

## ارزیابی کارایی الگوریتم‌های سنجش از دور SEBS و SEBAL در برآورد تبخیر و بررسی اثر شوری در پیکره‌های آبی

روح الله ضیایی<sup>۱</sup>، مهنوش مقدسی<sup>۱\*</sup>، شهلا پایمزد<sup>۱</sup> و محمدحسین باقری<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۶/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱/۲۹)

### چکیده

تبخیر یکی از پارامترهای مهم در مدیریت پیکره‌های آبی، تغییرات تراز آب در آنها و محاسبه بیلان آب است که برآورد دقیق آن با مشکلات و پیچیدگی‌های خاصی روبه‌رو است. فناوری سنجش از دور به دلیل امکان برآورد مکانی اطلاعات و همچنین حداقل کردن استفاده از داده‌های هواشناسی می‌تواند کاربرد وسیعی در محاسبه تبخیر داشته باشد. در این تحقیق دو الگوریتم سنجش از دور SEBS و SEBAL با لحاظ فاکتور شوری در برآورد تبخیر ماهانه از سطح آزاد آب دریاچه ارومیه مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت که بدین منظور برای ارزیابی تأثیر شوری آب بر میزان تبخیر، از دریاچه آب شیرین زریوار واقع در مریان استفاده شد. تصاویر سنجنده MODIS برای ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور طی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۸ استفاده شده است. ارزیابی الگوریتم‌های مذکور با مقایسه داده‌های تشتک تبخیر حاکی از دقت قابل قبول هر دو الگوریتم در برآورد تبخیر ماهانه هستند ولی الگوریتم SEBS (با اعمال فاکتور شوری)، با وجود سادگی در پیاده‌سازی آن، از دقت بالاتری نسبت به الگوریتم SEBAL برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: تبخیر، سطوح آزاد آب، سنجش از دور، الگوریتم‌های شار انرژی، سنجنده مودیس

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اراک

۲. شرکت آب منطقه‌ای یزد

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m-moghaddasi@araku.ac.ir

## مقدمه

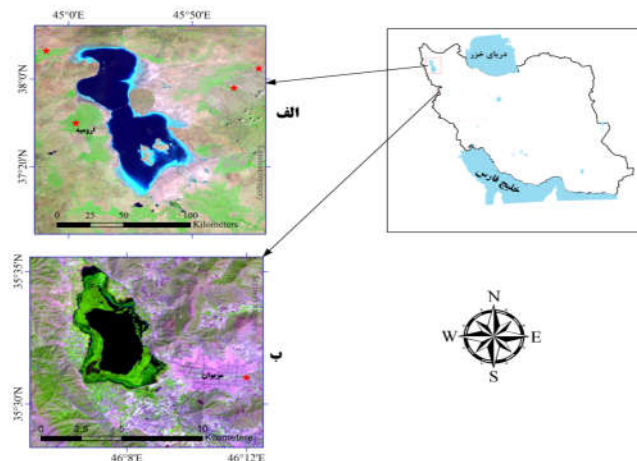
اندازه‌گیری‌های میدانی مقایسه کرد. وی الگوریتم خود را نیز برای محاسبه تبخیر از دریاچه‌های آب شور و شیرین و اقیانوس‌ها در نقاط مختلف جهان به‌کار برد و نتایج را با داده‌های ECMWF که مرکز پیش‌بینی‌های آب و هوای اروپا است، مقایسه کرد. نتایج تحقیق، دقت بالایی را با  $r^2 = 0/98$  برای آب‌های شیرین و  $r^2 = 0/88$  برای آب‌های شور نشان دادند. در زمینه به‌کارگیری الگوریتم‌های سنجنش از دوری در کشور نیز باقری و همکاران (۴) برای ارزیابی الگوریتم سنجنش از دوری SEBAL در برآورد تبخیر از سطوح آبی شیرین و شور، با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS و پیاده‌سازی این روش، تبخیر دریاچه ارومیه و مخزن آب شیرین سد بوکان را برآورد و با مقادیر تشتک مقایسه کردند، نتایج دقت بالای SEBAL با  $r^2 = 0/84$  را با داده‌های مشاهداتی تشتک نشان داد. بررسی تحقیقات فوق نشان داد الگوریتم‌های سنجنش از دور SEBAL و SEBS در زمینه برآورد تبخیر از سطوح آزاد آبی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند اما نظر به شرایط شوری آب دریاچه ارومیه، نیاز به اعمال اصلاحاتی در مدل SEBS است که در تحقیق حاضر الگوریتم مذکور اصلاح و به‌کار گرفته شده است. همچنین جهت بررسی تأثیر شوری آب تبخیر شده دریاچه آب شیرین زیروار مقادیر برآورد و صحت‌سنجی شد که در نهایت نیز به برای ارزیابی آن ضمن استفاده از داده‌های تشتک، نتایج الگوریتم مذکور با الگوریتم SEBAL مورد ارزیابی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

## منطقه مطالعاتی

دریاچه ارومیه بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران و بیستمین دریاچه بزرگ دنیا است که پس از دریاچه بحرالمتیت شورترین دریاچه دنیا قلمداد شده است (۱۷). مساحت و عمق دریاچه به‌علت تبخیر شدید، شرایط آب و هوایی و بهره‌برداری‌های بی‌رویه طی سال‌های اخیر تغییرات زیادی را شاهد بوده است به‌طوری‌که در سال ۱۳۹۲ دارای مساحت ۲۰۳۶ کیلومتر مربع

تبخیر یکی از اجزای مهم در پایش و مدیریت مخازن آب است که نقش مهمی در مطالعات بیلان آب دریاچه‌ها و مخازن ایفا می‌کند (۵). در چند دهه اخیر مطالعات زیادی در زمینه برآورد تبخیر با استفاده از فناوری سنجنش از دور صورت گرفته است (۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۲۱). روش‌های مبتنی بر این فناوری، استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی را به حداقل رسانده است و با توجه به اینکه از اطلاعات مکانی و مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌کند، خطای کمتری نسبت به روش‌های ذکر شده دارد. در خصوص برآورد تبخیر از سطوح آبی با به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای مطالعات محدودی صورت گرفته و بیشتر دو الگوریتم سیستم بیلان انرژی سطح برای زمین (SEBAL) و سیستم بیلان انرژی سطح (SEBS) برای برآورد تبخیر از سطوح آزاد آب اصلاح شده‌اند. سیستم بیلان انرژی سطح یا همان SEBS برای برآورد شارهای جریان گرما یا همان انرژی و کسر تبخیری پیشنهاد شده است (۲۴). در این روش تصاویر ماهواره‌ای همراه با اطلاعات هواشناسی برای حل معادله بیلان انرژی استفاده می‌شود. SEBAL نیز روشی است که بر پایه روابط فیزیکی و تجربی، میزان شار انرژی را با حداقل داده‌های زمینی برآورد می‌کند (۱۳ و ۱۴). در مورد استفاده از الگوریتم SEBAL در برآورد تبخیر از سطوح آب المجد و الهام (۱۶) این الگوریتم را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای NOAA-AVHRR برای برآورد تبخیر ماهانه از دریاچه ناصر در مصر اصلاح کردند. آنها از ۲۴ تصویر ماهواره‌ای در سال ۲۰۰۸ استفاده و نتایج حاصل از الگوریتم اصلاح شده را با نتایج معادله پنمن - مونیت مقایسه کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم اصلاح شده SEBAL دقت بالایی ( $r^2 = 0/78$ ) با معادله تجربی دارد. در تحقیقی ابدلرادی (۹) الگوریتم SEBS را برای محاسبه تبخیر از آب‌های شور و شیرین اصلاح کرد. وی از تصاویر ماهواره AATSR/Envisat استفاده کرده است. او ابتدا الگوریتم اصلاح شده برای آب‌های شیرین را برای دریاچه IJsselmeer در هلند به‌کار برد و نتایج را با مقادیر



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) منطقه مطالعاتی: الف) دریاچه ارومیه و ب) دریاچه زریوار (نقاط قرمز رنگ موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب)

لحاظ عاری بودن از ابر مورد استفاده قرار گرفت. برای اجرای الگوریتم‌های SEBAL و SEBS برخی پارامترهای هواشناسی از جمله دمای هوا، سرعت باد دمای نقطه شبنم مورد نیاز است که اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک مریوان، ارومیه، سلماس، تبریز و سهند بدین منظور جمع‌آوری شد. علت انتخاب این ایستگاه‌ها در اولویت اول فاصله از دریاچه و سپس قدمت و صحت اطلاعات موجود بود. همچنین به منظور ارزیابی نتایج، داده‌های تشکک تبخیر ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه و مریوان مورد استفاده قرار گرفت.

#### الگوریتم‌های سنجش از دور

به‌طورکلی تمامی الگوریتم‌های برآورد اجزای شار انرژی بر اساس معادله بیلان انرژی استوار هستند رابطه (۱). در ادامه به تفکیک اجزای معادله بیلان انرژی و شباهت‌ها و اختلافات آن برای دو الگوریتم اشاره می‌شود.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (1)$$

در رابطه فوق، ET تبخیر و تعرق،  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر،  $R_n$  تابش خالص خورشید، H شار گرمای محسوس و G شار گرمای خاک (یا آب) است (تمامی اجزای معادله فوق برحسب  $W/m^2$  هستند).

گزارش شده است، این در حالی است که در تراز ماکزیمم دارای مساحت ۶۱۰۰ کیلومترمربع بوده است (۱۸).

دریاچه زریوار به‌عنوان یک دریاچه آب شیرین انتخاب شد. دریاچه تالابی زریوار از جمله معدود دریاچه‌های آب شیرین ایران واقع در رشته کوه‌های زاگرس در شمال غرب ایران و در استان کرستان و در سه کیلومتری شمال غربی مریوان واقع شده است (شکل ۱). حداکثر طول دریاچه زریوار با روش‌های مرتبط ۸/۷ کیلومتر و با عرضی معادل ۴/۴ کیلومتر که به‌طور متوسط دارای عمق ۳ متر است (۱). به‌منظور اجرای الگوریتم‌ها برای برآورد تبخیر این دریاچه از اطلاعات ایستگاه هواشناسی مریوان استفاده شد. نمایی از دریاچه ارومیه و دریاچه زریوار و ایستگاه‌های منتخب در آنها در شکل ۱ نشان داده شده است.

#### داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه تصاویر سنجنده MODIS مستقر بر ماهواره Terra برای ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور سال‌های ۱۳۸۵، ۸۶، ۸۷ و ۸۸ از وب سایت سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا تهیه و پردازش شد. برای محاسبات تبخیر در این مطالعه باندهای ۱ تا ۷ و ۳۱ و ۳۲ سنجنده MODIS مورد استفاده قرار گرفت. برای هر ماه به‌طور میانگین شش تصویر با

### شار تابش خالص: $R_n$

فرآیند محاسباتی  $R_n$  در هر دو الگوریتم تقریباً یکسان است. شار تابش برابر با مجموع تابش‌های موج کوتاه و بلند ورودی و خروجی به سطح است که معیاری از مقدار انرژی موجود در سطح زمین به‌شمار می‌رود. تابش خالص بر اساس بقای انرژی مطابق رابطه (۲) است.

$$R_n = (1 - \alpha) R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_s) R_{L\downarrow} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $\alpha$  آلبیدوی پهن باند سطحی،  $R_{S\downarrow}$  چگالی شار موج کوتاه فرودی که در محدوده ۰/۳ تا ۳ میکرومتر ( $W/m^2$ )،  $R_{L\downarrow}$  تابش موج بلند فرودی که در محدوده ۳ تا ۱۰۰ میکرومتر است ( $W/m^2$ )،  $R_{L\uparrow}$  تابش موج بلند بازتابیده ( $W/m^2$ ) و  $\epsilon_s$  گسیلمندی پهن باند سطح است.

### شار گرمای آب: $G$

در الگوریتم SEBS برای محاسبه شار گرمای آب از مدل موازنه گرمایی طبق رابطه (۳) استفاده شد (۹).

$$G_s = \beta (T_e - T_s) \quad (3)$$

که در آن  $T_e$  دمای موازنه ( $^{\circ}C$ )،  $T_s$  دمای سطح آب ( $^{\circ}C$ ) و  $\beta$  ضریب مبادله گرمایی ( $W m^{-2} C^{-1}$ ) هستند.

### شار گرمای محسوس: $H$

شار گرمای محسوس میزان گرمای انتقال یافته به‌صورت همرفت و هدایت ملکولی و بر اثر اختلاف دما است. تفاوت اصلی الگوریتم‌های سنجش از دور در برآورد تبخیر و تعرق در محاسبه شار گرمای محسوس است. در SEBAL شار گرمای محسوس بر اساس رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$H = \rho_{air} \cdot C_p \cdot \frac{T_s - T_{air}}{R_{ah}} \quad (4)$$

در رابطه فوق  $T_0$  دمای آئروپدینامیک هوا،  $T_{air}$  دمای هوا (کلوین)،  $\rho_{air}$  چگالی هوا ( $kg/m^3$ )،  $C_p$  گرمای ویژه هوا ( $J/kg/K$ ) و  $R_{ah}$  مقاومت آئروپدینامیکی هوا ( $s/m$ ) است. اندازه‌گیری یا برآورد دمای آئروپدینامیک، عملاً غیرممکن و

پیچیده است. در SEBAL، به‌منظور برآورد اختلاف دمای هوا و آئروپدینامیک که با  $dT$  نمایش داده می‌شود از یک فرآیند درون تکرار استفاده می‌شود (۴) که در آن یک رابطه رگرسیونی رابطه (۵) برای دمای سطح زمین یا  $T_s$  و  $dT$  در دو پیکسل شاخص که پیکسل‌های سرد و گرم نامیده می‌شوند، برآورد شده و سپس این رابطه به تمامی پیکسل‌های تصویر اعمال می‌شود (۱۴).

$$dT = a T_s + b \quad (5)$$

برای محاسبه شار 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. رابطه (۶)، رابطه اصلی است که در آن شار گرمای محسوس محاسبه می‌شود (۲۲).

$$\theta_s - \theta_a = \frac{H}{k u^* \rho C_p} \left[ \ln \left( \frac{z - d_s}{z_{oh}} \right) - \Psi_h \left( \frac{z - d_s}{L} \right) + \Psi_h \left( \frac{z_{oh}}{L} \right) \right] \quad (6)$$

پارامترهای به‌کار رفته در رابطه فوق در جدول ۱ توضیح داده شده‌اند.

پارامترهایی که در محاسبه شار گرمای محسوس برای سطوح آب باید اصلاح شوند، ارتفاع زبری برای انتقال گرما یا  $Z_{oh}$  و ارتفاع زبری برای انتقال مومتم  $Z_{om}$  هستند. پارامتری است که در SEBAL برای محاسبه مقاومت آئروپدینامیکی هوا و در SEBS برای محاسبه سرعت برشی مورد استفاده قرار گرفت.

روابط جدول ۲ برای محاسبه  $Z_{om}$  برای سطوح آب در الگوریتم SEBAL مورد استفاده قرار گرفت.

در SEBS برای سطوح آب نیز مقدار ثابت  $Z_{om} = 0.0002$  مورد استفاده قرار گرفت (۹).

$Z_{oh}$  تنها در الگوریتم SEBS استفاده و مقدار آن در این مطالعه ثابت و برابر ۰/۰۰۰۱ در نظر گرفته شد (۸).

### فاکتور شوری

تبخیر از سطوح آب شور در شرایط آب و هوایی یکسان به‌دلیل

جدول ۱. پارامترهای به کار رفته در محاسبه شارگرمای محسوس در الگوریتم SEBS

پارامتر	نام	واحد و مقدار
H	شار گرمای محسوس	$W/m^2$
L	طول Obukhov	m
Z	ارتفاع مرجع بالای سطح آب	m
$C_p$	گرمای ویژه هوا در فشار ثابت	$J kg^{-1} K^{-1}$
$u^*$	سرعت برشی	$ms^{-1}$
K	ثابت Von Karman	۰/۴
$\theta_s$	دمای پتانسیل در سطح آب	K
$\theta_a$	دمای پتانسیل هوا در ارتفاع مرجع Z	K
$\Psi_h$	تابع اصلاح پایداری برای انتقال گرمای نهان	
$z_{oh}$	ارتفاع زبری سطح برای انتقال گرما	m
P	چگالی هوا	$Kg m^{-3}$
$d_s$	ارتفاع جابه‌جایی صفر	m

جدول ۲. مقادیر  $Z_{om}$  استفاده شده در الگوریتم SEBAL برای آب

آب (عمیق)	$Z_{om} = 0/0005$
آب (کم عمق)	$Z_{om} = 0/005$

که برای شرایط آب و هوایی مشابه نتایج قابل قبولی ارائه داده است، مورد استفاده قرار گرفت (۲۲).

$$K_{pan} = 0/51206 - (0/000321 * U_p) + (0/002889 * RH) + (0/03188 * \ln(F)) - (0/000107 * RH * \ln(F)) \quad (8)$$

که در این رابطه  $U_p$  سرعت باد در ارتفاع ۲ متری  $(Km day^{-1})$ ، RH میانگین روزانه رطوبت نسبی (%) و F فاصله واکنشگر خلاف جهت باد برای پوشش گیاهی در حال رشد است که در این مطالعه معادل ۱۰ متر در نظر گرفته شد (۲۳).

#### پارامترهای آماری برای مقایسه نتایج خروجی مدل‌ها

به منظور ارزیابی دقیق‌تر مقادیر تبخیر برآورد شده توسط الگوریتم‌ها و مقایسه آن با مقادیر مشاهداتی (تشت تبخیر)، از پارامترهای آماری جدول ۳ استفاده می‌شود. پارامترهای آماری به کار رفته، همگی میزان خطای برآورد تبخیر واقعی در هر یک از الگوریتم‌ها را نسبت به مقادیر مشاهداتی (تشت تبخیر) بیان می‌کند.

تأثیر مستقیم شوری بر فشار بخار آب کمتر از آب شیرین است. تأثیر شوری بر گرمای نهان تبخیر و مقدار تبخیر می‌تواند با یک فاکتور شوری بیان شود. این فاکتور نسبت تبخیر از آب شور و شیرین را در شرایط اتمسفری یکسان نشان می‌دهد. معادله فاکتور شوری بر پایه مطالعات آزمایشگاهی مطابق رابطه (۷) به دست آمده است (۲۵).

$$\alpha = 1/025 - 0/0246 \cdot e^{0/00879 S} \quad (7)$$

که در آن  $\alpha$  ضریب تأثیر شوری بر تبخیر و S میزان شوری بر حسب گرم در لیتر است.

#### ضریب تشتک تبخیر

در این مطالعه برای ارزیابی و صحت‌سنجی تبخیر برآورد شده از تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های تشتک تبخیر مورد استفاده قرار گرفت. برای استفاده از داده‌های تشتک، ضریب تشتک یک پارامتر مهم است. مدل‌های متعددی برای برآورد ضریب تشتک توسعه داده شده‌اند. در این مطالعه مدل Orang مطابق رابطه (۸)

جدول ۳. پارامترهای آماری برای مقایسه نتایج خروجی مدل‌ها

پارامتر آماری	توضیحات	رابطه
RMSD	ریشه میانگین مربع اختلافات	$\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{1/2}$
MBE	متوسط خطای انحراف	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)$

در جدول فوق  $P_i$  مقادیر خروجی الگوریتم و  $O_i$  مقادیر مشاهداتی هستند.

جدول ۴. نتایج ماهانه الگوریتم SEBAL برای ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور سال‌های ۸۸-۱۳۸۵ (برحسب میلی‌متر در ماه)

سال	ماه	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۱۳۸۸		۱۷۹/۲۸	۱۹۳/۹۱	۱۷۵/۴	۱۱۳/۶۸
۱۳۸۷		۲۰۲/۴۴	۱۹۲/۹۲	۲۱۰/۲۳	۱۷۱/۵۳
۱۳۸۶		۲۳۳/۱۷	۱۹۳/۵۳	۱۹۴/۶۴	-
۱۳۸۵		۲۱۴/۵۴	۲۱۱/۵۳	۲۰۲/۶۵	۱۶۲/۶۲

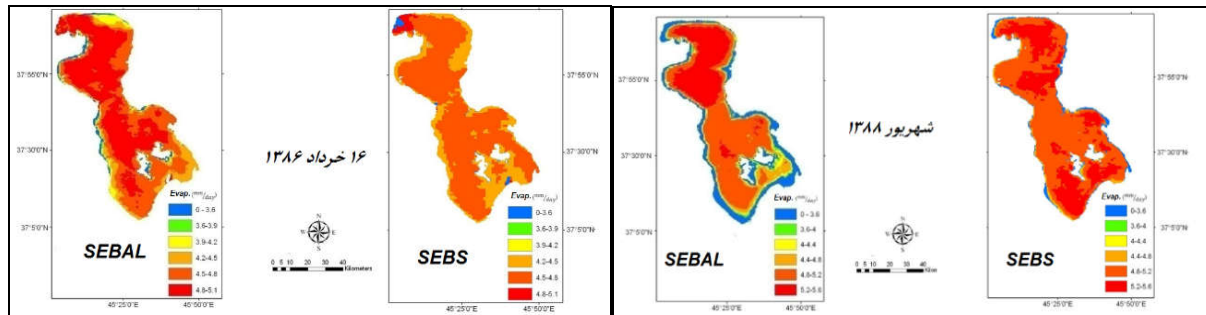
جدول ۵. نتایج ماهانه الگوریتم SEBS برای ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور سال‌های ۸۸-۱۳۸۵ (برحسب میلی‌متر در ماه)

سال	ماه	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۱۳۸۸		۱۵۱/۴۶	۱۸۰/۶	۱۷۰/۱	۱۳۰/۸
۱۳۸۷		۱۶۲/۶۹	۱۵۰/۹۷	۱۶۵/۳۹	۱۲۲/۳۴
۱۳۸۶		۲۲۱	۱۵۳/۲۵	۱۵۴/۶۱	-
۱۳۸۵		۱۹۸/۸۱	۱۸۵/۵۳	۱۷۸/۲۷	۱۴۰/۳۷

## نتایج و بحث

از الگوریتم SEBAL در مقیاس روزانه مطابق جداول (۴) و (۵) ارائه می‌شود. با توجه به تعدد روزهایی که تبخیر در آن برآورد شده، به‌طور نمونه برای هر ماه یک روز نشان داده شده است. همچنین مقادیر ماهانه تبخیر مطابق جدول ۳ ارائه شده است. نتایج مقادیر تبخیر ماهانه برای الگوریتم SEBS روندی مشابه با SEBAL دارد. به‌طوری که تبخیر ماهانه در چهار سال مورد مطالعه کمترین مقدار را در ماه شهریور و بیشترین را در ماه خرداد نشان می‌دهد. به‌منظور ارائه پراکندگی مقادیر تبخیر دریاچه ارومیه حاصل از دو الگوریتم یاد شده برای نمونه نقشه دو روز مختلف در ماه و سال مختلف مطابق شکل ۲ نشان داده شده است.

در این مطالعه تبخیر ماهانه از سطح آزاد آب دریاچه توسط الگوریتم‌های SEBS و SEBAL برای ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور سال‌های ۱۳۸۵ الی ۱۳۸۸ محاسبه شده است. قابل ذکر است با توجه به اینکه برای شهریور سال ۱۳۸۶ تصاویر ماهواره‌ای برای منطقه مورد مطالعه در سایت مربوطه غیر قابل دریافت (به‌دلیل ابری بودن) بودند، در مجموع تبخیر برای ۱۵ ماه محاسبه شد. به‌منظور بررسی دقت نتایج هر دو الگوریتم از داده‌های تست تبخیر به‌عنوان داده‌های مشاهداتی استفاده شده است. پس از توسعه نرم‌افزاری الگوریتم‌ها در زبان برنامه‌نویسی IDL و در قالب نرم‌افزار ENVI، مدل‌ها اجرا شدند. نتایج حاصل



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نقشه تبخیر دریاچه ارومیه حاصل از الگوریتم‌های SEBS و SEBAL برای دو روز متفاوت

جدول ۶. میانگین تبخیر روزانه برآورد شده از سطوح آب شیرین دریاچه زریوار

تبخیر SEBAL ( $\text{mm day}^{-1}$ )	تبخیر SEBS ( $\text{mm day}^{-1}$ )	تبخیر تشت با اعمال ضریب ( $\text{mm day}^{-1}$ )
۸/۹	۸/۵	۸/۰۹

جدول ۷. میانگین تبخیر روزانه برآورد شده از سطوح آب شور دریاچه ارومیه

تبخیر SEBAL ( $\text{mm day}^{-1}$ )	تبخیر SEBS بدون اعمال ضریب شوری ( $\text{mm day}^{-1}$ )	تبخیر SEBS با اعمال ضریب شوری ( $\text{mm day}^{-1}$ )	تبخیر تشت با اعمال ضریب تشت ( $\text{mm day}^{-1}$ )
۶/۲	۹/۱۳	۶/۲۲	۵/۹۱

باشند (۹ تیر ۱۳۸۸) برآورد شد. بدین منظور ضریب تشت مطابق رابطه (۸) در این روز برای ایستگاه مریوان ۰/۷۱ برآورد شد که میانگین تبخیر روزانه برای دریاچه زریوار به منظور بررسی دقیق‌تر در جدول ۶ آورده شده است. همچنین با استفاده از رابطه (۸) و در نظر گرفتن میزان شوری دریاچه ارومیه که به طور میانگین ۳۰۰ میلی گرم در لیتر گزارش شده، ضریب ۰/۶۸۱ به عنوان ضریب شوری دریاچه ارومیه محاسبه که در جدول ۷ ارائه شده است.

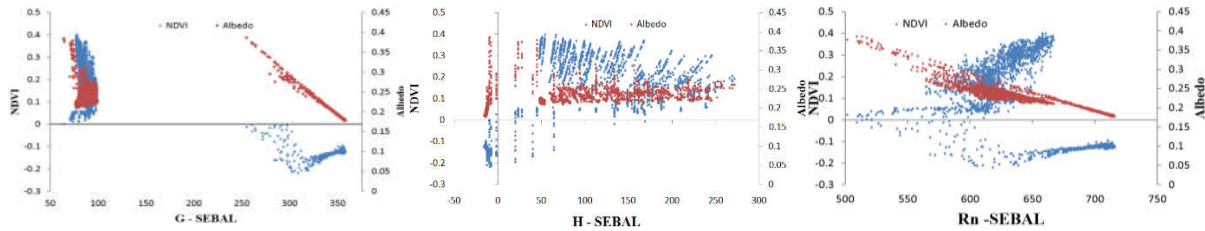
مطابق جدول ۷ به صراحت مشخص می شود که در برآورد تبخیر از آب‌های شور توسط الگوریتم SEBS، ضریب شوری یک پارامتر مهم است، لذا با توجه به دقت بالای به کارگیری ضریب شوری، در این تحقیق الگوریتم SEBS با اعمال ضریب مذکور به کار رفته است. قابل ذکر است که الگوریتم SEBAL نیازی به استفاده از این ضریب در محاسبات خود ندارد و پایه محاسباتی آن برای آب شور و شیرین یکسان است.

همان گونه که در شکل ۲ نیز مشهود است مقادیر تبخیر حاصل از SEBS نسبت به نتایج SEBAL کمتر است اما در حالت کلی هر دو الگوریتم دارای اختلاف کمی هستند که ارزیابی بیشتر دو الگوریتم یاد شده در قسمت بعد به تفصیل بیان می شود.

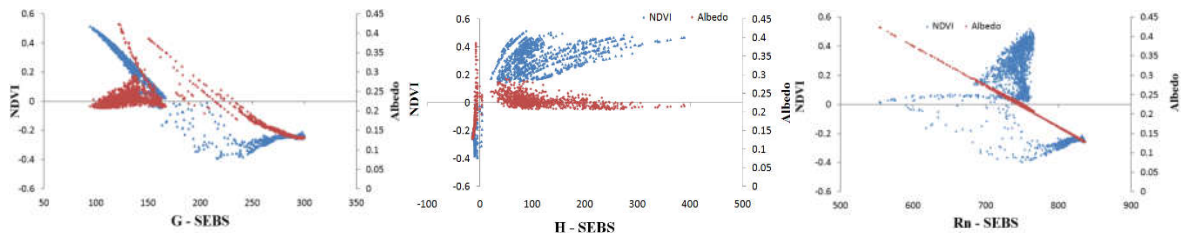
### ارزیابی و صحت سنجی الگوریتم‌ها

#### بررسی تأثیر ضریب شوری

همان گونه که قبلاً نیز بیان شد به دلیل شوری بالای دریاچه ارومیه به کارگیری الگوریتمی که توان تأثیر این موضوع را داشته باشد نقش مهمی در دقت مقادیر استخراجی از الگوریتم ایفا خواهد کرد. بدین منظور دریاچه زریوار به عنوان یک مخزن آب شیرین انتخاب و تبخیر آن با الگوریتم‌های SEBS و SEBAL برآورد شد. برای محاسبه الگوریتم‌ها و بررسی اثر شوری، تبخیر دریاچه ارومیه و دریاچه زریوار برای یک روز خاص که تصاویر ماهواره آن عاری از ابر



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) پراکندگی اجزای شار انرژی برآورد شده توسط الگوریتم SEBAL



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) پراکندگی تابش خالص خورشیدی برآورد شده توسط الگوریتم SEBS

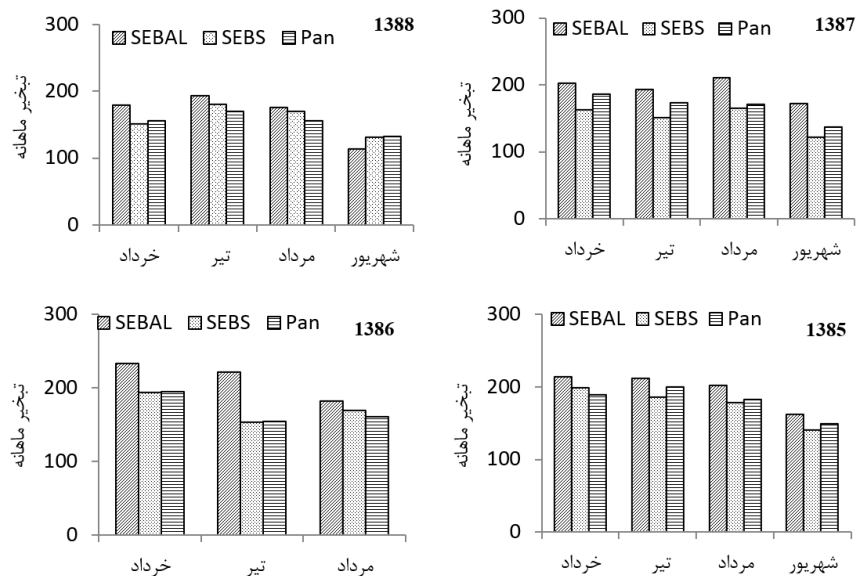
بوده و با بازتابش کمتری روبه‌رو است و مقادیر بزرگ‌تر به کاربری‌های کشاورزی و زمین تعلق خواهد گرفت. از این‌رو دو شاخص مذکور قابلیت بررسی نتایج حاصل از الگوریتم‌ها را در کاربری‌های مختلف ارائه خواهند کرد. در شکل‌های ۳ و ۴ نحوه توزیع اجزای شار انرژی برای هر دو الگوریتم نشان داده شده است.

نحوه توزیع Rn برای SEBAL نشان می‌دهد که توزیع این پارامتر برای سطوح آب منطقه مطالعاتی (دریاچه ارومیه) بین ۵۱۰ و ۷۱۵ وات بر متر مربع قرار گرفته است و ۷۹ درصد این مقادیر بیشتر از ۶۹۰ وات بر مترمربع هستند. مقادیر Rn در سطوح آب برای SEBS نیز بین ۵۹۰ و ۸۳۶ وات بر مترمربع قرار گرفته است و ۷۹ درصد این مقادیر بیشتر از ۸۱۳ وات بر مترمربع هستند. در مقایسه نتایج الگوریتم‌ها در برآورد این پارامتر برای سطوح آب نیز، این نکته قابل دریافت است که SEBS حدود ۱۰۰ وات بر مترمربع بیشتر از SEBAL این پارامتر را برآورد می‌کند. توزیع شار گرمای آب نیز نشان می‌دهد که این پارامتر در سطوح آب منطقه مطالعاتی (دریاچه ارومیه) برای الگوریتم SEBAL بین ۳۵۷/۸۶ و ۲۵۴/۷۴ وات بر مترمربع و در الگوریتم SEBS بین ۳۰۰/۲۴ و ۱۵۰/۵۴ وات بر

#### مقایسه نسبی الگوریتم‌ها در برآورد اجزای شار انرژی

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد محاسبات هر دو الگوریتم بر پایه رابطه بیلان انرژی استوار بوده و با محاسبه سه جزء اصلی این رابطه یعنی G، H و Rn، شار گرمای نهان و در نهایت تبخیر برآورد می‌شود. درحالی‌که برآورد اجزای معادله بیلان انرژی در هر یک از دو الگوریتم، مخصوصاً در برآورد شار گرمای محسوس، با تفاوت‌هایی روبه‌رو است، لذا در این قسمت نتایج اجزای رابطه بیلان انرژی برای هر یک از دو الگوریتم مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. بدین‌منظور برای روز ۲۲ خرداد سال ۱۳۸۸، نحوه توزیع اجزای معادله بیلان انرژی در کنار شاخص پوشش گیاهی NDVI و آلبیدوی سطحی مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌طورکلی محدوده عددی شاخص پوشش گیاهی NDVI مقادیر بین -۱ تا +۱ و آلبیدوی سطحی مقادیر صفر تا +۱ را پوشش می‌دهند. تقریباً مقادیر منفی شاخص NDVI (استخراج شده از سنجنده مودیس) مربوط به کاربری‌های آبی و مقادیر مثبت مربوط به زمین‌های بایر و اراضی کشاورزی تعلق دارد. شاخص آلبیدو نیز رابطه مستقیمی با میزان بازتابش از هر پیکسل دارد و به عبارتی هرچه این میزان به سمت صفر نزدیک شود، به منزله ورود به کاربری آب





شکل ۵. مقایسه تبخیر ماهانه (میلی‌متر) SEBS و SEBAL و تشتک تبخیر برای ماه‌های گرم ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۸

از آن را با محدودیت مواجه کرد لذا تفاوت تبخیر از تشت آب شور و شیرین در نظر گرفته نشد. با توجه به مطالعات قبلی انجام شده در این مورد استفاده از تشت تبخیر ایستگاه سینوپتیک برای مقایسات کافی در نظر گرفته شد (۴، ۶، ۷، ۱۵). برای استفاده از داده‌های تشت، با استفاده از رابطه (۸) ضریب تشت برای تمامی روزهای مورد نظر محاسبه و با استفاده از آن تبخیر روزانه و سپس از مجموع آنها تبخیر ماهانه برای بررسی مدل‌ها به دست آمد. نتایج تبخیر برآورد شده توسط الگوریتم‌های SEBS و SEBAL در مقایسه با داده‌های تشت تبخیر (با اعمال ضریب تشت) در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که می‌توان مشاهده کرد کمترین میزان تبخیر مربوط به ماه شهریور است (به جز سال ۱۳۸۶ که به دلیل نبود تصاویر برای این ماه تبخیر آن مشخص نیست و نتایج الگوریتم SEBS (با اعمال فاکتور شوری) به واقعیت (مقادیر تشت) نزدیک‌تر است. نتایج پارامترهای آماری و همچنین ضرایب همبستگی بین الگوریتم‌ها و داده‌های تشت در جدول ۸ ارائه شده است. نتایج پارامترهای آماری در جدول ۸ حاکی از آن است که هر دو الگوریتم از دقت نسبتاً خوبی برخوردار بوده‌اند. اما از نظر مقایسه مقادیر ریشه میانگین مربع اختلافات

مترمربع قرار گرفته است. در همین راستا نیز شار گرمای محسوس برای سطوح آب بین ۱۶/۰۱- و ۱۶۸/۷۸ برای الگوریتم SEBAL و ۱۴/۳۸- و ۴/۰۴ وات بر متر مربع برای SEBS قرار گرفته است. ۹۹/۹۸ درصد H برآورد شده توسط SEBAL و ۹۹/۹۹ درصد این پارامتر برای SEBS در سطوح آب مقادیر منفی هستند. با توجه به این نکته که وجود مقادیر منفی و یا نزدیک به صفر برای شار گرمای محسوس در کاربری‌های آبی کاملاً منطقی است (۸، ۱۹ و ۲۰) لذا عملکرد هر دو الگوریتم را در برآورد این پارامتر نیز می‌توان مناسب قلمداد کرد. از این ارزیابی آشکار است که اختلاف بین H برآورد شده توسط الگوریتم‌ها بسیار کم است و SEBS و SEBAL نتایجی مشابه در محاسبه این پارامتر ارائه می‌دهند.

#### ارزیابی و صحت‌سنجی الگوریتم‌ها بر اساس اطلاعات مشاهداتی

به‌منظور ارزیابی نتایج در این مطالعه با توجه به نبود تشت تبخیر شناور در دریاچه از داده‌های تشت تبخیر ایستگاه سینوپتیک اطراف دریاچه استفاده شد. همچنین به دلیل نقصان اطلاعات در ایستگاه آب شور گل‌مانخانه که عملاً امکان استفاده

جدول ۸. مقادیر پارامترهای آماری برای مقایسه الگوریتم‌ها در برآورد تبخیر ماهانه (برحسب میلی‌متر در ماه)

R <sup>۲</sup>				MBE	RMSD	الگوریتم
۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸			
۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۵	۰/۸۸	-۳/۲۶	۷/۸	SEBS
۰/۹۳	۰/۸۲	۰/۷۲	۰/۸۵	۲۲/۴۶	۱۴/۸۸	SEBAL

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه الگوریتم‌های سنجش از دوری SEBS و SEBAL در برآورد تبخیر ماهانه از سطح آزاد آب دریاچه ارومیه مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. مبنای مقایسات، اطلاعات تشکک تبخیر ایستگاه سینوپتیک ارومیه است و تصاویر سنجنده MODIS در ماه‌های خرداد، تیر، مرداد شهریور سال‌های ۱۳۸۵ الی ۱۳۸۸ مورد استفاده قرار گرفته است. از تحلیل‌های به عمل آمده از این مطالعه نتایج زیر قابل ارائه هستند:

- ۱- هر دو الگوریتم SEBS و SEBAL نتایج نسبتاً قابل قبولی در مقیاس روزانه و ماهانه در برآورد تبخیر نشان می‌دهند.
- ۲- در مقایسه دو الگوریتم با یکدیگر الگوریتم SEBS نتایج قابل قبول‌تری ارائه می‌دهد. اما نظر به اینکه دریاچه ارومیه به‌عنوان یکی از شورترین دریاچه‌های جهان در این تحقیق مورد استفاده بوده است، لذا از الگوریتم SEBS با اعمال فاکتور شوری استفاده شده است که نتایج این الگوریتم اصلاحی شده در مقایسه با SEBAL نیز مناسب‌تر ارزیابی می‌شود.
- ۳- با توجه به انتخاب پیکسل‌های گرم و سرد در الگوریتم SEBAL که تأثیر بسیار زیادی در نتایج دارد و دقت بالایی که در انتخاب این پیکسل‌ها مورد نیاز است و عدم نیاز به این انتخاب در الگوریتم SEBS و به عبارتی سادگی آن پیشنهاد می‌شود برای برآورد تبخیر از الگوریتم SEBS استفاده شود.

(RMSD) نشان می‌دهد که الگوریتم SEBS نسبت به SEBAL با خطای کمتری روبه‌رو بوده است، به‌طوری‌که خطای SEBAL نسبت به مقادیر مشاهداتی تقریباً دو برابر خطای SEBS روبه‌رو بوده است.

مقادیر پارامتر آماری MBE از این منظر حائز اهمیت است که نشان می‌دهد در مجموع دو الگوریتم مذکور نسبت به مقادیر مشاهداتی بیش‌برآورد و یا کم‌برآورد بوده‌اند. نتایج این پارامتر نشان می‌دهد که الگوریتم SEBS در عین حال که با خطای کمتری روبه‌رو بوده (۳/۲۶-) اما علامت منفی خطا نشان می‌دهد که SEBS نسبت به مقادیر مشاهداتی کم‌برآورد بوده، این در حالی است که الگوریتم SEBAL ضمن خطای بیشتر (۲۲/۴۶)، بیش-برآورد بوده است. نتایجی که با تحقیقات قبلی از قبیل باباجعفری و همکاران (۳) و اکبرزاده مقدم و همکاران (۲) همخوانی دارد.

مقادیر ضریب تبیین به‌عنوان یک شاخص مطرح در ارزیابی مدل‌ها و الگوریتم‌ها نیز حاکی از دقت بالای دو الگوریتم در مقایسه با مقادیر مشاهداتی است. الگوریتم SEBAL برای برآورد شار گرمای محسوس به‌دلیل متکی بودن به انتخاب دو پیکسل کلیدی به نام پیکسل‌های سرد و گرم همواره با عدم قطعیت زیادی روبه‌رو است. اما الگوریتم SEBS با به‌کارگیری روشی ساده‌تر عملکرد بهتری را در این زمینه نشان می‌دهد.

## منابع مورد استفاده

۱. ابراهیم‌پور، ص. و ح. محمدزاده. ۱۳۹۲. ارزیابی و پهنه‌بندی کیفیت آب دریاچه زریوار با استفاده از شاخص‌های کیفی NSFWQI, OWQI, CWQI. *پژوهش‌های محیط زیست* ۴(۷): ۱۴۶-۱۳۷.
۲. اکبرزاده، ه.، پ. حقیقت‌جو و م. ح. باقری. ۱۳۹۴. برآورد تبخیر از سطح پیکره‌های آبی با الگوریتم SEBAL با استفاده از تکنیک سنجش از دور (مطالعه موردی مخازن آب شیرین چاه‌نیمه سیستان)، *نشریه آبیاری و زهکشی ایران* ۳(۹): ۵۲۲-۵۱۱.
۳. بابا جعفری ح.، ش. پایمزد، م. مقدسی و م. ح. باقری. ارزیابی الگوریتم SEBS در برآورد تبخیر و تعرق واقعی بر اساس تصاویر ماهواره NOAA-AVHRR مطالعه‌ی موردی: دشت تبریز، *پژوهش‌های کاربردی علوم آب* ۱(۲): ۱-۱۰.
۴. باقری، م. ح.، س. مرید و ص. ارشد. ۱۳۹۱. مقایسه مدل‌های تک منبعی و دو منبعی سنجش از دور مبتنی بر شار انرژی در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دشت تبریز. *نشریه سنجش از دور و GIS/ایران* ۴(۱): ۹۶-۸۱.
۵. باقری، م. ح.، س. مرید و ص. ارشد. ۱۳۹۴. ارزیابی مدل سنجش از دور SEBAL در برآورد تبخیر و تعرق واقعی برای کاربری‌های مختلف، منطقه موردی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه، *نشریه پژوهش‌های آب ایران* ۹(۱): ۱۱۰-۱۰۱.
۶. دانش‌کار آراسته، پ.، م. تجریشی، م. میرلطیفی و ب. ثقفیان. ۱۳۸۴. مدل آماری برآورد تبخیر از مخزن چاه‌های نیمه سیستان به روش بیلان حجمی. *پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی* ۶۸: ۱۴-۲.
۷. یزدانی، و.، ب. قهرمانی، ک. داور. ۱۳۸۹. تعیین بهترین روش تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد در اراضی شالیزاری آمل بر پایه آنالیز حساسیت و مقایسه آن با نتایج شبکه عصبی مصنوعی. *مجله پژوهش‌های آب ایران* ۴(۷): ۵۸-۴۷.
8. Abdelrady, A., J. Timmermans, V. T Zoltán and M. S. Salama. 2016. Surface energy balance of fresh and saline waters. *AquaSEBS Remote Sensing* 8(7): 583.
9. Abdelrady, A. 2013. Evaporation over fresh and saline water with SEBS. MSc. Thesis, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, University of Twente, Enschede, Netherlandse.
10. Allen, R. G., M. Tasumi, A. Morse and R. Trezza. 2005. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. *Irrigation and Drainage Systems* 19: 251-268.
11. Anderson, M. C., J. M. Norman, J. R. Mecikalski, J. A. Otkin and W. P. Kustas. 2007. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 1. Model formulation. *Journal of Geophysical Research* 112: 1-17.
12. Bagheri, M. H., S. Morid and S. Arshad. 2015. Application of remotely-sensed data to estimate a water budget for data-scarce endorheic basins: a case study of Lake Urmia basin, Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 1-12
13. Bastiaanssen, W. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology* 229: 87-100.
14. Bastiaanssen, W., M. Meneti, R. Feddes and A. Holtslag. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). I. Formulation. *Journal of Hydrology* 212: 198-212.
15. Chinyepe, A. 2011. Satellite remote sensing of surface water evaporation over lake Mutirikwi, Zimbabwe. MSc. Thesis, Water Resource Management, University of Zimbabwe. Zimbabwe.
16. El-Magd, I. H. A. and M. A. Elham. 2011. Estimation of the evaporative losses from Lake Nasser, Egypt using optical satellite imagery. *International Journal of Digital Earth* 5(2): 133-146.
17. Hassanzadeh, E., M. Zarghami, Y. Hassanzadeh. 2012. Determining the main factors in declining the Urmia Lake level by using system dynamics modeling. *Water Resources Management* 26: 129-145
18. Karimi, N., M. H. Bagheri, F. Hooshyaripor, A. Farokhnia and S. Sheshangosht. 2016. Deriving and Evaluating Bathymetry Maps and Stage Curves for Shallow Lakes Using Remote Sensing Data. *Water Resources Management* 30(14): 5003-5020.
19. Lofgren, B. M. and Y. Zhu. 2000. Surface energy fluxes on the Great Lakes based on satellite-observed surface temperatures 1992 to 1995. *Journal of Great Lakes Research* 26(3): 305-314.
20. McJannet, D. L., F. J. Cook, R.P. McGloin, H. A. McGowan and S. Burn. 2011. Estimation of evaporation and sensible heat flux from open water using a large-aperture scintillometer. *Water Resources Research* 47(5): 1-14.
21. Olioso, A., H. Chauki, D. Courault and J. P. Wigneron. 1999. Estimation of evapotranspiration and photosynthesis

- by assimilation of remote sensing data into SVAT models. *Remote Sensing of Environment* 68: 341-356.
22. Sabziparvar, A. A., H. Tabari, A. Aeni and M. Ghafouri. 2010. Evaluation of class a pan coefficient models for estimation of reference crop evapotranspiration in cold semi-arid and warm arid climates. *Water Resources Management* 24: 909-920.
  23. Sentelhas, P. C. and M. V. Folegatti. 2003. Class a pan coefficients (Kp) to estimate daily reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>), *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 7(1):111-115.
  24. Su, Z. 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Science* 6(1): 85-99.
  25. Turk, L. J. 1970. Evaporation of Brine: A Field Study on the Bonneville Salt Flats. *Water Resources Research* 6(4): 1209-1215 .

## Comparison of SEBS and SEBAL Algorithms in Evaporation Estimation from Open Water Surface with the Assessment of the Salinity Effect

R. Ziaee<sup>1</sup>, M. Moghaddasi<sup>1\*</sup>, S. Paimozd<sup>1</sup> and M. H. Bagheri<sup>2</sup>

(Received: September 2-2017 ; Accepted: April 18-2018)

### Abstract

Evaporation is one of the important components in water body's management, leading to changes in the water level and water balance. Also, its accurate estimation is faced with certain difficulties and complexities. Because of the limitations of physical and empirical methods based on the meteorological data, remote sensing technology can be widely used for evaporation calculation due to its capabilities for spatial data estimation and minimization of the meteorological data application. Many models have been developed to estimate evapotranspiration using remote sensing technology. Regarding the use of these algorithms for estimating evaporation from water surface, a few studies have been done; however, there is yet no comparison between them to estimate evaporation from the water surface. For this purpose, in this study, the output from two models estimating spatially distributed evaporation of water surfaces from remotely sensed imagery is compared. In order to implement these models, Terra/MODIS Images for four months including June, July, August and September in of 2006, 2007, 2008 and 2009 were prepared. Comparisons were made using pan data from Urmia synoptic station. In general, there was a reasonable agreement between the evaporation outputs from both models versus a pan data observation. The statistical analysis also showed that the SEBS algorithm (by applying the salinity factor), despite being simple in its implementation, has higher accuracy than the SEBAL algorithm.

**Keywords:** Evaporation, Remote sensing, Energy balance algorithms, MODIS, Pan Coefficient

---

1. Department of Water Engineering, College of Agricultural, Arak University, Arak, Iran.

2. Yazd Province Regional Water Expert, Yazd, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: m-moghaddasi@araku.ac.ir