

## برآورد تبخیر و تعرق واقعی حوضه دریاچه ارومیه به کمک الگوریتم سنجش از دور SEBS و تصاویر ماهواره NOAA

حبیب بابا جعفری<sup>۱</sup>، شهلا پایمزد<sup>۲\*</sup>، مه‌نوش مقدسی<sup>۲</sup>

۱. کارشناس ارشد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه اراک

۲. استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه اراک

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۲/۰۲؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۷/۲۵)

### چکیده

تبخیر و تعرق از مؤلفه‌های اصلی بیلان آب هر منطقه و از عوامل کلیدی برای برنامه‌ریزی صحیح و مناسب به منظور بهبود بازده آب مصرفی در اراضی فاریاب است. تصاویر ماهواره‌ای به دلیل پوشش مناطق وسیع، به منظور غلبه بر محدودیت‌های مکانی روش‌های نقطه‌ای، کاربرد بهتری برای مطالعات ناحیه‌ای نسبت به داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی دارند. بنابراین، هدف از تحقیق حاضر برآورد تبخیر و تعرق واقعی حوضه آبریز دریاچه ارومیه به کمک الگوریتم سنجش از دور SEBS و تصاویر سنجنده AVHR است. ابتدا ۲۴۸ تصویر از سنجنده AVHRR ماهواره نوا (NOAA) دریافت و پس از بررسی و ابری‌نبودن طی دوره آماری ۱۹۹۸-۲۰۰۹ استفاده شد. به منظور دقت در برآورد تبخیر و تعرق، محدوده مطالعه‌شده به سه بخش سقز، ارومیه و تبریز تقسیم شد. تبخیر و تعرق واقعی به کمک نقشه کاربری برای اراضی کشاورزی مشخص شده و با نیاز خالص آبیاری منطقه مقایسه شد. با محاسبه شاخص‌های ارزیابی مدل برای دشت تبریز، مجذور میانگین مربعات خطا  $RMSE=10.89$  و ضریب تعیین  $R^2=0.79$  به دست آمد. نتایج نشان داد روند تغییرات تبخیر و تعرق برآوردشده با مقادیر نیاز خالص آبیاری همخوانی داشته است. همچنین، نتایج دقت خوب مدل SEBS را در برآورد تبخیر و تعرق واقعی برای اراضی کشاورزی در کاربری‌های مختلف در حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان داد.

**کلیدواژگان:** تبریز، سنجش از دور، سنجنده AVHRR، نیاز خالص آبیاری، NOAA.

## مقدمه

تبخیر و تعرق یکی از مؤلفه‌های اصلی بیلان آب هر منطقه و همچنین از عوامل کلیدی برای برنامه‌ریزی درست و مناسب به منظور بهبود راندمان آب مصرفی در کشاورزی و مدیریت منابع آب است. روش‌های مختلفی برای برآورد تبخیر و تعرق بر مبنای داده‌های هواشناسی وجود دارد. دسترسی نداشتن به داده‌های لازم برای هر روش، نبود وسایل مناسب و عدم اندازه‌گیری برخی پارامترها استفاده از این روش‌ها را با مشکل روبه‌رو می‌سازد. از طرفی، این روش‌ها که با داده‌های نقطه‌ای ایستگاه‌های هواشناسی تبخیر و تعرق را پیش‌بینی می‌کنند، در مقیاس وسیع کارایی لازم را ندارند [۱]. امروزه، با پیشرفت تکنولوژی سنجش از دور امکان برآورد تبخیر و تعرق واقعی برای سطح وسیعی فراهم شده است. سنجش از دور این قابلیت را دارد که ضمن تخمین مقدار تبخیر و تعرق، توزیع مکانی آن را نیز نشان دهد. سنجش از دور تنها تکنولوژی‌ای است که شاخص‌هایی نظیر دمای سطحی، ضریب آلبیدو و شاخص گیاهی را به صورت منطبق یا سازگار با محیط استخراج می‌کند و از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است [۲]. برای تعیین تبخیر و تعرق با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای می‌توان به الگوریتم‌های متعددی همچون سیستم بیلان انرژی سطح SEBS [۳]، بیلان انرژی در سطح زمین SEBAL [۴]، SEBI [۵] و Metric [۶] اشاره کرد. سیستم بیلان انرژی سطح<sup>۱</sup> (SEBS)، برای برآورد شارهای جریان گرما (انرژی) و کسر تبخیری توسط Su [۷] پیشنهاد شد. الگوریتم SEBS برای ایجاد تبخیر و تعرق روزانه، ماهانه و سالانه، در یک محیط نیمه‌خشک و همچنین برای پایش خشک‌سالی توسط سو و همکارانش [۱۱] ارائه شد. آنها از تصاویر ماهواره‌ای همراه با اطلاعات هواشناسی برای حل معادله بیلان انرژی استفاده کردند. از مزیت‌های این الگوریتم، برآورد تبخیر و تعرق برای سطوح و مقیاس‌های مختلف است. در زمینه برآورد تبخیر و تعرق به کمک فناوری سنجش از دور، مطالعات مختلفی در ایران و دیگر نقاط جهان انجام شده است. مطالعه‌ای در هلند توسط Hail و همکارانش به منظور برآورد تبخیر و تعرق واقعی در فصل تابستان به کمک الگوریتم SEBS صورت پذیرفت. آنها تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق واقعی را برای کاربری‌های مختلف نشان دادند.

مقایسه بین تبخیر و تعرق مرجع و Kc در الگوریتم SEBS قدرت این مدل را در مطالعه یادشده نشان داد [۶]. حیدرنژاد و همکارانش [۸] به منظور تعیین دقت مدل SEBS در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در منطقه خشک یزد با استفاده از تصاویر Landsat 5 TM و الگوریتم SEBS تبخیر و تعرق واقعی مربوط به دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۱۱ در منطقه مرکزی یزد را برآورد کرده و نتایج به‌دست‌آمده را با نتایج تشت تبخیر و معادله فائو پنمن مانیتیت مقایسه کردند. نتایج نشان داد تبخیر و تعرق واقعی به‌دست‌آمده با الگوریتم SEBS با تبخیر و تعرق روش فائو پنمن مانیتیت از لحاظ آماری همبستگی معناداری داشت، اما به دلیل نبود یک پیکره آبی در منطقه مطالعه‌شده، سطح همبستگی مناسبی نداشت. ضیایی و همکارانش [۹] برای برآورد تبخیر ماهانه از سطح دریاچه ارومیه دو الگوریتم سنجش از دور SEBS و SEBAL را هدف پژوهش خود قرار دادند. به این منظور، از تصاویر سنجنده MODIS برای ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۸۸ استفاده کردند. آنها برای ارزیابی الگوریتم‌ها از داده‌های تشت تبخیر ایستگاه هواشناسی ارومیه استفاده کردند. نتایج برای هر دو الگوریتم قابل قبول بود، ولی الگوریتم SEBS به رغم سادگی روابط و پیاده‌سازی آن، دقت بیشتری نسبت به الگوریتم SEBAL داشت. پاک‌پرور و همکارانش [۱۰] با استفاده از روش SEBS و تصاویر لندست ۵ تبخیر و تعرق واقعی دشت گرگان استان فارس را برآورد کردند. در این بررسی R.sun تشعشع خالص و تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده و با تبخیر و تعرق مرجع مقایسه شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد R.sun در مقایسه با SEBS با تبخیر و تعرق مرجع هماهنگی بیشتری داشت، اما مدل SEBS در برآورد زمانی و مکانی تبخیر و تعرق توانایی مطلوبی نشان داد. باقری هارونی و همکارانش [۱۱] به ارزیابی الگوریتم سنجش از دوری سبال (SEBAL) در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در کاربری‌های مختلف در حوضه دریاچه ارومیه طی سال‌های ۲۰۰۲-۲۰۰۸ به کمک تصاویر ماهواره MODIS پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد دقت مدل برای اراضی کشاورزی آبی  $R=0.84$ ، پیکره‌های آبی  $R=0.84$  و برای شوره‌زارها، مراتع و زمین‌های دیم مدل کم است. فرهادی بانسوله و همکارانش [۱۲] به برآورد تبخیر و تعرق به کمک الگوریتم SEBS و تصاویر ماهواره لندست در ماهیدشت کرمانشاه پرداختند. آنها از چهار تصویر ماهواره

1. Surface Energy Balance System

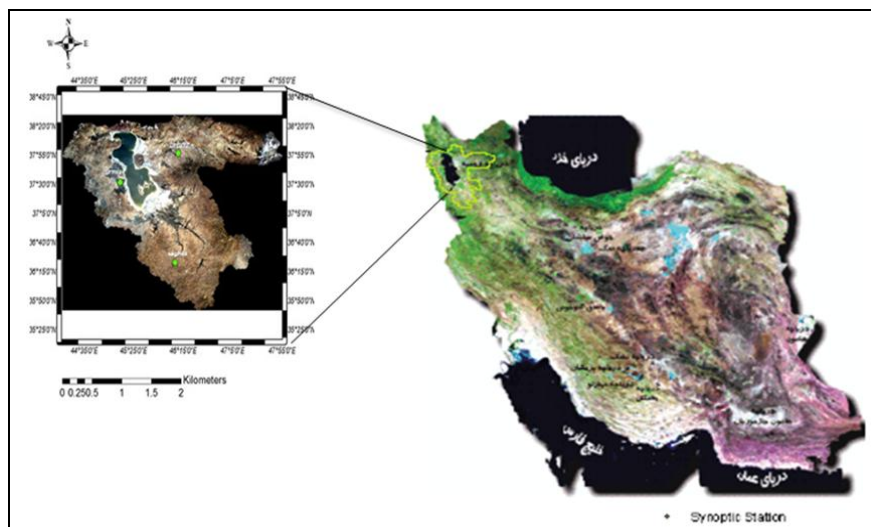
نقطه‌ای مورد توجه محققان قرار گرفته است. به همین دلیل، بر آن شدیم تا بر اساس تبخیر و تعرق واقعی حاصل از الگوریتم SEBS از روی تصاویر NOAA بپردازیم. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر ارزیابی الگوریتم سنجش از دوری SEBS در سطح حوضه‌ای (حوضه آبریز دریاچه ارومیه) به کمک تصاویر سنجنده AVHRR و ماهواره NOAA با قدرت تفکیک زمانی زیاد برای زمین‌های کشاورزی در کاربری‌های مختلف و مقایسه با نیاز خالص آبیاری (سند ملی آب) در این حوضه است.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با طول جغرافیایی ۴۴°۷ تا ۵۳°۴۷ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵°۴۰ تا ۳۸°۳۰ شمالی در شمال غرب کشور قرار گرفته است. این حوضه یکی از شش حوضه اصلی ایران است. حوضه یادشده که در سه استان آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی و کردستان واقع شده، وسعتی حدود ۵۹۱۲۳ کیلومتر مربع دارد و وسعت دریاچه ۳۸۳۷ کیلومتر مربع است. منطقه یادشده از نظر اقلیمی، مشخصات دشت‌های نیمه‌مرتفع عرض‌های میانی با آب و هوای عمومی، زمستان‌های سرد و تابستان‌های نسبتاً معتدل را دارد. میانگین سالانه بارندگی از ۳۵۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر متغیر بوده و رژیم قالب آن مدیترانه‌ای با بارش اندک تابستانه است. محدوده مطالعه‌شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

لندست در سال ۱۳۸۹ که از مراحل مختلف فصل رشد ذرت بود، استفاده کردند. هم‌زمان داخل یک لایسیمتر ذرت کشت شده و تبخیر و تعرق با الگوریتم سبال محاسبه شد. نتایج برای الگوریتم SEBS نشان داد تبخیر و تعرق محاسبه‌شده هر چهار تاریخ بین ۱/۰۲ تا ۱/۲۲ تبخیر و تعرق محاسبه‌شده با مدل پنمن مانیتیت فائو بود. محمد ابراهیم و همکارانش [۱۳] به برآورد تبخیر و تعرق واقعی دشت سیستان به کمک الگوریتم سنجش از دور SEBS و تصاویر ماهواره MODIS پرداختند. نتایج ارزیابی شاخص‌های آماری نشان داد الگوریتم SEBS عملکرد خوبی در سطح زمین و آب دارد. در پژوهشی دیگر مؤذن‌زاده و همکارانش [۱۴] با استفاده از تصاویر ماهواره سنجنده مودیس روند تغییرات شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی NDVI در ماه‌های نوامبر تا می ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ را در کشت مرتع و اراضی دیم در حوضه آبریز نیشابور بررسی کردند. طی سال‌های اخیر مدل‌های مختلفی برای حل معادله بیلان انرژی و تعیین تبخیر و تعرق به کمک سنجش از دور معرفی و استفاده شده‌اند. این مدل‌ها به دو دسته تک‌منبعی و دومنبعی تقسیم می‌شوند (تانگ و همکارانش). مدل SEBS سیستم بیلان انرژی سطح [۷]، مدل SEBAL یا الگوریتم توازن انرژی سطحی برای زمین [۴]، مدل S-SEBI یا شاخص ساده‌شده بیلان انرژی سطح [۱۵] از جمله مدل‌های تک‌منبعی هستند. در سالیان اخیر مطالعات اندکی در ایران به کمک الگوریتم SEBS انجام شده است، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به دلیل پوشش مناطق وسیع و به منظور غلبه بر محدودیت‌های مکانی روش‌های



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز دریاچه ارومیه

جدول ۱. تعداد تصویر گرفته شده به تفکیک سال و ماه

ماه	۱۹۹۸	۱۹۹۹	۲۰۰۰	۲۰۰۱	۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹
می	۵	۴	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۴	۵	۵
جون	۵	۵	۴	۶	۶	۶	۵	۶	۵	۴	۵	۵
جولای	۵	۵	۵	۶	۶	۶	۵	۵	۵	۴	۵	۵
آگوست	۵	۵	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۵	۵	۵	۵
مجموع	۲۰	۱۹	۲۰	۲۳	۲۳	۲۳	۲۱	۲۲	۲۰	۱۷	۲۰	۲۰

### داده‌های مورد نیاز

#### تصاویر ماهواره‌ای (Land Sat و NOAA)

در مطالعه حاضر تصاویر مورد نیاز، ۴۹۰ تصویر از سنجنده AVHRR ماهواره‌های ۱۶ و NOAA-14 با قدرت تفکیک ۱/۱ کیلومتر با فرمت LAC (Local Area Coverage) از ماه می تا آگوست (اوایل اردیبهشت تا اوایل شهریور) سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۹ به صورت روزانه، بدون پوشش ابر، از آرشیو وبسایت ناسا (NASA) [www.class.ngdc.noaa.gov](http://www.class.ngdc.noaa.gov) گرفته شد. علت انتخاب تصاویر سنجنده AVHRR در دسترس بودن تصاویر به صورت روزانه بود. از بین ۴۹۰ تصویر، تعداد ۲۴۸ تصویر پس از بررسی و ابری نبودن برای پردازش نهایی انتخاب شد. تعداد تصویر گرفته شده به تفکیک سال و ماه در جدول ۱ آمده است. همچنین، در مطالعه حاضر به منظور تهیه نقشه کاربری اراضی و تعیین کاربری کشاورزی تصاویر سنجنده TM ماهواره LANDSAT 5 برای ماه‌های ژانویه تا جولای ۲۰۰۹ از وبسایت <http://www.usgs.gov> گرفته شد. شایان یادآوری است که تصحیحات هندسی روی تصاویر ماهواره لندست توسط وبسایت ناسا و پیش از رسیدن به دست کاربر انجام شده است. تصحیح تصاویر نیز با واسنجی باندها، موزاییک کردن تصاویر و ترکیب باندی در باندهای یک تا هفت به جز باند شش (به علت ماهیت متفاوت) انجام شد. به منظور وضوح پدیده‌های مختلف در منطقه، از شاخص پوشش گیاهی تفاضل شده استفاده شد.

#### پردازش تصاویر ماهواره‌ای

فایل اطلاعات تصاویر با فرمت LAC شامل اطلاعات مداری، ژئومتری و ضرایب واسنجی برای باندهای سنجنده AVHRR است. با استفاده از اطلاعات فایل هر تصویر، بازتابندگی (Reflectance) در باندهای ۱-۳ (مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی) و دمای درخشندگی (Brightness) در باندهای ۴ و ۵ (مادون قرمز حرارتی) با در نظر گرفتن

اصلاحات مربوط به زاویه میل خورشیدی محاسبه شد. در مطالعه حاضر با استفاده از نسخه ۵ نرم افزار ENVI تصحیحات رادیومتریک، سیستماتیک و غیر سیستماتیک به ترتیب در سه مرحله واسنجی داده‌ها<sup>۱</sup>، زمین مرجع کردن داده‌ها<sup>۲</sup> و برش تصاویر با منطقه مطالعاتی صورت گرفت. در مطالعه حاضر، برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی از باندهای ۱، ۲ و ۴، ۵ سنجنده AVHRR استفاده شد. برای هر ماه به طور میانگین پنج تصویر بدون پوشش ابر استفاده شد.

#### طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

در تصاویر رقومی سنجنش از دور هر پیکسل ارزش عددی دارد که بازگوکننده رفتار طیفی پدیده متناظر آن در سطح زمین است. با تحلیل ارزش عددی پیکسل‌ها می‌توان پدیده‌های متناظر آنها را شناسایی و ارزیابی کرد. با تجزیه و تحلیل ارزش‌های عددی تصاویر رقومی سنجنش از دور، امکان شناسایی پدیده‌های زمینی روی تصویر فراهم می‌شود و می‌توان نسبت به طبقه‌بندی آنها اقدام کرد. این طبقه‌بندی بر اساس ارزش عددی پیکسل‌ها است که در آن پدیده‌های دارای ارزش عددی یکسان، در یک گروه قرار می‌گیرند. این طبقه‌بندی که مبتنی بر ارزش عددی پیکسل‌هاست، طبقه‌بندی پیکسل پایه نامیده می‌شود [۱۶]. با استفاده از محیط نرم افزارهای تخصصی می‌توان تصاویر را به روش‌هایی طبقه‌بندی کرد که عبارتند از: ۱. طبقه‌بندی نظارت نشده؛ ۲. طبقه‌بندی نظارت شده. در طبقه‌بندی نظارت نشده، به طور اتوماتیک و بر اساس اختلاف اثر طیفی و محاسبات آماری، هر پیکسل به کلاس خاصی تعلق می‌گیرد. ضعف طبقه‌بندی نظارت نشده در این است که اگر عارضه مد نظر اختلاف اثر

1. The Environment for Visualizing Images (ENVI)  
2. Calibrate Data  
3. Georeferenced Data

نقطه، اراضی آبی (۱۴۰۰)، اراضی دیم (۱۳۰۰)، مراتع (۹۵۰)، برای پیکره آبی (۶۵۰) و نواحی بایر (۵۰۰) نقطه برداشت شد. به منظور اجرای الگوریتم SEBS از داده‌های ایستگاه سینوپتیک تبریز، سقز و ارومیه استفاده شد (جدول ۲).

#### داده‌های زمینی

برای اجرای الگوریتم SEBS پارامترهای دمای هوا، سرعت باد، و دمای نقطه شبنم مورد نیاز است. این اطلاعات از ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه، سقز و تبریز جمع‌آوری و استفاده شد. علت انتخاب این ایستگاه‌ها، قدمت و صحت اطلاعات موجود بود.

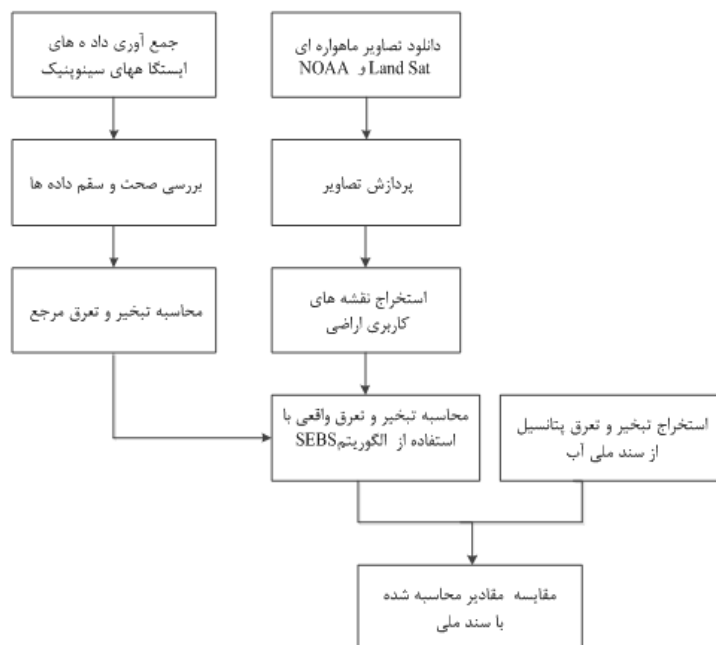
#### روش انجام تحقیق

به منظور ارائه تصویر کلی از مراحل انجام تحقیق، فلوجارت مرتبط ارائه شده است (شکل ۲).

طیفی کمی نسبت به سایر عوارض داشته باشد، تفکیک آن با روش یادشده و به طور اتوماتیک بسیار دشوار است [۱۷]. برای غلبه بر این مشکل روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده ارائه شدند که در آن‌ها از نمونه‌های تعلیمی به عنوان کلیدی که اثر طیفی مربوط به یک عارضه خاص و مد نظر کاربر را نشان می‌دهد، برای طبقه‌بندی استفاده می‌شود [۱۸]. در پژوهش حاضر، اصول تئوریک طبقه‌بندی پیکسل پایه معروف (طبقه‌بندی نظارت‌شده) و جزئیات مربوط به آن ارائه می‌شود. پس از آماده‌سازی تصاویر، لازم است مشخصات و تعداد کلاس‌های مد نظر در محدوده مطالعه تعیین شود. در پژوهش حاضر با توجه به شناخت کافی از منطقه با استفاده از نرم‌افزار Google Earth، مطابق داده‌ها به صورت نقطه‌ای در شش کلاس کاربری و با توجه به وسعت منطقه تعداد شش هزار نقطه تعیین شد. در نهایت، برای اراضی باغی (۱۲۰۰)

جدول ۲. مشخصات و موقعیت‌های ایستگاه‌های سینوپتیک

ایستگاه	استان	نوع ایستگاه	متولی	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع
ارومیه	آذربایجان غربی	سینوپتیک	هواشناسی	۴۵/۰۵	۳۷/۶۶	۱۳۲۸
تبریز	آذربایجان شرقی	سینوپتیک	هواشناسی	۴۶/۰۳	۳۸/۰۸	۱۳۶۱
سقز	کردستان	سینوپتیک	هواشناسی	۴۶/۲۶	۳۶/۲۵	۱۵۲۲



شکل ۲. فلوجارت مراحل انجام تحقیق

گرمای محسوس در SEBS از تئوری مشابهت استفاده شده است. در این تئوری، از چند رابطه در یک فرایند تکراری برای برآورد شار گرمای محسوس استفاده می‌شود. معادله ۴ یک رابطه اصلی است که در آن شار گرمای محسوس محاسبه می‌شود:

$$\theta_s - \theta_a = \frac{H}{k u^* \rho C_p} \quad (4)$$

$$\left[ \ln \left( \frac{z-d_s}{z_{oh}} \right) - \Psi_h \left( \frac{z-d_s}{L} \right) + \Psi_h \left( \frac{z_{oh}}{L} \right) \right]$$

که H شار گرمای محسوس بر حسب  $W/m^2$ ، L طول Obukhov بر حسب m، Z ارتفاع مرجع بالای سطح آب بر حسب متر،  $C_p$  گرمای ویژه هوا در فشار ثابت ( $J kg^{-1} K^{-1}$ )،  $u^*$  سرعت برشی بر حسب  $m/s$ ، k ثابت Von Karman و برابر با  $0.4$ ،  $\theta_0$  دمای پتانسیل در سطح آب بر حسب کلوین،  $\theta_a$  دمای پتانسیل هوا در ارتفاع مرجع Z بر حسب کلوین،  $\Psi_h$  تابع اصلاح پایداری برای انتقال گرمای نهان،  $z_{oh}$  ارتفاع زبری سطح برای انتقال گرما (m)، p چگالی هوا ( $kg m^{-3}$ ) و  $d_s$  ارتفاع جابه‌جایی صفر بر حسب m هستند.

مراحلی که برای اجرای الگوریتم SEBS گفته شده، در محیط برنامه‌نویسی IDL نرم‌افزار ENVI کدنویسی و اجرا شد.

#### دمای سطحی

دمای سطح زمین در برآورد شار گرمای خاک، شار گرمای محسوس هوا و میزان تبخیر و تعرق استفاده می‌شود. آگاهی از توزیع مکانی و زمانی دمای سطح زمین برای تعیین بیلان انرژی زمین، مطالعات هواشناسی و تبخیر و تعرق ضروری است [۴]. دمای سطح زمین با استفاده از تابش مادون قرمز ساطع شده از زمین که توسط باندهای حرارتی ماهواره ثابت می‌شود، از طریق معادله معکوس پلانک قابل برآورد است. در سنجش از دور، دمای سطح زمین که در بالای اتمسفر به‌وسیله سنجنده‌ها به‌دست می‌آید را دمای روشنایی می‌نامند؛ این دما به‌علت پدیده‌های جذب و پخش اتمسفری، کمتر از دمای واقعی سطح زمین است.

#### تعیین دمای سطح زمین

برای تعیین دمای واقعی سطح زمین غالباً از الگوریتم‌های روزنه مجزا استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها باندهای مادون

#### الگوریتم SEBS

به طور کلی، تمامی الگوریتم‌های برآورد اجزای شار انرژی بر اساس معادله بیلان انرژی استوارند. در ادامه، به تفکیک اجزای معادله بیلان انرژی (رابطه ۱) اشاره می‌شود:

$$R_n = G + H + \lambda E \quad (1)$$

که  $R_n$  تابش خالص، G شار گرمای خاک، H شار گرمای محسوس و  $\lambda E$  شار گرمای نهان بوده و تمامی واحدها بر حسب  $W/m^2$  هستند.

#### شار تابش خالص $R_n$

شار تابشی خالص برابر مجموع تابش‌های موج کوتاه و بلند ورودی و خروجی به سطح است که معیاری از مقدار انرژی موجود در سطح زمین به شمار می‌رود. شار تابش خالص بر اساس بقای انرژی مطابق رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

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

در رابطه ۲،  $\alpha$  آلبدوی سطحی،  $R_{s\downarrow}$  میزان تابش موج کوتاه فرودی بر حسب  $(W/m^2)$  است که طول موج‌های از  $0.3$  تا  $3$  میکرومتر را شامل می‌شود.  $R_{L\downarrow}$  میزان تابش موج بلند فرودی است بر حسب  $(W/m^2)$ ، که طول موج‌های  $3$  تا  $100$  میکرومتر را شامل می‌شود.  $R_{L\uparrow}$  میزان تابش موج بلند بازتابیده بر حسب  $(W/m^2)$  است و در نهایت  $\epsilon_0$  میزان گسیلمندی سطحی است.

#### شار گرمای خاک G

شار گرمای خاک، میزان انرژی وارد شده به خاک و پوشش گیاهی بر اثر هدایت ملکولی است. معادله شار گرمای خاک در SEBS به صورت زیر (رابطه ۳) بیان می‌شود:

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

که  $\Gamma_c$  و  $\Gamma_s$  ضرایب تجربی هستند و با استفاده از مشاهدات تجربی تعیین می‌شوند و به نوع خاک و پوشش گیاهی وابسته‌اند برای اغلب خاک‌های بایر و بدون کشت  $\Gamma_s = 0.315$  و برای پوشش گیاهی اغلب  $\Gamma_c = 0.05$  فرض می‌شود [۳].

#### شار گرمای محسوس H

شار گرمای محسوس، میزان گرمای انتقال یافته به صورت همرفت و هدایت ملکولی و بر اثر اختلاف دماست. تفاوت اصلی الگوریتم‌های سنجش از دور در برآورد تبخیر و تعرق در محاسبه شار گرمای محسوس است. برای محاسبه شار

نشان می‌دهد.  $\bar{ci}$  میانگین مقدار مشاهداتی متغیر،  $Si$  مقدار متغیر محاسبه‌شده توسط مدل،  $Ci$  مقدار متغیر مشاهداتی (واقعی) و  $R^2$  ضریب تبیین است که هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، همبستگی بیشتری را نشان می‌دهد. این پارامترها میزان خطای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در الگوریتم را نسبت به مقادیر مشاهداتی (تبخیر و تعرق پتانسیل) بیان می‌کنند.

### نتایج و بحث

همان‌طور که قبلاً گفته شد، برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی توسط الگوریتم SEBS، ۴۹۰ تصویر از آرشیو وبسایت ([www.class.NOAA.gov](http://www.class.NOAA.gov)) تهیه شد که از بین آنها ۲۴۸ تصویر پس از چک کردن و ابری‌نبودن، برای پردازش نهایی انتخاب شدند. سپس، به منظور دقت در برآورد تبخیر و تعرق حوضه آبریز تقسیم‌بندی شد. علاوه بر تصاویر ماهواره‌ای، DEM منطقه و موقعیت و اطلاعات ایستگاه هواشناسی معرف منطقه برای هر تصویر به عنوان ورودی مدل انتخاب شد. با توجه به مساحت زیاد حوضه آبریز دریاچه ارومیه و تغییرات درخور توجه اطلاعات هواشناسی و به منظور افزایش دقت خروجی الگوریتم SEBS، ابتدا از بین ایستگاه‌های سینوپتیک، مطابق جدول ۲ سه ایستگاه ارومیه، تبریز و سقز که هم از نظر قدمت و هم از نظر پراکندگی در طول حوضه مناسب بودند، انتخاب شدند. در نهایت، بر اساس سه ایستگاه منتخب، سه پلیگون که دربرگیرنده این سه ایستگاه بود انتخاب شده و روی کل حوضه آبریز دریاچه برش داده شد. برای هر منطقه تعداد ۲۴۸ تصویر به صورت جداگانه توسط نرم‌افزار ENVI 4.2 اجرا و خروجی گرفته شد. در مجموع، برای کل حوضه از ۷۴۴ تصویر به عنوان ورودی مدل استفاده شد که حجم کار بسیار سنگینی را طلب می‌کرد. با توجه به مساحت محاسبه‌شده توسط نقشه کاربری اراضی بیش از ۵۵۶۵ کیلومترمربع از سطح حوضه دریاچه ارومیه تحت اراضی کشاورزی باغی و زراعی است (شکل ۴). در این مرحله با استفاده از قابلیت نرم‌افزار ENVI با اعمال پلیگون نقشه‌های به‌دست‌آمده از کاربری اراضی کشاورزی زراعی و باغی، برای هر تصویر تبخیر و تعرق

قرمز حرارتی سنجنده AVHRR ماهواره NOAA را استفاده می‌کنند و بر مبنای تفاوت قابلیت انتقال اتمسفر در دو محدوده طیفی باندهای ۱۱ و ۱۲ میکرومتر، توسعه یافته‌اند. تابش ساطع شده از سطح زمین در باند مادون قرمز قبل از اینکه به سنجنده برسد، به وسیله ذرات موجود در جو به‌ویژه بخار آب جذب می‌شود. از این رو، دمای روشنایی ثبت شده در سنجنده تفاوت معناداری با دمای واقعی سطح زمین دارد.

اودراری و همکارانش [۱۹] با جمع‌بندی روش‌های مبتنی بر Split-window برای تعیین دمای سطحی از سنجنده AVHRR، روشی اصلاح‌شده ارائه کردند (رابطه ۵)

$$T_s = a_0 + a_1 \times T_f + a_2 \times (T_f - T_d) + a_3 \times (T_f - T_d)^2 + a_4 \times WV + a_5 \times (1 - \varepsilon) \quad (5)$$

که در آن  $T_4$  و  $T_5$  درخشندگی باندهای ۴ و ۵ سنجنده AVHRR است.  $WV$  بخار آب موجود در جو ( $g/cm^2$ )،  $\varepsilon$  میزان گسیلمندی سطحی و  $a_i$  ضرایب تجربی برای هر یک از سنجنده‌هاست.

### ارزیابی عملکرد مدل

به منظور ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی برآوردشده توسط الگوریتم و مقایسه آن با نیاز خالص آبیاری از روابط ۶ و ۷ استفاده شد. ضریب تبیین ( $R^2$ ) که هر چه این مدل به یک نزدیک‌تر باشد، همبستگی مدل با مدل مبنا بیشتر است و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) که این پارامتر میزان خطای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در الگوریتم را نسبت به مقادیر مشاهداتی (تبخیر و تعرق پتانسیل) بیان می‌کند و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد مدل دقیق‌تر است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (si - \bar{ci})^2}{\sum_{i=1}^n (ci - \bar{ci})^2} \quad (7)$$

که در آن  $O_i$  تبخیر و تعرق پتانسیل،  $P_i$  تبخیر و تعرق واقعی محاسبه‌شده از مدل و RMSE ریشه میانگین مربعات خطا که هر چه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت زیاد مدل را

پارامترها میزان خطای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در الگوریتم را نسبت به مقادیر مشاهداتی (تبخیر و تعرق پتانسیل) بیان می‌کنند. نتایج آنالیز آماری مدل در جدول ۳ نشان داده شده است.

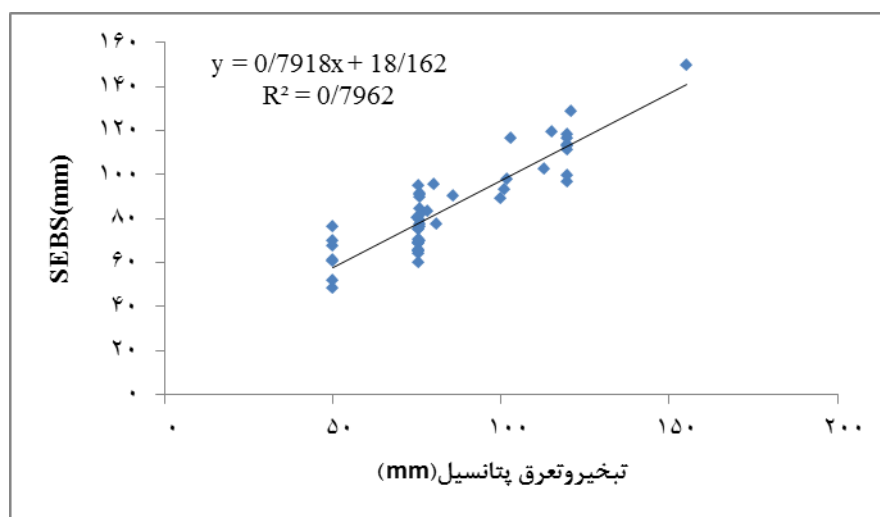
با توجه به آنالیز آماری برای منطقه آخوله واقع در دشت تبریز، روند تغییرات تبخیر و تعرق برآوردشده با مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل هم روند بوده و نشان‌دهنده دقت خوب مدل SEBS در برآورد تبخیر و تعرق واقعی برای اراضی کشاورزی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه است (شکل‌های ۳ و ۴).

جدول ۳. مقادیر آنالیز آماری برای مقایسه الگوریتم در برآورد تبخیر و تعرق ماهانه

منطقه	RMSE	R <sup>2</sup>
دشت تبریز (منطقه آخوله)	۱۰/۸۹	۰/۷۹۶۲

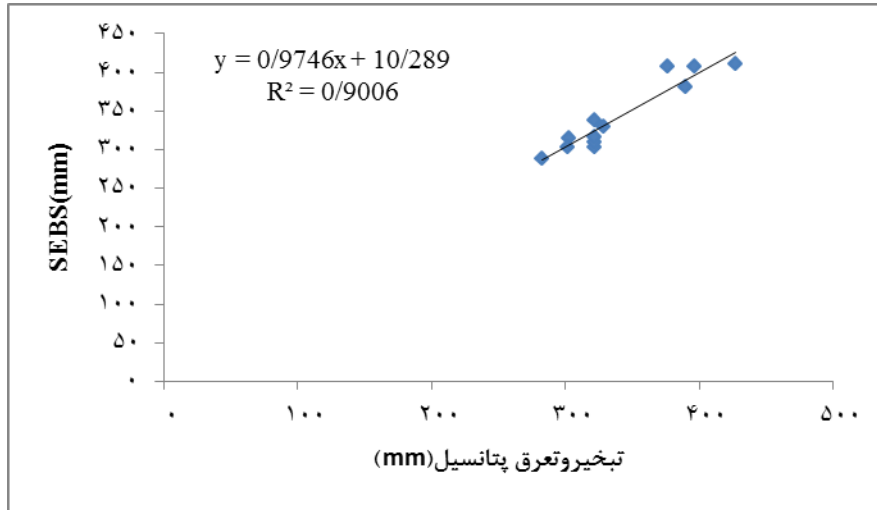
تبخیر و تعرق به صورت لحظه‌ای (mm/hr)، در گذر ماهواره محاسبه می‌شود. در پژوهش حاضر تبخیر و تعرق برای ماه‌های می، جون، جولای و آگوست ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۹ به صورت ماهانه محاسبه شد. نتایج ماهانه تبخیر و تعرق واقعی برای سه منطقه در شکل‌های ۶-۸ ارائه شده است.

خروجی از مدل SEBS برش خورد. سپس، متوسط پلیگون‌های حاصل به عنوان مقادیر خروجی برای آن تصویر به دست آمد. این مراحل برای هر تصویر (هر ماه) به طور مجزا انجام و در نهایت نتایج مربوط به تبخیر و تعرق واقعی برای اراضی کشاورزی برای دوره آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۹ استخراج شد. به دلیل نبود اطلاعات لایسیمیتری برای سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۹ طی فصل رشد، به منظور ارزیابی مدل SEBS در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در اراضی زراعی و باغی، از نقشه کاربری اراضی، اراضی زراعی و باغی دشت تبریز (منطقه آخوله) که تنوع محصول خوبی را نشان می‌داد، به عنوان مبنای مقایساتی تبخیر و تعرق واقعی استفاده شد. سپس، تبخیر و تعرق طی دوره ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۹ محاسبه شده و مقادیر به دست آمده از الگوریتم SEBS با مقادیر نیاز آبی خالص سطوح تحت کشت محصولات آبی زراعی و باغی در محدوده تبریز (آخوله)، که متناسب با تبخیر و تعرق پتانسیل است، ارزیابی و مقایسه شد. به منظور ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی برآوردشده توسط الگوریتم و مقایسه آن با نیاز خالص آبیاری (سند ملی آب)، از پارامترهای آماری جدول یادشده در بخش قبلی استفاده شد. ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای منطقه تبریز (آخوله) واقع در دشت تبریز به عنوان مبنای کار برده شد. این

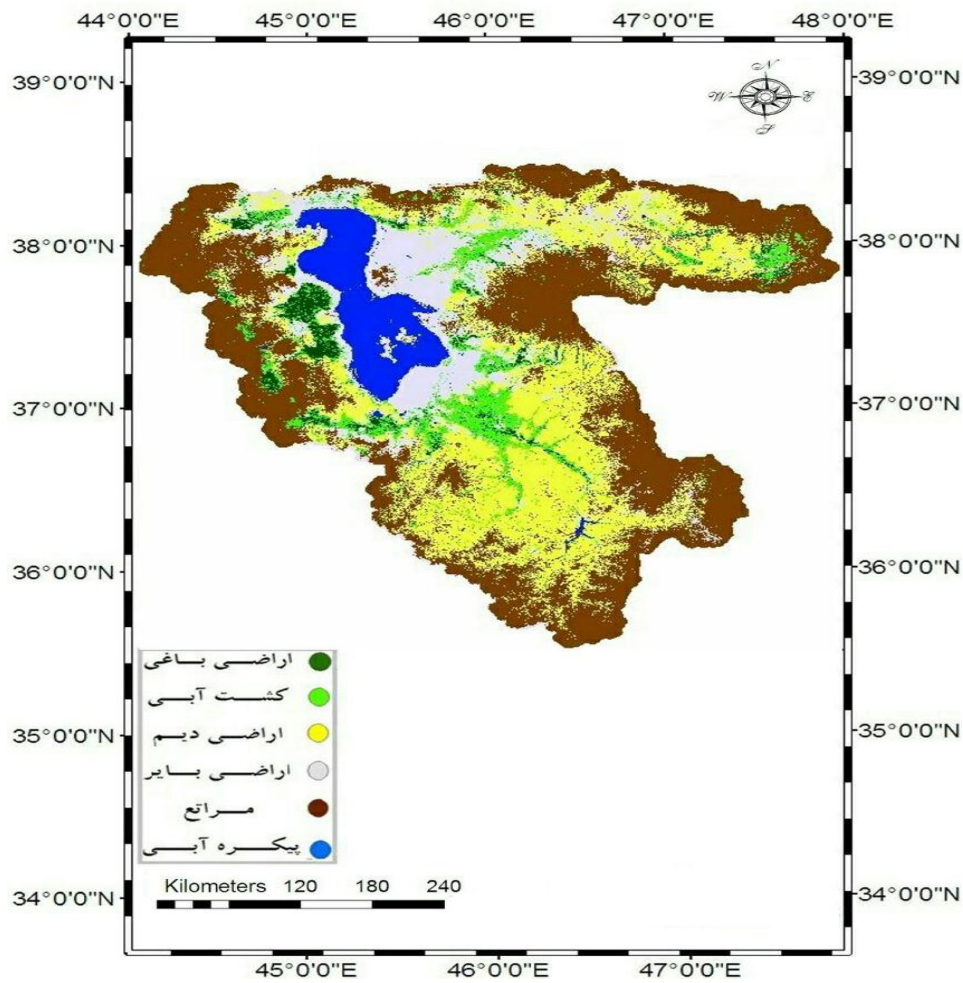


شکل ۳. نمودار پراکندگی مقادیر ماهانه تبخیر و تعرق واقعی و تبخیر و تعرق پتانسیل سطوح تحت کشت محصولات آبی منطقه تبریز (آخوله)

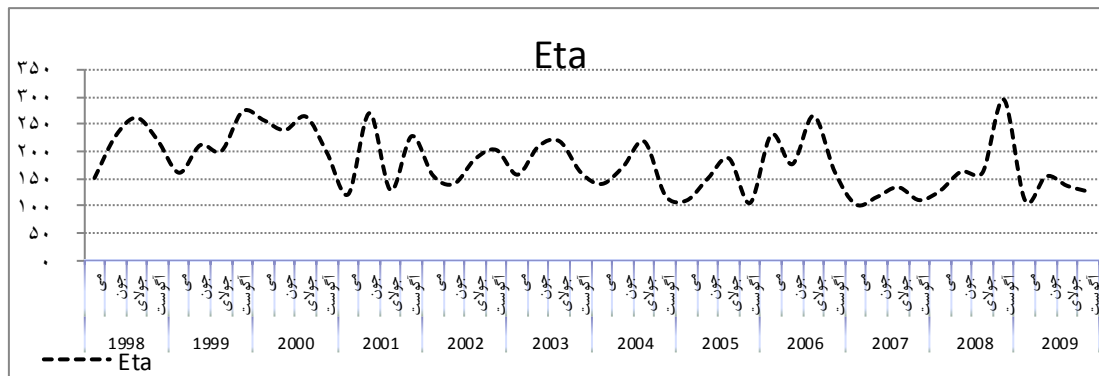




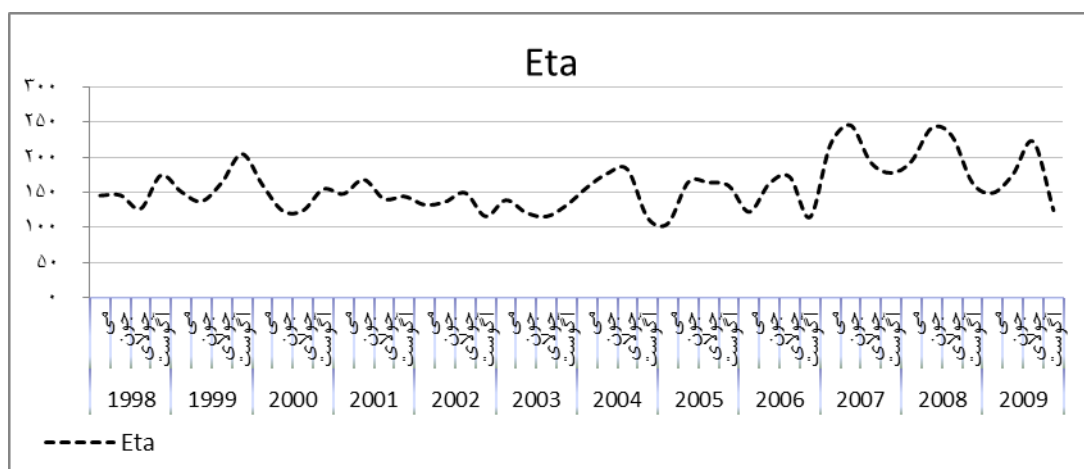
شکل ۴. نمودار پراکندگی مقادیر سالانه تبخیر و تعرق واقعی و تبخیر و تعرق پتانسیل سطوح تحت کشت محصولات آبی منطقه تبریز (آخوله)



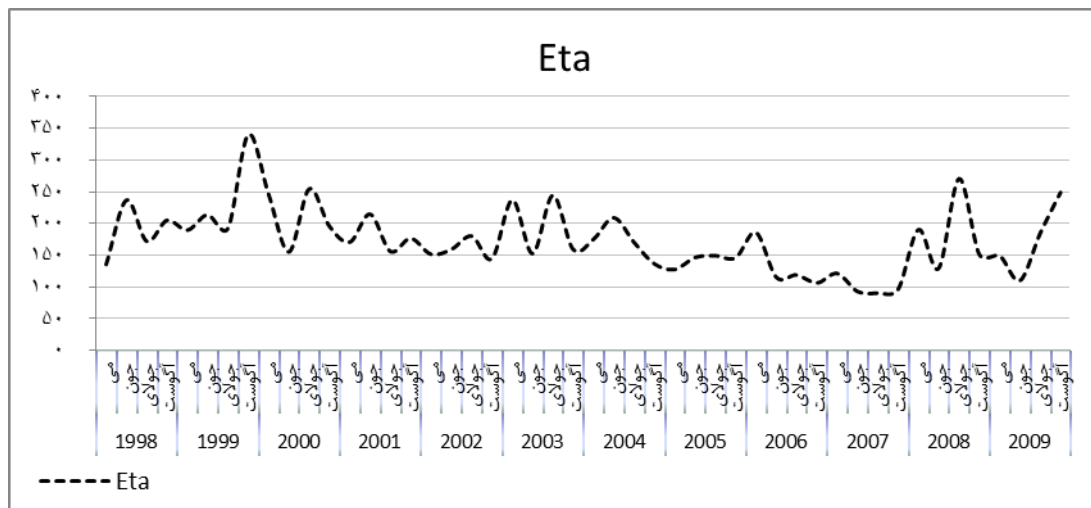
شکل ۵. طبقه‌بندی حوضه آبریز



شکل ۶. نتایج ماهانه الگوریتم SEBS طی ماه‌های می تا آگوست ۱۹۹۸-۲۰۰۹ تبریز (منطقه آخوله)



شکل ۷. نتایج ماهانه الگوریتم SEBS طی ماه‌های می تا آگوست ۱۹۹۸-۲۰۰۹ ارومیه



شکل ۸. نتایج ماهانه الگوریتم SEBS طی ماه‌های می تا آگوست ۱۹۹۸-۲۰۰۹ سقز

ماه آگوست مقادیر کمی نسبت به ماه آگوست کاهش می‌یابد. طی این دوره بیشترین تبخیر و تعرق ماهانه در منطقه تبریز مربوط به ماه آگوست ۱۹۹۹ با مقدار ۳۷۳

نتایج نشان داد برای سه منطقه در ماه می مقادیر تقریباً در یک محدوده قرار دارند. این مقدار در ماه جون افزایش می‌یابد که بیشترین مقدار آن در ماه جولای و در

- [7]. Su Z, Yacob A, Wen J, Roerink G, He Y, Gao B, Boogaard H, van Diepen C. Assessing relative soil moisture with remote sensing data: theory, experimental validation and application to drought monitoring over the North China Plain Physics and Chemistry of the earth, parts A/B/C, 2003; 28(1-3):89-101.
- [8]. Rahimi khob, A. Determination of regional evapotranspiration and reference transpiration using Nova satellite images; A case study of Urmia Lake basin. Ph.D. thesis, Tarbiat Modarres University. 2005. [Persian].
- [9]. Ziaee R, Moghaddasi M, Payamzad Sh, Bagheri M H. Estimation and Evaluation of Evaporation from Water Levels Using the SEBS Remote Sensing Algorithm and Comparison with SEBAL Algorithm, Case Study: Lake Urmia" Master's Thesis, Department of Irrigation and Drainage Engineering. Arak University. 2014. [Persian].
- [10]. Pakparvar M, Cornelis W, Pereira L S, Gabriels D, HosseiniMarandi H, Edraki M, Kowsar S A. Remote sensing estimation of actual evapotranspiration and crop coefficients for a multiple land use arid landscape of southern Iran with limited available data. Journal of Hydroinformatics, 2014;16(6):1441-1460.
- [11]. Bagheri M H. Remote Sensing Technology Assessment in Basin Water Scale. Determining the Purpose of Underground Water Consumption Case Study: Lake Urmia Basin. M.Sc. thesis, Water Resources Engineering Department. Tarbiat Modarres University. 2011. [Persian].
- [12]. Farhadi Bansouleh B, Karimi A.R, Hesadi H. Estimation of Actual Evapotranspiration in Mahidasht using SEBS Algorithm and LANDSAT Images. Journal of Water and Soil. 2016;30(3):706-716. [Persian].
- [13]. Mohammad Ebrahim M, Mohammadrezapour O, Akbarzadeh seghaleh H. Evaluating SEBES Model to Estimate Actual Evapotranspiration using MODIS Sensor Data in Regional Scale (Case Study: Sistan Plain. Eco hydrology. 2018;4(4):1141-1150. [Persian]
- [14]. Mozzan Zadeh R, Senior S, Heroin B, Davari K. Drought Monitoring in Non-Aqueous Cultures Using Remote Sensing Techniques, Water Management and Irrigation Management, 2012;2(2):52-32.[Persian]
- [15]. Zzine H, Bouziane A, Ouazar D. Seasonal comparisons of meteorological and agricultural drought indices in Morocco using open short time-series data. International Journal of applied Earth observation and Geo-information; 2014.p. 36-38.

میلی‌متر و کمترین آن در منطقه سقز متعلق به ماه جولای ۲۰۰۷ با مقدار ۹۰ میلی‌متر است.

### نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر تلاشی برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای NOAA و الگوریتم SEBS بود. بر اساس نتایج مقادیر تبخیر و تعرق واقعی ماهانه محاسبه شده با استفاده از الگوریتم SEBS و نیاز خالص آبیاری (تبخیر و تعرق پتانسیل) همبستگی قابل قبولی را با ضریب تبیین ۰/۸ نشان می‌دهد. نتایج این بخش با نتایج پژوهش باقری هارونی [۱۱] و سانتوس و همکارانش [۲۰] که مقادیر تبخیر و تعرق واقعی را در مقایسه با مقادیر لایسیمتری ارزیابی کرده بودند، هم‌مانگی دارد. بنابراین، الگوریتم SEBS دقت قابل قبولی در برآورد تبخیر و تعرق واقعی دارد.

### منابع

- [1]. Sun Z, Wei B, Su W, Shen W, Wang C, You D, Liu Z. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. Mathematical and Computer Modelling. 2011; 54(3): 1086-1092.
- [2]. Norman J M, Kustas W P, Humes KS. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. Agricultural and Forest Meteorology. 1995; 77(3): 263-293.
- [3]. Su ZB. A Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes from point to continental scale. Paper presented at the Spectra Workshop. 2002.
- [4]. Bastiaanssen W, Pelgrum H, Wang J, Ma Y, Moreno J, Roerink G, Van der Wal T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 2: Validation. Journal of hydrology. 1998; 212: 213-229
- [5]. Menenti M, Choudhury B J. Parameterization of land surface evapotranspiration using a location dependent potential evapotranspiration and surface temperature range. In H.J. Bolle (Ed.). Proceedings of exchange processes at the land surface for a range of space and time scales. 1993; 212: 561-568.
- [6]. Hailegiorgis W S. Remote sensing analysis of summer time evapotranspiration using SEBS algorithm: A case study in the Regge and Dinkel, The Netherlands. MSc Thesis. International Institute for Geoformation Science and Earth Observation. The Netherlands. 2006.

- [16]. Rezaei Moghadam M H, Valizadeh Kamran Kh, Rostamzadeh H, Rezaei Ali. Assessing the Efficiency of Data Sensor Data in Drought Estimation (Case Study: Urmia Lake Basin). *Geography and Environmental Studies*. 2012;2(2):37-52.[Persian].
- [17]. Rahimi Ali, Evaluation of several methods for estimating ground surface temperature using NOAA satellite imagery in the catchment area of Lake Urmia. *Research and development in agriculture and horticulture*. 2005;5(68): 84-90.[Persian]
- [18]. Quaidrari H, Goward S N, czajkowski K P, sobrinho J K, vermot E. Land surface temperature estimation from AVHRR Thermal infrared measurements an assessment for the AVHRR Land Pathfinder data set. *Remote sensing of Environment*. 2002;81: 114-128.
- [19]. Heydarnejad M, Zare Erani M, Pakparvar M. Determining the accuracy of the SEBS model for estimating actual evapotranspiration in Yazd region. *Geographic deserts of desert areas*. 2013:16-1.[Persian].
- [20]. Santos C A C D, Bezerra B G, Silva B B D, Rao T V R. Assessment of daily actual evapotranspiration with SEBAL and SSEBI algorithms in cotton crop. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 2010;25(3):383-392.