسل حدی یا پیکسل گرم و سرد می‌باشد. در مدل متریک پیکسل گرم معمولا در زمین بایر بدون پوشش گیاهی در نظر گرفته می شود، جایی که رطوبت در حد صفر بوده و دمای سطح بالایی داشته باشد. بدین ترتیب تبخیرتعرق در پیکسل گرم صفر در نظر گرفته می شود $(H_{hot}=Rn_{hot}-G_{hot})$. پیکسل سرد

[1] *Monin Obukhov*

[2] *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

[3] *Leaf Area Index*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

نیز معمولا در مزرعه یونجه خوب آبیاری شده در نظر گرفته شده و تبخیر در پیکسل سرد ۵ درصد بیشتر از تبخیرتعرق گیاه مرجع در نظر گرفته می شود ($H_{cold}=Rn_{cold}-G_{cold}-1.05*ET_{cold}$).

کسر تبخیر در مدل متریک با استفاده از تبخیرتعرق مرجع در ساعت گذر ماهواره مطابق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$EF=\frac{ET_{inst}}{ET_r} \qquad \text{رابطه(۱۱)}$$

در رابطه(۱۱)، ET_r تبخیرتعرق گیاه مرجع در ساعت عبور ماهواره می باشد. کسر تبخیر محاسبه شده در این روش، مقداری بین ۰ تا ۱ به خود می‌گیرد. اگر کسر تبخیر در پیکسلی صفر باشد، تبخیر در آن پیکسل صفر خواهد بود. همچنین، اگر کسر تبخیر در پیکسلی نزدیک ۱ باشد و پیکسل مورد نظر پوشش گیاهی بالایی داشته باشد، خصوصیاتی مشابه پیکسل سرد خواهد داشت. بعد از محاسبه کسر تبخیر، تبخیرتعرق روزانه با استفاده از تبخیرتعرق گیاه مرجع روزانه طبق رابطه(۱۲) محاسبه می‌شود:

$$ET_{daily}=EF\times ET_{r24} \qquad \text{رابطه(۱۲)}$$

در رابطه(۱۲)، ET_{r24} تبخیرتعرق گیاه مرجع ۲۴ ساعته بوده و از اطلاعات ثبت شده در ایستگاه هواشناسی محاسبه می‌شود. علاوه بر محاسبه تبخیر روزانه، تبخیر رو در طول یک دوره را می‌توان با فرض ثابت بودن کسر تبخیر در آن دوره بر طبق رابطه(۱۳) محاسبه کرد [۳].

$$ET_{period}=EF_{period}\times\sum_{1}^{n}ET_{r24} \qquad \text{رابطه(۱۳)}$$

در رابطه(۱۳)، EF_{period} کسر تبخیر در دوره مورد نظر بوده و n نشانگر روزهای مربوط به دوره مورد بررسی می‌باشد.

۳-۳- روش‌های ارزیابی نتایج

در این مطالعه، *RMSE* برای محاسبه خطا بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده استفاده شده است که توسط رابطه(۱۴) محاسبه می‌شود:

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\hat{x}_i\right)^2} \qquad \text{رابطه(۱۴)}$$

در رابطه(۱۴)، n تعداد مشاهدات می‌باشد، $\hat{x}_i$ مقادیر اندازه‌گیری شده است و x_i مقادیر پیش‌بینی شده است. علاوه بر این ضریب تعیین برای محاسبه همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر ارزیابی شده استفاده شده است (رابطه(۱۵)):

رابطه(۱۵)

$$R^2=\frac{\left[\sum_{i=1}^{n}x_i\hat{x}_i-\frac{(\sum_{i=1}^{n}x_i)(\sum_{i=1}^{n}\hat{x}_i)}{n}\right]^2}{\left[\sum_{i=1}^{n}x_i^2-\frac{(\sum_{i=1}^{n}x_i)^2}{n}\right]\left[\sum_{i=1}^{n}\hat{x}_i^{\,2}-\frac{(\sum_{i=1}^{n}\hat{x}_i)^2}{n}\right]}$$

۴- نتایج و بحث

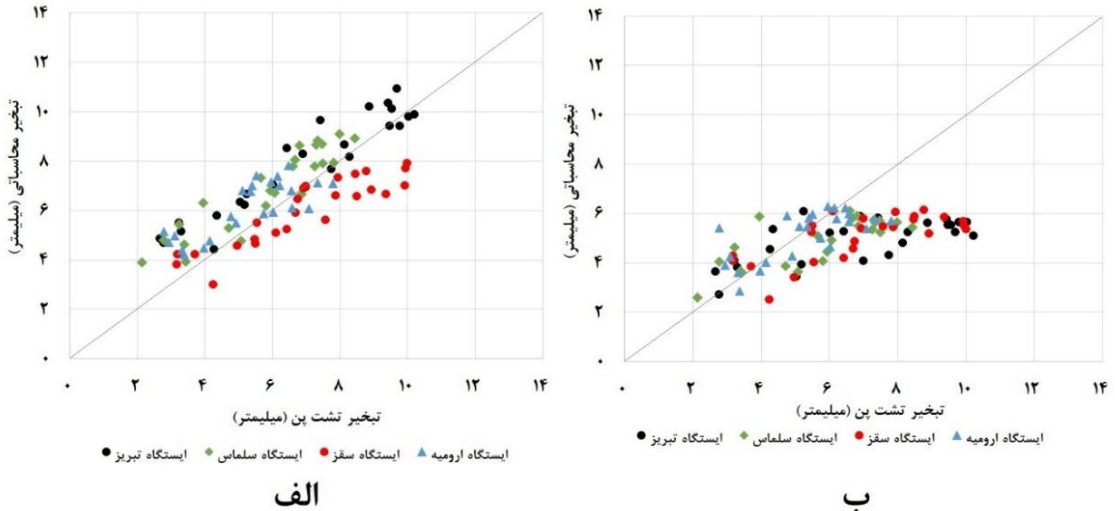
در این بخش تبخیر به دست آمده از مدل‌های سبال و متریک در سطح آب‌های شور و شیرین در مقیاس زمانی روزانه، ماهانه و سالانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱- تبخیر روزانه

شکل (۲-الف) نمودار تبخیر روزانه برآورد شده از دریاچه ارومیه با استفاده از مدل متریک را در مقابل مقادیر مشاهداتی نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است در صورت استفاده از داده‌های ایستگاه تبریز، تبخیر برآور شده از مدل متریک نسبت به ایستگاه‌های دیگر بیشتر خواهد بود. از طرفی مقادیر به دست آمده از ایستگاه تبریز با ضریب تعیین ۰/۸۹ و *RMSE* برابر ۱/۲۸ میلی‌متر در روز نسبت به ایستگاه‌های دیگر، مقادیری نزدیک به اندازه‌گیری‌های مستقیم ثبت شده در ایستگاه‌های مورد نظر دارد. شکل (۲-ب) نمودار تبخیر روزانه با استفاده از مدل سبال را در سطح دریاچه ارومیه نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است مدل متریک نسبت به مدل سبال نتایج قابل قبول‌تری را ارائه داده است. دلیل این موضوع می‌تواند به دلیل محدودیت دسترسی به مقادیر دقیق تابش

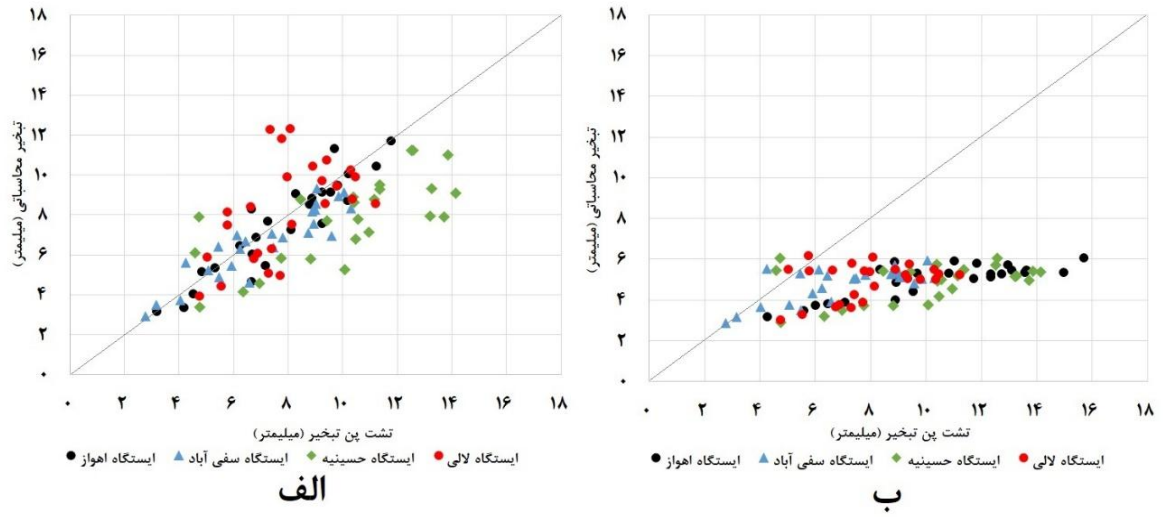
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

خالص روزانه باشد که در تبدیل تبخیر از مقیاس لحظه‌ای به روزانه در مدل سبال مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، بازه تغییرات مقادیر تبخیر در مدل سبال طبق شکل(۲) کمتر بوده و تغییرات بیشتر داده‌ها بین ۴ تا ۶ میلی‌متر می‌باشد. طبق بررسی‌های انجام شده این مورد بدان دلیل است که بازه تغییرات مقادیر تابش خالص روزانه محاسبه شده از طریق ساعت آفتابی به منظور تبدیل مقیاس تبخیر، گستردگی لازم را ندارد. شکل (۳-الف) تبخیر روزانه مدل متریک در مقابل مقادیر مشاهداتی دریاچه آب شیرین کرخه را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است استفاده از داده‌های ایستگاه اهواز با ضریب تعیین ۰٫۸۶ و *RMSE* ۰٫۹۲ میلی‌متر در روز و ایستگاه سفی‌آباد با ضریب تعیین ۰٫۸۲ و *RMSE* ۱٫۰۷ میلی‌متر در روز منجر به نتیجه بهتری در مدل متریک نسبت به ایستگاه‌های دیگر شده است. همچنین طبق شکل (۳-الف)، استفاده از داده‌های ایستگاه لالی منجر به خطای بیشتر در مدل متریک نسبت به مقادیر مشاهداتی می‌شود همانند نتایج مدل سبال در آب شور، در آب شیرین نیز مطابق شکل (۳-ب) نتیجه قابل قبولی به دلیل دسترسی نداشتن به مقادیر دقیق تابش خالص حاصل نمی‌شود. همچنین، امکان اعتبار سنجی مقادیر برآورد شده‌ی شار گرمای خالص لحظه‌ای با استفاده از مدل‌های سبال و متریک به دلیل فقدان مقدار زمینی وجود نداشت. علاوه بر این، با در نظر گرفتن نتایج مدل متریک در ایستگاه‌های هواشناسی تبریز و ایستگاه اهواز می‌توان گفت که مدل متریک در آب‌های شور و شیرین نتیجه مناسبی دارد، با این تفاوت که در آب شیرین انتخاب شده خطای مدل متریک کمتر از خطا در آب شور دریاچه ارومیه است. همچنین، مقادیر تبخیر در آب شیرین نسبت به آب شور بیشتر بوده است که این می‌تواند به دلیل شوری و موقعیت مکانی دریاچه‌های آب شور و شیرین باشد، به‌طوری که به دلیل قرار گرفتن مخزن کرخه و دز در منطقه‌ای با آب و هوای گرم و مرطوب، متوسط دمای هوا در سطح دریاچه کرخه و دز بیشتر از متوسط دما در سطح دریاچه ارومیه است. قابل ذکر است که به دلیل مشابهت در نتایج تبخیر روزانه دریاچه کرخه و دز به دلیل قرار گرفتن در موقعیت مکانی مشابه و داشتن آب و هوای یکسان که در ادامه نیز بحث شده است، در اینجا تنها نتایج تبخیر روزانه دریاچه کرخه مورد بحث قرار گرفت.



شکل۲: تبخیر روزانه دریاچه ارومیه اندازه‌گیری شده توسط تشت تبخیر در مقایسه با مقادیر برآورد شده با استفاده از مدل‌های الف) متریک و ب) سبال

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]



شکل۳: تبخیر روزانه دریاچه کرخه (آب شیرین) اندازه‌گیری شده توسط تشت تبخیر در مقایسه با مقادیر برآورد شده با استفاده از مدل‌های الف) متریک و ب) سبال

۴-۲- میانگین ماهانه تبخیر

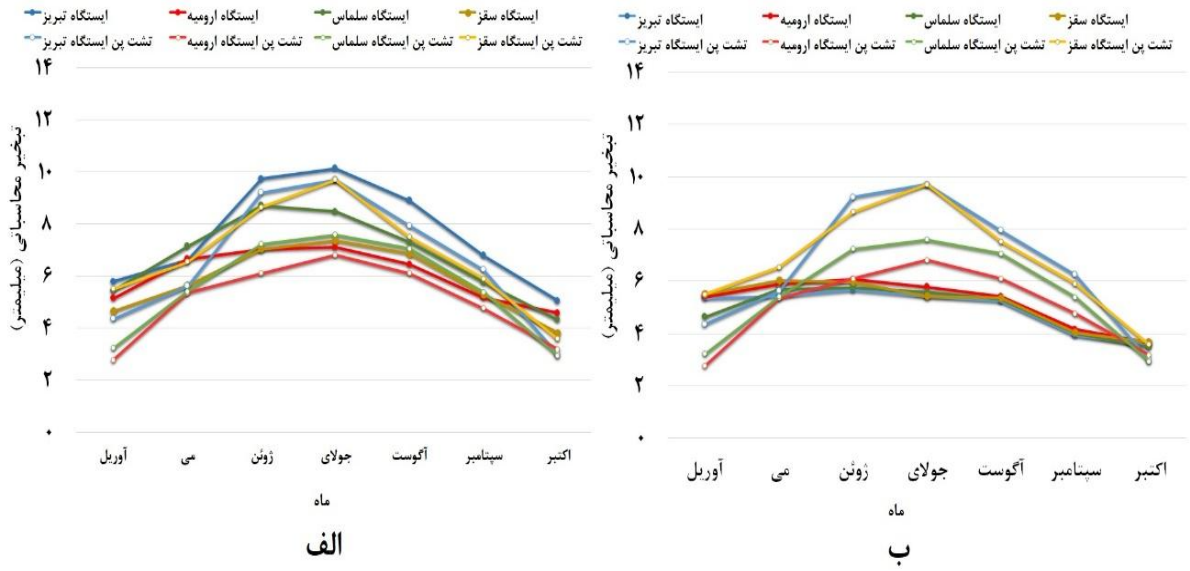
شکل (۴) نمودار تغییرات میانگین ماهانه تبخیر را با استفاده از مدل‌های متریک و سبال در دریاچه ارومیه نشان می‌دهد. نتایج مشاهداتی در این نمودار برگرفته از مقادیر ثبت شده در ۴ ایستگاه می‌باشد. شکل (۴-الف) تغییرات تبخیر ماهانه را با استفاده از مدل متریک نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است روند تغییرات تبخیر با استفاده از مدل متریک شباهت زیادی به نتایج اندازه‌گیری شده توسط تشت تبخیر دارد و بیشترین تبخیر در ماه جولای اتفاق افتاده است که دمای سطح دریاچه در این ماه نسبت به ماه‌های دیگر بیشینه بوده و مقدار آن معقول به‌نظر می‌رسد. علاوه بر این، کمترین تبخیر در ماه اکتبر اتفاق می‌افتد که دراین ماه دمای هوا و دمای سطح دریاچه نسبت به ماه‌های دیگر کمتر است. همچنین، شکل (۴-الف) تاثیر داده‌های ایستگاه هواشناسی در برآورد تبخیر را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل نیز مشخص است استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی تبریز منجر به برآورد تبخیر بیشتر نسبت به ایستگاه‌های دیگر شده است، به‌طوری که استفاده از داده‌های ایستگاه ارومیه منجر به برآورد تبخیر کمتر شده است. علاوه بر این، نتایج حاصل از برآورد تبخیر با استفاده از داده‌های هواشناسی مختلف نشان‌دهنده آن است که در ماه‌های آوریل و اکتبر کمترین اختلاف و در ماه جولای بیشترین اختلاف بین نتایج مدل در ایستگاه‌های مختلف رخ داده است. این اختلاف‌ها درصورتی بوده است که این ایستگاه‌ها به دریاچه نزدیک می‌باشند و این مورد تاثیر داده‌های ایستگاه هواشناسی در نتایج مدل را نشان می‌دهد. علت این اختلاف می‌تواند دقت در ثبت داده‌ها در ایستگاه‌ها باشد.

برای بررسی دقت ثبت داده‌های هواشناسی مطابق شکل (۴-الف) می‌توان به مقادیر تشت تبخیر ثبت شده در ایستگاه‌ها توجه نمود، به‌طوری که بیشترین اختلاف بین ایستگاه تبریز و ارومیه بوده و در حدود ۳ میلی‌متر می‌باشد که با توجه به فاصله‌ی نه چندان زیاد این دو ایستگاه از همدیگر این اختلاف کمی زیاد به نظر می‌رسد. به منظور بررسی بیشتر این موضوع، میانگین داده‌های ایستگاه سینوپتیک تبریز و ارومیه بعنوان ورودی به مدل متریک و سبال در نظر گرفته شد و نتایج با میانگین داده‌های پن دو ایستگاه مورد ارزیابی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

قرار گرفت. نتیجه به دست آمده نشان‌دهنده آن بود که در این حالت همبستگی بین مقادیر برآورد شده از مدل متریک و مقادیر مشاهداتی نسبت به نتیجه مدل در ایستگاه ارومیه بهتر شده است. ولی در نتیجه مدل سبال تغییری ایجاد نشد.

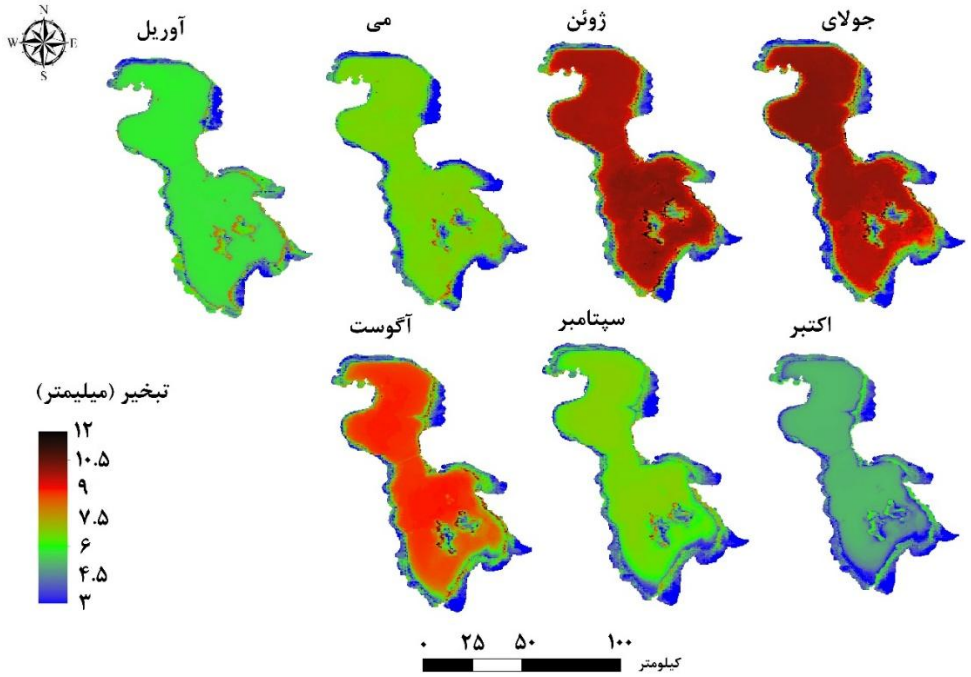
در هر حال نتایج میانگین ماهانه مدل متریک در ایستگاه هواشناسی تبریز با ضریب تعیین ۰/۹۸ و *RMSE* برابر با ۰/۱۳ میلی‌متر و در ایستگاه هواشناسی سقز با ضریب تعیین ۰/۹۴ و *RMSE* برابر با ۰/۱۲۱ میلی‌متر نزدیکی بیشتری به مقادیر مشاهداتی نسبت به ایستگاه‌های دیگر داشته و کارایی مناسب این مدل را در برآورد تبخیر از پهنه‌های آب شور نشان می‌دهد. شکل (۴-ب) نتایج ماهانه مدل سبال را در مقابل نتایج مشاهداتی نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، بازه تغییرات مقادیر تبخیر برآورد شده با استفاده از این روش، در ماه‌های مختلف کم و در حدود ۲ میلیمتر می‌باشد که این مقدار بیانگر مناسبی برای بیان تفاوت تبخیر بیشینه و کمینه بین ماه‌های آوریل تا اکتبر نمی‌باشد. همچنین، اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین مقادیر اندازه‌گیری شده و نتایج مدل سبال وجود دارد، این درحالی است که بررسی‌های انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهد که تفاوت زیادی در نرخ تبخیر لحظه‌ای در زمان گذر ماهواره بین مدل متریک و مدل سبال وجود ندارد. بنابراین خطای به وجود آمده ناشی از تبدیل مقیاس تبخیر از مقیاس لحظه‌ای به روزانه است. به‌طوری که در مدل اصلی سبال از تابش خالص روزانه برای تبدیل مقیاس استفاده می‌شود و طبق مطالعات پیشین که در بخش مقدمه تشریح شد، درصورت استفاده از مقادیر دقیق اندازه‌گیری، نتایج قابل قبولی نسبت به مقادیر مشاهداتی ارائه خواهد شد. به دلیل آنکه مقادیر تابش خالص در ایستگاه‌های هواشناسی کشور ایران به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شود، مقدار این پارامتر با استفاده از مقادیر ساعت آفتابی برآورد شد. که در نتیجه مطابق شکل(۴) این مورد منجر به ایجاد خطا در مدل شده است. در هر حال ضریب تعیین بین مقادیر ماهانه مدل سبال در ایستگاه تبریز در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده ۰/۳۸ و *RMSE* برابر ۲/۵ میلیمتر به دست آمد. که در مقابل نتایج مدل متریک قابل قبول نمی‌باشد.



شکل۴: تغییرات میانگین ماهانه تبخیر دریاچه ارومیه با استفاده از مدل‌های الف)متریک ب) سبال

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

با توجه به کارایی بهتر مدل متریک، شکل(۵) توزیع تبخیر درون دریاچه ارومیه را در ماه‌های آوریل تا اکتبر با استفاده از این مدل نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، تبخیر در ماه جولای و ژوئن بیشتر از ماه‌های دیگر است که در شکل(۴) نیز کاملا مشهود بود. دلیل این موضوع، دمای هوای بالا در این دوماه نسبت به ماه‌های دیگر است. همین استدلال برای تبخیر در ماه اکتبر نیز صادق است که به دلیل افت دما در این فصل، تبخیر کمتری در این ماه اتفاق افتاده است. طبق نقشه توزیع تبخیر دریاچه ارومیه، تبخیر در نواحی شمالی دریاچه نسبت به نواحی جنوبی دریاچه بیشتر می‌باشد که می‌تواند به دلیل عمق بیشتر آب در این نواحی باشد که نقشه عمق سنجی دریاچه ارومیه صحت این موضوع را تایید می‌کند. علاوه بر این مقدار آلبیدو نیز در نواحی میانی و شمالی دریاچه کمتر می‌باشد که نشان‌دهنده تابش خالص بیشتر در این نواحی است. این مورد نیز می‌تواند علت دیگری از افزایش تبخیر در نواحی شمالی دریاچه باشد. طبق شکل(۵) حاشیه‌های قرمز رنگی (مقادیر تبخیر کم) در کناره‌های دریاچه دیده می‌شود که این نشانگر خشک شدن این مناطق نسبت به سال‌های قبل است که می‌تواند ناشی از تبخیر و کاهش جریانات ورودی به دریاچه باشد.



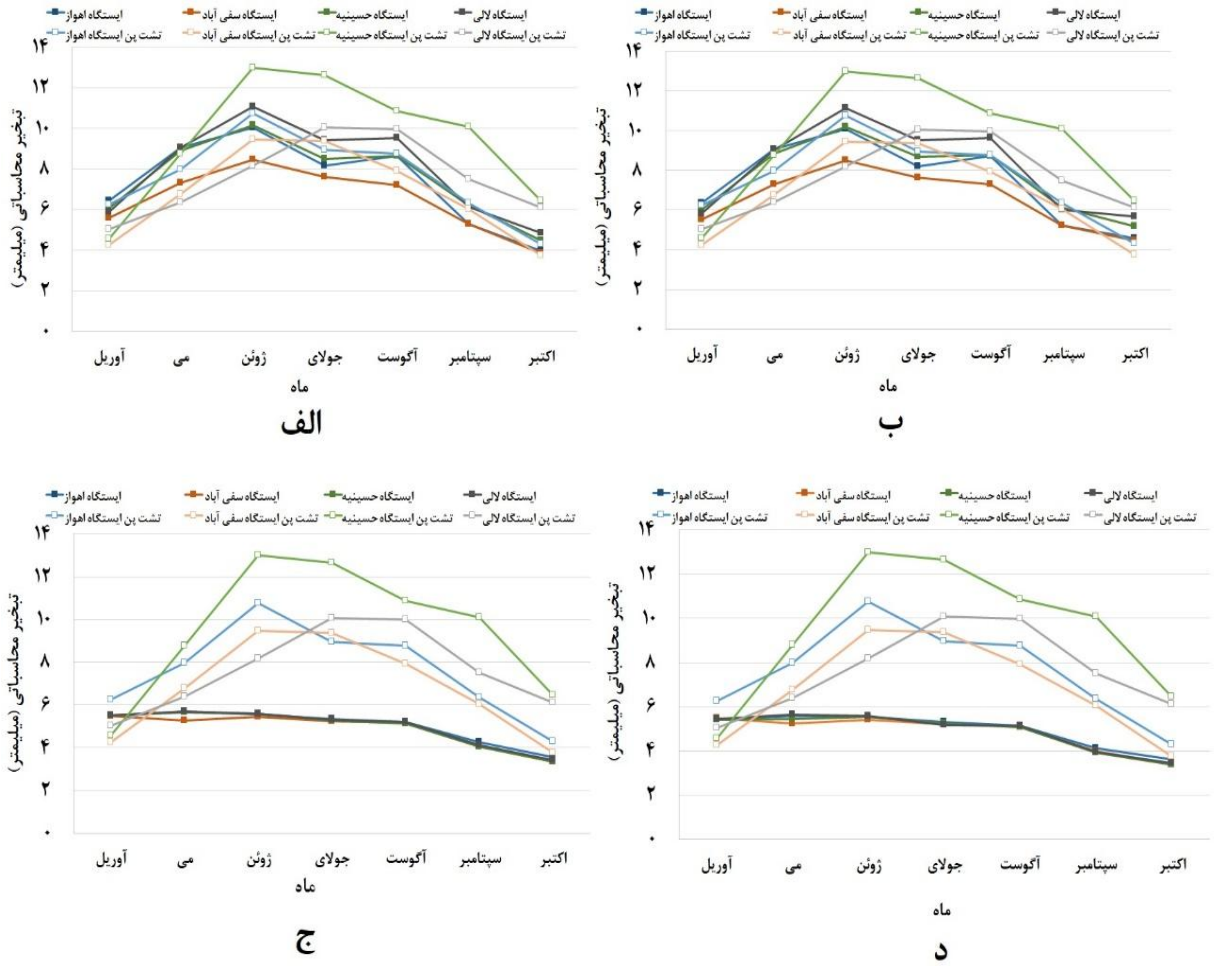
شکل۵: توزیع میانگین تبخیر ماهانه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل متریک برای ماه‌های آوریل تا اکتبر

شکل (۶-الف) تبخیر از سطح مخزن کرخه و شکل (۶-ب) تبخیر از سطح مخزن دز با استفاده از مدل متریک را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، روند تغییرات تبخیر در این دو شکل بسیار مشابه همدیگر می‌باشد که دلیل آن نزدیکی این دو سد به یکدیگر و داشتن شرایط آب و هوای مشابه می‌باشد که در شکل(۱) نیز قابل مشاهده است. طبق شکل(۶)، استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی مختلف منجر به نتیجه‌های مختلفی شده است. با توجه به نزدیک بودن ایستگاه‌های مورد بررسی به مخازن سد داده‌های تشت تبخیر حسینیه اختلاف زیادی با دیگر ایستگاه‌ها دارد که نشان از نامناسب بودن این ایستگاه برای برآورد

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

تبخیر از دریاچه‌های دز و کرخه می باشد. همچنین طبق شکل (۶-الف) و (۶-ب) در صورت استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی اهواز و سفی‌آباد، تبخیر به دست آمده از مدل متریک نشان‌دهنده توزیعی متناسب با هر ماه است. همچنین بیشترین تبخیر در ماه‌های جولای و ژوئن اتفاق افتاده است و کمترین تبخیر در ماه اکتبر اتفاق افتاده است که با توجه به دمای هوا در این ماه معقول به نظر می‌رسد. همانطور که از شکل نیز مشخص است، در صورت استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی اهواز نتایج مدل متریک در سطح دریاچه کرخه با ضریب تعیین ۰٫۸۹ و *RMSE* برابر ۰٫۷ میلی‌متر به مقادیر مشاهداتی نزدیک خواهد بود.

شکل (۶-ج) و (۶-د) تبخیر از سد کرخه و دز را به ترتیب با استفاده از مدل سبال را نشان می‌دهد. همانند نتیجه‌ای که در تبخیر از دریاچه ارومیه به دست آمد، بازه تغییرات مقدار تبخیر با استفاده از مدل سبال در ماه‌های مختلف کم بوده و مدل متریک نتایج قابل قبول‌تری ارائه داده است. شکل (۶-د) تبخیر از سد دز با استفاده از مدل سبال را نشان می‌دهد که نتایج نزدیکی به مقادیر به دست آمده از مخزن کرخه دارد و بررسی‌های انجام شده در شکل‌های قبلی نیز برای این شکل صادق است.



شکل۶: تغییرات تبخیر ماهانه با استفاده از مدل متریک در سطح مخزن الف) کرخه و ب) دز و تغییرات تبخیر ماهانه مدل سبال در سطح مخزن الف) کرخه و ب) دز

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

۴-۳- تبخیر سالیانه

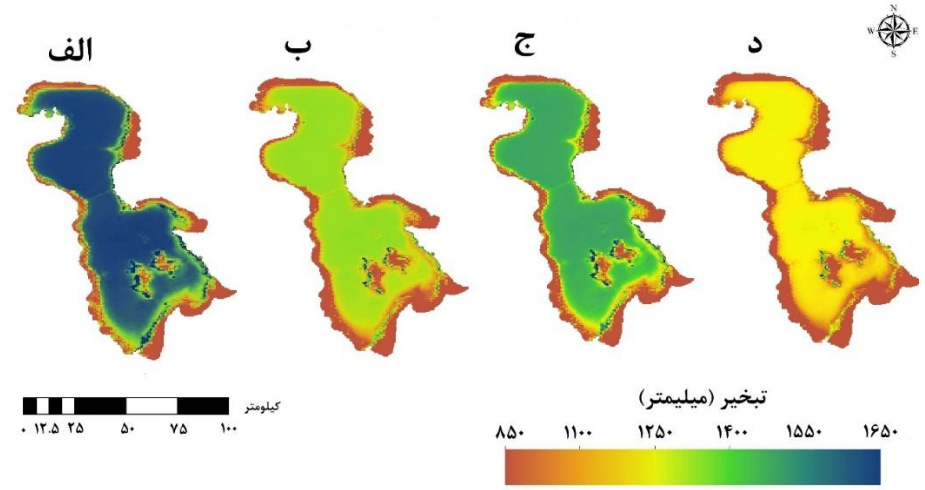
همانطور که گفته شد، محاسبات تبخیر برای ماه‌های غیر یخبندان سال ۲۰۲۰ اجرا شده است. شکل(۷) توزیع تبخیر تجمعی دریاچه ارومیه را با استفاده از مدل متریک برای ماه‌های آوریل تا اکتبر نشان می‌دهد. چهار تصویر موجود در شکل(۷) نشانگر نتایج تبخیر با استفاده از ۴ ایستگاه هواشناسی به‌طور مجزا می‌باشد. شکل (۷-الف) توزیع تبخیر دریاچه ارومیه با استفاده از داده‌های ایستگاه تبریز را نشان می‌دهد، در حالی که شکل‌های (۷-ب)، (۷-ج) و (۷-د) به ترتیب نشانگر تبخیر در ایستگاه‌های ارومیه، سلماس و سقز هستند. همانطور که از شکل مشخص است، درصورت استفاده از داده‌های هواشناسی تبریز، تبخیر به دست آمده بیشینه خواهد بود، که طبق شکل(۲) این نتیجه تایید شد. از سوی دیگر، در صورت استفاده از داده‌های هواشناسی سقز به عنوان ورودی به مدل، تبخیر کمتری از مدل متریک نسبت به ایستگاه‌های دیگر به دست خواهد آمده است. تفاوت تبخیر به دست آمده از مدل متریک در صورت استفاده از داده‌های ایستگاه تبریز نسبت به ایستگاه سینوپتیک سقز (شکل (۷-الف) و (۷-ب)) در حدود ۴۰۰ میلی‌متر شده است که مقدار قابل توجهی است و تاثیر داده‌های هواشناسی در نتایج مدل را به‌خوبی نشان می‌دهد. این در حالی است که میانگین تبخیر ثبت شده از تشت تبخیر در ۴ ایستگاه هواشناسی ۱۲۵۵ میلیمتر در سال می‌باشد، که به تبخیر به دست آمده از ایستگاه تبریز نزدیک است. همچنین، طبق تحقیقات پیشین انجام شده توسط محققان مختلف، روش فائو۵۶-پنمن-مانتیث[1]عملکرد مناسبی در محاسبه تبخیرتعرق مرجع در نواحی مختلف ایران و نقاط مختلف جهان داشته و در صورت صحیح بودن اطلاعات هواشناسی از دقت بالایی برخوردار است [۲۵و ۲۶]. حتی در بسیاری از مطالعات به عنوان یک روش استاندارد برای ارزیابی نتایج استفاده می‌شود [۲۷و ۲۸]. طبق بررسی‌های انجام شده در این مطالعه، تبخیرتعرق مرجع به دست آمده از داده‌های ایستگاه سینوپتیک تبریز همبستگی و دقت زیادی به تبخیرتعرق مرجع به دست آمده از روش تشت تبخیر داشته است. همچنین همانطور که در بخش روش‌شناشی گفته شد. تبخیرتعرق مرجع نقش مهمی در تبدیل مقیاس تبخیر در مدل متریک داشته و دقت در برآورد تبخیرتعرق مرجع منجر به دقت در برآورد تبخیر با استفاده از مدل متریک می‌شود. با توجه به توضیحات فوق، طبق نتایج به دست آمده در این مطالعه استفاده از داده‌های ایستگاه سینوپتیک تبریز برای برآورد تبخیر از سطح دریاچه ارومیه مناسب می‌باشد. همچنین شکل(۸) نشان‌دهنده تبخیر تجمعی به دست آمده از مدل سبال برای ماه‌های آوریل تا اکتبر است. در این شکل نیز نتایج به دست آمده از مدل سبال در صورت استفاده از ۴ ایستگاه هواشناسی آمده است. شکل (۸-الف) توزیع تبخیر دریاچه ارومیه با استفاده از داده‌های ایستگاه تبریز را نشان می‌دهد، در حالی که شکل‌های (۸-ب)، (۸-ج) و (۸-د) به ترتیب نشانگر تبخیر در ایستگاه‌های ارومیه، سلماس و سقز هستند. طبق این شکل مقادیر به دست آمده از مدل سبال در ایستگاه‌های مختلف نزدیک یکدیگر هستند و بیشترین اختلاف در حدود ۶۰ میلی‌متر شده است. نزدیک بودن نتایج مدل سبال در ایستگاه‌های هواشناسی یاد شده بدان دلیل است که مقادیر محاسبه شده تابش خالص روزانه با استفاده از ساعت آفتابی ثبت شده در این ایستگاه‌ها مقادیری نزدیک به هم دارند، به‌طوری که این مقادیر در تبدیل مقیاس مدل سبال استفاده شده و تاثیر قابل ملاحظه‌ای در تبخیر روزانه دارند. بنابراین، نزدیک بودن مقادیر تابش خالص روزانه در ایستگاه‌های مورد بررسی باعث نزدیک شدن نتایج مدل سبال شده است. این درحالی است که در مدل متریک برای تبدیل مقیاس از تبخیرتعرق مرجع استفاده شده است و به دلیل اینکه در محاسبه

[1] *Penman-Monteith*

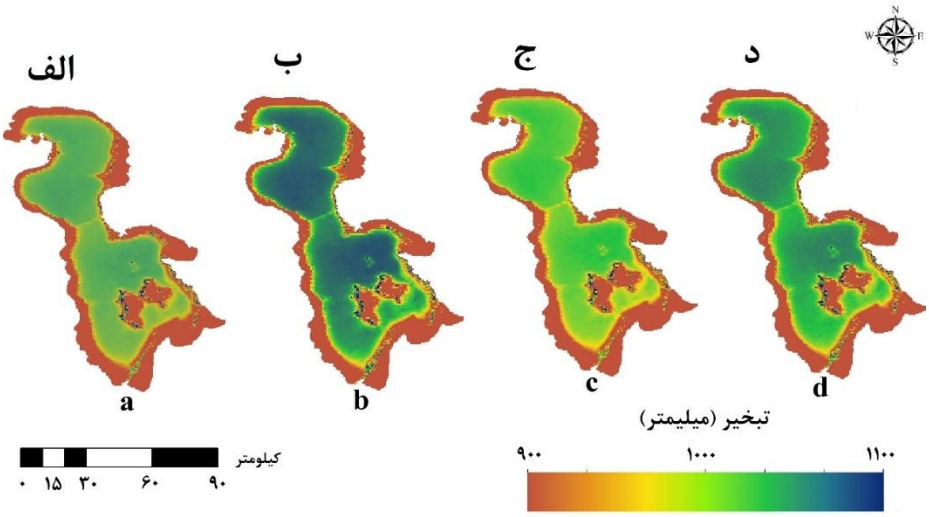
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

تبخیرتعرق مرجع از داده‌های هواشناسی بیشتری استفاده شده است و با توجه به این که اختلاف داده‌های هواشناسی ثبت شده در ۴ ایستگاه یاد شده زیاد است، بنابراین تبخیرتعرق گیاه مرجع محاسبه شده در ۴ ایستگاه تفاوت زیادی با هم دارند که در نتیجه آن مقادیر به دست آمده از مدل متریک در ۴ ایستگاه هواشناسی اختلاف زیادی نسبت به هم داشته است.



شکل۷: توزیع تبخیر تجمعی به دست آمده از مدل متریک با استفاده از ایستگاه سینوپتیک الف) تبریز، ب) ارومیه، ج) سلماس، و د) سقز



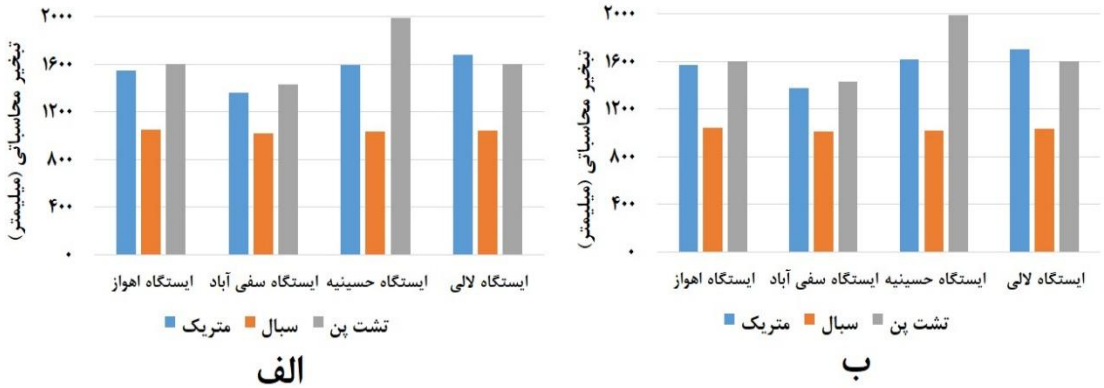
شکل۸: توزیع تبخیر تجمعی به دست آمده از مدل سبال با استفاده از ایستگاه سینوپتیک الف) تبریز، ب) ارومیه، ج) سلماس و د) سقز

شکل(۹) نمودار تغییرات تبخیر تجمعی مدل سبال و متریک را از ماه آوریل تا اکتبر در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده برای دو سد کرخه و دز نشان می‌دهد. شکل (۹-الف) تغییرات تبخیر تجمعی در مخزن کرخه و شکل (۹-ب) تغییرات تبخیر تجمعی در مخزن دز را نشان می‌دهد. به دلیل نزدیکی این دو سد به همدیگر، داشتن شرایط آب و هوایی یکسان و استفاده از داده‌های ۴ ایستگاه مشترک به عنوان ورودی به مدل‌ها، نتایج نزدیک به هم به دست آمده است. شکل(۹) نیز تاثیر استفاده از داده‌های ایستگاه‌های

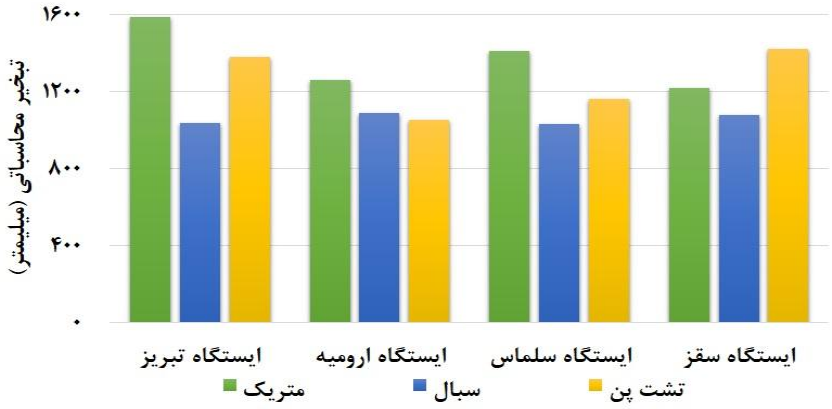
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

مختلف در برآورد تبخیر از آب شیرین را نشان می‌دهد و نشانگر این است که استفاده از داده‌های یک ایستگاه چه میزان در نتیجه نهایی مدل تاثیر خواهد گذاشت. طبق شکل(۹) می‌توان گفت که مقادیر تبخیر به دست آمده از مدل سبال نسبت به مدل متریک کمتر بوده و نتایج مدل متریک به مقادیر مشاهداتی نزدیکتر است. همچنین تغییرات نتایج مدل سبال در ۴ ایستگاه مورد نظر نسبت به تغییرات مدل متریک کمتر می‌باشد که مطابق با نتیجه به دست آمده از دریاچه ارومیه می‌باشد و تحلیل انجام شده برای شکل‌های (۷و۸) در این جا نیز صادق است. طبق شکل(۹)، در صورت استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه اهواز نسبت به ایستگاه‌های دیگر نتایج به دست آمده از مدل متریک به مقادیر تشت تبخیر نزدیک خواهد بود.

شکل(۱۰) نمودار تغییرات تجمعی مدل سبال و متریک و مقادیر پن مشاهداتی را از ماه آوریل تا اکتبر در سطح دریاچه ارومیه نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است تغییرات مدل سبال در ایستگاه‌های مختلف در مقایسه با مدل متریک کم می‌باشد و همچنین مقادیر تشت پن در ۴ ایستگاه سینوپتیک تفاوت قابل ملاحظه‌ای در طول ۷ ماه نسبت به همدیگر داشته است که با توجه به اینکه این ایستگاه‌ها فاصله زیادی از هم ندارند این اختلاف بین مقادیر پن کمی زیاد به نظر می‌رسد. لازم به ذکر است که تمامی مقادیر مربوط به روزهایی با آسمان صاف می‌باشد.



شکل۹: روند تغییرات تبخیر تجمعی مدل سبال و متریک در برابر مقادیر مشاهداتی از ماه آوریل تا اکتبر برای الف) سد کرخه و ب) سد دز



شکل۱۰: روند تغییرات تبخیر تجمعی مدل سبال و متریک در برابر مقادیر مشاهداتی از ماه آوریل تا اکتبر برای دریاچه ارومیه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

هدف این مطالعه، پیاده‌سازی مدل‌های سبال و متریک برای برآورد تبخیر از آب شور و شیرین و ارزیابی تاثیر استفاده از داده‌های مشاهداتی مختلف در نتایج آن بود. نتایج پیاده‌سازی مدل متریک در این مطالعه نشان داد که این مدل کارایی مناسبی در برآورد تبخیر از سطح آب‌های شور و شیرین دارد، با این تفاوت که خطای مدل متریک در آب شیرین کمتر از خطا در آب شور دریاچه ارومیه است. همچنین مقادیر تبخیر محاسبه شده با استفاده از این مدل در آب شیرین نسبت به آب شور بیشتر بوده است که این می‌تواند به دلیل شوری دریاچه ارومیه و موقعیت جغرافیایی دریاچه‌ها باشد. این درحالی است که طبق نتایج به دست آمده نسخه اصلی مدل سبال در آب‌های شور و شیرین نتیجه قابل قبولی ارائه نمی‌دهد. در مدل اصلی سبال ، برای تبدیل تبخیر از مقیاس لحظه‌ای به مقیاس روزانه از تابش خالص روزانه استفاده شده است. دستگاه اندازه‌گیری این پارامتر ممکن است در برخی ایستگاه‌های هواشناسی وجود نداشته باشد. در ایران نیز پارامتر تابش خالص در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری نمی‌شود و این پارامتر با استفاده از روابط موجود و ساعت آفتابی تخمین زده می شود. در این مطالعه، از تابش خالص محاسباتی به‌عنوان تبدیل مقیاس مدل سبال استفاده شد و نتایج آن با مدل متریک و مقادیر مشاهداتی تشت پن مقایسه و ارزیابی شد. نتایج حاکی از آن بود که مقادیر میانگین تبخیر ماهانه به دست آمده از نسخه اصلی مدل سبال با ضریب تعیین ۰/۵۷ و *RMSE* برابر ۳/۰۱ در برابر مقادیر اندازه‌گیری مستقیم، نتایج قابل قبولی ارائه نمی‌دهد. این درحالی است که تحقیقات پیشین نشان داده است که استفاده از مقادیر اندازه‌گیری مستقیم تابش خالص به‌عنوان ورودی به مدل سبال منجر به نتیجه بهتر این مدل در برابر مقادیر مشاهداتی شده است. علاوه بر این یکی دیگر از نتایج مهم در این مطالعه، بررسی تاثیر دقت داده‌های هواشناسی بود. به‌طوریکه داده‌های ایستگاه تبریز نسبت به ایستگاه‌های دیگر دقت مناسبی در برآورد تبخیرتعرق مرجع و مدل متریک داشته و طبق بررسی‌های انجام شده استفاده از داده‌های این ایستگاه برای برآورد تبخیر از دریاچه ارومیه مناسب می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور *(INSF)* به دلیل حمایت ایشان در قالب طرح شماره ۹۹۰۲۲۶۸۷ تشکر نمایند.

مراجع

[1] *J. D. Lenters, T. K. Kratz, and C. J. Bowser, "Effects of climate variability on lake evaporation: Results from a long-term energy budget study of Sparkling Lake, northern Wisconsin (USA)," Journal of Hydrology, vol. 308, no. 1, pp. 168-195, 2005.*

[2] *M. E. Jensen, "Estimating evaporation from water surfaces," in CSU/ARS Evapotranspiration Workshop, Fort Collins, CO, 2010, pp. 1-27.*

[3] *R. Allen, M. Tasumi, R. Trezza, R. Waters, and W. Bastiaanssen, "SEBAL. Surface energy balance algorithms for land. Idaho implementation, advanced training and users manual. Version 1.0," The Idaho Department of Water Resources: Boise, ID, USA, 2002.*

[4] *W. G. Bastiaanssen, "SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey," Journal of hydrology, vol. 229, no. 1-2, pp. 87-100, 2000.*

[5] *W. G. Bastiaanssen, M. Menenti, R. Feddes, and A. Holtslag, "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation," Journal of hydrology, vol. 212, pp. 198-212, 1998.*

[6] *R. Allen, M. Tasumi, and A. Morse, "Satellite-Based evaporation by METRIC and Landsat for Western States Water*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

Management," in US Bureau of Reclamation Evapotranspiration Workshop. Forth Collins, Colo, 2005.

[7] Z. Su, "The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes," Hydrology earth system sciences, vol. 6, no. 1, pp. 85-99, 2002.

[8] M. Mhawej, A. Fadel, and G. Faour, "Evaporation rates in a vital lake: a 34-year assessment for the Karaoun Lake," International Journal of Remote Sensing, vol. 41, no. 14, pp. 5321-5337, 2020.

[9] R. G. Allen, A. Morse, and M. Tasumi, "Application of SEBAL for western US water rights regulation and planning," in Proc. ICID Int. Workshop on Remote Sensing, 2003.

[10] W. Bastiaanssen, E. Noordman, H. Pelgrum, G. Davids, B. Thoreson, and R. Allen, "SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions," Journal of irrigation and drainage engineering, vol. 131, no. 1, pp. 85-93, 2005.

[11] M. Rahimzadegan and A. Janani, "Estimating evapotranspiration of pistachio crop based on SEBAL algorithm using Landsat 8 satellite imagery," Agricultural Water Management, vol. 217, pp. 383-390, 2019.

[12] H. Mohebzadeh and M. Fallah, "Quantitative analysis of water balance components in Lake Urmia, Iran using remote sensing technology," Remote Sensing Applications: Society and Environment, vol. 13, pp. 389-400, 2019.

[13] A. Chinyepe, "Satellite remote sensing of surface water evaporation over Lake Mutirikwi, Zimbabwe," 2012.

[14] A. R. Abdelrady, Evaporation Over Fresh and Saline Water Using SEBS. University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC), 2013.

[15] S. Z. Losgedaragh and M. Rahimzadegan, "Evaluation of SEBS, SEBAL, and METRIC models in estimation of the evaporation from the freshwater lakes (Case study: Amirkabir dam, Iran)," Journal of Hydrology, vol. 561, pp. 523-531, 2018.

[16] G. Zhao and H. Gao, "Estimating reservoir evaporation losses for the United States: Fusing remote sensing and modeling approaches," Remote Sensing of Environment, vol. 226, pp. 109-124, 2019.

[17] S. Sima, A. Ahmadalipour, and M. Tajrishy, "Mapping surface temperature in a hyper-saline lake and investigating the effect of temperature distribution on the lake evaporation," Remote Sensing of Environment, vol. 136, pp. 374-385, 2013.

[18] R. Allen, A. Irmak, R. Trezza, J. M. Hendrickx, W. Bastiaanssen, and J. Kjaersgaard, "Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC," Hydrological Processes, vol. 25, no. 26, pp. 4011-4027, 2011.

[19] A. Eimanifar and F. Mohebbi, "Urmia Lake (northwest Iran): a brief review," Saline systems, vol. 3, no. 1, pp. 1-8, 2007.

[20] B. Pengra, "The drying of Iran's Lake Urmia and its environmental consequences," UNEP-GRID, Sioux Falls, UNEP Global Environmental Alert Service (GEAS), 2012.

[21] R. P. J. porhemaat, "Regional Analaysis and Investigation of Base Discharge of Karstic Basin (case Study of Karkhe Basin)," Fourth Iranian Water Resources Management, Tehran 2011.

[22] "Regional Water Compony of Tehran https://www.thrw.ir ".

[23] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, "Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56," Fao, Rome, vol. 300, no. 9, p. D05109, 1998.

[24] R. G. Allen, M. Tasumi, and R. Trezza, "Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

Model," Journal of irrigation and drainage engineering, vol. 133, no. 4, pp. 380-394, 2007.

[25] A. Onnabi Milan and M. R. Neyshabouri, "Comparison of Some Empirical Estimating Methods of Reference Evapotranspiration in Tabriz Plain Using Lysimeter and Proposing a Model for its Determination from Climatic Data," Water and Soil Science, vol 28, no. 1, pp 41-54, 2018 (in Persian).

[26] J. Ma, "Comparison of several reference evapotranspiration methods for Itoshima Peninsula area, Fukuoka, Japan," Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, vol. 66, no. 1, 2006.

[27] H. Ghamarnia and M. Lorestani, "Evaluating the efficiency of temperature empirical based methods for estimating evapotranspiration in different climate conditions (case study of Iran)," Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, vol. 66, no. 1, 2006.

[28] A. C. Cunha, L. R. A. Gabriel Filho, A. A. Tanaka, B. C. Goes, and F. F. Putti, "Influence Of The Estimated Global Solar Radiation On The Reference Evapotranspiration Obtained Through The Penman-Monteith Fao 56 Method," Agricultural Water Management, vol. 243, p. 106491, 2021.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.11, No.4, Winter 2024

Research Paper

Evaluation of SEBAL and METRIC algorithms to estimate evaporation over fresh and saline water bodies (case study: Urmia Lake, Dez reservoir, and Karkhe reservoir)

Ramin Ghahreman [1], Majid Rahimzadegan [2*]

1- Ms.c student of Water Resources Engineering and Management Department, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
2- Associate professor of Water Resources Engineering and Management Department, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

Evaporation over the surface of water bodies is regarded as one of the main sources of water loss. Various models based on satellite imagery have been introduced to estimate evaporation. The accurate realization of the performance of each model to estimate evaporation over water bodies is one of the critical issues in the water balance and water resource management. Hence, the purpose of this study was the implementation and evaluation of the initial version of Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and Mapping Evapotranspiration at High Resolution and with Internalized Calibration (METRIC) Algorithms over Urmia Lake, Karkhe reservoir, and Dez reservoir. It was performed using 25 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) images in 2020. Regarding the restriction on accessibility to the required meteorological data to run the relevant models in Iran, the consequences of using various synoptic station data, which were located in the vicinity of the lake, were investigated. The obtained results of the monthly mean of the evaporation showed that METRIC model over saline water has good efficiency against the measurement value with coefficient of determination (R^2)=0.98 and Root Mean Square Error (RMSE) of 0.13(mm), and over the freshwater with R^2=0.89 and RMSE=0.7(mm). The difference was that the METRIC model error on saline water is higher than freshwater. Nevertheless, due to the inaccessibility to the daily solar net radiation, the obtained results show that the initial version of SEBAL model over saline and fresh water has resulted in more errors and unacceptable results in comparison to the observed values. The analysis of the results showed that as Dez and Karkhe reservoirs have the same climate conditions and they are quite near each other, the obtained results of the evaporation value in both of them were close to each other.

Key words: *Energy balance, Urmia lake, reference evapotranspiration, Evaporation, Remote sensing*.

Correspondence Address *: No. 1346, ValiAsr Street, Mirdamad cross, Civil Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.*
Tel *: +98 21 88779474*
Email*: rahimzadegan@kntu.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.61186/jgit.11.4.1]