

## برآورد تبخیر از سطح پیکره‌های آبی با الگوریتم SEBAL با استفاده از تکنیک سنجش از دور (مطالعه موردی مخازن آب شیرین چاه‌نیمه سیستان)

هادی اکبرزاده مقدم سه قلعه<sup>۱\*</sup>، پرویز حقیقت جو<sup>۲</sup>، محمد حسین باقری<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۶/۱۱

### چکیده

دریاچه‌های آب شیرین یکی از منابع محدود آب شیرین محسوب می‌شود که در دهه‌های اخیر با مشکلات کمی و کیفی بسیاری مواجه‌اند. مدیریت صحیح و جامع این منابع نیازمند وجود اطلاعات دقیق از مؤلفه‌های بیلان آب می‌باشد. تبخیر به‌عنوان ناشناخته‌ترین مؤلفه بیلان آب، سهم زیادی در میزان تلفات آبی دارد، که داشتن اطلاع دقیق از میزان و توزیع مکانی و زمانی آن کمک شایانی به مبانی برنامه‌ریزی کمی و کیفی منابع آب می‌نماید. مخازن مصنوعی آب شیرین چاه‌نیمه‌ها واقع در شرق کشور، با مساحت ۱۴۱ کیلومتر مربع به‌عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب گردید. در این تحقیق، توانایی مدل SEBAL در برآورد تبخیر از سطح پیکره آبی با استفاده از اطلاعات هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS بررسی گردید. در نتیجه میزان تبخیر روزانه با تفکیک مکانی  $250 \times 250$  متر با دقت قابل قبول به‌دست آمد. از روش تستک تبخیر به‌عنوان روش مرجع استفاده شد. در مقایسه نقطه‌ای نتایج مدل SEBAL با روش تستک، ضریب همبستگی مدل  $R = 0.74$  و میانگین درصد خطای کل  $\pm 14/5$  و RMSE مقادیر روزانه، بین ۱۵ تا ۲۵ درصد مقادیر کل می‌باشد. به‌صورت میانگین شار گرمای نهان و متوسط نرخ روزانه تبخیر برای ۳۰ تیرماه سال ۱۳۹۱ برای سطح آب به-ترتیب برابر با  $308 \text{ W/m}^2$  و  $13$  میلی‌متر در روز به‌دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** بیلان انرژی سطح، توزیع مکانی تبخیر، مخازن چاه نیمه، SEBAL

### مقدمه

(Sun et al., 2011). و نیز از طرفی روش بیلان آب می‌تواند تبخیر و تعرق را در مقیاس حوضه برآورد و در دراز مدت آن هم به‌طور کلی و سالیانه به‌کار برد که این هم نمی‌تواند الزامات مطالعات کوتاه مدت را برآورده سازد (Liu et al., 2006).

با مشاهده این مسائل، روش‌های مبتنی بر سنجش از دور می-تواند جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی به‌کار رود به‌طوری که میزان تبخیر و تعرق را در مقیاس پیکسل در پیکسل برای دوره‌های زمانی کوتاه در یک سطح فضایی بزرگ فراهم کند (Batra et al., 2006; Kustas et al., 1989). بیش‌تر روش‌های مورد استفاده در این زمینه، تماماً یا تا حدی مبتنی بر اصل تعادل انرژی، با تابش خالص گرفته شده به‌عنوان پارامتر اصلی می‌باشد که منجر به دست‌یابی دقیق‌تر در کیفیت‌های بالا می‌شود (Jabloun and Sahli, 2008).

معادله بیلان انرژی در سطح زمین جهت کاربرد در تعیین تبخیر و تعرق با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای، موجب توسعه الگوریتم‌های متعددی از جمله الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین (SEBAL) و الگوریتم سیستم بیلان انرژی سطح (SEBS) شده است. با استفاده از این الگوریتم‌ها، مؤلفه‌های مختلف بیلان انرژی در مقیاس منطقه‌ای

تبخیر از پیکره‌های آبی بزرگ پارامتر هیدرولوژیکی مهمی است که به‌عنوان پارامتر تعیین‌کننده معادله بیلان آب در آب و هوای خشک و نیمه خشک است. تغییرات کوچک در تبخیر واقعی می‌تواند منجر به تغییرات بزرگ در جریان‌های آب سطحی شود اما برآورد تبخیر از سطح‌های آبی بزرگ همچنان دست نیافتنی است زیرا به‌طور معمول به‌عنوان تلفات باقی‌مانده از مخزن محاسبه می‌شود. اندازه-گیری صحیح‌تر تبخیر از مخازن باعث افزایش اطمینان در برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب قابل دسترس و بهبود دقت تعیین حبابه می‌شود. در برخی از تحقیقات روش‌های زیادی برای برآورد تبخیر توسعه داده شده است. روش‌های اقلیمی یا هواشناسی مبتنی بر داده‌های نقطه‌ای، نمی‌تواند تخمین خوبی از تبخیر و تعرق در سطح بزرگ داشته باشد

۱- کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک زایل

۲- استادیار، دکتری هیدرولوژی و منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک زایل

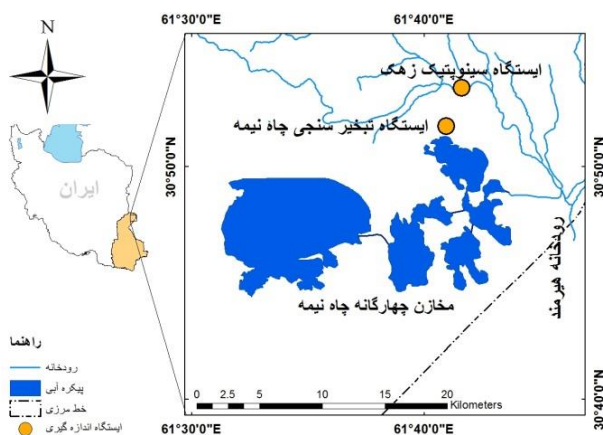
۳- کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، شرکت آب منطقه ای استان یزد

\* - نویسنده مسئول: (Email: Hadi3castle@gmail.com)

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه و اطلاعات

مخازن آب شیرین چاه‌نیمه‌ها در شرق ایران بین طول‌های جغرافیایی ۴۴ درجه و ۶۱ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۲۹ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۰ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۵۴ دقیقه شمالی واقع گردیده است. تالاب‌های هامون و مخازن آبی چاه‌نیمه‌های سیستم از مهم‌ترین منابع آبی سیستان و بلوچستان به شمار می‌روند. این منابع توسط رودخانه هیرمند که از افغانستان سرچشمه می‌گیرد تغذیه می‌شود. موقعیت جغرافیایی چاه‌نیمه‌ها و جانمایی ایستگاه‌های هواشناسی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی چاه‌نیمه‌های سیستان

اطلاعات هندسی این مخازن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- اطلاعات مخازن چاه‌نیمه‌های سیستان

مخازن	حد اکثر عمق مخزن سطح آب (m)	حجم مخزن سطح آب (MCM)	مساحت (Km <sup>2</sup> )
شماره ۱	۲۰		۲۱
شماره ۲	۲۲	۶۲۰	۹
شماره ۳	۳۲		۱۷
شماره ۴	۱۷	۸۲۰	۹۴
در مجموع		۱۴۴۰	۱۴۱

تبخیر از سطح این مخازن بعلاوه دارا بودن شرایط اقلیمی خاص سیستان بسیار زیاد است. مطالعاتی به منظور برآورد تبخیر واقعی از سطح آن انجام گرفته است که در جدول ۲ خلاصه‌ای از نتایج بررسی این جدول نشان می‌دهد که گستره وسیعی از برآوردها بدست می‌آید.

و با کم‌ترین داده‌های زمینی محاسبه می‌شود. به‌طور خلاصه ارتباط بین تشعشعات دریافتی توسط ماهواره‌ها از سطح زمین در باندهای قابل رؤیت و مادون قرمز حرارتی و همچنین تفاوت زیاد هیدرولوژیکی سطوح زمین، پایه و اساس فرمول‌ها در الگوریتم بیلان انرژی می‌باشد (Z. Su, 1999; Bastiaanssen et al., 1998).

در مطالعات هیدرولوژیکی، برای محاسبه تبخیر از سطح آب‌های آزاد، با استفاده از فن‌آوری سنسجش از دور، روش‌هایی توسعه یافته مبتنی بر معادله بیلان انرژی هستند. اکثر این روش‌ها برای سطح زمین با پوشش گیاهی و خاک تعریف شده است. این مدل‌ها در دو دسته تک منبعی و دو منبعی تقسیم‌بندی می‌شوند. که مدل‌هایی از قبیل SEBAL و SEBS تک‌منبعی و مدل‌هایی از قبیل P-TSEB و S-TSEB دو منبعی محسوب می‌شوند. مدل‌های تک منبعی، پوشش زمین را در قالب یک سطح با عنوان "برگ بزرگ" در نظر می‌گیرد که مقاومت آئرو‌دینامیکی و دمای یکسان برای انتقال آب-گرما در ارتفاع یکسان دارد. در مقابل در مدل‌های دو منبعی که بیش-تر برای برآورد ترکیب تبخیر و تعرق استفاده می‌شود، پوشش گیاهی و خاک شار گرمای مستقلی از هم دارند. به عبارتی دیگر تفاوت عمده بین مدل‌های تک منبعی و دو منبعی در الگوریتمی است که برای محاسبه شار گرمای محسوس به کار می‌برند (Kimura et al., 2007).

تکنیک‌های به‌دست آمده برای برآورد دقیق شار گرمای نهان در سطح آب با استفاده از فن‌آوری سنسجش از دور، نیازمند ترکیب اطلاعات متفاوتی در دامنه طول موج گسترده‌ای، از رادیومترهای متفاوت است (Curry et al., 1999).

نتایج مطالعات دیگر محققین در این زمینه نشان از کاربرد موفق مدل‌های سنسجش از دور جهت برآورد شارهای گرمایی از سطح زمین و سطح پیکره‌های آبی دارد (Abou El-Magd and Ali, 2012; Evans et al.; Bastiaanssen, 2000; Bastawesy et al., 2008; Z. B. Su, 2002; Shaltout and El Housry, 1997; Sun et al., 2011).

هدف از این مطالعه بررسی قابلیت مدل SEBAL در برآورد تبخیر سطح پیکره‌های آبی مخازن چاه نیمه‌های سیستان، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنسجند MODIS می‌باشد. هم‌چنین توزیع مکانی تبخیر در سطح چهار مخزن مورد به‌دست می‌آید. این مخازن نقش مهمی را در کنترل سیلاب و تأمین آب شرب منطقه سیستان ایفا می‌کند. تبخیر واقعی روزانه در منطقه مطالعاتی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای TERRA/MODIS با کیفیت پیکسل ۲۵۰×۲۵۰ متر برآورد شده است.

جدول ۲ - نتایج برآورد تلفات تبخیر سالیانه از مخازن چاه‌نیمه‌ها براساس دیگر مطالعات انجام شده، سعادت خواه و همکاران (۱۳۸۰)

مطالعه	سال انتشار	تبخیر سالیانه (mm)	تلفات تبخیر (MCM)
کازه سانیو	۱۳۴۷	۲۸۰۰	۱۱۷
تهران سحاب	۱۳۶۹	۳۴۸۹	۱۴۳
ایتال کنسولت	---	۲۷۱۲	۱۱۱
سازمان هواشناسی	---	۲۸۴۷	۱۱۷
پارس کنسولت	۱۳۷۹	۳۰۹۳	۱۲۷
سامانه فرایندهای محیطی*	۱۳۸۷	۳۱۱۷	---

\* این مطالعه در سال ۱۳۸۷ توسط شرکت توسعه آب و خاک سیستان انجام گرفته است.

(پیکسل)، براساس (۱) محاسبه می‌شود:

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

واحد هر کدام از ترم‌های بیلان انرژی  $[Wm^{-2}]$

تابش خالص ( $R_n$ ): از طریق توازن تابش سطحی زمین به صورت

رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S in} + R_{l in} + R_{L out} - (1 - \epsilon_0)R_{L in} \quad (2)$$

$R_{S in}$  تابش خورشیدی طول موج کوتاه ورودی  $[Wm^{-2}]$ ،

$R_{L in}$  تابش خورشیدی طول موج بلند ورودی  $[Wm^{-2}]$ ،

$R_{L out}$  تابش خورشیدی طول موج بلند خروجی  $[Wm^{-2}]$ ،

$\alpha$  آلبدو طول موج کوتاه سطح،  $\epsilon_0$  گسیلندگی سطح زمین،

تمام پارامترهای گفته شده با استفاده از الگوریتم سبال و روش های پارامتر سازی سطح زمین محاسبه می شود.

شار گرمای زمین (G): با استفاده از یک رابطه تجربی به صورت

خالص و تعداد کمی از پارامترهای سطحی مثل آلبدو ( $\alpha$ )، دمای سطحی ( $T_s$ ) و شاخص گیاهی تفاضل نرمال شده (NDVI) محاسبه

می‌شود (Bastiaanssen et al., 1998).

$$\frac{G}{R_n} = \left[ \frac{T_s}{\alpha} \right] (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98NDVI^4) \quad (3)$$

در نقاط با وجود آب و برف (که مقادیر LAI صفر بوده و نیز مقادیر آلبدو شرایط حدی دارد) استفاده از **Error! Reference source not found.** با توجه به مدلسازی‌های اولیه‌ای که انجام گردید مناسب نمی‌باشد. بدین منظور روابط جدول ۳ برای آب عمیق و کم عمق و نواحی برفی برای حوضه مطالعاتی تعدیل شده است.

جدول ۳ - روابط شار گرمای خاک برای سطوح برف و آب (کالیبره شده برای حوضه مطالعاتی)

شار گرمای خاک	
برف	$G=0.5R_n$
آب (عمیق)	$G_{water}=0.45 R_n$

مقادیر داده‌های اندازه‌گیری شده از تشتک با اعمال ضرایب

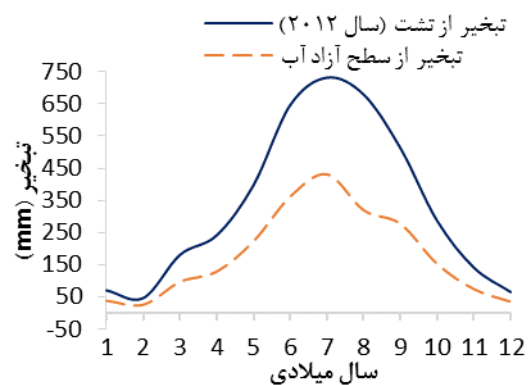
تشتک، به صورت نمودار از ایستگاه سینوپتیک زهک در شکل ۲

نشان داده شده است. ضریب تشتک برای یک سال بین ۰/۵ تا ۰/۶

در نظر گرفته شده است. مقادیر ضریب تشتک از مطالعات گزارش

هواشناسی شرکت توسعه آب و خاک سیستان برای منطقه به‌دست

آمده است.



شکل ۲- مقادیر ماهانه تبخیر از تشتک و تبخیر از سطح آب در سال ۲۰۱۲

### روش شناسی

روش شناسی مدل‌های شار انرژی بر اساس محاسبه تبخیر و تعرق واقعی به عنوان یکی از اجزای معادله توازن انرژی می‌باشد. الگوریتم توازن انرژی سطح (SEBAL) (Bastiaanssen et al., 1998)، یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های شار انرژی برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از سنجش از دور است. مدل SEBAL مبتنی بر معادله بیلان انرژی، کلیه تابش‌ها و توازن انرژی را به همراه مقاومت‌های انتقال حرارت و انتقال بخار آب برای هر پیکسل محاسبه می‌کند. تبخیر و تعرق از عبارت شار گرمای نهان لحظه‌ای ( $\lambda ET$ ) مشتق می‌شود و به‌عنوان ترم باقیمانده معادله تراز انرژی سطح در لحظه عبور ماهواره بر روی واحد تصویر

آب کم عمق	Zom=0.005
-----------	-----------

شار گرمای نهان لحظه‌ای، ( $\lambda ET$ ) ترم باقی‌مانده محاسبه شده از بیلان انرژی است که از (۶) برای محاسبه نسبت تبخیر ( $\Lambda$ ) استفاده می‌شود.

$$\Lambda = \frac{\lambda ET}{\lambda ET + H} = \frac{\lambda ET}{R_n - G_0} \quad (6)$$

نسبت تبخیر لحظه‌ای بیان می‌کند نسبتی از مقدار واقعی نیاز تبخیر سطح به هنگامی که شرایط رطوبتی هوا با شرایط رطوبتی زمین در حالت توازن باشد.

در این زمینه محققان و پژوهش‌های علمی دیگری نیز این رویه کار مدل SEBAL را برای برآورد تبخیر از سطح آب به کار بردند (Bastiaanssen, 2000; Abou El-Magd and Ali, 2012); فلوچارت مدل (Sun et al., 2011; Evans et al., 2009). SEBAL به کار رفته در این تحقیق در شکل ۳ نشان داده شده است.

## نتایج و بحث

به منظور برنامه‌ریزی دقیق منابع آب شیرین نیازمند داشتن آگاهی دقیق از مؤلفه‌های بیلان آب در سیستم مطالعاتی می‌باشد. از طرفی با توجه به وضعیت آب و هوایی و هیدرولوژیکی منطقه مطالعاتی که در آن دریاچه‌های چاه‌نیمه به عنوان تنها منبع آبی منطقه محسوب می‌شود، در محاسبات شارهای انرژی، با سازگاری مدل‌های انتخاب شده به منظور محاسبه مؤلفه‌های بیلان انرژی با استفاده از روش‌های به کار رفته در مطالعات دیگران برای منطقه مطالعاتی، نرخ تبخیر به صورت لحظه‌ای برای سطح آب برآورد شد و سپس با انجام نسبت-گیری میان شار تبخیر لحظه‌ای با تبخیر و تعرق پتانسیل با روش پنمن مانیتیت، شار روزانه تبخیر محاسبه می‌گردد.

در ادامه به منظور ارزیابی و تحلیل مدل SEBAL تبخیر و تعرق واقعی در اراضی منطقه و تبخیر از سطح دریاچه که از مهم‌ترین اجزای بیلان آب محسوب می‌شوند با تبخیر به دست آمده از داده‌های مشاهداتی تشتک تبخیر جهت اعتبارسنجی کار استفاده شد.

از دیگر پارامترهای مورد نیاز مدل‌ها، علاوه بر دمای سطحی زمین ( $T_s$ )، شاخص پوشش گیاهی (NDVI) و شار تابش خالص ( $R_n$ ) برای منطقه مطالعاتی می‌باشد که برای مدل SEBAL از تصاویر سنجنده مودیس استخراج شده است. شکل ۴ و شکل ۵ توزیع پراکندگی این پارامترها را برای روز ۳۰ تیرماه سال ۱۳۹۱ به عنوان نمونه در منطقه مطالعاتی انتخاب و نتایج مدل‌سازی ارائه می‌گردد.

توزیع شاخص NDVI در محدوده ۰/۴۶- تا ۰/۳۱ (بی بعد) متغیر می‌باشد و این درحالی است که توزیع دمای سطحی  $T_s$  در محدوده از ۲۹۶ تا ۳۱۸ درجه کلون متغیر می‌باشد.

از ابتدای خرداد تا انتهای شهریور  $G_{water}=0.38 R_n$  آب (کم عمق)

عمق آب دو متر، معیار عمیق و کم عمق بودن آب در نظر گرفته می‌شود (Allen et al., 2002). از خصوصیات آب عمیق نسبت به آب کم عمق، ضریب آلیبدوی کم تر (نزدیک به صفر)، دمای سطح زمین بیش تر و شاخص NDVI کوچک تر (اعداد منفی به صفر نزدیک تر) می‌باشد.

شار گرمای محسوس ( $H$ ) تابعی از گرادیان دمایی، زبری سطحی و سرعت باد است. بنابراین دشواری در محاسبه به علت رابطه درونی بین دو عامل گرادیان دما و زبری سطحی است. در بیان کلاسیک برای شار گرمای محسوس  $H$  از (۴) استفاده می‌شود (Farah and Bastiaanssen, 2001):

$$H = \rho C_p \frac{dT}{r_a h} \quad (4)$$

$\rho$  چگالی هوا  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه هوا  $dT$  گرادیان دمایی لایه سطحی نزدیک  $r_a h$  مقاومت ائرونامیکی انتقال حرارت  $[s \cdot m^{-1}]$

در این مدل یک رابطه خطی به صورت (۵) بین دمای سطحی و تغییرات دما تعریف می‌شود تا کالیبره شود بر روی شرایط مرزی تعیین شده در درون خودشان جایی که ( $dT$ ) می‌تواند محاسبه شود با داشتن مقدار  $H$  در دو پیکسل.

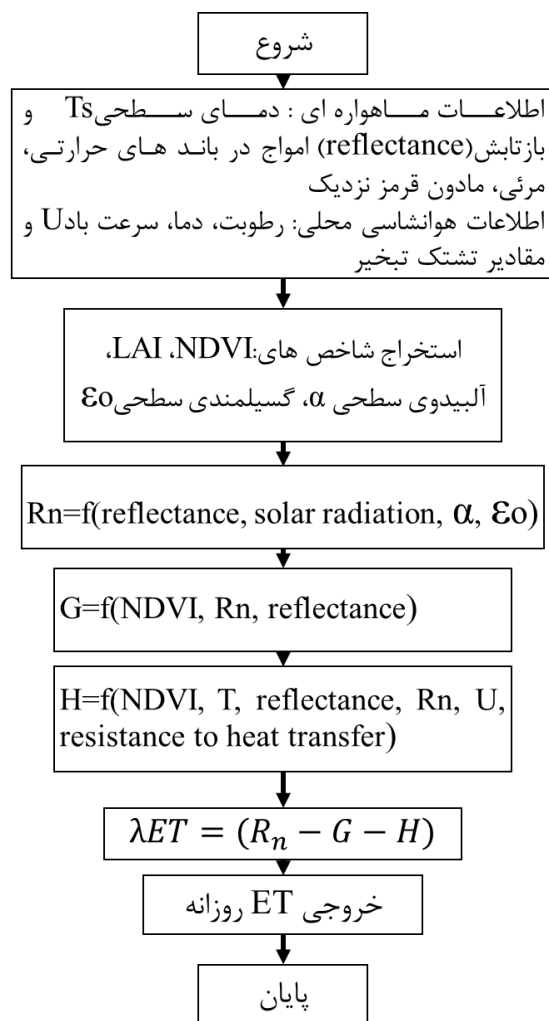
$$dT = aT_s + b \quad (5)$$

تعریف ضرایب  $a$  و  $b$  نیازمند به انتخاب دو پیکسل که ارائه دهنده شرایط حدی از دما و رطوبت می‌باشند این دو با نام پیکسل گرم و پیکسل سرد بیان می‌شود. پیکسل سرد سطحی است که به صورت کامل آبیاری شده و دارای پوشش گیاهی کامل باشد و دمای سطحی ( $T_s$ ) نزدیک دمای هوا ( $T_a$ ) می‌باشد. پیکسل گرم سطح خشک و لخت است جایی که مقدار شار گرمای نهان صفر در نظر گرفته می‌شود. از رابطه خطی برقرار شده بین دو پیکسل، برای محاسبه تمام پیکسل‌ها استفاده می‌شود.

در محاسبه مقاومت ائرونامیکی نیاز به برآورد زبری طول مومنتوم ( $Z_{om}$ ) می‌باشد که در حال کلی به عنوان کسری از LAI در نظر گرفته می‌شود. حال آنکه برای برف و آب این پارامتر عملاً صفر می‌باشد، لذا برای دو سطح برف و آب از مقادیر ثابت آمده در جدول ۴

**Error! Reference source not found.** استفاده می‌شود:

$Z_{om}$	
برف	$Z_{om}=0.0005$
آب عمیق	$Z_{om}=0.0005$



شکل ۳ - فلوجارت محاسبه تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از تصاویر ماهواره ای MODIS و مدل SEBAL

پوشش گیاهی در سطح پیکسل، رابطه دما و NDVI متفاوت است (Timmermans et al., 2007). در منطقه مطالعاتی در مقادیر NDVI کم، بین صفر تا ۰/۱ این رابطه مستقیم است و در بیش تر از این حدود این رابطه معکوس است.

در ادامه برای برآورد تبخیر و تعرق روزانه ماهواره از مقدار لحظه‌ای آن، از نسبت تبخیر و تعرق مرجع روزانه به ساعتی استفاده گردید. به این منظور تبخیر و تعرق گیاه مرجع (حاصل از روش پنمن - مانتیت - فائو) در مقیاس ساعتی (میلی متر در ساعت) در لحظه گذر ماهواره ( $ET_{r-inst}$ ) و همچنین میزان آن در مقیاس روزانه بر حسب میلی متر در روز ( $ET_{r-24}$ ) برای ایستگاه هواشناسی معرف منطقه (ایستگاه سینوپتیک زهک) محاسبه شد. سپس از (۷ میزان تبخیر و تعرق واقعی روزانه مدل های ماهواره ای ( $ET_{act-24}$ ) بر حسب میلی متر در روز برآورد گردید.

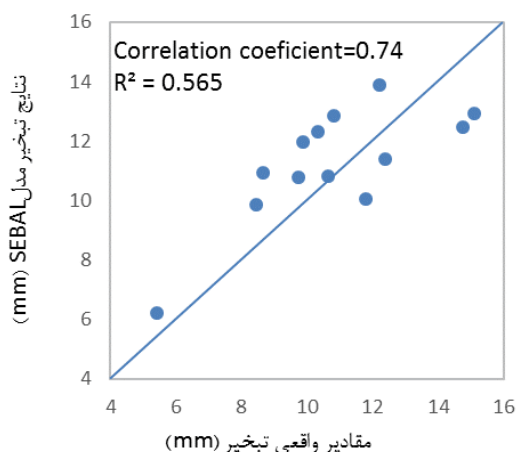
تابش خالص برای سطح خشکی منطقه بین ۴۳۰ تا ۵۲۰ متغیر است اما برای سطح آب این مقدار تا ۷۵۰ متغیر است. بدین ترتیب مقادیر تابش خالص و شاخص گیاهی با دما برای هر سطح به صورت جدا بررسی می شود. شاخص گیاهی برای سطح خشکی در محدوده ۰ تا ۰/۲۸ می باشد که مقدار پایین این شاخص به دلیل زمان تصویر برداشت محصول غالب منطقه (گندم)، ضعیف بودن پوشش گیاهی در منطقه را حکایت دارد و همچنین مقادیر منفی NDVI برای سطح آب می باشد که به عنوان شاخص های جداسازی سطح آب و خاک نیز استفاده گردید. نیز به همین ترتیب مقادیر بالای دمای سطح زمین نیز به گرمای هوا در زمان تصاویر (ماه تیر) و درجه حرارت کمتر سطح آب نسبت به منطقه، برمی گردد. لذا نتایج این قسمت بر اساس آمار متوسط داده های دما مشاهداتی در منطقه، در زمان های تصویر برداری (فصل تابستان)، با واقعیت های منطقه مطالعاتی سازگاری دقیقی دارد. بر اساس نمودار شکل ۵ و بسته به اندازه NDVI و یا تراکم

سطح خشکی منطقه مطالعاتی برای روز سی ام تیر ماه ۱۳۹۱ در سطح دشت سیستان

$$ET_{act-24} = ET_{r-24} \frac{ET_{inst}}{ET_{r-inst}} \quad (7)$$

### مقایسه و ارزیابی نتایج

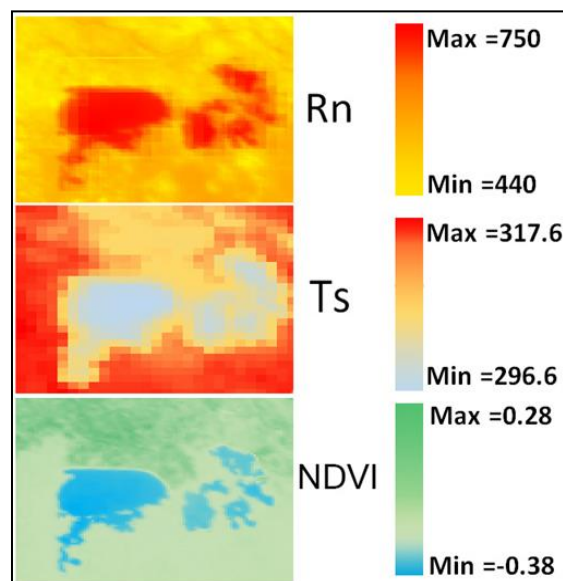
برای ارزیابی مقادیر تبخیر و تعرق مدل سازی شده و مقایسه با مقادیر مشاهداتی (تشتک تبخیر)، از معیارهای آماری جدول ۵ استفاده می گردد که مبین میزان خطای برآوردهای هریک از مدل ها می باشند. در جدول ۵، مقادیر خروجی مدل،  $O_i$  مقادیر مشاهداتی،  $n$  تعداد مشاهدات و  $\bar{O} = \frac{1}{n} \sum O_i$  می باشد. نتایج معیارهای آماری فوق، در جدول ۶ ارائه شده است. به منظور ارزیابی عملکرد و نیز مقایسه نتایج روزانه و دوره ای تبخیر از مدل SEBAL، برای ۱۲ روز تصویربرداری از مقادیر تشتک تبخیر در منطقه مطالعاتی استفاده شد.



شکل ۶ - مقایسه مقادیر واقعی با مقادیر شبیه سازی شده مدل SEBAL

بیشترین و کمترین میزان درصد خطای مدل مربوط به ۱۸ شهریور و ۲۱ تیرماه سال ۱۳۹۱ می باشد. نتایج مقایسه نشان داده شده در جدول ۶ و

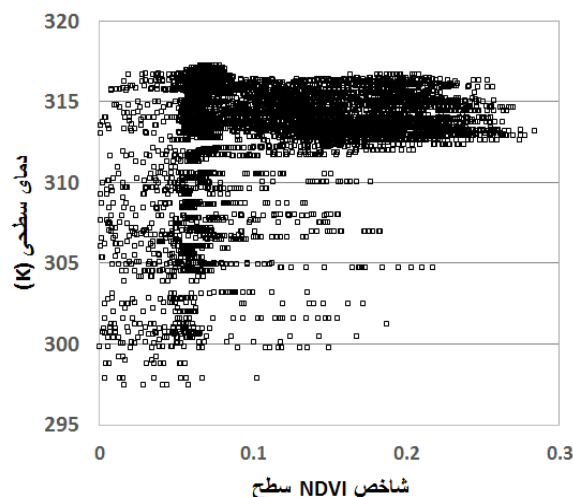
شکل ۶ میزان RMSD و ضریب همبستگی داده های شبیه سازی شده و مقادیر واقعی را به ترتیب برابر ۲/۹۵ میلی متر و ۰/۷۴ می باشد. همچنین مطابق جدول ۶ متوسط درصد خطای کل مدل SEBAL نیز برابر ۱۴/۵% ± به دست آمده است.



شکل ۴ - توزیع شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، دمای سطح زمین (Ts) بر مبنای شار تابش خالص (Rn) برای روز ۳۰ ام تیر ماه ۱۳۹۱، در سطح دشت سیستان با پوشش کامل مخازن چاه نیمه ها و مناطق کشاورزی اطراف.

جدول ۵ - معیارهای آماری برای مقایسه نتایج خروجی مدل ها

پارامتر آماری	رابطه	توصیف
$\Delta_i$	$\frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100$	درصد خطای برآورد مدل برای روز i ام
RMSD	$\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{1/2}$	ریشه میانگین مربع اختلافات



شکل ۵ - توزیع شاخص پوشش گیاهی NDVI، دمای سطح برای

۱ - Root-mean-square difference



جدول ۶- مقادیر معیارهای آماری برای مقایسه مدل شار انرژی در برآورد تبخیر تعرق واقعی در دوره اندازه‌گیری

E pan (mm)	SEBAL		روز جولایی	تاریخ تصویر
	E روزانه	درصد خطا		
۱۰/۶۴	۱/۵	۱۰/۸	۱۷۰	۲۰۱۲/۰۶/۱۸
۱۵/۱۲	-۷/۹	۱۲/۹۲	۱۷۷	۲۰۱۲/۰۶/۲۵
۱۱/۸	-۱۴/۸	۱۰/۰۵	۱۸۴	۲۰۱۲/۰۷/۰۲
۱۲/۳۹	* -۸	۱۱/۴	۱۹۳	۲۰۱۲/۰۷/۱۱
۱۴/۷۵	-۱۸	۱۲/۴۵	۲۰۲	۲۰۱۲/۰۷/۲۰
۱۲/۲۲	۱۳/۷	۱۳/۹	۲۰۹	۲۰۱۲/۰۷/۲۷
۱۰/۸۱	۱۸/۹	۱۲/۸۵	۲۱۸	۲۰۱۲/۰۸/۰۵
۱۰/۳۴	۱۸/۹	۱۲/۲۹۵	۲۲۵	۲۰۱۲/۰۸/۱۲
۹/۸۷	۲۱/۱	۱۱/۹۵	۲۳۲	۲۰۱۲/۰۸/۱۹
۸/۴۶	۱۶/۴	۱۰/۸۵	۲۴۱	۲۰۱۲/۰۸/۲۸
۸/۶۴	* ۲۶/۷	۱۱/۹۵	۲۵۲	۲۰۱۲/۰۹/۰۸
۹/۷۲	۱۱	۱۰/۷۹	۲۶۲	۲۰۱۲/۰۹/۱۸
۵/۴	۱۴/۸	۶/۲	۲۶۸	۲۰۱۲/۰۹/۲۴

RMSD \* ۲/۹۵۲ میلی-متر  
میانگین درصد خطای مدل  $\pm 14/5\%$

دما و عمق آب در پیکره آبی وابسته دانست (Brutsaert, 2005). استفاده از رابطه تجربی به کار رفته در مدل SEBAL به علت اینکه مقدار G در سطح زمین از توزیع مکانی برخوردار است (Kustas et al., 2000). بنابراین ثابت گرفتن این ضریب، توزیع مکانی واقعی تبخیر را تا اندازه‌ای بر هم می‌زند.

#### نتایج تبخیر به روش SEBAL

با توجه به آنچه بیان شد، نتایج مدل SEBAL به صورت روزانه و برای دوره زمانی اوایل تیرماه تا اوایل مهر ماه سال ۱۳۹۱ شمسی (اواسط ژوئن تا اواسط سپتامبر سال ۲۰۱۲ میلادی) در سطح مخازن بر حسب میلی‌متر در روز برای منطقه به دست آمد. با استفاده از قابلیت نرم افزار ENVI، هر نقشه تبخیر از مدل SEBAL برش خورده و سپس متوسط پلیگون‌های حاصل به عنوان مقادیر خروجی برای آن تصویر به دست می‌آید. این مراحل برای هر تصویر (هر روز) به طور مجزا، انجام و در نهایت نتایج مربوطه برای محدوده درجدول ۷ و شکل ۷ ملاحظه می‌شود.

نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد که متوسط تبخیر روزانه طی دوره زمانی ۲۹ خرداد تا ۲۸ شهریور سال ۱۳۹۱ روند کم و بیش افزایشی داشته و بعد از آن با کاهش روبرو بوده است که این روند مطابق با روند مشاهداتی داده‌های دما و سرعت باد به عنوان مؤلفه‌های اصلی تبخیر است.

این نتایج نشان از سطح دقت قابل قبول مدل SEBAL می‌باشد. در نتایج مطالعات دیگر محققین سطح قابل قبول ضریب همبستگی مدل‌های سنجش از دوری را ۰/۷۵ نشان داده شده است. به طور کلی نتایج بیان شده نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول در مدل SEBAL در زمینه برآورد تبخیر از سطح پیکره‌های آبی می‌باشد. مقدار پایین معیار درصد خطا نیز مؤید این مطلب می‌باشد.

از نظر داده‌های ورودی، داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز مدل SEBAL به راحتی قابل دسترس می‌باشد. از جهتی نتایج قابل قبول این مدل نیز نشان داد با وجود عدم اطلاعات دمایی از سطح و بدنه آبی و عدم ثبت اطلاعات هواشناسی در نزدیکی مخازن، می‌توان از این مدل برای محاسبه شارهای حرارتی سطح آب استفاده نمود.

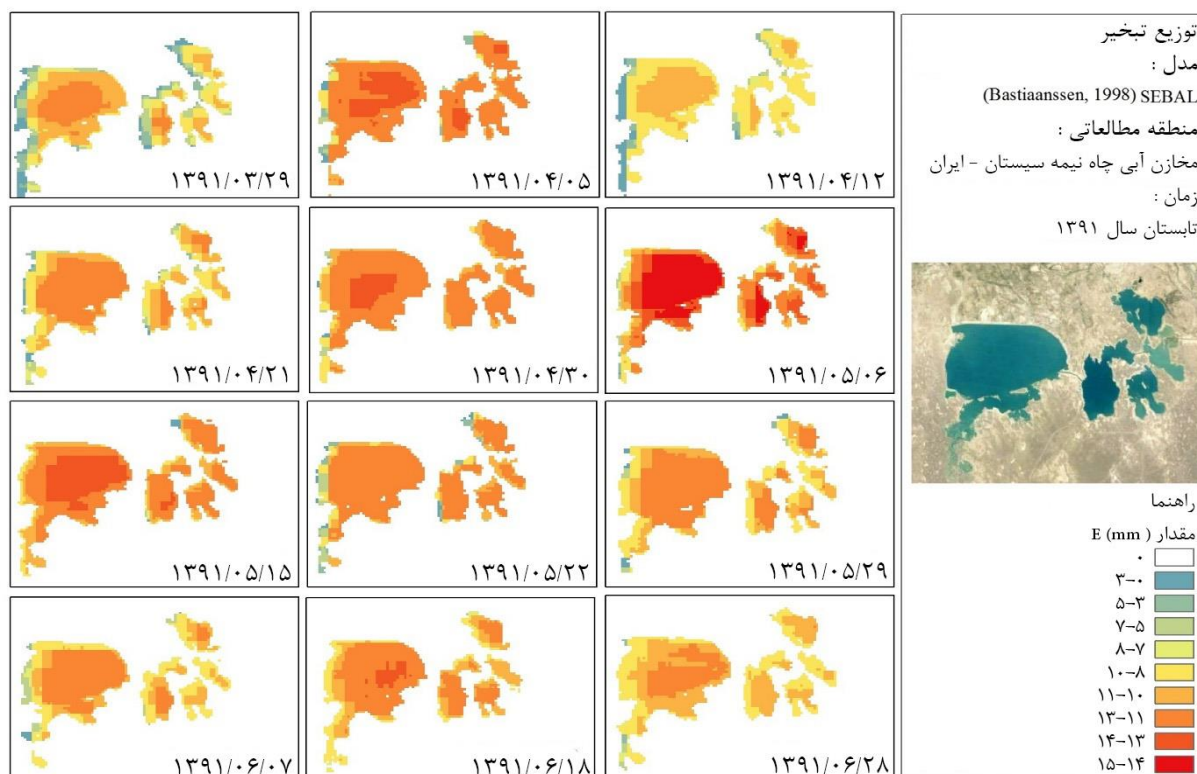
با تحلیل شار حرارتی آب G در مدل سبال می‌توان اینگونه بیان کرد که استفاده از رابطه تجربی  $G=Cr*Rn$  با توجه به اینکه مؤلفه G از توزیع مکانی برخوردار است بنابراین توزیع شار تبخیر را دچار مشکل می‌کند (Brutsaert, 2005). در این مدل با مشاهده نقشه-های توزیع تبخیر که در ادامه بررسی می‌شود نشان از همبستگی توزیع مکانی شار تبخیر با توزیع مکانی نقشه هم‌عمق دارد طوری که حداکثر مقدار تبخیر در سمت شرقی چاه‌نیمه‌ها و نیز در مکان‌های با عمق بالاتر از ده متر اتفاق می‌افتد. این امر را می‌توان نقطه ضعف مدل SEBAL در استفاده از رابطه تجربی برای شار حرارتی سطح آب دانست. با توجه به نقشه‌های هم‌عمق چاه‌نیمه و با توجه به اینکه در مدل SEBAL شار حرارتی سطح آب از یک نسبت ثابت تجربی از Rn برای سطح آب استفاده می‌کند می‌توان این تغییرات را به توزیع

جدول ۷ - متوسط مقادیر تبخیر روزانه و دوره ای مدل SEBAL برای مخازن آبی چاه نیمه‌های سیستان

SEBAL						فاصله زمانی تا تصویر بعدی	زمان تصویر
دوره ای mm			روزانه mm				
حداکثر	حداقل	متوسط	حداکثر	حداقل	متوسط		
۱۰۱	۳۷/۵	۹۳/۳۶	۱۱/۸	۱/۴	۱۰/۸	۷	۱۳۹۱/۰۳/۲۹
۸۵/۲	۳۱/۹۵	۷۹/۸۳۵	۱۴	۱/۷	۱۳/۹۲	۷	۱۳۹۱/۰۴/۰۵
۱۰۸	۴۰/۶۵	۱۰۱/۶۲۵	۱۰/۹	۱/۳۶	۱۰/۰۵	۹	۱۳۹۱/۰۴/۱۲
۱۳۲	۴۹/۵۳	۱۲۳/۱۸	۱۲/۴	۱/۵۵	۱۱/۴	۹	۱۳۹۱/۰۴/۲۱
۹۹/۵	۳۷/۳۲	۹۲/۷۰۵	۱۳/۷	۱/۷	۱۲/۴۵	۷	۱۳۹۱/۰۴/۳۰
۱۵۳	۵۷/۳۵	۱۴۲/۰۱	۱۵/۳	۱/۹۱	۱۳/۹	۹	۱۳۹۱/۰۵/۰۶
۸۴/۴	۳۱/۶۵	۷۷/۴۳	۱۳/۹	۱/۷	۱۲/۸۵	۷	۱۳۹۱/۰۵/۱۵
۸۸/۴	۳۳/۱۳	۸۲/۸۳	۱۳/۵	۱/۶	۱۲/۳۹۵	۷	۱۳۹۱/۰۵/۲۲
۱۱۷	۴۳/۷	۱۰۶/۲۷۵	۱۳/۱	۱/۶	۱۱/۹۵	۹	۱۳۹۱/۰۵/۲۹
۱۵۲	۵۷/۱۱	۱۴۰/۵۹	۱۲/۱	۱/۵	۹/۸۵	۱۱	۱۳۹۱/۰۶/۰۷
۱۴۷	۵۵/۱	۱۳۴/۸۹۹	۱۳/۶	۱/۷	۱۰/۹۵	۱۰	۱۳۹۱/۰۶/۱۸
۶۰/۷	۲۲/۶	۵۶/۴۰۵	۱۱/۷	۱/۴	۱۰/۷۹	۹	۱۳۹۱/۰۶/۲۸
					۶/۲	۰	۱۳۹۱/۰۷/۰۳

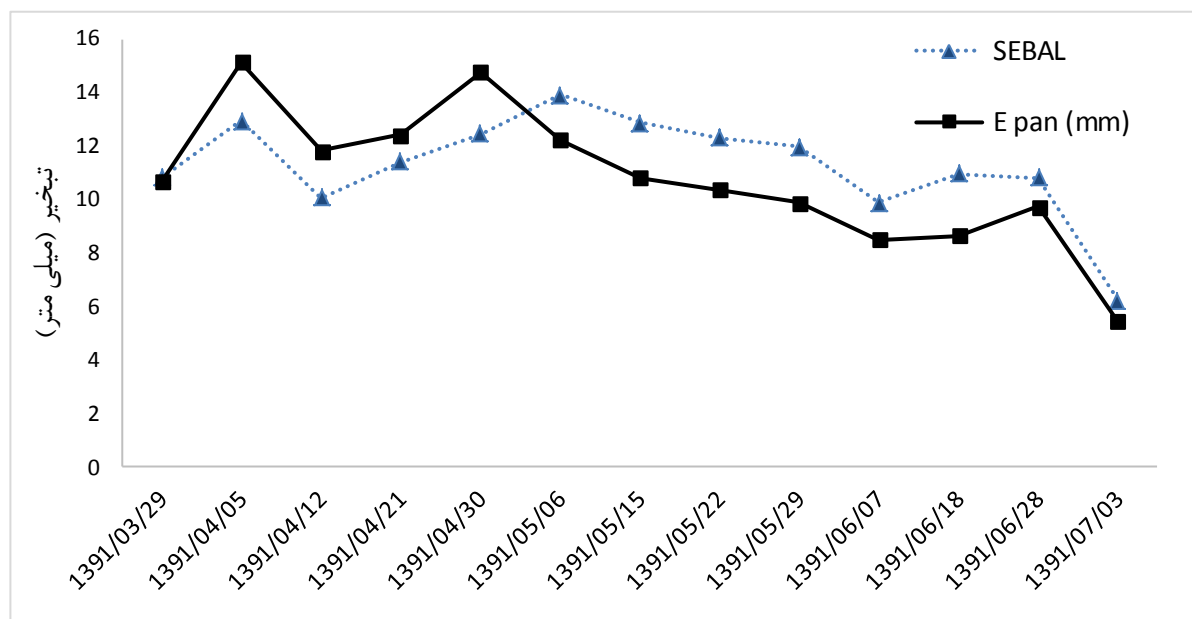
۱۱۳۷/۷۸۴

مجموع تلفات تبخیر در دوره زمانی (میلی متر)

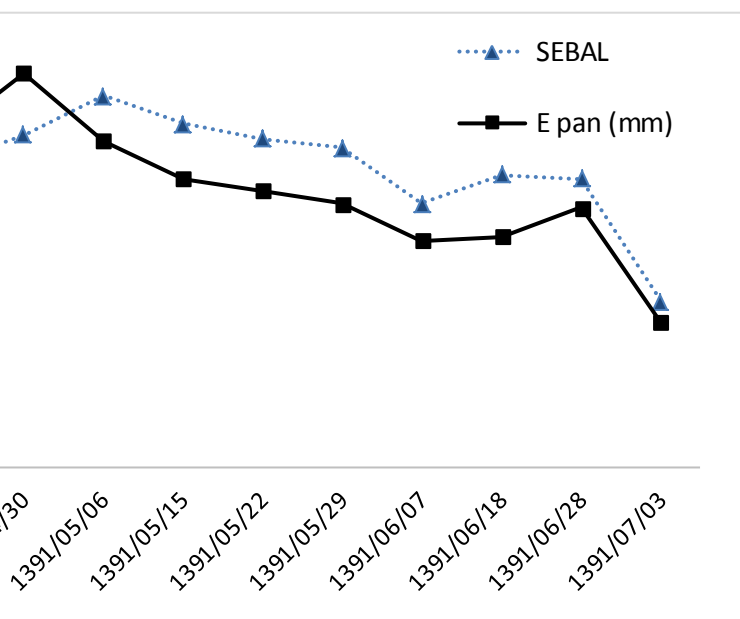


شکل ۷ - مقادیر روزانه تبخیر حاصل از مدل SEBAL





شکل ۸ - روند تغییرات تبخیر روزانه مدل SEBAL در مقایسه با مقادیر روش تشتک (Pan)



شکل ۸ مشاهده می‌شود که در ابتدای دوره مقدار تبخیر با روند افزایشی و از ابتدای ماه مرداد این روند بر عکس می‌شود.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

الگوریتم بیلان انرژی سطحی برای زمین (SEBAL) به‌منظور برآورد نرخ تبخیر روزانه برای مخازن آبی بزرگی مانند چاه نیمه‌های سیستم به‌کار گرفته شده است. شار گرمای نهان نیروی محرکه اصلی برای تبخیر، به‌عنوان عبارت باقی‌مانده در تابش خالص  $R_n$

بیش‌ترین مقدار تبخیر در حدود ۱۴ میلی‌متر بر روز، در روز ۶ مرداد ماه رخ داده است. مقادیر تبخیر بالای ۱۰ میلی‌متر بر روز در تمامی روزها در فصل تابستان نشان از شدت تبخیر مخازن دارد. افزایش مقدار تبخیر متناسب با افزایش عمق در سطح مخازن نیز به‌عنوان نتیجه قابل بحث این مدل می‌باشد که امکان تحلیل علمی آن با وجود اطلاعات سایر پارامترهای مؤثر عملی خواهد بود.

مطابقت توزیع مکانی تبخیر با نقشه هم عمق مخازن به‌دلیل رابطه نسبی و تجربی تابش خالص  $R_n$  و شار حرارتی پیکره آبی Go که در مدل SEBAL استفاده شده بر می‌گردد (Brutsaert, 2005). امکان بررسی توزیع مکانی تبخیر از امتیازات منحصر به فرد تکنیک‌های مبتنی بر سنجش از راه دور می‌باشد.

علاوه بر این نتایج به‌صورت میانگین مدل SEBAL برای مخازن با روند مقادیر مشاهداتی (تشتک تبخیر) در

- Journal of Digital Earth. 5.2: 133-146.
- Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R and Bastiaanssen, W. 2002. SEBAL: Surface Energy Balance Algorithms for Land, Idaho implementation. Idaho: Waters Consulting: University of Idaho: *WaterWatch, Inc.*
- Bastawesy, M.A., Khalaf, F.I and Arafat, S.M. 2008. The use of remote sensing and GIS for the estimation of water loss from Tushka lakes, southwestern desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences.*, 52.3: 73-80.
- Bastiaanssen, W. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of hydrology.* 229.1: 87-100.
- Bastiaanssen, W., Menenti, M., Feddes, R and Holtslag, A. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology.* 212: 198-212.
- Batra, N., Islam, S., Venturini, V., Bisht, G and Jiang, L. 2006. Estimation and comparison of evapotranspiration from MODIS and AVHRR sensors for clear sky days over the Southern Great Plains. *Remote Sensing of Environmen.*, 103.1: 1-15.
- Brutsaert, W. 2005. *Hydrology: an introduction:* Cambridge University Press.
- Curry, J., Clayton, C., Rossow, W., Reeder, R., Zhang, Y., Webster, P., Liu, G and Sheu, R. 1999. High-resolution satellite-derived dataset of the surface fluxes of heat, freshwater, and momentum for the TOGA COARE IOP. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 8.10: 2080-2059.
- Evans, R., Hulbert, S., Murrphy, E., Bastiaanssen, W and Molloy, R. 2009. Using satellite imagery to measure evaporation from storages—solving the great unknown in water accounting. Paper presented at the Irrigation and Drainage Conference 2009.
- Farah, H.O and Bastiaanssen, W.G. 2001. Impact of spatial variations of land surface parameters on regional evaporation: a case study with remote sensing data. *Hydrological processes.* 15.9: 1585-1607.
- Jabloun, M.d and Sahli, A. 2008. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: Application to Tunisia. *Agricultural Water Management.* 95.6: 707-715.
- Kimura, R., Bai, L., Fan, J., Takayama, N and Hinokidani, O. 2007. Evapo-transpiration estimation over the river basin of the Loess Plateau of China based on remote sensing. *Journal of Arid Environments.* 68.1: 53-65.
- شار گرمای محسوس H، تغییر در انرژی ذخیره شده سطح زمین Go برآورد شده است. این الگوریتم بر روی تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS برای منطقه به کار برده شده است. مقادیر تبخیر روزانه از روش اندازه‌گیری مستقیم تبخیر؛ روش تستک تبخیر با نتایج مدل SEBAL مقایسه شده است. دقت قابل قبول نتایج توانایی کاربرد مدل بر روی سطح آب به خصوص در مناطق دارای حداقل داده‌های زمینی را اثبات می‌نماید. تحقیقات آینده در این زمینه ممکن است این مدل را بر روی داده‌های ماهواره‌ای مشابه با گستره طیفی و تفکیک مکانی بالاتر، به صورت دوره مطالعاتی برای کسب نتایج بهتر به کار ببرند.
- نتایج به دست آمده جدول ۷ و شکل ۷ نشانگر این است که روش SEBAL ابزار قابل قبولی جهت برآورد تبخیر سطوح پیکره‌های آبی است و نتایج به دست آمده می‌تواند مبنای تصمیمات برنامه‌ریزی و مدیریت یکپارچه منطقه قرار گیرد. همچنین لازم است تمهیدات بیشتری برای ثبت تبخیر و تفرق واقعی و مؤلفه‌های مؤثر تبخیر به صورت مستقیم و میدانی از جمله نصب تستک‌های تبخیر و ایستگاه اندازه‌گیری رادیوی در مجاورت و سطح مخازن صورت پذیرد.

#### پیشنهادات

به کارگیری روش‌شناسی تحقیق، با تصاویر دارای وضوح مکانی بالا، که با توجه به نوع سنجنده‌های قابل دسترس، تصاویر ASTER و LANDSAT پیشنهاد می‌شود. با انجام این پیشنهاد، بررسی و تجدید نظر در مورد توزیع مکانی تبخیر نیز پیشنهاد می‌گردد.

علاوه بر روش‌شناسی این تحقیق در منطقه مطالعاتی انجام مدل‌های دیگر سنجش از دوری از جمله روش‌های مبتنی بر دمای دریاچه و مبتنی بر تابش خالص نیز مورد آزمایش قرار گیرد.

در مطالعات کاهش تبخیر با توجه به نتایج تحقیق آگاهی از توزیع مکانی تبخیر در سیستم مورد مطالعه می‌بایستی بررسی مد نظر قرار گیرد.

بررسی روش‌شناسی تحقیق برای دیگر فصل‌های سال و بررسی تاثیرات آب و هوایی بر توزیع مکانی مؤلفه تبخیر.

طراحی و توسعه روش‌شناسی تحقیق برای دریاچه‌های آب شور با انجام تصحیحات مربوط به تبخیر آب شور.

#### منابع

- سعادت خواه، ن.، سارنگ، ا.س.، تجریشی، م.، ابریشم چی، ا. ۱۳۸۰. برآورد تبخیر از مخازن چاه نیمه. مجله آب و فاضلاب، ۴۰: ۲۳-۱۲
- Abou El-Magd, I.H and Ali, E.M. 2012. Estimation of the evaporative losses from Lake Nasser, Egypt using optical satellite imagery. *International*

- (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. Hydrology and earth system sciences. 6.1: 85-100.
- Su,Z.B. 2002. A Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes from point to continental scale. Paper presented at the Spectra Workshop.
- Sun,Z., Wei ,B., Su,W., Shen,W., Wang,C., You,D and Liu,Z. 2011. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. Mathematical and Computer Modelling.54.3: 1086-1092.
- Timmermans,W.J., Kustas,W.P., Anderson,M.C and French,A.N. 2007. An intercomparison of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) and the two-source energy balance (TSEB) modeling schemes. Remote Sensing of Environment. 108.4: 369-384.
- Kustas,W.P., Choudhury,B.J., Moran,M.S., Reginato,R.J., Jackson,R.D., Gay,L.W and Weaver,H.L. 1989. Determination of sensible heat flux over sparse canopy using thermal infrared data. Agricultural and Forest Meteorology. 44.3: 197-216.
- Kustas,W.P., Prueger,J.H., Hatfield,J.L., Ramalingam,K and Hipps,L.E. 2000. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. Agricultural and Forest Meteorology. 103.3: 249-264.
- Liu,S., Sun,R., Sun,Z., Li,X and Liu,C. 2006. Evaluation of three complementary relationship approaches for evapotranspiration over the Yellow River basin. Hydrological processes, 20.11: 2361-3472.
- Shaltout,M and El Housry,T. 1997. Estimating the evaporation over Nasser Lake in the upper Egypt from Meteosat observations. Advances in Space Research. 19.3: 515-518.
- Su,Z. 1999. The Surface Energy Balance System

## Estimates of Evaporation from Surface Water Bodies with SEBAL Algorithm using Remote Sensing Techniques (Case Study: Chahnimeh's Fresh Water Reservoirs of Sistan)

H. Akbarzadeh M.S.<sup>1\*</sup>, P. Haghigatjou<sup>2</sup>, M.H. Bagheri<sup>3</sup>

Received: Apr.18, 2015

Accepted: Sep.02, 2015

### Abstract

Freshwater lakes are considered one of limited water resources that in recent decades are faced with many problems of quality and quantity. Proper management of these resources requires accurate information of component of the water budget. Evaporation as most unknown term of water budget, have a large share of water losses. To have precise information on the spatial and temporal distribution contribute to principles of qualitative and quantitative planning at water resources. Chahnimeh's artificial reservoirs are located in the east part of the country, with an area 141 Km<sup>2</sup> was selected as case study. In this research, evaporation rate were estimated by SEBAL model and using meteorological data and satellite images of MODIS. Pan method applied in the region was used as reference method. As a result, the mapping of evaporation by 25\*250 m spatial resolution was obtained. In point compare SEBAL model results with pan observed amount, the model correlation coefficient R, 0.74 and the error average percentage,  $\pm 14.5$  and RMSD is equal to 2.95 mm. The mean latent heat flux and evaporation in average daily rate for the 202th of Julian days of 2012 year from water surface are equal 308 W/m<sup>2</sup> and 13 mm per day, respectively.

**Keywords:** Surface energy balance, Evaporation spacial distribution, Chahnimeh reservoir SEBAL

1- Water Resource Engineering Graduate, Water Engineering Group, Water and Soil Department of Zabol

2- Assistant Professor, PhD in Hydrology and Water Resource, Water Engineering Group, Water and Soil Department of Zabol

3- MSc in Water Resources Engineering, Yazd Regional Water Company

(\*-Corresponding Author Email: Hadi3castle@gmail.com)