



ستاد احیای دریاچه ارومیه



دانشگاه صنعتی شریف
مرکز تحقیقات سنجش از دور (RSRC)

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

مدیر فنی

مصطفی جوادیان

نویسندگان

مصطفی جوادیان محسن قلیزاده فاطمه کردی مرسته طاهری محمد عبدلی

کد سند

OC11RN9605040

مرداد ۱۳۹۶



شناسه سند			
عنوان سند		بررسی روش های مختلف برآورد تبخیر و تعرق واقعی	
نوع سند	گزارش فنی (TR) ☐	خلاصه مدیریتی (ES) ☐	پروپوزال (PR) ☐
	یادداشت تحقیقی (RN) ☒	یادداشت فنی (TN) ☐	مقاله (AR) ☐ خروجی غیررسمی (RM) ☐
کد سند	RN -۹۶-۱۱		
شماره قرارداد			
تاریخ قرارداد	۱۳۹۶		
کارفرما	ستاد احیای دریاچه ارومیه		
گروه فنی	بهداد چهره‌نگار		
مدیر فنی طرح	مصطفی جوادیان		
کارشناسان فنی طرح	مصطفی جوادیان، محسن قلیزاده، فاطمه کردی، مرسته طاهری، محمد عبدلی		
تاریخ انتشار	۱۳۹۶		
ویرایش	دوم		

تعریف	نوع سند
Peer review شده با فرایند داوری خیلی دقیق و جدی و دارای محتوی علمی مفصل و ویرایش شده ادبی و فنی	گزارش فنی (TR)
همانند گزارش فنی است با این تفاوت که مطالب مفصل نبوده و داوری جدی نشده است.	یادداشت فنی (TN)
خلاصه‌ای از یک کار تحقیقاتی یا مطالعاتی که برای مدیران و بارگذاری روی سایت تنظیم شده است.	خلاصه مدیریتی (ES)
جهت پاسخگویی به سوالات و ابهامات و یا آموزش و یادگیری از تکنیک ها و الگوریتم هایی که کاربرد آن برای مطالعات و پروژه های مرکز می باشد	یادداشت تحقیقی (RN)
نتیجه کار تحقیقی که تکمیل نشده و لذا داوری جدی نشده و ارزیابی عمیق و ویراستاری روی آن صورت نگرفته و به صورت غیر رسمی برای اطلاع عموم در اختیار قرار گرفته است.	خروجی غیر رسمی (RM)
پیشنهادیه انجام پروژه	پروپوزال (PR)
مقالات فارسی و انگلیسی	مقاله (AR)

پیش‌گفتار

قرارگیری دریاچه ارومیه در آستانه بحرانی زیست‌محیطی در مقیاس بین‌المللی در سال‌های منتهی به سال ۱۳۹۲ شمسی و مطالبات مردم شریف منطقه، هیأت محترم وزیران را بر آن داشت که در اولین جلسه خود در دولت یازدهم، طی مصوبه شماره ۴۹۵۰۳/۱۱۱۱۴۶ مورخ ۱۳۹۲/۰۵/۲۸، تشکیل کارگروه نجات دریاچه ارومیه را به تصویب رسانند که پس از بررسی‌های گروه‌های کارشناسی، ۱۹ طرح اولویت‌دار جهت نجات دریاچه ارومیه در جلسه ۱۳۹۲/۰۷/۱۶ کارگروه نجات دریاچه ارومیه تصویب گردید.

به منظور تمرکز و تسریع در روند اقدامات مرتبط با احیای دریاچه ارومیه، پیشنهاد تشکیل «کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه» در جلسه مورخ ۱۳۹۲/۱۱/۰۲ هیأت محترم وزیران مطرح و به موجب اختیارات اصل ۱۳۸ قانون اساسی، طبق مصوبه شماره ۴۹۵۰۳/۱۷۰۰۹۲ مورخ ۱۳۹۲/۱۱/۱۲، مقرر گردید که ریاست کارگروه بر عهده معاون اول محترم رئیس‌جمهور باشد و جناب آقای دکتر عیسی کلانتری به عنوان دبیر کارگروه و مدیر اجرایی احیای دریاچه ارومیه تعیین گردیدند. ۷ وزیر، ۲ معاون رئیس‌جمهور و ۳ استاندار حوضه آبریز نیز به عنوان اعضای این کارگروه معرفی شدند.

در گام بعدی، ستاد احیای دریاچه ارومیه ضمن ایجاد کمیته‌های تخصصی شش‌گانه، ۲۰ کارگروه تخصصی، انجام مطالعات تطبیقی و ایجاد شوراهای منطقه‌ای، ضمن برگزاری ۹۸ جلسه متنوع کارشناسی و مدیریتی و بهره‌گیری از نظرات بیش از ۷۵۰ نفر از متخصصان داخلی و بین‌المللی در بازه زمانی ۱۳۶ روزه (از ۱۳۹۲/۱۱/۰۲ تا ۱۳۹۳/۰۳/۱۷)، اقدام به تدوین و اجرای یک نقشه راه جامع در راستای احیای دریاچه ارومیه نمود که نقشه راه مذکور در جلسه مورخ ۱۳۹۳/۰۴/۰۸ به ریاست رئیس‌جمهور محترم جناب آقای دکتر روحانی، ارائه و مورد تصویب قرار گرفت و دستور شروع عملیات اجرایی راه‌کارهای مصوب توسط ایشان صادر گردید. کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه نیز طی مصوبه شماره ۴۹۵۰۳/۵۷۵۴۲ مورخ ۱۳۹۳/۰۵/۲۵ به طور رسمی مسئولیت مطالعه و طراحی طرح نجات دریاچه ارومیه را به دانشگاه صنعتی شریف سپرد.

در کنار دستاوردهای میدانی متعدد حاصل از طرح ملی نجات دریاچه ارومیه از جمله قرار گرفتن دریاچه در مسیر احیای پایدار و رفع مخاطرات بهداشتی و سلامتی، نقش محوری دانشگاه‌های ملی و استانی در کلیه امور مطالعه و پایش، شاخصه‌ای کم‌نظیر در پروژه بوده که توانسته است ضمن خلق تعاملی پویا و چندسویه با دستگاه‌های اجرایی، روح اقدامات علمی-پژوهشی را در کالبد همه پروژه‌های ذیل طرح، جاری نمایند.

لذا با هدف شفاف‌سازی اقدامات مطالعاتی و پژوهشی انجام شده و نیز به منظور فراهم شدن امکان استفاده مجامع علمی در رشته‌های مختلف دانشگاهی از آب (هیدرولوژی، آب زیرزمینی، هیدرولیک و هیدرودینامیک)، محیط‌زیست، اکولوژی و لیمنولوژی گرفته تا اقتصاد و جامعه‌شناسی از دانش بومی تولید شده در این طرح ملی، کلیه مطالعات انجام شده توسط دبیرخانه کارگروه در کتابخانه مرکزی دانشگاه صنعتی شریف در دسترس پژوهشگران محترم قرار گرفته است. یقیناً تدارک مطالعه و پژوهش در این منابع بومی ارزشمند که حاصل سال‌ها تلاش مجدانه محققان تراز اول داخلی و بین‌المللی بوده، سرآغازی خواهد بود برای تداوم نهضت علمی شکل گرفته و به زودی با بروز جهشی علمی در بستر استثنایی پدید آمده، شاهد شکوفایی برکات این گردش آزاد اطلاعات در اقصی نقاط کشور خواهیم بود.

کلیه تعبیر، نتایج و تفاسیری که در این اثر ذکر شده‌اند، محصول تلاش‌های نویسندگان (یا نویسندگان) آن بوده و لزوماً منعکس‌کننده دیدگاه‌های دبیرخانه کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه نیست. لذا مسئولیت صحت کلیه اطلاعات و نتایجی که توسط این اثر در دسترس عموم قرار می‌گیرد، به عهده نویسندگان (یا نویسندگان) آن می‌باشد.

چکیده

تبخیر و تعرق واقعی یکی از متغیرهای اصلی در محاسبه بیلان آب و انرژی سطح زمین محسوب می‌گردد. تاکنون روش‌های مختلفی برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی ارائه شده است. در این یادداشت تحقیقی به بررسی برخی از این روش‌ها پرداخته شده است که تعدادی از آن‌ها در حوضه آبریز دریاچه ارومیه ارزیابی شده‌اند. روش‌های کلاسیک تخمین تبخیر و تعرق عمدتاً به علت وابستگی زیاد به مکان و زمان کنار گذاشته شده‌اند. مراکز تحقیقاتی مختلفی نیز در دنیا اقدام به تولید محصولات آماده تبخیر و تعرق نموده‌اند که تاکنون نتوانسته‌اند همه انتظارات کاربران را برآورده کنند. لذا مدت‌هاست روش‌هایی که تبخیر و تعرق را با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور برآورد می‌نمایند، گزینه اول پژوهشگران شده است. الگوریتم‌های SEBAL، SEBS و S-SEBI که بر پایه معادله بیلان انرژی استوار هستند از جمله پرکاربردترین این روش‌ها بوده‌اند. فرضیات ساده‌کننده این روش‌ها که بسیاری از شرایط فیزیکی واقعی را در نظر نگرفته‌اند باعث شده است تا محققین همواره به دنبال توسعه این روش‌ها باشند. روش ETLook که از جدیدترین روش‌های برآورد تبخیر و تعرق می‌باشد توانسته است تا 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 WaPOR (تولید شده با ETLook) با مشاهدات زمینی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه باعث شده است تا استفاده از آن نیز چندان میسر و مناسب نباشد. با توجه به جمیع شرایط از جمله دارا بودن پایه فیزیکی مناسب، سهولت در اجرا و دقت می‌توان اذعان داشت که الگوریتم SEBAL مناسب‌ترین گزینه برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد.

کلمات کلیدی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه، تبخیر و تعرق، الگوریتم، سنجش‌ازدور، بیلان انرژی، محصول جهانی.

فهرست مطالب

۱- مقدمه.....	۱
۱-۱- سؤالات طرح.....	۱
۲-۱- هدف طرح.....	۱
۲- روش های برآورد تبخیر و تعرق واقعی.....	۲
۱-۲- روش های برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از فناوری سنجش از دور.....	۲
SEBAL-۱-۱-۲.....	۳
SEBS-۲-۱-۲.....	۵
S-SEBI-۳-۱-۲.....	۶
ET Look-۴-۱-۲.....	۷
۲-۲- برآورد تبخیر و تعرق واقعی توسط تبخیر و تعرق مرجع و ضریب محصول.....	۱۰
۳-۲- برآورد تبخیر و تعرق واقعی توسط محصولات آماده ی بین المللی.....	۱۲
۱-۳-۲- مرکز ECMWF و خصوصیات پایگاه دادهای آن.....	۱۴
۲-۳-۲- محصول MOD16 و خصوصیات کاربردی آن.....	۱۶
۳-۳-۲- محصول پایگاه داده GLEAM.....	۱۹
۴-۳-۲- سامانه WaPOR.....	۲۱
۳- نتایج.....	۲۵
۱-۳- مقایسه نتایج تبخیر تعرق ECMWF و الگوریتم SEBAL.....	۲۵
۲-۳- مقایسه نتایج تبخیر تعرق MOD16 و الگوریتم SEBAL.....	۲۸
۳-۳- مقایسه نتایج تبخیر تعرق GLEAM و الگوریتم SEBAL.....	۳۳
۴-۳- مقایسه محصولات سامانه WaPOR و مطالعات مرکز RSRC.....	۳۷
۱-۴-۳- مقایسه قدرت تفکیک زمانی و مکانی محصولات سامانه WaPOR و مطالعه مرکز RSRC.....	۳۷
۲-۴-۳- مقایسه تبخیر و تعرق محاسبه شده در سامانه WaPOR و مطالعات مرکز RSRC.....	۳۷
۳-۴-۳- تحلیل زمانی و مکانی تبخیر و تعرق.....	۴۴
۴-۴-۳- مقایسه مقادیر محاسباتی سنجندها با سامانه WaPOR.....	۴۶
۵-۴-۳- بررسی اختلاف نتایج در کاربری اراضی کشت دیم.....	۴۸
۶-۴-۳- مقایسه بهره وری زیرحوضه بر اساس مصرف آب.....	۵۱
۷-۴-۳- مقایسه تبخیر از سطح دریاچه توسط سامانه WaPOR و مطالعه مرکز RSRC.....	۵۳

- ۳-۴-۸- بارش ۵۴
- ۳-۵- مقایسه نتایج ET محصولات جهانی و الگوریتم SEBAL با داده های زمینی ۵۶
- ۳-۵-۱- مقایسه با استفاده از لایسیمتر ۵۶
- ۳-۵-۲- مقایسه با استفاده از مقادیر تخصیص یافته برای شبکه آبیاری زهکشی زرينهرود و سيمينهرود ۵۷
- ۴- جمع بندی و نتیجه گیری ۶۰
- ۵- مراجع ۶۳
- ۶- پیوست ۱ ۶۷

فهرست شکل ها

- شکل ۱- نمایش شماتیک بیلان انرژی در سطح زمین (ALLEN ET AL. 2002) ۳
- شکل ۲- روندنمای الگوریتم SEBAL (مرکز سنجش از دور دانشگاه شریف، ۱۳۹۴) ۴
- شکل ۳- ساختار شماتیک الگوریتم ETLOOK (WATERWATCH, 2013) ۹
- شکل ۴- فلوچارت الگوریتم تخمین ET روزانه از داده های MODIS (MU ET AL., 2013) ۱۷
- شکل ۵- ساختار شماتیک الگوریتم تبخیر تعرق پایگاه GLEAM ۲۰
- شکل ۶- تغییرات بهره وری آب به ازای تولید محصول ۲۲
- شکل ۷- لایه تبخیر تعرق ECMWF در محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه در ماههای MARCH تا JUNE سال ۲۰۱۰ ۲۶
- شکل ۸- لایه تبخیر تعرق ECMWF در محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه در ماه های JULY تا SEPTEMBER سال ۲۰۱۰ ۲۶
- شکل ۹- مقایسه نتایج ET ماهانه ECMWF و الگوریتم SEBAL در محدوده حوضه دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی ۲۷
- شکل ۱۰- مقایسه نتایج ET ماهانه ECMWF و الگوریتم SEBAL در محدوده حوضه دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵ میلادی ۲۸
- شکل ۱۱- مقایسه نتایج ET ماهانه MOD16 و الگوریتم SEBAL در محدوده حوضه دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی ۲۹
- شکل ۱۲- اختلاف لایه تبخیر تعرق MOD16 و الگوریتم SEBAL در ماه های APRIL تا JULY سال ۲۰۱۰ میلادی ۳۰
- شکل ۱۳- اختلاف لایه تبخیر تعرق MOD16 و الگوریتم SEBAL در ماه های AGUEST و SEPTEMBER سال ۲۰۱۰ میلادی ۳۱
- شکل ۱۴- مقایسه نتایج ET ماهانه MOD16 و الگوریتم SEBAL در محدوده اراضی زراعی و باغی حوضه دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی ۳۲
- شکل ۱۵- نمودار همبستگی نتایج ET بدست آمده از الگوریتم SEBAL و MOD16 ۳۳
- شکل ۱۶- ارتفاع تبخیر تعرق محصول پایگاه GLEAM (MAY تا AUGUST سال ۲۰۱۰ میلادی) ۳۴
- شکل ۱۷- ارتفاع تبخیر تعرق محصول پایگاه GLEAM (SEPTEMBER تا DECEMBER سال ۲۰۱۰ میلادی) ۳۵
- شکل ۱۸- مقایسه نتایج ET ماهانه GLEAM و الگوریتم SEBAL در سال ۲۰۱۰ ۳۶
- شکل ۱۹- نقشه برآورد تبخیر و تعرق توسط سامانه WAPOR و مرکز RSRC (سال ۲۰۱۰) ۳۹
- شکل ۲۰- نقشه برآورد تبخیر و تعرق توسط سامانه WAPOR و مرکز RSRC (سال ۲۰۱۴) ۴۰
- شکل ۲۱- اختلاف مکانی محصولات تبخیر و تعرق سامانه WAPOR و مرکز RSRC در حوضه دریاچه ارومیه (۲۰۱۰) ۴۱
- شکل ۲۲- اختلاف مکانی محصولات تبخیر و تعرق سامانه WAPOR و مرکز RSRC در حوضه دریاچه ارومیه (۲۰۱۴) ۴۲
- شکل ۲۳- بررسی هیستوگرام برای نقشه های تبخیر و تعرق در سال ۲۰۱۴ میلادی - الف - هیستوگرام مربوط به مرکز RSRC - ب - ۴۳
- هیستوگرام مربوط به سامانه WAPOR ۴۴
- شکل ۲۴- متوسط مقادیر تبخیر و تعرق در حوض آبریز دریاچه ارومیه (۲۰۱۴ میلادی) ۴۵
- شکل ۲۵- نمودار میانگین ارتفاع تبخیر و تعرق در دشت میاندوآب (MODIS, LANDSAT و سامانه WAPOR) ۴۷
- شکل ۲۶- تفاوت ارتفاعی مقادیر بارش و تبخیر و تعرق سالانه در اراضی دیم در سال ۲۰۱۰ ۴۹

- شکل ۲۷- تفاوت ارتفاعی مقادیر بارش و تبخیر و تعرق سالانه در اراضی دیم در سال ۲۰۱۴ ۵۰
- شکل ۲۸- نقشه ناخالص بهره‌وری آب در حوضه دریاچه ارومیه (۲۰۱۰)..... ۵۱
- شکل ۲۹- نقشه ناخالص بهره‌وری آب در اراضی کشت آبی چهار دشت مهم حوضه دریاچه ارومیه (۲۰۱۰) ۵۲
- شکل ۳۰- مقایسه مقادیر ET محصولات جهانی و الگوریتم SEBAL با مقادیر لایسیمتر تبریز در سال ۲۰۱۰..... ۵۷
- شکل ۳۱- منطقه‌بندی بخشی از حوضه آبریز زرینه رود و سیمینه رود (مهندسین مشاور یکم، ۱۳۹۵)..... ۵۸
- شکل ۳۲- مقایسه مقادیر آب مصرفی مشاهداتی با الگوریتم SEBAL و محصول WAPOR ۶۰

فهرست جدول‌ها

جدول ۱- مشخصات سنجنده های ارائه‌دهنده رطوبت سطحی خاک.....	۸
جدول ۲- داده های دینامیک مورد نیاز در روش ET LOOK.....	۹
جدول ۳- داده های ایستای مورد نیاز در روش ET LOOK.....	۹
جدول ۴- محصولات آماده تبخیر و تعرق.....	۱۳
جدول ۵- پایگاه داده‌های قابل دانلود تارنمای ECMWF.....	۱۶
جدول ۶- خصوصیات ورودیهای مدل تبخیر تعرق GLEAM.....	۲۰
جدول ۷- مشخصات اطلاعات خروجی از سامانه WAPOR (تارنمای سامانه WAPOR).....	۲۳
جدول ۸- برنامه زمانبندی توسعه سامانه WAPOR.....	۲۵
جدول ۹- مقایسه اطلاعات خروجی از سامانه WAPOR و مرکز RSRC.....	۳۷
جدول ۱۰- متوسط اختلاف مکانی تبخیر و تعرق سالانه (بر حسب میلیمتر) در محدوده های ارتفاعی بین نتایج مرکز RSRC و سامانه WAPOR.....	۴۳
جدول ۱۱- متوسط تبخیر و تعرق اراضی کشاورزی به تفکیک زیر حوضه‌های مهم حوضه دریاچه ارومیه (میلیمتر).....	۴۶
جدول ۱۲- میزان تبخیر و تعرق میانگین (بر حسب میلیمتر) در حوضه دشت میاندوآب و همچنین اختلاف میان دو سنجنده لندست و مادیس با سامانه WAPOR (سال ۲۰۱۴ میلادی).....	۴۷
جدول ۱۳- مقایسه روش های محاسبه تبخیر دریاچه ارومیه در مرکز RSRC با سامانه WAPOR.....	۵۳
جدول ۱۴- مقادیر شاخص های آماری واسنجی مورد مطالعه در حوضه دریاچه ارومیه.....	۵۵
جدول ۱۵- آب مصرفی مشاهدتی مناطق منتخب حوضه آبریز زرينه رود و سيمينه رود در سال ۱۳۹۲-۱۳۹۳.....	۵۹
جدول ۱۶- مقایسه روش های مختلف برآورد تبخیر و تعرق واقعی.....	۶۲
جدول ۱۷- مشخصات محصولات سامانه WAPOR.....	۶۷

۱- مقدمه

از آنجا که توسعه اقتصادی، کشاورزی و اجتماعی هر منطقه‌ای متأثر از مدیریت صحیح منابع آبی آن می‌باشد، بنابراین برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی امری حیاتی و غیرقابل انکار است. تبخیر و تعرق از گیاه، خاک، مناطق شهری، جنگل و پوشش گیاهی طبیعی بیش‌ترین سهم مصرف آب را دارا می‌باشد. در این بین نیز، بیشترین مقدار مصرف آب مربوط به آبیاری زمین‌های کشاورزی است.

اطلاعات تبخیر و تعرق می‌تواند در راستای مدیریت آبیاری (Allen et al., 2007; Bastiaanssen et al., 1996)، پایش خشکسالی (Calcagno et al., 2007)، ذخیره واقعی آب (Seckler, 1996)، بیلان آب (Molden and Sakthivadivel, 1999)، تولید آب (Zwart et al., 2010)، تجارت آب مجازی (de Fraiture and Wichelns, 2010)، کالیبراسیون مدل (Immerzeel and Droogers, 2008)، کاربرد مدل هیدرولوژیکی (Droogers et al., 2010) و مدیریت آب‌های زیرزمینی (Ahmad et al., 2005) مورد استفاده قرار بگیرد. لذا پرداختن به روش‌هایی که تبخیر و تعرق واقعی را برآورد می‌نمایند در طیف وسیعی از مطالعات مربوط به منابع آب از اهمیت بالایی برخوردار است.

۱-۱- سؤالات طرح

سؤالاتی که این مطالعه سعی دارد تا به آن پاسخ دهد عبارتند از:

- چه روش‌هایی برای تخمین تبخیر و تعرق واقعی وجود دارد؟
- روش‌های تخمین تبخیر و تعرق واقعی به چه صورت دسته‌بندی می‌شوند؟
- مزایا و معایب هریک از این روش‌ها چیست؟
- چه تعداد محصول جهانی برای برآورد تبخیر/تعرق واقعی وجود دارد؟
- کدام یک از این محصولات در دسترس عموم قرار دارند؟
- خصوصیات این محصولات چیست و دقت آن‌ها به چه میزان است؟
- نسبت نتایج این محصولات با نتایج SEBAL و داده‌های زمینی در حوضه دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی چگونه است؟
- نتایج مقایسه مقادیر بارش توسط سامانه WaPOR و مطالعه مرکز RSRC به چه صورت است؟

۱-۲- هدف طرح

هدف این یادداشت تحقیقی، بررسی و مقایسه انواع روش‌های موجود برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه به منظور انتخاب روش بهینه می‌باشد.

۲- روش های برآورد تبخیر و تعرق واقعی

۲-۱- روش های برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از فناوری سنجش از دور

روش هایی که در گذشته برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی استفاده می شد، فقط در همان نقطه که اندازه گیری صورت پذیرفته معتبر بوده اند. لذا با توجه به اهمیت تبخیر و تعرق در مطالعات مختلف، لازم است تا روش هایی که از توزیع مکانی خوبی برای محاسبه تبخیر و تعرق برخوردار می باشند بهره گرفت (Dominique et al., 2005). با توسعه ی ماهواره های سنجش از دور، استفاده از تصاویر ماهواره ای به دلیل پوشش وسیع مکانی، قدرت تفکیک بالا، هزینه کم و آرشیو زمانی غنی تصاویر ماهواره ای رشد چشمگیری داشته است. از اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی، سنجش از دور در تخمین تبخیر و تعرق نیز به کار گرفته شده است. تا کنون روش های مختلفی برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی بر مبنای داده های سنجش از دور به کار گرفته شده است.

روش های مختلفی جهت تخمین تبخیر-تعرق مرجع و گیاه با استفاده از تصاویر ماهواره ای توسعه یافته است که هریک دارای پیچیدگی های خاص خود می باشد. به طور کلی این روش ها را می توان در چهار گروه زیر طبقه بندی کرد:

- روش های مستقیم تجربی

- روش های مبتنی بر شاخص های گیاهی

- روش های قطعی

- روش های مبتنی بر بیلان انرژی

به علت کاربرد بیش تر روش های مبتنی بر بیلان انرژی، در این مطالعه بر روی این روش ها تمرکز شده است. الگوریتم روش های مبتنی بر بیلان انرژی سطح (Surface Energy Balance) بر ترکیب مدل های تجربی و فیزیکی با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده، استوار می باشد؛ بنابراین بیشتر مدل های کاربردی با استفاده مستقیم از تصاویر ماهواره ای میزان اختلاف دمای هوا و دمای زمین را محاسبه و به طور غیر مستقیم تبخیر تعرق گیاه را محاسبه می نمایند (Inoue, 2003).

به طور کلی روش های مبتنی بر بیلان انرژی سطح (SEB) را می توان به سه گروه تقسیم بندی کرد:

الف- روش های تک منبعی

ب- روش های دو منبعی

ج- روش های ذوزنقه ای یا مثلثی

ویژگی بارز روش های تک منبعی یکپارچه فرض کردن سطح زمین است. در این روش ها تنها از یک مقاومت آئرو دینامیک در فرآیند انتقال آب-گرما استفاده و فرض می شود تمامی سطح، تحت تأثیر دما و رطوبت قرار می گیرد. روش هایی همچون SEBAL، SEBS، METRIC و SEBI از جمله الگوریتم های معمول تک-منبعی می باشند. این روش ها بر پایه مقایسه بین محدوده خشک و تر بنا نهاده شده اند تا میزان ET را برای هر پیکسل تصویر جداگانه و از روی ضریب تبخیر به همراه پارامترهای سطحی به دست آمده از داده های سنجش از دور و مقادیر به دست آمده از اندازه گیری های زمینی در سطح محلی یا منطقه ای به دست آورند (Gowda et al, 2007).

روش های دو منبعی، سطح زمین را به دو بخش دارای پوشش گیاهی و فاقد آن تقسیم کرده و معادله بیلان انرژی سطح را برای هر بخش به طور جداگانه محاسبه می نمایند. از جمله این روش ها می توان به TSM، TSTIM، DTD و ETLook اشاره کرد.

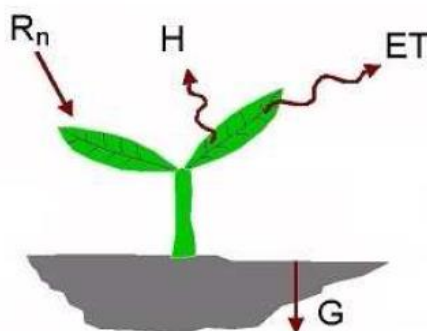
در این یادداشت تحقیقی، از روش های تک منبعی، الگوریتم های SEBAL، SEBS و S-SEBI و از روش های دو منبعی به الگوریتم ETLook پرداخته شده است که در ادامه تشریح می شوند.

SEBAL-۱-۱-۲

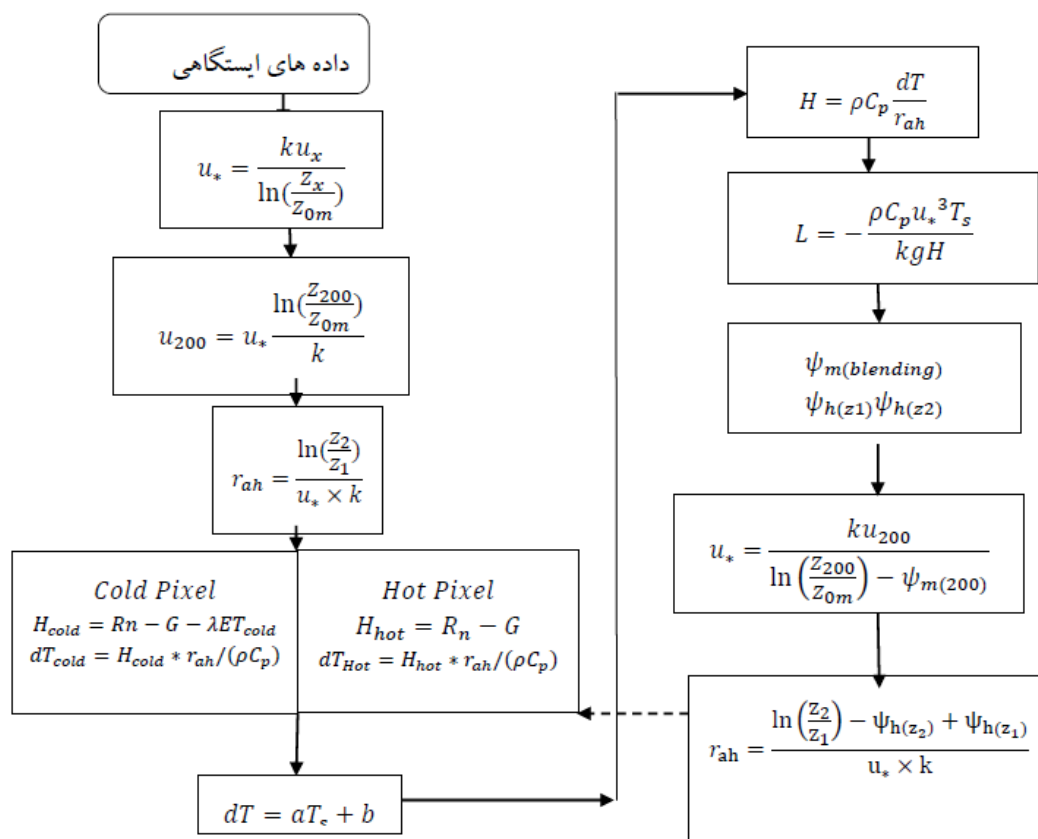
الگوریتم SEBAL با به کارگیری تصاویر ماهواره ای و داده های هواشناسی جهت تخمین بیلان انرژی در سطح (رابطه ۱)، ابتدا شار گرمای تبخیر برای هر پیکسل تصویر را به صورت لحظه ای (برای زمان دریافت تصویر) محاسبه و سپس برای گام های زمانی روزانه و ماهانه تعمیم می دهد.

$$\lambda ET = R_n - G - H$$

در این رابطه λET شار گرمای نهان تبخیر و تعرق ($W.m^{-2}$)، R_n شار تشعشع خالص در سطح زمین ($W.m^{-2}$)، G شار گرمایی زمین ($W.m^{-2}$) و H شار گرمای محسوس به سمت جو ($W.m^{-2}$) می باشند. شکل شماتیک و روندنمای الگوریتم SEBAL به ترتیب در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمایش شماتیک بیلان انرژی در سطح زمین (Allen et al. 2002)



شکل ۲- روندنمای الگوریتم SEBAL (مرکز سنجش از دور دانشگاه شریف، ۱۳۹۴)

این روش محدودیت هایی نیز دارد؛ از جمله ای این محدودیت ها می توان به عدم توانایی این روش در روزهای ابری اشاره کرد که برای برخی مناطق می تواند محدودیت بزرگی به شمار رود. محدودیت دیگر این روش مربوط به نحوه انتخاب پیکسل گرم و سرد است. اکثر روش های انتخاب پیکسل گرم و سرد به صورت کیفی و بصری می باشند که همین امر باعث وابستگی زیاد این روش به نحوه انتخاب پیکسل گرم و سرد شده است (Zhang et al., 2016). البته روش های نوینی برای اتوماسیون نحوه انتخاب پیکسل گرم و سرد نیز پیشنهاد شده است (Kjaersgaard et al., 2009). همین طور عدم توانایی این روش در تخمین تبخیر و تعرق در مناطق کوهستانی نیز به ضعف های ساختاری این روش افزوده است.

این الگوریتم در مرکز سنجش از دور دانشگاه شریف تحت عنوان SUTSEBAL توسعه داده شده و برخی از ضعف های این الگوریتم همچون عدم کاربرد در مناطق کوهستانی را تا حدی پوشش داده است. درواقع الگوریتم SUTSEBAL ترکیبی از روش های SEBAL، METRIC و SEBS می باشد.

SEBS-۲-۱-۲

اساس الگوریتم SEBS نیز بر مبنای معادله بیلان انرژی بنا نهاده شده است (رابطه (۱)). در این الگوریتم با محاسبه مقدار شار لحظه‌ای گرمای نهان تبخیر به عنوان باقیمانده رابطه (۱)، برای هر پیکسل تبخیر-تعرق لحظه‌ای و روزانه محاسبه می‌گردد.

مقدار تابش خالص خورشیدی از رابطه (۲) قابل محاسبه است.

$$R_n = (1-\alpha)R_{s\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1-\varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

که در آن α آلبیدوی سطح، ε_0 گسیلندگی^۱ سطح، $R_{s\downarrow}$ تابش فرودی طول موج کوتاه، $R_{L\downarrow}$ تابش فرودی طول موج بلند، $R_{L\uparrow}$ تابش خروجی طول موج بلند است.

شار گرمایی خاک (G) میزان ذخیره‌سازی گرما در خاک و گیاه، در اثر انتقال می‌باشد. این متغیر با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$G_0 = R_n \cdot [\Gamma_c + (1-f_c) \cdot (\Gamma_s - \Gamma_c)] \quad (3)$$

که در آن، نسبت شار حرارتی خاک به تابش خالص^۲، برای مناطق با پوشش گیاهی کامل $\Gamma_c = 0.05$ و برای خاک لخت $\Gamma_s = 0.315$ ، فرض می‌شود و f_c کسر پوشش گیاهی^۳ است.

شار گرمای محسوس (H) برابر با مقدار گرمای منتقل شده به هوا، به دلیل اختلاف دما، به صورت همرفت است. در مدل SEBS این متغیر از یک روند تکراری بین سه رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$u = \frac{u_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z-d_0}{z_{0m}}\right) - \Psi_m\left(\frac{z-d_0}{L}\right) + \Psi_m\left(\frac{z_{0m}}{L}\right) \right] \quad (4)$$

$$\theta_0 - \theta_a = \frac{H}{ku_* \rho C_p} \left[\ln\left(\frac{z-d_0}{z_{0h}}\right) - \Psi_h\left(\frac{z-d_0}{L}\right) + \Psi_h\left(\frac{z_{0h}}{L}\right) \right] \quad (5)$$

$$L = \frac{\rho C_p u_*^3 \theta_v}{kgH} \quad (6)$$

که در معادلات بالا، u_* سرعت اصطکاک (m/s)، ρ چگالی هوا (kg/m^3)، $k = 0.41$ ثابت ون کارمن^۴، d_0 ارتفاع جابجایی صفر (m)، z_{0m} ارتفاع زبری برای جابجایی مومنتم (m)، θ_0 دمای پتانسیل سطح (K)، θ_a دمای پتانسیل هوا در ارتفاع z (K)، z_{0h} ارتفاع زبری (m) برای انتقال گرما، Ψ_m و Ψ_h توابع تصحیح پایداری برای

¹ Emissivity

² ratio of soil heat flux to net radiation

³ fractional canopy coverage

⁴ von Karman's constant

مومنتم و انتقال گرما محسوس^۱، L طول ابوخو و (m) ، g شتاب جاذبه زمین (m/s^2) و θ_v دمای عمودی پتانسیل در نزدیکی سطح زمین (K) است.

طول زبری گرما (z_{0h}) با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می شود:

$$z_{0h} = \frac{z_{0m}}{\exp(kB^{-1})} \quad (۷)$$

$$kB^{-1} = \frac{kC_d}{4C_t \frac{u_*}{u(h)} (1 - e^{-n_{ec}/2})} f_c^2 + 2 f_c^2 f_s^2 \frac{k \frac{u_*}{u(h)} \cdot \frac{z_{0m}}{h}}{C_t^*} + kB_s^{-1} f_s^2 \quad (۸)$$

که در معادله بالا $f_s = 1 - f_c$ است.

و در نهایت با محاسبه شار گرمای نهان تبخیر (λET_{inst}) ، مقدار تبخیر لحظه ای (در لحظه گذر ماهواره) محاسبه می شود.

$$E_{inst} = \frac{\lambda ET_{inst}}{\lambda * \rho_w} \quad (۹)$$

که در آن، E_{inst} تبخیر لحظه ای (m) ، λ گرمای نهان تبخیر (J/kg) و ρ_w چگالی آب (kg/m^3) است.

S-SEBI-۳-۱-۲

تئوری اصلی به کار رفته در روش S-SEBI بر پایه تفاوت میزان آلیدوی حاصل از ماکزیمم دمای سطح برای محدوده خشک و آلیدوی حاصل از حداقل 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 مزیت های اصلی این روش می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- غیر از پارامترهای دمای سطحی و میزان آلیدو که از داده های سنجش از دور به دست می آیند، برای به دست آوردن ضریب تبخیر مورد استفاده در این الگوریتم (EF) نیازی به اندازه گیری های اضافی زمینی نیست.
- در روش S-SEBI دمای سطح برای حالت های تر و خشک با تغییر میزان آلیدو تغییر می کند، در صورتی که در باقی روش ها همچون SEBAL تلاش بر این است تا دمایی ثابت را برای حالت های تر و خشک در نظر بگیرند.

به هر حال توجه به این نکته ضروری است که تصحیحات اتمسفری جهت اصلاح دمای سطح و میزان آلیدو به دست آمده از داده های سنجنده و همچنین تعیین دمایی خاص برای حالت های تر و خشک تنها برای یک

¹ stability correction functions for momentum and sensible heat transfer

² Obukhov length

محدوده خاص قابل اجراست، زیرا وضعیت جوی در سطوح وسیع به هیچ وجه ثابت نیست (Zhao et al., 2009).

۲-۱-۴- ET Look

محاسبات تبخیر و تعرق ذکر شده برپایه بیلان انرژی سطح است (Long and Singh, 2012; Mu et al., 2007; Price, 1990; Senay et al., 2007; Tang et al., 2009). بسیاری از مدل های بیلان انرژی نیازمند تابش مادون قرمز حرارتی گرفته شده از تصاویر بدون ابر و تصحیح شده به منظور تولید نقشه دمای سطحی زمین هستند (Jia et al., 2009). بدست آوردن تصاویر بدون ابر برای مناطق بزرگ و بارندگی زیاد چندان آسان نیست (Bastiaanssen and Bandara, 2001)؛ چراکه تابش مادون قرمز حرارتی در مقایسه با تابش مرئی و مادون قرمز نزدیک، نسبت به بخار آب موجود در اتمسفر حساس ترند (Lillesand and Kiefer, 2000). به طور کلی وجود ابر در تصویر به عنوان یک مانع، امری اجتناب ناپذیر است که خود سبب کاهش دقت در نتایج می شود؛ بنابراین در کنار الگوریتم هایی که به آن اشاره شد باید به دنبال الگوریتمی بود که مشکل ابری بودن در آن برطرف شده باشد. در میان الگوریتم های ارائه شده، الگوریتم ETLook دارای این مزیت بوده که در ادامه تشریح خواهد شد. الگوریتم ETLook برای محاسبه بیلان انرژی سطح به جای استفاده از دمای سطح، رطوبت خاک استخراج شده از سنسور مایکروویو غیرفعال را مورد استفاده قرار می دهد. داده های مایکروویو به دلیل اینکه کمتر تحت تأثیر پوشش ابری قرار می گیرند (Fily et al., 1995; Ulaby et al., 1981) می توانند اطلاعات مربوط به زمان هایی که بارندگی اتفاق افتاده است را در اختیار قرار دهد؛ به عبارت دیگر سیگنال داده های سنسور مایکروویو غیرفعال، تحت تأثیر ابری بودن جو قرار نمی گیرد. لذا امتیازی که این الگوریتم نسبت به الگوریتم های پیشین دارد، محاسبه پارامتر تبخیر و تعرق در هر شرایط آب و هوایی (ابری) می باشد. همچنین این الگوریتم می تواند الگوی مکانی و زمانی (روزانه، ۸ روزه، ماهانه) تعادل انرژی موجود در سطح و تبخیر و تعرق واقعی را مورد ارزیابی قرار دهد و به منظور ساده سازی جریانات پیچیده رطوبت خاک، در بخش بالایی خاک غیراشباع در نظر گرفته نمی شود.

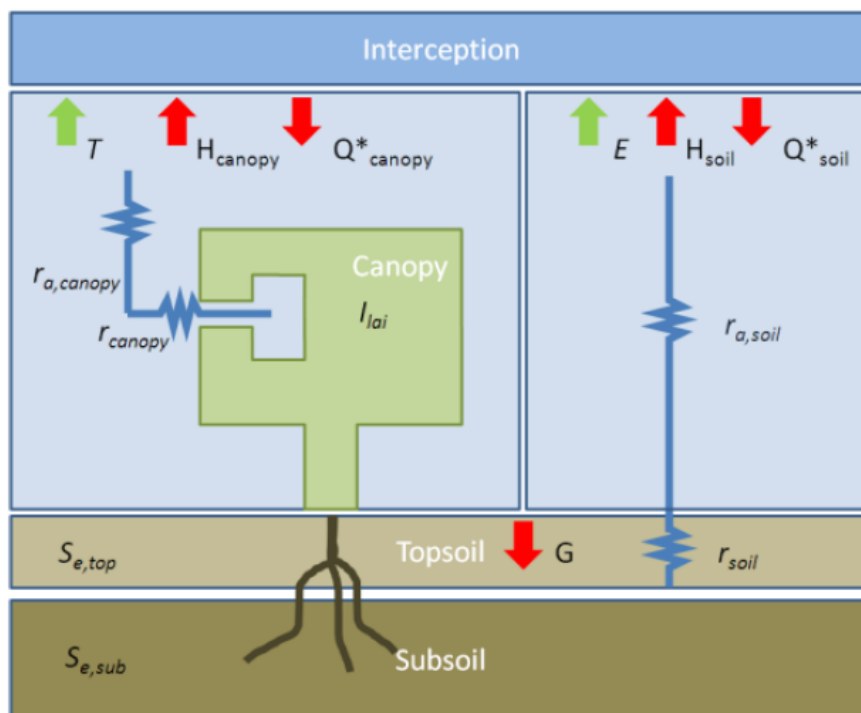
در الگوریتم ETLook، شاخص سطح برگ محاسبه شده به طور جداگانه هم در محاسبه شار تابشی مربوط به خاک و هم شار تابشی بخش کانوپی (تاج پوشش) لحاظ می شود. دو نوع مقاومت (مقاومت سطح و آئرودینامیکی) در معادله پنمن-مانتیش برای خاک و کانوپی (تاج پوشش) نیز در نظر گرفته شده است و خروجی های مدل شامل تبخیر خاک، تعریق گیاه و برگاب می باشد.

داده های مربوط به رطوبت خاک عموماً مربوط به عمق ۲ یا ۳ سانتی متری خاک هستند و هرچه تعداد سنسورهای مایکروویو غیرفعال افزایش یابد، تعداد داده های رطوبت خاک نیز افزایش می یابد. قدرت تفکیک مکانی سنجنده AMSR-E بسیار پایین (۲۵ کیلومتر) می باشد؛ بنابراین بهتر است لایه های مربوط به رطوبت خاک اندازه گیری شده توسط داده های راداری فعال که هم اکنون دسترسی به آنها آسان تر و رایگان نیز می باشد، جایگزین سنجنده AMSR-E شود. این امر به سهم خود فرصت خوبی برای تولید و توسعه مدل های تبخیر و تعرق براساس داده های رطوبت خاک برپایه داده های سنجنده های جدیدی همچون SMOS و یا ASCAT می باشد. مشخصات سه سنجنده ذکر شده به طور خلاصه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات سنجنده های ارائه دهنده رطوبت سطحی خاک

نام سنجنده	بازه زمانی قابل استفاده	تفکیک زمانی	تفکیک مکانی
AMSR-E	۲۰۰۲-۲۰۱۱	روزانه	۲۵ کیلومتری
SMOS	اکنون - ۲۰۱۰	۱-۳ روز	۳۰-۵۰ کیلومتری
ASCAT	۲۰۰۷-۲۰۱۴	روزانه	۱۱ کیلومتری

به طور کلی می توان گفت که الگوریتم ETLlook یک مدل دو منبعی است که برای محاسبه تبخیر از رطوبت خاک استفاده می کند و همچنین با معرفی معیارهایی جدید جهت محاسبه مقدار رطوبت خاک و دیگر پارامترها تبخیر و تعرق را محاسبه می نماید. شکل ۳ ساختار الگوریتم ETLlook را نشان می دهد. همین طور داده های دینامیک مورد نیاز این روش در جدول ۲ و داده های ایستای نیز در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- ساختار شماتیک الگوریتم ETLook (WaterWatch, 2013)

جدول ۲- داده های دینامیک مورد نیاز در روش ET Look

داده های روزانه رطوبت خاک سنجنده AMSR-E
بارش روزانه
تابش و مقدار بیشینه و کمینه دمای هوا با استفاده از داده SILO
سرعت باد
داده های ۱۶ روزه شاخص نرمال شده پوشش گیاهی سنجنده MODIS
داده های ۸ روزه آلبدو سنجنده MODIS

جدول ۳- داده های ایستای مورد نیاز در روش ET Look

نقشه های مالکیت
نقشه نوع خاک و داشتن داده های مربوط به ویژگی های فیزیکی خاک
مدل رقومی ارتفاع

این روش محدودیت هایی نیز دارد. به عنوان مثال قدرت تفکیک مکانی داده مربوط به رطوبت خاک پایین است (۲۵ کیلومتر). استفاده از روش های معمول جهت ریزمقیاس کردن باعث کاهش دقت در نتایج شده بنابراین باید با استفاده از روش های جدیدی که از پیچیدگی بیشتر ولی دقت بالاتری برخوردار بوده استفاده نمود که این امر خود نیازمند اطلاعاتی در مورد توپوگرافی و ویژگی های خاک می باشد.

محدودیت دیگر این است که برای دستیابی به رابطه رطوبت خاک بین خاک سطحی و عمقی، این الگوریتم باید در شرایط آب و هوایی و محیطی مختلف ارزیابی شود؛ به عبارت دیگر برخی از روابط موجود در این الگوریتم، برای منطقه ای که الگوریتم برای آن توسعه داده شده مورد ارزیابی واقع گردیده است.

۲-۲- 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 (ET_r) نام دارد. تبخیر و تعرق مرجع، نیاز تبخیری^۱ جو را مستقل از نوع گیاه، مرحله رشد و سیاست های مدیریت مزرعه بررسی می کند. مقادیر تبخیر و تعرق مرجع اندازه گیری شده یا محاسبه شده به دلیل اشاره به یک سطح مرجع خاص، امکان مقایسه را در مکان ها و فصول مختلف فراهم می کند (Hatch et al., 1999).

یکی از روش هایی که به طور گسترده برای برآورد ET_r استفاده می شود، رابطه Penman-Monteith است که به صورت زیر محاسبه می گردد (Allen et al., 1998).

$$ET_r = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \left(\frac{900}{T + 273} \right) \times U_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 \times U_2)} \quad (10)$$

در این رابطه، ET_r تبخیر و تعرق مرجع روزانه (mm.day^{-1})، R_n تشعشع خالص ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$)، G شار حرارتی خاک ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$)، T دمای میانگین هوا در ارتفاع ۲ متری ($^{\circ}\text{C}$)، U_2 میانگین سرعت باد (m.s^{-1})، e_s فشار بخار اشباع (kPa)، e_a فشار بخار واقعی (kPa)، Δ گرادیان فشار بخار اشباع در برابر دمای هوا ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) و γ ثابت سایکرومتریکی ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) می باشد. تشعشع خالص (R_n) بر حسب ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$)، مطابق رابطه زیر قابل محاسبه است (Allen et al., 1998).

$$R_n = \{R_{ns}\} - \{R_{nl}\} = \{(1 - \alpha) \times ((a_s + b_s \frac{n}{N}) R_a)\} - \{\sigma [\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2}] (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) (1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35)\} \quad (11)$$

^۱ Evaporative demand

در رابطه فوق، α آلبدو (بدون بعد)، a_s و b_s ثابت رگرسیون، $\frac{n}{N}$ مدت زمان نسبی تابش خورشید (بدون بعد)، R_a تشعشع خارج از محیط زمین ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$)، T_{min} و T_{max} دمای مطلق بیشینه و کمینه در طول زمان ۲۴ ساعت ($^{\circ}\text{K}$)، σ استفان بولتزمن ($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)، e_a فشار بخار واقعی (kPa)، R_s تشعشع خورشید (طول موج کوتاه) ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$) و R_{so} تابش خورشید در آسمان صاف ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$) است. شار حرارتی خاک (G) برای دوره های روزانه تا ۱۰ روز معادل صفر و برای دوره های ساعتی یا کوتاه تر در طول روز برابر با ۱۰ درصد R_n و در طول شب برابر با ۵۰ درصد R_n در نظر گرفته می شود.

فشار بخار اشباع (e_s)، فشار بخار واقعی (e_a) و گرادیان فشار بخار اشباع به ترتیب مطابق روابط (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) قابل محاسبه است (Allen et al., 1998):

$$e_s = 0.5 \times [e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})] ; \quad e^o(T) = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27T}{T + 237.3}\right] \quad (12)$$

$$e_a = \left(\frac{RH}{100}\right) \times e^o(T) \quad (13)$$

$$\Delta = \frac{2503 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)}{(T + 237.3)^2} \quad (14)$$

در روابط بالا، $e^o(T)$ فشار بخار اشباع در دمای T (kPa)، T دمای هوا ($^{\circ}\text{C}$) و RH رطوبت نسبی بر حسب درصد است.

همچنین داده های مورد نیاز برای تخمین ET_r به روش پنمن-مونتیت، مجموعه ای از داده های هواشناسی شامل دمای هوای میانگین، بیشینه و کمینه (درجه سانتی گراد)، رطوبت نسبی (درصد)، سرعت باد (متر بر ثانیه) و تعداد ساعات آفتابی (ساعت) است.

ضریب محصول (K_c)، ویژگی هایی از گیاه را در برمی گیرد که در پیش بینی مقدار تبخیر و تعرق استفاده می شوند. به عبارتی تأثیر تعرق گیاه و تبخیر خاک در یک ضریب محصول واحد دیده می شود (FAO Corporate Document Repository, 2017).

برای برآورد ضریب محصول، روش های زمینی و سنجش از دوری وجود دارد. در روش های زمینی بایستی در هر مرحله رشد گیاه ضریب محصول مجزایی برآورد شود. استخراج ضرایب محصولات به روش سنجش از دور، توسط روش شاخص های سبزینگی - تبخیر و تعرق مرجع (VI-ET_r) صورت می گیرد؛ به طوری که ابتدا شاخص های سبزینگی از تصاویر ماهواره ای استخراج شده و سپس از روی آن ضرایب محصول

به دست می آید. ضرایب محصول می تواند مربوط به شاخص های سبزیگی، تبدیل بازتاب های سطحی اندازه گیری شده در باندهای خاص طیف الکترومغناطیس به خصوص باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک باشد (Jackson et al., 1980; Bausch & Neale, 1987; Neale et al., 1989).

در نهایت تبخیر تعرق واقعی برای هر گیاه مشخص از رابطه زیر محاسبه می شود (Allen et al. 1998; Wright, 1982)

$$ET = K_c * ET_r \quad (15)$$

در عمل می توان در محدوده دشت یا یک حوضه آبریز، با محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق مرجع در مکان های مختلف به یک نقشه پهنه بندی مناسب از تبخیر و تعرق واقعی رسید. از جمله محدودیت های این روش می توان به عدم توزیع مکانی مناسب آن اشاره کرد. همین طور این روش نیاز به دانش بالایی از نوع کشت منطقه دارد.

۲-۳- برآورد تبخیر و تعرق واقعی توسط محصولات آمادهی بین المللی

در شرایط نبود اطلاعات دقیق تبخیر که می تواند با استفاده از اندازه گیری ها و یا اجرای مدل ها بدست آید، داده های جهانی تبخیر می توانند به عنوان یک جایگزین مناسب مورد استفاده قرار گیرند. محصولات، مدل ها و پایگاه های ارائه کننده تبخیر تعرق در جدول ۴ نشان داده شده است.

از بین محصولات موجود در جدول ۴، فقط ۵ محصول اول در دسترس عموم قرار دارند و از بین این ۵ محصول فقط ۴ محصول نخست در محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه دارای اطلاعات می باشند. سایر محصولات ناشی از مدل هایی می باشند که افراد مختلف صرفاً برای انجام یک کار تحقیقاتی خاص توسعه داده اند و خروجی های آن را در پایگاه خاصی عرضه نکرده اند.

جدول ۴- محصولات آماده تبخیر و تعرق

محصولات ET	معادلات حاکم	دقت مکانی (km)	دقت زمانی	پوشش مکانی	پوشش زمانی	مراجع
Mod16 (MODIS)	معادله Penman-Monteith	۱	۸ روزه، ماهانه و سالانه	جهانی	۲۰۰۰-۲۰۱۳	ntsg.umt.edu
ECMWF	معادله Penman-Monteith	۸۳	میانگین روزانه، ماهانه و سالانه	جهانی	از سال ۱۹۷۹ تاکنون	ecmwf.int
FAO (WaPOR)	الگوریتم ETLOOK	۰,۲۵	۱۰ روزه	آفریقا، خاورمیانه	۲۰۰۹ تاکنون	fao.org
GLEAM	معادله Priestley-Taylor	۲۸	روزانه	جهانی	۱۹۸۴ تا ۲۰۰۷	Miralles et al. (2011)
LSA-SAF MSG	SVAT	۵	۳۰ دقیقه ای، روزانه و ۸ ساعته	اروپا، آفریقا و امریکا	-	Hu et al. (2015)
ZHANG_E	معادله Penman-Monteith اصلاح شده	۸	ماهانه	جهانی	۱۹۸۳ تا ۲۰۰۶	Liu et al. (2016)
CHEN_ET	معادله بیلان انرژی	۵	ماهانه	جهانی	۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴	Chen et al. (2014)
JUNG_E	معادله تجربی	۵۵	ماهانه	جهانی	۱۹۸۱ تا ۲۰۱۱	Jung et al. (2010)
JRA55_E	مدل SIB	۶۰	۳ ساعته	جهانی	۱۹۵۸ تاکنون	Kobayashi et al. (2015)
MERRA_E	GEOS-5 Catchment LSM مدل	۱۱۱	۱ ساعته و ماهیانه	جهانی	۱۹۷۹ تاکنون	Lucchesi et al. (2012)
ERA1_E	مدل TESSEL	۵۵	۳ ساعته و روزانه	جهانی	۱۹۷۹ تاکنون	Berrisford et al. (2011)
GNOAH_E	معادله Penman-Monteith	۱۱۱	۳ ساعته	جهانی	۱۹۴۸ تاکنون	Rui et al. (2011)
GCLM_E	Monin-Obukhov similarity theory	۱۱۱	۳ ساعته	جهانی	۱۹۴۸ تاکنون	Rodell et al. (2004)
GMOS_E	Penman-Monteith	۱۱۱	۳ ساعته	جهانی	۱۹۴۸ تاکنون	Rodell et al. (2004)

در این قسمت به بررسی چهار داده جهانی تبخیر تعرق پرداخته شده است. یکی از مراکزی که پارامترهای مختلف آب و هوایی را در مقیاس جهانی تولید و در دسترس قرار می دهد، مرکز ECMWF است و پارامتر تبخیر، یکی از پارامترهای موجود در پایگاه داده های این مرکز می باشد. از طرفی لایه تبخیر تعرق به عنوان یکی از محصولات تولید شده از تصاویر سنجنده MODIS است که به طور رایگان در اختیار کاربران قرار گرفته است. همین طور محصول تبخیر تعرق واقعی پایگاه داده GLEAM نیز یکی دیگر از لایه های آماده جهانی موجود برای برآورد تبخیر تعرق واقعی است. جدیدترین پایگاه داده در دسترس در زمینه تبخیر تعرق نیز مربوط به پایگاه داده WaPOR می باشد که یکی از خروجی های آن لایه تبخیر تعرق واقعی می باشد. در این مطالعه سعی شده به خصوصیات تبخیر تعرق ارائه شده توسط این چهار مرجع پرداخته شود. در انتها نیز جهت به دست آوردن تخمینی از نسبت داده های فوق، داده های تبخیر تعرق از این چهار منبع در حوضه دریاچه ارومیه استخراج و با نتایج به دست آمده از الگوریتم SEBAL در سال ۲۰۱۰ میلادی مقایسه شده اند.

۲-۳-۱- مرکز ECMWF و خصوصیات پایگاه داده های آن

۲-۳-۱-۱- معرفی مرکز

مرکز اروپایی پیش بینی میان-مدت آب و هوا (ECMWF)^۱ یک سازمان مستقل میان دولتی است که توسط ۳۴ دولت حمایت می شود. ECMWF هم یک موسسه تحقیقاتی و هم یک موسسه خدمات کاربردی است که به دولت های عضو در تولید و ادغام پیش بینی های عددی مربوط به آب و هوا یاری می رساند. اهداف کلیدی ECMWF عبارتند از:

- تولید پیش بینی های عددی و پایش سیستم زمین
- انجام تحقیقات علمی و تکنیکی جهت ارتقای مهارت پیش بینی
- نگهداری و آرشیو نمودن داده های آب و هوایی
- جهت دستیابی به این اهداف، فعالیت های این مرکز عبارتند از:
- پیش بینی های عددی آب و هوا در مقیاس جهانی به صورت دو مرتبه در روز
- تحلیل کیفیت هوا
- پایش ترکیب اتمسفری

^۱ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

- پایش آب و هوا
- تحلیل سیکل اقیانوس ها
- پیش بینی هیدرولوژیکی

۲-۳-۱-۲- پایگاه داده های مرکز ECMWF

داده پیش بینی ها، تحلیل ها، باز تحلیل آب و هوا، پیش بینی های دوباره و چندین مدل در آرشیو این مرکز (تارنمای ECMWF، ۲۰۱۵) موجود می باشد. لازم به ذکر است مرکز ECMWF به صورت دوره ای از مدل های پیش بینی و سیستم های ادغام داده جهت بازتحلیل مشاهدات آرشیو شده و تولید پایگاه داده جهانی که توضیح دهنده شرایط اخیر اتمسفر، سطح زمین و اقیانوس ها باشد، استفاده می کند.

در تهیه کلیه پیش بینی ها و بازتحلیل ها از یک مدل عددی استفاده شده است. این مرکز، مدل اتمسفری و سیستم ادغام داده مختص به خود را به نام سیستم پیش بینی جامع (IFS) توسعه داده است. این مدل جامع شامل زیرمدل های دینامیک اتمسفر، روندهای فیزیکی مانند تشکیل ابرها و فرآیندهای دیگری در سیستم زمین که بر آب و هوا تأثیر می گذارد مانند ترکیب اتمسفری، محیط دریایی و روندهای زمین می باشد.

پیش بینی های انجام شده در این مرکز محدود به این مسئله است که اتمسفر بی نظم است (هرگز نمی توان حالت اولیه اتمسفر را به طور دقیق دانست) و اینکه مدل های عددی نیز نمی توانند به طور کامل قوانین فیزیکی حاکم بر روابط دینامیکی را نشان دهند. بسیاری از روندها که در مقیاس های کوچک اتفاق می افتند مانند تشکیل ابرها باید ساده سازی شوند. این بدان معناست که همه پیش بینی های انجام گرفته دارای برخی عدم قطعیت ها می باشند. روش هایی نیز جهت کمی نمودن این عدم قطعیت ها بکار گرفته شده است.

۳-۱-۳-۲ پایگاه داده های قابل دانلود ECMWF

پایگاه داده های قابل دانلود ECMWF در جدول ۵ نشان داده شده است (تارنمای ECMWF، 2015).

جدول ۵- پایگاه داده های قابل دانلود تارنمای ECMWF

DEMETER Project	پروژه های پیش بینی
ENSEMBLES project	
GEMS Reanalysis and Near Real-time	
MACC Reanalysis and Near Real-time	
TIGGE (2008- 2013)	
TIGGE LAM	
YOTC Global Reanalyses	بازتحلیل های جهانی
ERA-Interim (Jan 1979 - present)	
ERA-Interim/LAND (Jan 1979 - Dec 2010)	
ERA-40 (Sep 1957 - Aug 2002)	
ERA-15 (Jan 1979 - Dec 1993)	
ERA-20CM (Jan 1900 - Dec 2010): Climate Model Integration	
ERA-20C (Jan 1900 - Dec 2010): Reanalysis of the 20th-century using surface observations only	بازخوردهای مشاهداتی
ISPD v2.2	
ICOADS v2.5.1 with interpolated NOAA 20CR feedback	

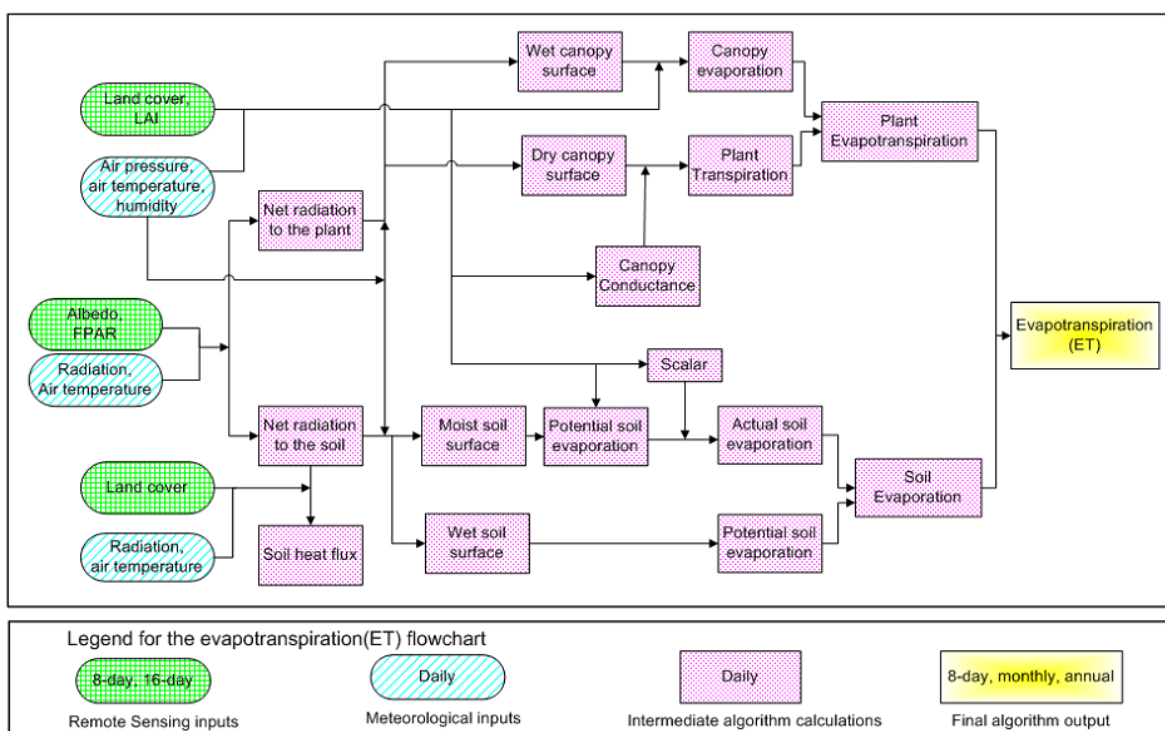
۳-۲-۲ محصول MOD16 و خصوصیات کاربردی آن

۱-۲-۳-۲ معرفی محصول MOD16 و بررسی الگوریتم آن

این محصول شامل داده های تبخیر تعرق (ET)، شار نهان تبخیر (LE)، تبخیر تعرق پتانسیل (PET) و شار نهان تبخیر پتانسیل (PLE) بوده و در سایت دانشگاه Montana (۲۰۱۵) قابل دانلود می باشد. وضوح مکانی آن ۱ کیلومتر مربع و با فواصل زمانی ۸ روزه، ماهانه و سالانه در اختیار کاربران قرار گرفته است. این محصول دوره زمانی ۲۰۱۳-۲۰۰۰ را پوشش می دهد و نتایج مربوط به سایر سال ها به تدریج تولید می گردد. در این مطالعه از محصول ماهانه استفاده شده است که در واقع مجموع ET را در دوره زمانی یک ماهه بیان می کند.

این محصول با استفاده از الگوریتم بهبود یافته Mu و همکاران (۲۰۱۳) تخمین زده شده است. این الگوریتم بر مبنای رابطه Penman-Monteith (Monteith, 1965) تولید شده است و از داده های روزانه هواشناسی و محصولات ۸ روزه خصوصیات گیاهی سنجنده MODIS به عنوان ورودی استفاده می کند. الگوریتم MOD16 در محاسبه ET از لحاظ زمانی، مجموع ET روزانه و شبانه را در نظر می گیرد. در یک مقطع عمودی، ET مجموع شارهای بخار آب از تبخیر خاک مرطوب، تبخیر از پوشش گیاهی مرطوب و تعرق گیاه از سطح گیاه خشک است. پارامتر ۸ روزه FPAR سنجنده MODIS، درصد پوشش گیاهی را جهت کمی کردن اینکه چقدر

از تابش خالص بین خاک و پوشش گیاهی تخصیص داده می شود، مشخص می کند. آلبدوی ۸ روزه و تابش خورشیدی روزانه رسیده به سطح زمین و دمای هوای روزانه، جهت محاسبه تابش خالص در سطح زمین و شار حرارتی خاک استفاده می شوند. دمای هوای روزانه، کمبود فشار بخار (VPD) و داده رطوبت نسبی و LAI^A روزه جهت تخمین انتقال گرما از روزنه گیاهان، مقاومت آیرودینامیکی، پوشش گیاهی مرطوب، شار حرارتی خاک و سایر متغیرهای زیست محیطی بکار می روند. لایه کاربری اراضی نیز جهت تعیین نوع پوشش گیاهی برای هر پیکسل، و پارامترهای ثابت مرتبط با هر پوشش گیاهی که در الگوریتم بکار رفته است در یک جدول مشاهده ای خصوصیات پوشش گیاهی (BPLUT) ذخیره می شوند. فلوچارت ارائه شده در شکل ۴، منطق حاکم بر تخمین ET را در محصول MOD16 نشان می دهد. همان گونه که مشخص است این الگوریتم با تفکیک هر پیکسل به خاک و گیاه به محاسبه تبخیر و تبخیر تعرق با استفاده از بیلان انرژی در هر دو پدیده پرداخته است.



شکل ۴- فلوچارت الگوریتم تخمین ET روزانه از داده های MODIS (Mu et al., 2013)

۲-۲-۳-۲- صحت سنجی نتایج تبخیر تعرق MOD16 در مطالعات سایر محققین

این محصول در بسیاری از نقاط دنیا صحت سنجی و کالیبره شده است. به طور مثال، Cleugh و همکاران (۲۰۰۷) الگوریتم پنمن-مونثیث و داده MODIS را جهت تخمین ET در استرالیا بکار گرفتند. Mu و همکاران (۲۰۱۱) این الگوریتم را تغییر دادند و از داده برج شار ایستگاه های Ameriflux جهت صحت سنجی محصول جهانی MOD16 استفاده کردند. سپس Kim و همکاران (۲۰۱۲) این محصول جهانی را با استفاده از ایستگاه های

Asiaflux صحت سنجی کردند. Jia و همکاران (۲۰۱۲) محصول ET سنجنده MODIS را در حوضه رودخانه Hai در گستره زمانی و مکانی ارزیابی کردند. در کلیه مطالعات فوق، عدم دقت هایی از جمله زیاد یا کم برآورد نمودن مشاهده شده است و رابطه ای بین برج شار و تخمین های تبخیر تعرق MOD16 مشاهده نشده است.

در مطالعه ای در سال ۲۰۱۴ میلادی در منطقه افریقای جنوبی با اقلیم نیمه خشک، داده های ماهانه و هشت روزه ET با اندازه گیری های زمینی (از طریق برج شار) در بازه زمانی ژانویه ۲۰۰۰ و دسامبر ۲۰۱۰ در دو منطقه بیابانی و درختزار مقایسه شده اند. در هر دو منطقه عدم هماهنگی زیادی در نتایج محصول و مقادیر اندازه گیری شده مشاهده شد که این عدم تشابه در سایت درختزار شدت بیشتری داشت. در منطقه بیابانی، اندازه گیری های زمینی ET عموماً مقادیر بالاتری را نسبت به MOD16 نشان می دهند، این مسئله بخصوص در ماه های گرم تابستان نسبت به ماه های سرد پررنگ تر است. صحت سنجی در سایت درخت زار نیز نشان می دهد MOD16 نتایج تبخیر تعرق را نسبت به اندازه گیری های زمینی بیشتر از مقدار واقعی برآورد می کند. این تفاوت ها در اندازه گیری های زمینی و مقادیر MOD16 می تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند خطا در داده های ورودی مدل پنمن-مونتیث، خطای اندازه گیری در برج شار، موقعیت نقطه ای اندازه گیری زمینی نسبت به اندازه پیکسل MODIS و همچنین محدودیت های الگوریتم که توسط Mu و همکاران (۲۰۱۱) اشاره شده است، باشد. این مطالعه به طور کلی به این نتیجه رسیده است که این محصول برای استفاده در مدیریت جامع منابع آب افریقای جنوبی دارای دقت مناسبی نمی باشد و باید محصولی بهبود یافته با استفاده از پارامترهای محلی توسعه داد.

داده های ورودی اصلی برای مدل سازی تبخیر تعرق MODIS شامل محصولات جهانی MODIS از جمله لایه کاربری زمین، آلبدو، شاخص سطح برگ (LAI)، درصد تابش جذب شده برای انجام فتوسنتز (FPAR) و داده های ایستگاهی است. این پارامترها محصولاتی بزرگ مقیاس هستند که عموماً برای مناطق نیمه خشکی مانند افریقای جنوبی که در معرض تولید خطای پیش بینی بیشتری برای ET هستند تأیید اعتبار نشده اند. بنابراین ارزیابی، صحت سنجی و در صورت نیاز بهبود داده های ورودی مثل لایه کاربری، FPAR و LAI بسیار مهم است. این کار می تواند در تعیین و مستندسازی خطای موجود در الگوریتم MOD16 کمک کند و مدل های تخمین پارامترهای محلی را برای یک سیستم جامع مدیریت آب توسعه دهد. تحلیل حساسیت نیز جهت تعیین متغیرهایی که تأثیر بیشتری بر ET خروجی دارند لازم به نظر می رسد.

مقایسه نتایج MOD16 با اندازه گیری های زمینی در سال ۲۰۱۰ میلادی نشان می دهد که کمترین همبستگی در طی فصل خشک به دست آمد که مشابه نتایج به دست آمده در سایر مناطق است و احتمالاً ناشی از عدم تشخیص تنش آبی گیاه با استفاده از تکنیک های سنجش از دور می باشد.

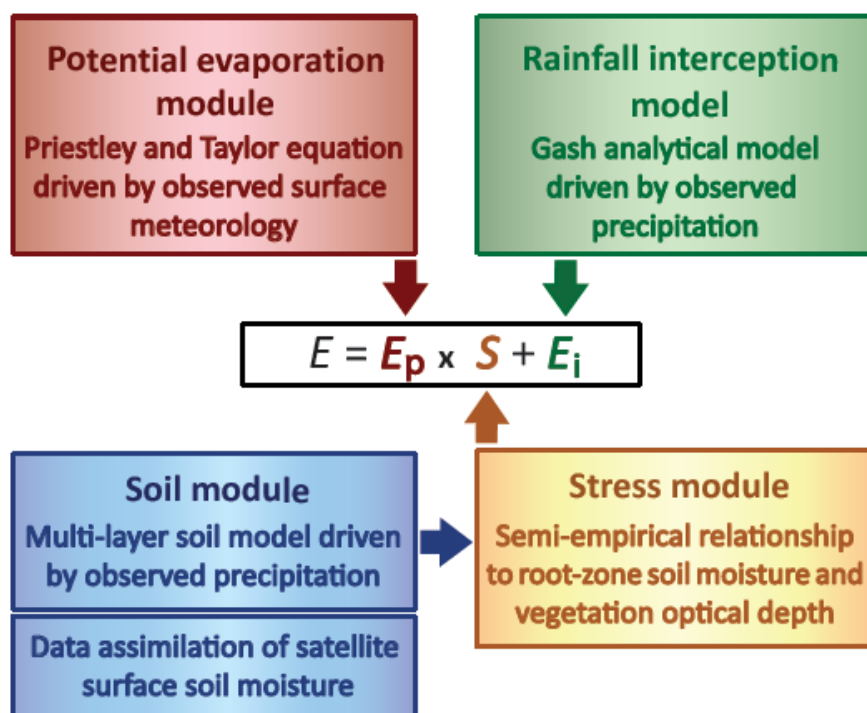
در تهیه MOD16 این فرض در نظر گرفته شده است که روزنه گیاه در طی شب بسته می شود، در صورتی که مطالعاتی مثل Musselman و Minnick باز بودن روزنه گیاهان را در طی شب گزارش کرده اند. این مسئله نیز می تواند منجر به کم برآورد کردن ET روزانه به علت عدم در نظر گرفتن تعرق شبانه شود (Ramoelo & et al., 2014).

۲-۳-۳- محصول پایگاه داده GLEAM

این پایگاه تحت عنوان Global Land Evaporation Amsterdam Model در دانشگاه های آمستردام هلند، Ghent بلژیک و آژانس فضایی اروپا (ESA) توسعه داده شده است و دارای محصولات مختلفی می باشد که عبارت اند از:

- تبخیر تعرق واقعی (Actual evapotranspiration)
 - تبخیر تعرق پتانسیل (Potential evapotranspiration)
 - برگاب (Interception loss)
 - تبخیر از خاک بدون پوشش (Bare-soil evaporation)
 - تصعید برف (Snow sublimation)
 - تعرق (Transpiration)
 - تبخیر از پهنه های آبی (Open-water evaporation)
 - ضریب تنش تبخیر (Evaporation Stress Factor)
 - رطوبت ریشه خاک (Root-Zone Soil Moisture)
 - رطوبت سطحی خاک تا عمق ۱۰ سانتی متری (Surface Soil moisture)
- از سال ۲۰۱۱ تاکنون نسخه های مختلفی از محصولات در این پایگاه ارائه شده است که آخرین نسخه آن در ماه May سال ۲۰۱۷ میلادی تحت عنوان 3.1.a منتشر شده است. تمام محصولات نسخه 3.1.a این پایگاه در گستره جهانی و به صورت روزانه از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۶ میلادی دارای اطلاعات می باشند.
- معادله حاکم بر الگوریتم تبخیر و تعرق این پایگاه، معادله Priestley and Taylor (1972) می باشد که در آن تبخیر تعرق را بر اساس مقادیر تشعشع خالص در سطح و دمای هوا در نزدیک سطح زمین محاسبه می کند. در این الگوریتم از یک ضریب تنش تبخیر نیز استفاده می شود که بر اساس microwave vegetation optical depth و رطوبت ریشه خاک به دست می آید. خود رطوبت ریشه خاک از طریق معادلات بیلان آبی محاسبه

می شود. تلفات برگاب موجود در این الگوریتم نیز از طریق مدل تحلیلی Gash محاسبه می شود. در نهایت با استفاده از معادله حاکم که Priestley and Taylor می باشد، مقدار تبخیر تعرق واقعی محاسبه می شود. ساختار شماتیک ۴ ماژول موجود در الگوریتم این پایگاه در شکل ۵ نشان داده شده است (Martens et al., 2017).



شکل ۵- ساختار شماتیک الگوریتم تبخیر تعرق پایگاه GLEAM

ورودی های محصول تبخیر تعرق این پایگاه داده از تصاویر مایکروویو تهیه می شوند که در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶- خصوصیات ورودی های مدل تبخیر تعرق GLEAM (Miralles et al., 2011)

Variables	Source	Freq.	Domain	Availability	Res.	Method
Net Radiation, R_n	SRB	Daily	Global	1983–2007	1°	Satellite/Reanalysis
Precipitation, P	CMORPH	Daily	60° N–60° S	2002–2009	0.07°	Satellite
Precipitation, P (gap-filling)	GPCP	Daily	Global	1997–2008	1°	Satellite/Gauge
Surface Soil Moisture, θ	LPRM	Daily	Global	1979–2009	0.25°	Satellite
Skin Temperature, T	LPRM	Daily	Global	1979–2009	0.25°	Satellite
Air Temperature, T (gap-filling)	ISCCP	3-hourly	Global	1983–2008	2.5°	Satellite
Vegetation optical depth, τ	LPRM	Daily	Global	1979–2009	0.25°	Satellite
Snow water equivalents, D_s	NSIDC	Daily	Global	2002–2009	0.25°	Satellite

۲-۳-۱- صحت‌سنجی نتایج تبخیر تعرق GLEAM در مطالعات محققین

Miralles et al. (2011) در تحقیقی به بررسی مدل تبخیر تعرق پایگاه داده GLEAM پرداخته‌اند. آن‌ها یکی از مزایای این الگوریتم را در ورودی‌های در دسترس آن می‌دانند که ناشی از الگوریتم Priestley and Taylor (1972) می‌باشد. همین‌طور بحث استفاده از تصاویر مایکروویو را کلیدی‌ترین بخش الگوریتم تولید این محصول می‌دانند که باعث تمایز آن از سایر محصولات تبخیر تعرق شده است. آنها نتایج روزانه، ماهانه و سالانه تبخیر تعرق GLEAM را در مناطق مختلفی از اروپا در کشت‌های گوناگون با مقادیر زمینی مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد که مقدار ضریب همبستگی در مقادیر روزانه، ماهانه و سالانه به ترتیب برابر ۰/۸۳، ۰/۹۰ و ۰/۸۰ بدست آمده است که حاکی از توانایی بالای این محصول در تخمین مقدار تبخیر تعرق در اروپا می‌باشد.

۲-۳-۴- سامانه WaPOR

گروه تکنولوژی اطلاعات FAO و کارشناسان آب و خاک آژانس تخصصی سازمان ملل «سامانه بهره‌وری آب با دسترسی آزاد» (FAO Water Productivity Open Access Portal) را طی یک پروژه ۱۰ میلیون دلاری با حمایت مالی دولت هلند طراحی کرده‌اند. این پروژه با هدف تحت پوشش قرار دادن کشورهایی که با کم‌آبی فیزیکی یا زیرساختی در آفریقا و خاورمیانه مواجه بوده و یا به زودی دچار بحران می‌شوند، طراحی شده است. «سامانه بهره‌وری آب با دسترسی آزاد» با هدف تقویت بهره‌وری کشاورزی، مقدار تبخیر و تعرق واقعی را تخمین می‌زند. تبخیر و تعرق یکی از مراحل کلیدی در چرخه طبیعی آب بوده و شامل آبی است که مستقیماً با تبخیر وارد اتمسفر شده و یا پس از حرکت از درون گیاه، از شاخه‌ها و برگ‌ها به صورت بخار خارج شده و به اتمسفر باز می‌گردد.

این ابزار می‌تواند ارزیابی‌های تفصیلی برای پایش عملکرد مجموعه مشخصی از برنامه‌های آبیاری، پشتیبانی از سامانه‌های مدرن آبیاری و نیز کمک به دسترسی همه کاربران به خدمات آبی مطمئن‌تر، با صرفه‌تر و سازگارتر با تغییرات اقلیمی را ارائه کند. ابزار جدید ارائه شده توسط FAO با بهره‌گیری از پیشرفته‌ترین فن‌آوری‌های ماهواره‌ای و استفاده از الگوریتم جدید محاسبه تبخیر و تعرق (ETLook)، امکان اندازه‌گیری مؤثر استفاده از آب کشاورزی، به ویژه در کشورهای کم‌آب از جمله ایران را فراهم می‌کند (تارنمای سامانه WaPOR).

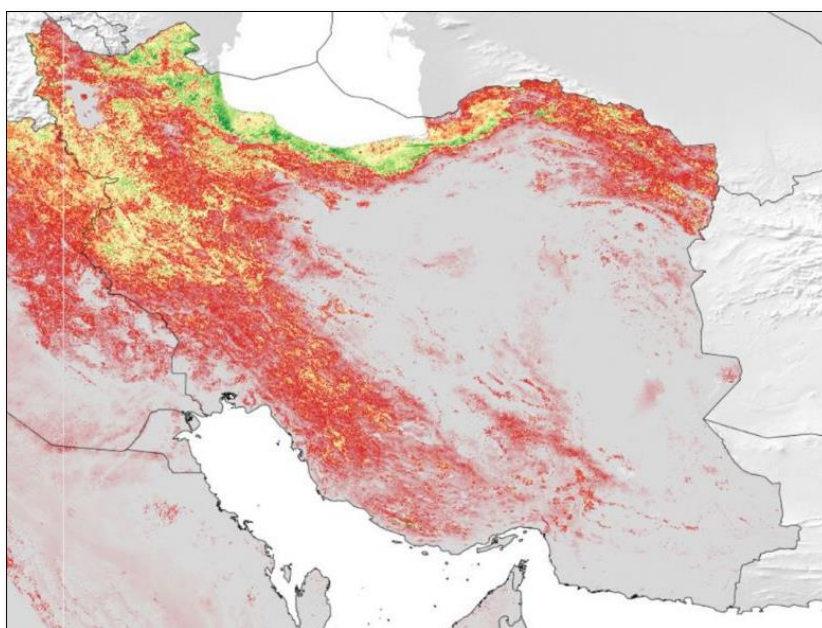
در بخش اعظمی از قرن گذشته، میزان مصرف جهانی آب - که قسمت عمده‌ای از آن صرف کشاورزی می‌شود - از نرخ رشد جمعیت بالاتر رفته و در برخی مناطق به شرایط بحرانی نزدیک شده است. بنابراین FAO با راه اندازی «سامانه بهره‌وری آب» از داده‌های ماهواره‌ای زمان واقعی برای ارزیابی بهره‌وری آب در بخش

کشاورزی بهره می گیرد تا از این طریق کشاورزان محصولات قابل اتکاتر تولید کرده و سیستم های آبیاری خود را بهینه سازند (تارنمای سامانه WaPOR).

با استفاده از «سامانه بهره وری آب با دسترسی آزاد» (WaPOR) می توان تحلیلی کامل از میزان آب استفاده شده در سیستم های کشاورزی را ملاحظه نمود و شواهدی تجربی درباره اینکه چگونه می توان از میزان آبی معین بیش ترین بهره وری را برد، بدست آورد.

«سامانه بهره وری آب با دسترسی آزاد» با ارزیابی داده های ماهواره ای و استفاده از امکانات پردازشی گوگل ارث (Google Earth) نشان می دهد که به ازای هر مترمکعب آب مصرفی چه مقدار زیست توده و محصول تولید می شود. این نقشه ها هر ۱۰ روز یک بار بروزرسانی شده و می توان آن ها را با وضوح مکانی ۳۰ تا ۲۵۰ متر مشاهده کرد.

کارشناسان توسعه کشاورزی با استفاده از این داده های زمان واقعی، می توانند به کشاورزان در دستیابی به محصولات کشاورزی قابل اتکاتر یاری رسانده و ابزار معیشت کشاورزان را بهبود بخشند. در شکل ۶ نمونه ای از تصاویر تولیدی در این سامانه نمایش داده شده است.



شکل ۶- تغییرات بهره وری آب به ازای تولید محصول

همان طور که قبلاً اشاره شد، سامانه WaPOR برای کمک به مسائل کشاورزی مناطق درگیر با مشکلات مدیریت منابع آب، مجموعه ای از اطلاعات در بخش های مرتبط با کشاورزی را در اختیار کاربران قرار داده

است. جدول ۷، فهرستی از نقشه‌های قابل دریافت از این سامانه به همراه شرح مختصری از آن‌ها مانند واحد، منطقه تحت پوشش و بازه زمانی اطلاعات موجود را ارائه می‌دهد.

استفاده از اطلاعات این سامانه در کنار داده‌های زمینی می‌تواند کمک شایانی به حفظ پایداری منابع آب در حوضه‌های آبریز کند. اطلاعات قابل دریافت از این سامانه عبارت‌اند از: بهره‌وری آب و زمین، تبخیر و تعرق واقعی، زیست توده تولید شده در سطح زمین، نقشه پوشش زمین/طبقه‌بندی محصولات، تبخیر و تعرق مرجع و بارش.

جدول ۷- مشخصات اطلاعات خروجی از سامانه WaPOR (تارنمای سامانه WaPOR).

اطلاعات خروجی از سامانه WaPOR	واحد	منطقه تحت پوشش	رزولوشن زمانی	بازه زمانی
ارزیابی بهره‌وری آب	kgDM/m ³ /year	افریقا و خاورمیانه	سالانه	۲۰۱۰ به بعد
ارزیابی بهره‌وری زمین	kgDM/ha/year	افریقا و خاورمیانه	سالانه	۲۰۱۰ به بعد
تبخیر و تعرق واقعی	& mm/year mm/day	افریقا و خاورمیانه	سالانه و ده روزه	آوریل ۲۰۰۹ به بعد
تعرق	mm/year	افریقا و خاورمیانه	سالانه	۲۰۱۰ به بعد
زیست توده تولید شده در سطح زمین	kgDM/ha/year	افریقا و خاورمیانه	سالانه	۲۰۱۰ به بعد
کسر تعرق	٪ (درصد)	افریقا و خاورمیانه	ده روزه	آوریل ۲۰۰۹ به بعد
تبخیر و تعرق مرجع	mm/day	افریقا و خاورمیانه	روزانه	آوریل ۲۰۰۹ به بعد
بارش	mm/day	افریقا و خاورمیانه	روزانه	آوریل ۲۰۰۹ به بعد

۲-۳-۴-۱- مناطق تحت پوشش طرح

پروژه WaPOR در سه سطح متفاوت انجام شده است. در ادامه به تشریح این مناطق پرداخته می‌شود:

(۱) مناطقی که در سطح یک پوشش داده می‌شوند شامل افریقا و خاورمیانه (در مختصات $W30^{\circ}$ -

$40N$ ، $65E$ ، $40S$) هستند.

(۲) مناطق پوشش داده شده در سطح دو، به دو بخش کشورها و حوضه‌های آبریز تقسیم می‌شوند:

کشورها شامل مراکش، تونس، مصر، لبنان، جمهوری عربی سوریه، اردن، غنا، کنیا، سودان جنوبی، مالی، بنین، اتیوپی، روآندا، برونودی، موزامبیک، اوگاندا، نوار غزه و یمن و حوضه رودخانه شامل اردن (Jordan)/ لیتانی (Litani)، نیل (Nile)، اواش (Awash) و نیجر (Niger).

در این سطح، در حالی بهره‌وری آب و زمین ارزیابی خواهد شد که امکان تشخیص چندین محصول اصلی تحت کشت آبی یا دیم نیز وجود دارد. در محدوده اشاره شده، حسابداری آب از طریق فناوری سنجش از دور انجام شده که برای ارزیابی اثر افزایش میزان بهره‌وری آب استفاده می‌شود.

۳) در نهایت سطح سه شامل برنامه‌ریزی آبیاری در سطح زیر حوضه است که با پرواز هواپیما در قسمتی از مناطق اردن / حوضه رودخانه لیتانی، حوضه رود نیل، حوضه رودخانه اوآش و نیجر انجام می‌شود.

۲-۳-۴-۲- اطلاعات خروجی از سامانه WaPOR

نوع فعالیت‌ها و اطلاعات تولیدی توسط این سامانه با توجه به هریک از سطوح اشاره شده متفاوت است. در این بخش تفاوت‌های بین سه سطح مختلف مطالعات به شرح زیر اشاره می‌شود:

در سطح یک، بهره‌وری آب بر اساس زیست‌توده تولید شده به ازای هر مترمکعب مصرف آب بررسی شده و به تفکیک اراضی دیم و آبی ارائه می‌شود. همچنین بهره‌وری زمین از نظر تولید زیست‌توده در هر هکتار نیز بررسی و در واحدهای مکانی به صورت پیکسل در سطح کشور و حوضه نمایش داده می‌شود.

در سطح دوم از مطالعات، بهره‌وری آب و زمین برای مجموعه‌ای از کشورها و حوضه‌های منتخب با تشخیص چندین محصول اصلی تحت کشت آبی و دیم بررسی می‌شود. دقت مکانی پیکسل‌ها نسبت به سطح یک افزایش یافته و بهره‌وری زمین بر اساس عملکرد محصول (کیلوگرم بر هکتار) و بهره‌وری آب بر اساس میزان تولید بر حجم آب مصرفی (کیلوگرم بر مترمکعب) محاسبه می‌شود. آب مورد استفاده برای تولید محصولات کشاورزی بر پایه تبخیر و تعرق واقعی که از دو ترم تبخیر و تعرق نشات گرفته از بارش (آب سبز) و تبخیر و تعرق تدریجی از آبیاری (آب آبی) محاسبه شده، بیان می‌گردد.

در سطح سوم، از مطالعات بهره‌وری زمین و آب برای ارزیابی عملکرد و ارائه پیشنهاد برای بهبود سیستم‌های آبی استفاده می‌شود. در این سطح بهره‌وری آب و زمین همانند سطح دو محاسبه شده و بهره‌وری اقتصادی آب برای استفاده‌های متعدد از آب به لحاظ محاسبه ترم بازگشت اقتصادی به ازای مقدار آب آبیاری بررسی می‌شود. هدف از ارزیابی عملکرد در طرح‌های آبیاری، نوسازی سیستم‌های آبیاری منتخب می‌باشد. پس از نوسازی، یک طرح مصرف آب باید قابل اطمینان‌تر، مقرون به صرفه و سازگارتر به تنوع آب و هوایی باشد. در این سطح همچنین خدمات کم هزینه‌ای برای افزایش بازده اقتصادی به کشاورزان پیشنهاد می‌شود. سامانه WaPOR در حال به روزرسانی و تکمیل پایگاه داده خود بوده و جدول ۸ خلاصه‌ای از اهداف آن را نشان می‌دهد.

جدول ۸- برنامه زمان بندی توسعه سامانه WaPOR

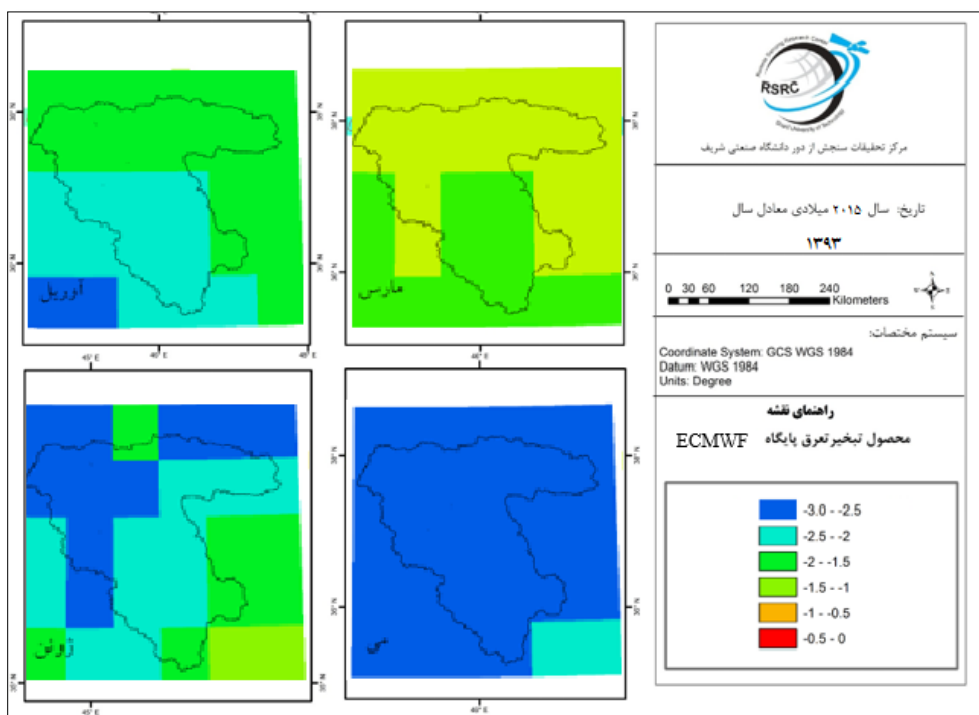
سال	ماه	به روز رسانی داده ها	به روز رسانی سامانه
2017	April	Level 1 archive beta release (db_v0.1)	WaPOR beta release (v 0.1)
	May	Level 1 near real time	Near-real time data pipeline for Level 1
		Land Cover for Level 1 (in cooperation with EC Copernicus)	
	June	Methodology document online	Full catalogue of WaPOR APIs for Level 1
		Level 2 archive beta release	WaPOR portal v 0.2 (new features, bug-fixes)
	September	Level 2 near real time	WaPOR portal v 0.3 (including WP calculations over user-defined areas and time-periods)
	October	Level 3 first pilot area	Near-real time data pipeline for Level 2 and 3
	November		Full APIs catalogue published on FAO API store
2018	February	Database version 1.0 release	WaPOR 1.0

نکته قابل توجه در این بخش، استقرار کشور ایران در سطح یک طبقه بندی اشاره شده است و اطلاعات قابل دستیابی برای این منطقه شامل ارزیابی های تخصصی سطوح دوم و سوم نمی باشد و بهترین مقیاس مکانی در این سطح ۲۵۰ متر می باشد.

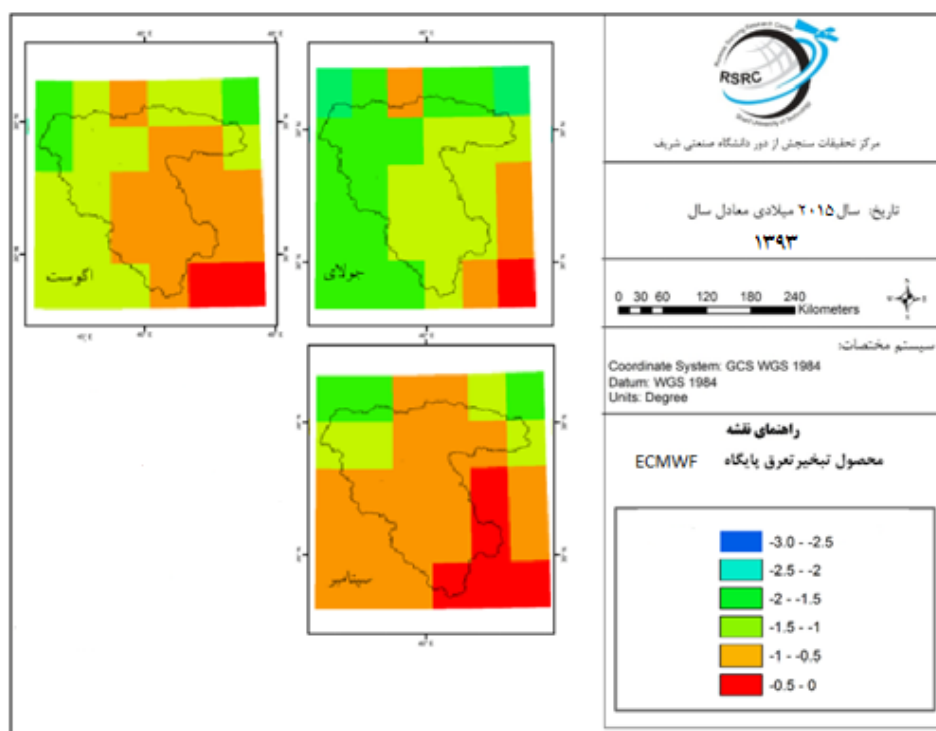
۳- نتایج

۳-۱- مقایسه نتایج تبخیر تعرق ECMWF و الگوریتم SEBAL

در ادامه لایه های ارتفاع تبخیر ECMWF در ماه های مارس تا سپتامبر سال ۲۰۱۰ میلادی در محدوده حوضه دریاچه ارومیه در شکل ۷ و شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۷- لایه تبخیر تعرق ECMWF در محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه در ماه های March تا June سال ۲۰۱۰

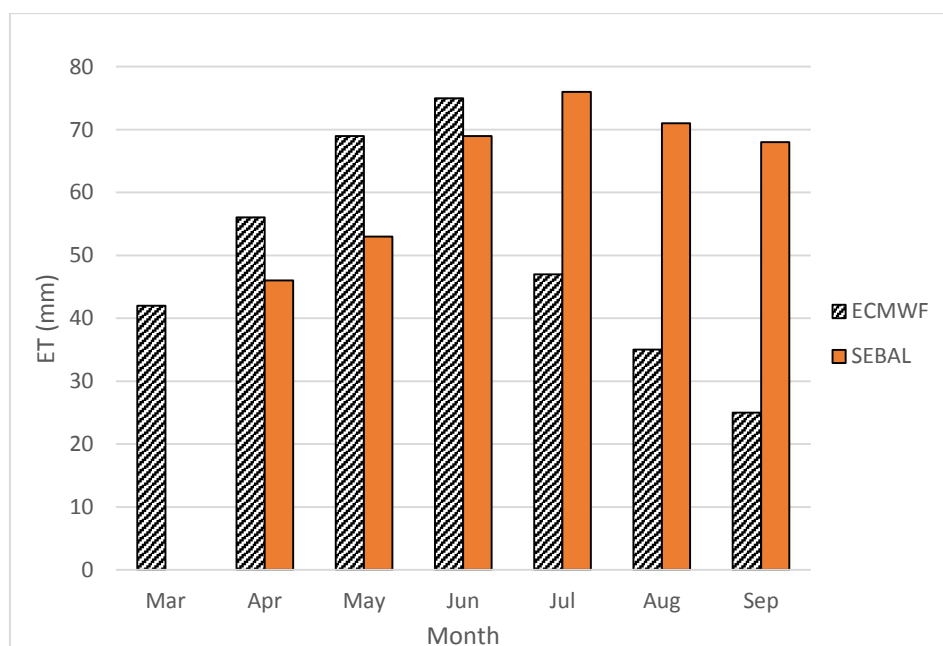


شکل ۸- لایه تبخیر تعرق ECMWF در محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه در ماه های July تا September سال ۲۰۱۰

با ملاحظه نقشه های فوق می توان تحلیل های زیر را ارائه نمود:

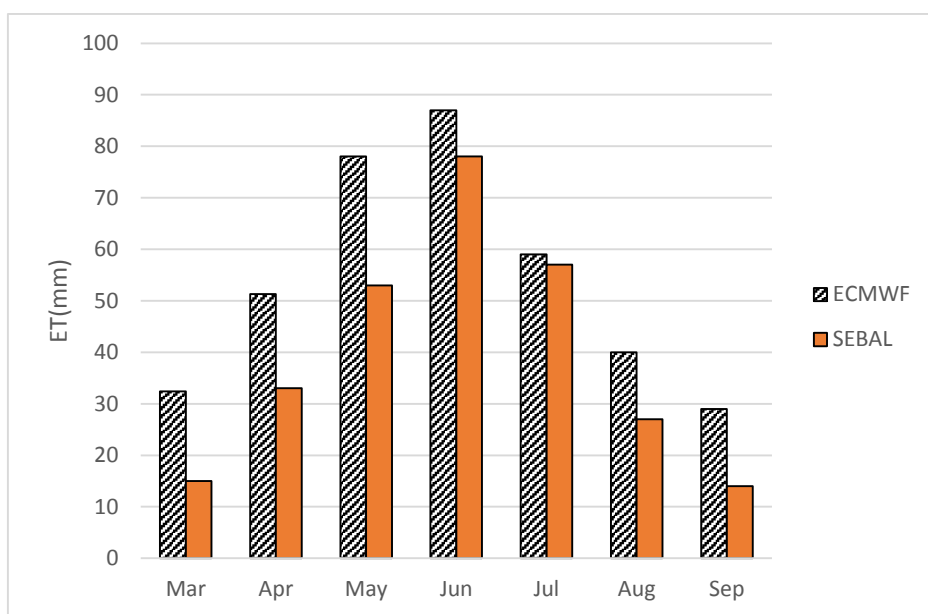
۱. تفکیک مکانی منظمی در ماه های مختلف مشاهده نمی شود؛ اما غربی ترین پیکسل قرار گرفته در حوضه که دارای بیشترین تمرکز اراضی کشاورزی می باشد در اکثر ماه ها بخصوص ماه های گرم، مقادیر بالای ET (و نه لزوماً بالاترین) را به خود اختصاص داده است.
۲. پیکسل میانی که شامل دریاچه ارومیه می باشد، مقدار ET بالاتری را نسبت به پیکسل های اطراف نشان نمی دهد. این مساله می تواند ناشی از بزرگی پیکسل ها و قرار گرفتن کاربری هایی با ET پایین در محدوده این پیکسل باشد.

تبخیر تعرق تجمعی ماهانه با استفاده از لایه های فوق تخمین زده شده و در شکل ۹ با نتایج ET الگوریتم SEBAL در سال ۲۰۱۰ میلادی مقایسه شده است. بررسی نتایج دو نمودار نشان می دهد که در ماه های ابتدایی کشت، مقادیر ECMWF اندکی کمتر از مقادیر SEBAL هستند و با رسیدن به ماه های گرم، نتایج SEBAL از مقادیر ECMWF پیشی می گیرند و در ماه سپتامبر، این اختلاف به حداکثر مقدار خود می رسد. بنظر می رسد در ماه های آوریل، می و ژوئن هر دو نمودار روند یکسانی را نشان می دهند اما در فصل گرما با مقایسه مکانی نقشه های ET، الگوریتم SEBAL مقادیر تبخیر را در اراضی غیر کشاورزی بیشتر از لایه ECMWF برآورد می کند که این مساله منجر به افزایش مقادیر میانگین ET حوضه حاصل از این روش نسبت به نتایج ECMWF شده است.



شکل ۹- مقایسه نتایج ET ماهانه ECMWF و الگوریتم SEBAL در محدوده حوضه دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی

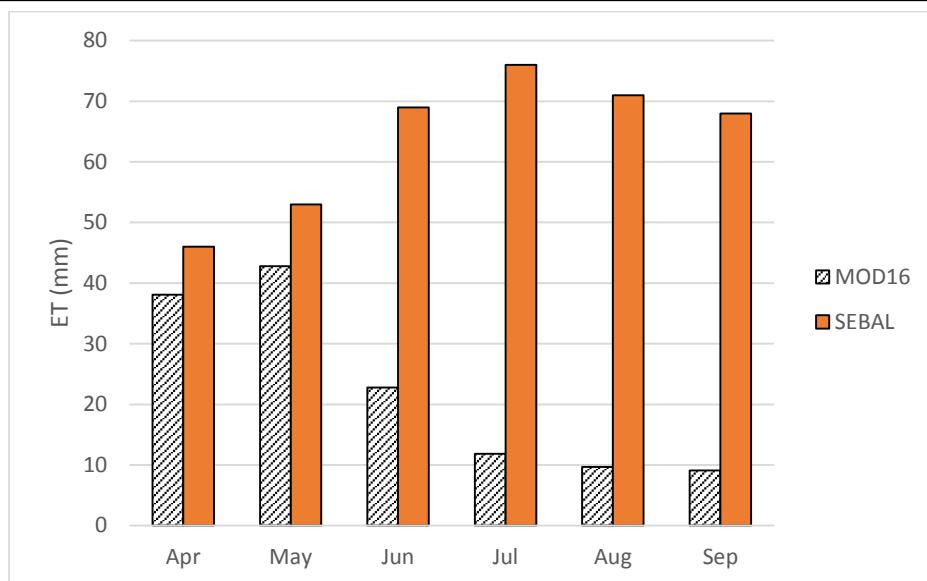
در شکل ۱۰ نیز نتایج تبخیر تعرق ماهانه حاصل از الگوریتم SEBAL با نتایج مرکز ECMWF در سال ۱۹۹۵ میلادی مقایسه شده‌اند. بررسی این مقایسه نشان می‌دهد که هر دو نمودار روند یکسانی را در ماه‌های مختلف به نمایش گذاشته‌اند. اما مقادیر ET بخصوص در ماه‌های ابتدایی اختلاف چشمگیری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- مقایسه نتایج ET ماهانه ECMWF و الگوریتم SEBAL در محدوده حوضه دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵ میلادی

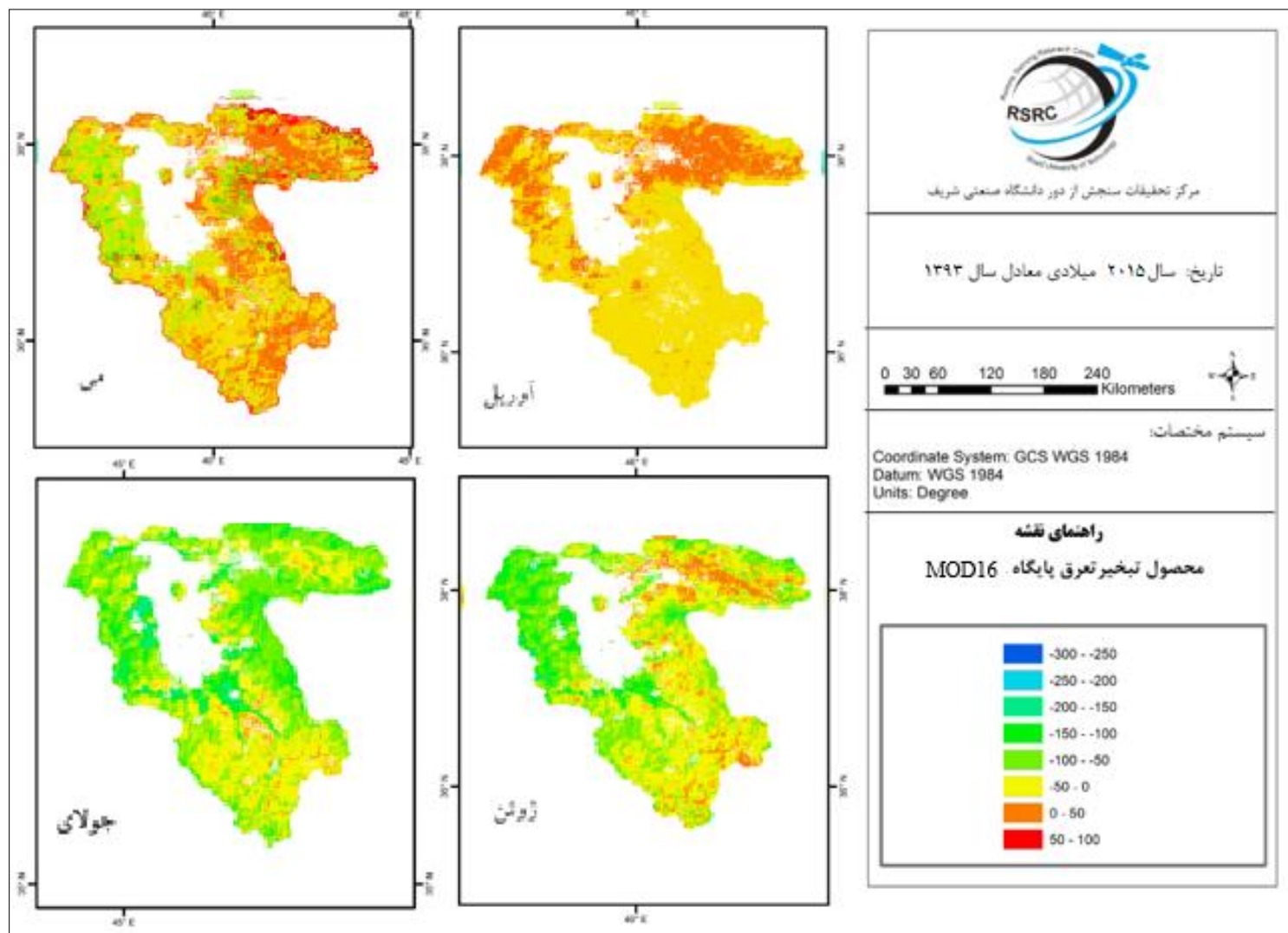
۳-۲- مقایسه نتایج تبخیر تعرق MOD16 و الگوریتم SEBAL

در سال ۲۰۱۰ میلادی که سنجنده MODIS حائز تصویر می‌باشد، نتایج تبخیر تعرق محصول MOD16 با نتایج بدست آمده از الگوریتم SEBAL مقایسه شده است. نمودار نتایج این دو محصول شکل ۱۱ ارائه شده است. بنظر می‌رسد نتایج این دو روش غیر از ماه‌های آوریل و می، از نظر مقدار و روند قابل مقایسه نیستند.

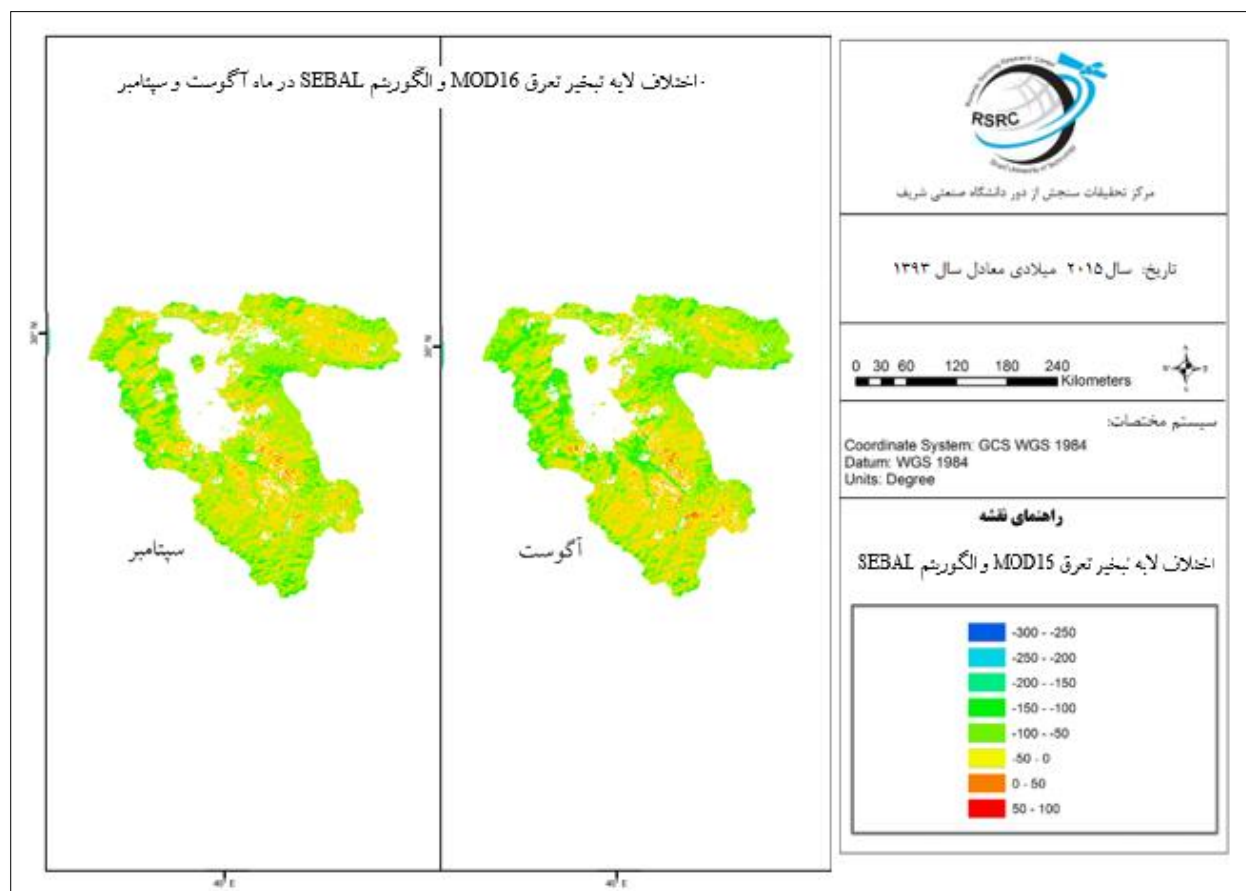


شکل ۱۱- مقایسه نتایج ET ماهانه MOD16 و الگوریتم SEBAL در محدوده حوضه دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی

جهت انجام مقایسه تغییرات مکانی لایه تبخیر تعرق حاصل از الگوریتم SEBAL و MOD16، اختلاف این دو لایه اطلاعاتی ($ET_{MOD16} - ET_{SEBAL}$) در ماه های مختلف محاسبه گردید. نتایج این مقایسه در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ ارائه شده است.



شکل ۱۲- اختلاف لایه تبخیر تعرق MOD16 و الگوریتم SEBAL در ماه های April تا July سال ۲۰۱۰ میلادی

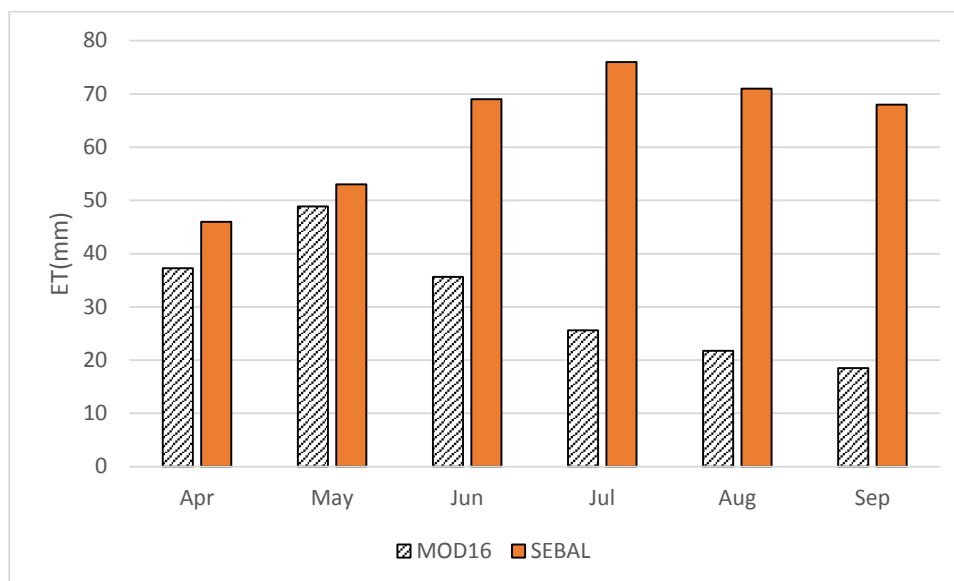


شکل ۱۳- اختلاف لایه تبخیر تعرق MOD16 و الگوریتم SEBAL در ماه های August و September سال ۲۰۱۰ میلادی

با ملاحظه اختلاف این دو لایه در ماه های مختلف می توان مشاهده کرد که در اراضی فاقد پوشش گیاهی، لایه MOD16 مقادیر تبخیر تعرق را بیش تر از مقادیر ET بدست آمده از SEBAL برآورد نموده است، این در حالیست که شرایط در مناطق دارای پوشش گیاهی کاملاً برعکس است و MOD16 مقادیر ET را کمتر از مقادیر بدست آمده از SEBAL برآورد کرده است. اختلاف مقادیر حاصل از دو روش در اراضی دارای پوشش گیاهی نسبت به مراتع شدت بیشتری را نشان می دهد.

از آنجا که اختلاف مقادیر در دو محدوده حائز پوشش گیاهی و مناطق فاقد پوشش گیاهی کاملاً متفاوت می باشد، در نمودار شکل ۱۴ میانگین مقادیر تبخیر تعرق ماهانه بدست آمده از محصول MOD16 و الگوریتم SEBAL در محدوده اراضی زراعی و باغی در سال ۲۰۱۰ میلادی با یکدیگر مقایسه شده اند. نمودار SEBAL در کلیه ماه ها مقادیر بیشتری را نشان داده است و غیر از ماه های آوریل و ژوئن، در چهار ماه دیگر اختلاف زیادی در مقادیر دو نمودار مشاهده می شود. از طرفی با اینکه هر دو نمودار روندی زنگوله ای را نشان می دهند

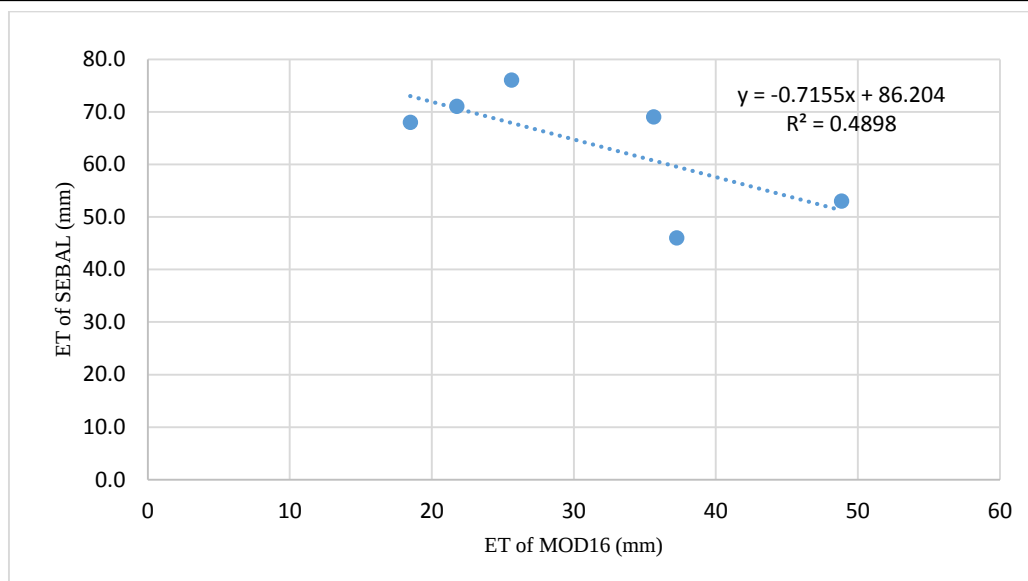
اما مقادیر ماکزیمم در ماه های متفاوتی اتفاق افتاده است، نمودار MOD16 در ماه می و نمودار SEBAL در ماه جولای مقدار ماکزیمم را نشان می دهند.



شکل ۱۴- مقایسه نتایج ET ماهانه MOD16 و الگوریتم SEBAL در محدوده اراضی زراعی و باغی حوضه دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی

با وجود این تفاوت های فاحش در نتایج تبخیر تعرق دو روش، از آنجا که MOD16 یک محصول آماده است که از سال ۲۰۰۰ میلادی، نتایج تبخیر را محاسبه نموده است، در نمودار شکل ۱۵ رابطه مقادیر دو الگوریتم در ماه های آوریل تا سپتامبر بدست آمده است. با توجه به ضریب تبیین قابل قبول این رابطه، می توان در طی ماه های ذکر شده با استفاده از لایه های آماده MOD16، مقادیر تبخیر تعرق معادل الگوریتم SEBAL را بدست آورد.

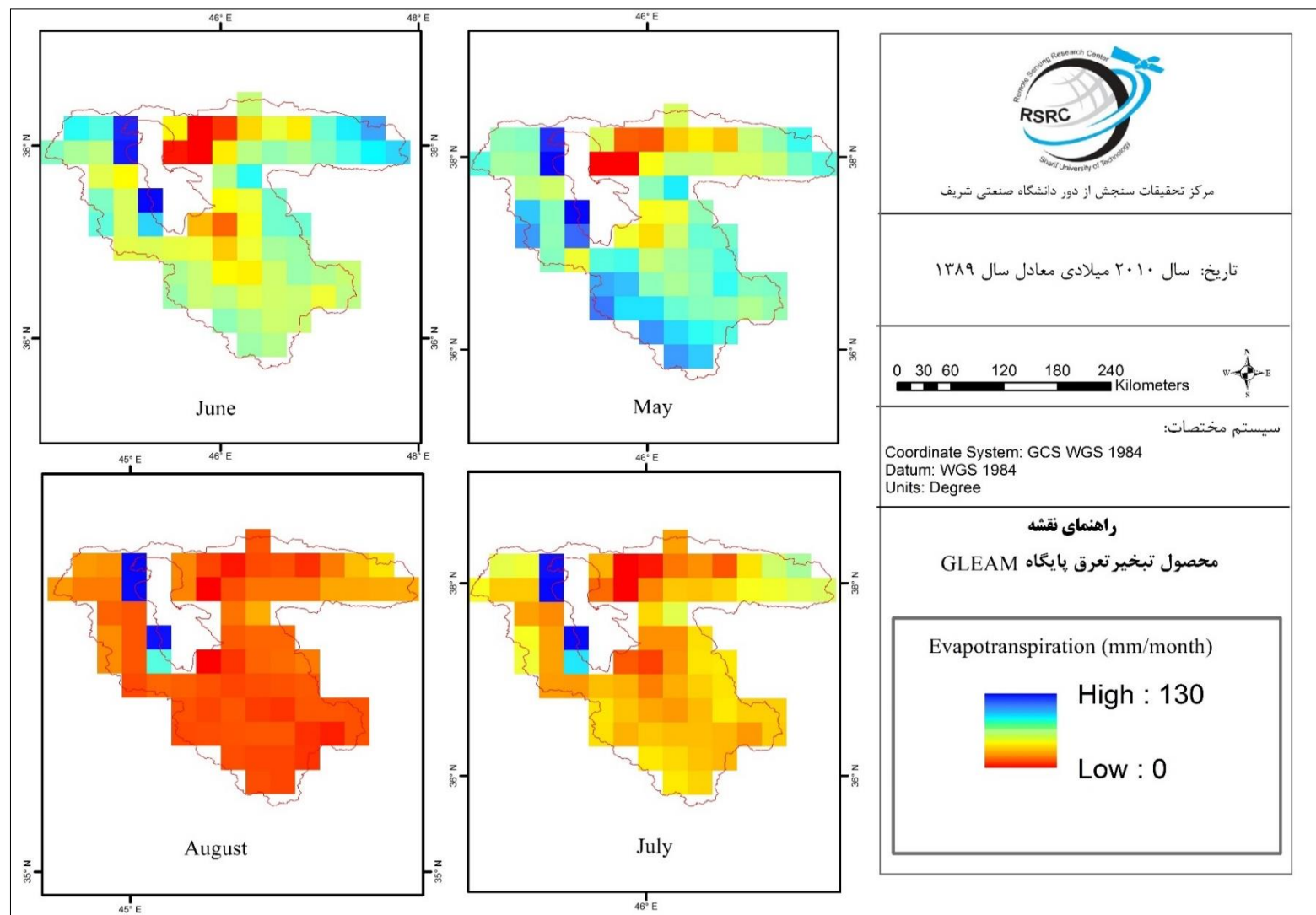
لازم به ذکر است که این رابطه تنها در طی ماه های آوریل تا سپتامبر برقرار است و با افزودن ماه اکتبر، همبستگی بین نتایج به شدت کاهش پیدا می کند و رابطه بدست آمده جهت شبیه سازی نتایج، قابل اطمینان نمی باشد.



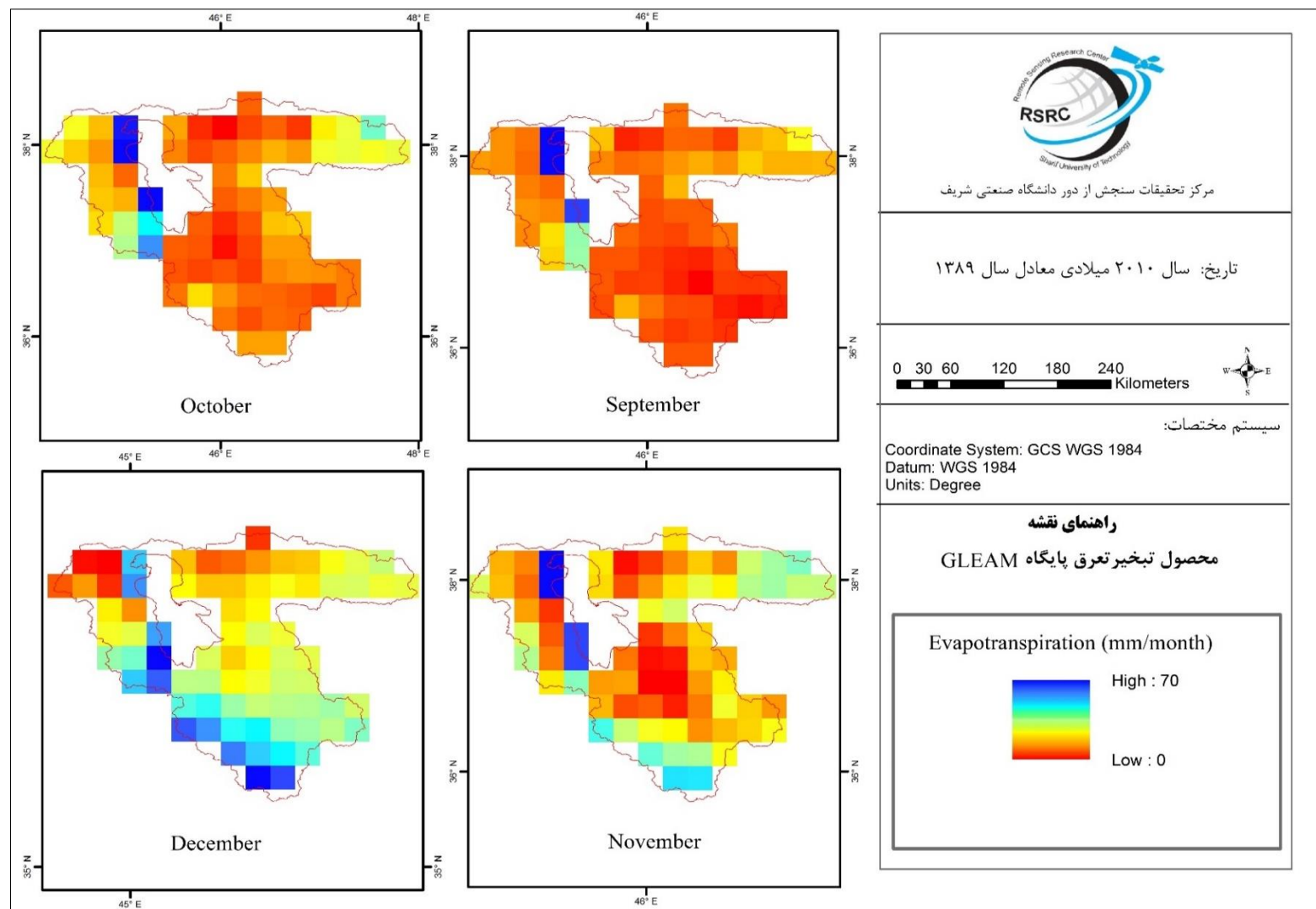
شکل ۱۵- نمودار همبستگی نتایج ET بدست آمده از الگوریتم MOD16 و SEBAL

۳-۳- مقایسه نتایج تبخیر تعرق GLEAM و الگوریتم SEBAL

لایه های ارتفاع تبخیر تعرق GLEAM در ماه های می تا دسامبر سال ۲۰۱۰ میلادی در محدوده حوضه دریاچه ارومیه پردازش و سلول های مربوط به دریاچه ارومیه و سلول های خارج حوضه از آن حذف شد. نقشه های نهایی در شکل ۱۶ و شکل ۱۷ ارائه شده است. با دقت در شکل های مذکور مشخص می شود که مقادیر تبخیر تعرق در دشت های بزرگ حوضه آبریز دریاچه ارومیه همچون دشت ارومیه و دشت میاندوآب نسبت به سایر نقاط حوضه بالاتر نیست. درواقع انتظار می رود که به دلیل آبیاری زیاد این دشت ها، مقدار تبخیر تعرق در این دو منطقه بالاتر از سایر مناطق باشد که در تمامی ماه ها چنین چیزی مشاهده نمی شود. با توجه به این مشاهدات می توان نتیجه گرفت که محصول تبخیر تعرق پایگاه GLEAM از نظر توزیع مکانی در مقیاس کوچک دقت خوبی ندارد. مقادیر متوسط ماه ها نیز نشان می دهد که ماه های می، ژوئن و آوریل فصل بهار به ترتیب با مقادیر ۸۱، ۶۷ و ۵۸ میلی متر در ماه، بالاترین مقادیر ارتفاع تبخیر تعرق را به خود اختصاص داده اند در صورتی که در الگوریتم SEBAL، ماه های فصل تابستان رکورددار مقادیر تبخیر تعرق هستند.

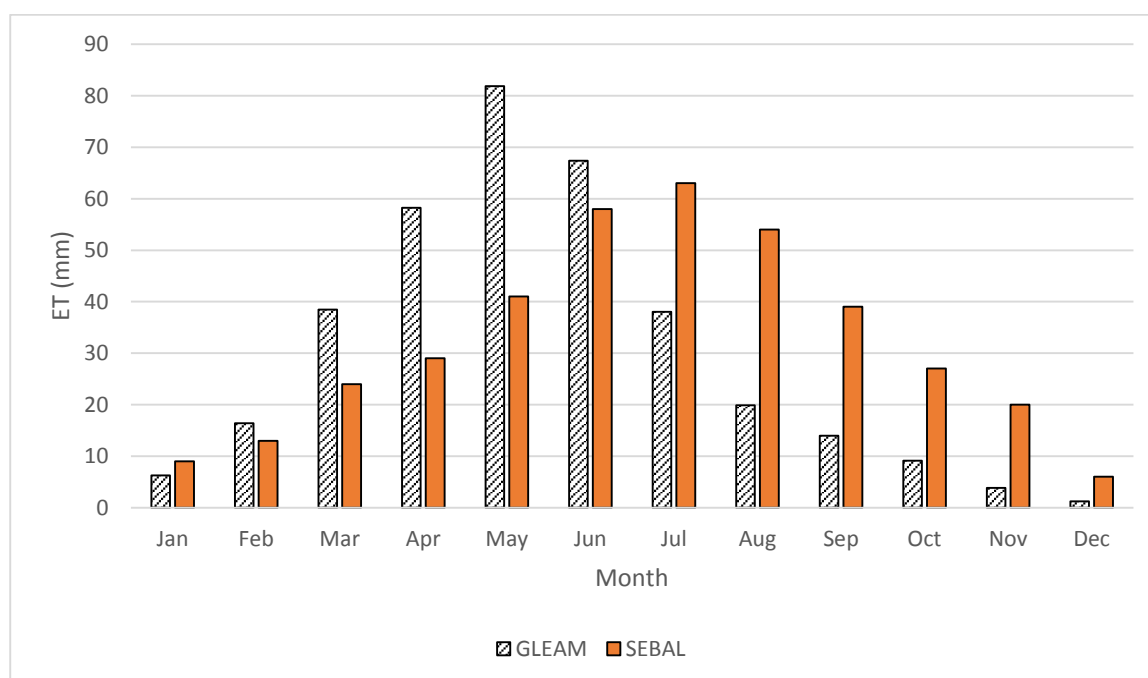


شکل ۱۶- ارتفاع تبخیر تعرق محصول پایگاه GLEAM (May تا August سال ۲۰۱۰ میلادی)



شکل ۱۷- ارتفاع تبخیر تعرق محصول پایگاه GLEAM (September تا December سال ۲۰۱۰ میلادی)

مقایسه نتایج تبخیر تعرق واقعی الگوریتم SEBAL با محصول تبخیر تعرق پایگاه GLEAM در سال ۲۰۱۰ انجام شد (شکل ۱۸). برای اینکار ابتدا داده های روزانه محصول GLEAM به ماهانه تبدیل شد تا با نتایج الگوریتم SEBAL قابل مقایسه باشد. نتایج نشان می دهد که در ماه های مارس، آوریل و می، مقادیر تبخیر تعرق پایگاه GLEAM حدود دو برابر الگوریتم SEBAL است. بالعکس از ماه جولای تا دسامبر، مقدار تبخیر تعرق SEBAL بین دو تا چهار برابر محصول پایگاه GLEAM می باشد. فقط در ماه های ژانویه، فوریه و ژوئن نتایج این دو الگوریتم به یکدیگر نزدیک می باشند. اما در مقیاس سالانه، مقدار تبخیر تعرق سالانه الگوریتم SEBAL و محصول GLEAM به ترتیب برابر ۳۸۳ و ۳۵۴ میلی متر در سال می باشد که نشان می دهد نتایج این دو، در مقیاس سالانه بسیار به یکدیگر نزدیک می باشند.



شکل ۱۸- مقایسه نتایج ET ماهانه GLEAM و الگوریتم SEBAL در سال ۲۰۱۰

۳-۴- مقایسه محصولات سامانه WaPOR و مطالعات مرکز RSRC

۳-۴-۱- مقایسه قدرت تفکیک زمانی و مکانی محصولات سامانه WaPOR و مطالعه مرکز RSRC
تفکیک زمانی و مکانی سامانه WaPOR و خروجی مطالعات مرکز RSRC در جدول ۹ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، خروجی های سامانه WaPOR از نظر مقیاس زمانی و مکانی دقت بیشتری نسبت به مرکز RSRC دارد.

جدول ۹-مقایسه اطلاعات خروجی از سامانه WaPOR و مرکز RSRC

مرکز RSRC	WaPOR (FAO)	
ماهانه (۲۰۱۰) (۱ Km)	سالانه و ۱۰ روزه (۲۵۰ m)	ارزیابی بهره‌وری آب
-----	سالانه و ۱۰ روزه (۲۵۰ m)	ارزیابی بهره‌وری زمین
ماهانه (۱۹۹۵، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴) (۱ Km)	سالانه و ۱۰ روزه (۲۵۰ m)	تبخیر و تعرق واقعی
ماهانه (۱۹۹۵، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴) (۳۰ m)	فصلی (۲۵۰ m)	پوشش زمین / طبقه‌بندی محصولات
روزانه و ماهانه (۱۹۹۵، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴)	روزانه (۲۰ Km)	تبخیر و تعرق مرجع
ماهانه (۱۹۹۵، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴)	روزانه (۵ Km)	بارش

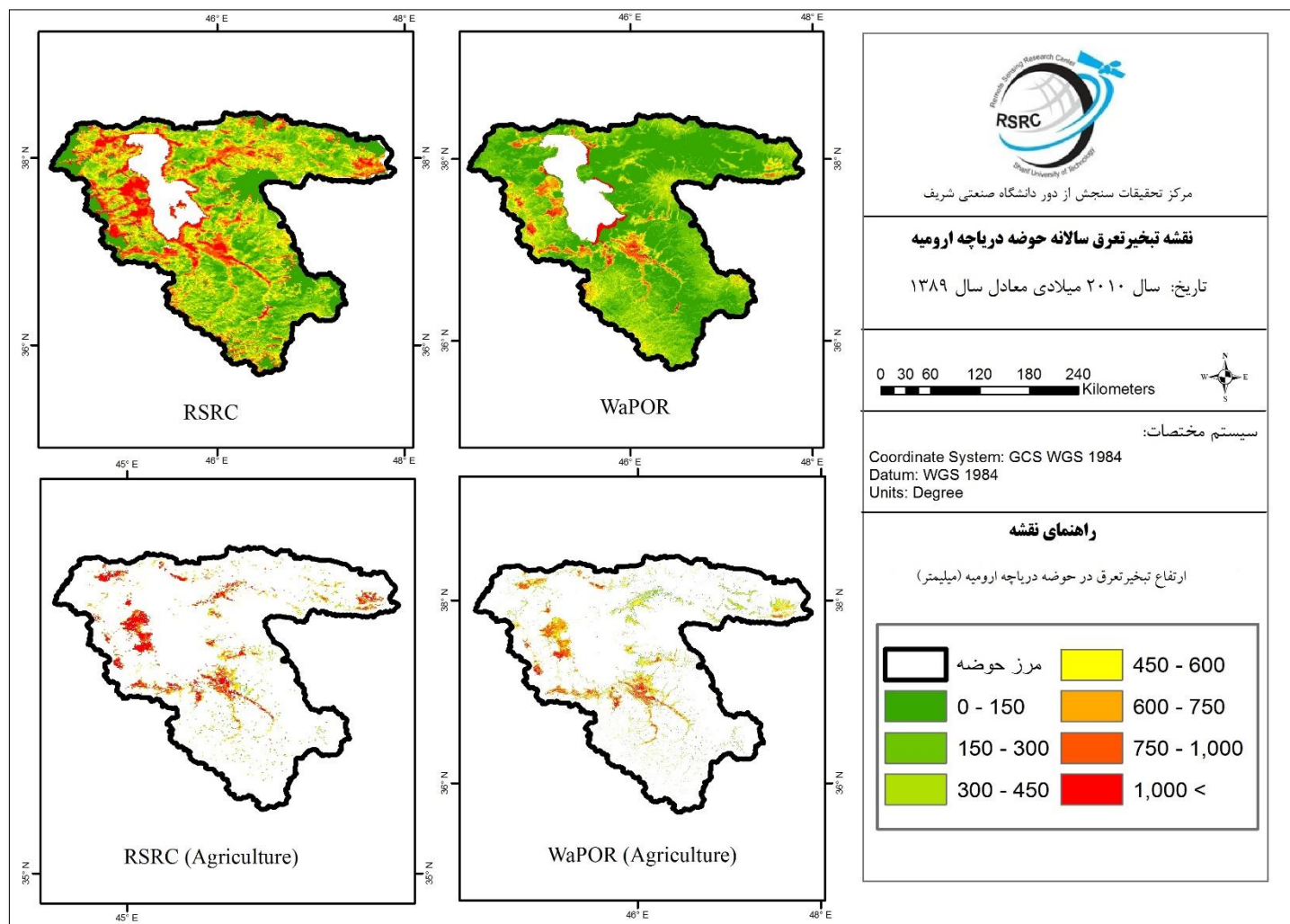
ارقام مربوط به تفکیک مکانی ارائه شده در جدول ۹ مربوط به نقشه‌های تبخیر و تعرق تولید شده در گزارش‌های قبلی مرکز RSRC است. با توجه به قدرت تفکیک مکانی باندهای سنجنده MODIS، امکان بهبود دقت مکانی نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی مرکز RSRC تا ۲۵۰ متر وجود دارد و این درحالی است که با اصلاح الگوریتم سبال با استفاده از ماهواره Landsat 8 امکان تولید نقشه تبخیر و تعرق تا ۳۰ متر نیز مهیا می‌شود.

۳-۴-۲- مقایسه تبخیر و تعرق محاسبه شده در سامانه WaPOR و مطالعات مرکز RSRC

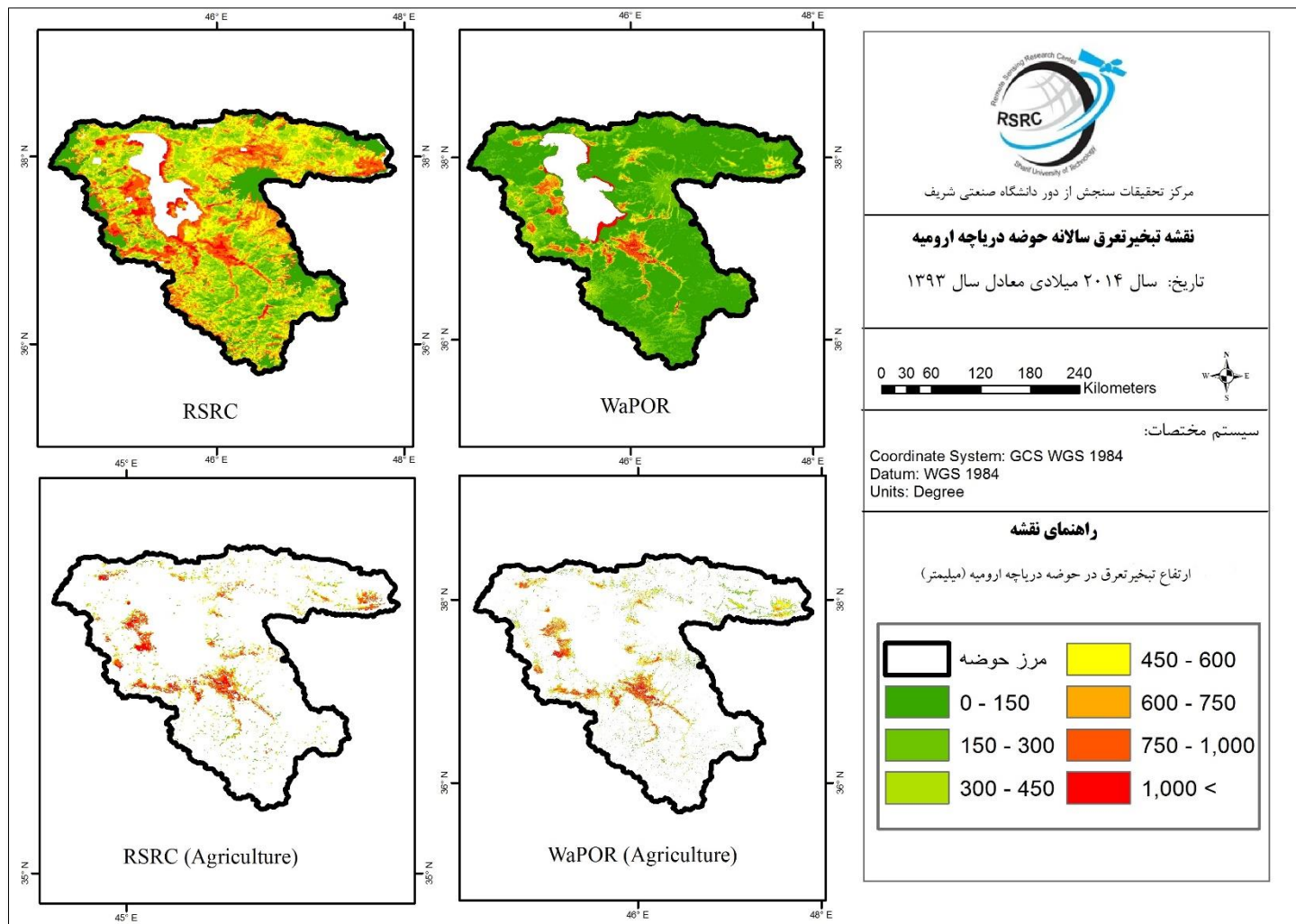
با توجه به اینکه در مطالعات پیشین توسط مرکز RSRC در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ میزان تبخیر و تعرق در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه برآورد شده، تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط سامانه WaPOR در دو سال یاد شده با مطالعات مرکز RSRC مقایسه شده‌اند. نقشه‌های میزان تبخیر و تعرق در سطح حوضه دریاچه ارومیه و همچنین مناطق با تفکیک کاربری کشاورزی با توجه به سامانه WaPOR و مطالعات مرکز RSRC برای سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ به ترتیب در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده‌اند.
شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان می‌دهند که عموماً تبخیر و تعرق در محاسبات مربوط به مرکز RSRC مقادیر بیشتری را به خود اختصاص داده و در برخی مناطق این اختلاف قابل توجه می‌باشد.

برای مشاهده اختلاف مکانی نقشه های محاسبه شده توسط WaPOR و مرکز RSRC، نقشه تفاضل مکانی تبخیر و تعرق در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه و همچنین به تفکیک کاربری های کشاورزی و مرتع در سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ به ترتیب در شکل های ۲۱ و ۲۲ آورده شده است. با توجه به شکل های ارائه شده، نقاط پیشینه در نقشه های اختلاف تبخیر و تعرق مرکز RSRC و سامانه WaPOR مناطقی می باشند که در نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، به عنوان مراتع معرفی گردیده اند. همان طور که در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده است، نقاطی از اراضی حوضه آبریز دریاچه ارومیه که دارای اختلاف بالاتری در نرخ تبخیر و تعرق واقعی بوده اند (که در شکل با رنگ قرمز پررنگ نشان داده شده است) کاملاً منطبق با توزیع مکانی مراتع مشخص شده اند.

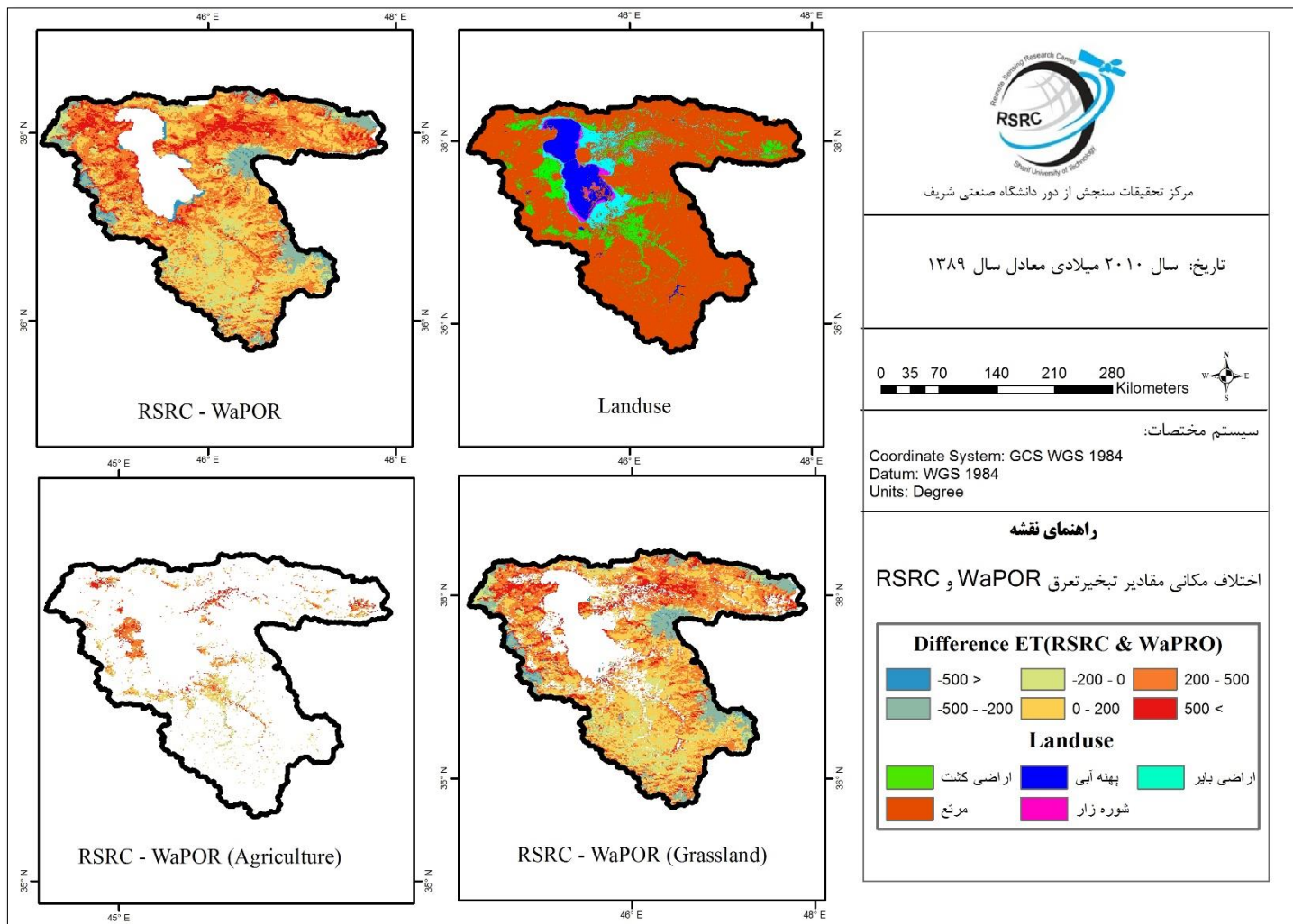
در بررسی مکانی نیز مشخص شد متوسط اختلاف مکانی تبخیر و تعرق خروجی از محاسبات مرکز RSRC و سامانه WaPOR در شرق دریاچه بیشترین مقدار را نسبت به سایر مناطق دارد و کمترین میزان اختلاف در دشت ها نیز در جنوب دریاچه رخ داده است.



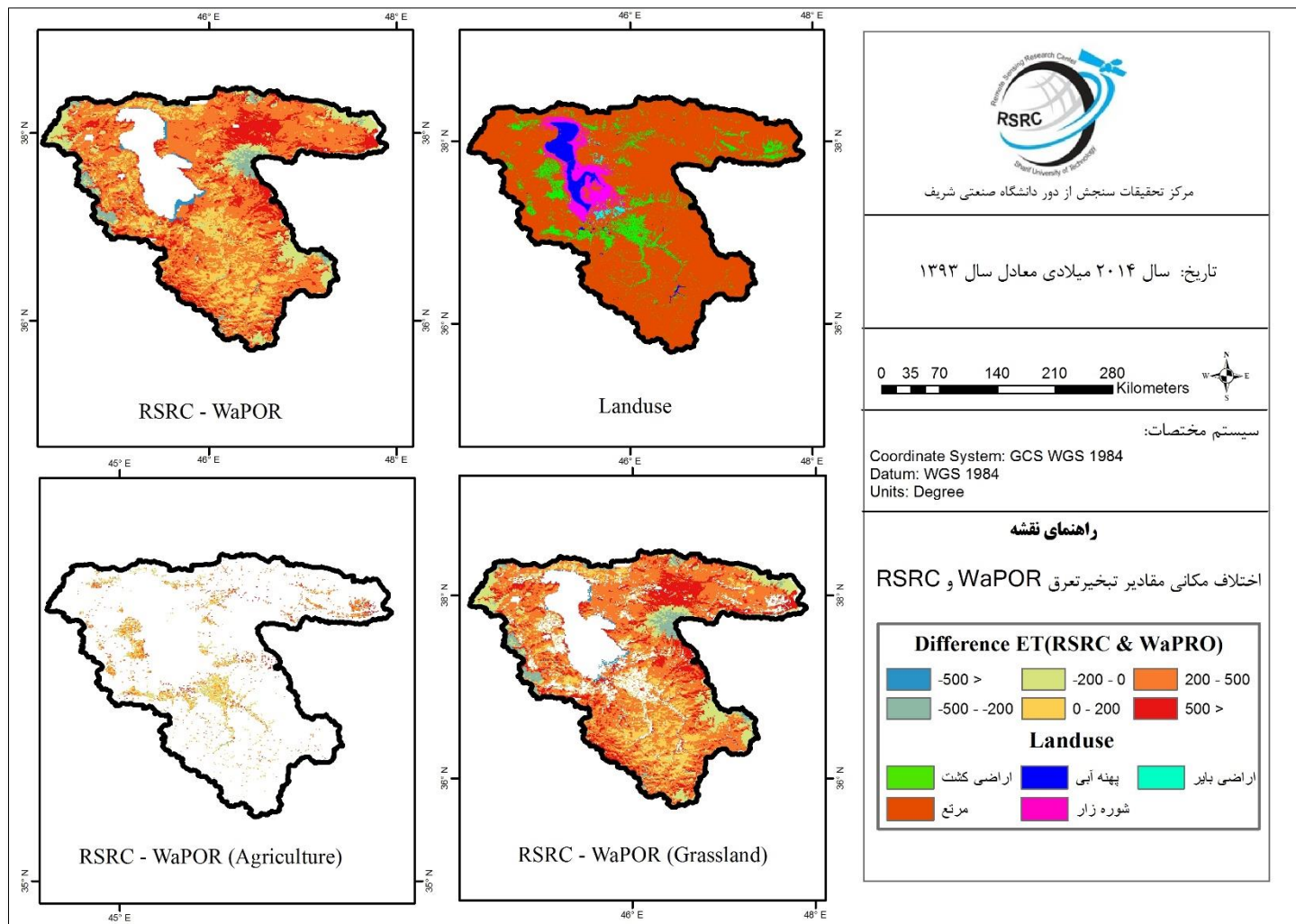
شکل ۱۹- نقشه برآورد تبخیر و تعرق توسط سامانه WaPOR و مرکز RSRC (سال ۲۰۱۰)



شکل ۲۰- نقشه برآورد تبخیر و تعرق توسط سامانه WaPOR و مرکز RSRC (سال ۲۰۱۴)



شکل ۲۱- اختلاف مکانی محصولات تبخیر و تعرق سامانه WaPOR و مرکز RSRC در حوضه دریاچه ارومیه (۲۰۱۰)



شکل ۲۲- اختلاف مکانی محصولات تبخیر و تعرق سامانه WaPOR و مرکز RSRC در حوضه دریاچه ارومیه (۲۰۱۴)

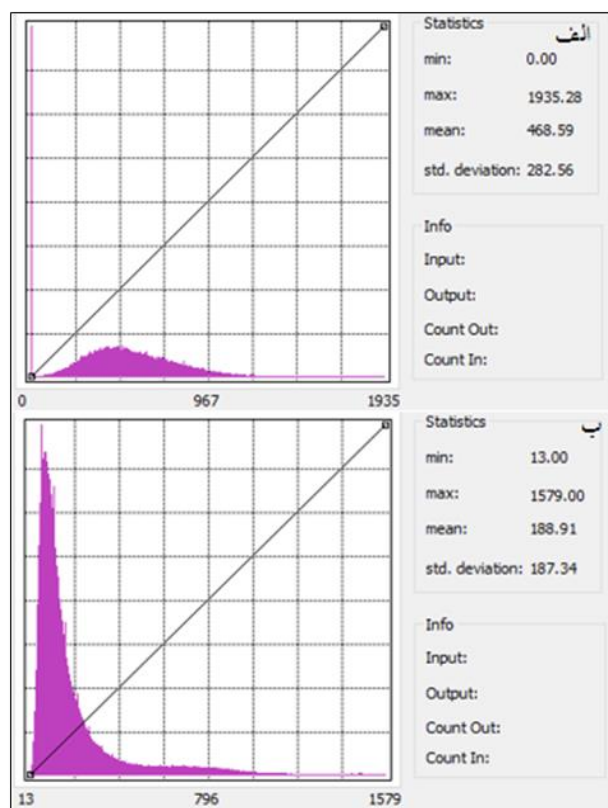
با توجه به اینکه ترازهای ارتفاعی مختلف می تواند عاملی برای اختلاف در محاسبه تبخیر و تعرق به شمار آید، میانگین اختلاف محاسبه تبخیر و تعرق در سامانه WaPOR و محاسبات مرکز RSRC در ترازهای مختلف در سطح حوضه به ترتیب برای سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ ارائه شده است. با توجه به جدول می توان نتیجه گرفت که در ارتفاعات بالاتر از ۲۲۰۰ متر مقادیر مرکز RSRC کمتر از سامانه WaPOR است، زیرا توسط اصلاح محلی، نتایج خروجی تبخیر و تعرق مرکز RSRC در ارتفاع بالاتر از ۲۲۰۰ متر صفر شده که این امر با توجه با مناطق ارتفاعی حوضه در مرکز RSRC تعیین شده است. مقادیر سامانه WaPOR در مناطق کم ارتفاع حوضه با کاربری مرتع کمتر از مقادیر محاسباتی توسط مرکز RSRC است و با توجه به جدول ۱۰ معمولاً این اختلاف با حرکت به سمت ارتفاع ۲۰۰۰ متر افزایش می یابد.

جدول ۱۰- متوسط اختلاف مکانی تبخیر و تعرق سالانه (بر حسب میلی متر) در محدوده های ارتفاعی بین نتایج مرکز RSRC و

سامانه WaPOR

محدوده های ارتفاعی	متوسط اختلاف مکانی تبخیر و تعرق بین مرکز RSRC و سامانه WaPOR در سال ۲۰۱۰	متوسط اختلاف مکانی تبخیر و تعرق بین مرکز RSRC و سامانه WaPOR در سال ۲۰۱۴
۱۲۳۵-۱۴۰۰	۲۷۱/۲	۲۶۸/۷
۱۴۰۰-۱۶۰۰	۲۰۷	۳۱۲/۷
۱۶۰۰-۱۸۰۰	۲۰۲/۲	۳۵۶/۱
۱۸۰۰-۲۰۰۰	۲۳۹/۴	۴۰۹/۹
۲۰۰۰-۲۲۰۰	۲۰۹	۳۵۵/۵
۲۲۰۰-۲۴۰۰	-۱۹۵/۹	-۷۸/۴
۲۴۰۰-۲۸۰۰	-۳۰۰/۴	-۱۷۸/۸
۲۸۰۰-۳۷۸۹	-۳۲۱/۸	-۱۹۵/۳

برای بررسی ارزش پیکسل ها در دو نقشه، نمودار هیستوگرام آن ها همانند شکل ۲۳ برای سال ۲۰۱۴ به دست آمد. میانگین ارتفاع تبخیر و تعرق در نمودار مربوط به هیستوگرام مرکز RSRC (شکل ۲۳-الف) در حدود ۴۶۸/۶ میلی متر به دست آمده که این مقدار برای سامانه WaPOR (شکل ۲۳-ب) حدود ۱۸۸/۹ میلی متر ثبت شده است. این تفاوت به طور عمده اختلاف قابل توجه مقادیر خروجی مرکز RSRC با سامانه WaPOR را نشان می دهد. بیش ترین مقادیر رخداد ثبت شده برای نرخ تبخیر و تعرق در هیستوگرام مرکز RSRC تقریباً در حدود ۱۹۳۵ میلی متر و در سامانه WaPOR نیز در محدوده ۱۵۸۰ میلی متر بوده است.

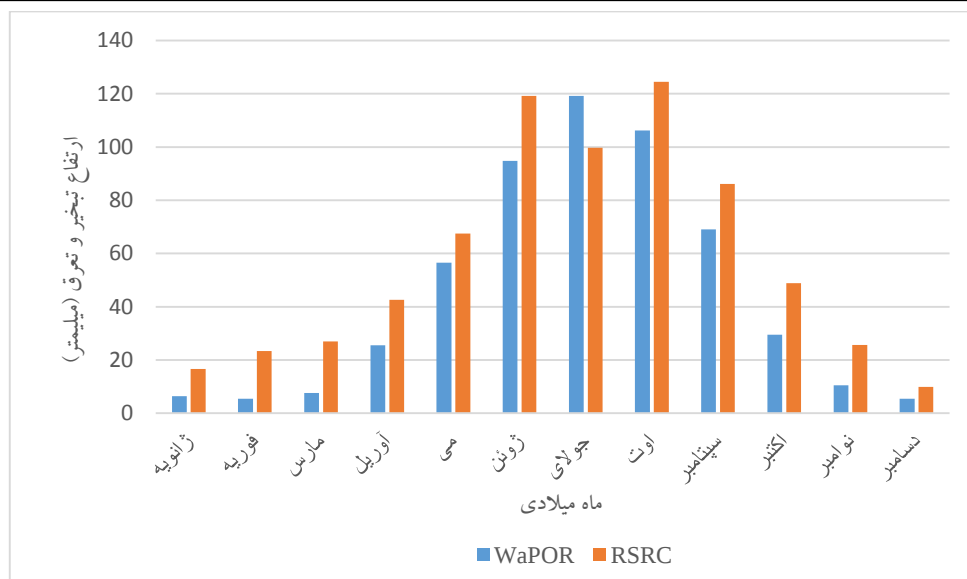


شکل ۲۳- بررسی هیستوگرام برای نقشه های تبخیر و تعرق در سال ۲۰۱۴ میلادی - الف - هیستوگرام مربوط به مرکز RSRC
ب - هیستوگرام مربوط به سامانه WaPOR

۳-۴-۳- تحلیل زمانی و مکانی تبخیر و تعرق

در پژوهش صورت گرفته نرخ تبخیر و تعرق واقعی حوضه دریاچه ارومیه طی ماه های مختلف در سال ۲۰۱۴ میلادی با استفاده از الگوریتم بیلان انرژی SEBAL و سامانه WaPOR در شکل ۲۴ آورده شده است. گام بعد با استفاده از نقشه های مرکز RSRC و سامانه WaPOR برای ماه های مختلف، وضعیت تبخیر و تعرق واقعی در زیر حوضه های مهم حوضه دریاچه ارومیه مقایسه و بررسی می شود.

برای بررسی بهتر تغییرات در سامانه WaPOR و مرکز RSRC به صورت مکانی، نقشه میزان تبخیر و تعرق در ماه های سال ۲۰۱۴ میلادی تهیه شد. برای بدست آوردن میزان اختلاف، چهار زیر حوضه مهم به عنوان واحدهای مکانی انتخاب شدند. برای این منظور نقشه های تبخیر و تعرق با توجه به موقعیت زیر حوضه ها بریده می شود و پس از میانگین گیری در جدول ۱۱ آورده شده است.



شکل ۲۴- متوسط مقادیر تبخیر و تعرق در حوض آبریز دریاچه ارومیه (۲۰۱۴ میلادی)

برای ارزیابی نرخ تغییرات سامانه WaPOR و مطالعه مرکز RSRC در ماه های مختلف، میانگین تبخیر و تعرق محاسبه شده در محدوده ی زیرحوضه های میاندوآب، سراب، ارومیه و نقده و اشنویه مورد بررسی قرار گرفت و در جدول ۱۱ نشان داده شده است. بر اساس این جدول، میزان تبخیر و تعرق در ماه های مختلف در سامانه WaPOR در واحدهای مکانی مختلف روند افزایشی و کاهشی تقریباً مشابهی دارند.

اراضی کشاورزی زیرحوضه میاندوآب و ارومیه نسبت به اراضی کشاورزی زیرحوضه های سراب و نقده و اشنویه در تمامی ماه ها میزان تبخیر و تعرق بیشتری دارند و اراضی کشاورزی زیرحوضه ارومیه با ۷۱۷ میلی متر در مقابل ۷۰۲ میلی متر اراضی کشت میاندوآب مقدار تبخیر و تعرق بالاتری دارد. در کنار اختلاف ناچیز بین مقادیر تبخیر و تعرق این دو زیرحوضه، نسبت تبخیر و تعرق در ماه های مختلف به مقدار سالانه در این دو زیرحوضه تقریباً یکسان است و با حرکت به سمت فصل کشت افزایش می یابد تا به بیشترین مقدار در ماه جولای برسد. زیرحوضه سراب نیز با ارتفاع تبخیر و تعرق ۴۱۳ میلی متر کمترین تبخیر و تعرق را در بین این چهار زیرحوضه دارد. در حالی که بر اساس خروجی مطالعه مرکز RSRC مجموع ارتفاع تبخیر و تعرق ماهانه برای اراضی کشاورزی زیرحوضه های میاندوآب، نقده و اشنویه، ارومیه و سراب به ترتیب برابر با ۷۷۷، ۷۵۴، ۷۳۱ و ۵۱۹ میلی متر است که الگوی متفاوتی نسبت به نتایج سامانه WaPOR دارد.

بررسی در مقدار اختلاف بین مقادیر ماهانه تبخیر و تعرق سامانه WaPOR و مرکز RSRC نشان می دهد کمترین مقدار اختلاف در دشت میاندوآب و بیشترین میزان اختلاف در زیرحوضه سراب رخ داده است و تنها

در منطقه ارومیه مقادیر تبخیر و تعرق سامانه WaPOR به طور متوسط بیشتر از خروجی مرکز RSRC است و در سه زیرحوضه دیگر، به طور معمول در تمامی ماهها مرکز RSRC مقادیر بیشتری برآورد داشته است.

جدول ۱۱- متوسط تبخیر و تعرق اراضی کشاورزی به تفکیک زیرحوضه های مهم حوضه دریاچه ارومیه (میلی متر)

میان دو آب	ارومیه		سراب		نقده و اشنویه		
	RSRC	WaPOR	RSRC	WaPOR	RSRC	WaPOR	
ژانویه	۶/۵	۸/۷	۷/۵	۶/۴	۶/۳	۳۱/۶	۱۸/۷
فوریه	۴/۴	۲۰/۶	۵/۹	۶/۲	۶/۴	۲۴/۸	۱۲/۹
مارس	۱۱	۳۵/۴	۶/۵	۲۹/۳	۳/۶	۱۷/۱	۳۲
آوریل	۳۷/۷	۳۶/۸	۲۹/۷	۴۰/۶	۹/۶	۴۷/۸	۴۵/۸
می	۷۱/۶	۷۱/۹	۷۰/۴	۹۱/۳	۴۰/۵	۸۱/۴	۸۱/۳
ژوئن	۱۲۱/۹	۱۳۴/۷	۱۲۴/۳	۱۰۶/۹	۹۰	۱۵۹/۳	۱۳۲/۴
جولای	۱۵۱/۱	۱۰۹/۲	۱۵۶/۷	۱۱۷	۱۰۳/۹	۱۱۹/۹	۱۲۰/۱
اوت	۱۴۲/۸	۱۴۶/۹	۱۴۵/۵	۵۴/۹	۸۳/۹	۱۱۳/۹	۱۴۸/۹
سپتامبر	۹۹/۷	۱۱۱/۱	۱۰۳/۹	۳۸/۴	۴۵/۲	۷۵/۳	۸۵/۳
اکتبر	۳۹/۱	۵۷/۵	۴۴	۱۴/۶	۱۷/۱	۳۵/۴	۴۶/۲
نوامبر	۱۱	۲۸/۸	۱۴/۸	۱۲/۳	۵/۴	۲۲/۷	۲۳/۶
دسامبر	۵/۱	۱۵/۷	۷/۹	۱	۱/۵	۲/۳	۶/۵

۳-۴-۴- مقایسه مقادیر محاسباتی سنجنده ها با سامانه WaPOR

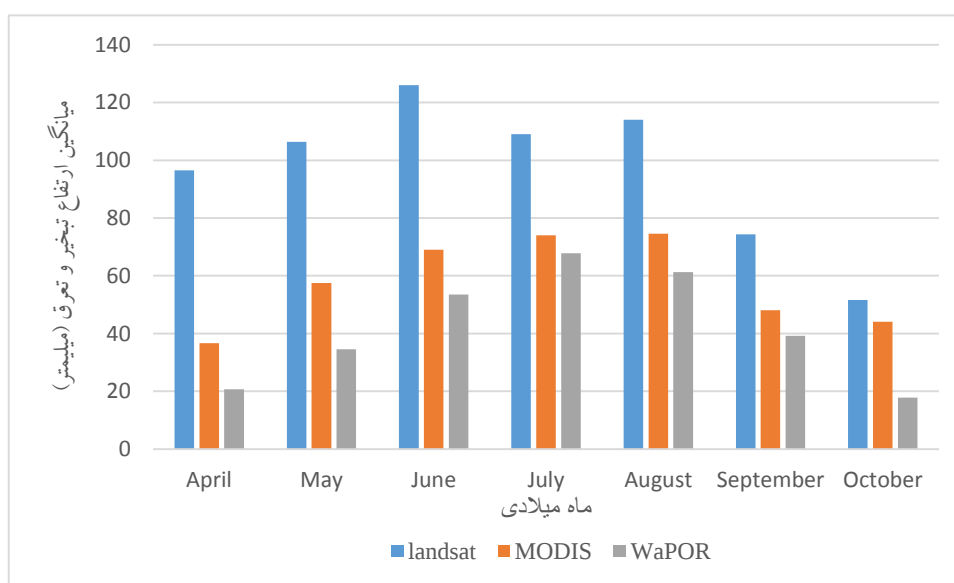
به منظور مقایسه ماهانه اطلاعات خروجی از سنجنده های مختلف، نتایج محاسبه تبخیر و تعرق ماهانه مربوط به تصاویر Terra-MODIS و Landsat8-OLI در جدول ۱۲ خلاصه شده است. بررسی ماهانه نتایج خروجی تبخیر و تعرق واقعی توسط سامانه WaPOR و مرکز RSRC در ماه های میلادی آوریل، می، ژوئن، ژوئیه، اوت، سپتامبر و اکتبر از سال ۲۰۱۴ میلادی ارائه شده است. محاسبات مرکز RSRC بر پایه تصاویر Terra-MODIS و Landsat8-OLI در داخل حوضه میاندوآب و برای اراضی کشت آبی و باغی و همچنین اراضی بایر اطراف محاسبه شده و نقشه های خروجی سامانه WaPOR براساس الگوریتم ETLook محاسبه شده است که در این بخش به مقایسه نتایج حاصل از آن پرداخته خواهد شد (شکل ۲۵).

برای بررسی نرخ تغییرات در ماه های مختلف، میانگین تبخیر و تعرق محاسبه شده در محدوده مورد بررسی، در جدول ۱۲ نشان داده شده است. بر اساس این جدول، میزان تبخیر و تعرق در ماه های مختلف روند افزایشی و کاهشی تقریباً مشابهی دارند. تنها تفاوت در روند تغییرات تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط ماهواره لندست و سامانه WaPOR در فاصله ماه های ژوئن و ژوئیه رخ داده و در مقایسه سنجنده MODIS و سامانه WaPOR تفاوت در ماه های ژوئیه و اوت مشاهده می شود.

جدول ۱۲- میزان تبخیر و تعرق میانگین (بر حسب میلی متر) در حوضه دشت میاندوآب و همچنین اختلاف میان دو سنجنده

لندست و مادیس با سامانه WaPOR (سال ۲۰۱۴ میلادی)

ماه میلادی	لندست	مادیس	سامانه WaPOR
آوریل	۹۶/۵	۳۶/۷	۲۰/۷
می	۱۰۶/۴	۵۷/۵	۳۴/۵
ژوئن	۱۲۶	۶۹	۵۳/۵
ژوئیه	۱۰۹	۷۴	۶۷/۸
اوت	۱۱۴	۷۴/۶	۶۱/۳
سپتامبر	۷۴/۴	۴۸/۱	۳۹/۲
اکتبر	۵۱/۶	۴۴/۱	۱۷/۸



شکل ۲۵- نمودار میانگین ارتفاع تبخیر و تعرق در دشت میاندوآب (Landsat، MODIS و سامانه WaPOR)

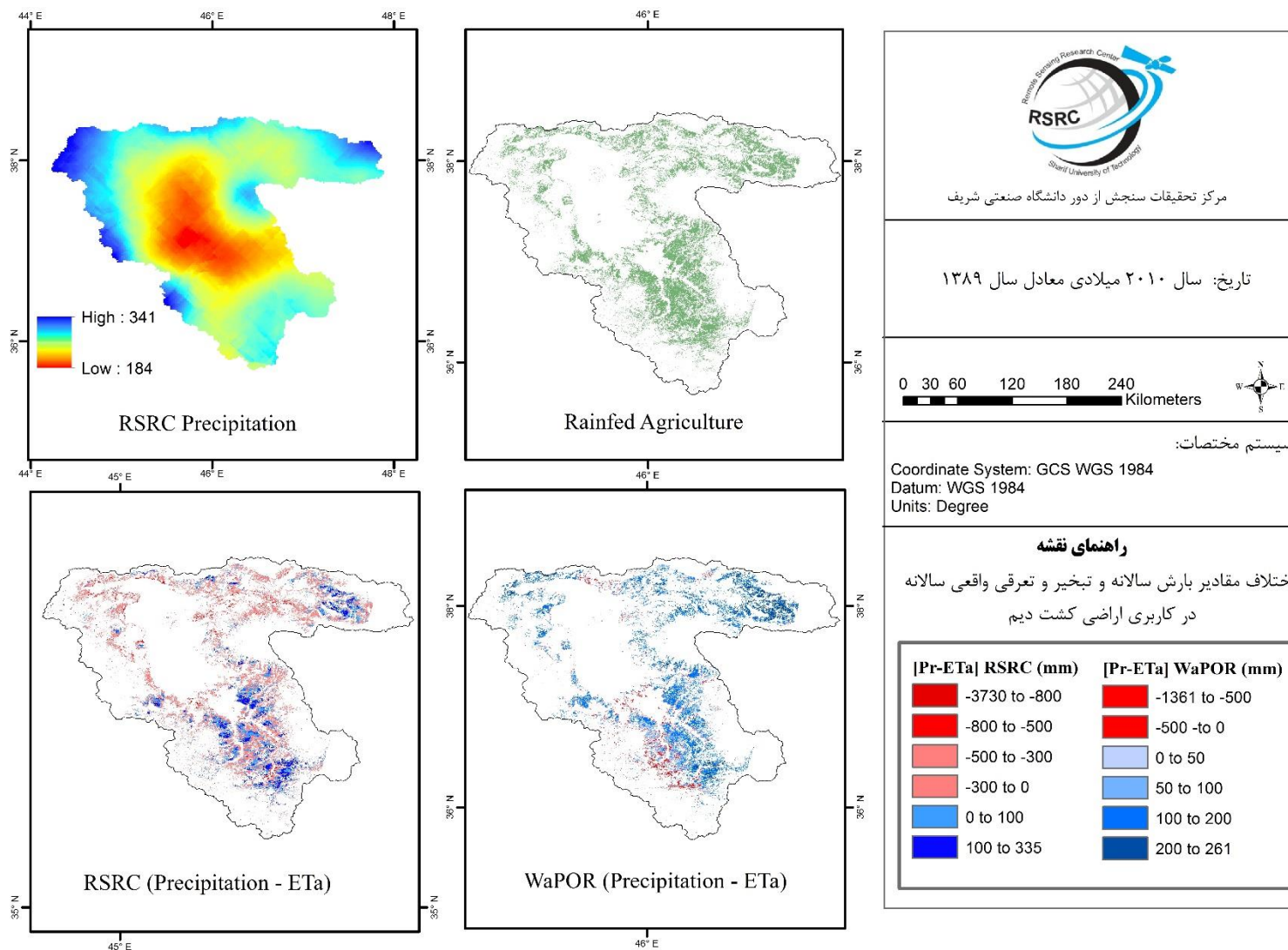
همان طور که قبلاً اشاره شد، مقادیر محاسباتی توسط مطالعه مرکز RSRC بیشتر از مقادیر سامانه WaPOR و مقادیر محاسبه شده توسط ماهواره لندست بیشتر از مقدار محاسبه شده توسط سنجنده MODIS می باشد.

بیشترین مقدار اختلاف تبخیر و تعرق بین نقشه های خروجی از ماهواره لندست و سامانه WaPOR وجود دارد، که مربوط به ماه آوریل است و مقادیر آنها به ترتیب حدود ۹۶/۵ و ۲۰/۷ میلی متر در ماه است. نکته قابل توجه دیگر این است که با حرکت به سمت ماه اکتبر، میزان اختلاف بین مقادیر محاسباتی مرکز RSRC و سامانه WaPOR عموماً کاهش پیدا کرده است. یک دلیل محتمل برای این موضوع کاهش میزان تبخیر و تعرق ماهانه در فصول سردتر است.

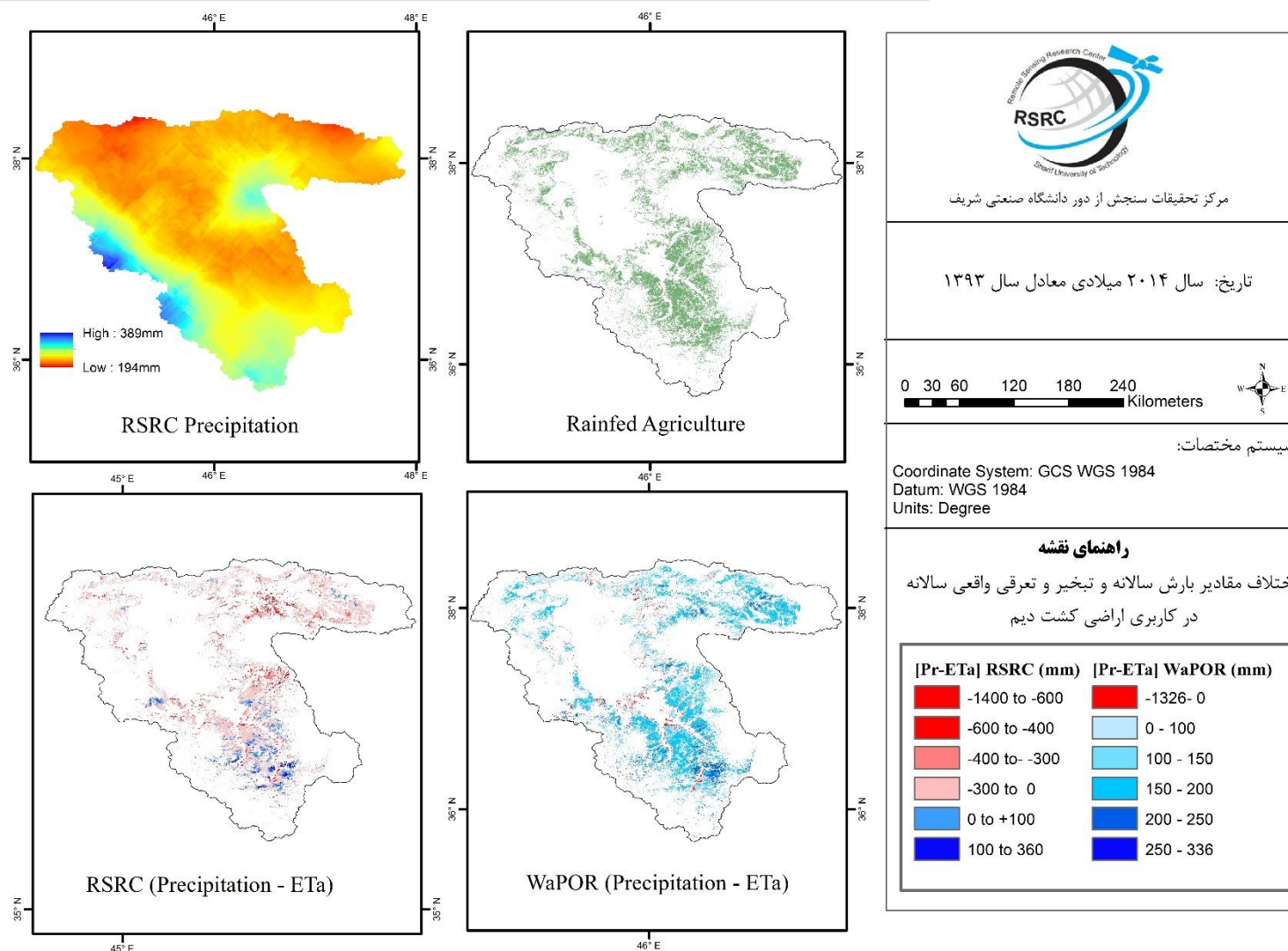
۳-۴-۵- بررسی اختلاف نتایج در کاربری اراضی کشت دیم

از آنجایی که اطلاعات لایسیمترهای حوضه آبریز دریاچه ارومیه از گسترده گی مکانی و زمانی خوبی برخوردار نیستند، لذا به ناچار باید روش های دیگری را برای صحت سنجی نتایج تبخیر و تعرق واقعی جستجو کرد. یکی از این روش ها بررسی نتایج در کاربری اراضی کشت دیم می باشد. در مناطقی که زمین های کشاورزی آبیاری می شوند، عمدتاً مقدار تبخیر و تعرق واقعی از مقدار بارش بیش تر است که این عدد به چندین برابر مقدار کل بارش سالانه نیز می رسد. در مراتع کوهستانی نیز به دلیل شیب زیاد زمین، در عمل تبخیر و تعرق خاصی انتظار نمی رود؛ اما اراضی با کاربری کشت دیم که بین این دو حالت می باشند بهترین گزینه برای ارزیابی مقدار تبخیر و تعرق می باشند؛ چرا که در این اراضی به دلیل عدم آبیاری توسط چاه یا رودخانه ها، تبخیر و تعرق نمی تواند از بارش پیشی بگیرد و طبق مطالعاتی که صورت پذیرفته است مقداری در حدود ۰/۶ تا ۰/۷ بارش را دارا می باشد (Wang et al., 2008). همین طور به دلیل اینکه این اراضی عمدتاً در شیب های ملایم تری نسبت به ارتفاعات قرار دارند، انتظار می رود که از پتانسیل نگهداشت رطوبت مناسبی برخوردار باشد.

در این بخش، میزان تبخیر و تعرق واقعی ارائه شده در سامانه WaPOR و محاسبه شده توسط مرکز RSRC در سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ در اراضی با کاربری دیم مقایسه شده اند (شکل های ۲۶ و ۲۷). نتایج نشان می دهد میانگین مقدار تبخیر و تعرق واقعی سالانه سامانه WaPOR در سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ در اراضی با کاربری کشت دیم به ترتیب ۱۰۴ و ۱۳۵ میلی متر کمتر از مقدار مجموع بارش سالانه محاسبه شده توسط مرکز RSRC که به ترتیب برای سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ برابر با ۳۴۱ و ۳۸۹ میلی متر (RSRC، ۱۳۹۵) بوده است و این در حالی است که میانگین مقدار تبخیر و تعرق واقعی سالانه محاسبه شده توسط مرکز RSRC در سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ در اراضی با کاربری کشت دیم به ترتیب ۱۰۰ و ۱۷۰ میلی متر بیش تر از مقدار مجموع بارش سالانه مرکز RSRC برآورد شده است.



شکل ۲۶- تفاوت ارتفاعی مقادیر بارش و تبخیر و تعرق سالانه در اراضی دیم در سال ۲۰۱۰

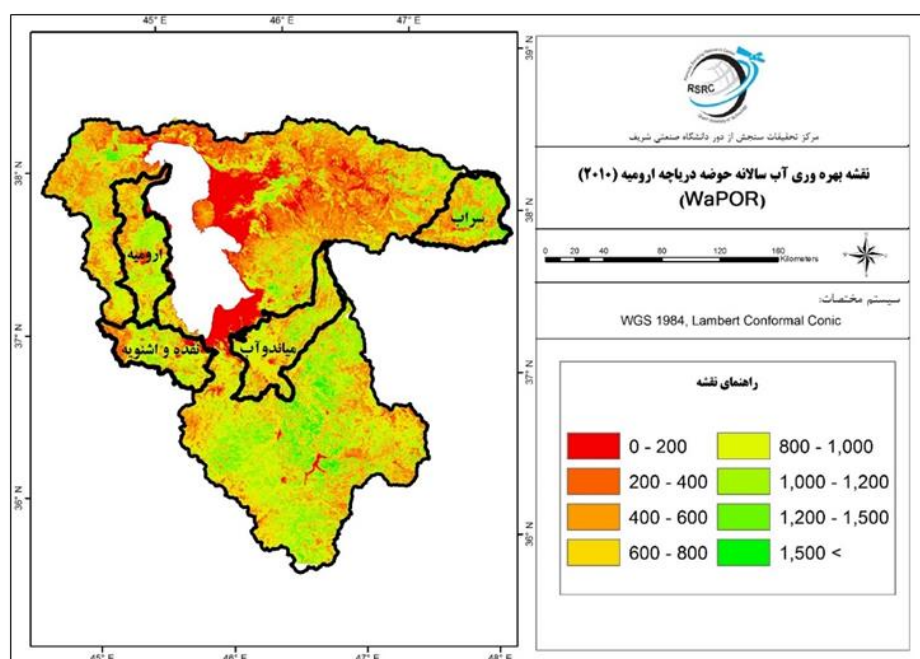


شکل ۲۷- تفاوت ارتفاعی مقادیر بارش و تبخیر و تعرق سالانه در اراضی دیم در سال ۲۰۱۴

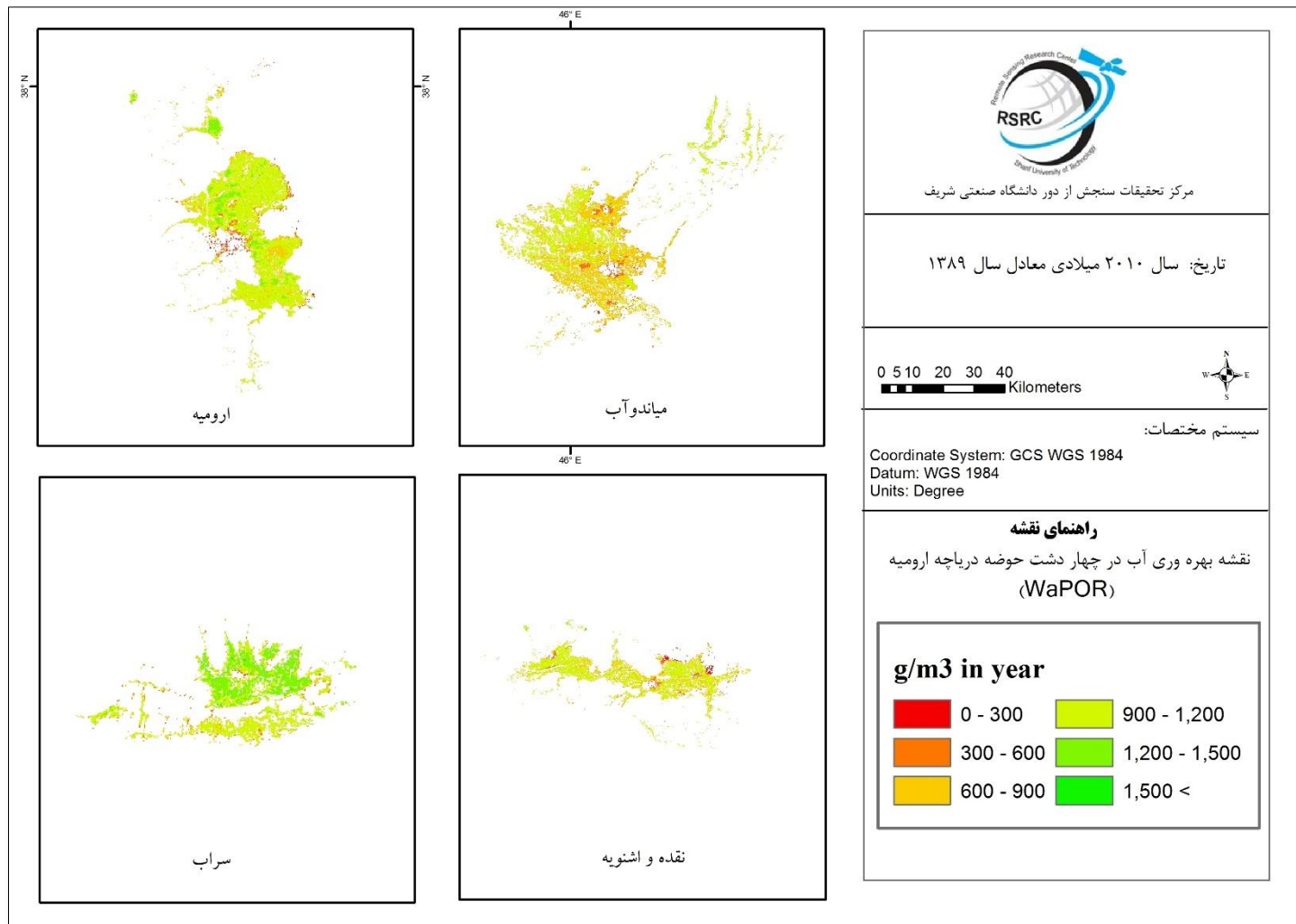
۳-۴-۶- مقایسه بهره‌وری زیرحوضه بر اساس مصرف آب

در مطالعه مصارف و میزان آب قابل صرفه‌جویی محدوده‌های کشاورزی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی، میزان صرفه‌جویی در ۴ دشت مهم حوضه (ارومیه، سراب، میاندوآب و نقده و اشنویه) توسط مرکز RSRC بررسی شده است. از نظر صرفه‌جویی قابل حصول، بیشترین درصد صرفه‌جویی به دشت ارومیه با ۳۹٪ تعلق دارد. پس از آن منطقه نقده و اشنویه با ۳۱٪، میاندوآب با ۲۵٪ و سراب با ۲۰٪ در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند (مرکز RSRC، ۱۳۹۴). در همین راستا در ادامه، میزان بهره‌وری استخراجی توسط سامانه WaPOR با نتیجه گزارش فوق مقایسه می‌گردد (شکل ۲۸). با توجه به مقادیر خروجی از این سامانه متوسط بهره‌وری آب در سراب با $1/109 \text{ Kg/m}^3$ بیشترین مقدار را در مقابل سایر دشت‌ها دارد پس از آن ارومیه با $1/106$ ، نقده و اشنویه با $0/909$ و میاندوآب با $0/862 \text{ Kg/m}^3$ قرار دارند. مقادیر مربوط به مرکز RSRC و سامانه WaPOR حاکی از آن است که بهترین وضعیت از نظر بهینه بودن مصرف آب به منطقه سراب تعلق دارد و این در حالی که در سایر مواد نتایج همخوانی ندارند.

بازه تغییرات بهره‌وری براساس نقشه بهره‌وری سامانه WaPOR برای میاندوآب بین $0/11$ تا $1/672 \text{ Kg/m}^3$ (std dev= 170.4)، در سراب بین $0/21$ تا $1/754 \text{ Kg/m}^3$ (std dev= 208.1)، در ارومیه $0/092$ تا $1/584 \text{ Kg/m}^3$ (std dev= 186.7) و نهایتاً در نقده و اشنویه بین $0/049$ تا $1/756 \text{ Kg/m}^3$ (std dev= 181.8) تغییر می‌کند.



شکل ۲۸- نقشه ناخالص بهره‌وری آب در حوضه دریاچه ارومیه (۲۰۱۰)



شکل ۲۹- نقشه ناخالص بهره‌وری آب در اراضی کشت آبی چهار دشت مهم حوضه دریاچه ارومیه (۲۰۱۰)

۳-۴-۷- مقایسه تبخیر از سطح دریاچه توسط سامانه WaPOR و مطالعه مرکز RSRC

در یکی از پروژه های مرکز RSRC با توسعه مدل های تجربی مختلف برای دریاچه ارومیه میزان تبخیر از سطح دریاچه در سال ۲۰۱۰ محاسبه شده است (جدول ۱۳). به منظور شناخت روش مناسب مقادیر محاسباتی از طریق شاخص های آماری با داده های بدست آمده از طریق بیلان انرژی مقایسه می شوند. با توجه به مقایسه انجام شده دقیق ترین روابط برای محاسبه تبخیر دریاچه ارومیه بر مبنای شاخص جذر میانگین مجموع مربع خطا ها (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) انتخاب شده است. روابط Debruin/Keijman، Penman، Priestly/Taylor و Turc به ترتیب دقیق ترین روابط در مقیاس روزانه و ماهانه هستند (مرکز RSRC، ۱۳۹۳). دو رابطه اول نیاز به ۵ نوع داده (گرمای نهان تبخیر/چگالی آب/دمای آب/تشنع خالص/فشار هوا) دارند. رابطه پنمن علاوه بر داده های مورد نیاز دو روش قبل نیاز به داده های سرعت باد و فشار بخار هوا در بالای سطح آب نیز دارد. رابطه Turc با وجود دقت پایین تری که نسبت به سه روش دیگر دارد داده های مورد نیاز آن به سه نوع داده درجه حرارت هوا، تشنع خورشیدی و رطوبت نسبی محدود می شود و از نظر هزینه محاسباتی روش مقرون به صرفه ای محسوب می شود (مرکز RSRC، ۱۳۹۳).

جدول ۱۳- مقایسه روش های محاسبه تبخیر دریاچه ارومیه در مرکز RSRC با سامانه WaPOR

نام روش	April	May	June	July	August	September	October
Developed Meyer	۸۳/۷	۱۲۰/۹	۲۱۵/۶	۲۵۱/۴	۲۰۸/۹	۱۶۲/۲	۷۳/۷
Developed Harbeck	۲۸/۲	۴۶/۶	۷۶/۴	۱۱۱/۵	۸۱/۷	۶۳/۳	۲۴/۹
Debruin/Keijman	۱۶۷/۳	۲۰۸/۳	۲۰۸/۸	۲۰۲/۵	۱۶۸/۳	۱۱۵/۵	۷۹/۸
Penman	۱۵۹/۵	۲۰۱/۷	۲۱۴/۱	۲۲۰/۷	۱۸۲/۹	۱۳۴/۱	۸۹/۱
Priestly/Taylor	۱۶۳/۹	۲۰۶/۹	۲۱۰	۲۰۴/۴	۱۶۹/۵	۱۱۵/۷	۷۸/۵
stephen stewart	۹۸/۶	۱۳۳/۳	۱۵۵/۴	۱۵۶/۲	۱۳۴/۲	۱۰۵/۷	۶۵/۵
Ryan/Harleman	۵۹/۵	۸۹/۷	۱۴۳/۵	۱۸۷/۳	۱۵۱/۲	۹۴/۷	۵۵/۲
Turc	۱۳۸/۷	۱۷۵/۶	۲۲۶/۶	۲۲۰/۳	۱۸۳/۷	۱۴۱/۶	۹۳/۷
Dalton	۳۶/۵	۵۸/۶	۸۳/۴	۱۲۱/۱	۹۱/۲	۵۶/۸	۳۵/۱
Bulk/Aerodynamic	۳۱۷/۹	۵۱۰/۶	۷۱۵	۱۰۳۹/۵	۷۸۱/۶	۴۸۵/۸	۲۹۹/۱
Meyer	۱۳۵/۵	۱۹۰/۸	۳۰۲/۸	۳۵۳/۳	۳۰۲/۵	۱۹۳/۴	۱۲۹/۷
BREB	۱۷۶/۳	۲۰۷/۲	۲۰۲/۴	۱۹۳/۸	۱۶۰/۵	۱۱۰/۹	۷۷
WaPOR	۸۸/۳	۱۷۰	۲۲۸/۴	۲۳۸/۸	۲۰۶/۶	۱۵۵/۶	۱۱۴/۶

در پروژه تخمین تبخیر از سطح دریاچه ارومیه در مطالعه مرکز RSRC، میزان تبخیر برای محدوده دریاچه از آوریل تا اکتبر (فروردین تا مهر سال ۱۳۸۹ شمسی) در حدود ۱۱۵۸ میلی متر گزارش شده و در مدت زمان مشابه، سامانه WaPOR مقدار تبخیر از سطح دریاچه را حدود ۱۲۰۲ میلی متر نشان می دهد. مقایسه بین نتایج روش های مختلف در سال ۲۰۱۰ و نتیجه WaPOR، نشان می دهد که مقادیر تبخیر در گزارش مرکز RSRC اختلاف ناچیزی (کمتر از پنج درصد) با برآورد WaPOR دارد. دلیل این اختلاف تفاوت در روش محاسبه تبخیر می باشد. WaPOR با تعمیم الگوریتمی که برای محاسبه تبخیر و تعرق حوضه توسعه داده شده به محاسبه تبخیر از محیط آبی دریاچه پرداخته است. این در حالیست که روش تجربی دوبرین-کژمن برای محاسبه تبخیر در محیط های آبی توسعه داده شده و شوری آب نیز در آن لحاظ شده است که هر دوی این موارد منجر به بالا رفتن دقت محاسبات تبخیر با این روش می شود.

۳-۴-۸- بارش

در مطالعه حاضر مقدار ارتفاع بارش پایگاه TRMM و سامانه WaPOR با یکدیگر مقایسه شده است و اعداد حاصل نقشه های تولید شده توسط مرکز RSRC با دو روش دیگر مقایسه شد. مجموع ارتفاع بارش سال ۲۰۱۴ میلادی سامانه WaPOR، پایگاه TRMM و مرکز RSRC به ترتیب برابر ۳۶۸/۵، ۴۵۰ و ۲۵۴ است که اختلاف قابل توجهی با هم دارند.

جهت بهره گیری از اطلاعات ایستگاه های جهانی بارش لازم است تا اطلاعات این ایستگاه ها با اطلاعات زمینی موجود در حوضه آبریز مقایسه و صحت سنجی آماری شود. جدول ۱۴ شاخص های آماری واسنجی مورد مطالعه بین پایگاه های بارش به عنوان مقادیر برآورد مدل و آمار بارش ایستگاه های زمینی به عنوان داده های اندازه گیری شده، را نشان می دهند.

جهت محاسبه خطای ناشی از برآورد بارش در پایگاه های مختلف نسبت به مقادیر مبنا، از شاخص آماری خطای جذر میانگین مربعات یا RMSE^۹ استفاده گردید (رابطه (۱۶)).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (16)$$

در این فرمول P_i مقادیر مدل سازی شده، O_i مقادیر مشاهده شده و n تعداد داده می باشد. این آزمون تفاوت میان مقدار پیش بینی شده توسط مدل ها و الگوریتم های بارش (برآوردگر آماری) و مقدار واقعی آن

^۹ Root Mean Square Error

را نشان داده و میزان خطا را با واحد مورد استفاده در آزمایش که در اینجا میلی متر در ماه است نشان می دهد. هرچه مقدار عددی شاخص RMSE کمتر باشد میزان خطای مدل نیز پایین تر است. همان طور که از جدول ۱۴ مشخص است، پارامترهای آماری نشان می دهند که سامانه WaPOR عملکرد بهتری نسبت پایگاه TRMM دارد.

میزان ضریب خطای جذر میانگین مربعات بین آمار زمینی و آمار ماهواره ای بارش به طور کلی و برای همه ماه های سال ۲۰۱۴ میلادی بسته به ارتفاع بارش متغیر است. این ضریب در ماه های ژوئن تا سپتامبر افت معنی داری پیدا می کند و در حالت کلی با افزایش میزان بارندگی میزان RMSE افزایش می یابد.

جدول ۱۴- مقادیر شاخص های آماری واسنجی مورد مطالعه در حوضه دریاچه ارومیه

RSRC	TRMM		WaPOR		
	خطا نسبت به اطلاعات ایستگاه های زمینی (mm)	متوسط ارتفاع بارش (mm)	خطا نسبت به اطلاعات ایستگاه های زمینی (mm)	متوسط ارتفاع بارش (mm)	
۲۱/۴	۳۶	۵۰	۲۶/۸	۳۵/۹	ژانویه
۷/۶	۲۱	۲۰	۲۳/۳	۱۶/۴	فوریه
۵۶/۸	۳۷/۳	۸۰	۲۷/۹	۶۶/۶	مارس
۲۶/۲	۱۶/۵	۳۰	۱۶/۷	۳۵/۸	آوریل
۳۰	۲۶	۵۰	۲۰/۴	۳۸/۹	می
۴/۴	۱۱/۳	۱۰	۸/۵	۸	ژوئن
۶/۲	۱۸/۳	۲۰	۸/۶	۶/۷	جولای
۰/۷	۹/۲	۱۰	۴	۱/۸	اوت
۰/۵	۲۹/۲	۲۰	۵/۳	۱/۷	سپتامبر
۴/۸	۲۵/۴	۱۳۰	۵۶/۴	۵۸/۵	اکتبر
۵۸/۶	۲۷/۱	۷۰	۲۹/۸	۶۲	نوامبر
۳۶/۷	۲۹/۶	۶۰	۲۴/۲	۱۸/۹	دسامبر

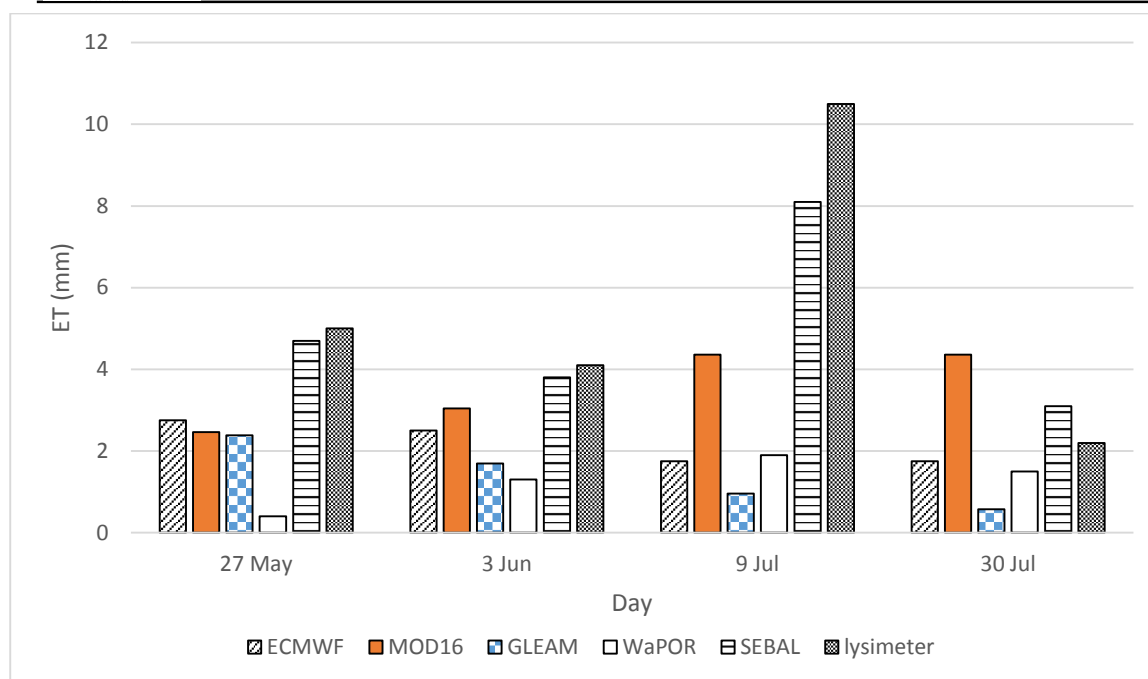
همانطور که اشاره شد ساخت نقشه بارش در مرکز RSRC براساس اطلاعات زمینی بود و باعث شده که نقشه های این مرکز با اطلاعات زمینی قابل مقایسه نباشد و مقدار نزدیکی نسبت به واقعیت داشته و از آمار ارائه شده توسط تصاویر ماهواره ای دقت بالاتری دارد.

۳-۵- مقایسه نتایج ET محصولات جهانی و الگوریتم SEBAL با داده های زمینی

۳-۵-۱- مقایسه با استفاده از لایسیمتر

در زمان تنظیم گزارش برآورد تبخیر و تعرق، مصارف و میزان آب قابل صرفه جویی محدوده های کشاورزی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی، تنها داده های ۱۶ روز از ماه های آوریل، می، ژوئن و جولای ایستگاه مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تبریز موجود بوده است (مرکز سنجش از دور شریف، ۱۳۹۴). با توجه به روزها و ماه های مورد مطالعه، تنها داده های چهار تاریخ یعنی بیست و هفتم ماه می، سوم ماه ژوئن، نهم ماه جولای و سی ام ماه جولای قابل مقایسه می باشد. نتایج داده های اندازه گیری شده در ایستگاه لایسیمتری، داده های محاسبه شده در نقشه های تولیدی به روش الگوریتم SEBAL اصلاح شده و اطلاعات خروجی از نقشه های تبخیر و تعرق محصولات جهانی ECMWF، MOD16، GLEAM و سامانه WaPOR در شکل ۳۰ نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان می دهد که مقادیر لایسیمتر با مقادیر محاسبه شده الگوریتم SEBAL توسط مطالعات مرکز RSRC مشابهاً قابل قبولی دارد. در بین محصولات جهانی نیز مقادیر تبخیر تعرق GLEAM و WaPOR اختلاف قابل توجهی با مقادیر تبخیر تعرق واقعی لایسیمتر دارند اما محصولات تبخیر تعرق MOD16 و ECMWF وضعیت بهتری از نظر نزدیکی با لایسیمترها دارند هرچند که باز هم اختلافشان با مقادیر لایسیمتر قابل اغماض نیست.

در ایستگاه لایسیمتر، مقدار متوسط ارتفاع تبخیر و تعرق واقعی برای محدوده کوچک دایره ای به قطر ۳۰ متر ارائه می شود، یعنی حدود ۷۰۰ مترمربع، حال آنکه تفکیک مکانی نقشه های تولیدی توسط روش SEBAL در این مطالعه و محصول MOD16، سلول های با ابعاد ۱ کیلومتر در ۱ کیلومتر و نقشه های 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 می باشند که این خود عملاً امکان مقایسه مناسب را محدود می نماید. با کاهش قابلیت تفکیک مکانی نقشه های تولیدی با استفاده از تغییر سنجنده مورد استفاده و یا ریزمقیاس نمودن تصاویر و هم چنین افزایش تعداد روزها و ایستگاه های لایسیمتری می توان امکان مقایسه مناسب تری را بین دو نقطه از مدل سازی و داده واقعی از محل برقرار نمود (مرکز سنجش از دور دانشگاه شریف، ۱۳۹۴).



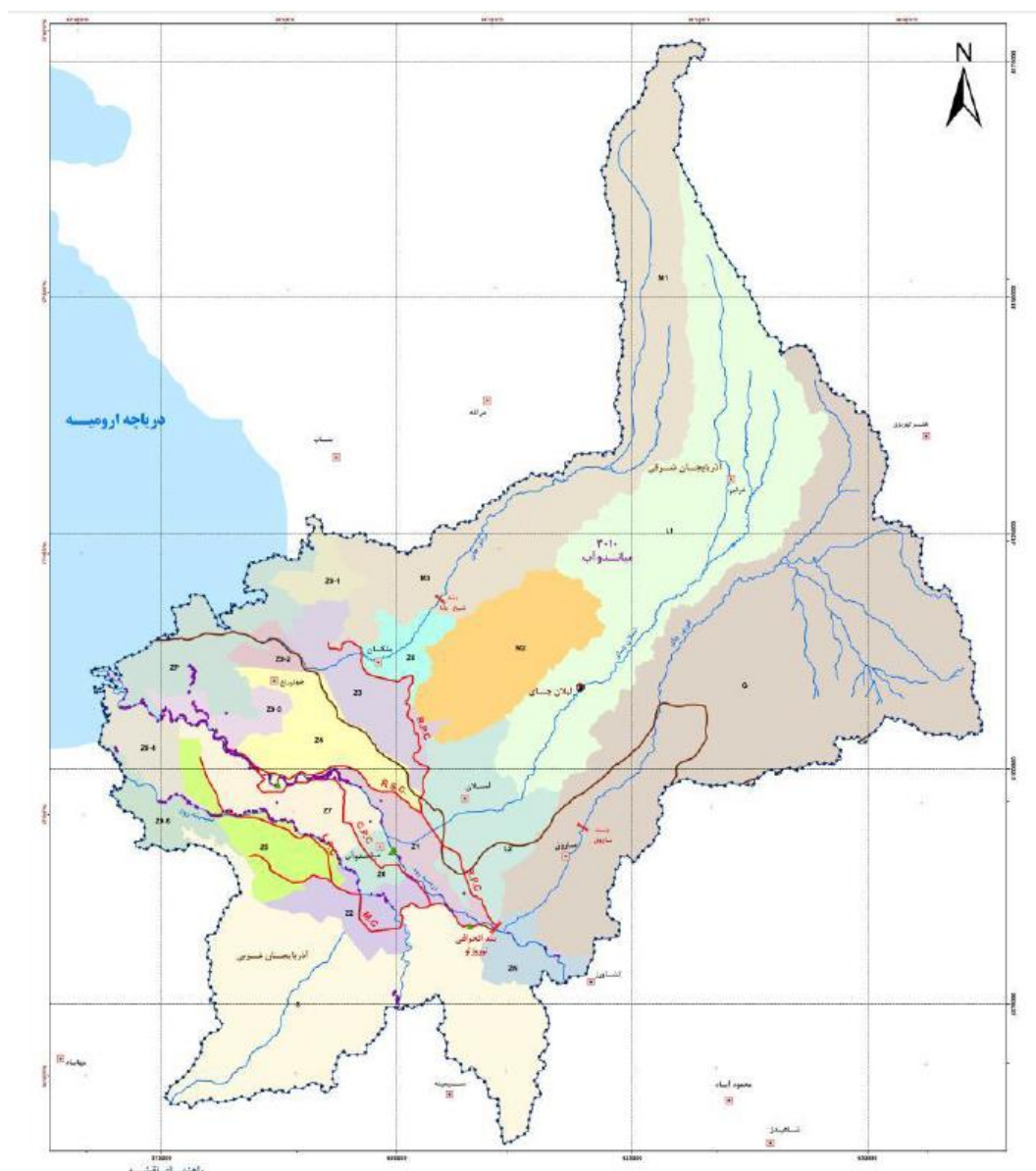
شکل ۳۰- مقایسه مقادیر ET محصولات جهانی و الگوریتم SEBAL با مقادیر لایسیمتر تبریز در سال ۲۰۱۰

۳-۵-۲- مقایسه با استفاده از مقادیر تخصیص یافته برای شبکه آبیاری زهکشی زرينه رود و سيمينه رود

حوضه آبریز سيمينه رود و زرينه 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 برمی گیرد که قسمت عمده آن در استان آذربایجان غربی و بخش کوچکی از آن در استان های آذربایجان شرقی و کردستان واقع شده است.

رودخانه های زرينه رود و سيمينه رود با پتانسیل آبدهی حدود ۳ میلیارد مترمکعب در سال، از جمله رودخانه های پرآب کشور محسوب می شود که به همراه پتانسیل های طبیعی و اجتماعی متعدد موجب توسعه فعالیت های کشاورزی در دشت های آبخور حوضه خود شده است. احداث شبکه های آبیاری همچون میاندوآب به همراه مخازن سد هایی مانند شهید کاظمی بوکان، امکاناتی را در سطح حوضه ایجاد نموده اند که در حال حاضر در حدود ۱۵۰۰۰۰ هکتار از اراضی حوضه، تحت کشت آبی به صورت سنتی و مدرن قرار گرفته است. کاهش ۴۰ درصدی مصارف کشاورزی در حوضه آبریز رودخانه های زرينه رود و سيمينه رود یکی از مصوبات ستاد احیای دریاچه ارومیه می باشد که راهکارهای اجرایی نمودن این مصوبه در قالب یک پروژه مطالعاتی به شرکت مهندسين مشاور یکم واگذار شده است (مهندسين مشاور یکم، ۱۳۹۵). در گزارشی که شرکت مذکور برای ارائه راهکارهایی جهت کاهش ۴۰ درصدی مصرف آب کشاورزی در این حوضه منتشر

کرده است، حوضه زرينه رود و سيمينه رود به چندین منطقه مطالعاتی بر اساس وضعیت شبکه آبیاری زهکشی، نوع کشت و نوع آبرسانی و همینطور وضعیت هیدرولوژیک منطقه تقسیم شده است (شکل ۳۱). در این گزارش برای هریک از مناطق مطالعاتی میزان مصرف آب کشاورزی باتوجه به تخصیص آب برآورد شده است (جدول ۱۵).



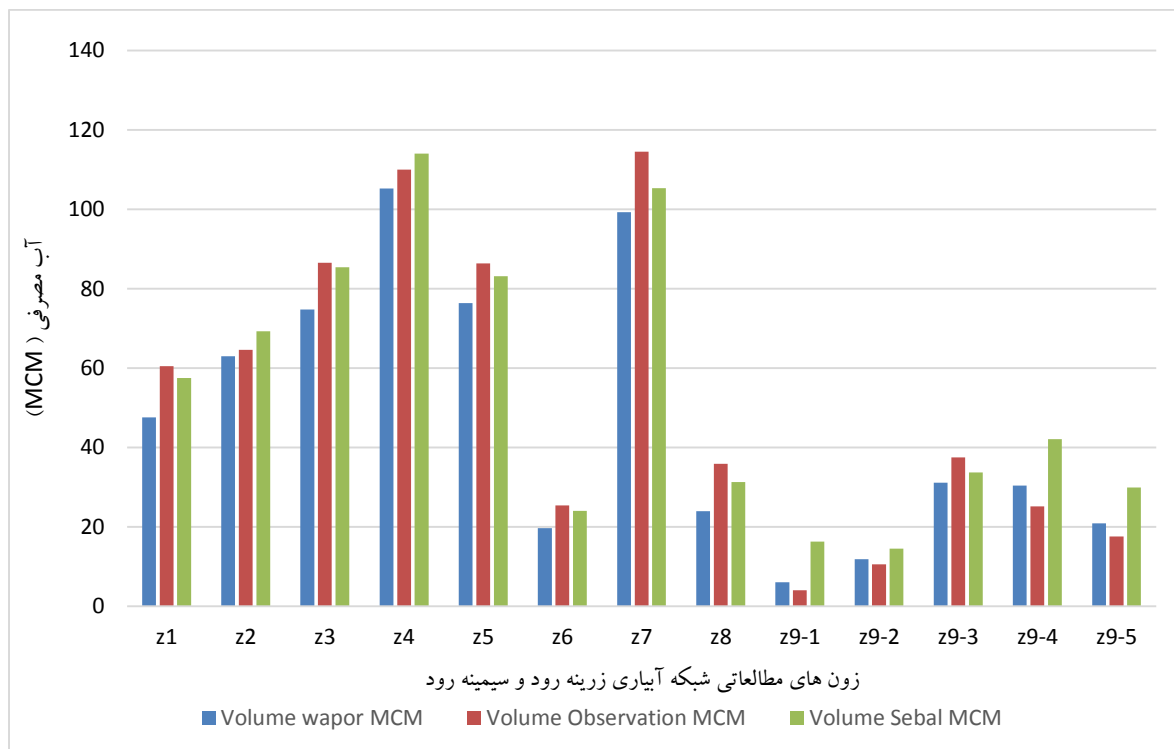
شکل ۳۱- منطقه بندی بخشی از حوضه آبریز زرينه رود و سيمينه رود (مهندسین مشاور یکم، ۱۳۹۵).

جدول ۱۵- آب مصرفی مشاهداتی مناطق منتخب حوضه آبریز زرینه رود و سیمینه رود در سال ۱۳۹۲-۱۳۹۳

کد منطقه مطالعاتی	مساحت (m^2)	آب مصرفی مشاهداتی (MCM)
z1	62278100	60.5
z2	78021900	64.6
z3	111524000	86.5
z4	121876000	110
z5	94051800	86.4
z6	26905900	25.4
z7	111254000	114.5
z8	49239500	35.9
z9-1	39431700	4
z9-2	25634200	10.6
z9-3	42402900	37.5
z9-4	65919000	25.13
z9-5	48330000	17.6

با توجه به اینکه محصول تبخیر تعرق WaPOR هم از نظر تفکیک مکانی و هم از نظر توزیع مکانی از الگوی بهتری نسبت به محصولات دیگر برخوردار است، 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 اینکار ابتدا آب مصرفی هریک از زون های مطالعاتی جدول ۱۵ از طریق مقادیر تبخیر و تعرق الگوریتم SEBAL و WaPOR محاسبه شد تا برای مقایسه با مقادیر مشاهداتی مهیا گردند. مقادیر آب مصرفی هریک از دو روش فوق در مقایسه با مقادیر مشاهداتی در شکل ۳۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که هم مقادیر تبخیر تعرق محصول WaPOR و هم الگوریتم SEBAL از نزدیکی خوبی با مقادیر مشاهداتی برخوردار هستند. 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 کم تخمین (Underestimate) و الگوریتم SEBAL نسبت به مقادیر مشاهداتی بیش تخمین (Overestimate) است ولی در مجموع میزان اختلاف آن ها با مقادیر مشاهداتی در این مناطق قابل قبول ارزیابی می شود. نکته مهمی که باید در این تحلیل به آن اشاره کرد این است که احتمالاً میزان آب مصرفی این مناطق از مقادیر مشاهداتی باید بیش تر باشد چرا که کشاورزان معمولاً جدا از مقادیر تخصیص یافته ممکن است از چاه های غیر مجاز نیز برای آبیاری استفاده کرده باشند که قاعدتاً در این مقادیر مشاهداتی لحاظ نشده

است. پس با در نظر گرفتن این نکته، الگوریتم SEBAL برتری محسوس نسبت به محصول WaPOR در تخمین مقادیر آب مصرفی شبکه آبیاری زهکشی زرينه رود و سيمنه رود داشته است.



شکل ۳۲- مقایسه مقادیر آب مصرفی مشاهداتی با الگوریتم SEBAL و محصول WaPOR

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این بررسی، برخی از روش های موجود برای دستیابی به مقادیر تبخیر و تعرق واقعی تشریح شد. همان طور که اشاره شد هر کدام از این روش ها مزایا و معایب خاص خود را دارا می باشند. روش هایی مانند استفاده از تبخیر و تعرق مرجع به دلیل نقطه ای بودن آن کاربرد چندانی ندارند. استفاده از محصولات آماده تبخیر و تعرق نیز به دلیل عدم بومی سازی الگوریتم های مورد استفاده و همین طور عدم واسنجی در مکان های مختلف، توصیه نمی شود. لذا همچنان برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از داده های سنجش از دور در اولویت کار پژوهشگران قرار دارد. در بین روش های موجود، روش ET Look پایه فیزیکی بهتری از خود نشان می دهد. امتیازات این روش همچون در نظر گرفتن رطوبت خاک، عدم محدودیت در روزهای ابری، عدم محدودیت در اقلیم های مختلف و کاربرد در مناطق وسیع، بسیار قابل توجه می باشد. البته تجاری بودن این الگوریتم و عدم دسترسی کامل به ساختار محاسباتی این الگوریتم، امکان ارزیابی دقیق تر را فراهم ن ساخته است و همین طور محصول WaPOR که از الگوریتم ETLook استفاده می کند علی رغم دارا بودن توزیع

مکانی مناسب، از نظر مقداری نسبت به داده های زمینی، مقادیر کمتری را برآورد می کند که بعضاً این اختلاف قابل توجه است.

با در نظر گرفتن تمامی شرایط و محدودیت های برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه می توان گفت مناسب ترین گزینه استفاده از الگوریتم SEBAL اصلاح شده است که علی رغم محدودیت های ساختاری و فیزیکی هم چون عدم کاربرد در روزهای ابری، هم چنان از نظر اجرایی برتری های قابل توجهی نسبت به سایر روش ها دارد. مقایسه روش های مختلفی که در این مطالعه ذکر شد در جدول ۱۶ گزارش شده است.

جدول ۱۶- مقایسه روش های مختلف برآورد تبخیر و تعرق واقعی

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

۵- مراجع

- شرکت مهندسین مشاور یکم (۱۳۹۵)، راهکارهای اجرایی کاهش ۴۰ درصدی مصرف آب کشاورزی حوضه رودخانه های زرينه رود و سيمينه رود (محدوده های مطالعاتی صائين قلعه و مياندوآب).
- مرکز تحقیقات سنجش از دور (مرکز RSRC). (۱۳۹۴)، برآورد تبخیر و تعرق، مصارف و میزان آب قابل صرفه جویی محدوده های کشاورزی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ میلادی. پژوهشکده آب و انرژی دانشگاه صنعتی شریف.
- مرکز تحقیقات سنجش از دور (مرکز RSRC). (۱۳۹۳)، تخمین تبخیر از سطح دریاچه ارومیه. پژوهشکده آب و انرژی دانشگاه صنعتی شریف.
- مرکز تحقیقات سنجش از دور (مرکز RSRC). (۱۳۹۵)، پایش تغییرات مصارف آب و کاربری اراضی کشاورزی حوضه آبریز دریاچه ارومیه. پژوهشکده آب و انرژی دانشگاه صنعتی شریف.
- Allen, R. G., M. Tasumi, and R. Trezza (2007), Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model, J.Irrig. Drain. Eng., 133(4), 380–394.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.
- Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R., & Bastiaanssen, W. (2002). SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Advance Training and Users Manual—Idaho Implementation, version, 1, 97.
- Bastiaanssen, W. G. M., and K. Bandara (2001), Evaporative depletion assessments for irrigated watersheds in Sri Lanka, Irrig. Sci., 21(1), 1–15.
- Bastiaanssen, W. G. M., T. Van der Wal, and T. N. M. Visser (1996), Diagnosis of regional evaporation by remote sensing to support irrigation performance assessment, Irrig. Drain. Syst., 10(1), 1–23.
- Bausch, W.C., Neale, C.M.U., (1987). Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. Transactions of the ASAE 30, 703–709.
- Berrisford, P, Lee, D., Poli, P., Brugge, R., Fielding, K., Fuentes, M., Kållberg, P.Kobayashi, S., Uppala, S., Simmons, A., (2011). The ERA-interim archive. ERAReports Series No. 1
- Calcagno, G., G. Mendicino, G. Monacelli, A. Senatore, and P. Versace (2007), Distributed estimation of actual evapotranspiration through remote sensing techniques, in Methods and Tools for Drought Analysis and Management, edited by G. Rossi et al., pp. 125–147, Springer, Netherlands.
- Chen, Y., Xia, J., Liang, S., Feng, J., Fisher, J. B., Li, X., ... & Mu, Q. (2014). Comparison of satellite-based evapotranspiration models over terrestrial ecosystems in China. *Remote sensing of environment*, 140, 279-293
- Cleugh, H.A.; Leuning, R.; Mu, Q. (2007). Running, S.W. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. *Remote Sens. Environ.* 106, 285–304.

- de Fraiture, C., and D. Wichelns (2010), Satisfying future water demands for agriculture, *Agric. Water Manage.*, 97(4), 502–511.
- Droogers, P., W. W. Immerzeel, and I. J. Lorite (2010), Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations, *Agric. Water Manage.*, 97, 1351–1359
- gleam.eu
- Gowda, P.H., Chavez, J. L., Colaizzi, P. D., Evett, S. R., Howell, T. A., Tolck, J. A. (2007). ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. *Irrigation Science*. 26:223-237.
- Hatch, U., Jagtap, S., Jones, J., Lamb, M., (1999). Potential effects of climate change on agricultural water use in the southeast U.S. *Journal of the American Water Resources Association* 35 (6), 1551–1561.
- <http://www.ecmwf.int/>
- <http://www.fao.org/docrep/s2022e/s2022e03.htm#TopOfPage>
- <http://www.fao.org/in-action/remote-sensing-for-water-productivity/wapor/en/#/home>
- <http://www.ntsg.umt.edu/project/mod16>
- Hu, G., Jia, L., & Menenti, M. (2015). Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011. *Remote Sensing of Environment*, 156, 510-526.
- Inoue, Y. (2003). Synergy of Remote Sensing and Modeling for Estimating Ecophysiological Processes in Plant Production. *Plant Production Science*, 6:3–16.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter Jr., P.J., (1980). Remotely sensed crop temperatures and reflectances as inputs to irrigation scheduling. In: *Irrigation and Drainage Special Conference Proceedings*, ASCE, Boise, NY, USA, pp. 390–397.
- Jia, L., G. Xi, S. Liu, C. Huang, Y. Yan, and G. Liu (2009), Regional estimation of daily to annual regional evapotranspiration with MODIS data in the Yellow River Delta wetland, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 1775– 1787.
- Jia, Z.; Liu, S.; Xu, Z.; Chen, Y.; Zhu, M. (2012) Validation of remote sensed evapotranspiration over the Hai river basin, China. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 117.
- Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S. I., Sheffield, J., Goulden, M. L., ... & Dolman, A. J. (2010). Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, 467(7318), 951-954.
- Kim, H.W.; Hwang, K.; Mu, Q.; Lee, S.O.; Choi, M. (2012) Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia. *KSCE J. Civ.Eng.* 16, 229–238.
- Kjaersgaard, J. H., Allen, R. G., Garcia, M., Kramber, W., & Trezza, R. (2009). Automated selection of anchor pixels for landsat based evapotranspiration estimation. In *World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers* (pp. 1-11).
- Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebita, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., kamahori, H., kobayashi, C., Endo, H., miyaoka, K., Takahashi, K., (2015). The JRA- 55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc.Jpn.* 93 (1), 5–58. <http://dx.doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>
- Lillesand, T., and R. W. Kiefer (2000), *Remote Sensing and Image Interpretation*, John Wiley and Sons, New York.

- Liu, W., Wang, L., Zhou, J., Li, Y., Sun, F., Fu, G., ... & Sang, Y. F. (2016). A worldwide evaluation of basin-scale evapotranspiration estimates against the water balance method. *Journal of Hydrology*, 538, 82-95.
- Long, D., and V. P. Singh (2012), A modified surface energy balance algorithm for land (M-SEBAL) based on a trapezoidal framework, *Water Resour. Res.*, 48, W02528, doi:10.1029/2011WR010607.
- Lucchesi, R., (2012). File specification for MERRA products. GMAO Office Note No. 1 (version 2.3), 82 pp. Available from <http://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/office_notes/>.
- Martens, B., Miralles, D.G., Lievens, H., van der Schalie, R., de Jeu, R.A.M., Fernández-Prieto, D., Beck, H.E., Dorigo, W.A., and Verhoest, (2017). N.E.C.: GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture, *Geoscientific Model Development*, 10, 1903–1925.
- Miralles, D. G., Holmes, T. R. H., De Jeu, R. A. M., Gash, J. H., Meesters, A. G. C. A., & Dolman, A. J. (2011). Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 453.
- Molden, D. J., and R. Sakthivadivel (1999), Water accounting to assess use and productivity of water, *Int. J. Water Resour. Dev.*, 15(1–2), 55–71.
- Monteith, J.L. (1965). Evaporation and environment. pp. 205-234. In G.E. Fogg (ed.) *Symposium of the Society for Experimental Biology, The State and Movement of Water in Living Organisms*, Vol. 19, Academic Press, Inc., NY.
- Mu, Q., F. A. Heinsch, M. Zhao, and S. W. Running (2007), Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data, *Remote Sensing Environ.*, 11, 519–536.
- Mu, Q., Zhao, M., & Running, S.W. (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115(8), 1781–1800
- Mu, Q., Zhao, M., Running, S.W., (2013) Algorithm Theoretical Basis Document: MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3) Collection 5. NASA Headquarters. MOD16, ATBD.
- Mu, Q.; Zhao, M.; Running, S.W., (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sens. Environ.* 2011, 115, 1781–1800.
- Musselman, R.C.; Minnick, T.J. (2000) Nocturnal stomatal conductance and ambient air quality standards for azone. *Atmos. Environ.* 34, 719–733.
- Neale, C.M.U., Bausch, W.C., Heermann, D.F., (1989). Development of reflectance based crop coefficients for corn. *Transactions of the ASAE* 32, 1891–1899.
- Price, J.C. (1990), Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 28(5), 940–948.
- Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100(2), 81–92.
- Ramoelo, A., Majozi, N., Mathieu, R., Jovanovic, N., Nickless, A., Dzikiti, S., (2012). Validation of Global Evapotranspiration Product (MOD16) using Flux Tower Data in the African Savanna, South Africa, *Journal of Remote Sensing*, 6, 7406-7423.
- Rui, H., (2011). README Document for Global Land Data Assimilation System Version 2 (GLDAS-2) Products, GES DISC
- Seckler, D. (1996), The new era of water resources management: From “dry” to “wet” water savings, *Int. Water Manage. Inst.*, Colombo, Sri Lanka

- Senay, G. B., M. Budde, J. P. Verdin, and A. M. Melesse (2007), A coupled remotesensing and simplified surface energybalance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields, *Sensors*, 7, 979–1000.
- Srivastava, P. K., Han, D., Rico Ramirez, M. A., & Islam, T. (2013). Comparative assessment of evapotranspiration derived from NCEP and ECMWF global datasets through Weather Research and Forecasting model. *Atmospheric Science Letters*, 14(2), 118-125.
- Tang, Q., S. Peterson, R. H. Cuenca, Y. Hagimoto, and D. P. Lettenmaier (2009), Satellite-based near-real-time estimation of irrigated crop water
- Trambauer, P., Dutra, E., Maskey, S., Werner, M., Pappenberger, F., van Beek, L.P.H., et al. (2014). Comparison of different evaporation estimates over the African continent. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1), 193–212
- U.S. Department of Agriculture, 1970, Soil Conservation Service, Irrigation Water Requirements, Technical Release no. 21, 88 p.
- Velpuri, N.M., Senay, G.B., Singh, R.K., Bohms, S., & Verdin, J.P. (2013). A comprehensive evaluation of two MODIS evapotranspiration products over the conterminous United States: Using point and gridded FLUXNET and water balance ET. *Remote Sensing of Environment*, 139, 35–49.
- Wang, Y. , Yu, P. , Xiong, W. , Wang, L. (2008). Water-Yield Reduction After Afforestation and Related Processes in the Semiarid Liupan Mountains, Northwest China. *Journal of the American Water Resources Association*. 44(5):1086-1097.
- Water Watch, (2013). Water accounting plus (WA+) in the Awash river basin.
- Wright, J.L., (1982). New evapotranspiration crop coefficients. *ASCE J. Irrig. Drain. Div.* 108 (2), 57–74.
- Zhang, K., Kimball, J. S. and Running, S. W. (2016), A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *WIREs Water*, 3: 834–853.
- Zhao, L. L., Ronglin, T., Zhengming, W., Yuyun, B., Chenghu, Z., Bohui, T., Guangjian, Y., Xiaoyu, Z. (2009). A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data. *Sensors*, 9:3801-3853.
- Zwart, S. J., W. G. M. Bastiaanssen, C. de Friture, and D. J. Molden (2010), WATPRO: A remote sensing based model for mapping water productivity of wheat, *Agric. Water Manage.*, 97(10), 1628–1636.

۶- پیوست ۱

سامانه WaPOR برای ارتقا مدیریت آب، به خصوص در مناطقی که درگیر با مشکلات منابع آب هستند لایه های اطلاعاتی مختلفی را تولید می کند. در جدول ۱۷ به معرفی این محصولات پرداخته شده و توضیح مختصری از ویژگی های لایه های تولید شده ارائه شده است.

جدول ۱۷- مشخصات محصولات سامانه WaPOR

محصولات WaPOR	توضیحات
Annual gross biomass water productivity	- The unit is the ratio of kg of dry matter per cubic meter of water consumed (ETa): kgDM/m³/year - Conversion factor: the pixel value must be multiplied by 0.001 - Spatial resolution: 250m (0.00223 degree) - Geographic extent: Africa and Near East - Temporal extent: 2010 to date - Temporal resolution: year - Coordinate System: EPSG:4326 - WGS84 - Geographic Coordinate System (lat/long)
Annual net biomass water productivity	- The unit is the ratio of kg of dry matter per cubic meter of water transpired by vegetation (T): kgDM/m³/year - Conversion factor: the pixel value must be multiplied by 0.001 - Spatial resolution: 250m (0.00223 degree) - Geographic extent: Africa and Near East - Temporal extent: 2010 to date - Temporal resolution: year - Coordinate System: EPSG:4326 - WGS84 - Geographic Coordinate System (lat/long)
Annual actual evapotranspiration	- The unit is mm/year, which can be converted into volume for a specific area, e.g. 1mm = 1l/m² or 1mm = 10 m³/ha. - Conversion factor: none - Spatial resolution: 250m (0.00223 degree) - Geographic extent: Africa and Near East - Temporal extent: 2010 to date - Temporal resolution: year - Coordinate System: EPSG:4326 - WGS84 - Geographic Coordinate System (lat/long)
Annual transpiration	- The unit is mm/year, which can be converted into volume for a specific area, e.g. 1mm = 1l/m² or 1mm = 10 m³/ha. - Conversion factor: the pixel value must be multiplied by 0.001. - Spatial resolution: 250m (0.00223 degree) - Geographic extent: Africa and Near East - Temporal extent: 2010 to date - Temporal resolution: year - Coordinate System: EPSG:4326 - WGS84 - Geographic Coordinate System (lat/long)

ادامه جدول ۱۷ - مشخصات محصولات سامانه WaPOR

محصولات WaPOR	توضیحات
Annual above ground biomass production (land productivity)	- The unit is kgDM/ha/year - Conversion factor: none - Spatial resolution: 250m (0.00223 degree) - Geographic extent: Africa and Near East - Temporal extent: from 2010 to date - Temporal resolution: year - Coordinate System: EPSG:4326 - WGS84 - Geographic Coordinate System (lat/long)
Actual evapotranspiration (dekad)	- The unit is mm/day, which can be converted into volume for a specific area (1mm = 1l/m² or 1mm = 10 m³/ha). - Conversion factor: the pixel value must be multiplied by 0.1. - Spatial resolution: 250m (0.00223 degree) - Geographic extent: Africa and Near East (bounding box 30W 40N, 65E 40S) - Temporal extent: from April 2009 to date - Temporal resolution: dekad (approximately 10 days) - Coordinate System: EPSG:4326 - WGS84 - Geographic Coordinate System (lat/long)
Transpiration fraction (dekad)	- The unit is percentage (%). - Spatial resolution: 250m (0.00223 degree) - Geographic extent: Africa and Near East (bounding box 30W 40N, 65E 40S) - Temporal extent: from April 2009 to date - Temporal resolution: dekad (approximately every 10 days) - Coordinate System: EPSG:4326 - WGS84 - Geographic Coordinate System (lat/long)
Net primary production (dekad)	- The unit is gC/m²/day. - Conversion factor: the pixel value must be multiplied by 0.001. - Spatial resolution: 250m (0.00223 degree) - Geographic extent: Africa and Near East (bounding box 30W 40N, 65E 40S) - Temporal extent: from April 2009 to present - Temporal resolution: Dekadal (approximately every 10 days) - Coordinate System: EPSG:4326 - WGS84 - Geographic Coordinate System (lat/long)
Precipitation (daily)	- The unit mm/day - Conversion factor: the pixel value must be multiplied by 0.1. - Spatial resolution: Approximately 5km (0.05 degree) - Geographic extent: Africa and Near East - Temporal extent: from April 2009 to date - Temporal resolution: Daily - Coordinate System: EPSG:4326 - WGS84 - Geographic Coordinate System (lat/long)
Reference evapotranspiration (daily)	- The unit is mm/day, which can be converted into volume for a specific area, e.g. 1mm = 1l/m² or 1mm = 10 m³/ha - Conversion factor: the pixel value must be multiplied by 0.1. - Spatial resolution: 20km (0.17857 degree) - Geographic extent: Africa and Near East - Temporal extent: from April 2009 to date - Temporal resolution: Daily - Coordinate System: EPSG:4326 - WGS84 - Geographic Coordinate System (lat/long)



Urmia Lake Restoration Program



Sharif University of Technology
Remote Sensing Research Center

Evaluation Of Different Estimation Methods On Actual Evapotranspiration in Urmia Lake Basin

Technical Manager

Mostafa Javadian

Authors

Mostafa Javadian, Mohsen Gholizadeh, Fatemeh Kordi,
Mercede Taheri, Mohammad Abdoli

Document ID

RN-96-11

August 2017