

## مقایسه الگوریتم سبال با مدل SWAP و روش های محاسباتی جهت تعیین تبخیر و تعرق

مصطفی یعقوب زاده<sup>۱\*</sup>، زهرا ایزدپناه<sup>۲</sup>، سعید برومند نسب<sup>۳</sup> و حسام سید کابلی<sup>۴</sup>

- ۱- نویسنده مسئول، دانش آموخته دکترای آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۲- استادیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۳- استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۴- استادیار گروه عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول.

تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۵

تاریخ دریافت: ۹۳/۹/۱۵

### چکیده

تعیین مقدار دقیق تبخیر و تعرق در اراضی تحت آبیاری برای برنامه ریزی تخصیص آب، بهینه سازی تولید محصول، مدیریت آبیاری و ارزیابی اثر تغییر کاربری روی راندمان آب ضروری است. بدین منظور در این تحقیق، تبخیر و تعرق با سه نوع روش مختلف سنجش از دور، مدل آگروهیدرولوژیکی و روش های محاسباتی برای مزرعه ذرت واقع در دشت نیشابور محاسبه گردید. الگوریتم سبال انرژی سطح برای زمین (سبال) و تصاویر سنجنده مودیس در طی دوران رشد، مدل آگروهیدرولوژیکی SWAP و روش های محاسباتی فائو پنمن مانتیث، هارگریوز سامانی و فائو بلانی کریدل روش های تعیین تبخیر و تعرق در این تحقیق می باشند. ضرایب همبستگی ۰/۶۷ تا ۰/۹۱ بین الگوریتم سبال با مدل SWAP و روش های محاسباتی نشان داد که الگوریتم سبال قابلیت بالایی در تخمین تبخیر و تعرق دارد. در بین روش های تعیین تبخیر و تعرق پتانسیل نیز فائو بلانی کریدل نتایج بهتری نسبت به دو روش پنمن مانتیث و هارگریوز سامانی ارائه نمود. همچنین این تحقیق مشخص کرد که می توان از الگوریتم سبال برای تعیین تبخیر و تعرق در مناطق با کمبود داده و برای ارزیابی روش های محاسباتی و مدل های هیدرولوژیکی استفاده نمود.

کلید واژه‌ها: تبخیر و تعرق، الگوریتم سبال، مدل SWAP، روش های محاسباتی، سنجش از دور.

## The Comparison of SEBAL Algorithm with SWAP Model and Computational Method to Determine Evapotranspiration

M. Yaghoobzadeh<sup>1\*</sup>, Z. Izadpanah<sup>2</sup>, S. Boromand- Nasab<sup>3</sup> and H. Seyed Kaboli<sup>4</sup>

- 1\* - PhD Student, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
- 2- Assistant Professor of Irrigation and Drainage, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
- 3- Professor of Irrigation and Drainage, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
- 4- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Jondishapur University of Dezfoul, Iran.

Received: 6 December 2014

Accepted: 26 May 2015

### Abstract

Accurate quantification of ET in irrigated agricultural lands is crucial for planning for water allocation, optimizing crop production irrigation management, evaluating the effects of changing land use on water yields. For this purpose in the research, evapotranspiration calculated by three kind of different methods remote sensing, agro-hydrological model and computational method for maize field located in Neyshabour plain. Methods of evapotranspiration determination consist of Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) algorithm and Modis product satellite in the long of during growth, SWAP agro-hydrological and computational methods of FAO Penman-Monteith and Hargreaves-Samani and FAO Blany Criddle. Correlation coefficient 0.67 to 0.91 between SEBAL algorithm with SWAP model and computational method showed high potential for SEBAL algorithms in the evapotranspiration estimation. In between methods for

potential evapotranspiration determination, FAO Blany Criddle method has better result in comparison with Penman-Monteith and Hargreaves-Samani methods. Also, this study found that the SEBAL algorithm could be used to determine evapotranspiration in areas with shortages of data and for evaluation of computational methods and hydrological models.

**Keywords:** Evapotranspiration, SEBAL algorithm, SWAP model, Computational methods, Remote sensing.

گرفتند ایرماک و بابورائو<sup>۳</sup> (۲۰۰۹)، میناکاپیلی و همکاران<sup>۴</sup> در مطالعه ای در راستای اهداف این تحقیق از الگوریتم های سنجش از دور سبال و TSEB برای تخمین تبخیر و تعرق واقعی استفاده نموده و برای ارزیابی آن از مدل SWAP صحت سنجی شده استفاده نمودند. پالادینو و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۳)، سینگ و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۰) از الگوریتم SEBS و تصاویر ماهواره NOAA AVHRR برای تعیین تبخیر و تعرق واقعی و مقایسه آن با نتایج SWAP استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند می توان با دقت قابل قبول از مدل SWAP برای شبیه سازی نیاز آبی گیاهان و رطوبت خاک استفاده کرد (ترینیک و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۱۳). چارونایرونینگیوس و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۱) به کمک تبخیر و تعرق و شاخص سطح برگ (LAI) بدست آمده از سبال و به روش مهندسی معکوس، پارامترهای هیدرولیکی خاک ورودی به مدل SWAP را بهینه کردند تا بدین وسیله اختلاف شاخص سطح برگ و رطوبت خاک اندازه گیری شده در مزرعه با مقادیر شبیه سازی شده با مدل SWAP به حداقل برسد. نتایج نشان دهنده توافق خوب بین تبخیر و تعرق و شاخص سطح برگ حاصل از سبال و رطوبت حاصل از SWAP با مقادیر اندازه گیری شده در اعماق ۲۸ سانتی متر و ۶۰ سانتی متر دارد. پالادینو و همکاران (۲۰۱۳) نیز از مدل SWAP و الگوریتم TSEB و روش کواریانس گردابی برای مشخص شدن تنش آب در محصولات باغی استفاده نمودند (پاتل و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۰۶). در داخل کشور نیز محمدی و همکاران (۱۳۹۳) برای واسنجی مدل SWAP از ۱۲ تصویر ماهواره لندست ۷ ETM+ در طی فصل رشد گیاه نیشکر استفاده نمودند و تبخیر و تعرق به دست آمده را برای برنامه ریزی آبیاری به کار بردند.

همچنین به طور معمول در مناطق با کمبود داده برای ارزیابی الگوریتم های سنجش از دور از روش های محاسباتی استفاده می شود که در تحقیقات متعدد استفاده از این مدل های محاسباتی در آن مناطق به تایید رسیده است (آلن و همکاران<sup>۱۰</sup>، ۲۰۰۲). قمرنیا و رضوانی (۱۳۹۳) نتایج الگوریتم سبال در دشت

## مقدمه

تبخیر و تعرق به عنوان فاکتور کلیدی در تعیین بیلان آب و محاسبه مقدار آب مورد نیاز برای مصرف آبیاری از اهمیت قابل توجهی در مطالعات آبیاری، منابع آب و محیط زیست برخوردار می باشد. از این رو مدل ها و روش های مختلفی برای تعیین تبخیر و تعرق ارائه شده اند که بعضی از این روش ها مانند لایسیمترهای وزنی یا نسبت باون به طور مستقیم در داخل مزرعه تبخیر و تعرق واقعی را برآورد می کنند که استفاده از این وسایل دقیق اندازه گیری پرهزینه و احتیاج به زمان زیادی دارد. مدل های هیدرولوژیکی مانند مدل SWAP نیز شبیه سازی تبخیر و تعرق را به کمک اطلاعات زراعی و هواشناسی و براساس معادله بیلان آب انجام می دهند (دروگزر و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۰). روش های محاسباتی مانند پنمن مانیتث نیز از راه های تعیین تبخیر و تعرق می باشند که در این روش ها، ابتدا می توان تبخیر و تعرق پتانسیل را محاسبه و در مرحله بعد به کمک ضرایب گیاهی، تبخیر و تعرق گیاه را تعیین کرد. ولی همه این روش ها در یک نقطه و یا حداکثر در سطح یک مزرعه، تبخیر و تعرق را برآورد می کنند و امکان استفاده از این روش ها در نقاط کوهستانی و در مکان هایی که امکان اندازه گیری دقیق تبخیر و تعرق مورد نیاز می باشد، وجود ندارد. با گسترش استفاده از سنجش از دور و به کاربردن تصاویر ماهواره ای در مطالعات مختلف منابع آب، امکان تعیین تبخیر و تعرق نیز به وجود آمد که الگوریتم های مختلفی به مرور ارائه شد که تبخیر و تعرق واقعی را در مقیاس مکانی و زمانی پهنه بندی می کنند. الگوریتم سبال یکی از مدل هایی است که در نقاط مختلف بکار برده شده و به نتایج رضایت بخشی منجر شده است تا حدی که بعضی از محققان به دلایل نبود داده های اندازه گیری در مزارع برای واسنجی کردن مدل از تصاویر ماهواره ای و الگوریتم سبال به منظور واسنجی و صحت سنجی مدل سبال استفاده نمودند (دروگزر و باستیانس<sup>۲</sup>، ۲۰۰۲). دروگزر و همکاران (۲۰۱۰) به منظور تعیین نیاز آبیاری، تبخیر و تعرق واقعی را با مدل SWAP و ابزار بهینه ساز PEST محاسبه نموده و برای ارزیابی آن از الگوریتم SEBAL استفاده نمودند. آنها برای این منظور از شیوه مهندسی معکوس و شیوه رو به جلو-عقب مانده استفاده نمودند و صحت ۹۰ درصد نیاز آبیاری را نتیجه

3 - Irmak and Baburao

4- Minacapilli *et al.*

5 - Palladino *et al.*

6-Singh *et al.*

7 - Terink *et al.*

8- Charoenhirunyingyos *et al.*

9 - Patel *et al.*

10 - Allen *et al.*

1 - Droogers *et al*

2- Droogers and Bastiaanssen

محصول ذرت تابستانه استفاده شده است. به دین منظور و برای تعیین تبخیر و تعرق واقعی از ۱۳ تصویر سنجنده مودیس ماهواره ترا و مدل SWAP برای شبیه سازی رطوبت و تبخیر و تعرق استفاده شده است. تصاویر مودیس برای یک دوره رشد محصول ذرت و از بین روزهایی انتخاب شده است که هیچ گونه ابری منطقه را پوشانده نباشد. روزهای ژوئیه از تصاویر ماهواره ای در طی دوره رشد ذرت انتخاب شده است که به همراه فاصله نسبت به روز اول کشت در جدول (۱) نشان داده شده است. روزهای ژوئیه به روزهایی از سال میلادی گفته می شود که از ابتدای سال شروع شده و بدون توجه به ماه تا پایان سال میلادی شماره گذاری می شود. دوره رشد گیاه ذرت این تحقیق، یک دوره ۱۱۰ روزه است که از ۲۹ ژوئن ۲۰۰۸ (۸ تیرماه ۱۳۸۷) شروع شده و تا ۱۶ اکتبر ۲۰۰۸ (۲۴ مهرماه ۱۳۸۷) ادامه می یابد. مزرعه انتخابی ذرت در روستای فاروب شهرستان نیشابور انتخاب شده است و داده های رطوبت خاک به کمک رطوبت سنج TDR در سه تکرار در طی رشد محصول (قبل و بعد هر نوبت آبیاری) اندازه گیری شده است. از این داده های رطوبت در کالیبراسیون مدل SWAP و برای شبیه سازی دقیق تر تبخیر و تعرق واقعی و ارزیابی مدل سبال استفاده شده است. نرم افزارهای ARC GIS 10.2 برای تهیه نقشه خروجی، ERDAS 9.1 برای ویرایش تصاویر ماهواره ای و همچنین ساختن مدول هایی برای محاسبه پارامترهای الگوریتم سبال استفاده شده است. همچنین نرم افزار Ref ET تبخیر و تعرق ساعتی و روزانه را برای روش های محاسباتی محاسبه می نماید.

میان دربند واقع در غرب ایران را با روش فائو پنمن مانیتث مقایسه کرده و همبستگی ۰/۸۴ بین نتایج دو مدل را به دست آوردند.

در این تحقیق نیز سعی شد تا از سه نوع مختلف روش تبخیر و تعرق استفاده و بین نتایج این روش ها ارزیابی صورت گیرد و لزوم استفاده از تصاویر ماهواره ای و سنجش از دور برای تعیین تبخیر و تعرق در مناطق با کمبود داده و یا مناطق وسیع تایید شود. مدل کالیبره شده SWAP به عنوان مرجع و روش های محاسباتی فائو پنمن-مانیتث، هارگریوز-سامانی و فائولانی کریدل، درستی کارایی توزیع زمانی و مکانی تبخیر و تعرق با الگوریتم سبال را محقق می نمایند.

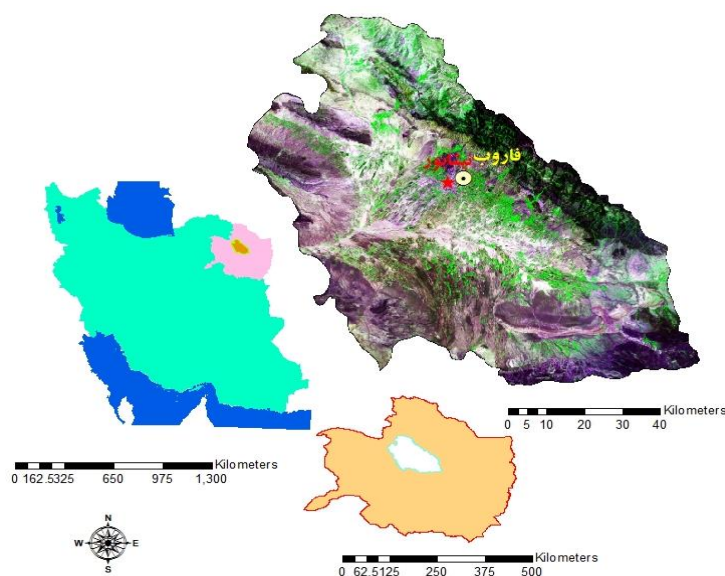
## مواد و روش ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد تحقیق در این پژوهش، دشت نیشابور می باشد که از نظر موقعیت جغرافیایی در حد فاصل  $۵۸^{\circ} ۱۳'$  تا  $۵۹^{\circ} ۳۰'$  طول شرقی و  $۳۵^{\circ} ۴۰'$  تا  $۳۶^{\circ} ۳۹'$  عرض شمالی قرار دارد و وسعت کل آن ۷۳۰۰ کیلومتر مربع است. آب و هوای منطقه نیمه خشک و خشک، متوسط دمای آن  $۱۲^{\circ}$  درجه سانتی گراد و میزان بارندگی سالیانه آن بطور متوسط برای کل دشت ۲۹۲ میلی متر می باشد (شکل ۱).

### داده های مورد استفاده

در این مطالعه از داده های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک نیشابور و داده های رطوبت اندازه گیری شده در مزرعه برای



شکل ۱- تصویر لندست منطقه مورد مطالعه به همراه موقعیت آن در استان و کشور

## جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره ای مورد استفاده در تحقیق

شماره تصویر	روز ژولوسی	ساعت اخذ داده بر اساس زمان گرینویچ	تاریخ میلادی	تاریخ شمسی	روز از شروع فصل رشد ذرت در منطقه
۱	۱۸۱	صبح ۷:۳۰	30-Jun-2008	۹ تیر ۱۳۸۷	۱
۲	۱۸۵	صبح ۷:۰۵	04-Jul-2008	۱۳ تیر ۱۳۸۷	۵
۳	۱۸۸	صبح ۷:۳۵	07-Jul-2008	۱۶ تیر ۱۳۸۷	۸
۴	۱۹۴	صبح ۷:۰۰	13-Jul-2008	۲۲ تیر ۱۳۸۷	۱۴
۵	۱۹۷	صبح ۷:۳۰	16-Jul-2008	۲۵ تیر ۱۳۸۷	۱۷
۶	۱۹۸	صبح ۶:۳۵	17-Jul-2008	۲۶ تیر ۱۳۸۷	۱۸
۷	۲۰۰	صبح ۶:۲۰	19-Jul-2008	۲۸ تیر ۱۳۸۷	۲۰
۸	۲۰۵	صبح ۶:۴۰	24-Jul-2008	۲ مرداد ۱۳۸۷	۲۵
۹	۲۱۲	صبح ۶:۴۵	31-Jul-2008	۹ مرداد ۱۳۸۷	۳۲
۱۰	۲۲۸	صبح ۶:۴۵	16-Aug-2008	۲۵ مرداد ۱۳۸۷	۴۸
۱۱	۲۴۰	صبح ۷:۱۰	28-Aug-2008	۶ شهریور ۱۳۸۷	۶۰
۱۲	۲۶۴	صبح ۶:۲۰	21-Sep-2008	۳۰ شهریور ۱۳۸۷	۸۴
۱۳	۲۷۷	صبح ۷:۳۰	04-Oct-2008	۱۲ مهر ۱۳۸۷	۹۷

## مدل SWAP

مدل SWAP یک مدل آگرو هیدرولوژیکی بسیار جامع برای انتقال آب، گرما و املاح در محیط اشباع و غیر اشباع است و شامل زیرمدل های فیزیکی برای شبیه سازی عملیات آبیاری و رشد گیاه و بیلان آبی می باشد (وان دم و همکاران<sup>۲</sup>، ۱۹۹۷). شرایط مرزی بالا توسط تبخیر و تعرق، آبیاری و بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس داده های هواشناسی روزانه و با استفاده از معادله فائو پنمن ماتیتث محاسبه می گردد. بررسی حرکت آب براساس معادله ریچاردز<sup>۳</sup> صورت می گیرد که از روش عددی تفاضل محدود و اعمال شرایط مرزی و توابع هیدرولیکی خاک استفاده می گردد. توابع هیدرولیکی خاک به عنوان روابط بین هدایت هیدرولیکی، رطوبت خاک و بار فشاری آب خاک تعریف می شوند. بخش اصلی مدل شبیه سازی جریان عمودی آب در منطقه اشباع-غیراشباع است که می تواند بوسیله معادله شناخته شده ریچاردز توصیف شود (ورما و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۳).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S(h) \quad (1)$$

در این رابطه  $\theta$ : مقدار رطوبت حجمی ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )،  $t$ : زمان (روز)،  $h$ : ارتفاع فشار آب خاک (cm)،  $z$ : افزایش عمق نسبت به سطح زمین (cm)،  $K(\theta)$ : هدایت هیدرولیکی ( $\text{cm}/\text{day}$ ) و  $S$ : نسبت آب جذب شده توسط ریشه گیاه ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3/\text{day}$ ) می باشد. در این تحقیق مدل SWAP از مهندسی معکوس برای تعیین تبخیر و تعرق واقعی استفاده می کند، بدین

## روش تحقیق

در این تحقیق از پنج روش و یا بهتر می توان گفت سه نوع مدل مختلف برای تعیین تبخیر و تعرق استفاده شد که از بین این روش ها الگوریتم سبال و مدل SWAP به طور مستقیم تبخیر و تعرق واقعی را برای کل دشت نیشابور محاسبه نمودند. مدل SWAP به کمک داده های هواشناسی و زراعی، تبخیر و تعرق واقعی و رطوبت را برای مزرعه ذرت شبیه سازی می کند. تفاوت این پنج روش در این است که فقط الگوریتم سبال می تواند تبخیر و تعرق واقعی را برای یک منطقه وسیع مانند یک دشت پهنه بندی کند و بقیه روش ها در حد یک نقطه یا مزرعه، تبخیر و تعرق را شبیه سازی و یا محاسبه می نمایند. رطوبت خاک در طی دوران رشد ذرت به کمک رطوبت سنج قرار گرفته شده در خاک در بازه زمانی های مختلف قرائت شده و برای واسنجی و صحت سنجی داده های رطوبت مدل SWAP مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب بعد از صحت سنجی مدل SWAP و با واسنجی رطوبت خاک براساس معادله بیلان آب می توان به نتایج مدل SWAP و تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی به دست آمده، بیشتر اعتماد ورزید. تبخیر و تعرق پتانسیل به کمک نرم افزار Ref ET برای سه روش پنمن ماتیتث، هارگریوز سامانی و فائو بلانی کریدل که کاربرد فراوانی در مناطق خشک و نیمه خشک دارند محاسبه شد و به کمک ضرایب رشد گیاهی ذرت به تبخیر و تعرق گیاه تبدیل گردید (آن و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۲). مقایسه الگوریتم سبال با روش های دیگر تعیین تبخیر و تعرق در روزهای ژولوسی طی دوره رشد ذرت انجام می گیرد.

2 - Van Dam et al.

3- Richards

4- Verma et al.

1- Alen et al.

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} \times [0.0032 \times \alpha + 0.0062 \times \alpha^2] \times [1 - 0.978 \times NDVI^4] \quad (4)$$

در این رابطه، NDVI: شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی،  $T_s$ : دمای سطحی بر حسب درجه سانتی گراد و  $\alpha$ : آلیدوی سطحی می‌باشد.

محاسبه شار حرارتی از سمت زمین به طرف هوای مجاور بر اساس پارامترهای متعددی صورت می‌گیرد که نیاز به استفاده از اطلاعات زمینی و داده‌های هواشناسی منطقه می‌باشد. این مرحله از الگوریتم سبال سخت‌ترین و در عین حال حساس‌ترین بخش نیز می‌باشد. حساس بودن و لزوم دقت بیشتر در محاسبات بیشتر به تعیین پیکسل سرد و گرم بر می‌گردد. با تعیین این دو پیکسل و بعد از یک سری معادله‌های رفت و برگشتی شار گرمای محسوس پیش‌بینی می‌شود. شار حرارتی محسوس هوا ( $H$ ) با توجه به معادله زیر قابل پیش‌بینی خواهد بود:

$$H = \frac{\rho_{air} \times C_{air} \times dT}{r_{ah}} \quad (5)$$

در این معادله نیز  $\rho_{air}$ : چگالی هوا (کیلو گرم بر متر مکعب)،  $C_{air}$ : گرمای ویژه هوا (ژول بر کیلوگرم بر کلونین)،  $dT$ : اختلاف دمای بین دو ارتفاع  $Z_1$  و  $Z_2$  (کلونین) و  $r_{ah}$ : مقاومت آیرودینامیکی برای انتقال گرما (ثانیه بر متر) می‌باشد.

شار گرمای نهان ( $\lambda ET$ )، میزان هدر رفت گرما از سطح به علت فرآیند تبخیر و تعرق می‌باشد که با استفاده از معادله (۲) به دست می‌آید. از آنجا که مقادیر شار تابش خالص ( $R_n$ )، شار گرمای محسوس ( $G$ ) و شار گرمای خاک ( $H$ ) که تاکنون به دست آمده، مقادیر لحظه‌ای و برای زمان گذر ماهواره می‌باشند، مقدار شار گرمای نهان نیز به صورت لحظه‌ای است. شار گرمای نهان، مقداری است که توسط تصاویر ماهواره‌ای به دست می‌آید. بنابراین مقدار عددی  $\lambda$  باید محاسبه شود تا با تقسیم عدد مربوط در هر پیکسل مقدار  $ET$  لحظه‌ای به دست‌آید. مقدار تبخیر و تعرق واقعی در لحظه گذر ماهواره تبخیر و تعرق لحظه‌ای ( $ET_{inst}$ ) بر حسب میلی‌متر به صورت زیر به دست می‌آید:

$$ET_{inst} = 3600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (6)$$

$\lambda$ : در این رابطه گرمای نهان تبخیر بر حسب ژول بر کیلوگرم و  $3600$ : برای تبدیل زمان می‌باشد. مقدار  $\lambda$  از معادله زیر قابل محاسبه است:

$$\lambda = [2.501 - 0.00236(T_s - 273)] \times 10^6 \quad (7)$$

طریق که ابتدا رطوبت خاک با مدل SWAP شبیه‌سازی و سپس با استفاده از ۷۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک، مدل SWAP واسنجی و با استفاده از ۳۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده، صحت‌سنجی داده‌ها انجام می‌شود. در مرحله بعد از تبخیر و تعرق به دست آمده از مدل SWAP به روش مهندسی معکوس برای ارزیابی نتایج مدل سبال استفاده گردید.

### الگوریتم توازن انرژی سطحی برای زمین (سبال)

الگوریتم سبال در اکثر نقاط دنیا با اقلیم‌های مختلف، به منظور برآورد تبخیر و تعرق و سایر شارهای گرمایی در سطح، با استفاده از داده‌های سنسجش از دور مورد استفاده قرار گرفته است. روش سبال اولین بار به منظور برآورد تبخیر تعرق در مناطق هموار و نواحی کشاورزی توسط باستیانس در سال ۱۹۹۸ میلادی ارائه شد (باستیانس و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۹۹۸) که البته به مرور و برای سازگاردن با مناطق با آب و هوای مختلف و تصاویر ماهواره‌ای متنوع، تغییراتی در آن اتفاق افتاد (باستیانس و همکاران، ۲۰۰۵). مقدار لحظه‌ای تبخیر و تعرق ( $\lambda ET$ ) برای زمان گذر ماهواره به کمک مقادیر شار تابش خالص ( $R_n$ )، شار گرمای محسوس ( $G$ ) و شار گرمای خاک ( $H$ ) برای هر پیکسل با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (2)$$

شار تابش خالص در سطح زمین با استفاده از تمامی شارهای تابشی ورودی و خروجی از سطح به دست می‌آید. میزان تابش خالص در سطح زمین و اجزای آن از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$R_n = (1 - \alpha) R_{s\downarrow} + R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{l\downarrow} \quad (3)$$

که در این معادله  $\alpha$ : آلیدوی سطحی،  $R_{s\downarrow}$ : تابش موج کوتاه ورودی (۰/۳ تا ۳ میکرومتر) بر حسب وات بر مترمربع،  $R_{l\downarrow}$ : تابش موج بلند ورودی (۳ تا ۱۰۰ میکرومتر) بر حسب وات بر متر مربع،  $R_{l\uparrow}$ : تابش موج بلند خروجی بر حسب وات بر مترمربع،  $\epsilon_0$ : گسیلندگی سطحی عریض باند می‌باشد.

شار گرمای خاک پارامتر دومی می‌باشد که امکان اندازه‌گیری آن به طور مستقیم با باندهای تصاویر ماهواره‌ای وجود ندارد ولی مطالعات نشان داد که بین پارامترهایی مثل شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)، دمای سطح زمین ( $T_s$ ) و آلیدو با نسبت  $G/R_n$  رابطه‌ای وجود دارد. بنابراین باستیانس نسبت شار گرمای محسوس ( $G$ ) به شار تابش خالص ( $R_n$ ) را برای نیمه روز با استفاده از معادله تجربی زیر در سال ۲۰۰۰ ارائه کرد (باستیانس، ۲۰۰۰):

یعقوب زاده و همکاران: مقایسه الگوریتم سیال با مدل SWAP و روش های...

در این رابطه  $ET_0$ : تبخیر و تعرق گیاه مرجع بر حسب میلی متر در روز،  $T_{max}$ ،  $T_{min}$  و  $T_{mean}$ : حداکثر، حداقل و میانگین دمای روزانه و  $Ra$ : حداکثر ممکن تابش خورشید به سطح زمین با توجه به عرض جغرافیایی می باشد. یکی از قدیمی ترین روش های برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل، روش بلانی کریدل است. فرمول زیر برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل با این روش ارائه شده است (علیزاده، ۱۳۸۵):

$$ET_0 = a + b[p(0.46T + 8.13)] \quad (12)$$

در این رابطه نیز  $\rho$ : ضریب مربوط به طول روز یا درصد سالانه تابش آفتاب در ماه که به صورت روزانه توصیف می شود،  $T$ : متوسط ماهانه درجه حرارت بر حسب درجه سانتی گراد و  $a$ ،  $b$ : ضرایب اقلیمی که به حداقل رطوبت نسبی هوا، نسبت ساعات واقعی آفتاب به حداکثر ساعات آفتابی و سرعت باد در روز دارد. رطوبت نسبی هوا توسط دماسنج های تر و خشک و ساعات واقعی آفتاب در طول روز توسط آفتاب نگار اندازه گیری می شود.

#### شاخص های ارزیابی

به منظور ارزیابی و دقت روش ها در این تحقیق، سه معیار ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE) و میانگین خطای مطلق<sup>۲</sup> (MAE)، تفاضل نسبی<sup>۳</sup> (RD)، قدرمطلق تفاضل مطلق<sup>۴</sup> (AD) و ضریب تبیین<sup>۲</sup> (R<sup>2</sup>) مورد استفاده قرار گرفت:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n}} \quad (13)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_m|}{n} \quad (14)$$

$$RD = \left| \frac{x_i - x_m}{x_m} \right| \quad (15)$$

$$AD = x_i - x_m \quad (16)$$

در این روابط،  $x_i$  و  $x_m$  مقادیر بدست آمده از مدل سیال و روش های پنمن مانتیت و هارگریوز-سامانی و  $n$  تعداد کل داده ها است. هرچه مقادیر شاخص های آماری به صفر نزدیک تر

همچنین می توان تبخیر و تعرق روزانه را می توان با استفاده از کسر تبخیر ( $ET_r F$ ) و تبخیر و تعرق گیاه مرجع ( $ET_r$ ) محاسبه کرد. مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع براساس داده های ایستگاه هواشناسی و با استفاده از روش پنمن مانتیت استاندارد محاسبه می گردد:

$$ET_r F = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (8)$$

$ET_r F$  مشابه ضریب گیاهی (Kc) بوده و مقدار آن عموماً بین صفر و یک متغیر است به طوری که برای پیکسل کاملاً خشک مقدار کسر تبخیر برابر صفر و در پیکسل سرد برابر یک می باشد. مقادیر منفی برای  $ET_r F$  به علت خطاهای سیستماتیک که توسط فرضیه های مختلف سیال وارد می شوند، رخ می دهد (الن و همکاران، ۲۰۰۲). در روش سیال جهت تبدیل مقادیر لحظه ای تبخیر و تعرق به مقادیر روزانه فرض می شود مقدار کسر تبخیر لحظه ای محاسبه شده از طریق معادله (۸) در طول ۲۴ ساعت شبانه روز تقریباً ثابت است. بنابراین می توان مقدار روزانه تبخیر و تعرق واقعی را با استفاده از کسر تبخیر و تبخیر و تعرق مرجع ۲۴ ساعته در روز تصویر ( $ET_{r-24}$ ) محاسبه نمود:

$$ET_{24} = ET_r F \times ET_{r-24} \quad (9)$$

روش پنمن مانتیت به عنوان روش استاندارد برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از داده های هواشناسی بیان می شود. همچنین روش پنمن مانتیت، تنها روش برآورد است که برای اکثر کشورهای با اقلیم خشک و نیمه خشک از جمله ایران پیشنهاد شده است و معادله آن بصورت زیر می باشد (علیزاده، ۱۳۸۵):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \times u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (10)$$

در این رابطه،  $T$ : میانگین دمای روزانه هوا بر حسب درجه سانتی گراد،  $e_s$ : فشار بخار اشباع بر حسب کیلوژول،  $e_a$ : فشار بخار واقعی بر حسب کیلوژول،  $e_s - e_a$ : کمبود فشار بخار اشباع،  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار بر حسب کیلوپاسکال بر درجه سانتی گراد و  $\gamma$ : ضریب ثابت سایکرومتری بر حسب کیلو پاسکال بر درجه سانتی گراد می باشد. روش هارگریوز-سامانی نیز یکی دیگر از روش های محاسبه تبخیر و تعرق مرجع می باشد که در سال ۱۹۸۵ میلادی توسط هارگریوز-سامانی ارائه شد (علیزاده، ۱۳۸۵):

$$ET_o = 0.0023(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} \times Ra \quad (11)$$

- 1- Root Mean Square Error
- 2- Mean Absolute Error
- 3- Relative difference
- 4- Absolut difference

کشت بتدریج زیاد می شود. شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) در روزهای آخر کشت به دلیل نزدیک شدن به زمان برداشت و زرد شدن گندم، مقدار آن کم می شود و از حدود ۰/۳۳۱ در اوج مرحله توسعه گیاهی به حدود ۰/۱۶۷ می رسد. با به پایان رسیدن فصل گرم تابستان و رسیدن به روزهای سردتر پاییز از مقادیر شار گرمای خاک (G) و تابش خالص (Rn) کاسته می شود.

روزهای ژولیوسی انتخابی در این تحقیق از روز اول تا روز ۹۷ بعد از کشت متغیر هستند. همان طور که در نقشه های مربوط به هر یک از روزها نیز مشخص می باشد در مناطق کوهستانی دارای دمای سطحی پایین که حاشیه غربی دشت را شامل می شوند و مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم تر که این مراتع نیز در قسمت غرب تا جنوب دشت گسترده شده اند، تبخیر و تعرق واقعی از بقیه نقاط بیشتر می باشد. در بین تصاویر ماهواره ای، تصویر روز ۲۰۰ ژولیوسی رفتار مشابه با بقیه روزها را از خود نشان نمی دهد که این ممکن است به دلیل داشتن خطاهای تصویر ماهواره در این روز و همچنین اشتباه در یکی از فرآیندهای محاسبه الگوریتم سبال اتفاق افتاده باشد که سبب شده در قسمت های جنوبی تبخیر و تعرق بیشتر از واقعیت برآورد شود. به دلیل اینکه الگوریتم سبال نقشه توزیع مکانی تبخیر و تعرق را نشان می دهد برای مقایسه و ارزیابی این الگوریتم با روش های دیگر تعیین تبخیر و تعرق از یک نقطه با موقعیت مکانی مشخص (مزرعه ذرت روستای فاروب) استفاده شد شکل (۲).

باشند، به این معناست که مقادیر به دست آمده از سبال از میزان خطای کمتری برخوردارند.

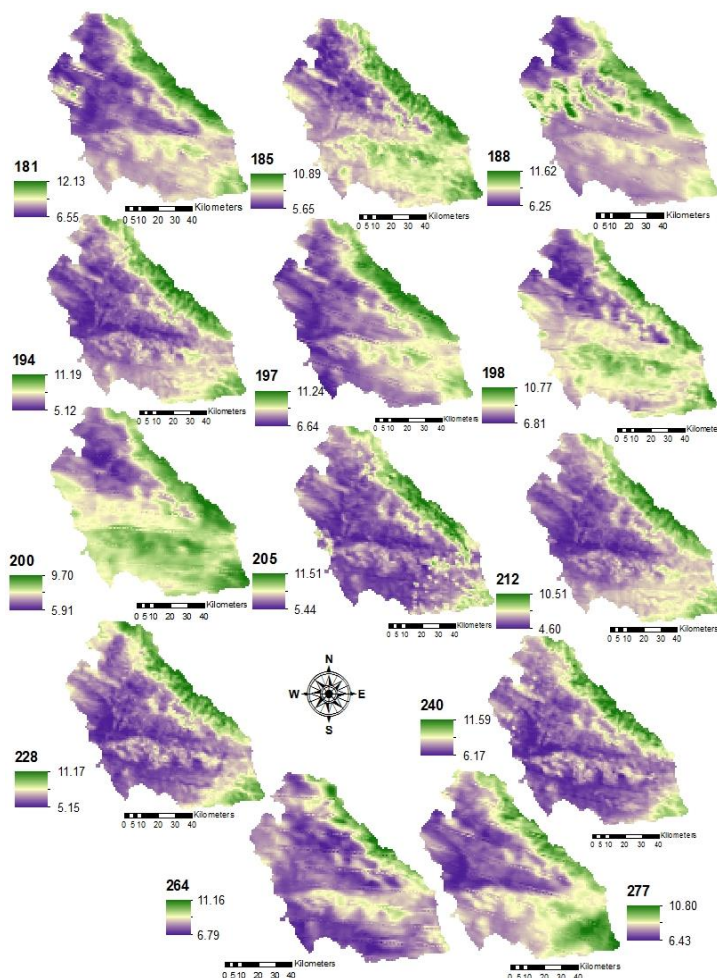
### نتایج و بحث

همان طور که بیان شد الگوریتم سبال از بخش های متفاوتی تشکیل شده است که هر کدام از این بخش ها بر روی بخش دیگر تاثیرگذار می باشد. نتایج به دست آمده از پارامترهای سبال در جدول (۲) مشخص می کند بعضی از پارامترهای الگوریتم سبال رفتار مخالف با یکدیگر از خود نشان می دهند مانند دمای سطحی زمین و شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) که در تحقیقات ثنائی نژاد و همکاران (۱۳۹۰) نیز رفتار مخالف این دو پارامتر با هم به اثبات رسیده است (ثنائیی نژاد و همکاران ۱۳۹۰). با توجه به جدول می توان مشاهده کرد در هر روز ژولیوسی نسبت به روز دیگر که دمای سطحی زمین افزایش پیدا کرده است، شاخص پوشش گیاهی عدد با مقدار کمتری را نشان می دهد. همچنین پارامترهای دمای سطحی زمین (Ts)، شار گرمای خاک (G) و شار گرمای محسوس (H) رفتار همسو با یکدیگر و تشعشع خالص (RN) رفتار متقابل با این پارامترها را نشان می دهد. نتایج مدل سبال نشان می دهد که در روزهای اول کشت که در فصل پاییز و زمستان واقع است، دمای سطح زمین (Ts) پایین و درحد ۲۹۰ درجه کلوین هست و در روزهای آخر کشت به مقدار بالای ۳۱۰ درجه می رسد. شاخص پوشش گیاهی NDVI و شار گرمای خاک (G) تابش خالص (Rn) و شار گرمای محسوس (H) نیز از روز اول کشت به تدریج کم می شود و در فصل زمستان به کمترین مقدار خود می رسند و در روزهای آخر

جدول ۲- نتایج به دست آمده از الگوریتم سبال در مزرعه ذرت

Ts ( $^{\circ}\text{K}$ )	Rn ( $\text{w}/\text{m}^2$ )	NDVI	H ( $\text{w}/\text{m}^2$ )	G ( $\text{w}/\text{m}^2$ )	ET ( $\text{mm}/\text{day}$ )	روز ژولیوسی
۳۱۸/۹۷	۷۵۸/۱۸	۰/۱۴۶	۱۳۶/۵۲	۱۷۸/۴۷	۴/۲۴	۱۸۱
۳۲۳/۲۶	۷۱۰/۱۶	۰/۰۹۵	۱۴۱/۸۹	۱۸۴/۱۱	۴/۲۶۴	۱۸۵
۳۱۰/۸۶	۷۰۷/۲۵	۰/۱۲۰	۱۲۹/۸۲	۱۴۳/۳۹	۴/۵۳۶	۱۸۸
۳۲۵/۹۷	۷۰۴/۰۱	۰/۱۱۵	۱۲۳/۰۸	۱۹۵/۰۱	۶/۹۵	۱۹۴
۳۲۱/۱۱	۷۴۰/۶۱	۰/۱۱۵	۱۲۱/۹۸	۱۸۳/۳۰	۶/۱۳۶	۱۹۷
۳۲۱/۴۷	۶۷۶/۴۷	۰/۰۸۷	۶۵/۰۱	۱۷۵/۰۴	۷/۱۲۴	۱۹۸
۳۱۸/۰۳	۶۸۳/۰۶	۰/۰۹۷	۱۲۸/۳۴	۱۶۴/۹۲	۶/۲۵۴	۲۰۰
۳۲۵/۰۸	۷۰۴/۹۴	۰/۰۸۹	۱۰۵/۷۵	۱۸۹/۸	۶/۱۰۵	۲۰۵
۳۲۵/۱۴	۶۳۶/۹	۰/۱۰۹	۸۳/۸۷	۱۷۴/۴	۶/۰۰	۲۱۲
۳۲۲/۷۰	۷۱۰/۱۲	۰/۰۷۹	۱۳۰/۲۴	۱۸۲/۲۳	۹/۰۷۵	۲۲۸
۳۲۳/۳۸	۶۹۷/۳۰	۰/۰۹۵	۹۹/۵۴	۱۸۶/۲۲	۹/۱۵۲	۲۴۰
۳۱۳/۹۶	۶۳۸/۴۸	۰/۰۹۷	۹۲/۱۲	۱۳۲/۲۳	۸/۶۴۱۵	۲۶۴
۳۱۰/۸۸	۶۲۴/۱۵	۰/۰۹۷	۱۰۹/۲۸	۱۱۴/۵۶	۶/۰۵۷	۲۷۷

یعقوب زاده و همکاران: مقایسه الگوریتم سیال با مدل SWAP و روش های...



شکل ۲- نقشه تبخیر و تعرق واقعی برای روزهای ژولیوسی فصل کشت ذرت در دشت نیشاپور

برای اینکه بتوان در مجموع روزهای ژولیوسی بین مدل سیال با سایر روش ها مقایسه ای انجام گیرد از شاخص های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، و ضریب تبیین ( $R^2$ ) استفاده شده است. مقادیر این شاخص ها به همراه میانگین تفاضل نسبی که از جدول (۳) به دست می آید، در جدول (۴) نشان داده شده است. مقادیر RMSE برابر ۰/۹۴۷ و MAE برابر ۰/۲۲ بین مدل سیال و SWAP و مقادیر RMSE و MAE در حدود ۱ و کمتر از آن در مقایسه سیال با مدل های محاسباتی تعیین تبخیر و تعرق، هماهنگی و ارتباط نزدیک نتایج مدل سیال با چهار روش دیگر تعیین تبخیر و تعرق بخصوص مدل SWAP را نشان می دهد. همچنین هماهنگی ضریب تبیین ( $R^2$ ) بالای ۰/۹۱ بین سیال با روش فائو بلانی کریدل، دقت بیشتر نتایج این روش را نسبت به دو روش دیگر تعیین تبخیر و تعرق پتانسیل نشان می دهد. سالاریان و همکاران (۱۳۹۳) نیز روش بلانی کریدل را مناسب ترین روش محاسباتی برای مناطق با داده های محدود در ماه های گرم و سرد سال دانستند که می تواند جایگزین روش استاندارد مرجع پنمن مانیتث در مناطق خشک و نیمه خشک شود.

جدول (۳) به مقایسه نتایج مدل سیال با چهار روش دیگر به خصوص نتایج حاصل از مدل SWAP پرداخته و تفاضل مطلق و تفاضل نسبی برای هر یک از روزهای ژولیوسی محاسبه شده است. همان طور که در جدول نشان داده شده است وجود اختلاف کم (تفاضل نسبی کمتر از ۰/۲۰۳) بین نتایج سیال با مدل SWAP نشان می دهد که تطابق خوبی بین نتایج سیال و مدل SWAP وجود دارد و می توان به درستی نتایج سیال اطمینان نمود. در مورد مقایسه مدل سیال با سه روش محاسباتی می توان بیان نمود که بین نتایج سیال با روش فائو بلانی کریدل و پنمن مانیتث رابطه نزدیکی وجود دارد. مقادیر تفاضل نسبی کمتر از ۰/۲۵۵ بین نتایج سیال با مدل پنمن مانیتث و کمتر از ۰/۲۲ بین مدل سیال با مدل بلانی کریدل این هماهنگی را روشن تر می کند. پاتل و همکاران (۲۰۰۶) نیز در تحقیق خود اختلاف مطلق ۰/۸ و ضریب همبستگی ۰/۹۴۸ بین روش سیال و پنمن مانیتث به عنوان روش استاندارد مرجع بدست آوردند (سینک و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۰).



## جدول ۳- مقایسه نتایج الگوریتم سبال با روش های محاسباتی تعیین تبخیر و تعرق در طی دوره زراعی سال ۲۰۰۸

روز ژولیوسی	ضریب رشد گیاهی	تفاضل مطلق				تفاضل نسبی			
		SWAP	پن من مانتیت	هارگریوز	بلانی کریدل	SWAP	پن من مانتیت	هارگریوز	بلانی کریدل
۱۸۱	۰/۴	۰/۲	۰/۴۴	۱/۷۵	۰/۴	۰/۴۹	۰/۷۰	۰/۰۱	
۱۸۵	۰/۴۱	۰/۱۶	۱/۱۵	۱/۴۳	۰/۴	۰/۳۷	۰/۵۰	۰/۰۱	
۱۸۸	۰/۴۲	۰/۹۰	۱/۵۵	۱/۴۷	۰/۴	۰/۱۶۶	۰/۴۸	۰/۰۱	
۱۹۴	۰/۵	۰/۱۰	۰/۲۰	۳/۰۲	۰/۶۵	۰/۱۵	۰/۷۷	۰/۱۰	
۱۹۷	۰/۵۲	۱/۵۶	۱/۶۶	۲/۳۶	۰/۴۲	۰/۲۰۳	۰/۶۲	۰/۰۷	
۱۹۸	۰/۵۲	۰/۴۸	۰/۳۱	۳/۴۳	۰/۷۳	۰/۰۶۵	۰/۹۳	۰/۱۱	
۲۰۰	۰/۵۳	۱/۱۲	۱/۱۱	۲/۶۱	۰/۲۱	۰/۱۵۱	۰/۷۱	۰/۰۳	
۲۰۵	۰/۵۵	۱/۲۱	۰/۲۲	۲/۲۳	۰/۱۱	۰/۱۶۵	۰/۵۷	۰/۰۲	
۲۱۲	۰/۶	۰/۶۸	۱/۱۰	۲/۰۹	۰/۳۶	۰/۱۱۵	۰/۴۶	۰/۰۵	
۲۲۸	۰/۷۵	۰/۰۱	۰/۳۷	۴/۲۵	۱/۶۵	۰/۰۰۱	۰/۸۸	۰/۲۲	
۲۴۰	۰/۸۸	۱/۳۷	۱/۸۵	۲/۱۲	۰/۰۹	۰/۱۷۶	۰/۴۵	۰/۰۱	
۲۶۴	۱/۰۵	۱/۳۲	۰/۰۷	۲/۳۴	۰/۲۶	۰/۱۸۰	۰/۳۷	۰/۰۳	
۲۷۷	۰/۹	۱/۱۴	۰/۹۳	۱/۲	۰/۲۸	۰/۱۶۰	۰/۲۵	۰/۰۵	

## جدول ۴- مقایسه الگوریتم سبال با روش های تعیین تبخیر و تعرق

آزمون خطا	SWAP	پنمن مانتیت	هارگریوز سامانی	فائو بلانی کریدل
میانگین تفاضل نسبی	۰/۱۹۲	۰/۲۹۶	۰/۳۲۳	۰/۰۴۴
$R^2$ ضریب تبیین	۰/۶۷	۰/۷۵	۰/۷۶	۰/۹۱
RMSE ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۹۴۷	۱/۰۲۹	۲/۵۲۴	۰/۵۶۸
MAE میانگین خطای مطلق	۰/۲۲	۰/۵۳	۲/۳۸	۰/۳

## نتیجه گیری

الگوریتم ها و روش های مختلفی برای تعیین تبخیر و تعرق ارائه شده اند که از این میان، الگوریتم های بر پایه سنجش از دور و تصاویر ماهواره ای روز به روز گسترش یافته اند و صحت نتایج این روش ها در بیشتر موارد به تأیید رسیده است. در این تحقیق نیز سعی شد نتایج حاصل از الگوریتم سبال با مدل هیدرولوژیکی SWAP و سه روش محاسباتی پنمن مانتیت، هارگریوز سامانی و فائو بلانی کریدل ارزیابی شود. به دلیل فقدان داده های اندازه گیری مستقیم تبخیر و تعرق، مدل SWAP با استفاده از داده های اندازه گیری شده رطوبت خاک واسنجی شد و تبخیر و تعرق به دست آمده از مدل واسنجی شده SWAP با نتایج مدل سبال مقایسه گردید. وجود مقادیر RMSE برابر ۰/۹۴۷، MAE برابر ۰/۲۲ و میانگین تفاضل نسبی ۰/۱۹۲ نشان دهنده نزدیکی نتایج مدل سبال با مدل واسنجی شد شده SWAP دارد. در بین روش های محاسباتی نیز فائو بلانی کریدل نتایج رضایت بخش تری نسبت به دو روش محاسباتی پنمن مانتیت و هارگریوز سامانی داشت. با وجود همبستگی بالای مدل

سبال با روش های دیگر تعیین تبخیر و تعرق می توان بیان نمود خطاهایی نیز وجود دارد که ممکن است به دلیل قدرت تفکیک ۱۰۰۰ متر تصاویر سنجنده مودیس باشد که ایجاب می کند در تحقیقات از مزارع وسیع با کشت هماهنگ استفاده شود. تصاویر لندست دارای قدرت تفکیک ۳۰ متر بوده و از این جهت بهتر از تصاویر مودیس می باشد ولی بازه زمانی ۱۶ روزه بین تصاویر لندست و روزانه مودیس، محققان را به استفاده از تصاویر مودیس تشویق می نماید.

در حالت کلی این تحقیق مشخص کرد با کمک سنجش از دور و تصاویر ماهواره ای می توان پهنه بندی تبخیر و تعرق را در مقیاس بزرگ و مناطق با کمبود داده انجام داد. همچنین از الگوریتم های مبتنی بر سنجش از دور مانند سبال می توان به عنوان روش مرجع برای ارزیابی و واسنجی کردن مدل های هیدرولوژیکی و روش های محاسباتی تعیین تبخیر و تعرق استفاده نمود. تبخیر و تعرق به دست آمده می تواند در موارد متعددی مانند مطالعات و طرح های تخصیص منابع آب، مدیریت مصرف آب و تعیین کاربرد صحیح مصرف آب به کار برده شود.

## منابع

- ۱- ثنایی نژاد، س.ح، نوری، س.، و س.م. هاشمی نیا. ۱۳۹۰. برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره ای در منطقه مشهد. آب و خاک. (۳)۲۵: ۵۴۰-۵۴۷.
- ۲- سالاریان، م. نجفی، م. داوری، ک. اسلامیان، س. س. و م. حیدری. ۱۳۹۳. مناسب ترین روش برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در شرایط کمبود داده هواشناسی در ماه های گرم و سرد سال (مطالعه موردی شهرستان اصفهان). مجله آبیاری و زهکشی ایران. (۱)۸: ۶۲-۷۳.
- ۳- علیزاده، ا. ۱۳۸۵. رابطه آب و خاک و گیاه، دانشگاه امام رضا(ع). انتشارات آستان قدس رضوی. ۶: ۳۱۹-۳۲۵.
- ۴- قمرنیا، ه. و س. رضوانی. ۱۳۹۳. محاسبه و پهنه بندی تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم سیبال (SEBAL) در غرب ایران (دشت میان دربند). مجله آب و خاک. (۱)۲۸: ۷۲-۸۱.
- ۵- محمدی، س. میرلطیفی، س. م. و م. اکبری. ۱۳۹۳. برنامه ریزی آبیاری نیشکر با استفاده از تلفیق داده های سنجش از دور و مدل SWAP در کشت و صنعت نیشکر مرزاکوچک خان خوزستان. مجله پژوهش آب در کشاورزی. (۱)۲۸: ۳۹-۵۰.
- 6-Allen, R. G. Tasumi, M. Trezza, R. Waters, R. and W. G. M. Bastiaanssen. 2002. Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)-Advanced Training and User's Manual, University of Idaho: Kimberly. ID. USA.
- 7-Bastiaanssen, W.G.M. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. Journal of Hydrology. 229: 87-100.
- 8-Bastiaanssen, W.G.M. Menenti, M. Feddes, R. A. and A. A. M. Holtslag. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL), part 1: formulation. Journal of Hydrology. 212-213:198-212.
- 9-Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H. David, G. Thoreson, B.P. and R.G. Allen. 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions. Journal of Irrigation Drainage Engineering. 131: 85-93.
- 10-Charoenhirunyingyos, S., Kiyoshi Honda, K., Kamthonkiatb, D. and Ines, A.V.M. 2011. Soil moisture estimation from inverse modeling using multiple criteria functions. Computers and Electronics in Agriculture. 75: 278-287.
- 11-Droogers, P. and W. Bastiaanssen. 2002. Irrigation Performance using Hydrological and Remote Sensing Modeling. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 128(1): 11-18.
- 12-Droogers, P. Bastiaanssen, W. G. M. Beyazgul, M. Kayamb, Y. Kite, G. W. and H. Murray-Rust. 2000. Distributed agro-hydrological modeling of an irrigation system in western Turkey. Agricultural Water Management. 43: 183-202.
- 13-Droogers, P. Immerzeela, W. W and I. J. Lorite. 2010. Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations. Agricultural Water Management. 97: 1351-1359.
- 14-Irmak, A. and K. Baburao. 2009. Evapotranspiration data assimilation with genetic algorithms and SWAP model for on-demand irrigation. Irrigation Science. 28: 101-112.
- 16-Minacapilli, M. Agnese, C. Blanda, F. Cammalleri, C. Ciraolo, G. D'Urso, G. Iovino, M. Pumo, D. Provenzano, G. and G. Rallo. 2009. Estimation of actual evapotranspiration of Mediterranean perennial crops by means of remote-sensing based surface energy balance Models. Hydrology and Earth System Sciences. 13: 1061-1074.
- 17-Palladinoa, M. Staianob, A. D'Ursoa G. Minacapillic, M. and G. Rallo. 2013. Mass and surface energy balance approaches for monitoring water stress in vineyards. Procedia Environmental Sciences 19:231-238.

- 18-Patel, N. R. Rakhesh, D. and A. J. Mohammad. 2006. Mapping of regional evapotranspiration in wheat using Terra/MODIS satellite data. *Hydrological Sciences Journal*. 51(2): 325-335.
- 19-Singh, U.K., Ren L., and Kang S. 2010. Simulation of soil water in space and time using an agro hydrological model and remote sensing techniques, *Agricultural Water Management*, 97 (8): 1210-1220.
- 20-Terink, W. Droogers, P. Van Dam, J. Simons, G. Voogt, M. and A. Ines. 2013. Satellite Based Data Mining to Support Egypt's Agriculture. *Industrial Conference on Data Mining –Workshops*. page 171-180.
- 21-Van Dam, J. C. Huygen, J. Wesseling, J. G. Feddes, R. A. Kabat, P. and P. E. V. Walsum. 1997. Simulation of transport processes in the Soil-Water-Air-Plant environment. *SWAP User's Manual*. DLO-Winand Staring Centre. Wageningen. Netherlands.
- 22-Vermaa, A. K. Guptab, S. K. and R. K. Isaac. 2012. Use of saline water for irrigation in monsoon climate and deep water table regions: Simulation modeling with SWAP. *Agricultural Water Management*. 115: 186–193.