



Integration of Landsat 8 Satellite Images and MODIS Sensor to Estimate Actual Crop Evapotranspiration of Maize During the Growing Period (Case Study: Mahidasht, Kermanshah Province)

H. Varvani¹, B. Farhadi Bansouleh^{2*}
and M.A. Sharifi³

Abstract

Evapotranspiration is one of the key components in the hydrological cycle and its quantification is essential to understand the processes such as vegetation phenological changes, environmental hazards such as floods and droughts, and, in general, the ecosystem water balance. Remote sensing methods based on surface energy balance are being more widely used to estimate evapotranspiration. The purpose of this study was to estimate the actual evapotranspiration of maize based on integration of Landsat 8 and MODIS satellite images using the SEBAL algorithm in Mahidasht, Kermanshah province. Linear with Zero Intercept (LinZi) method was used to integrate satellite images. Also, actual evapotranspiration of maize in 15 farms in the study area was estimated based on ground surface data. The results of the SEBAL algorithm were compared with ground-based actual evapotranspiration using MAE, BIAS and RMSE indices. The results indicated that the combination of satellite images has led to an improvement in the accuracy of estimated actual evapotranspiration compared with that obtained by Landsat 8 images. The mean absolute error of estimated actual evapotranspiration during the growing period was determined as 0.44 and 0.42 mm.day⁻¹ respectively based on Landsat 8 and combined images. In general, the results of this study showed that the estimation of actual evapotranspiration using the SEBAL algorithm and based on the integration of satellite images with different spatial and temporal resolutions could result in acceptable values.

Keywords: Energy Balance, Evapotranspiration, Linzi, Remote Sensing, SEBAL.

Received: May 19, 2018

Accepted: December 10, 2018

تلفیق تصاویر ماهواره Landsat 8 و سنجنده‌ی MODIS جهت برآورد تبخیر تعرق ذرت علوفه‌ای در دوره رشد (منطقه مورد مطالعه: ماهیدشت کرمانشاه)

هادی وروانی^۱، بهمن فرهادی بانسوله^{۲*} و محمدعلی شریفی^۳

چکیده

تبخیر و تعرق به عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی چرخه هیدرولوژیکی می‌باشد و کمی کردن مقادیر آن جهت درک فرایندهای اصلی از قبیل تغییرات فنولوژی پوشش گیاهی، خطرات زیست محیطی مانند سیلاب و خشکسالی، و به طور کلی بیلان آب اکوسیستم‌ها امری ضروری می‌باشد. استفاده از روش‌های مبتنی بر بیلان انرژی سطحی با استفاده از سنجنش از دور جهت تخمین تبخیر و تعرق بطور روز افزونی افزایش یافته است. هدف از پژوهش حاضر، تلفیق تصاویر لندست ۸ و مودیس با استفاده از الگوریتم سیال جهت برآورد تبخیر و تعرق گیاه ذرت در منطقه ماهیدشت کرمانشاه می‌باشد. به منظور تلفیق تصاویر ماهواره‌ای از روش خطی با عرض از مبدا صفر (LinZi) استفاده شد. همچنین، همزمان تبخیر و تعرق واقعی ذرت در ۱۵ مزرعه واقع در منطقه مورد مطالعه بر اساس داده‌های زمینی برآورد گردید. نتایج حاصل از الگوریتم سیال با برآوردهای زمینی تبخیر و تعرق با استفاده از آماره‌های MAE، BIAS و RMSE مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج بیانگر این بود که تلفیق تصاویر ماهواره‌ای منجر به بهبود دقت تبخیر و تعرق برآوردی نسبت به تصاویر لندست ۸ شده است. میانگین خطای مطلق تبخیر و تعرق برآوردی در طول دوره رشد بر اساس تصاویر لندست و تلفیق تصاویر به ترتیب ۰/۴۴ و ۰/۴۲ میلی‌متر در روز تعیین گردید. به طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از الگوریتم سیال و براساس تلفیق تصاویر با دقت‌های متفاوت زمانی و مکانی می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه دهد.

کلمات کلیدی: بیلان انرژی، تبخیر و تعرق، روش LinZi، سنجنش از دور، الگوریتم سیال.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۲/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۹/۱۹

1- Ph.D. Student of Irrigation and Drainage, Razi University, Kermanshah, Iran.

2- Assistant Professor, Water Engineering Department, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: bfarhadi2001@yahoo.com

3- Associate Professor, University of Twente, the Netherlands.

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه رازی.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی.

۳- دانشیار دانشگاه توتته، هلند.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

تبخیر و تعرق توسعه یافته‌اند (Ndou et al., 2017). از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به SEBS (Jia et al., 2003; Roerink et al., 1997) METRIC (Allen et al., 1998) و SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998) اشاره کرد. از این میان، سیال به عنوان یکی از الگوریتم‌های مناسب برای مقیاس‌ها و مناطق مختلف معرفی شده است و اساس آن معادله بیلان انرژی می‌باشد (Bastiaanssen et al., 1998; Compaoré et al., 2008; Ramos et al., 2009; Tang et al., 2013).

در طی سالیان اخیر محققان زیادی در داخل و خارج از کشور جهت برآورد تبخیر و تعرق از الگوریتم سیال استفاده کرده‌اند. ملک‌پور و همکاران (Malekpour et al., 2017) تبخیر و تعرق دشت قزوین را با استفاده از الگوریتم سیال و برای ۵ تصویر ماهواره لندست ۵ محاسبه کردند و نتایج را با داده‌های لایسیمتر زهکش‌دار موجود در منطقه مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان از دقت مناسب الگوریتم سیال در تخمین تبخیر تعرق بود. فرهادی بانسوله و همکاران (Farhadi-Bansouleh et al., 2016) تبخیر و تعرق واقعی ذرت در ماهیدشت را با استفاده از الگوریتم سیس و تصاویر لندست ۵ در فصل رشد ذرت در سال ۱۳۸۹ برآورد کردند. پورمحمدی و همکاران (Poormohammadi et al., 2016) تبخیر و تعرق را با استفاده از الگوریتم سیال و تلفیق تصاویر ماهواره‌ای مودیس و لندست در منطقه تویسرکان برآورد کرد. در نبود لایسیمتر از تبخیر و تعرق گردو و جو مندرج در سند ملی آب کشور برای ارزیابی نتایج مدل سیال استفاده کردند. از دیگر مطالعات انجام شده در این زمینه در داخل کشور نیز می‌توان به کریمی و همکاران (Karimi et al., 2012) اشاره کرد. گوشه‌گیر و همکاران (Goshehgir et al., 2018) به منظور برآورد تبخیر تعرق واقعی نیشکر در شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر با استفاده از الگوریتم سیال تصاویر لندست ۸ و مودیس را به روش گرام اشمیت در بازه زمانی ۱۶ روزه ادغام و نتایج را با روش لایسیمتری مقایسه کردند. میانگین تفاضل مطلق بین تبخیر تعرق واقعی برآورد شده با روش تلفیق تصاویر و لایسیمتر را ۰/۵۵ میلی‌متر در روز محاسبه کردند. سینگ و همکاران (Singh et al., 2014) به تلفیق تصاویر ۸ روزه مودیس با تصاویر لندست در حوضه آبریز کلرادو در آمریکا با استفاده از روش خطی با عرض از مبدا صفر (LinZI) به منظور برآورد تبخیر و تعرق واقعی پرداختند. نتایج آنها حاکی از همبستگی بالای تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده به روش تلفیق با روش کوواریانس اددی بود. ژو و همکاران (Zhou et al., 2014) تبخیر و تعرق برآورد شده با مدل‌های 3T، الگوریتم سیال و کوواریانس اددی را با هم مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که در بین مدل‌های مذکور، مدل دارای صحت و دقت بیشتر در برآورد تبخیر و تعرق بود. قمرنیا و همکاران

تبخیر و تعرق به عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی چرخه هیدرولوژیکی و تعادل انرژی در کره زمین می‌باشد و کمی کردن مقادیر آن جهت درک فرآیندهای اصلی شامل تغییرات فنولوژی پوشش گیاهی، خطرات زیست‌محیطی مانند سیلاب و خشکسالی، رواناب سطحی و تغذیه منابع آب زیرزمینی، بیلان آب اکوسیستم‌ها امری ضروری می‌باشد (Battude et al., 2017). تبخیر و تعرق شامل تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاهان می‌باشد که تحت عنوان نیاز آبی گیاه نیز نامیده می‌شود. تبخیر و تعرق به طور همزمان صورت گرفته و روش ساده‌ای برای تفکیک این دو فرآیند وجود ندارد. با افزایش رشد و سایه‌اندازی پوشش گیاهی، مقدار تابش ورودی به خاک کاهش می‌یابد به طوری که در آغاز رشد گیاه، آب به طور عمده، به صورت تبخیر از خاک خارج می‌شود، لیکن با کامل شدن پوشش گیاهی، تعرق جزء اصلی فرآیند تبخیر-تعرق است (Han et al., 2016). به هر حال کمی کردن تبخیر و تعرق به عنوان یکی از مسائل پیچیده در چرخه هیدرولوژی با فاکتورهای زیاد محیطی و اقلیمی قلمداد می‌شود. روش‌های میدانی اندازه‌گیری تبخیر و تعرق مانند روش بیلان آب خاک و روش نسبت باوون به شدت هزینه‌بر و زمان‌گیر هستند (Droogers, 2000). علاوه بر این روش‌های مذکور صرفاً برای مناطق کوچک از چند ده متر تا نهایتاً چند کیلومتر کاربرد دارند.

در طی دو دهه اخیر روش‌های مبتنی بر سنجش از دور جهت تخمین تبخیر و تعرق به دلیل پیشرفت‌های زیاد در محاسبات کامپیوتری و همچنین کاربرد آن در مساحت‌های زیاد رشد قابل توجهی داشته است (Liou and Kar, 2014). تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مختلف وجود دارند. معمولاً تصاویر با دوره بازگشت کمتر دارای قدرت تفکیک مکانی پایینی هستند و تصاویر با قدرت تفکیک مکانی متوسط و بالا دوره بازگشت طولانی‌تری دارند. تصاویر سنجنده مودیس (با دوره بازگشت روزانه و قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر در باند حرارتی) و ماهواره لندست ۸ (با دوره بازگشت ۱۶ روزه و قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰ متر در باندهای حرارتی) از رایج‌ترین تصاویر ماهواره‌ای جهت برآورد تبخیر و تعرق می‌باشند. تلفیق این تصاویر به منظور تهیه داده‌های مربوط به تبخیر و تعرق به صورت سری زمانی و استفاده از مزایای هر دو تصویر در برآورد تبخیر و تعرق نیز در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (Singh et al., 2014). الگوریتم‌های مختلفی براساس معادله بیلان انرژی سطحی جهت برآورد شارهای سطحی با استفاده از متغیرهای سنجش از دور نظیر دمای سطح زمین، آلبیدوی سطحی و همچنین پوشش گیاهی و نوع پوشش زمین در ارتباط با داده‌های هواشناسی به منظور برآورد

برگ بوته‌های برداشت شده در آزمایشگاه اندازه‌گیری و بر اساس آن شاخص سطح برگ برای هر مزرعه در روز نمونه‌برداری تعیین شد.

۲-۲- محاسبه نیاز آبی واقعی ذرت (تبخیر و تعرق واقعی)

ابتدا تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع با استفاده از روش پنمن-مانیت (Allen et al., 1998) با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه ماهیدشت محاسبه شد. سپس مقادیر ضریب گیاهی (Kc) در هر بازدید برای هر مزرعه از روش شاخص سطح برگ (Kang et al., 2003; Li and Lyons, 2002) محاسبه گردید. رابطه بین ضریب گیاهی و شاخص سطح برگ برای ذرت در منطقه مورد مطالعه قبلاً توسط بافکار و همکاران (Bafkar et al., 2013) تعیین شده است. مقدار تبخیر و تعرق واقعی گیاه ذرت از حاصل ضرب تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع در ضریب گیاهی محاسبه شد و مجموع آن برای دوره رشد برای هر مزرعه برآورد شد.

۲-۳- تصاویر ماهواره‌ای و پیش‌پردازش

در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنجنده مودیس ماهواره ترا در دوره رشد گیاه ذرت (از اول خرداد تا اوایل مهر ۱۳۹۴) استفاده شد. تصاویر هر دو ماهواره از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا (USGS) رایگان دانلود گردید. ماهواره لندست ۸ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در بخش نوری (سنجنده OLI) و ۱۰۰ متر در بخش حرارتی با شماره گذر ۱۶۷ و ردیف ۳۶، هر ۱۶ روز یکبار و تصاویر سنجنده مودیس با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ و ۱۰۰۰ متر به ترتیب در باندهای نوری و حرارتی، و با شماره گذر h22 و شماره ردیف v05، به صورت روزانه از منطقه تصویربرداری می‌کند. هر هشت تصویر ماهواره لندست ۸ در طول دوره رشد گیاه ذرت و تعداد ۳۲ تصویر سنجنده مودیس (با فاصله زمانی چهار روز) در این دوره جهت برآورد نیاز آبی ذرت تحلیل شد. پیش‌پردازش‌های لازم از قبیل تصحیحات رادیومتریکی بر روی تصاویر قبل از اجرای الگوریتم سبال اعمال شد.

۲-۴- برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از الگوریتم سبال

الگوریتم سبال یک مدل پردازش تصویر است که تبدیلات انرژی در سطح زمین و تبخیر و تعرق را به عنوان جزئی از بیلان انرژی در هر پیکسل محاسبه می‌کند. بر اساس اینکه ذخیره و یا هدر رفت انرژی در تاج پوشش بسیار ناچیز است بیلان انرژی سطحی می‌تواند از معادله ۱ محاسبه شود:

$$LE=Rn-G-H \quad (1)$$

(Ghamarnia et al., 2017) با محاسبه تبخیر و تعرق واقعی گیاه ذرت بر اساس تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و الگوریتم سبال ضریب گیاهی ذرت را در دشت منتهی به سراب نیلوفر کرمانشاه محاسبه کردند. یانگ و همکاران (Yang et al., 2015) میزان مصرف آب در مزارع ذرت در فصل تابستان و در مزارع گندم در فصل زمستان در کشور چین را بر اساس الگوریتم سبال محاسبه کردند. نتایج آنها نشان داد که ارتباط زیادی بین تبخیر و تعرق با دمای سطح زمین و شاخص NDVI و همچنین ارتباط زیادی بین فنولوژی گیاه در سطوح مختلف مزارع با میزان تبخیر و تعرق وجود داشت. محققان دیگری نیز با استفاده از روش‌های سنجش از دور و همچنین الگوریتم سبال به محاسبه تبخیر و تعرق در سطوح مختلف پرداختند (Battude et al., 2017; Lin et al., 2011; Moiwo et al., 2011). از این رو تحقیق حاضر برآن شد تا با استفاده از تلفیق تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و مودیس و الگوریتم سبال به برآورد تبخیر و تعرق از سطح مزارع ذرت علفه‌ای در ماهیدشت کرمانشاه بپردازد.

۲- روش تحقیق

به طور کلی پژوهش حاضر بر ۶ مرحله استوار است که به ترتیب شامل: ۱- بررسی‌های میدانی جهت انتخاب مزارع ذرت و جمع‌آوری داده‌های زمینی، ۲- محاسبه تبخیر و تعرق مزارع ذرت مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از رابطه پنمن-مانیت، ۳- برآورد تبخیر و تعرق ذرت در طول دوره رشد با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و مودیس، ۴- ارزیابی نتایج الگوریتم سبال با استفاده از معیارهای ارزیابی عملکرد، ۵- تلفیق تصاویر ماهواره‌ای و تخمین تبخیر و تعرق (برای روزهای عدم وجود تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸) به منظور ایجاد سری زمانی از داده‌های تبخیر و تعرق و ۶- محاسبه نیاز آبی گیاه ذرت برای دوره رشد می‌باشد.

۲-۱- نمونه‌برداری‌های میدانی

نمونه‌برداری مزرعه‌ای به منظور برداشت شاخص سطح برگ در زمان گذر ماهواره لندست ۸ از منطقه مطالعاتی انجام گرفت. برای این منظور تعداد ۱۵ مزرعه از مزارع کشاورزان که مالکین آنها برای همکاری در اجرای این مطالعه اعلام آمادگی نمودند انتخاب شد. در هر بازدید با توجه به اندازه پیکسل‌ها، پلاتی به ابعاد ۳۰ متر در ۳۰ متر از مزارع ذرت جهت نمونه‌برداری انتخاب شد. سپس در مرکز هر پلات، زیر پلاتی مربعی به ابعاد یک متر در یک متر انتخاب شد. با توجه به اینکه امکان برداشت کل محصول در هر زیر پلات نبود در هر زیر پلات، تعداد بوته‌های موجود در سطح کل مربع در نظر گرفته شد و سپس ۴ بوته ذرت از اضلاع مربع برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. سطح

میانگین (MAE)، میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (r) و شاخص بایاس (BIAS) استفاده شد (معادله‌های ۳ تا ۶).

$$MAE = \sum_{i=1}^N |ET_{S_i} - ET_i| / N \quad (3)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (ET_{S_i} - ET_i)^2}{N} \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$BIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (ET_{S_i} - SET_{S_i}) * 100}{\sum_{i=1}^N (ET_{S_i})} \right] \quad (5)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (ET_{S_i} - \overline{ET_S})(ET_i - \overline{ET})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (ET_{S_i} - \overline{ET_S})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (ET_i - \overline{ET})^2}} \quad (6)$$

در این معادله‌ها ET_{S_i} برآورد ماهواره‌ای تبخیر و تعرق برای تصویر روز i ، ET_i تبخیر و تعرق واقعی مبتنی بر داده‌های زمینی در روز i ، $\overline{ET_S}$ متوسط تبخیر و تعرق برآورد شده بر اساس تصاویر ماهواره‌ای، \overline{ET} متوسط تبخیر و تعرق واقعی مبتنی بر داده‌های زمینی و N تعداد تصویر (روز) بررسی شده است.

۳- منطقه‌ی مورد مطالعه

بخش ماهیدشت واقع در استان کرمانشاه دارای دو دهستان (ماهیدشت و چقا نرگس) و ۱۱۸ پارچه آبادی دارای سکنه می‌باشد که شهر ماهیدشت تنها نقطه شهری آن محسوب می‌شود. این بخش از لحاظ مورفولوژی بنام دشت ماهیدشت شناخته می‌شود و بین طول‌های ۳۷° ۴۶° تا ۴۷° ۰۲' شرقی و عرض‌های ۳۴° ۰۴' تا ۳۴° ۲۷' شمالی با مساحتی بالغ بر ۷۹۵ کیلومتر مربع واقع شده است. ارتفاع منطقه بین ۱۳۱۵ تا ۲۱۷۸ متر از سطح دریا متغیر می‌باشد. در این منطقه کشت‌های آبی و دیم رایج می‌باشد. محصولات پاییزه (گندم، جو و نخود) عمدتاً به صورت دیم و محصولات بهاره به صورت آبی کشت می‌شوند.

۴- نتایج

۴-۱- نیاز آبی ذرت بر اساس داده‌های زمینی

نتایج مربوط به محاسبه تبخیر و تعرق مبتنی بر اندازه‌گیری‌های زمینی برای مزرعه شماره‌ی ۱۳ در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که از جدول ۱ پیداست در اوایل دوره رشد مقدار شاخص سطح برگ و همچنین تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع کم می‌باشد. حداکثر مقدار تبخیر و تعرق واقعی در این مزرعه در بازدید شماره ۴ بود و بعد از آن روند کاهشی آن به خود گرفته است، به طوری‌که در انتهای دوره رویشی

در این معادله R_n : تابش خالص (با استفاده از آلبیدو و قابلیت انتقال حاصل از باندهای موج کوتاه و نشر موج بلند باندهای حرارتی محاسبه می‌شود)، G : شار گرمای خاک (با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی محاسبه می‌شود)، H : شار گرمای محسوس (با توجه به دمای سطح و سرعت باد، زبری سطح و اختلاف دمای سطح - هوا محاسبه می‌گردد) و LE : شار گرمای نهان می‌باشد. در نهایت، تبخیر و تعرق با تقسیم LE بر گرمای نهان تبخیر (λ) به دست می‌آید که مقداری لحظه‌ای است. لازم به ذکر است که الگوریتم سیال به تفصیل در مقالات مختلف ارائه شده است و در اینجا از تشریح مجدد و ارائه روابط متعدد این الگوریتم پرهیز شده است (Allen et al., 2011; Long and Singh, 2010).

۲-۵- تلفیق نتایج لندست و مودیس

از نظر تئوری، تبخیر- تعرق واقعی برآورد شده با استفاده از تصاویر لندست باید در سطوح همگن همانند تبخیر- تعرق برآورد شده با استفاده از تصاویر مودیس باشد. البته ممکن است اندکی تفاوت ناشی از قدرت تفکیک مکانی، هندسه دید و خورشیدی، زمان اخذ تصویر، تصحیح اتمسفری، پهنای باند سنجنده، خطای زمینی و برآورد تشعشع وجود داشته باشد. با توجه به اینکه بیشتر پیکسل‌های موجود در یک تصویر ممکن است همگن نباشند، از این‌رو فرض شد که رابطه خطی با فاصله از مبدا صفر، بین تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده مودیس و لندست وجود دارد. بنابراین، به منظور تلفیق تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده با تصاویر لندست و مودیس از روش LinZI (Singh et al., 2014) استفاده شد (معادله ۲):

$$L(x_i, y_i, t_k) = \alpha * M(x_i, y_j, t_k) \quad (2)$$

در این معادله، $L(x_i, y_i, t_k)$ تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده با استفاده از تصویر لندست برای پیکسل (x_i, y_j) و دوره زمانی t_k (روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه)، α یک فاکتور ضربی و $M(x_i, y_j, t_k)$ تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده با استفاده از تصویر مودیس برای همان موقعیت و دوره زمانی است. پس از تلفیق برآوردهای لندست و مودیس، مقدار متناظر تبخیر و تعرق برای روزهایی که از لندست تصویر در دسترس نبود نیز به دست آمد (هر چهار روز یکبار) و در نهایت مقدار کل نیاز آبی برای دوره رشد (دوره زمانی مورد مطالعه) گیاه ذرت محاسبه شد. بنابراین داده‌های تبخیر و تعرق برای دوره‌های زمانی ۴ روزه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰ متر برای مزارع مختلف استخراج شدند.

۲-۶- ارزیابی عملکرد الگوریتم سیال

جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم سیال از معیارهای آماری خطای مطلق

حداکثر تبخیر و تعرق محاسبه شده برای مزارع ذرت در طول دوره رشد ۸/۷۹ میلی‌متر در روز بود.

۳-۴- ارزیابی عملکرد تبخیر و تعرق روزانه تصاویر لندست ۸

در جدول ۲ شاخص‌های ارزیابی عملکرد تبخیر و تعرق برآورد شده با الگوریتم سبال و تصویر لندست ۸ ارائه شده است. بر اساس نتایج این بخش، ضریب همبستگی بین تبخیر و تعرق برآورد شده با استفاده از تصاویر لندست (در روزهای مختلف از دوره رشد) با مقادیر برآورد شده مبتنی بر داده‌های زمینی، بین ۰/۴۶ تا ۰/۸۴ (به طور متوسط ۰/۶۲) می‌باشد که بیانگر توافق خوب برای اندازه‌گیری‌های زمینی و برآوردهای حاصل از تصاویر لندست ۸ و قابل اعتماد بودن نتایج الگوریتم سبال بود. براساس مقادیر حاصل از شاخص‌های MAE و RMSE (هر دو بیانگر متوسط شدت خطا هستند ولی RMSE وزن بیشتری به خطاهای بزرگتر می‌دهد) حداکثر مقدار خطا در روز ۲۲۲ام میلادی و برابر با ۰/۹۲ میلی‌متر در روز می‌باشد.

نیز تقریباً برابر با ابتدای دوره رشد می‌باشد. قابل ذکر است که در برخی از مزارع (از جمله مزرعه ۱، تحت مدیریت نامطلوب آبیاری) نبود مقادیر شاخص سطح برگ پایین‌تر و در نتیجه تبخیر و تعرق واقعی نیز کم بود. با توجه به تبخیر و تعرق تعیین شده در بازدهی‌های مختلف مجموع میزان آب مصرفی در طول دوره رشد برای مزارع منتخب محاسبه گردید. مقادیر حداقل، متوسط، حداکثر و انحراف معیار تبخیر و تعرق فصلی در ۱۵ مزرعه مورد مطالعه به ترتیب ۵۰۵، ۶۰۲، ۷۲۳ و ۶۳ میلی‌متر محاسبه گردید.

۲-۴- نیاز آبی بر اساس تصاویر لندست ۸

شکل ۱ تبخیر و تعرق واقعی روزانه (میلی‌متر در روز) برآورد شده را براساس تصاویر لندست ۸ در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. بر اساس این نقشه‌ها بیشترین مقادیر تبخیر و تعرق در نواحی مرکزی دشت (به دلیل وجود اراضی آبی) و مناطق حاشیه غربی (عمدتاً پوشش جنگلی دارد) مشاهده می‌شود. مزارع مورد مطالعه نیز در مناطقی از دشت هستند که تبخیر تعرق آن بالا می‌باشد. با توجه به شکل ۱،

Table 1- The amount of consumed water by maize based on the field measurements in farm No. 13

جدول ۱- میزان آب مصرفی ذرت براساس اندازه‌گیری‌های میدانی در مزرعه شماره ۱۳

Visit Number	Julius day	Day after the cultivation	Leaf area index	Kc	ETo (mm/day)	ET (mm/day)
First	142	22	0.17	0.44	5.8	2.54
Second	158	38	0.95	0.55	7.2	3.98
Third	174	54	2.86	0.78	8.1	6.3
Fourth	190	70	5.62	1.08	7.2	7.84
Fifth	206	84	5.85	1.07	6.6	7.1
Sixth	222	102	3.17	0.79	6.0	4.73
Seventh	238	118	1.09	0.58	7.0	4.04
Eighth	254	134	0.22	0.44	6.3	2.79

Table 2- Performance assessment indicators of estimated evapotranspiration based on Landsat 8 images

جدول ۲- شاخص‌های ارزیابی عملکرد تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده با تصاویر لندست ۸

Julius day	RMSE	MAE	R ²	Bias
142	0.27	0.17	0.71	0.05
158	0.49	0.40	0.66	-0.17
174	0.4	0.38	0.46	0.12
190	0.19	0.47	0.52	0.53
206	0.73	0.58	0.56	0.3
222	0.92	0.71	0.46	0.48
238	0.79	0.54	0.74	0.33
254	0.44	0.30	0.84	-0.04
Average	0.53	0.44	0.62	0.2

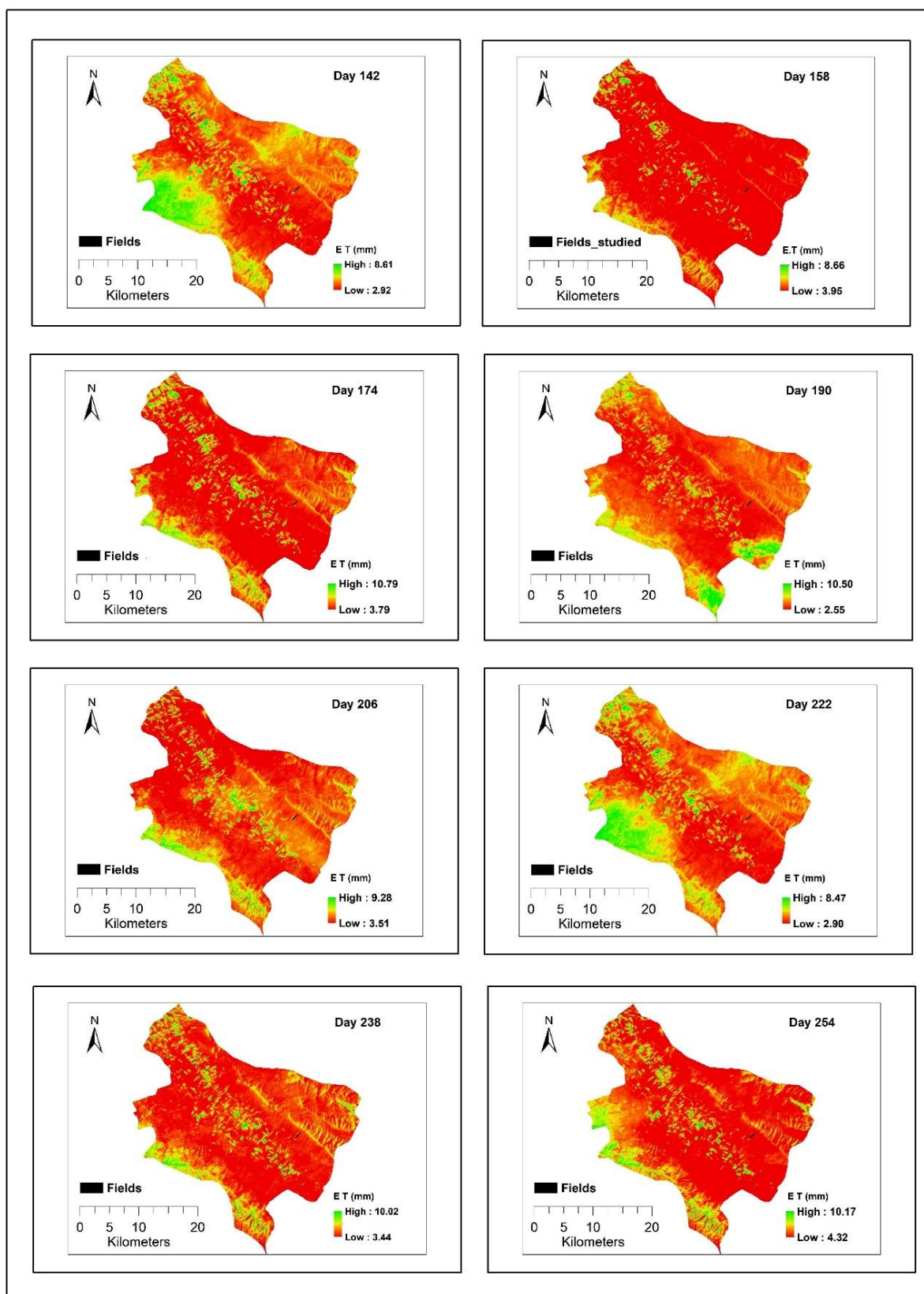


Fig. 1- Estimated daily actual evapotranspiration based on Landsat 8 images (mm / day)

شکل ۱- تبخیر و تعرق واقعی روزانه برآورد شده بر اساس تصاویر لندست ۸ (میلی‌متر در روز)

۴-۴- تلفیق تصاویر لندست و مودیس و ارزیابی عملکرد تبخیر و تعرق روزانه

تلفیق برآوردهای لندست و مودیس با استفاده از روش LinZI (معادله ۲) انجام گرفت، تا برای روزهایی که تصویر لندست در دسترس نبود نیز بتوان نیاز آبی را برآورد نمود. نتایج حاصل از ارزیابی برای روزهای عدم وجود تصویر لندست در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به مقادیر همبستگی میان این برآوردها و مقادیر زمینی نیز بین ۰/۱۷ تا ۰/۸۷ و بطور متوسط ۰/۵۶ بدست آمد که بیانگر مطلوب بودن عملکرد الگوریتم برای تلفیق بود. همچنین، متوسط مقادیر RMSE و MAE به ترتیب برابر با ۰/۶ و ۰/۴۵ نیز بیانگر کارایی مطلوب الگوریتم می‌باشد. متوسط مقادیر شاخص Bias نیز برابر ۰/۰۰۷- بود که نشان دهنده کمی برآوردی مدل نسبت به داده‌های واقعی بود.

۴-۵- نیاز آبی گیاه ذرت برای دوره رشد و ارزیابی عملکرد آن

در شکل ۲ نیاز آبی دوره رشد در محدوده مورد مطالعه براساس سنجنده‌های لندست ۸ و تلفیق آن با مودیس نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور اراضی تحت کشت پاییزه، (در دوره مورد مطالعه بایر بوده‌اند) و همچنین مناطق کوهستانی بدون پوشش گیاهی (که بیشتر اراضی منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شوند) دارای مقادیر تبخیر و تعرق کم بودند. مقادیر بالای تبخیر و تعرق در مناطق تحت کشت آبی و جنگلی مشاهده گردید. در بین گیاهان کشت شده در منطقه مورد مطالعه، ذرت علوفه‌ای نیاز آبی بیشتری دارد. بنابراین مقادیر بالای تبخیر و تعرق در این نقشه‌ها مربوط به اراضی تحت کشت ذرت بودند (مزارع ۱۵ گانه مورد مطالعه نیز در این مناطق قرار گرفته‌اند). حداکثر مقدار تبخیر و تعرق در دوره مورد مطالعه با استفاده از تصاویر لندست ۸ (با فاصله زمانی ۱۶ روز) برابر با ۶۵۲ میلی‌متر تعیین گردید. همچنین، نتایج مربوط به مقادیر تبخیر و تعرق بعد از تلفیق تصاویر

ماهواره‌ای (فاصله زمانی ۴ روز) نشان داد که مقادیر مربوطه به ۸۲۸ میلی‌متر افزایش یافت.

در جدول ۴ شاخص‌های ارزیابی عملکرد تبخیر و تعرق فصلی برآورد شده با الگوریتم سبال ارائه شده است. نتایج بیانگر این بود که تبخیر و تعرق برآورد شده فصلی بر اساس تلفیق تصاویر لندست و مودیس به واقعیت نزدیکتر بود. مقدار شاخص‌های آماری MAE و RMSE برای تبخیر و تعرق برآوردی با استفاده از تصاویر لندست به ترتیب ۱۱۷/۶ و ۹۹/۸ میلی‌متر بود، در حالیکه بعد از تلفیق تصاویر مقدار این شاخص‌ها به ترتیب ۲۰/۲ و ۱۲/۳ میلی‌متر بود که بیانگر دقت بیشتر تبخیر و تعرق فصلی برآورد شده با تلفیق تصاویر بود. همچنین، مقادیر بالای ضریب همبستگی تلفیق نسبت به تصاویر لندست و مودیس نیز مؤید کارایی مدل تلفیق می‌باشد. همچنین، در شکل ۳ نمودار رابطه را برای تبخیر و تعرق برآوردی بر اساس تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و مودیس و همچنین تلفیق آنها برای کل دوره رشد ذرت علوفه‌ای (در مزارع مورد مطالعه) نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که مقادیر برآورد شده بر اساس تلفیق تصاویر به خط ۱:۱ نزدیکتر می‌باشد.

۵- جمع بندی

تخمین تبخیر تعرق واقعی با دقت قابل قبول در فواصل زمانی کوتاه می‌تواند به مدیریت، ارزیابی و برنامه‌ریزی منابع آب کمک قابل توجهی داشته باشد. یکی از محدودیت‌های تخمین تبخیر- تعرق با استفاده از تصاویر لندست، عدم دسترسی به تصاویر بدون ابر لندست می‌باشد. چنانچه فاصله زمانی برای تصاویر بدون ابر لندست زیاد باشد ممکن است برخی وقایع آبیاری توسط نقشه‌های مربوط به تبخیر و تعرق واقعی در نظر گرفته نشود.

Table 3- Performance assessment indicators of estimated actual evapotranspiration for days of absence of Landsat 8 images

جدول ۳- شاخص‌های ارزیابی عملکرد تبخیر و تعرق برآورد شده در روزهای عدم وجود تصاویر لندست ۸

Julius Day	RMSE	MAE	R ²	Bias	Julius day	RMSE	MAE	R ²	Bias
146	0.39	0.30	0.17	-0.10	202	0.69	0.37	0.44	0.07
150	0.46	0.38	0.46	0.22	210	0.89	0.67	0.33	-0.76
154	0.31	0.24	0.84	0.12	214	0.43	0.31	0.52	0.56
166	0.31	0.20	0.64	-0.53	218	0.49	0.35	0.24	-0.48
170	1.09	0.46	0.87	-0.48	226	0.43	0.71	0.20	-0.13
178	0.60	0.49	0.46	0.12	230	0.55	0.40	0.69	0.51
182	0.51	0.46	0.66	0.41	234	0.34	0.36	0.90	0.048
186	0.67	0.51	0.79	0.08	242	0.58	0.52	0.35	0.86

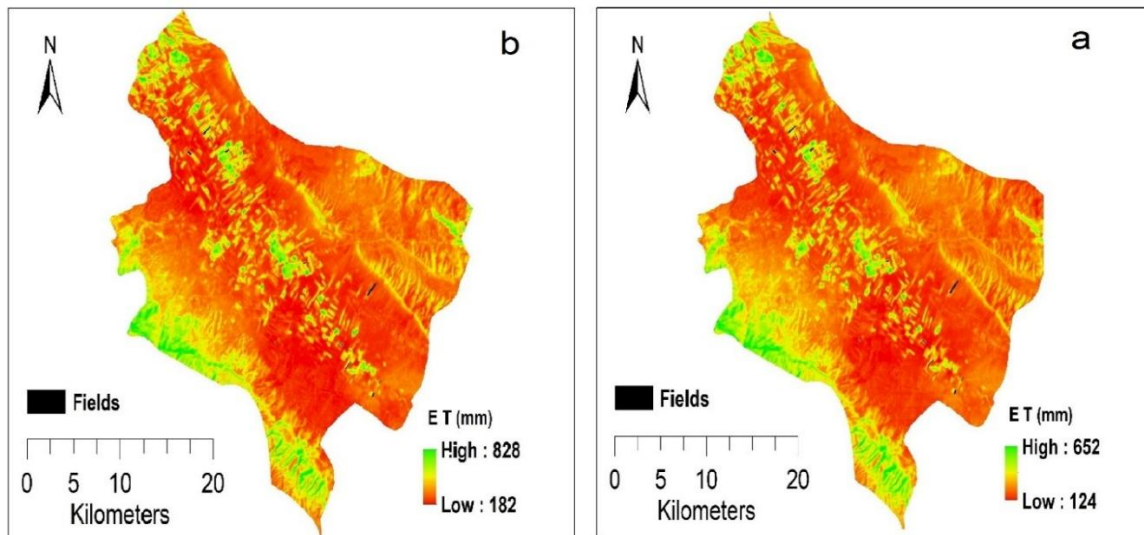


Fig. 2- Total crop water use during the studied period estimated based on a) Landsat 8 and b) integration of Landsat 8 and MODIS

شکل ۲- مجموع آب مصرفی واقعی در دوره مورد مطالعه برآورد شده بر اساس (a) تصویر لندست ۸ و (b) تلفیق تصاویر لندست ۸ و مودیس

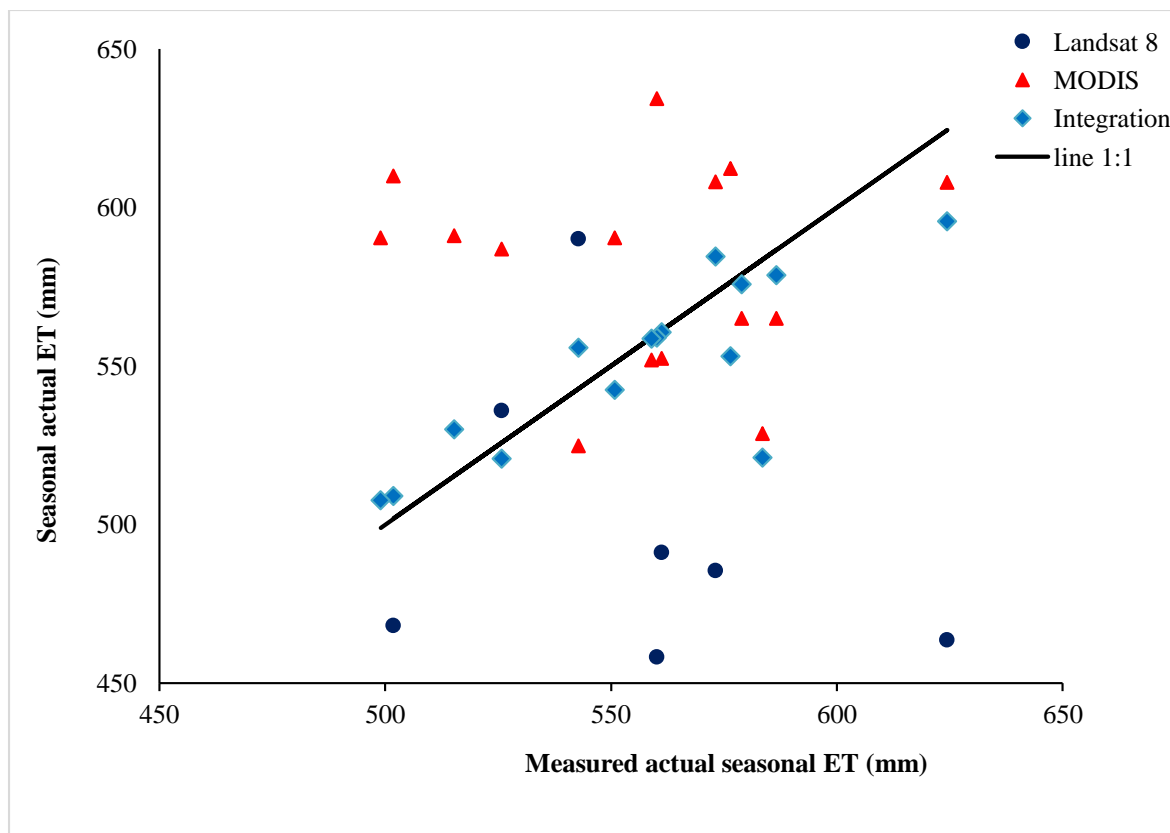


Fig. 3- Estimated values of seasonal actual evapotranspiration based on Landsat 8, MODIS and the integration of images versus field based evapotranspiration

شکل ۳- تبخیر و تعرق واقعی فصلی برآورد شده بر اساس تصاویر لندست ۸، سنجنده‌ی مودیس و تلفیق تصاویر در مقابل تبخیر و تعرق واقعی مبتنی بر اندازه‌گیری زمینی

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M and Ab W (1998) Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Irrigation and Drainage, ISBN 92-5-104219-5

Bafkar A, Farhadi B and Karimi AR (2013) Estimation of crop coefficients (KC) of grain corn S.C. 704 using the physiological properties (Case study: Kermanshah- Mahidsht). Journal of Water and Soil 27(4):832-838 (In Persian)

Bastiaanssen W, Pelgrum H, Wang J, Ma Y, Moreno JF, Roerink GJ and van der Wal T (1998) A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Journal of Hydrology 212-213:213-229

Battude M, Al A, Brut A, Tallec T, Huc M, Cros J, Weber J, Lhuissier L and Simonneaux V (2017) Modeling water needs and total irrigation depths of maize crop in the south west of France using high spatial and temporal resolution satellite imagery. Agricultural Water Management 189:123-136

Compaoré H, Hendrickx JMH, Hong S, Friesen J, van de Giesen NC, Rodgers C, Szarzynski J and Vlek PLG (2008) Evaporation mapping at two scales using optical imagery in the White Volta Basin, Upper East Ghana. Physics and Chemistry of the Earth 33:127-140

Droogers P (2000) Estimating actual evapotranspiration using a detailed ago-hydrological model. Journal of Hydrology 229(1-2):50-58

Farhadi-Bansouleh B, Karimi AR, and Hesadi H (2016) Estimation of actual evapotranspiration in Mahidasht using SEBS algorithm and LANDSAT images. Journal of Water and Soil 30(3):706-716 (In Persian)

Ghamarnia H, Gholamian SM and Kamali N (2017) Estimating of crop coefficient and actual evapotranspiration of Corn using LANDSAT8 images (Case study: Sarab Nilufar plain in Kermanshah). Iran-Water Resources Research 12(4):93-107 (In Persian)

Goshehghir AS, Golabi M and Naseri AA (2018) Comparison of actual evapotranspiration estimated using Gram-Schmidt method and SEBAL algorithm with lysimeteric data (Case study; Amir Kabir sugarcane argo-industry company). Iran-Water Resources Research 14(1):125-139 (In Persian)

Han M, Zhang H, Dejonge KC, Comas LH and Trout TJ (2016) Agricultural water management estimating maize water stress by standard deviation of canopy temperature in thermal imagery. Agricultural Water Management 177:400-409

Jia L, Su ZB, van den Hurk B, Menenti M, Moene A, De Bruin HAR, Yrisarry JJB, Ibanez M and Cuesta A

Table 4- Performance assessment indicators of estimated actual seasonal evapotranspiration
جدول ۴- شاخص‌های ارزیابی عملکرد تبخیر و تعرق واقعی فصلی برآورد شده

Image	RMSE	MAE	Bias	R ²
MODIS	53.8	41.4	25.28	0.07
Landsat 8	117.6	99.8	-98.8	0.1
Integration	20.2	12.3	-5.8	0.66

همچنین، وقایع مربوط به تنش آبی در فاصله زمانی که تصویر بدون اثر لندست وجود ندارد ممکن است به منظور تهیه نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی برداشت نشود. از این رو ترکیب تصاویر مودیس (با قدرت تفکیک زمانی مناسب) و لندست (با قدرت تفکیک مکانی مناسب) مزایای زیادی را در تخمین تبخیر و تعرق واقعی ایجاد می‌کند. رویکرد ارائه شده در پژوهش حاضر تلفیق تصاویر مودیس و لندست به کمک روش LinZI به منظور تخمین نیاز آبی گیاه ذرت علوفه‌ای طی دوره رشد در ۱۵ مزرعه در ماهیدشت کرمانشاه بود. نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که تبخیر و تعرق برآوردشده در منطقه مورد مطالعه با کاربرد مدل سبال و اطلاعات سنجنده‌ها با قدرت تفکیک مکانی-زمانی متفاوت، از دقت کافی برخوردار است. بطوریکه نقشه‌های حاصل از مدل تلفیقی (با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰ متر و قدرت تفکیک زمانی ۴ روز) بیانگر دقت قابل قبول آن جهت برآورد تبخیر و تعرق و نیاز آبی نسبت به شرایط استفاده از یک سنجنده (لندست ۸ یا مودیس) بود. همانطور که Singh et al. (2014) و Long and Singh (2010) نیز بر این موضوع تأکید داشتند. مقایسه نتایج حاصل از نتایج نیاز آبی برآورد شده برای کل دوره رشد با مشاهدات زمینی، بیانگر دقت قابل قبول آن بود. قابلیت الگوریتم سبال تاکنون در مطالعات متعددی مورد تأکید قرار گرفته است و در این مطالعه نیز نشان حاکی از عملکرد الگوریتم سبال در برآورد نیاز آبی بود. به طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از مدل‌های سنجنش از دور و براساس تلفیق تصاویر با دقت‌های متفاوت زمانی و مکانی می‌توانند نتایج قابل قبول را ارائه دهد و نتایج آنها در تعیین مصرف آب کشاورزی، مدیریت اراضی، مدیریت منابع آب و مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گیرد.

۶- مراجع

Allen R, Irmak A, Trezza R, Hendrickx JMH, Bastiaanssen W and Kjaersgaard J (2011) Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. Hydrological Processes 25(26):4011-4027

- based dry season potential evapotranspiration in the upper Molopo River Catchment, South Africa. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 21(3):237-248
- Poormohammadi S, Dastorani MT, Masah Bavani AR, Jafari H and Rahimian MH (2016) Application of mountain SEBAL and MODIS imagery for estimation of catchment actual evapotranspiration (Case study: Tuyserkhan catchment, Hamedan, Iran). *Journal of Water and Soil Conservation* 22(5):1-21 (In Persian)
- Ramos JG, Cratchley CR, Kay JA, Casterad MA, Martínez-Cob A and Domínguez R (2009) Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using ground-meteorological data available for the Flumen District into the Ebro Valley of N.E. Spain. *Agricultural Water Management* 96(4):638-652
- Roerink GJ, Bastiaanssen WGM, Chambouleyron J and Menenti M (1997) Relating crop water consumption to irrigation water supply by remote sensing. *Water Resources Management* 11(6):445-465
- Singh RK, Senay GB, Velpuri NM, Bohms S and Verdin JP (2014) On the downscaling of actual evapotranspiration maps based on combination of MODIS and landsat-based actual evapotranspiration estimates. *Remote Sensing* 6(11):10483-10509
- Tang RL, Li ZL, Chen KS, Jia YY, Li CR and Sun XM (2013) Spatial-scale effect on the SEBAL model for evapotranspiration estimation using remote sensing data. *Agricultural and Forest Meteorology* 174:28-42
- Yang JY, Mei XR, Huo ZG, Yan CR, Ju H, Zhao FH and Liu Q (2015) Water consumption in summer maize and winter wheat cropping system based on SEBAL model in Huang-Huai-Hai Plain, China. *Journal of Integrative Agriculture* 14(10):2065-2076
- Zhou X, Bi S, Yang Y, Tian F and Ren D (2014) Comparison of ET estimations by the three-temperature model, SEBAL model and eddy covariance observations. *Journal of Hydrology* 519(PA):769-776
- (2003) Estimation of sensible heat flux using the Surface Energy Balance System (SEBS) and ATSR measurements. *Physics and Chemistry of the Earth* 28(1-3):75-88
- Karimi A, Farhadi Bansouleh B and Hesadi H (2012) Estimation of regional evapotranspiration using LANDSAT TM images and SEBAL algorithm. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 6(4):353-364 (In Persian)
- Kang S, Gu B, Du T and Zhang J (2003) Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. *Agricultural Water Management* 59:239-254
- Li F and Lyons TJ (2002) Remote estimation of regional evapotranspiration. *Environmental Modelling & Software* 17(1):61-75
- Lin MA, Yanmin Y, Yonghui Y, Dengpan X and Shaojie BI (2011) The distribution and driving factors of irrigation water requirements in the North China Plain. *Journal of Remote Sensing* 15(2):324-339
- Liou YA and Kar SK (2014) Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms-A review. *Energies* 7(5):2821-2849
- Long D and Singh VP (2010) Integration of the GG model with SEBAL to produce time series of evapotranspiration of high spatial resolution at watershed scales. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 115(21):D21128
- Malekpour M, Babazadeh H, Kaveh F and Ebrahimi Pak N (2017) Estimation of actual evapotranspiration and water productivity of wheat using SEBAL algorithm and Landsat 5TM images. *Journal of Water Research in Agriculture* 30(4):569-582 (In Persian)
- Moiwo JP, Yang Y, Yan N and Wu B (2011) Comparison of evapotranspiration estimated by ETWatch with that derived from combined GRACE and measured precipitation data in Hai River Basin, North China. *Hydrological Sciences Journal* 56(2):249-267
- Ndou NN, Palamuleni LG, and Ramoelo A (2017) Modelling depth to groundwater level using SEBAL-