



## دورسنجی تبخیر- تعرق واقعی و ضریب گیاهی سیب با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس و مدل سبال (مطالعه موردی: دشت اهر، ایران)

امین رستمی<sup>۱</sup>، محمود رائینی سرجاز<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۱۵

### چکیده

رخداد گرمایش فراگیر و پیامد آن تغییر اقلیم، تولید گیاهی را در برخی از اقلیم‌ها با چالش روبه‌رو کرده است. با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران و کمبود آب شیرین، یکی از راهکارهای کاهش اثرات تنش آبی بهبود مدیریت منابع آب و سرانجام افزایش کارایی مصرف آب است. برآورد دقیق تبخیر- تعرق و نیاز آبی گیاهان در گستره وسیعی می‌تواند در بهبود مدیریت کشت و تخصیص آب کارآمد باشد. در این پژوهش از تصاویر سنجنده مودیس و مدل سبال، که یکی از پرکاربردترین و دقیق‌ترین مدل‌های سنجنش از دور می‌باشد، برای برآورد دقیق تبخیر- تعرق واقعی در دشت اهر در استان آذربایجان شرقی و در سال زراعی ۹۳-۹۲ استفاده شد. اساس محاسبات در این مدل بر معادله ترازمندی تابش در سطح زمین استوار است. مدل سبال با استفاده از دمای سطحی، بازتابندگی سطحی و نمایه تفاوت نرمال شده گیاهی (NDVI) پارامترهای این معادله را برآورد می‌کند. یافته‌های به دست آمده نشان داد که تبخیر- تعرق واقعی از آغاز فصل (با ۰/۵۹ میلی‌متر بر روز) تا نیمه‌های تابستان روندی افزایشی داشت، به گونه‌ای که در ۲۷ تیر ۹۳ مقدار آن به بیشینه (۱۰/۱ میلی‌متر بر روز) رسید. نقشه‌های پراکندگی مکانی شاخص‌های گیاهی و پارامترهای معادله تراز تابش نشان داد که مناطق جنوبی دشت که بالاترین تراکم گیاهی را دارا هستند، بیش‌ترین میزان تبخیر- تعرق واقعی را به خود اختصاص داده‌اند. نتایج مقایسه آماری بین تبخیر- تعرق واقعی حاصل از مدل سبال و روش معیار پنمن-مانتیث-فائو نیز نشان داد که در سطح اطمینان ۹۵ درصد اختلاف معنی‌داری میان این دو روش وجود ندارد. همچنین همبستگی بالایی ( $r = 0.92$ ) میان داده‌های دو روش دیده شد. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با ۰/۹۶ میلی‌متر بر روز برآورد شد، که نشان دهنده دقت پذیرفتنی مدل سبال در برآورد تبخیر- تعرق در منطقه می‌باشد. از یافته‌های این پژوهش نتیجه گرفته می‌شود که برآورد تبخیر- تعرق با روش سنجنش از دور، برآورد دقیقی از پهنه فراهم می‌کند و این برتری خوبی بر روش‌های نقطه‌ای است.

واژه‌های کلیدی: اهر، تبخیر- تعرق، سنجنش از دور، مدل سبال

### مقدمه

مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب شده و بخش کشاورزی سهم بالایی از کل آب مصرفی را به خود اختصاص می‌دهد. از سویی دیگر، با توجه به رشد ۶/۸ برابری جمعیت کشور در طی کم‌تر از ۸۰ سال، موضوع کمبود آب شیرین و در نتیجه بهبود مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی بسیار حیاتی به نظر می‌رسد. یکی از روش‌هایی که باعث بهبود مدیریت منابع آب و سرانجام افزایش کارایی مصرف آب می‌شود، برآورد دقیق تبخیر- تعرق یا میزان آب مصرفی گیاهان است. هم‌چنین، تبخیر- تعرق نقش چشم‌گیری در اقلیم جهانی از طریق چرخه آب‌شناختی بازی می‌کند، که برآورد آن کاربردهای مهمی در پیش‌بینی رواناب، پیش‌بینی عملکرد محصول و طراحی

براساس برنامه زیست‌محیطی سازمان ملل متحد، کمبود آب شیرین هم از دیدگاه دانشمندان و هم از دیدگاه سیاست‌گذاران، پس از موضوع تغییر اقلیم، به عنوان دومین موضوع مهم زیست‌محیطی سده ۲۱ میلادی تشخیص داده شده است (برنامه زیست‌محیطی سازمان ملل متحد<sup>۳</sup>، ۲۰۰۰). کشور ایران از لحاظ اقلیمی جزو

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم

کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری،

ساری، ایران

(\*نویسنده مسئول: raeini@yahoo.com)

<sup>۳</sup> United Nations Environmental Programme (UNEP)

مطالعه نتایج حاصل از سبال با نتایج به دست آمده از دو سامانه چشمک‌سنج و برج‌های شار اصلاحی بادپیچه‌ای مقایسه شد، که در پیوند با تبخیر- تعرق لحظه‌ای از یک تا ۳۳ درصد و در محاسبه تبخیر- تعرق با دوره ۱۰ روزه از ۲ تا ۳۰ درصد تغییرات دیده شد. در پژوهشی در ایالات متحده در دره رودخانه بیر، آلن و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۰۳) با به به کاربردن سبال به مقایسه نتایج با مقادیر لایسیمتری پرداختند. طی این پژوهش تبخیر- تعرق ماهانه ۱۶ درصد و فصلی ۴/۳ درصد با مقادیر لایسیمتری تفاوت داشت. تیکسیرا و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۰۹) از الگوریتم سبال برای برآورد، واسنجی و صحت‌سنجی مقادیر روزانه ET در چهار پایگاه و هفت ایستگاه هواشناسی کشاورزی در حوضه‌ای از برزیل استفاده کردند. یافته‌های پژوهشی آنان دقت مناسبی ( $RMSE = 0.38 \text{ mm day}^{-1}$ ) برای مدل سبال در بر داشت. جونیور و همکاران<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۳) مقادیر ET واقعی را برای مناطق شرقی جنگل آمازون با استفاده از مدل سبال و تصاویر مودیس (MODIS)<sup>۱۲</sup> به دست آوردند. آنان مدل سبال را برای برآورد ET واقعی به ویژه در فصل‌های خشک سال در مناطق جنگلی به عنوان ابزاری دقیق و کارآمد معرفی کردند. فرنچ و همکاران<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۵) به بررسی دقت دو روش سنجش از دور متریک و TSEB در برآورد تبخیر- تعرق گیاه پنبه در مقیاس مزرعه‌ای در ایالت آریزونا ایالات متحده پرداختند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که در هر دو روش سنجش از دور در مقایسه با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای بیش‌ترین اختلاف برابر ۱/۹ میلی‌متر بر روز می باشد. در پیوند با استفاده از روش‌های سنجش از دور در ایران نیز پژوهش‌هایی انجام شده است. علی اصغرزاده و ثنائی‌نژاد (۱۳۸۵)، در حوضه آبخیز تنگ کنشت کرمانشاه با استفاده از فن‌آوری سنجش از دور و تصاویر ماهواره لندست تبخیر- تعرق واقعی گیاهان را محاسبه کرده و با مقادیر به دست آمده از معادله هارگریوز مقایسه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که همبستگی بالایی بین دو روش سنجش از دور و معادله هارگریوز وجود دارد. غلامی سفیدکوهی و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس و فن‌آوری سنجش از

کاربری اراضی (کوستاس و نورمن<sup>۱</sup>، ۱۹۹۶)، طراحی کانال‌های آبیاری و سازه‌های تقسیم آب دارد (مایکل و باستیانس<sup>۲</sup>، ۲۰۰۲) و همچنین بر روی بلایای طبیعی (مانند خشکسالی) مؤثر است (اوغاوا و همکاران<sup>۳</sup>، ۱۹۹۹). با توجه به طبیعت پویا و تغییرات منطقه‌ای تبخیر- تعرق، اندازه‌گیری مکانی و زمانی این پارامتر به ویژه در مناطقی که با کمبود آب شیرین روبه‌رو هستند لازم است. روش‌های اندازه‌گیری مزرعه‌ای از جمله لایسیمتر، نسبت باون و روش بادپیچه‌ای مقدار تبخیر- تعرق را در مقیاس مزرعه‌ای و یا محدود به محیط موضعی نصب شده دستگاه برآورده می‌کنند (دوگاس و همکاران<sup>۴</sup>، ۱۹۹۱). همچنین روش‌های محاسباتی زیادی برای برآورد تبخیر و تعرق در شرایط اقلیمی و جغرافیایی مختلف با استفاده از داده‌های هواشناسی توسعه داده شده‌اند. این روش‌ها نیز چون اغلب از اندازه‌گیری‌های (داده‌های) نقطه‌ای استفاده می‌کنند، فقط مناسب مناطق محلی بوده و قابل تعمیم به حوضه‌های بزرگ نمی‌باشند (لی و لیونز<sup>۵</sup>، ۲۰۰۲). یکی از روش‌های نوین برای برآورد تبخیر- تعرق، به ویژه در مناطق بزرگ، استفاده از فن‌آوری سنجش از دور می‌باشد. فن‌آوری سنجش از دور این امکان را می‌دهند تا سطح گسترده‌ای از منطقه مورد مطالعه را هم‌زمان پایش و تبخیر و تعرق را برآورد کند. به کمک این فن‌آوری توزیع مکانی عامل‌های مورد نیاز مدل‌های تبخیر و تعرق و تغییرات زمانی آن‌ها بین دو تصویربرداری پیاپی فراهم می‌شود (دانش‌کار آراسته و همکاران، ۱۳۸۴). برای تعیین تبخیر- تعرق با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای و فن‌آوری سنجش از دور، الگوریتم‌های چندی، مانند الگوریتم تراز انرژی در سطح زمین (SEBAL)<sup>۶</sup> تدوین شده است. با استفاده از این الگوریتم، اجزای معادله تراز انرژی در مقیاس منطقه‌ای و با کم‌ترین داده‌های زمینی محاسبه می‌شوند (استوارت و همکاران<sup>۷</sup>، ۱۹۹۹). دقت کاربرد الگوریتم سبال در برآورد تبخیر- تعرق توسط باستیانس و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۰۲) مورد ارزیابی قرار گرفت. طی این

<sup>1</sup> Kustas and Norman

<sup>2</sup> Michael and Bastiaanssen

<sup>3</sup> Ogawa et al

<sup>4</sup> Dugas et al.

<sup>5</sup> Li and Lyons

<sup>6</sup> Surface Energy Balance Algorithms for Land

<sup>7</sup> Stewart et al.

<sup>8</sup> Bastiaanssen et al.

<sup>9</sup> Allen et al.

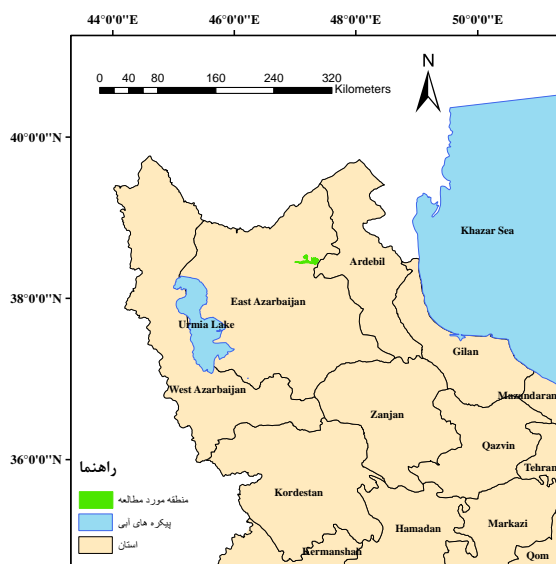
<sup>10</sup> Teixeira et al.

<sup>11</sup> Junior et al.

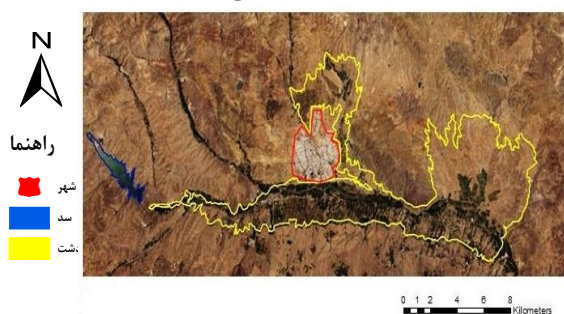
<sup>12</sup> Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

<sup>13</sup> French et al.

مناطق سرد و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی دشت ستارخان اهر در ایران و در درون استان آذربایجان شرقی و هم‌چنین تصویر برگرفته از ماهواره لندست برای منطقه مورد مطالعه در تاریخ ۶ تیرماه ۱۳۹۳ نشان داده شده است.



شکل ۱- الف- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



شکل ۱- ب- تصویر ماهواره لندست از منطقه مورد مطالعه در روز ۶ تیرماه ۹۳

### روش پژوهش

در این مطالعه برای برآورد تبخیر- تعرق واقعی به روش سنجش از دور از الگوریتم سبال استفاده شد. الگوریتم تراز انرژی در سطح زمین (سبال) توسط باستیانس و همکاران (۱۹۹۸) ارائه شد. این الگوریتم به عنوان بهترین الگوریتم تراز انرژی در پژوهش‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته و درستی یافته‌های آن نیز طی مقاله‌های زیادی به اثبات رسیده است. از سویی دیگر، نیاز به داده‌های هواشناسی ایستگاه زمینی در هنگام استفاده از این الگوریتم به کمینه ممکن می‌رسد (کاویانی و همکاران، ۱۳۹۰). مدل سبال از اطلاعات تصاویر رقومی برگرفته

دور تبخیر- تعرق واقعی گندم را در حوضه گرگان‌رود محاسبه کرده و با یافته‌های روش پنمن- مانتیث- فائو مقایسه کردند. نتایج این مقایسه نشان داد که استفاده از روش سنجش از دور نسبت به روش پنمن- مانتیث- فائو دارای ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE) ۱۸ میلی‌متر و میانگین خطای مطلق (MAE) ۱۶ میلی‌متر در کل فصل رشد گندم می‌باشد. کاویانی و همکاران (۱۳۹۰) برای بررسی بهره‌وری آب کشاورزی در دشت قزوین از تصاویر ماهواره مودیس و الگوریتم سبال استفاده کردند. ایشان نتایج اجرای الگوریتم سبال را در تمامی تصاویر با داده‌های لایسمیتر زهکش‌دار موجود در منطقه مورد مقایسه قرار داده و همبستگی ( $r=0/89$ ) بالایی به دست آوردند. رحیمی و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از مدل سبال و تصاویر سنجنده مودیس تبخیر- تعرق واقعی گیاهان را در دشت تجن برآورد کردند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که اختلاف معنی‌داری میان داده‌های برآوردی مدل سبال و داده‌های معادله فائو- پنمن- مانتیث وجود نداشت. با توجه به دقت و توانایی تایید شده مدل سبال و تصاویر سنجنده مودیس در برآورد تبخیر- تعرق گیاهان، در پژوهش حاضر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مودیس و مدل سبال مقدار تبخیر- تعرق واقعی سیب تحت آبیاری قطره‌ای در دشت اهر برآورد می‌شود و این یافته‌ها با نتایج معادله فائو- پنمن- مانتیث مقایسه خواهد شد. نتیجه این پژوهش ضمن این‌که می‌تواند کارایی این مدل را در برآورد دقیق تبخیر- تعرق واقعی گیاهان به نمایش بگذارد، به بهبود مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی آبیاری و تخصیص آب در دشت مورد نظر نیز کمک شایانی خواهد کرد.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، دشت اهر در پایاب سد ستارخان اهر است، که در شمال شرق استان آذربایجان شرقی واقع شده است. این منطقه جزو حوضه آبریز ارس بوده و پهنه‌ای معادل ۱۱۰۰۰ هکتار را دارا است. کشت غالب دشت را باغ سیب در بر می‌گیرد، که تقریباً تمامی آن با سامانه قطره‌ای آبیاری می‌شود. میانگین بلندمدت بارش سالانه منطقه ۲۷۷/۹ میلی‌متر است، که در رده‌بندی اقلیمی دومارتن اصلاح شده جزو

مهر ماه) تهیه شود، ولی با توجه به ابری بودن برخی روزها به ناچار از تصویری با کمترین ابرناکی، چند روز پیش یا پس از روز مورد نظر، استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در پژوهش

ردیف	تاریخ	ساعت محلی	روز ژولپوسی
۱	۳ فروردین ۱۳۹۳	۱۰:۳۰	۸۲
۲	۲۲ فروردین ۱۳۹۳	۱۱:۴۰	۱۰۲
۳	۱۱ اردیبهشت ۱۳۹۳	۱۰:۳۵	۱۲۱
۴	۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۳	۱۱:۲۰	۱۳۸
۵	۲۰ خرداد ۱۳۹۳	۱۱:۴۵	۱۶۱
۶	۶ تیر ۱۳۹۳	۱۰:۳۰	۱۷۸
۷	۲۷ تیر ۱۳۹۳	۱۰:۴۵	۱۹۹
۸	۱۸ مرداد ۱۳۹۳	۱۱:۵۰	۲۲۱
۹	۷ شهریور ۱۳۹۳	۱۱:۴۵	۲۴۱
۱۰	۲ مهر ۱۳۹۳	۱۲:۰۰	۲۶۷
۱۱	۲۰ مهر ۱۳۹۳	۱۱:۵۰	۲۸۵

در سنجنده مودیس باندهای گرمایی ۳۱ و ۳۲ برای برآورد دمای سطح زمین استفاده می‌شوند. نخست تابش توسط معکوس معادله پلانک به درخشندگی باند تبدیل می‌شود.

$$T_i = \frac{\left(\frac{hc}{k}\right)}{\lambda_i \ln\left(\frac{2hc^2}{RAD\pi\lambda_i^5} + 1\right)} \quad (2)$$

در این معادله، RAD تابش هر باند، h ثابت پلانک ( $s^{-1}$ )،  $c = 3 \times 10^8$  (۶/۲۶۲ × ۱۰<sup>-۲۶</sup>)، سرعت نور ( $m s^{-1}$ )،  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  (۱/۳۸۱ × ۱۰<sup>-۲۳</sup>) J k<sup>-1</sup> و  $\lambda_i$  طول موج میانه باند است. پارودی<sup>۲</sup> (۲۰۰۰) معادله ۳ را برای برآورد دمای سطح زمین توسط سنجنده مودیس ارائه داد.

$$T_{s1000} = 0.39T_{b31}^2 + 2.34T_{b31} - 0.78T_{b31} - 1.34T_{b32} + 0.39T_{b32}^2 + 0.56 \quad (3)$$

که در آن،  $T_b$  درخشندگی باند و زیرنمادهای ۳۱ و ۳۲ باندهای سنجنده می‌باشند. با توجه به اینکه اندازه پیکسل باندهای گرمایی (۳۱ و ۳۲) در سنجنده مودیس ۱۰۰۰ متر است، دمای سطحی‌ای که از تصاویر سنجنده مودیس و معادله (۳) به دست می‌آید دارای وضوح مکانی ۱۰۰۰ متری است، بنابراین بایستی به وضوح مکانی بهتر (دست کم ۲۵۰ متر)، معادل وضوح شاخص پوشش گیاهی (NDVI) ریزپیکسل شود. در این پژوهش برای

توسط هر سنجنده‌ای که قادر به ثبت تابش‌های فروسرخ گرمایی و همچنین تابش‌های مرئی و فروسرخ نزدیک باشد، استفاده می‌کند و سپس مقدار تبخیر- تعرق در هر پیکسل را برای همان زمان برداشت تصویر محاسبه می‌کند. محاسبه تبخیر- تعرق برپایه تراز تابش خورشیدی استوار است، که در آن مقدار تبخیر- تعرق از کم کردن مقدار انرژی باقی‌مانده از معادله تراز تابش به دست می‌آید. معادله کلی تراز انرژی در سطح زمین که در مدل سبال مورد استفاده است، به شرح معادله ۱ است.

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

که در آن  $\lambda ET$  شارگرماي نهان ( $LE$ ) ( $w m^{-2}$ )،  $R_n$  تابش خالص خورشیدی (جمع همه تابش‌های موج کوتاه و بلند دریافتی در سطح زمین،  $w m^{-2}$ )،  $H$  شار گرمای محسوس ( $w m^{-2}$ ) و  $G$  شار گرمای زمین یا خاک ( $w m^{-2}$ ) می‌باشد. الگوریتم سبال با استفاده از دمای سطحی، بازتابندگی سطحی و نمایه تفاوت نرمال شده گیاهی (NDVI)<sup>۱</sup> و روابط درونی شارهای سطحی را برای انواع پوشش‌های سطح زمین برآورد می‌کند. چگونگی محاسبه پارامترهای معادله تراز انرژی و شاخص‌های گیاهی و دیگر ضرایب مورد استفاده در مدل سبال را می‌توان در کار باستیانس و همکاران (۱۹۹۸) یافت. در این پژوهش تصاویر سنجنده مودیس مربوط به سال زراعی ۹۳-۹۲ برای استفاده در مدل سبال و برآورد تبخیر- تعرق به کار برده شد. سنجنده مودیس با دارا بودن ۳۶ باند می‌تواند اطلاعات دریافتی از سطح زمین را در بازه طیفی ۰/۴ تا ۱۴/۴ میکرومتر و با عرض پوشش ۲۳۳۰ کیلومتر ثبت کند. توان جداسازی مکانی این باندهای از ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ متر متغیر است. به طور متوسط سنجنده مودیس بین ساعت‌های ۱۰ تا ۱۲ بامداد از محدوده پژوهش گذر و عکس‌برداری می‌کند. کلیه تصاویر مورد نیاز این پژوهش شامل ۹ باند سنجنده مودیس می‌باشد، که باندهای ۱ و ۲ با توان جداسازی مکانی ۲۵۰ متر، ۳ تا ۷ (۵۰۰ متر) و باندهای گرمایی ۳۱ و ۳۲ (۱۰۰۰ متر) را شامل می‌شوند. در جدول ۱ اطلاعات مربوط به تصاویر دریافتی از سنجنده مودیس در این پژوهش مشخص شده است. در این پژوهش در آغاز کوشش شد تا تصاویری با فاصله زمانی ۲۰ روزه در دوره رشد سیب (نیمه‌های فروردین تا میانه

<sup>2</sup> Parodi

<sup>1</sup> Normalized Difference Vegetation Index

لحظه‌ای محاسبه شده از مدل سبال به تبخیر- تعرق گیاه مرجع در مقیاس ساعتی در لحظه گذر ماهواره تعیین و حاصل ضرب این نسبت در تبخیر- تعرق روزانه گیاه مرجع، میزان تبخیر- تعرق واقعی روزانه ( $ET_{act-24}$ ) می‌باشد.

$$ET_{act-24} = ET_{r-24} \frac{ET_{inst}}{ET_{r-inst}} \quad (6)$$

تبخیر و تعرق واقعی روزانه با استفاده از الگوریتم سبال تنها در روزهایی که تصاویر آن دریافت شده بود به دست آمد (۱۱ روز از فصل رشد). برای تعیین تبخیر- تعرق واقعی دیگر روزهای فصل رشد در آغاز مقدار ضریب گیاهی، با تقسیم تبخیر- تعرق واقعی به دست آمده از مدل سبال به تبخیر- تعرق مرجع، محاسبه گردید و ضریب گیاهی برای روزهای بازه زمانی بین دو تصویر متوالی نیز با رگرسیون خطی محاسبه شد. به این ترتیب تبخیر- تعرق واقعی در دیگر روزهای فصل رشد از حاصل ضرب ضریب گیاهی به دست آمده از مدل سبال در تبخیر- تعرق مرجع به دست آمد.

$$K_c(SEBAL) = \frac{ET_{act}(SEBAL)}{ET_r} \quad (7)$$

مقادیر تبخیر- تعرق مرجع در مقیاس ساعتی و روزانه با استفاده از معادله معروف فائو- پنمن- مانیتث و داده‌های هواشناسی ایستگاه همدیدی اهر که در درون منطقه مورد مطالعه می‌باشد، محاسبه شد. برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای و محاسبات مربوط به مدل سبال از دو نرم‌افزار سنچس از دور Envi و Erdas استفاده شد. همچنین برای ساده‌سازی و به کمینه رساندن مدت زمان انجام محاسبات، محدوده دشت اهر از تصاویر ماهواره‌ای جدا شده و محاسبات تنها بر روی این محدوده انجام گرفت.

## نتایج و بحث

### پراکندگی مکانی تبخیر- تعرق در دشت

برتری اصلی برآورد تبخیر- تعرق با استفاده از روش‌های سنچس از دور توانایی برآورد پراکندگی مکانی تبخیر- تعرق، شاخص‌های گیاهی و دیگر پارامترهای معادله تراز انرژی در مقیاس منطقه‌ای است. در شکل ۲ نقشه‌های پراکندگی مکانی دو شاخص گیاهی نمایه سطح برگ (LAI)<sup>۲</sup> و نمایه تفاوت نرمال شده گیاهی (NDVI) برای روز ۶ تیر ماه نشان داده شده است. همان‌طور که از

ریزمقیاس‌نمایی پارامتر دمای سطح زمین از روش پیشنهادی کوستاس و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۳) استفاده شد. برای این کار مراحل زیر روی تصاویر سنجنده مودیس انجام گرفت:

- محاسبه شاخص  $NDVI_{250}$  (باندهای محاسباتی NDVI برای تصویر مودیس دارای وضوح مکانی ۲۵۰ متر هستند)
- ساخت NDVI های ۱۰۰۰ متری ( $NDVI_{1000}$ ) از روی تصویر با وضوح مکانی ۱۰۰۰ متر (مجموع ۱۶ پیکسل  $NDVI_{250}$ )
- برقراری رابطه رگرسیونی بین دمای سطحی ( $T_{s1000}$ ) و  $NDVI_{1000}$  برپایه معادله ۴:

$$T'_{s1000}(NDVI_{1000}) = a + b(NDVI_{1000}) \quad (4)$$

که در آن  $a$  و  $b$  ضرایب رگرسیونی هستند.

- سرانجام، گسسته‌سازی دمای سطحی برای هر پیکسل ۲۵۰ متری (۱، ۲، ۳، ...، ۱۶) که از طریق معادله ۵ به دست می‌آید.

$$T'_{s250}(i) = T'_{s1000}(NDVI_{250}(i)) + \Delta T'_{s1000} \quad (5)$$

که در آن معادله  $\Delta T'_{s1000} = T_{s1000} - T'_{s1000}$  برقرار است. با توجه به اینکه نقشه‌های تبخیر- تعرق واقعی حاصل از مدل سبال و دیگر پارامترهای معادله تراز انرژی و تصاویر سنجنده مودیس دارای اندازه پیکسل ۲۵۰ متر معادل سطح پیکسل ۶/۲۵ هکتار می‌باشند، بنابراین با استفاده از یک تصویر ماهواره لندست (که دارای اندازه پیکسل ۳۰ متر می‌باشد) برای تاریخ ۶ تیرماه و برخی مشاهدات میدانی، مرز باغ‌های سیب در منطقه مشخص شد. سرانجام چندین پیکسل از هر تصویر سنجنده مودیس که دارای پوشش یکنواخت سیب بود انتخاب شد و میانگین تبخیر- تعرق واقعی در آن پیکسل‌ها به عنوان تبخیر- تعرق واقعی سیب در دوره رشد تعیین شد. برای برآورد تبخیر- تعرق روزانه از تبخیر- تعرق لحظه‌ای، می‌توان از مفهوم تبخیر- تعرق گیاه مرجع استفاده کرد. به این منظور تبخیر- تعرق گیاه مرجع در مقیاس ساعتی در لحظه گذر ماهواره ( $ET_{r-inst}$ ) و همچنین میزان آن در مقیاس روزانه ( $ET_{r-24}$ ) برای ایستگاه هواشناسی معرف منطقه محاسبه می‌شود. سپس نسبت تبخیر- تعرق

<sup>2</sup> Leaf Area Index

<sup>1</sup> Kustas et al.

شاخص‌های گیاهی، تبخیر- تعرق و دیگر پارامترهای معادله تراز انرژی در منطقه با یافته‌های مباحثی و همکاران (۱۳۸۴)، یانگ و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۲)، رحیمی و همکاران (۲۰۱۵)، پورمحمدی و همکاران (۱۳۸۹) و امیدوار و همکاران (۱۳۹۱) همخوانی دارد. با توجه به اینکه در دیگر روزها نیز پراکندگی مکانی شاخص‌های گیاهی، دمای سطح زمین و پارامترهای معادله تراز انرژی در منطقه همانند نقشه‌های ارائه شده برای روز ۶ تیر ماه هستند، از ارائه آن‌ها صرف‌نظر شد.

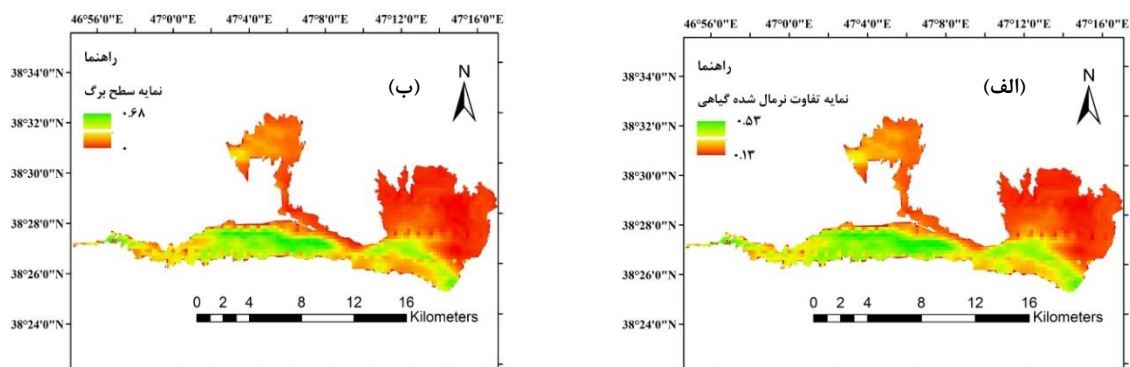
#### تغییرات زمانی تبخیر- تعرق در فصل رشد

نمودار تغییرات زمانی اجزای معادله تراز انرژی (تابش خالص خورشیدی، شار گرمای محسوس، شار گرمای خاک و شار گرمای نهان) در دشت مورد مطالعه و در طول فصل رشد در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که از این نمودار دیده می‌شود، شار گرمای نهان و شار گرمای محسوس روندی کاملاً عکس یکدیگر در طول فصل طی کرده‌اند، به طوری که در آغاز فصل که پوشش گیاهی ناچیز است، شار گرمای محسوس سهم بیشتری از تابش خالص خورشیدی را دریافت کرده و شار گرمای نهان کم‌ترین مقدار خود را دارا است. با گذشت زمان و با افزایش تراکم پوشش گیاهی بر روی سطح زمین شار گرمای نهان افزایش یافته (تبخیر- تعرق گیاهان با نزدیک شدن به میانه فصل رشد افزایش می‌یابد) و در روز ۲۸ اردیبهشت ماه تقریباً به بالاترین مقدار خود رسیده و تا ۱۸ مرداد ماه در این مقدار ثابت می‌ماند و سپس تا پایان فصل با کاهش تراکم گیاهی، روندی کاهشی را ادامه می‌دهد (در اواخر فصل رشد تبخیر- تعرق گیاهان کاهش می‌یابد). با آغاز کاهش شار گرمای نهان در اواخر فصل، شار گرمای محسوس دوباره افزایش می‌یابد. نمودار تغییرات زمانی تبخیر- تعرق واقعی روزانه و شاخص سطح برگ (LAI) در شکل ۶ دیده می‌شوند.

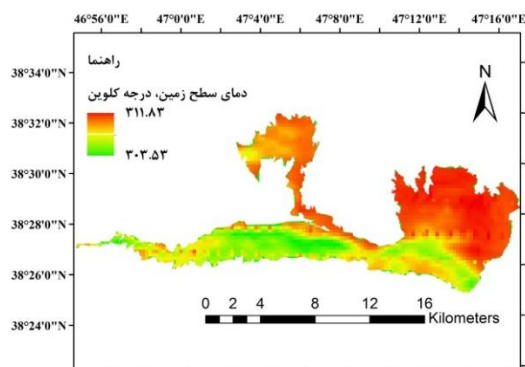
این شکل، در مقایسه با شکل ۱. ب، دیده می‌شود شاخص‌های گیاهی NDVI و LAI، که نشان دهنده سبزیگی و انبوهی پوشش گیاهی هستند، در مناطق جنوبی دشت بزرگ‌ترند. ولی در مناطق شمالی و شمال شرقی دشت که پوشش گیاهی بسیار اندک و حتی در مناطقی به دلیل اجرا نشدن شبکه آبیاری پوشش گیاهی ناچیز است، شاخص‌های گیاهی بسیار ناچیز و نزدیک به صفر هستند. در شکل ۳ نقشه دمای سطحی منطقه برای روز ۶ تیر نشان داده شده است، که با روش ریزمقیاس‌سازی پیشنهاد شده توسط کوستاس و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۳) به دست آمده است. همانند شاخص‌های گیاهی، در مناطق جنوبی و پرتراکم دشت، دمای سطح زمین کم‌ترین مقدار خود را داشته و در مناطق شمالی و شمال شرقی دشت که پوشش گیاهی بسیار ناچیز است، دمای سطح زمین بیش‌ترین اندازه را در منطقه داراست. دلیل این امر اینست که در مناطق با تراکم بالای گیاهی، شار گرمای نهان و یا به عبارتی تبخیر- تعرق سهم زیادی از تابش خالص خورشیدی رسیده به سطح زمین را به خود اختصاص داده، از این رو شار گرمای محسوس در این مناطق کاهش می‌یابد که منجر به کاهش دمای سطح زمین می‌شود و بر عکس در مناطقی با پوشش گیاهی ناچیز، سهم زیادی از تابش خالص خورشیدی رسیده به سطح زمین را شار گرمای محسوس دریافت کرده و صرف گرم کردن هوا و به عبارتی افزایش دمای سطح زمین می‌شود. در شکل ۴ پراکندگی مکانی پارامترهای شار گرمای محسوس (H)، شار گرمای خاک (G) و تبخیر- تعرق واقعی (ET<sub>a</sub>) برای روز ۶ تیرماه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ نیز بحث شد، در مناطق جنوبی دشت که تراکم پوشش گیاهی بالاست، میزان تبخیر- تعرق واقعی به بیش‌ترین مقدار رسیده و شار گرمای خاک که به‌طور مستقیم به دمای سطح زمین بستگی دارد و شار گرمای محسوس کم‌ترین مقدار خود را در این مناطق دارا می‌باشند و بر عکس در مناطق با پوشش گیاهی ناچیز، شار گرمای محسوس و شار گرمای خاک بالاترین سهم از تابش خالص خورشیدی رسیده به سطح زمین را دریافت کرده و تبخیر- تعرق واقعی (شار گرمای نهان) در برخی از این مناطق حتی به صفر می‌رسد. این یافته‌ها در خصوص پراکندگی مکانی

<sup>2</sup> Yang et al

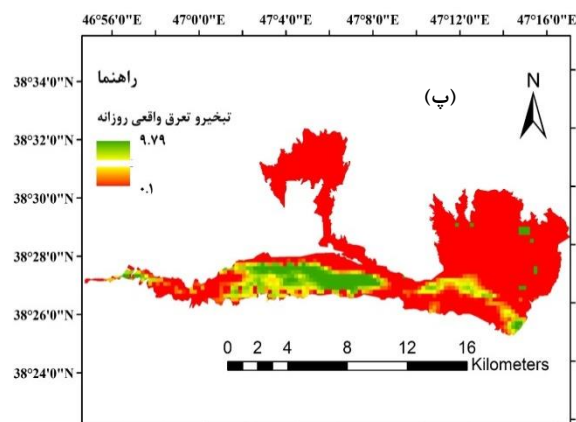
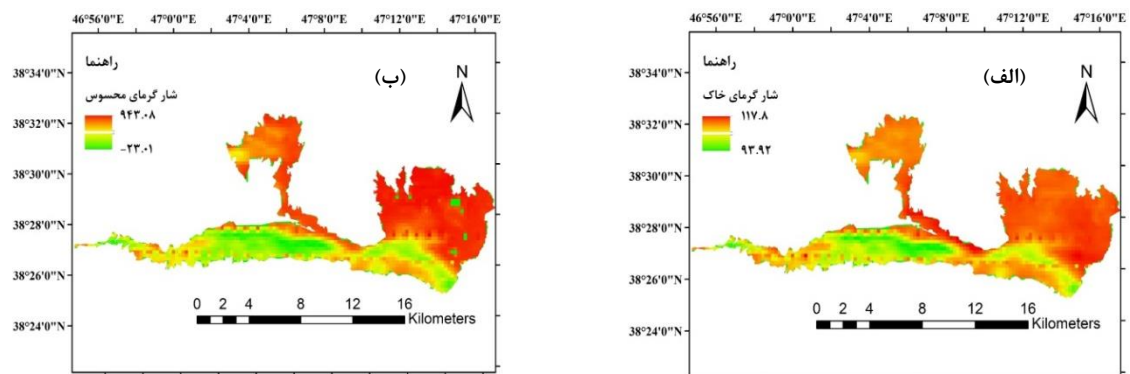
<sup>1</sup> Kustas et al



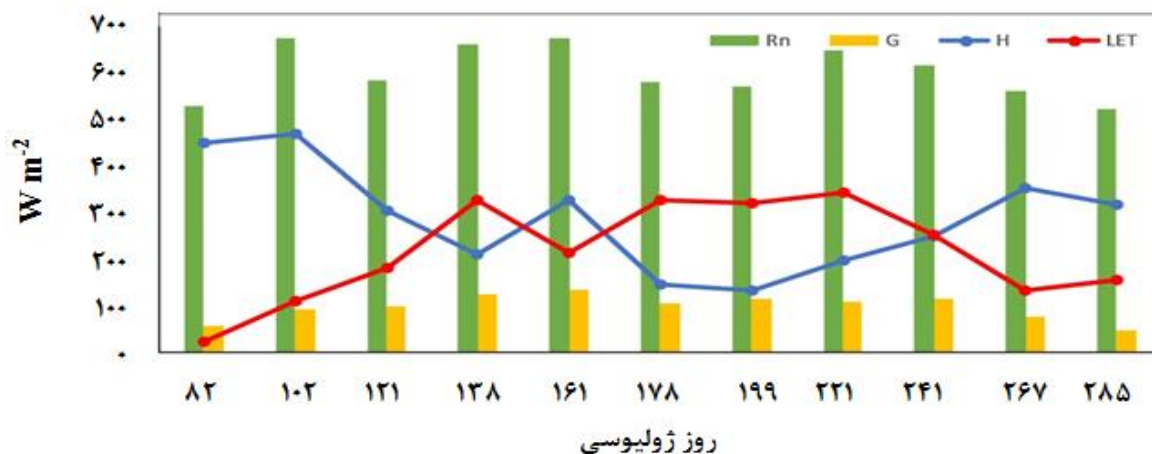
شکل ۲- الف- نقشه پراکندگی مکانی شاخص NDVI و ب- نقشه پراکندگی مکانی شاخص LAI برای روز ۶ تیر ماه



شکل ۳- نقشه پراکندگی مکانی دمای سطحی زمین (درجه کلون) برای روز ۶ تیر ماه



شکل ۴- الف. نقشه پراکندگی مکانی شار گرمای خاک (وات بر مترمربع)، ب- نقشه پراکندگی مکانی شار گرمای محسوس (وات بر مترمربع) و پ- نقشه پراکندگی مکانی تبخیر- تعرق واقعی روزانه (میلی متر بر روز) برای روز ۶ تیر ماه



شکل ۵- نمودار تغییرات زمانی اجزای معادله تراز انرژی در سطح زمین

### مقایسه یافته‌های مدل سبال با روش پنمن -

#### مانتیت- فائو

ضریب گیاهی سیب با تقسیم مقدار تبخیر- تعرق واقعی برآورد شده از مدل سبال در هر تصویر بر تبخیر- تعرق مرجع متناظر با آن به دست آمد و سپس هر ضریب برای دوره زمانی تصویر متناظر نیز در نظر گرفته شد. همچنین مقدار ضریب گیاهی پیشنهادی توسط فائو<sup>۵</sup> (۱۹۹۸) نیز برای منطقه مورد مطالعه تعدیل شد، که مقادیر ضرایب گیاهی حاصل از هر دو روش در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، جز برای دوره بیشینه مقدار ضریب گیاهی (نیمه‌های فصل رشد) که مقدار ضریب گیاهی حاصل از مدل سبال بیشتر از فائو است، مقدار پیشنهادی فائو برای ضریب گیاهی سیب همواره بالاتر از مقدار به دست آمده از مدل سبال می‌باشد. با محاسبه ضریب گیاهی سبال، مقدار تبخیر- تعرق واقعی برای تمام روزهای فصل رشد محاسبه شد. همچنین مقدار تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از روش پنمن- مانتیت- فائو نیز با اعمال ضریب گیاهی تعدیل شده و داده‌های هواشناسی ایستگاه همدیدی اهر به دست آمد. شکل ۸ نمودار تغییرات مقدار تبخیر- تعرق واقعی روزانه سیب حاصل از هر دو روش را برای فصل رشد نشان می‌دهد. همچنین نتایج مقایسه آماری دو روش سبال و پنمن- مانتیت- فائو برای مقادیر ET روزانه در جدول ۲ آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، مقدار تبخیر- تعرق واقعی از آغاز فصل (با ۰/۵۹ میلی‌متر بر روز) تا میانه‌های تابستان روندی افزایشی دارد، به گونه‌ای که در ۲۷ تیر مقدار آن به بیشینه (۱۰/۱ میلی‌متر بر روز) می‌رسد. پس از آن مقدار تبخیر- تعرق واقعی دوباره سیری کاهشی یافته و در پایان فصل (۲۰ مهر ماه) به مقدار ۱/۷۷ میلی‌متر بر روز می‌رسد. از آنجایی که این مقادیر مربوط به مناطقی است که به طور پیوسته پوشیده از درختان سیب است، این روند افزایشی و کاهشی تبخیر- تعرق واقعی منطقی به نظر می‌رسد. همچنین دیده می‌شود که روند تغییرات شاخص سطح برگ نیز همسو با تبخیر- تعرق واقعی است و ضریب همبستگی میان این دو پارامتر ۰/۷۷ است. مقدار شاخص سطح برگ در آغاز فصل ۰/۲۴ بوده و به تدریج با افزایش تراکم گیاهی، افزایش یافته و در روز ۶ تیرماه به ۰/۵۲ رسیده که این اندازه تا ۲۷ تیرماه (۰/۵۱) تغییری نکرد. از آن پس تا پایان فصل این نمایه روندی کاهشی داشت و در پایان فصل به ۰/۱۴ به کمترین مقدار خود، رسید. این یافته‌ها با نتایج پژوهش کاراسکو- بناویدس و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۲) که به بررسی تبخیر- تعرق واقعی و ضریب گیاهی باغ‌های انگور با استفاده از روش سنجش از دور پرداخته‌اند و هم‌چنین با یافته‌های تستی و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۴)، سینگ و ایرماک<sup>۳</sup> (۲۰۰۹) و مارسال و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۳) همخوانی خوبی دارد.

<sup>1</sup> Carrasco-Benavides et al.

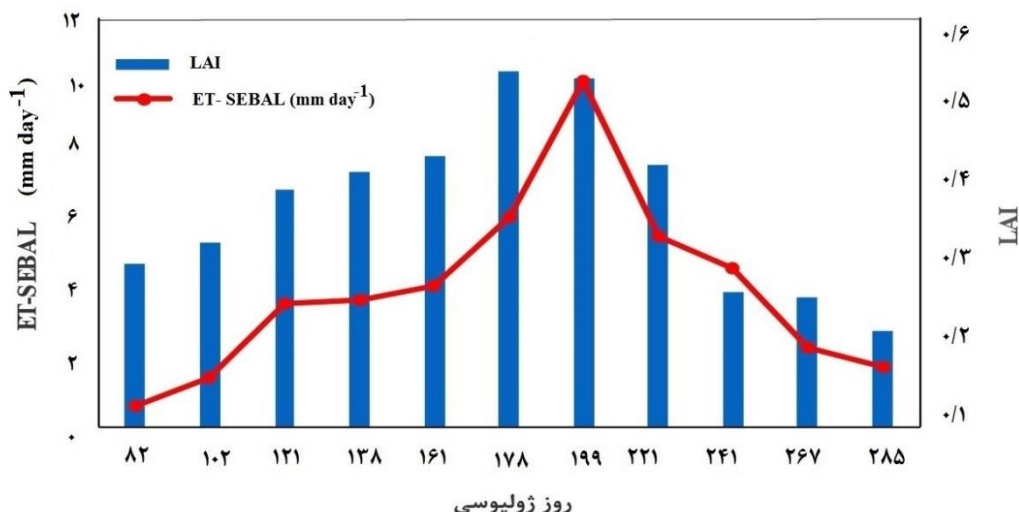
<sup>2</sup> Testi et al.

<sup>3</sup> Singh and Irmak

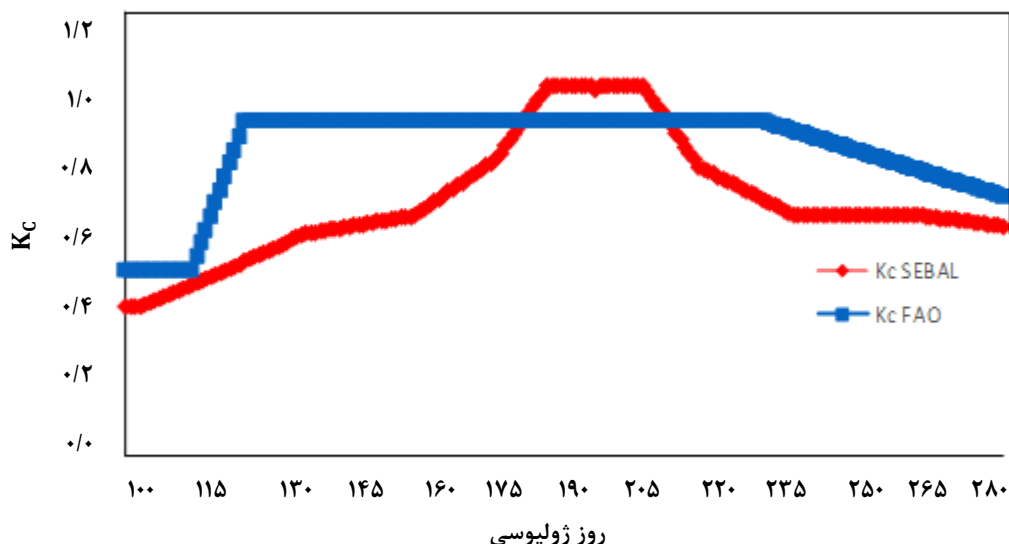
<sup>4</sup> Marsal et al.

<sup>5</sup> FAO





شکل ۶- نمودار تغییرات زمانی تبخیر- تعرق واقعی روزانه و شاخص سطح برگ



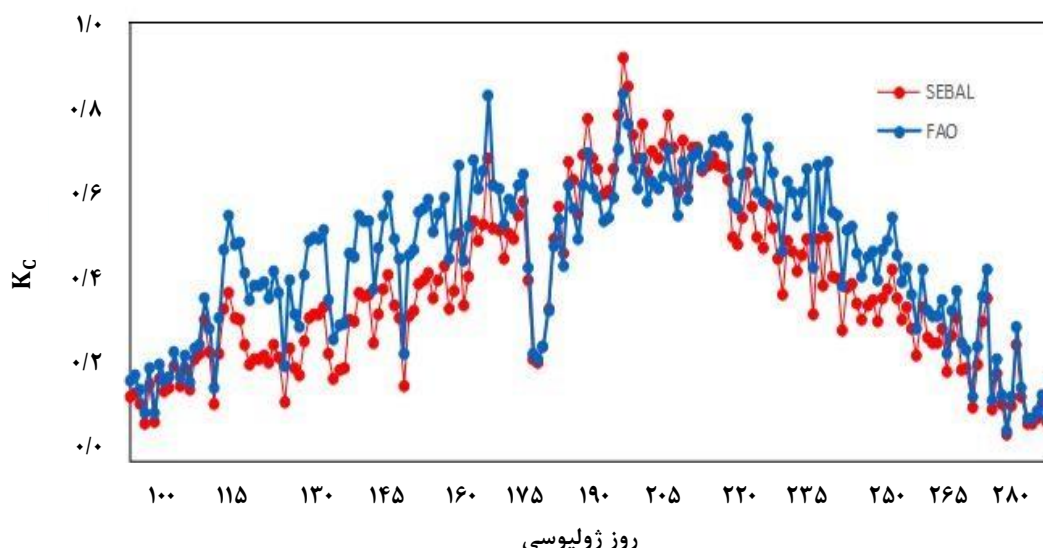
شکل ۷- مقادیر ضریب گیاهی حاصل از مدل سبال و روش FAO برای دوره رشد سیب در دشت اهر

جدول ۲- نتایج مقایسه آماری بین مقادیر ET روزانه دو روش سبال و پنمن- مانتیث- فائو

شاخص آماری	ضریب همبستگی (r)	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (mm day <sup>-1</sup> )	میانگین خطای مطلق (MAE) (mm day <sup>-1</sup> )	میانگین انحراف خطا (MBE) (mm day <sup>-1</sup> )
مقدار	۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۸۷	۰/۷۶

مدل سبال بیش برآورد شده است، در دیگر روزهای فصل رشد روش پنمن- مانتیث- فائو نسبت به مدل سبال بیش برآورد داشته است. همچنین بر اساس مقایسه میانگین دو جامعه جفت شده با استفاده از آزمون t مقادیر به دست آمده از دو روش در سطح اطمینان ۹۵ درصد (P-value > ۰/۰۵) اختلاف معنی داری با هم ندارند که نشان دهنده دقت بالای مدل سبال در برآورد پارامتر تبخیر- تعرق در منطقه مورد مطالعه است.

همان طور که دیده می شود نحوه تغییرات ET واقعی در هر دو روش مشابه هم بوده و ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۲ بین مقادیر دو روش به دست آمده است که با یافته های اکبری و همکاران (۱۳۹۰) که ضریب همبستگی ET روزانه بین دو روش سنجش از دور و پنمن- مانتیث- فائو را در حدود ۰/۸۷ گزارش کرده اند، هماهنگی دارد. با توجه به مقادیر ضریب گیاهی مقایسه شده در شکل ۷، مطابق انتظار، مقدار ET واقعی جز در دوره بیشینه که



شکل ۸- مقایسه مقادیر تبخیر- تعرق واقعی روزانه سیب در دو روش سبال و پنمن-مانتیت- فائو در طول فصل رشد

می‌کند. هم‌چنین یافته‌های همانند در بسیاری از پژوهش‌ها، مانند اوبرگ و ملس<sup>۶</sup> (۲۰۰۶)، بشیر و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۰۸)، رحیمی و همکاران (۲۰۱۵)، اکبری و همکاران (۱۳۹۰) و قمرنیا و رضوانی (۱۳۹۳) نیز گزارش شده است.

### نتیجه گیری

برآورد دقیق‌تر تبخیر- تعرق در مقیاس حوضه و یا دشت همواره به عنوان یکی از مشکلات اصلی در مدیریت منابع آب در سطح حوضه مطرح بوده است، چرا که بیش‌تر روش‌های محاسباتی و یا اندازه‌گیری تبخیر- تعرق به صورت نقطه‌ای می‌باشند. با استفاده از تکنیک سنجش از دور می‌توان پراکنش مکانی و زمانی این پارامتر را با دقت بهتری برآورد نمود. در این پژوهش با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس و الگوریتم سنجش از دور سبال، پارامترهای معادله تراز انرژی و شاخص های گیاهی در دشت ستارخان اهر در سال زراعی ۹۳-۹۲ برآورد شدند. هم‌چنین با استفاده از مدل سبال، تبخیر- تعرق واقعی سیب در منطقه محاسبه شد. بیش‌ترین میزان تبخیر- تعرق واقعی برابر با ۱۰/۱ میلی متر بر روز مربوط به ۲۷ تیر ماه و کم‌ترین مقدار آن برابر با ۰/۵۹ میلی متر بر روز مربوط به ۳ فروردین ماه بود. هم‌چنین نتایج مقایسه آماری مدل سبال با روش پنمن-مانتیت- فائو با ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۲ و ریشه میانگین مربعات خطای

ریشه میانگین مربعات خطا نیز برابر ۰/۹۶ میلی‌متر بر روز و میانگین خطای مطلق برابر ۰/۸۷ میلی‌متر بر روز به دست آمده است. مشابه این یافته‌ها در بیش‌تر پژوهش‌های انجام گرفته نیز گزارش شده است. کاراسکو- بناویدس و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۲) با مقایسه مقادیر تبخیر- تعرق واقعی به دست آمده از روش سنجش از دور و داده های مشاهداتی، مقدار RMSE و MAE را به ترتیب برابر با ۰/۶۲ و ۰/۵ میلی‌متر بر روز برآورد کردند. فولهس و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۹) نشان دادند که مدل متریک مقدار تبخیر- تعرق واقعی درخت موز را با (۰/۴ mm d<sup>-1</sup>) = RMSE برآورد می‌کند. برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی ذرت، سینگ و ایرماک<sup>۳</sup> (۲۰۱۱) مقدار RMSE را بین ۱/۱ تا ۱/۷ میلی متر بر روز به دست آوردند. گالگیلوس و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۱) مقدار RMSE برابر با ۰/۸۳ میلی‌متر بر روز را در برآورد تبخیر- تعرق واقعی درخت انگور با روش سنجش از دور نشان داد. در برزیل، تیکسیرا و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۰۹) مقدار RMSE را برابر با ۰/۳۸ میلی‌متر بر روز در برآورد تبخیر- تعرق واقعی محصولات آبی (انواع درخت انگور و انبه) با استفاده از مدل سبال گزارش کردند. میر یعقوب‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند که که مدل سبال میزان تبخیر و تعرق را بین ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر در روز کم‌تر از روش پنمن مانتیت برآورد

<sup>1</sup> Carrasco-Benavides et al.

<sup>2</sup> Folhes et al.

<sup>3</sup> Singh and Irmak

<sup>4</sup> Galleguillos et al.

<sup>5</sup> Teixeira et al.

<sup>6</sup> Oberg and Melesse

<sup>7</sup> Bashir et al.

کاوپانی، ع.، سهرابی، ت.، دانش کار آراسته، پ. ۱۳۹۰. کاربرد الگوریتم SEBAL در تخمین تبخیر- تعرق واقعی و بهره‌وری آب کشاورزی در دشت قزوین و مقایسه نتایج آن با داده‌های لایسیمتر. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۲ (۵): ۱۶۵-۱۷۵.

مباشری، م. ر.، خاوریان، ح.، ضیائیان، پ.، کمالی، غ. ۱۳۸۴. برآورد تبخیر- تعرق واقعی با استفاده تصاویر MODIS و الگوریتم سبال. همایش ژئوماتیک، تهران، سازمان نقشه برداری کشور.

میر یعقوب زاده، م. ح.، سلیمانی، ک.، حبیب نژاد روشن، م.، شاهدهی، ک.، عباس‌پور، ک.، اخوان، س. ۱۳۹۳. تعیین و ارزیابی تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجش از دور (مطالعه موردی حوزه آبخیز تهر گلستان). مهندسی آبیاری و آب، ۴ (۱۵): ۱۰۲-۸۹.

Allen, R. G., Morse, A., Tasumi M. 2003. Application of SEBAL for western US rights regulation and planning. ICID workshop on remote sensing of ET for large regions.

Bashir, M. A., Hata, T., Tanakamaru, H., Abdelhadi, A. W., Tada, A. 2008. Satellite-based energy balance model to estimate seasonal evapotranspiration for irrigated sorghum: a case study from the Gezira scheme, Sudan. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12(4): 1129-1139.

Bastiaansen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., Holtslag, A. A. M. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *J. Hydrol.*, 212, 198-212.

Bastiaansen, W. G. M., Ahmad, M. D., Chemin, Y. 2002. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. *Water Resour. Res.*, 38 (12), 1273-1282.

Carrasco-Benavides, M., Ortega-Farías, S., Lagos, L. O., Kleissl, J., Morales, L., Poblete-Echeverría, C., Allen, R.G. 2012. Crop coefficients and actual evapotranspiration of a drip-irrigated Merlot vineyard using multispectral satellite images. *Irrig. Sci.*, 30:485-497.

Dugas, W. A., Fritschen, L. J., Gay, L. W., Held, A. A., Matthias, A. D., Reicosky, D. C., Steduto, P., Steiner, J. L. 1991. Bowen ratio, eddy correlation and portable chamber measurements of sensible and latent heat flux over irrigated spring wheat. *Agric. Meteorol.*, 56: 1-20.

FAO. 1998. Crop ET (guidelines for computing crop water requirements). *Irrigation and Drainage Paper No. 56*. Rome: FAO; p. 290.

برابر با ۰/۹۶ میلی متر بر روز تطابق خوبی را بین دو روش نشان می‌دهد. از آنجایی که نتایج یاد شده در مقیاس منطقه‌ای بوده و علاوه بر تغییرات زمانی، پراکندگی مکانی این پارامترها نیز برای کل شبکه آبیاری دشت برآورد شده است، می‌تواند به عنوان ابزار مناسبی در مدیریت مکانی منابع آبی و تخصیص بهینه منابع آب به هر نقطه از شبکه، مورد استفاده قرار گیرند.

## منابع

اکبری، م.، سیف، ز.، زارع ابیانه، ح. ۱۳۹۰. برآورد میزان تبخیر- تعرق واقعی و پتانسیل در شرایط اقلیمی مختلف با استفاده از سنجش از دور. آب و خاک، ۲۵ (۴): ۸۴۴-۸۳۵.

امیدوار، ج.، داوری، ک.، ارشد، ص.، موسوی بایگی، م.، اکبری، م.، فرید حسینی، ع. ۱۳۹۱. برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر سنجنده استر و مدل متریک. مهندسی آبیاری و آب، ۳ (۹): ۴۹-۳۸.

پورمحمدی، س.، دستورانی، م.، مختاری، م.، رحیمیان، م. ۱۳۸۹. تعیین و پهنه‌بندی تبخیر- تعرق واقعی توسط تکنیک سنجش از دور و الگوریتم سبال (مطالعه موردی: حوزه آبخیز منشاد در استان یزد). علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۲۱ (۴): ۳۰-۲۱.

دانش کار آراسته، پ.، تجربی، م.، ثقفیان، ب. ۱۳۸۴. تعیین دمای سطح با استفاده از فناوری سنجش از دور در منطقه سیستان. آب و آبخیز، ۲۹-۲۰.

علی اصغر زاده، ح.، ثنائی نژاد، س. ح. ۱۳۸۵. تخمین تبخیر و تعرق با استفاده از داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در حوضه آبخیز تنگ کنشت کرمانشاه. همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

غلامی سفیدکوهی، م. ع.، میرلطیفی، س. م.، محمدی، ک.، علیمحمدی، ع. ۱۳۸۹. برآورد ضریب گیاهی و تبخیر- تعرق واقعی گندم با استفاده از سنجش از دور، مطالعه موردی: حوضه گرگان‌رود. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۲ (۴): ۲۳۱-۲۲۲.

قمرنیا، ه.، رضوانی، س. و. ۱۳۹۳. محاسبه و پهنه‌بندی تبخیر- تعرق با استفاده از الگوریتم سبال (SEBAL) در غرب ایران (دشت میان‌دریند). آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۸ (۱): ۸۱-۷۲.

- ecohydrological restoration site: an energy balance and remote sensing approach. *J. Amer. Water Resour. Assoc.*, 42 (3): 565–582.
- Ogawa, S., Murakami, T., Ishitsuka, N., Saito, G. 1999. Evapotranspiration estimates from fine-resolution NDVI. National Institute of Agro-Environmental Science (Japan).
- Parodi, G. N. 2000. AVHRR hydrological analysis system. Algorithm and theory, Version 1.0, WRES, Netherlands.
- Rahimi, S., Gholami Sefidkouhi, M. A., Raeini-Sarjaz, M., Valipour, M. 2015. Estimation of actual evapotranspiration by using MODIS images (a case study: Tajan catchment). *Arch. Agron. Soil Sci.*, 61 (5): 695-709.
- Singh, R. K., Irmak, A. 2009. Estimation of crop coefficients using satellite remote sensing. *J Irrig Drain Eng ASCE*, 135(5):597–608.
- Singh, R. K., Irmak, A. 2011. Treatment of anchor pixels in the METRIC model for improved estimation of sensible and latent heat fluxes. *Hydrol. Sci. J.*, 56(5): 895–906.
- Stewart, J. L., Watts, C. J., Rodriguer, J. C., De Bruin, H. A. R., Van De Berg, A. R., Garatuza-Payan, J. 1999. Use of satellite data to estimate radiation and evaporation for Northwest Mexico. *Agric. Water Manage.*, 38: 181-193.
- Teixeira, A. D. C., Bastiaansen, W.G.M., Ahmad, M.D., Bos, M.G. 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the low-middle São Francisco river basin, Brazil. *Agric. Forest Meteorol.*, 149: 462–476.
- Testi, L., Villalobos, F. J., Orgaz, F. 2004. Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain. *Agric. For. Meteorol.*, 121(1–2): 1–18.
- United Nations Environment Programme (UNEP), Global Environmental Outlook 2000, Earthscan, London, 1999.
- Yang, Y. T., Shang, S. H., Jiang, L. 2012. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of north China. *Agric. Fores. Meteorol.*, 164: 112–122.
- Folhes, M. T., Renno, C. D., Soares, J. V. 2009. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. *Agric. Water Manage.*, 96(10): 1398–1408.
- French, A. N., Hunsaker, D. J., Thorp, K. R. 2015. Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. *Remote Sens. Environ.*, 158: 281-294.
- Galleguillos, M., Jacob, F., Prevot, L., Lagacherie, P., Liang, SL. 2011. Mapping daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 8(1): 168–172.
- Junior, P. F., Sousa, A. M., Vitorino, M. I., De Souza, E. B., De Souza, P. J. O. P. 2013. Estimate of evapotranspiration in eastern Amazonia using SEBAL. *Revista de Ciências Agrarias/Amazonian J. Agric. Environ. Sci.*, 56: 33–39.
- Kustas, W. P., Norman, J. M. 1996. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surface. *IAHS Hydrol. Sci. J.*, 41(4): 495–516.
- Kustas, W. P., Norman, J. M., Anderson, M. C., French, A. N. 2003. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship. *Remote Sens. Environ.*, 85: 429–440.
- Li, F., Lyons, T. J. 2002. Remote estimation of regional evapotranspiration. *Environ. Model. Softw.*, 17: 61-75.
- Marsal, J., Girona, J., Casadesus, J., Lopez, G., Stockle, C. O. 2013. Crop coefficient (Kc) for apple: comparison between measurements by a weighing lysimeter and prediction by CropSyst. *Irrig. Sci.* 31: 455–463.
- Michael, M. G., Bastiaansen, W. G. M. 2002. A new simple method to determine crop coefficients for water allocation planning from satellites: results from Kenya. *Irrig. Drain. Syst.*, 14: 237-256.
- Oberg, J. W., Melesse, A. M. 2006. Evapotranspiration dynamics at an

## Remotely sensed measurements of apple orchard actual evapotranspiration and plant coefficient using MODIS images and SEBAL algorithm (Case study: Ahar plain, Iran)

A. Rostami<sup>1</sup>, M. Raeini-Sarjaz<sup>\*2</sup>

Received: 18/07/2015

Accepted: 05/07/2016

### Abstract

Global warming and its consequence, climate change impede crop production in some regions. As Iran mainly consists of arid and semiarid regions and water scarcity is the main feature of such climates, decrease of the water shortage impacts is essential. Therefore, improvement of water resources management and increase of water use efficiency may be one of the main strategies to overcome these shortcomings. Precise evapotranspiration and crop water requirement estimation could beneficially improve cultivation management and water allocation. To precisely estimate actual evapotranspiration ( $ET_a$ ) of apple orchard trees at Ahar plain, East Azerbaijan province, MODIS images and SEBAL algorithm were employed. The energy balance equation was used to make calculations. SEBAL model calculates the energy balance equation parameters by using of surface temperature, surface reflectance and normalized difference vegetation index. Based on achieved data the actual evapotranspiration has an increasing trend toward middle of summer and the highest actual evapotranspiration value ( $10.1 \text{ mm d}^{-1}$ ) occurred on 18<sup>th</sup> July, 2014. The spatial distribution of crop indices and energy balance components revealed that southern part of the plain beside of having the highest crop density it has also the highest amount of evapotranspiration. Highly significant correlation ( $r = 0.92$ ) was found between SEBAL and Penman-Montieth-FAO estimated  $ET_a$  values. Meanwhile, t-test showed no significant difference between the two set of data with a RMSE value  $0.96 \text{ mm d}^{-1}$ . It could be concluded that regional estimation of ET based on remote sensing approach, may be used as an acceptable alternative to point methods for estimation of crop water requirement.

**Keywords:** Ahar, Evapotranspiration, Remote Sensing, SEBAL Model



<sup>1</sup> Ph. D. Candidate of Irrigation and Drainage, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

(\*Corresponding author email address: raeini@yahoo.com)

