

## بررسی و مقایسه روش‌های برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

مصطفی جوادیان<sup>۱</sup>، فاطمه کردی<sup>۱</sup>، مسعود تجریشی<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناس، مرکز تحقیقات سنجش از دور (RSRC)، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران و مدیر مرکز تحقیقات سنجش از دور (RSRC)، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۶/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۸/۱۳)

### چکیده

تبخیر و تعرق واقعی یکی از متغیرهای اصلی در محاسبه بیلان آب و انرژی سطح زمین محسوب می‌شود. تا کنون روش‌های مختلفی برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی ارائه شده است. هدف از مطالعه حاضر، بررسی و مقایسه انواع روش‌های موجود برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه به منظور انتخاب الگوریتم بهینه است. به بیان دیگر، با بررسی مزایا و معایب روش‌های تخمین تبخیر و تعرق واقعی، کارایی هر یک از این روش‌ها در حوضه آبریز دریاچه ارومیه بررسی می‌شود. در تحقیق حاضر با استفاده از الگوریتم‌های ETLook، SEBAL، SEBS و S-SEBI که بر پایه معادله بیلان انرژی استوار هستند و مقایسه نتایج به دست آمده از الگوریتم‌های مختلف این نتیجه به دست آمد که روش ETLook با بهره‌گیری از جدیدترین روش‌های برآورد تبخیر و تعرق توانسته است بسیاری از ضعف‌های سایر الگوریتم‌ها را پوشش دهد. این روش دومنبعی که پوشش گیاهی و خاک را به صورت جداگانه تحلیل می‌کند، با استفاده از تصاویر رطوبت خاک توانسته است حتی در روزهای ابری نیز کارایی خود را برای محاسبه تبخیر و تعرق از دست ندهد. با این حال، تجاری بودن این الگوریتم و اختلاف زیاد نتایج محصول جهانی WaPOR (تولیدشده با ETLook) با مشاهدات زمینی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه سبب شده است تا استفاده از آن نیز چندان میسر و مناسب نباشد. با توجه به جمیع شرایط از جمله داشتن پایه فیزیکی مناسب، سهولت در اجرا و مقایسه با مقادیر زمینی می‌توان گفت که الگوریتم SEBAL مناسب‌ترین گزینه برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی حوضه آبریز دریاچه ارومیه است.

**کلیدواژگان:** ارومیه، تبخیر و تعرق، محصول جهانی، SEBAL، WaPOR.

## مقدمه

تبخیر و تعرق یکی از مؤلفه‌های اصلی بیلان آب هر منطقه و نیز یکی از عوامل کلیدی برای برنامه‌ریزی صحیح و مناسب آبیاری به‌منظور بهبود راندمان آب مصرفی در اراضی کشاورزی است [۱].

روش‌های مختلفی برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع و گیاه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای توسعه یافته است که هر یک پیچیدگی‌های خاص خود را دارند. به‌طور کلی، این روش‌ها را می‌توان در چهار گروه تجربی، مبتنی بر شاخص‌های گیاهی، قطعی و مبتنی بر بیلان انرژی طبقه‌بندی کرد.

به علت کاربرد بیشتر روش‌های مبتنی بر بیلان انرژی، در مطالعه حاضر روی این روش‌ها تمرکز شده است. الگوریتم روش‌های مبتنی بر بیلان انرژی سطح (Surface Energy Balance) بر ترکیب مدل‌های تجربی و فیزیکی با در نظر گرفتن فرضیات ساده‌کننده، استوار است؛ بنابراین بیشتر مدل‌های کاربردی با استفاده مستقیم از تصاویر ماهواره‌ای میزان اختلاف دمای هوا و دمای زمین را محاسبه و به‌طور غیر مستقیم تبخیر و تعرق گیاه را محاسبه می‌کنند [۲].

به‌طور کلی، روش‌های مبتنی بر بیلان انرژی سطح (SEB) شامل روش‌های تک‌منبعی، دومنبعی و دوزنقه‌ای یا مثلثی هستند.

ویژگی بارز روش‌های تک‌منبعی یکپارچه فرض کردن سطح زمین است. در این روش‌ها فقط از یک مقاومت آئرو‌دینامیک در فرایند انتقال آب-گرما استفاده شده و فرض می‌شود که تمامی سطح تحت تأثیر دما و رطوبت قرار می‌گیرد. روش‌هایی همچون SEBAL، SEBS، METRIC و SEBI از جمله الگوریتم‌های معمول تک‌منبعی‌اند. این روش‌ها بر پایه مقایسه بین محدوده خشک و تر بنا نهاده شده‌اند تا میزان ET را برای هر پیکسل تصویر جداگانه و از روی ضریب تبخیر به همراه پارامترهای سطحی داده‌های سنجش‌ازدور و مقادیر به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های زمینی در سطح محلی یا منطقه‌ای به‌دست آورند [۳]. هر یک از روش‌های تک‌منبعی ویژگی‌های مختص به خود را دارند، به‌طور مثال الگوریتم SEBAL با به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی برای تخمین بیلان انرژی در سطح، ابتدا شار

گرمای تبخیر برای هر پیکسل تصویر را به‌صورت لحظه‌ای (برای زمان دریافت تصویر) محاسبه می‌کند و سپس برای گام‌های زمانی روزانه و ماهانه تعمیم می‌دهد.

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج الگوریتم سبال نتایج تبخیر و تعرق واقعی محاسبه‌شده با الگوریتم SEBAL در غرب آفریقا با داده‌های زمینی اندازه‌گیری‌شده ارزیابی شد. نتایج این بررسی بیان می‌کند که نتایج الگوریتم SEBAL همبستگی خوبی با داده‌های اندازه‌گیری‌شده دارد [۴].

این روش محدودیت‌هایی نیز دارد؛ برای مثال می‌توان به ناتوانی این روش در روزهای ابری اشاره کرد که برای برخی مناطق می‌تواند محدودیت بزرگی به شمار رود. محدودیت دیگر این روش به چگونگی انتخاب پیکسل گرم و سرد مربوط است. بیشتر روش‌های انتخاب پیکسل گرم و سرد به‌صورت کیفی و بصری هستند که همین امر سبب وابستگی زیاد این روش به چگونگی انتخاب پیکسل گرم و سرد شده است [۵]. البته، روش‌های نوینی برای اتوماسیون چگونگی انتخاب پیکسل گرم و سرد نیز پیشنهاد شده است [۶]. همین‌طور ناتوانی این روش در تخمین تبخیر و تعرق در مناطق کوهستانی نیز به ضعف‌های ساختاری آن افزوده است.

این الگوریتم در مرکز سنجش‌ازدور دانشگاه شریف تحت عنوان SUTSEBAL توسعه داده شده و برخی از ضعف‌های آن همچون عدم کاربرد در مناطق کوهستانی را تا حدی پوشش داده است. در واقع، الگوریتم SUTSEBAL ترکیبی از روش‌های SEBAL، METRIC و SEBS است.

روش‌های دومنبعی، سطح زمین را به دو بخش دارای پوشش گیاهی و فاقد آن تقسیم کرده و معادله بیلان انرژی سطح را برای هر بخش به‌طور جداگانه محاسبه می‌کنند. از جمله این روش‌ها می‌توان به TSM، TSTIM، DTD و ETLook اشاره کرد.

در حوضه دریاچه ارومیه مطالعات مختلفی در خصوص تخمین تبخیر و تعرق صورت گرفته است. از جمله در مطالعه‌ای، مؤلفه‌های مختلف بیلان آب شامل تغییرات حجم آبخوان، تبخیر از پیکره‌های آبی، تبخیر-تعرق واقعی و تغییرات رطوبت خاک به روش‌های تک‌منبعی SEBAL [۷] و METRIC [۸] و مدل‌های دومنبعی TSEB و STSEB به همراه مدل ترکیبی SEBAL-TSEB تبخیر-تعرق در حوضه دریاچه ارومیه تخمین زده شد. همچنین،

و تعرق نیز به کار گرفته شده است. روش‌های مختلفی برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع و گیاه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای توسعه یافته است که هر یک پیچیدگی‌های خاص خود را دارند. به‌طور کلی، این روش‌ها را می‌توان در چهار گروه تجربی، مبتنی بر شاخص‌های گیاهی، قطعی و مبتنی بر بیلان انرژی طبقه‌بندی کرد.

به‌علت کاربرد بیشتر روش‌های مبتنی بر بیلان انرژی، در مطالعه حاضر روی این روش‌ها تمرکز شده است. الگوریتم روش‌های مبتنی بر بیلان انرژی سطح (Surface Energy Balance) بر ترکیب مدل‌های تجربی و فیزیکی با در نظر گرفتن فرضیات ساده‌کننده استوار است. بنابراین، بیشتر مدل‌های کاربردی با استفاده مستقیم از تصاویر ماهواره‌ای میزان اختلاف دمای هوا و دمای زمین را محاسبه و به‌طور غیر مستقیم تبخیر و تعرق گیاه را محاسبه می‌کنند [۱۲].

در مطالعه حاضر سعی شده است به خصوصیات تبخیر و تعرق ارائه‌شده توسط چهار محصول MOD16, GLEAM, WaPOR و ECMWF که با استفاده از الگوریتم‌های متفاوت تولید شده‌اند، پرداخته شود. در انتها نیز برای به‌دست‌آوردن تخمینی از نسبت داده‌های یادشده، داده‌های تبخیر و تعرق از این چهار منبع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه استخراج و با نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم SEBAL در سال ۲۰۱۰ میلادی مقایسه شده‌اند. همچنین، به دلیل وجود داده‌های لایسینتر در سال ۲۰۱۰ نتایج این مقایسه با داده‌های زمینی موجود ارزیابی شده است. همان‌طور که گفته شد، این محصولات با الگوریتم‌های متنوعی تولید شده‌اند، به این منظور لازم است درباره هر یک از الگوریتم‌های استفاده‌شده توضیح داده شود. بنابراین، از بین روش‌های تک‌منبعی، الگوریتم‌های SEBAL, SEBS و S-SEBI و از روش‌های دومنبعی به الگوریتم ETLook پرداخته شده است که در ادامه به‌صورت مختصر تشریح می‌شود.

#### SEBAL

الگوریتم SEBAL با به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی برای تخمین بیلان انرژی در سطح (رابطه ۱)، ابتدا شار گرمای تبخیر برای هر پیکسل تصویر را به‌صورت لحظه‌ای (برای زمان دریافت تصویر) محاسبه می‌کند و سپس برای گام‌های زمانی روزانه و ماهانه تعمیم می‌دهد.

نتایج این تحقیق با مقادیر لایسینتری واقع در یک مزرعه در حوضه مطالعاتی به‌صورت نمونه مقایسه شد که از بین سایر مدل‌ها، نتایج روش SEBAL، با درصد خطای متوسط ۱۹ درصد در مقیاس روزانه، بیشترین همخوانی را با مقادیر اندازه‌گیری‌شده نشان داد [۹].

مدیریت منابع آب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه که یکی از حوضه‌های مهم کشور بوده و در حال حاضر با مشکلات جدی در زمینه زیست‌محیطی مواجه است، بسیار اهمیت دارد. تبخیر و تعرق از گیاه، خاک، مناطق شهری، جنگل و پوشش گیاهی طبیعی بیشترین سهم مصرف آب را دارد. در ضمن، بیشترین مقدار مصرف آب به آبیاری زمین‌های کشاورزی مربوط است. بنابراین، اطلاعات تبخیر و تعرق می‌تواند به‌منظور مدیریت آبیاری، پایش خشک‌سالی و... استفاده شود. بنابراین، پرداختن به روش‌هایی که تبخیر و تعرق واقعی را برآورد می‌کنند در طیف وسیعی از مطالعات مربوط به منابع آب اهمیت زیادی دارد [۱۰].

بنابراین، هدف از مطالعه حاضر بررسی و مقایسه انواع روش‌های موجود برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه به‌منظور انتخاب روش بهینه است. به این منظور، با بررسی دسته‌بندی‌های مختلف روش‌های تخمین تبخیر و تعرق واقعی و در نظر گرفتن مزایا و معایب آنها، کارایی هر یک از این روش‌ها در حوضه آبریز دریاچه ارومیه بررسی می‌شود.

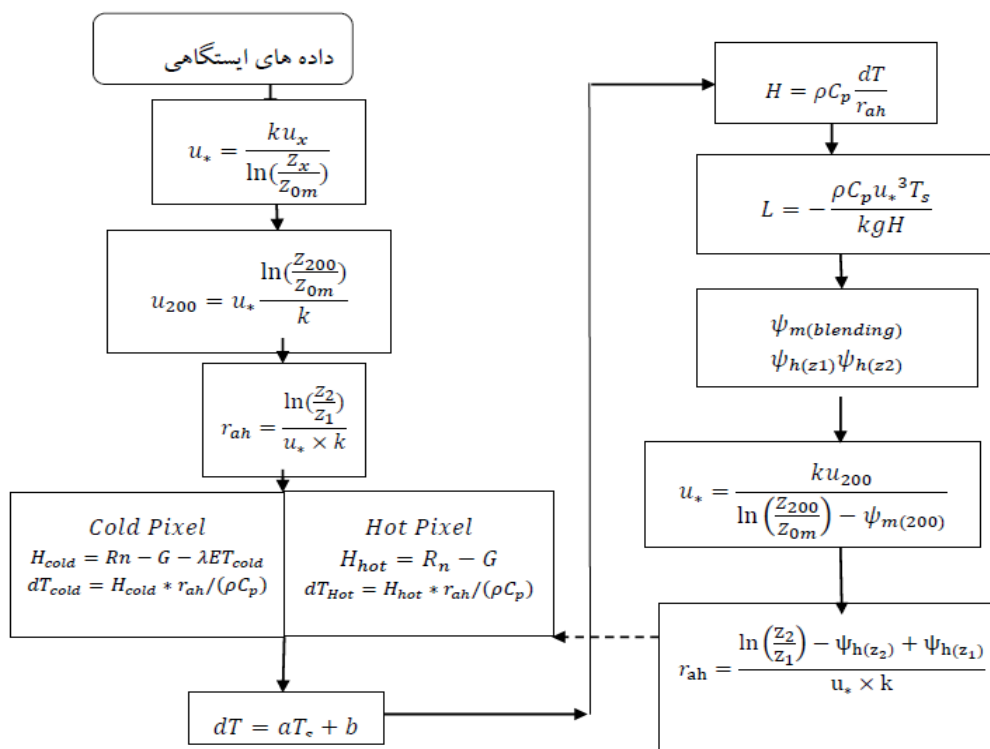
### مواد و روش‌ها

#### روش‌های برآورد تبخیر و تعرق واقعی

#### روش‌های برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از فناوری سنجنش‌ازدور

روش‌هایی که در گذشته برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی استفاده می‌شدند، فقط در همان نقطه که اندازه‌گیری صورت پذیرفته معتبر بوده‌اند. بنابراین، با توجه به اهمیت تبخیر و تعرق در مطالعات مختلف، لازم است از روش‌هایی که توزیع مکانی خوبی برای محاسبه تبخیر و تعرق دارند، بهره‌گرفت [۱۱]. با توسعه ماهواره‌های سنجنش‌ازدور، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به دلیل پوشش وسیع مکانی، قدرت تفکیک زیاد، هزینه کم و آرشیو زمانی غنی تصاویر ماهواره‌ای رشد چشمگیری داشته است. از اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی، سنجنش‌ازدور در تخمین تبخیر

شار گرمایی زمین  $G$  ( $W.m^{-2}$ )، شار گرمایی زمین  $H$  ( $W.m^{-2}$ ) و شار گرمایی محسوس به سمت جو  $(W.m^{-2})$  هستند. روند نمای الگوریتم SEBAL به ترتیب در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. روند نمای الگوریتم SEBAL [۱۳]

#### S-SEBI

تئوری اصلی به کاررفته در روش S-SEBI بر پایه تفاوت میزان آلودگی به دست آمده از بیشترین دمای سطح برای محدوده خشک و آلودگی به دست آمده از کمترین دمای سطح برای محدوده تر بنا نهاده شده تا انرژی دریافتی خورشید را به دو بخش گرمای قابل دسترس و گرمای پنهان تقسیم کند. از مزیت‌های اصلی این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- غیر از پارامترهای دمای سطحی و میزان آلودگی که از داده‌های سنجش از دور به دست می‌آیند، برای به دست آوردن ضریب تبخیر استفاده شده در این الگوریتم (EF) نیازی به اندازه‌گیری‌های اضافی زمینی نیست.

- در روش S-SEBI دمای سطح برای حالت‌های تر و خشک با تغییر میزان آلودگی تغییر می‌کند، در صورتی که در

#### SEBS

این مدل توسط پروفیسور سو در سال ۲۰۰۲ توسعه داده شده است. مدل SEBS به منظور تخمین بیلان انرژی از تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌کند. اساس معادله این مدل مانند الگوریتم SEBAL است که در رابطه ۱ به آن اشاره شد. پارامترهای ورودی مدل SEBS به سه دسته تقسیم می‌شوند: دسته نخست شامل آلودگی سطح زمین، گسیلندگی، دما، کسر پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ LAI و ارتفاع گیاه است. هریک از پارامترهای ورودی را می‌توان با استفاده از داده‌های سنجش از دوری به دست آورد. دسته دوم شامل فشار بخار، دمای رطوبت و سرعت باد در ارتفاع مرجع است. سومین دسته شامل تابش خورشیدی ورودی و تابش طول موج بلند ورودی است که به طور مستقیم می‌تواند اندازه‌گیری شود یا به صورت خروجی مدل، پارامترسازی شود [۱۴].

تبخیری<sup>۱</sup> جو را مستقل از نوع گیاه، مرحله رشد و سیاست‌های مدیریت مزرعه بررسی می‌کند. مقادیر تبخیر و تعرق مرجع اندازه‌گیری شده یا محاسبه شده به دلیل اشاره به یک سطح مرجع خاص، امکان مقایسه را در مکان‌ها و فصول مختلف فراهم می‌کند [۱۷].

یکی از روش‌هایی که به‌طور گسترده برای برآورد ETr استفاده می‌شود، رابطه Penman-Monteith است که به‌صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۱۸].

$$ET_r = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \left( \frac{900}{T + 273} \right) \times U_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 \times U_2)} \quad (2)$$

در این رابطه، ETr تبخیر و تعرق مرجع روزانه (mm.day-1)، Rn تشعشع خالص (MJm-2d-1)، G شار حرارتی خاک (MJm-2d-1)، T دمای میانگین هوا در ارتفاع دومتری (°C)، U2 میانگین سرعت باد (m.s-1)، es فشار بخار اشباع (kPa)، ea فشار بخار واقعی (kPa)، Δ گرادیان فشار بخار اشباع در برابر دمای هوا (°C-1 kPa) و γ ثابت سایکرومتریک (°C-1 kPa) است [۱۷].

ضریب محصول (Kc)، ویژگی‌هایی از گیاه را در بر می‌گیرد که در پیش‌بینی مقدار تبخیر و تعرق استفاده می‌شوند. به بیانی، تأثیر تعرق گیاه و تبخیر خاک در یک ضریب محصول واحد دیده می‌شود [۱۹].

### برآورد تبخیر و تعرق واقعی توسط محصولات آماده بین‌المللی

در شرایط نبود اطلاعات دقیق تبخیر که با استفاده از اندازه‌گیری‌ها و یا اجرای مدل‌ها به دست می‌آیند، داده‌های جهانی تبخیر می‌توانند به‌عنوان یک جایگزین مناسب استفاده شوند. محصولات، مدل‌ها و پایگاه‌های ارائه‌کننده تبخیر و تعرق در جدول ۱ نشان داده شده است.

از بین محصولات موجود در جدول ۱، فقط پنج محصول نخست در دسترس عموم قرار دارند و از بین آنها فقط چهار محصول نخست در محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه دارای اطلاعات هستند. سایر محصولات ناشی از مدل‌هایی هستند که افراد مختلف صرفاً برای انجام یک کار تحقیقاتی خاص توسعه داده‌اند و خروجی‌های آن را در پایگاه خاصی عرضه نکرده‌اند.

باقی روش‌ها همچون SEBAL تلاش بر این است تا دمایی ثابت را برای حالت‌های تر و خشک در نظر بگیرند.

به‌هرحال، توجه به این نکته ضروری است که تصحیحات اتمسفری برای اصلاح دمای سطح و میزان آلودگی به‌دست‌آمده از داده‌های سنجنده و همچنین تعیین دمایی خاص برای حالت‌های تر و خشک فقط برای یک محدوده خاص قابل اجراست، زیرا وضعیت جوی در سطوح وسیع به‌هیچ‌وجه ثابت نیست [۱۵].

### ET LOOK

الگوریتم ETLook برای محاسبه بیلان انرژی سطح به جای استفاده از دمای سطح، رطوبت خاک استخراج شده از سنسور مایکروویو غیرفعال را استفاده می‌کند. داده‌های مایکروویو به دلیل اینکه کمتر تحت تأثیر پوشش ابری قرار می‌گیرند، می‌توانند اطلاعات مربوط به زمان‌هایی که بارندگی اتفاق افتاده است را در اختیار قرار دهند. به‌بیان دیگر، سیگنال داده‌های سنسور مایکروویو غیرفعال، تحت تأثیر ابری بودن جو قرار نمی‌گیرد. بنابراین، امتیازی که این الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های پیشین دارد، محاسبه پارامتر تبخیر و تعرق در هر شرایط آب و هوایی (ابری) است. همچنین، این الگوریتم می‌تواند الگوی مکانی و زمانی (روزانه، هشت‌روزه، ماهانه) تعادل انرژی موجود در سطح و تبخیر و تعرق واقعی را ارزیابی کند و به‌منظور ساده‌سازی جریان‌های پیچیده رطوبت خاک، در بخش بالایی خاک غیراشباع در نظر گرفته نمی‌شود.

در الگوریتم ETLook، شاخص سطح برگ محاسبه شده به‌طور جداگانه هم در محاسبه شار تابشی مربوط به خاک و هم شار تابشی بخش کانوپی (تاج پوشش) لحاظ می‌شود. دو نوع مقاومت (مقاومت سطح و آئرودینامیکی) در معادله پنمن-مانتیث برای خاک و کانوپی (تاج پوشش) نیز در نظر گرفته شده است و خروجی‌های مدل شامل تبخیر خاک، تعریق گیاه و برگاب می‌شود [۱۶].

### برآورد تبخیر و تعرق واقعی توسط تبخیر و تعرق مرجع و ضریب محصول

تبخیر و تعرق از یک سطح مرجع (یک نوع چمن با مشخصات خاص) که در شرایط تنش آبی نباشد، تبخیر و تعرق مرجع (ETr) نام دارد. تبخیر و تعرق مرجع، نیاز

جدول ۱. محصولات آماده تبخیر و تعرق

محصولات ET	معادلات حاکم	دقت مکانی (km)	دقت زمانی	پوشش مکانی	پوشش زمانی
(MODIS) Mod16	معادله Penman-Monteith	۱	هشت‌روزه، ماهانه و سالانه	جهانی	۲۰۰۰-۲۰۱۳
ECMWF	معادله Penman-Monteith	۸۳	میانگین روزانه، ماهانه و سالانه	جهانی	از سال ۱۹۷۹ تا کنون
FAO (WaPOR)	الگوریتم ETLOOK	۰/۲۵	ده‌روزه	آفریقا، خاورمیانه	۲۰۰۹ تا کنون
GLEAM	معادله Priestley-Taylor	۲۸	روزانه	جهانی	۱۹۸۴ تا ۲۰۰۷
LSA-SAF MSG	SVAT	۵	۳۰ دقیقه‌ای، روزانه و هشت‌ساعته	اروپا، آفریقا و امریکا	-
ZHANG_E	معادله Penman-Monteith اصلاح شده	۸	ماهانه	جهانی	۱۹۸۳ تا ۲۰۰۶
CHEN_ET	معادله بیلان انرژی	۵	ماهانه	جهانی	۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴
JUNG_E	معادله تجربی	۵۵	ماهانه	جهانی	۱۹۸۱ تا ۲۰۱۱
JRA55_E	مدل SIB	۶۰	سه‌ساعته	جهانی	۱۹۵۸ تا کنون
MERRA_E	GEOS-5 Catchment LSM مدل	۱۱۱	یک‌ساعته و ماهانه	جهانی	۱۹۷۹ تا کنون
ERA1_E	مدل TESSEL	۵۵	سه‌ساعته و روزانه	جهانی	۱۹۷۹ تا کنون
GNOAH_E	معادله Penman-Monteith	۱۱۱	سه‌ساعته	جهانی	۱۹۴۸ تا کنون
GCLM_E	Monin-Obukhov similarity theory	۱۱۱	سه‌ساعته	جهانی	۱۹۴۸ تا کنون
GMOS_E	Penman-Monteith	۱۱۱	سه‌ساعته	جهانی	۱۹۴۸ تا کنون

پایگاه داده WaPOR نیز از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۶ مقادیر ارتفاع تبخیر و تعرق را برای آفریقا و خاورمیانه به‌صورت ده‌روزه و با تفکیک مکانی ۲۵۰ متری ارائه می‌کند.

### نتایج و بحث

**مقایسه نتایج ET محصولات جهانی با الگوریتم SEBAL**  
نتایج میانگین ماهانه چهار محصول جهانی تبخیر و تعرق GLEAM، MOD16، ECMWF و WaPOR با الگوریتم SEBAL در سال ۲۰۱۰ در حوضه آبریز دریاچه ارومیه مقایسه شد که در شکل ۲ نشان داده شده است.

مقایسه نتایج تبخیر و تعرق واقعی الگوریتم SEBAL با محصول تبخیر و تعرق پایگاه GLEAM در سال ۲۰۱۰ بیان می‌کند که در ماه‌های مارس، آوریل و می، مقادیر تبخیر و تعرق پایگاه GLEAM حدود دو برابر الگوریتم SEBAL است. به عکس از ماه جولای تا دسامبر، مقدار تبخیر و تعرق SEBAL بین دو تا چهار برابر محصول پایگاه GLEAM است. فقط در ماه‌های ژانویه، فوریه و ژوئن نتایج این دو الگوریتم به یکدیگر نزدیک‌اند.

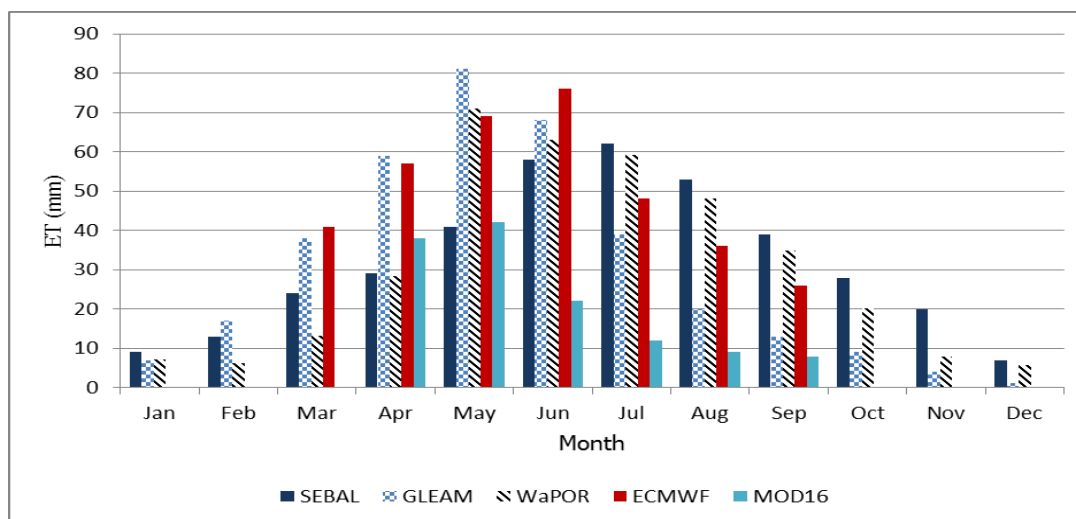
در پژوهش حاضر به بررسی چهار داده نخست جدول ۱ پرداخته شده است. مرکز ECMWF، یک سازمان مستقل است که توسط ۳۴ کشور اروپایی حمایت می‌شود و در مقیاس جهانی به پیش‌بینی پارامترهای مختلف آب و هوایی می‌پردازد. پارامتر تبخیر در این سایت، در مقیاس‌های زمانی میانگین روزانه، ماهانه و سالانه با اندازه پیکسل ۰/۷۵ درجه (حدود ۸۳ کیلومتر) در گستره جهانی قابل دسترس است. همین‌طور، در سال‌های اخیر محصول تبخیر و تعرق با نام تجاری MOD16، در مقیاس جهانی با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS با روش بیلان انرژی تولید شده و در اختیار کاربران قرار گرفته است. این محصول با وضوح مکانی یک کیلومتر مربع و با فواصل زمانی هشت‌روزه، ماهانه و سالانه در دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۳ در گستره جهانی موجود است. محصول تبخیر و تعرق پایگاه GLEAM توسط دانشگاه‌های آمستردام هلند، Ghent بلژیک و آژانس فضایی اروپا (ESA) توسعه داده شده و محصولات مختلفی از جمله تبخیر و تعرق واقعی دارد. این اطلاعات به‌صورت روزانه از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۶ با تفکیک مکانی حدود ۲۸ کیلومتری موجود است.

خود می‌رسد. به نظر می‌رسد در ماه‌های آوریل، می و ژوئن هر دو نمودار روند یکسانی را نشان می‌دهند، اما در فصل گرما با مقایسه مکانی نقشه‌های ET، الگوریتم SEBAL مقادیر تبخیر را در اراضی غیر کشاورزی بیشتر از لایه ECMWF برآورد می‌کند که این مسئله به افزایش مقادیر میانگین ET حوضه حاصل از این روش نسبت به نتایج ECMWF منجر شده است.

مقایسه نتایج محصول WaPOR با SEBAL نیز نشان می‌دهد در اغلب ماه‌ها میزان تبخیر و تعرق برآوردشده توسط سامانه WaPOR کمتر از الگوریتم SEBAL بوده است، اما به طور کلی میزان اختلاف در ماه‌های گرم که بیشترین میزان تبخیر و تعرق در آنها رخ می‌دهد، اندک است و نزدیکی خوبی بین نتایج مشاهده می‌شود.

مقایسه نتایج تبخیر و تعرق واقعی الگوریتم SEBAL با محصول تبخیر و تعرق MOD16 بیان می‌کند که مقادیر الگوریتم SEBAL در کلیه ماه‌ها بیشتر است و غیر از ماه‌های آوریل و ژوئن، در چهار ماه دیگر اختلاف زیادی در مقادیر دو نمودار مشاهده می‌شود. از طرفی، با اینکه هر دو نمودار روندی زنگوله‌ای را نشان می‌دهند، اما مقادیر ماکزیمم در ماه‌های متفاوتی اتفاق افتاده است، نمودار MOD16 در ماه می و نمودار SEBAL در ماه جولای مقدار ماکزیمم را نشان می‌دهند.

بررسی نتایج الگوریتم SEBAL و محصول ECMWF نشان می‌دهد در ماه‌های ابتدایی کشت، مقادیر ECMWF اندکی کمتر از مقادیر SEBAL هستند و با رسیدن به ماه‌های گرم، نتایج SEBAL از مقادیر ECMWF پیشی می‌گیرند و در ماه سپتامبر، این اختلاف به بیشترین مقدار



شکل ۲. مقایسه نتایج تبخیر و تعرق ماهانه محصولات جهانی تبخیر و تعرق با نتایج الگوریتم SEBAL در سال ۲۰۱۰

و تعرق نمی‌تواند از بارش پیشی بگیرد و طبق مطالعاتی که صورت پذیرفته است، مقداری حدود ۰/۶ تا ۰/۷ بارش را داراست [۲۰]. همین‌طور، به دلیل اینکه اراضی یادشده بیشتر در شیب‌های ملایم‌تری نسبت به ارتفاعات قرار دارند، انتظار می‌رود که پتانسیل نگهداشت رطوبت مناسبی داشته باشند.

میزان تبخیر و تعرق واقعی ارائه‌شده در سامانه WaPOR و محاسبه‌شده توسط الگوریتم SEBAL در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ در اراضی با کاربری دیم مقایسه شده‌اند (شکل ۳). میانگین مقدار تبخیر و تعرق واقعی

### بررسی اختلاف نتایج WaPOR و SEBAL در کاربری اراضی کشت دیم

در مناطقی که زمین‌های کشاورزی آبیاری می‌شوند، عمدتاً مقدار تبخیر و تعرق واقعی از مقدار بارش بیشتر است و حتی این عدد به چندین برابر مقدار کل بارش سالانه نیز می‌رسد. در مراتع کوهستانی نیز به دلیل شیب زیاد زمین، در عمل تبخیر و تعرق خاصی انتظار نمی‌رود؛ اما اراضی با کاربری کشت دیم که بین این دو حالت هستند، بهترین گزینه برای ارزیابی مقدار تبخیر و تعرق‌اند؛ چراکه در این اراضی به دلیل عدم آبیاری توسط چاه یا رودخانه‌ها، تبخیر

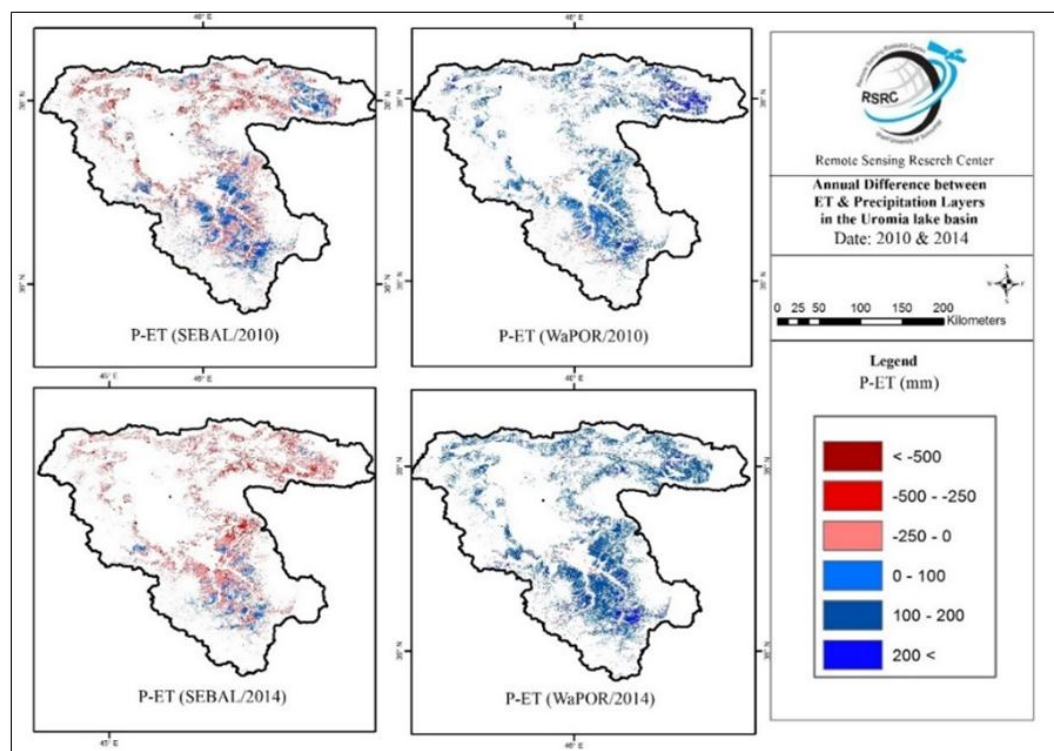
تبخیر و تعرق GLEAM و WaPOR اختلاف درخور توجهی با مقادیر تبخیر و تعرق واقعی لایسیمتر دارند، اما محصولات تبخیر و تعرق MOD16 و ECMWF وضعیت بهتری از نظر نزدیکی با لایسیمترها دارند، هرچند که باز هم اختلافشان با مقادیر لایسیمتر درخور توجه است.

در ایستگاه لایسیمتر، مقدار متوسط ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی برای محدوده کوچک دایره‌ای به قطر ۳۰ متر ارائه می‌شود، یعنی حدود ۷۰۰ مترمربع، حال آنکه تفکیک مکانی نقشه‌های تولیدی توسط روش SEBAL در مطالعه حاضر و محصول MOD16، سلول‌های با ابعاد یک کیلومتر در یک کیلومتر و نقشه‌های خروجی از محصولات ECMWF، GLEAM و WaPOR به ترتیب ۸۳ کیلومتر در ۸۳ کیلومتر، ۲۸ کیلومتر در ۲۸ کیلومتر و ۰/۲۵ کیلومتر در ۰/۲۵ کیلومتر هستند که این خود عملاً امکان مقایسه مناسب را محدود می‌کند. با کاهش قابلیت تفکیک مکانی نقشه‌های تولیدی با استفاده از تغییر سنجنده استفاده‌شده و یا ریزمقیاس کردن تصاویر و نیز افزایش تعداد روزها و ایستگاه‌های لایسیمتری می‌توان امکان مقایسه مناسب‌تری را بین دو نقطه از مدل‌سازی و داده واقعی از محل برقرار کرد.

سالانه سامانه WaPOR در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ در اراضی با کاربری کشت دیم به ترتیب ۱۰۴ و ۱۳۵ میلی‌متر کمتر از مجموع بارش سالانه محاسبه شده (که به ترتیب برای سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ برابر با ۳۴۱ و ۳۸۹ میلی‌متر تعیین شده)، بوده است و این در حالی است که میانگین مقدار تبخیر و تعرق واقعی سالانه محاسبه‌شده توسط الگوریتم SEBAL در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ میلادی در اراضی با کاربری کشت دیم به ترتیب ۱۰۰ و ۱۷۰ میلی‌متر بیشتر از مقدار مجموع بارش برآورد شده است.

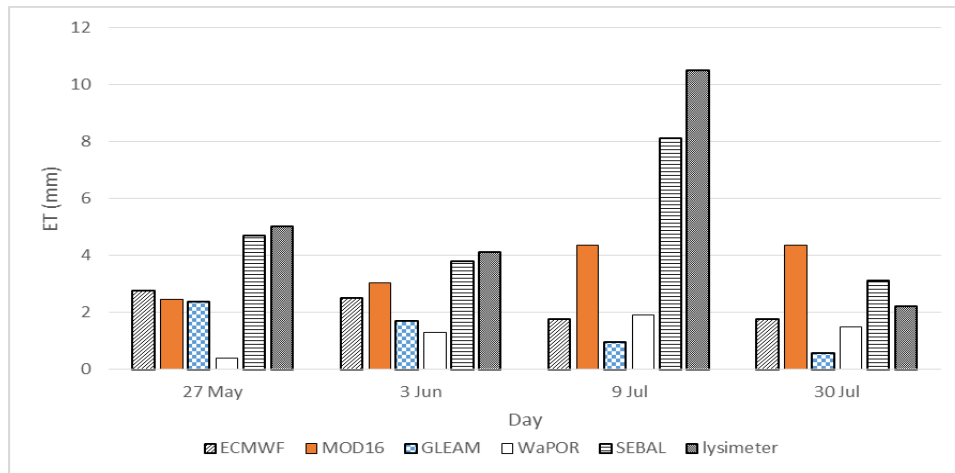
### مقایسه نتایج ET محصولات جهانی و الگوریتم SEBAL با داده‌های لایسیمتر

نتایج داده‌های اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه لایسیمتری، داده‌های محاسبه‌شده در نقشه‌های تولیدی به روش الگوریتم SEBAL اصلاح‌شده و اطلاعات خروجی از نقشه‌های تبخیر و تعرق محصولات جهانی ECMWF، MOD16، GLEAM و سامانه WaPOR در شکل ۴ نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد مقادیر لایسیمتر با مقادیر محاسبه‌شده الگوریتم SEBAL وجوه تشابه قابل قبولی دارد. در بین محصولات جهانی نیز مقادیر



شکل ۳. تفاوت ارتفاعی مقادیر بارش و تبخیر و تعرق سالانه در اراضی دیم در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ میلادی





شکل ۴. مقایسه مقادیر ET محصولات جهانی و الگوریتم SEBAL با مقادیر لایسیمتر تبریز در سال ۲۰۱۰

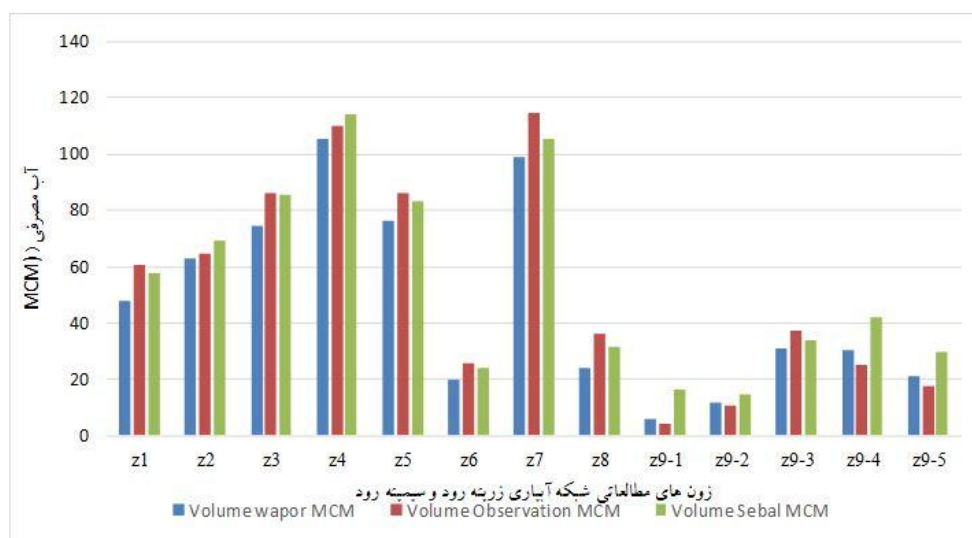
مقایسه با استفاده از مقادیر تخصیص یافته برای شبکه آبیاری زهکشی زربینه رود و سیمینه رود حوضه آبریز سیمینه رود و زربینه رود با مساحتی معادل ۱۷۵۶۳ کیلومتر مربع، بزرگ‌ترین زیرحوضه سه رقمی حوضه آبریز دریاچه ارومیه است که حدود ۳۴ درصد از کل مساحت این حوضه آبریز را در بر می‌گیرد و قسمت عمده آن در استان آذربایجان غربی و بخش کوچکی از آن در استان‌های آذربایجان شرقی و کردستان واقع شده است. در گزارشی که شرکت مهندسی مشاور یکم برای ارائه راهکارهایی به منظور کاهش ۴۰ درصدی مصرف آب کشاورزی در این حوضه منتشر کرده است، حوضه یادشده به چندین منطقه مطالعاتی بر اساس وضعیت شبکه آبیاری زهکشی، نوع کشت و نوع آبرسانی و همین‌طور وضعیت هیدرولوژیک منطقه تقسیم شده است [۲۱]. در این گزارش برای هر یک از مناطق مطالعاتی میزان مصرف آب کشاورزی با توجه به تخصیص آب برآورد شده است. با توجه به اینکه محصول تبخیر و تعرق WaPOR هم از نظر تفکیک مکانی و هم از نظر توزیع مکانی الگوی بهتری نسبت به محصولات دیگر دارد، در این قسمت مقادیر تبخیر و تعرق محصول WaPOR و الگوریتم SEBAL با مقادیر مشاهداتی در بازه زمانی سال ۱۳۹۲-۱۳۹۳ مقایسه شده است. برای این کار ابتدا آب مصرفی هریک از زون‌های مطالعاتی از طریق مقادیر تبخیر و تعرق الگوریتم SEBAL و WaPOR محاسبه شد تا برای مقایسه با مقادیر مشاهداتی مهیا شوند. مقادیر آب مصرفی هریک از دو روش یادشده در مقایسه با مقادیر مشاهداتی در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد هم مقادیر تبخیر و تعرق محصول

و هم الگوریتم SEBAL از نزدیکی خوبی با مقادیر مشاهداتی برخوردارند. شاخص RMSE تقسیم بر میانگین مقادیر مشاهداتی (درصد خطا) برای محصول WaPOR و الگوریتم SEBAL به ترتیب برابر ۱۶ و ۱۴ درصد به دست آمد که البته محصول WaPOR نسبت به مقادیر مشاهداتی کم‌تخمین (Underestimate) و الگوریتم SEBAL نسبت به مقادیر مشاهداتی بیش‌تخمین (Overestimate) است، ولی در مجموع میزان اختلاف آنها با مقادیر مشاهداتی در این مناطق قابل قبول ارزیابی می‌شود. نکته مهمی که باید در این تحلیل به آن اشاره کرد این است که احتمالاً میزان آب مصرفی این مناطق از مقادیر مشاهداتی باید بیشتر باشد چراکه کشاورزان معمولاً جدا از مقادیر تخصیص یافته ممکن است از چاه‌های غیرمجاز نیز برای آبیاری استفاده کرده باشند که قاعدتاً در این مقادیر مشاهداتی در نظر گرفته نشده است. پس با در نظر گرفتن این نکته، الگوریتم SEBAL برتری محسوسی نسبت به محصول WaPOR در تخمین مقادیر آب مصرفی شبکه آبیاری زهکشی زربینه رود و سیمینه رود داشته است.

در این بررسی، برخی روش‌های موجود برای دست‌یابی به مقادیر تبخیر و تعرق واقعی تشریح شد. همان‌طور که اشاره شد، هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند. روش‌هایی مانند استفاده از تبخیر و تعرق مرجع به دلیل نقطه‌ای بودن آن کاربرد چندانی ندارند. برای بررسی محصولات آماده جهانی نیز، تبخیر و تعرق ماهانه در محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی با استفاده از داده‌های ECMWF، MOD16، GLEAM و WaPOR استخراج و با نتایج

خیلی کمتر از الگوریتم SEBAL برآورد می‌کند. مقایسه نتایج تبخیر و تعرق GLEAM با الگوریتم SEBAL در سال ۲۰۱۰ نیز نشان داد در بیشتر ماه‌ها اختلاف زیادی بین این دو لایه دیده می‌شود و فقط در مجموع تبخیر و تعرق سالانه نزدیکی خوبی با یکدیگر دارند. مقایسه نتایج تبخیر و تعرق پایگاه داده WaPOR با الگوریتم SEBAL نیز نشان داد نقاط بیشینه در نقشه‌های اختلاف تبخیر و تعرق الگوریتم SEBAL و سامانه WaPOR مناطقی هستند که در نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، به عنوان مراتع معرفی شده‌اند. خلاصه‌ای از مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق واقعی در جدول ۲ گزارش شده است.

الگوریتم SEBAL مقایسه شدند. نتایج این مقایسه در سال ۲۰۱۰ میلادی نشان می‌دهد در ماه‌های آوریل و می مقادیر تبخیر به دست آمده از ECMWF اندکی بیشتر از نتایج تبخیر و تعرق الگوریتم SEBAL است که در ماه‌های گرم، این روند عکس شده و نتایج SEBAL مقادیر بیشتری را نسبت به ECMWF نشان می‌دهند؛ به طوری که در ماه سپتامبر این اختلاف به حدود ۳۵ میلی‌متر می‌رسد. در سال ۱۹۹۵ میلادی نیز روند موجود در ماه‌های مختلف یکسان بوده، ولی اختلاف در مقادیر، به خصوص در ماه‌های مارس تا می مشاهده می‌شود. مقایسه نتایج تبخیر و تعرق MOD16 و الگوریتم SEBAL نیز نشان می‌دهد محصول MOD16 در بیشتر ماه‌ها و بیشتر نقاط، مقادیر ET را



شکل ۵. مقایسه مقادیر آب مصرفی مشاهداتی با الگوریتم SEBAL و محصول WaPOR

جدول ۲. مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق واقعی

دقت از نظر مقداری	دقت در توزیع مکانی	عدم وابستگی به اقلیمی خاص	سهولت در اجرا	دسترسی به ورودی‌ها	پوشش زمانی	تفکیک مکانی	پایه فیزیکی و فرضیات	روش	
خوب	متوسط	ضعیف	خوب	خوب	متوسط	-	متوسط	SEBAL	
-	-	ضعیف	ضعیف	ضعیف	متوسط	-	ضعیف	SEBS	بیلان انرژی
-	-	ضعیف	متوسط	متوسط	متوسط	-	ضعیف	S-SEBI	سطح
-	-	خوب	ضعیف	خوب	خوب	-	خوب	ETLook	
ضعیف	ضعیف	ضعیف	خوب	خوب	متوسط	ضعیف	ضعیف	ETr	گیاه مرجع
ضعیف	ضعیف	ضعیف	خوب	-	متوسط	متوسط	متوسط	MOD16	
متوسط	ضعیف	ضعیف	خوب	-	خوب	ضعیف	خوب	ECMWF	محصولات
ضعیف	خوب	خوب	خوب	-	ضعیف	خوب	خوب	WaPOR	آماده
ضعیف	ضعیف	ضعیف	متوسط	-	خوب	ضعیف	متوسط	GLEAM	

Africa. International Journal of Agriculture and Environmental Research. 2018; 22:2455-6939

- [5]. Zhang K, Kimball JS, and Running SW. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. WIREs Water. 2016;3: 834–853.
- [6]. Kjaersgaard J H, Allen RG, Garcia M, Kramber W & Trezza, R. Automated selection of anchor pixels for landsat based evapotranspiration estimation. In World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers (pp. 1-11).
- [7]. Bastiaanssen, W, Van der Wal T, and Visser T. Diagnosis of regional evaporation by remote sensing to support irrigation performance assessment, Irrig. Drain. Syst. 1996; 10(1), 1–23
- [8]. Allen R, Tasumi M, and Trezza R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model, J. Irrig. Drain. Eng. 2007;133(4), 380–394.
- [9]. Bagheri Haroni, MH, Evaluating remote sensing to estimate water balance in regional scale harvest ground water Emphasizing the net purification of groundwater (case study: Urmia Lake basin), M.Sc. thesis, TMU university, 2011. [Persian]
- [10]. Droogers PW, Immerzeel W, and Lorite IJ. Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations, Agric. Water Manage. 2010; 97, 1351–1359
- [11]. Hu G, Jia, L & Menenti M. Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011. Remote Sensing of Environment. 2015; 156, 510-526.

- [12]. Zhao LL, Ronglin, T, Zhengming W, Yuyun B, Chenghu Z, Bohui T, Guangjian Y, et al. A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data. Sensors, 2009; 9:3801-3853.
- [13]. Remote Sensing Research Center (RSRC), Estimation of evapotranspiration, costs and the amount of water saving in agriculture (case study: Urmia Lake basin for 2010 ), EWRC in Sharif university of Technology, 2015. [Persian]
- [14]. Su Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes SEBS-The Surface Energy Balance. Hydrology and Earth System Sciences. 2002;6(1): 85-100.
- [15]. Martens B, Miralles DG, Lievens H, van der Schalie R, de Jeu RAM, Fernández-Prieto D, et al. N.E.C: GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture, Geoscientific Model Development. 2018;10, 1903–1925.

## نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، استفاده از محصولات آماده تبخیر و تعرق نیز به دلیل بومی‌سازی نشدن الگوریتم‌های استفاده‌شده و همین‌طور عدم واسنجی در مکان‌های مختلف، توصیه نمی‌شود. بنابراین، همچنان برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور در اولویت کار پژوهشگران قرار دارد. در بین روش‌های موجود، روش ET Look پایه فیزیکی بهتری از خود نشان می‌دهد. امتیازهای این روش همچون در نظر گرفتن رطوبت خاک، عدم محدودیت در روزهای ابری، عدم محدودیت در اقلیم‌های مختلف و کاربرد در مناطق وسیع، بسیار درخور توجه است. البته، تجاری‌بودن این الگوریتم و دسترسی نداشتن کامل به ساختار محاسباتی این الگوریتم، امکان ارزیابی دقیق‌تر را فراهم نساخته است و همین‌طور محصول WaPOR که از الگوریتم ETLook استفاده می‌کند، به‌رغم داشتن توزیع مکانی مناسب، از نظر مقداری نسبت به داده‌های زمینی، مقادیر کمتری را برآورد می‌کند که گاه این اختلاف درخور توجه است. با در نظر گرفتن تمامی شرایط و محدودیت‌های برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌توان گفت که مناسب‌ترین گزینه استفاده از الگوریتم SEBAL اصلاح‌شده است که به‌رغم محدودیت‌های ساختاری و فیزیکی همچون عدم کاربرد در روزهای ابری، همچنان از نظر اجرایی برتری‌های درخور توجهی نسبت به سایر روش‌ها دارد.

## منابع

- [1]. Tang R, Li ZL & Tang B. An application of the T s–VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation. Remote Sensing of Environment. 2010;114, 540-551
- [2]. Inoue Y. Synergy of Remote Sensing and Modeling for Estimating Ecophysiological Processes in Plant Production. Plant Production Science. 2003;6:3–16.
- [3]. Gowda PH, Chavez J L, Colaizzi PD, Evett S, Howell T A, Tolk JA. ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. Irrigation Science. 2007;26:223-237.
- [4]. Ayoola O, Emmanuel O, Harald K, Frank A, Joel A, Salisu T, Luitpold H, Jan B. Comparison Of Sebal Estimated Heat Fluxes And Evapotranspiration Using Field And Remote Sensing Data In The Sudanian Savanna In West

- [16]. [www.fao.org/3/i7315en/I7315EN](http://www.fao.org/3/i7315en/I7315EN)
- [17]. Hatch U, Jagtap S, Jones J, Lamb M. Potential effects of climate change on agricultural water use in the southeast U.S. *Journal of the American Water Resources Association*. 1999;35 (6), 1551–1561.
- [18]. Allen R, Pereira LS, Raes D and Smith M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome. 1998; 300(9), D05109.
- [19]. <http://www.fao.org/in-action/remote-sensing-for-water-productivity/wapor/en/#/home>
- [20]. Wang Y, Yu P, Xiong W, Wang L. Water-Yield Reduction after Afforestation and Related Processes in the Semiarid Liupan Mountains, China. *American Water Resources Association*. 2008;44(5):1086-1097.
- [21]. Yekom Consulting engineering, Implementation of 40 percent reduction in agricultural water consumption in the Zarrine-Rud and Simin-e Hidro rivers basin (case study: Saen ghalee and miandoab), 2016. [Persian]