

## Uncertainties in Estimation of Basin-Scale Actual Evapotranspiration Using SEBAL

AMIR HOSSEIN OWLIA<sup>1</sup>, SOMAYEH SIMA<sup>\*1</sup>

1. Department of Water Sources Management and Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering,  
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(Received: Jan. 9, 2021- Revised: Feb. 14, 2021- Accepted: Apr. 5, 2021)

### ABSTRACT

Estimation of actual evapotranspiration ( $E_t$ ) at the basin-scale using SEBAL, as one of the commonly used satellite-based models, are affected by uncertainties associated with the selection of the anchor pixels, satellite sensors, and the spatial extent of the input satellite images. This study was conducted to investigate the impacts of aforementioned uncertainties on the actual evapotranspiration estimates in Urmia Plain (in the northwest of Iran) using MODIS and Landsat8 satellite imaginaries and the PySEBAL and MPySEBAL (Modified version) models. Validation results using lysimetric data during 2010-2011, showed that MPySEBAL (with cold pixels on well-irrigated vegetation) has less RMSE up to 70% as compared to PySEBAL model. Moreover, in the heterogeneous areas such as Urmia Plain, MODIS data with less spatial resolution leads to a 33 percent overestimation of daily  $E_t$  compared to Landsat 8 results. Furthermore, introducing a satellite image at its original extent rather than cropping the study area will result an uncertainty in the daily  $E_t$  estimates up to 8%. Comparing the relative impacts of the three sources of uncertainties indicated that the selection of the anchor pixels based on the surface temperature and NDVI thresholds, the spatial resolution of the sensors, and the spatial extent of the input images introduce the largest uncertainties respectively. Findings of this study can be used to enhance the accuracy of satellite-based  $E_t$  models and estimation of the irrigation water consumption from field to basin scales.

**Keywords:** Agricultural Water Consumption, Surface Energy Balance, PySEBAL, Remote Sensing.

## عدم قطعیت‌های برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس حوضه آبریز با استفاده از مدل SEBAL

امیرحسین اولیاء<sup>۱</sup>، سمیه سیما<sup>۱\*</sup>

۱. گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۶ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶)

### چکیده

برآورد تبخیر-تعرق واقعی در سطح حوضه آبریز با استفاده از الگوریتم بیلان انرژی سطح (SEBAL) به عنوان یکی از پرکاربردترین مدل‌های مبتنی بر داده‌های سنجش از دور، متأثر از عدم قطعیت‌های ناشی از نحوه انتخاب پیکسل‌های حدی، نوع سنجنده و محدوده مکانی مورد بررسی است. در تحقیق پیش رو، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و Landsat 8، همچنین استفاده از مدل‌های بیلان انرژی سطح PySEBAL و MPySEBAL (نسخه اصلاح‌شده آن) اقدام به بررسی اثر این عدم قطعیت‌ها بر روی نتایج برآورد تبخیر-تعرق واقعی برای محدوده دشت ارومیه شده است. نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها با داده‌های لایسیمیتری در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۰-۲۰۱۱، حاکی از آن است که مدل MPySEBAL نسبت به مدل PySEBAL تا ۷۰ درصد خطای (RMSE) کمتری در برآورد تبخیر-تعرق روزانه دارد. همچنین در مناطق ناهمگن و متنوع از نوع کاربری اراضی نظیر دشت ارومیه، استفاده از تصاویر سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی کمتر در مقابل تصاویر Landsat 8، متوسط تبخیر-تعرق واقعی روزانه را تا حدود ۳۳ درصد بیشتر برآورد می‌کند. همچنین محدود نکردن تصویر به ناحیه مورد بررسی عدم قطعیتی تا ۸ درصد ایجاد می‌کند. در مقایسه نسبی عدم قطعیت‌های ناشی از تنظیمات مدل SEBAL، به ترتیب انتخاب خودکار پیکسل‌های حدی بر اساس تعیین حدود آستانه برای دمای سطح و NDVI، قدرت تفکیک مکانی سنجنده و انتخاب محدوده مکانی ورودی به مدل بیشترین اثرگذاری را در نتایج دارند. نتایج این پژوهش می‌تواند در بهبود دقت مدل‌های تبخیر تعرق و برآورد مصارف آب بخش کشاورزی در مقیاس‌های مزرعه تا سطح حوضه مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: مصارف آب کشاورزی، بیلان انرژی سطح، PySEBAL، سنجش از دور.

### مقدمه

تبخیر-تعرق یکی از اجزای اصلی چرخه آب و یک متغیر رابط مهم در تعیین تبادلات انرژی، آب و کربن در سطح زمین و اتمسفر به شمار می‌رود (Ning et al., 2018). از آنجا که هدررفت آب به واسطه تبخیر-تعرق از زمین‌های کشاورزی یک عامل مهم در ملاحظات تامین آب بخش کشاورزی و حسابداری آب حوضه می‌باشد، تخمین دقیق تبخیر-تعرق واقعی ( $ET_a^1$ )، می‌تواند کمک شایانی به برآورد مصارف آب کشاورزی و برنامه‌ریزی منابع آب در سطح حوضه نماید (Mahmoud & Gan, 2019).

برآورد تبخیر-تعرق، به ویژه در مقیاس‌های بزرگ مکانی دشوار بوده (Zhang et al., 2016) و به دلیل پیچیدگی چرخه زمین-گیاه-اتمسفر، اندازه‌گیری مستقیم تبخیر-تعرق واقعی زمان‌بر و گران است. روش‌های مورد استفاده برای برآورد تبخیر-تعرق به طور کلی شامل روش‌های اندازه‌گیری مستقیم با استفاده از لایسیمتر یا برج ادی کواریانس (EC) است (که اجزای بیلان

انرژی سطح را اندازه‌گیری می‌کند) و روش‌های غیر مستقیم شامل مدل‌های تجربی مبتنی بر داده‌های هواشناسی و یا شاخص پوشش گیاهی، مدل بیلان انرژی سطح و الگوریتم‌های مبتنی بر داده‌های سنجش از دور می‌شوند (Ning et al., 2018).

روش‌های اندازه‌گیری مستقیم صرفاً برای یک محدوده کوچک قابل استفاده هستند. از طرفی هیچ روش اندازه‌گیری زمینی مستقیم، کم هزینه و قابل اعتمادی برای برآورد تبخیر-تعرق وجود ندارد (Karimi & Bastiaanssen, 2015). در شرایط کمبود داده‌های زمینی، سنجش از دور به روشی مقرون به صرفه و با نیازمندی داده‌های زمینی کم برای تخمین تبخیر-تعرق در مقیاس‌های محلی تا جهانی به شمار می‌رود (Zhang et al., 2016). این الگوریتم‌ها بر اساس روابط تجربی و یا معادلات بیلان انرژی سطح که بخشی از داده‌های آن از سنجش از دور بدست می‌آید توسعه داده شده‌اند. عدم اعتبارسنجی نقشه‌های تبخیر-تعرق بدست آمده از الگوریتم‌های مبتنی بر داده‌های سنجش از

می‌شود که تبخیر تعرق حداکثر است. پیکسل گرم نیز در یک منطقه با پوشش گیاهی کم با تبخیر-تعرق تقریباً صفر فرض می‌شود (Allen et al., 2002). از جمله عواملی که اثر قابل توجهی در نتایج تبخیر-تعرق برآورد شده از مدل SEBAL دارند عبارتند از: (۱) عدم قطعیت‌های مربوط به داده‌های پایه مدل مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای، (۲) موقعیت پیکسل‌های حدی (۳) قدرت تفکیک مکانی سنجنده مورد استفاده و (۴) وسعت محدوده مورد مطالعه (Allen et al., 2013; Tang et al., 2013).

در دهه اخیر استفاده از الگوریتم‌های بیلان انرژی سطح در برآورد تبخیر تعرق در بسیاری از حوضه‌های کشور مورد توجه قرار گرفت است. از جمله در حوضه آبریز دریاچه ارومیه که در دو دهه گذشته به علت افزایش مصرف آب به ویژه در بخش کشاورزی با کاهش قابل توجه تراز آب دریاچه ارومیه مواجه شده است (Taheri et al., 2019). مطالعات گوناگونی در خصوص برآورد تبخیر-تعرق از سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از سنجنده‌های مختلف و در مقیاس‌های زمانی و مکانی متفاوت صورت گرفته است (جدول ۱). اعتبارسنجی و تحلیل عدم قطعیت تنها در تعداد محدودی از این مطالعات انجام شده است. این در حالی است که در مطالعات صورت گرفته با الگوریتم‌های بیلان انرژی سطح در زمان واحد به علت اختلاف در سنجنده و تنظیمات مدل، تا ۱۴۳ میلیمتر در سال برای کل حوضه (سال ۲۰۱۴) و تا ۲۹۲ میلیمتر در سال برای اراضی کشاورزی (سال ۲۰۱۰) اختلاف در برآورد تبخیر-تعرق وجود دارد (Houshmandi, 2020; Javadian et al., 2019; Karimi et al., 2019; Taheri et al., 2019). این موضوع ضرورت تحلیل عدم قطعیت ناشی از این عوامل را نشان می‌دهد.

دور در بیشتر مطالعات، یکی از ایراداتی است که منجر به محدودیت استفاده از نقشه‌های خروجی تبخیر-تعرق این مدل‌ها در کاربردهای عملیاتی شده است. با این وجود نتایج تحقیقات حاکی از نتایج قابل اعتماد این الگوریتم‌هاست؛ به طوری که بررسی انجام شده روی نزدیک به ۵۰ مطالعه در خصوص برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از روش‌های سنجش از دور نشان داده است که دقت کلی برآورد در مقایسه با اندازه‌گیری‌های زمینی حدود ۹۵ درصد می‌باشد (Karimi & Bastiaanssen, 2015).

مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق مبتنی بر داده‌های سنجش از دور به دو دسته تک منبعی و دو منبعی تقسیم می‌شوند. مدل‌های تک منبعی، مجموعه‌ی خاک و گیاه را به عنوان یک منبع واحد در نظر می‌گیرند (Nishida et al., 2003). حال آن که مدل‌های دو منبعی ضمن تفکیک خاک و گیاه در کلیه فرآیند مدل سازی، از چندین مقاومت مجزا برای خاک و گیاه استفاده می‌کنند (Huntingford et al., 2000). از جمله مدل‌های تک منبعی می‌توان به مدل‌های <sup>۱</sup>SEBAL، <sup>۲</sup>METRIC، <sup>۳</sup>SEBS و از جمله مدل‌های دو منبعی به مدل‌های <sup>۴</sup>TSEB، <sup>۵</sup>SESTB، ETLook اشاره کرد (Zhang et al., 2016).

مدل SEBAL از پرکاربردترین مدل‌های تک منبعی است که بر اساس فرض رابطه خطی میان اختلاف دمای هوای نزدیک سطح و دمای هوا توسعه یافته است و با تخمین شار دمای محسوس سطح و شار دمای نهان بر اساس دو پیکسل حدی (پیکسل سرد و پیکسل گرم) در یک فرآیند سعی و خطا، شار تبخیر-تعرق را به عنوان باقیمانده معادله بیلان انرژی برآورد می‌کند (Bastiaanssen et al., 1998). پیشنهاد شده است که محل قرارگیری پیکسل سرد پهنه آبی و یا یک منطقه با پوشش گیاهی متراکم و خوب آبیاری شده باشد و در این پیکسل فرض

جدول ۱ - خلاصه مطالعات انجام شده در خصوص برآورد تبخیر-تعرق در حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر داده‌های سنجش از دور

مرجع	مدل مورد استفاده	قدرت تفکیک مکانی (متر)	گام زمانی	منطقه مورد مطالعه	دوره زمانی مطالعه	سنجنده	انجام اعتبارسنجی
Bagheri et al., 2017	SEBAL	۱۰۰۰	ماهانه	کل حوضه و دریاچه ارومیه	۲۰۰۲-۲۰۰۸	MODIS	بله
JICA, 2019	METRIC	۱۰۰۰	ماهانه	کل حوضه	۲۰۰۰-۲۰۱۵	MODIS	خیر
Tasumi, 2019	METRIC	۱۰۰	ماهانه	غرب حوضه	۲۰۱۴-۲۰۱۶	Landsat 8	خیر
Taheri et al., 2019	SEBAL	۱۰۰۰	سالانه	هفت زیرحوضه و مناطق کشاورزی	۱۹۹۵، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴	& AVHRR MODIS	خیر
Karimi et al., 2019	SEBAL	۳۰	سالانه	کل حوضه و دریاچه ارومیه	۲۰۱۳-۲۰۱۵	Landsat 8	خیر
Javadian et al., 2019	METRIC	۱۰۰۰	ماهانه	کل حوضه	۲۰۱۰ و ۲۰۱۴	MODIS	بله
Houshmandi, 2020	SEBAL	۲۵۰	ماهانه	کل حوضه و اراضی کشاورزی	۲۰۰۹-۲۰۱۹	MODIS	بله

3 Surface Energy Balance System

4 Two Source Energy Budget

5 Simplified Two-Source Energy Balance

1 Surface Energy Balance Algorithm for Land

2 Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration

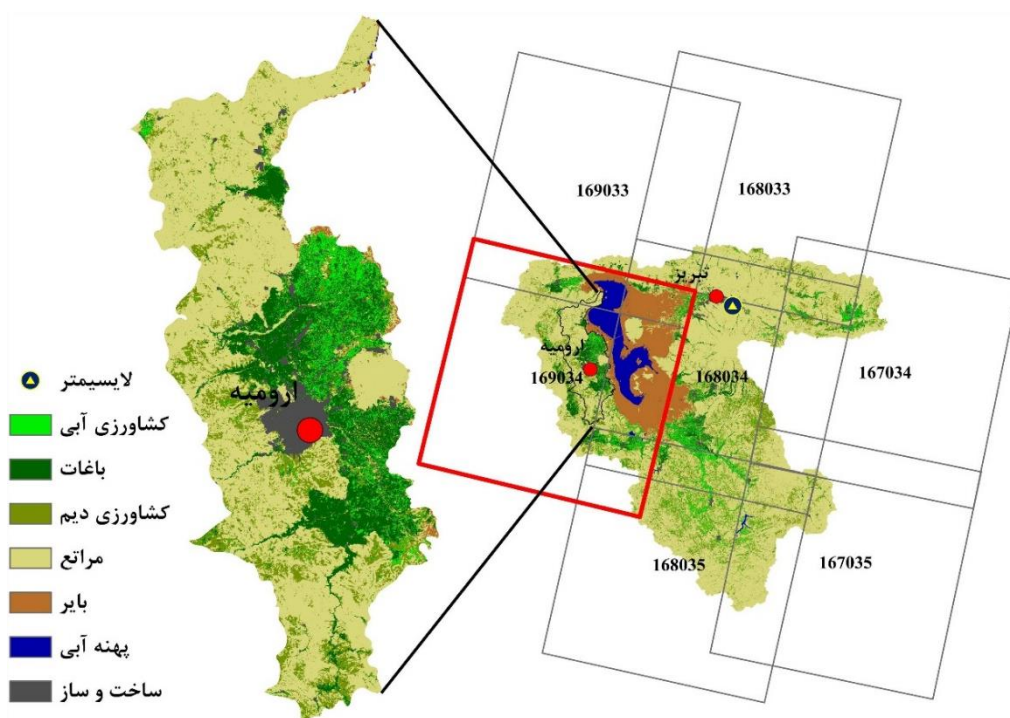
۵۲ هزار کیلومتر مربع، یک حوضه بسته است که کاربری‌های مرتع طبیعی، کشاورزی دیم و باغات به ترتیب دارای مساحت ۳۱۰۰۰، ۸۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلومتر مربع می‌باشند. کشاورزی دیم و آبی جمعا ۳۱ درصد از تبخیر-تعرق کل حوضه را شامل می‌شوند که در این بین، سهم کشاورزی دیم و آبی به ترتیب برابر با ۴۲٪ و ۵۸٪ می‌باشد. نیاز سالانه آب برای باغات و زراعت آبی در حوضه در سال ۱۹۸۷، در حدود ۲/۵ میلیارد متر مکعب در سال بوده که تا سال ۲۰۰۷، به حدود ۵/۸ میلیارد متر مکعب رسیده است و دشت ارومیه در غرب این حوضه با مساحت باغی، زراعت دیم و زراعت آبی به ترتیب در حدود ۴۸۵، ۳۶۸ و ۱۶۸ کیلومتر مربع از نقاط پر مصرف آب در سطح حوضه به شمار می‌رود (JICA, 2016; Karimi et al., 2019).

با توجه به ضرورت ارزیابی عدم قطعیت مدل SEBAL، اهداف اصلی این پژوهش عبارتند از: (۱) بررسی عدم قطعیت ناشی از انتخاب موقعیت پیکسل سرد (روی آب و یا زمین کشاورزی خوب آبیاری شده) و انتخاب پیکسل گرم (زمین با پوشش گیاهی تنک یا بایر)، (۲) اثر قدرت تفکیک مکانی (اندازه پیکسل) دو سنجنده (MODIS و Landsat 8) بر نتایج برآورد تبخیر-تعرق در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و (۳) بررسی اثر وسعت محدوده مکانی مورد بررسی (کل حوضه و یا زیرحوضه مورد نظر).

## روش تحقیق

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز ارومیه واقع در شمال غرب ایران با مساحت در حدود



شکل ۱- نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز دریاچه ارومیه و دشت ارومیه (RIWEM, 2018)، به همراه موقعیت قرارگیری تصاویر Landsat 8، شهرها، ایستگاه لایسیمتر و ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی مهم

اصلاحاتی در مدل pySEBAL 3.4.4 توسعه داده شده و به منظور ارزیابی عدم قطعیت‌های مدل در شرایط مختلف به کار رفته است. مدل pySEBAL 3.4.4 در محیط پایتون توسعه داده شده است و از الگوریتم SEBAL3.0 استفاده می‌کند که در این الگوریتم، انتخاب پیکسل‌های حدی برای منطقه بصورت خودکار انجام می‌شود (Hessels et al., 2017). کد مدل از پایگاه داده GitHub به آدرس "https://github.com/wateraccounting/SEBAL" قابل دریافت است. این انتخاب خودکار، در صورت نداشتن شناخت

### بازه زمانی

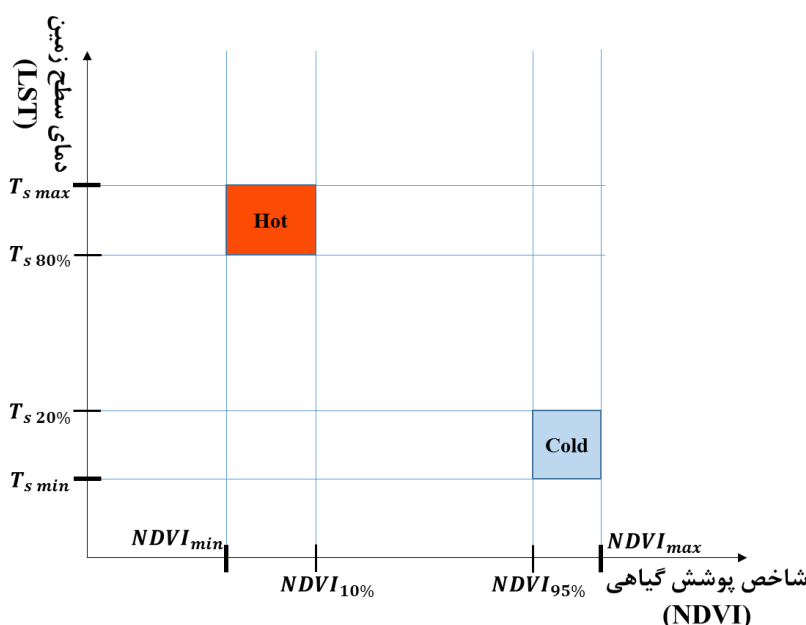
بازه زمانی برآورد تبخیر-تعرق واقعی در سطح حوضه و همچنین انجام اعتبارسنجی و بررسی عدم قطعیت‌های مربوط به مدل، از ۲۰ آوریل ۲۰۱۰ (۳۱ فروردین ۱۳۸۹) تا ۳۱ جولای ۲۰۱۱ (۹ مرداد ۱۳۹۰) و همچنین روز ۱۸ ژوئن ۲۰۱۴ (۲۸ خرداد ۱۳۹۳) بوده است.

### مدل مورد استفاده

در این مطالعه مدل MPySEBAL بر مبنای سفارشی سازی و اعمال

در مدل MPySEBAL به منظور انتخاب اتوماتیک پیکسل‌های حدی از الگوریتم پیشنهادی (Allen et al., 2013) استفاده شده است. در این الگوریتم انتخاب پیکسل‌های سرد با اعمال حد آستانه از میان نواحی با پوشش گیاهی متراکم که دمای پایین تری دارند انتخاب می‌شود. به همین منظور پیکسل‌هایی که در محدوده ۵٪ بالای شاخص تراکم پوشش گیاهی<sup>۱</sup> و ۲۰٪ سردترین پیکسل‌های منطقه (بر اساس دمای سطح زمین<sup>۲</sup> اصلاح شده بر اساس شیب و همچنین ارتفاع) واقع شوند به عنوان پیکسل سرد انتخاب می‌شوند. برای پیکسل‌های گرم نیز پیکسل‌های دارای ۱۰٪ کمترین پوشش گیاهی و ۲۰٪ بالاترین دمای سطح زمین اصلاح شده در نظر گرفته می‌شوند (شکل ۲).

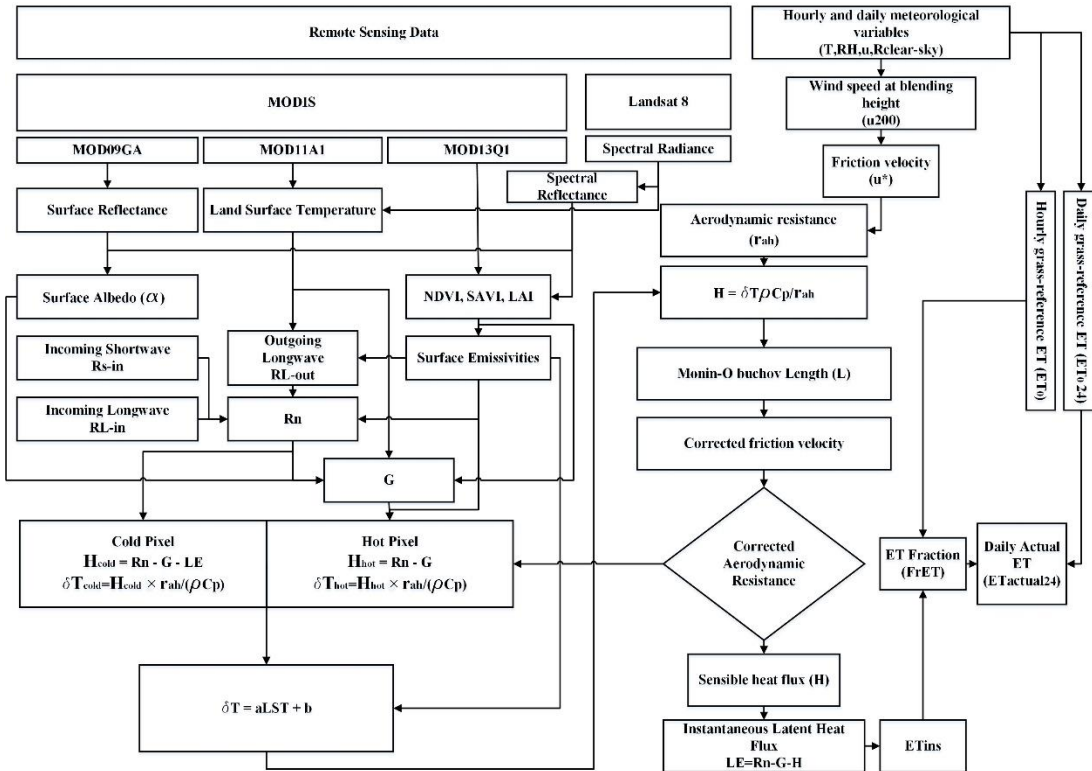
کافی نسبت به منطقه، به سبب تراکم و ناهمگنی پوشش کاربری اراضی در این حوضه و همچنین تغییر در دمای متوسط برای مجموعه پیکسل‌های حدی، می‌تواند سبب ایجاد خطای قابل توجه در برآورد مقادیر تبخیر-تعرق گردد. اهم بهبودهای اعمال شده در مدل pySEBAL عبارتند از: ۱) بهبود در انتخاب خودکار پیکسل‌های حدی سرد و گرم، ۲) امکان اعمال محدوده خاص در مجاورت ایستگاه‌های هواشناسی برای انتخاب پیکسل‌های حدی، ۳) امکان انتخاب پیکسل سرد بر روی پهنه آبی و یا مزرعه با آبیاری خوب و بدون تنش و یا بصورت ترکیبی، ۴) امکان انتخاب پیکسل گرم بر روی مناطق بایر و یا مناطق با پوشش گیاهی فقیر، ۵) امکان تغییر حد آستانه‌های شاخص پوشش گیاهی برای انتخاب پیکسل‌های حدی



شکل ۲- تعیین پیکسل‌های دارای پتانسیل برای پیکسل‌های حدی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی (Allen et al., 2013)

حوضه در برآورد مقدار تبخیر-تعرق کل حوضه تاثیر گذار باشد. اما در مدل MPySEBAL این قابلیت اضافه شده است که محاسبات را در محدوده مکانی مدنظر، برای مثال حوضه یا یک محدوده کوچک مانند دشت محدود کرد تا علاوه بر کاهش حجم محاسبات، از بروز خطاهای ناشی از لحاظ کردن پیکسل‌های حدی در خارج از حوضه و یا منطقه‌ی مورد نظر به حداقل برسد. در ادامه، فلوجارت کلی انجام محاسبات توسط مدل MPySEBAL ارائه شده است (شکل ۳).

از دیگر بهبودهای مدل MPySEBAL، می‌توان به اعمال شرایطی برای اجرای مدل و انتخاب پیکسل‌های حدی در محدوده مکانی بخصوص اشاره کرد. مدل PySEBAL برای محدوده‌ی نقشه‌ی رقومی ارتفاعی معرفی شده‌ی اولیه که تصویری مستطیلی شکل است، اجرا می‌شود. این موضوع سبب می‌شود در هنگام انجام محاسبات مربوط به مدل، نقاط خارجی حوضه و داخلی تصویر رقومی ارتفاعی تاثیر گذار باشد. همین امر سبب می‌شود در فصول و روزهای گوناگون سال، پیکسل‌های حدی خارج از



شکل ۳- فلوجارت کلی انجام محاسبات بر آورد تبخیر- تعرق واقعی روزانه در مدل MPySEBAL

که ۳۵ روز آن دارای تصویر مناسب و با پوشش ابر کم بر روی منطقه‌ی لایسیمتر بوده است) استفاده شد. برای بررسی اثر اندازه پیکسل در انجام محاسبات، مقایسه نتایج اجرای مدل با یک تصویر Landsat 8 با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر (مسیر شماره ۱۶۹، سطر ۳۴) و محصولات پایه سنجنده MODIS با وضوح ۲۵۰ متر در تاریخ ۱۸ ژوئن ۲۰۱۴ صورت گرفت و با توجه به نقشه‌ی تفکیک کاربری اراضی، مقدار و حجم آبی مقدار تبخیر- تعرق برای روز مورد نظر در دشت ارومیه محاسبه شده است.

#### داده‌های مورد استفاده

داده‌های ورودی مورد استفاده به منظور اجرای مدل MPySEBAL، شامل داده‌های ماهواره‌ای (جدول ۲) و داده‌های زمینی ایستگاه هواشناسی ارومیه (دمای سطح زمین، رطوبت نسبی، سرعت باد در ارتفاع دو متر و تشعشع ورودی خورشید در گام‌های زمانی لحظه‌ای و روزانه) می‌باشد. همچنین برای اعتبارسنجی خروجی‌های مدل در حالات مختلف، از داده‌های لایسیمتر مزرعه مطالعاتی دانشگاه تبریز که مربوط به دو سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ (در مجموع برابر با مقادیر تبخیر- تعرق ۳۹ روز

جدول ۲- داده‌های ماهواره‌ای ورودی به همراه مشخصات آن برای اجرای مدل MPySEBAL

تصاویر و یا محصولات مورد نیاز	نام سنجنده	نام محصول	قدرت تفکیک مکانی	قدرت تفکیک زمانی
نقشه رقومی ارتفاعی (DEM)	SRTM	SRTM 1 Arc-Second Global	۳۰ متر	-
بازتاب سطحی (Albedo)	MODIS	MOD09GA	۵۰۰ متر	روزانه
دمای سطح زمین (LST)		MOD11A1	۱۰۰۰ متر	روزانه
شاخص پوشش گیاهی (NDVI)		MOD13Q1	۲۵۰ متر	۱۶ روز
باند های ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۱۰ و ۱۱	Landsat 8	OLI/TIRS C1 level 1	۳۰ متر	۱۵ روز

از مدل با تنظیمات مختلف در مقایسه با داده‌های زمینی لایسیمتر، از شاخص‌های آماری میانگین خطا<sup>۱</sup> (MBE)، میانگین

#### ارزیابی مدل توسعه یافته

برای ارزیابی و مقایسه‌ی مقادیر تبخیر- تعرق واقعی بدست آمده

امر دمای کمتر سطوح آبی نسبت به سطوح دیگر است (شکل ۴-الف). دلیل دیگر این موضوع عدم حذف پهنه آبی در مراحل انتخاب پیکسل سرد بر روی پوشش گیاهی در متن PySEBAL می‌باشد که این موضوع در مدل MPySEBAL اصلاح شده است. در مدل MPySEBAL با اعمال شرایط برای انتخاب پیکسل‌های سرد روی پوشش گیاهی (شکل ۴-ب) و محدود کردن انتخاب پیکسل‌های حدی به مرز حوضه، می‌توان مشاهده کرد که این پیکسل‌ها در سطح حوضه در نواحی با پوشش گیاهی خوب و آبیاری مناسب پراکنده شده و در محدوده‌ی شهر ارومیه و مجاورت ایستگاه ارومیه به تعداد دیده می‌شود.

همچنین اعمال شرط پوشش گیاهی در انتخاب پیکسل گرم در مدل MPySEBAL منجر می‌شود که مناطق بایر و بدون پوشش گیاهی که در اطراف دریاچه به واسطه خشک شدن و پسروری آب دریاچه ایجاد شده است، شامل این نواحی نشده و پیکسل‌های گرم در اراضی کشاورزی با پوشش گیاهی کم و آبیاری کم انتخاب شوند. این مسأله از آنجا حایز اهمیت است که اگر انتخاب پیکسل گرم روی مناطق بیابانی غیر زراعی صورت گیرد، ممکن است فرض برقراری رابطه خطی بین اختلاف دمای هوای نزدیک سطح و دمای سطح (فرض اصلی مدل SEBAL) برقرار نباشد (Allen et al., 2002).

خطای مطلق<sup>۱</sup> (MAE)، خطای جذر میانگین مربعات<sup>۲</sup> (RMSE) و ضریب تعیین<sup>۳</sup> ( $R^2$ ) استفاده شده است (روابط ۱ تا ۴).

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{f,i} - x_{o,i}) \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_{f,i} - x_{o,i}| \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$RMSE = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{f,i} - x_{o,i})^2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

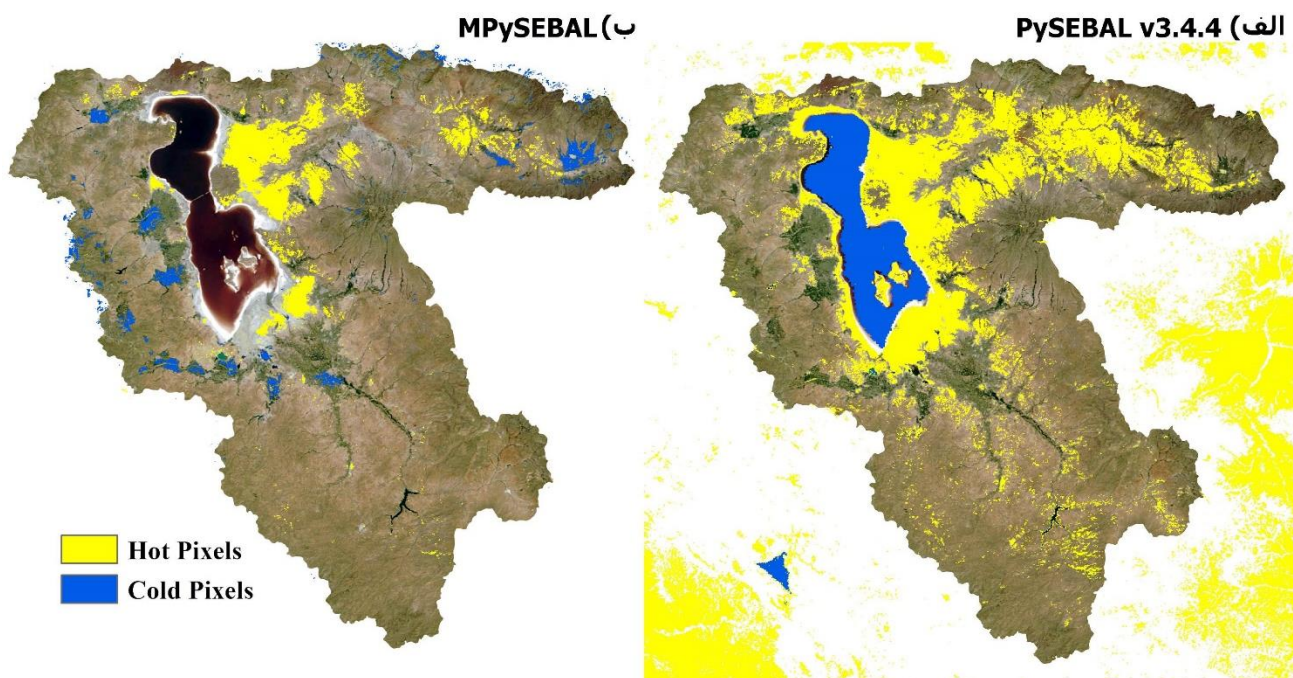
$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در این روابط  $X_{f,i}$  و  $X_{o,i}$  به ترتیب  $i$  امین داده‌ی محاسبه شده توسط مدل و مشاهداتی (لایسیمتر)، جمع RSS مربعات باقیمانده و TSS مجموع مربعات می‌باشد.

## نتایج و بحث

### بررسی اثر موقعیت پیکسل‌های حدی سرد و گرم

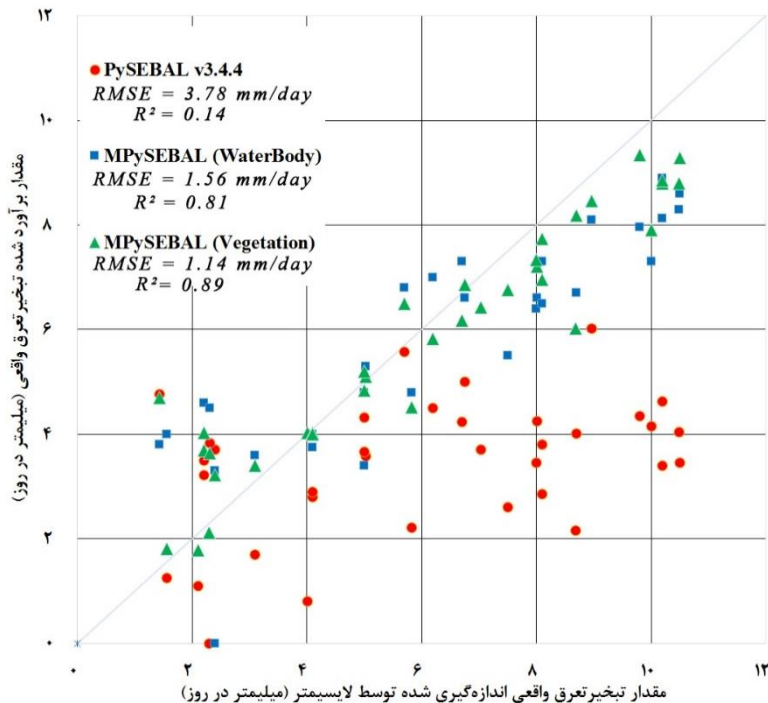
موقعیت پیکسل‌های بالقوه به عنوان پیکسل سرد برای مدل PySEBAL و MPySEBAL با انتخاب خودکار با استفاده از تصاویر MODIS در شکل (۴) ارایه شده است. در مدل PySEBAL، به دلیل اینکه انتخاب موقعیت پیکسل سرد صرفاً بر مبنای تعیین حد آستانه بر روی دمای سطح می‌باشد، این پیکسل‌ها روی پهنه‌های آبی دریاچه ارومیه، دریاچه دوکان (واقع در کشور عراق) و مخزن سد حسنلو قرار گرفته است که علت این



شکل ۴- موقعیت نقاط شناسایی شده به عنوان نقاط بالقوه برای انتخاب پیکسل‌های حدی سرد (رنگ آبی) و گرم (رنگ زرد) در حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از سنجنده MODIS. الف) مدل PySEBAL (انتخاب پیکسل سرد روی پهنه آبی و پیکسل گرم بر روی زمین بایر)، ب) مدل MPySEBAL (انتخاب پیکسل سرد روی پوشش گیاهی خوب با آبیاری مناسب و پیکسل گرم روی اراضی کشاورزی با پوشش گیاهی کم و آبیاری کم)

پوشش گیاهی چمن با آبیاری خوب) را کم برآورد می‌کند (MAE= ۳/۱۶mm و MBE=-۲/۶۶ mm). این درحالی است که مدل MPySEBAL (در هر دو حالت انتخاب پیکسل سرد بر روی گیاه و یا پهنه آبی و قرارگیری پیکسل گرم بر روی نواحی با پوشش گیاهی کم با آبیاری کم) در مقایسه با مدل PySEBAL بهبود قابل ملاحظه‌ای در برآورد مقادیر تبخیر-تعرق به ویژه در مقادیر بالای آن داشته است. از طرفی انتخاب پیکسل سرد بر روی پوشش گیاهی خوب آبیاری شده در مقایسه با پهنه آبی، مقادیر شاخص‌های خطایی کمتری را نشان می‌دهد و از این رو مناسب‌تر است.

بعد از اعمال تغییرات گفته شده در انتخاب پیکسل‌های حدی، برای بررسی عملکرد مدل MPySEBAL در مقایسه با مقادیر لایسیمتر، به بررسی معیارهای عملکردی پرداخته و همچنین نمودار پراکندگی یک به یک اجرای مدل در سه حالت (۱) اجرای مدل PySEBAL، (۲) اجرای مدل MPySEBAL با نظر گرفتن پیکسل سرد بر روی پهنه‌ی آبی و (۳) اجرای مدل MPySEBAL با انتخاب خودکار پیکسل سرد بر روی پوشش گیاهی خوب با آبیاری مناسب، ارائه شده است (شکل ۵). همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، در مقایسه با لایسیمتر مدل PySEBAL مقادیر بالای تبخیر-تعرق (مر بوز به



شکل ۵- نمودار پراکندگی مقایسه مقادیر بدست آمده توسط مدل‌های pySEBAL و MPySEBAL با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS با مقادیر مرجع لایسیمتر در سال‌های ۲۰۱۰ - ۲۰۱۱

پیکسل‌های حدی و در نتیجه مقادیر تبخیر-تعرق منطقه را بتوان ارزیابی کرد. همچنین در شکل (۶-الف و ۶-ب) جانمایی پیکسل‌های حدی برای اجرای مدل با استفاده از تصاویر دو سنجنده MODIS و Landsat 8 ارائه شده است.

در شکل (۶-الف) پیکسل‌های سرد در دشت ارومیه قرار نگرفته‌اند، در حالی که در اجرای مدل با استفاده از تصویر سنجنده‌ی Landsat 8 (شکل ۶-ب) تعدادی از این پیکسل‌ها در باغات در دشت ارومیه نیز قرار دارند که این موضوع بیانگر این است که با استفاده از تصویر با قدرت تفکیک مکانی بیشتر، توانایی مدل در تفکیک کاربری اراضی در این دشت بیشتر شده و مدل می‌تواند

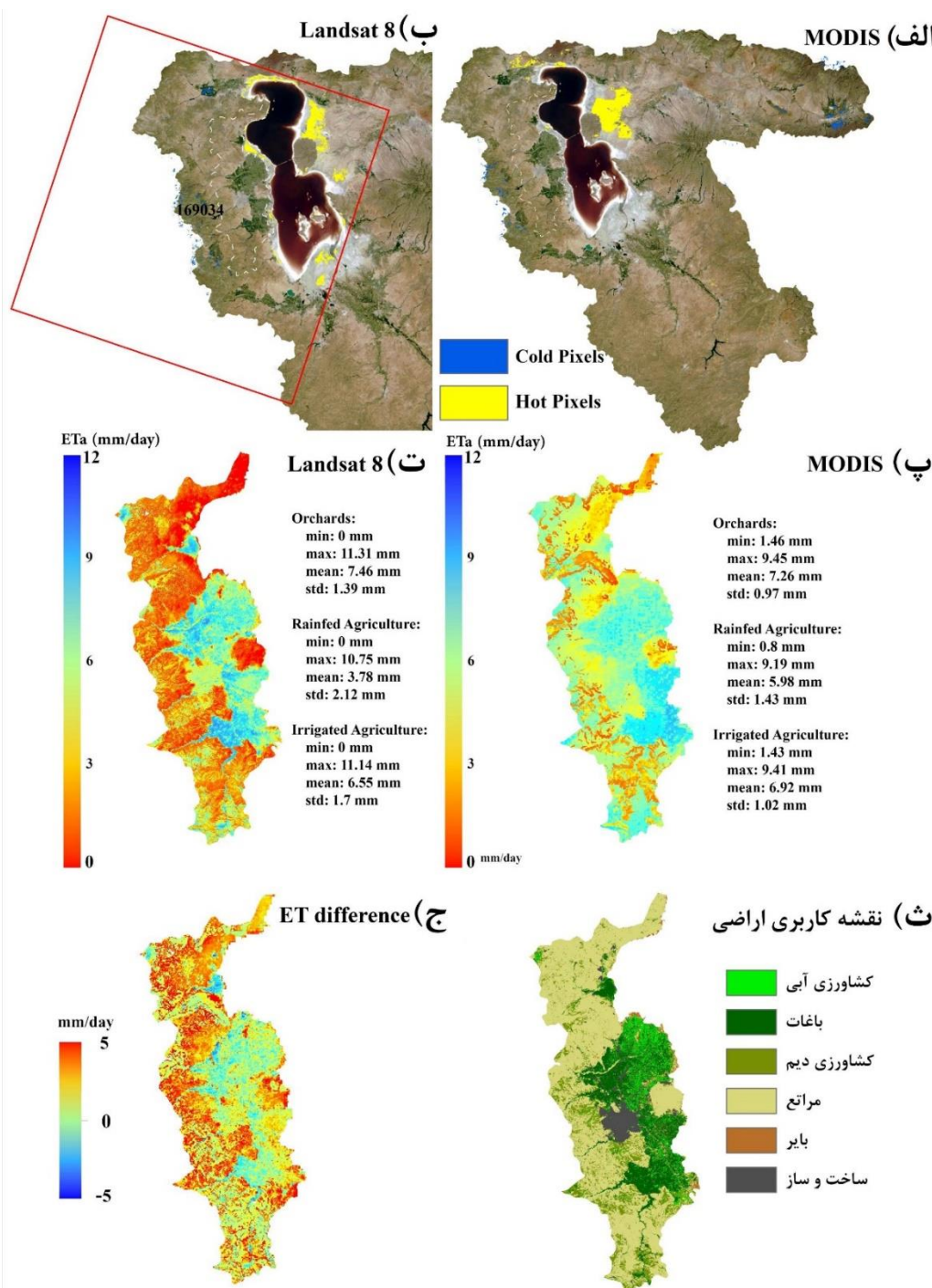
### تأثیر قدرت تفکیک مکانی سنجنده مورد استفاده در برآورد تبخیر-تعرق واقعی

برای ارزیابی اثر قدرت تفکیک مکانی سنجنده‌های MODIS و Landsat 8 بر مدل MPySEBAL، تصاویر این دو سنجنده در تاریخ ۱۸ ژوئن ۲۰۱۴ را به عنوان ورودی به مدل معرفی کرده و نتایج محاسبات ارائه شده است (شکل ۶). در نقشه‌ی کاربری اراضی تفکیک شده برای دشت ارومیه (شکل ۶-ث) مشاهده می‌شود که در این دشت، باغات، زراعت دیم و زراعت آبی به فواصل کمی از هم وجود دارند. این موضوع سبب می‌شود که اثر قدرت تفکیک مکانی سنجنده را روی تفکیک اراضی، انتخاب



۲۵۰ متر) برآورد تبخیر-تعرق واقعی ( $ET_{MODIS} - ET_{Landsat\ 8}$ ) در دشت ارومیه ارائه شده است (شکل ۶-ج).

پیکسل‌های حدی را در محل‌هایی با تراکم و متنوع از نوع کاربری اراضی تشخیص دهد. در ادامه با استفاده از این دو سنجنده، مقادیر تبخیر-تعرق واقعی روزانه (شکل ۶-پ و شکل ۶-ت) محاسبه شده و نقشه‌ی تفاضلی (بعد از بازنگاشت<sup>۱</sup> نقشه تبخیر-تعرق ۳۰ متری به



شکل ۶ - نقشه‌ی فرارگیری پیکسل‌های حدی مدل MPySEBAL برای روز ۱۸ ژوئن ۲۰۱۴ با استفاده از سنجنده‌ی الف) MODIS و ب) Landsat 8. نقشه‌ی تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده‌ی مدل با استفاده از سنجنده‌ی پ) MODIS و ت) Landsat 8. نقشه‌ی کاربری اراضی دشت ارومیه. ج) نقشه‌ی تفاضلی برآورد تبخیر-تعرق واقعی ( $ET_{MODIS} - ET_{Landsat8}$ )

مشابه است؛ به این معنی که کمترین و بیشترین مقادیر تبخیر-تعرق به ترتیب روی زمین‌های بایر شمال شرق دشت ارومیه و در

همانطور که در شکل (۶-پ و ۶-ت) مشاهده می‌شود، الگوی مکانی کلی تغییرات تبخیر-تعرق در این دشت در دو تصویر

زراعت دیم و آبی نزدیک به هم برآورد شده است. این موضوع سبب شده است تا در برآورد حجمی نیز برای اراضی دیم و باغی به ترتیب برابر ۳۶ و ۸ درصد اختلاف ایجاد شود. این موضوع نیز نمایانگر اهمیت قدرت تفکیک مکانی سنجنده در بر نتایج تبخیر-تعرق، در نواحی با تنوع بالای کاربری اراضی می‌باشد.

در خصوص اهمیت اثر قدرت تفکیک مکانی در برآورد تبخیر-تعرق الگوریتم‌های بیلان انرژی سطح، مطالعات قبلی نشان داده است که استفاده از سنجنده‌های با قدرت تفکیک مکانی کمتر از ۳۰ متر در مناطق ناهمگن به دلیل تغییر در جنس پوشش زمین (مقدار ضریب زبری)، نوع کاربری و میزان البیدوی سطح، منجر به ایجاد عدم قطعیت قابل توجه در برآورد مقادیر تبخیر-تعرق می‌شود (Ramírez-Cuesta et al., 2019). با نتایج این تحقیق نیز این امر را نشان می‌دهد دارد.

#### اثر محدوده مکانی مورد بررسی

برای بررسی اثر محدوده مکانی بر روی نتایج تبخیر-تعرق، مدل برای دو حالت (۱) معرفی کل تصویر سنجنده Landsat 8 و جداسازی دشت ارومیه پس از اجرای نهایی و (۲) روی ناحیه دشت ارومیه (انتخاب پیکسل‌های حدی در محدوده دشت) اجرا و مقایسه شد (شکل ۷).

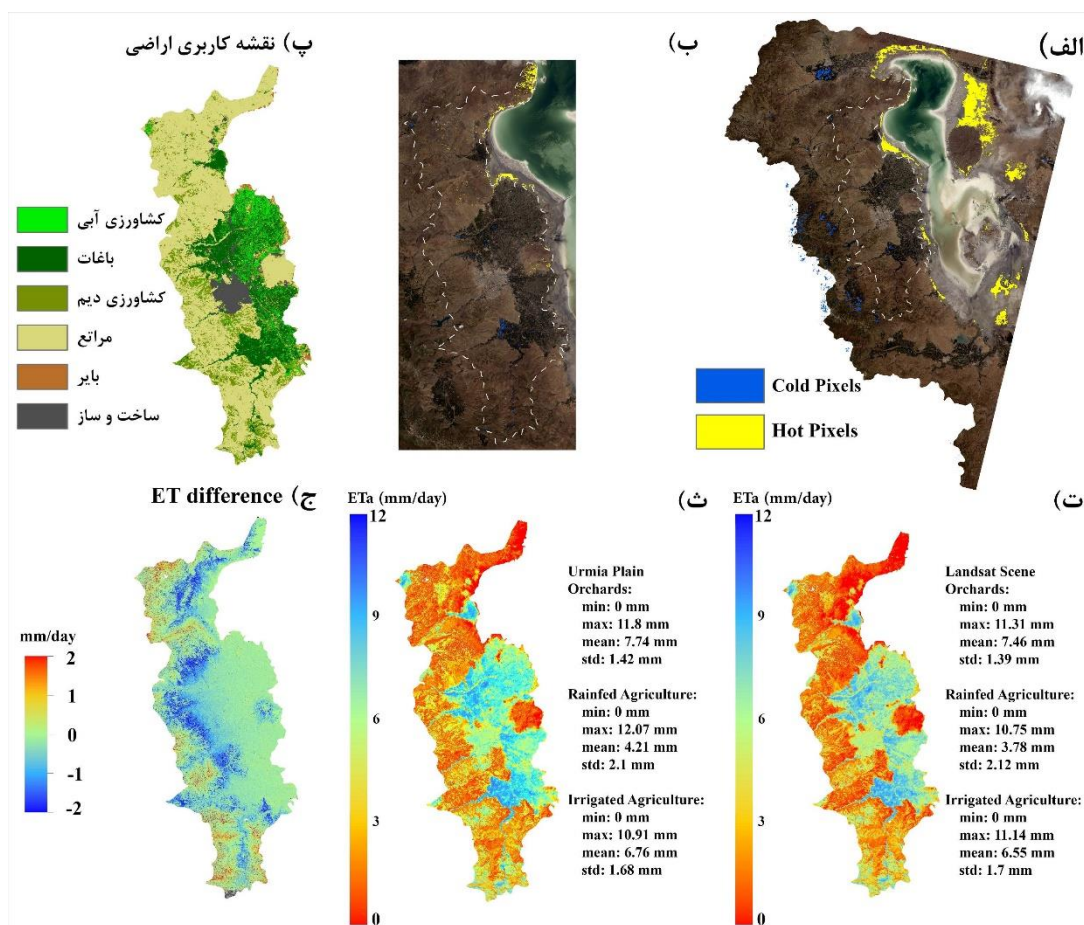
بر اساس شکل (۷) متوسط مقادیر تبخیر-تعرق واقعی در کل دشت ارومیه در تاریخ ۱۸ ژوئن ۲۰۱۴ با استفاده از اجرای مدل، برای دو حالت کل محدوده تصویر و تصویر محدود به دشت ارومیه سنجنده Landsat 8، به ترتیب برابر با ۳/۶۱ و ۳/۹۱ میلیمتر در روز می‌باشد.

بررسی نقشه تفاضلی تبخیر-تعرق (شکل ۷-ج) و انطباق آن با نقشه کاربری اراضی (شکل ۷-پ) نشان می‌دهد که در حالتی که کل تصویر Landsat 8 برای اجرای مدل به کار گرفته می‌شود، مقادیر متوسط تبخیر-تعرق واقعی روزانه برآورد شده برای اراضی دیم، آبی و باغات به ترتیب در حدود ۱۰/۲۱، ۳/۱ و ۳/۶۱ درصد کمتر از زمانی است که این مدل فقط برای محدوده دشت اجرا می‌شود.

به منظور حذف مداخله پیکسل‌های سرد و گرم در خارج از محدوده مورد بررسی، پیشنهاد می‌شود زمانی که برآورد تبخیر-تعرق برای منطقه‌ای مشخص مورد توجه قرار می‌گیرد، قبل از اجرای مدل تصویر سنجنده مورد نظر را به مرز منطقه مورد نظر محدود کرد. چرا که عدم محدود کردن تصویر به محدوده مورد نظر، سبب ایجاد عدم قطعیت تا حدود ۸ درصد برای برآورد مقادیر متوسط تبخیر-تعرق واقعی می‌شود.

محدوده باغات اطراف شهر ارومیه نشان داده شده است. انحراف معیار در اجرای مدل با استفاده از تصاویر MODIS کمتر از انحراف معیار با استفاده از تصاویر Landsat 8 می‌باشد که این موضوع بیانگر همگنی بیشتر در مقادیر تبخیر-تعرق برآورد شده با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS برای دشت ارومیه است که با توجه به قدرت تفکیک کمتر این سنجنده نسبت به Landsat 8، این موضوع نیز انتظار می‌رفت. اما مدل در برآورد الگوی تبخیر-تعرق متناسب با کاربری اراضی، با استفاده از تصاویر Landsat 8 الگوی سازگارتری را نسبت به سنجنده MODIS ارائه می‌دهد. به عنوان مثال تفاوت مقادیر تبخیر-تعرق برآورد شده بین نواحی شهری و زراعی در تصویر ۶-ت بارزتر است. همچنین محدوده‌های کشت کوچک با تبخیر-تعرق بالا در طول رودخانه‌ها در تصویر ۶-ت قابل رویت است در حالی که در شکل (۶-پ) به صورت نواحی پراکنده دیده می‌شوند.

متوسط مقادیر تبخیر-تعرق واقعی در کل دشت ارومیه در این تاریخ با استفاده از دو سنجنده MODIS و Landsat 8 به ترتیب برابر با ۵/۴۲ و ۳/۶۱ میلیمتر در روز می‌باشد که نشان می‌دهد در استفاده از سنجنده MODIS مقادیر تبخیر-تعرق تا ۳۳ درصد بیشتر برآورد می‌شود. نقشه‌ی تفاضلی برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از داده‌های دو سنجنده (شکل ۶-ج) نشان می‌دهد که برآورد مقادیر متوسط تبخیر-تعرق واقعی روزانه در مراتع و مناطق غیر کشاورزی با استفاده از تصاویر MODIS تا ۲/۵۱ میلیمتر در روز، بیشتر از متوسط تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از تصاویر Landsat 8 بوده است. همچنین اختلاف متوسط مقادیر تبخیر-تعرق بدست آمده در تصاویر MODIS و Landsat 8 برای اراضی دیم، آبی و باغی به ترتیب برابر ۳۶/۸، ۵/۴ و ۲/۷ درصد است. با استفاده از تصاویر Landsat 8، اختلاف تبخیر-تعرق واقعی بین اراضی زراعی آبی و دیم نیز بارزتر بوده است. در تاریخ مورد بررسی، به دلیل عدم آبیاری کاربری زراعت دیم (با توجه به بارش صفر در این روز و بارش تجمعی ۲،۲ میلیمتر در ماه ژوئن ۲۰۱۴ براساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک ارومیه)، انتظار می‌رود مقادیر تبخیر-تعرق برآورد شده از نواحی کشت دیم، تفاوت معنادارتری با کشت آبی داشته باشد که در برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از سنجنده MODIS، این تفاوت در حد ۰/۹۴ mm/day است در حالیکه در نقشه تبخیر-تعرق برآورد شده با لندست به ۲/۷۷ می‌رسد. با توجه به اندازه پیکسل ۲۵۰ متری نقشه تبخیر-تعرق MODIS، مدل نتوانسته است تفکیک مناسبی بین این دو نوع کاربری قایل شود و مقادیر تبخیر-تعرق



شکل ۷- نقشه‌ی فرارگیری پیکسل‌های حدی سنجنده‌ی Landsat 8 (الف) کل محدوده تصویر، (ب) محدود به دشت ارومیه. (پ) نقشه‌ی کاربری اراضی دشت ارومیه. نقشه‌ی تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده برای دشت ارومیه با استفاده از (ت) کل محدوده تصویر سنجنده، (ث) تصویر محدود شده به دشت ارومیه و (ج) نقشه‌ی تفاضلی تبخیر-تعرق واقعی ( $ET_{scene} - ET_{plain}$ )

## نتیجه‌گیری

تبخیر-تعرق واقعی روزانه را تا حدود ۳۳ درصد در محدوده دشت ارومیه بیشتر برآورد می‌کند؛ این اختلاف در کاربری دیم با حدود ۳۷ درصد به حداکثر می‌رسد. از این رو به منظور برآورد تبخیر-تعرق در مقیاس‌های مکانی کوچک (مثل مزرعه) و اراضی ناهمگن از نظر نوع کاربری، استفاده از تصاویر سنجنده با قدرت تفکیک مکانی بالاتر با توجه به امکان تفکیک بهتر اراضی پیشنهاد می‌شود. در صورتی که مطالعات برآورد مقدار تبخیر-تعرق برای مساحت‌های بزرگ (مانند حوضه) و بازه‌های زمانی بلند مدت مدنظر باشد استفاده از داده‌های سنجنده MODIS با توجه به حجم محاسباتی کمتر و برآورد کلی قابل قبول از الگوی تغییرات مکانی تبخیر-تعرق می‌تواند مدنظر قرار گیرد. همچنین با توجه به برتری داده‌های سنجنده MODIS از لحاظ قدرت تفکیک زمانی (روزانه) در مقابل سنجنده Landsat 8 (۱۶ روزه)، پیشنهاد می‌شود برآورد تبخیر-تعرق با تلفیق تصاویر این دو سنجنده به منظور بهبود همزمان قدرت تفکیک مکانی و زمانی در تحقیقات آتی مدنظر قرار گیرد.

در این تحقیق به بررسی عدم قطعیت‌های برآورد مقدار تبخیر-تعرق واقعی از سطح حوضه آبریز ناشی از نحوه انتخاب پیکسل‌های حدی، اثر قدرت تفکیک مکانی سنجنده مورد استفاده و اثر وسعت محدوده مکانی، با استفاده از مدل بیلان انرژی MPySEBAL در حوضه آبریز دریاچه ارومیه پرداخته شد. مهم نتایج بدست آمده حاکی از آن است که:

(۱) مدل MPySEBAL در مقابل مدل PySEBAL، در هنگام انتخاب پیکسل‌های حدی، بهتر عمل کرده و با انتخاب پوشش گیاهی خوب آبیاری شده به عنوان پیکسل سرد (به جای پهنه‌ی آبی) و زمین زراعی با پوشش گیاهی تنک برای پیکسل گرم (به جای زمین بایر و شوره زار) تا ۶۰ درصد باعث کاهش خطای (RMSE) برآورد تبخیر-تعرق روزانه در دشت ارومیه می‌شود.

(۲) استفاده از تصاویر سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی کمتر در مقابل تصاویر سنجنده Landsat 8، متوسط

سنجنده و انتخاب محدوده مکانی ورودی به مدل به ترتیب بیشترین اثرگذاری را در نتایج دارند. نتایج این پژوهش می‌تواند در بهبود دقت مدل‌های تبخیر-تعرق و مصارف آب بخش کشاورزی در مقیاس‌های مزرعه تا سطح حوضه مورد استفاده مدیران و برنامه‌ریزان قرار گیرد.

### سپاس‌گزاری

نویسندگان از پژوهشکده‌ی مهندسی و مدیریت منابع آب دانشگاه تربیت مدرس برای تامین سیستم محاسباتی مورد نیاز برای انجام محاسبات و همچنین پژوهشکده‌ی IHE-Delft برای در اختیارگذاری مدل PySEBAL تشکر می‌نمایند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

### REFERENCES

- Allen, R. G., Burnett, B., Kramber, W., Huntington, J., Kjaersgaard, J., Kilic, A., Kelly, C., & Trezza, R. (2013). Automated Calibration of the METRIC-Landsat Evapotranspiration Process. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 49(3), 563–576. <https://doi.org/10.1111/jawr.12056>
- Allen, R. G., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R., & Bastiaanssen, W. (2002). Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)–Advanced training and Users Manual. In *Kimberly: Idaho Implementation*. <https://doi.org/10.1002/2014GL060003>. Received
- Bagheri, M. H., Morid, S., & Arshad, S. (2017). Application of Remotely-Sensed Data to Estimate a Water Budget for Data-Scarce Endorheic Basins: A Case Study of Lake Urmia basin, Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 45(1), 101–112. <https://doi.org/10.1007/s12524-015-0522-9>
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. *Journal of Hydrology*, 212–213(1–4), 213–229. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6)
- Research Institute for Water Engineering and Management (RIWEM) at Tarbiat Modares University, 2018. Collaborative land cover mapping of the Lake Urmia Basin, Iran.
- Hessels, T., van Opstal, J., Trambauer, P., Bastiaanssen, W. G. M., Faouzi, M., Mohamed, Y., & Er-Raji, A. (2017). *pySEBAL Version 3.3.7*. <https://pypi.org/project/SEBAL/>
- Houshmandi, A. (2020). Comparative Assessment of Evapotranspiration Models and ET Products at Basin Scale (Case Study: Urmia Basin)(Unpublished Master's Dissertation). University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran. (In Farsi).
- Huntingford, C., Verhoef, A., & Stewart, J. (2000). Dual versus single source models for estimating surface temperature of African savannah. In *Hydrology and Earth System Sciences* (Vol. 4, Issue 1, pp. 185–191). <https://doi.org/10.5194/hess-4-185-2000>
- Javadian, M., Behrangi, A., Gholizadeh, M., & Tajrishy, M. (2019). METRIC and WaPOR Estimates of Evapotranspiration over the Lake Urmia Basin: Comparative Analysis and Composite Assessment. *Water*, 11(8), 1647. <https://doi.org/10.3390/w11081647>
- JICA. (2019). Data Collection Survey on Improvement of the Hydrological Cycle Model of Lake Urmia Basin. April 2019.
- Karimi, P., & Bastiaanssen, W. (2015). Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting – Part 1: Review of the accuracy of the remote sensing data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1), 507–532. <https://doi.org/10.5194/hess-19-507-2015>
- Karimi, P., Pareeth, S., & Michailovsky, C. (2019). Satellite derived gap-free monthly Actual EvapoTranspiration using SEBAL and spatio-temporal interpolation for Urmia Lake Basin METHODOLOGY DOCUMENT Rapid Assessment of the Water Accounts in Urmia Lake Basin.
- Mahmoud, S. H., & Gan, T. Y. (2019). Irrigation water management in arid regions of Middle East: Assessing spatio-temporal variation of actual evapotranspiration through remote sensing techniques and meteorological data. *Agricultural Water Management*, 212(July 2017), 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.040>
- Ning, T., Li, Z., Feng, Q., Liu, W., & Li, Z. (2018). Comparison of the effectiveness of four Budyko-based methods in attributing long-term changes in actual evapotranspiration. *Scientific Reports*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31036-x>
- Nishida, K., Nemani, R. R., Running, S. W., & Glassy,

(۳) انتخاب وسعت محدوده مکانی برای اجرای مدل برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی روی محل قرارگیری پیکسل‌های حدی تاثیر گذار است. در مواردی که منطقه از لحاظ کاربری اراضی و ارتفاعی ناهمگن باشد (مشابه دشت ارومیه)، این موضوع می‌تواند سبب ایجاد عدم قطعیتی تا حدود ۸ درصد در برآورد مقادیر متوسط تبخیر-تعرق واقعی شود. از این رو پیشنهاد می‌شود برای برآورد مقادیر تبخیر-تعرق واقعی در منطقه مورد نظر، ابتدا تصاویر به منطقه مورد نظر محدود شده و سپس در مدل مورد استفاده قرار گیرد.

(۴) در مقایسه نسبی عدم قطعیت‌های ناشی از تنظیمات مدل SEBAL، انتخاب خودکار پیکسل‌های حدی بر اساس تعیین حدود آستانه برای دمای سطح و NDVI، قدرت تفکیک مکانی

- J. M. (2003). An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 108(9). <https://doi.org/10.1029/2002JD002062>
- Ramírez-Cuesta, J. M., Allen, R. G., Zarco-Tejada, P. J., Kilic, A., Santos, C., & Lorite, I. J. (2019). Impact of the spatial resolution on the energy balance components on an open-canopy olive orchard. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74(September 2018), 88–102. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.001>
- Taheri, M., Emadzadeh, M., Gholizadeh, M., Tajrishi, M., Ahmadi, M., & Moradi, M. (2019). Investigating the temporal and spatial variations of water consumption in Urmia Lake River Basin considering the climate and anthropogenic effects on the agriculture in the basin. *Agricultural Water Management*, 213(November 2018), 782–791. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.013>
- Tasumi, M. (2019). Estimating evapotranspiration using METRIC model and Landsat data for better understandings of regional hydrology in the western Urmia Lake Basin. *Agricultural Water Management*, 226(October), 105805. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105805>
- Zhang, K., Kimball, J. S., & Running, S. W. (2016). A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(6), 834–853. <https://doi.org/10.1002/wat2.1168>