



Comparison of Actual Evapotranspiration Estimated Using Gram-Schmidt Method and SEBAL Algorithm with Lysimetric Data (Case study; Amir Kabir Sugarcane Argo-Industry Company)

A.S. Goshehgir¹, M. Golabi^{2*} and A.A. Naseri³

Abstract

One of the most important parameters of the water balance equation is evapotranspiration which is an effective factor in the management of water resources. As in many different sciences where hardware methods are widely being replaced by software methods, actual evapotranspiration is also being determined using remote sensing and satellite images. According to the importance of actual evapotranspiration in the allocation of water resources, in current research this parameter was determined for sugarcane by in Amir Kabir Sugarcane Argo-Industry using satellite images from Landsat8 (suitable spatial resolution) and MODIS (acceptable temporal resolution) and the results were compared with lysimetric data. For this purpose, Landsat 8 and MODIS images were merged in the period of 16 days by Gram-Schmidt method and the actual evapotranspiration of sugarcane was estimated by SEBAL algorithm. In addition, the amount of actual evapotranspiration was calculated using Landsat8 images and SEBAL algorithms. Finally, the results of the two methods were compared with lysimetric data and were analyzed by statistical methods. The results indicated that the average of absolute difference between actual evapotranspiration of fusion images and lysimetric method was 0.55 (mm/day). This index was 0.063 (mm/day) for Landsat 8 images compared to lysimetric data and the average of absolute difference between the two methods of remote sensing was obtained as 0.58 (mm/day). Also at the level of five percent, there is not a significant difference between the two methods of remote sensing.

Keywords: SEBAL Algorithm, Actual Evapotranspiration, Gram-Schmidt Method.

Received: June 6, 2017

Accepted: August 17, 2017

مقایسه تبخیر- تعرق واقعی حاصل از داده‌های سنجنش از دور با بهره‌گیری از روش گرام اشمیت و الگوریتم سبال با داده‌های لایسیمتری (مطالعه موردی؛ شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر)

آلا سادات گوشه‌گیر^۱، منا گلابی^{۲*} و عبدعلی ناصری^۳

چکیده

یکی از مؤلفه‌های مهم در معادله‌ی بیلان آب تبخیر- تعرق می‌باشد که اهمیت به‌سزایی در مدیریت منابع آب دارد. هم‌چنین در علوم مختلف تلاش بر این است که روش‌های سخت‌افزاری به نرم‌افزاری تبدیل شوند. یکی از روش‌های نرم‌افزاری تعیین تبخیر- تعرق واقعی استفاده از سنجنش از دور و بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. با توجه به اهمیت میزان تبخیر- تعرق واقعی در تخصیص منابع آب در تحقیق حاضر با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ (دارای تفکیک مکانی مناسب) و مودیس (با تفکیک زمانی مناسب) میزان تبخیر- تعرق واقعی نیشکر در شرکت کشت و صنعت امیرکبیر تعیین و با مقادیر حاصل از لایسیمتر مقایسه گردید. بدین منظور ابتدا تصاویر لندست ۸ و مودیس به روش گرام اشمیت در بازه‌ی زمانی ۱۶ روزه ادغام و میزان تبخیر- تعرق واقعی نیشکر با استفاده از الگوریتم سبال برآورد گردید. هم‌چنین میزان تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از تصاویر لندست ۸ و الگوریتم سبال نیز به‌دست آمد و در نهایت نتایج دو روش با روش لایسیمتری و با یکدیگر مورد مقایسه آماری قرار گرفتند. مقایسه نتایج نشان دادند که میانگین تفاضل مطلق بین تبخیر- تعرق واقعی روش تلفیق تصاویر و لایسیمتر ۰/۵۵ میلی‌متر در روز، این شاخص بین تبخیر- تعرق واقعی تصاویر ماهواره‌ای لندست به‌صورت مجزا و لایسیمتر ۰/۰۶۳ میلی‌متر بر روز و مقدار میانگین تفاضل مطلق دو روش سنجنش از دور ۰/۵۸ به‌دست آمد. هم‌چنین در سطح پنج درصد تفاوت معناداری بین دو روش سنجنش از دور ملاحظه نگردید.

کلمات کلیدی: الگوریتم سبال، تبخیر- تعرق واقعی، روش گرام اشمیت.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۳/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۵/۲۶

1- M.Sc Student of Irrigation and Drainage, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: m.golabi@scu.ac.ir

3- Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد 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.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

تبخیر- تعرق یکی از عوامل مهم چرخه هیدرولوژی بوده که باید در طرح‌های آبیاری، مطالعات زهکشی و هیدرولوژیکی برآورد شود. تعیین این پارامتر دارای روش‌های مختلفی می‌باشد، که در این میان استفاده از داده‌های لایسیمتر و معادله بیلان آب به عنوان روش پایه شناخته شده است. ولی احداث لایسیمتر مستلزم هزینه زیادی بوده و برای تحقیق در مراکز محدودی موجود می‌باشد. از این رو عمدتاً تخمین تبخیر- تعرق با استفاده از پارامترهای هواشناسی و به کار بردن مدل‌های تجربی انجام می‌گیرد. اغلب روش‌های محاسباتی نیاز به داده‌های هواشناسی دقیق داشته که این مورد هم وابسته به تجهیزات مناسب می‌باشد. لذا باید به دنبال روش‌های ساده با دقت بالا بود.

از طرفی در کشت‌های آبی، نیاز آبی گیاهان اغلب به صورت نقطه‌ای اندازه‌گیری و یا برآورد می‌شود. درحالی‌که بیشتر مطالعات و برنامه‌ریزی‌ها در مقیاس منطقه‌ای صورت می‌پذیرد. بنابراین استفاده از روش‌های سنجش از دور می‌تواند تا حدودی مشکلات فوق را پس از ارزیابی دقت و مقایسه با سایر روش‌ها حل نماید. در استان خوزستان کشت نیشکر در سطح وسیعی انجام می‌شود. لذا تعیین تبخیر- تعرق این گیاه با توجه به سطح زیر کشت و شرایط آب و هوایی حائز اهمیت می‌باشد.

غالب روش‌های تخمین تبخیر- تعرق در مزارع نیشکر مانند استفاده از لایسیمتر زهکش‌دار یا استفاده از معادلات تجربی (معادله پنمن، بلانی کریدل و ...) میزان پارامتر مذکور را به صورت نقطه‌ای برآورد می‌نماید که در صورت تعمیم این مقادیر به سطوح وسیع‌تر از دقت آن‌ها کاسته خواهد شد. امروزه با استفاده از روش‌های سنجش از دور می‌توان میزان تبخیر- تعرق را با دقت بالا و صرف هزینه‌ی اندک، صرف‌نظر از وسعت منطقه‌ی مورد نظر برآورد نمود. یکی از الگوریتم‌هایی که برای برآورد تبخیر- تعرق بسیار مورد توجه است الگوریتم توازن انرژی سبال است (Bastiaanssen et al., 1999).

روش سبال یکی از پرکاربردترین روش‌های تعیین تبخیر- تعرق بوده که در آن از روابط فیزیکی و تجربی استفاده شده است و یکی از مزایای آن نیاز حداقلی به داده‌های زمینی است که موجب می‌شود این روش با وجود صرف زمان و هزینه‌ی اندک و نتایج قابل قبول، یکی از پرکاربردترین شیوه‌های اندازه‌گیری تبخیر- تعرق باشد.

Simaie et al. (2013) تحقیقاتی برای ارزیابی مدل سبال در برآورد تبخیر- تعرق واقعی در دشت سهرین واقع در شمال غرب زنجان انجام داده و نشان دادند مدل سبال در تعیین میزان تبخیر- تعرق از دقت کافی برخوردار است و برای اراضی زیر کشت آبی در مقایسه با زمین‌های زیر کشت دیم دقت بالاتری داراست. همچنین Ghamarnia and Rezvani (2014) طی تحقیقاتی در دشت میان دربند واقع در غرب ایران نتایج حاصل از برآورد تبخیر- تعرق واقعی با دو روش مرسوم فائو برای محصول گندم و روش سبال را باهم مقایسه نموده و نشان دادند که همبستگی بالایی (۰/۸۳) بین این دو روش وجود دارد و الگوریتم سبال از توانایی بالایی در برآورد میزان تبخیر- تعرق واقعی دارد.

Miryaghobzadeh et al. (2014) میزان تبخیر- تعرق واقعی را در دشت نیشابور با روش‌های الگوریتم سبال، پنمن مانیت و هارگریوز- سامانی مقایسه نمودند. ضرایب خطای پایین بین مدل پنمن و الگوریتم سبال، دقت زیاد الگوریتم سبال را در تخمین تبخیر- تعرق و پارامترهای آن نشان داد.

Makari et al. (2015) از فاکتورهای مختلف برای تمام پارامترهای ورودی به مدل سبال (ضریب آلیبدوی سطح، شاخص پوشش گیاهی و دمای سطح زمین) به طور هم‌زمان، برای ریز مقیاس کردن مکانی تبخیر- تعرق واقعی به دست آمده از سنجنده مودیس با دقت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر به تصویر لندست با دقت تفکیک مکانی ۳۰ متر هم‌چنین استفاده از روش ورودی- خروجی رگرسیون بین پارامترهای همسان و روش ورودی- خروجی تفریق برای ریز مقیاس کردن زمانی تبخیر- تعرق واقعی تصاویر لندست از ۱۶ روز به روزانه، در بخشی از دشت مشهد استفاده نمودند. نتایج نشان داد که گسیلندگی سطحی در محدوده وسیع و دمای سطح زمین سنجنده مودیس به عنوان فاکتور مقیاس بهترین عملکرد را داشتند. در همین سال Steele et al. (2015) در شمال شرقی ایالت داکوتای شمالی آمریکا از الگوریتم سبال و داده‌های کاربری اراضی و پیمایش زمینی استفاده کردند. اختلاف ۱۷ و ۴۱ میلی‌متری تبخیر- تعرق محاسبه شده پنبه و گندم با الگوریتم سبال و داده‌های اندازه‌گیری شده در طول فصل کشت، نشان می‌دهد که می‌توان برای مدیریت منابع آب از الگوریتم سبال نیز استفاده کرد.

Fakhimi et al. (2016) از تصاویر ماهواره‌ای ASTER و IRS PAN و روش‌های مهم و پرکاربرد در ادغام تصاویر در سطح

مودیس و الگوریتم سبال استفاده گردید. نتایج نشان دادند که الگوریتم سبال توانایی قابل قبولی در برآورد تبخیر- تعرق دارا می‌باشد. همچنین Safi et al. (2016) بهره‌وری مصرف آب را بر مبنای میزان تبخیر- تعرق در مزارع شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در برآورد بهره‌وری مصرف آب از دقت مناسبی برخوردار است.

توسعه و گستردگی شبکه‌های آبیاری و زهکشی در استان خوزستان و اهمیت این استان به‌عنوان قطب کشاورزی از یک طرف و در نظر گرفتن تبخیر- تعرق به‌عنوان یک پارامتر مهم در تخصیص منابع آب از طرف دیگر باعث شده که تحقیقی به‌منظور مقایسه‌ی روش‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری برآورد تبخیر- تعرق در استان خوزستان انجام شود. سطح بالای تحت کشت نیشکر در استان خوزستان باعث شد که از بین محصولات مختلف نیشکر به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شود تا به مقایسه روش گرام اشمیت، سبال و لایسیمتری که از اهداف این تحقیق است، پرداخته شود. همچنین بررسی‌ها نشان دادند که تلفیق تصاویر ماهواره‌ای جهت برآورد تبخیر تعرق در مزارع نیشکر شرکت کشت و صنعت امیرکبیر انجام نشده است که نوآوری تحقیق حاضر محسوب می‌گردد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر یکی از مراکز کشت نیشکر و صنایع جانبی آن در جنوب استان خوزستان می‌باشد. اراضی این شرکت در $31^{\circ}15'$ تا $31^{\circ}40'$ عرض شمالی، $46^{\circ}30'$ عرض جنوبی، $48^{\circ}30'$ طول شرقی (رودخانه کارون) و $48^{\circ}12'$ طول غربی (جاده اهواز - خرمشهر) قرار دارد. مساحت این شرکت کشت و صنعت ۱۴۰۰۰ هکتار و سطح زیر کشت آن ۱۲۰۰۰ هکتار می‌باشد. شکل ۱ موقعیت اراضی این شرکت را نشان می‌دهد.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در تحقیق حاضر از تصاویر ماهواره لندست ۸ و مودیس و داده‌های لایسیمتریهای زهکش‌دار شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر استفاده شد. تصاویر ماهواره لندست ۸ دارای تفکیک مکانی ۳۰ متر و فاصله‌ی زمانی ۱۶ روز و تصاویر ماهواره مودیس دارای قدرت مکانی ۱۰۰۰ متر بوده که به‌صورت روزانه در دسترس می‌باشد.

پیکسل شامل الگوریتم گرام اشمیت، آنالیز مؤلفه اصلی، تبدیل براوی و تبدیل پرده رنگ اشباع استفاده کردند. روی این الگوریتم‌ها مقایسه‌های کمی و کیفی صورت پذیرفت. نتایج گویای این مطلب است که تصویر حاصل از ادغام به روش گرام اشمیت بهترین کیفیت را دارد، همچنین در بهبود اطلاعات بافت تصویر بسیار مؤثر واقع گردیده و دیگر روش‌ها در این نتایج در سطح هم‌دیگر بودند.

(Kathryn et al. 2016) با استفاده از الگوریتم STARFM¹ تلفیق تصاویر لندست ۸ و مودیس را برای محاسبه‌ی تبخیر- تعرق یک تاکستان در کالیفرنیا انجام دادند. مقایسه تبخیر- تعرق به‌دست آمده از این روش با روش زمینی ریشه میانگین مجذورخطایی برابر ۱ میلی‌متر در روز را نشان داد.

(Ghamarnia et al. 2017) پژوهشی با هدف بررسی کارایی استفاده از مدل سبال در تعیین تبخیر- تعرق واقعی و ضرایب گیاهی ذرت، از گیاهان اصلی اراضی کشاورزی استان کرمانشاه در دشت منتهی به سراب نیلوفر انجام دادند. برای این منظور در این تحقیق از پردازش تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ در سه‌گذر استفاده نمودند. تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی مورد نیاز و بر اساس معادله بیلان انرژی سطح (مدل سبال) محاسبه شد، سپس بر اساس معادله پنمن- مانیتث اصلاح شده میزان تبخیر- تعرق گیاه مرجع در محل به‌دست آمد، که از طریق آن ضرایب گیاهی ذرت محاسبه گردید. مقادیر محاسبه تعرق از مدل سبال (مقادیر پیش‌بینی شده) برای گیاه ذرت در تاریخ‌های گفته شده به ترتیب برابر با ۷/۱۱، ۶/۹ و ۵/۱۶ میلی‌متر در روز به‌دست آمد.

علاوه بر تحقیقاتی که اشاره شد، پژوهش‌های زیر روی گیاه نیشکر و روش‌های مختلف تلفیق انجام شده است. در تحقیقی (Zhuang et al. 2011) پنج روش مختلف تلفیق تصاویر شامل PCSS²، تبدیل براوی، تبدیل گرام اشمیت، CN³ و روش موجک را برای محاسبه شاخص پوشش گیاهی به‌کار گرفتند. نتایج نشان داد که تبدیل گرام اشمیت از دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است.

(Soheylifar et al. 2012) برآورد تبخیر- تعرق واقعی نیشکر با استفاده از داده‌های سنسجش از دور در اراضی شرکت کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک‌خان را مطالعه نمودند. در پژوهش مذکور از تصاویر

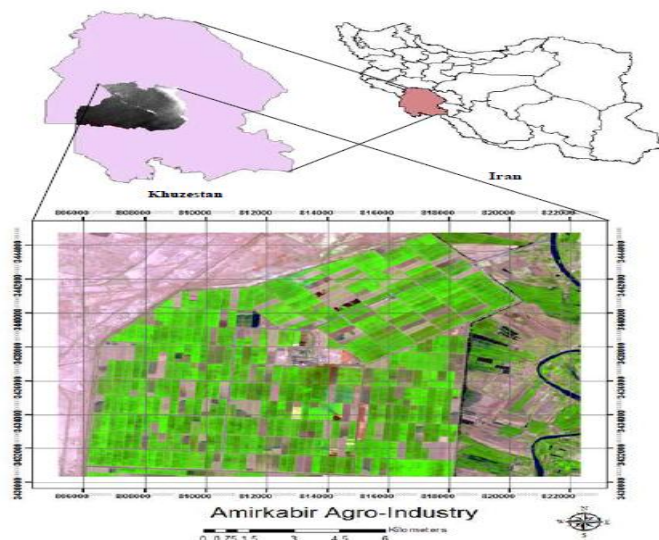


Fig. 1- The location of the studied area

شکل ۱- موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه

کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر منطق بر تاریخ‌های تصاویر استفاده شد.

۲-۳- تجزیه و تحلیل نتایج

۲-۳-۱- پردازش تصاویر

مهم‌ترین مراحل پیش‌پردازش در تصاویر مختلف ماهواره‌ای، تصحیحات هندسی و رادیومتریک می‌باشد که معمولاً با توجه به کاربرد تصاویر، اندکی متفاوت خواهند بود. در تصحیح هندسی، به‌کارگیری نقاط زمین با مختصات معلوم، سیستم مختصات تصاویر به یک سیستم مرجع زمینی انتقال می‌یابد و در تصحیح رادیومتریک، بسته به هدف، تصحیحات نسبی و یا مطلق رادیومتریک به‌منظور تبدیل مقادیر خام تصاویر به بازتابندگی سطح زمین، انجام می‌گیرد. مرحله اول از مراحل پردازش مقدماتی تصاویر ماهواره‌ای، تصحیح رادیومتریک است که شامل تبدیل داده‌های اولیه به مقادیر تابش و بازتابش می‌باشد. از آنجایی که تصاویر ماهواره لندست ۸ نیاز به تصحیح مذکور دارد، در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار ENVI 4.8 تصحیح رادیومتری بر روی تصاویر انجام شد. تصاویر ماهواره لندست ۸ نیازی به تصحیح هندسی ندارد. همچنین در این پژوهش از محصول MOD021KM ماهواره مودیس استفاده شد که تصاویر آن نیاز به تصحیحات هندسی و رادیومتریک ندارند.

از طرفی محاسبه نیاز آبی گیاه به‌صورت روزانه انجام می‌شود، لذا در این مطالعه از تکنیک تلفیق تصاویر، استفاده شده است. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده‌ی سنجنش از دور از داده‌های زمینی هم‌زمان نیز استفاده شد. بدین ترتیب که نتایج با داده‌های لایسیمتر مقایسه شدند. مشخصات تصاویر ماهواره لندست ۸ مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

Table 1- The characteristics of Landsat 8 images

جدول ۱- مشخصات تصاویر مورد استفاده ماهواره لندست ۸

Date	Time	Path	Row
3 October 2014			
19 October 2014			
23 October 2015	7:21 A.M	166	38
8 October 2015			
1 October 2016			
17 October 2016		165	39

تصاویر مودیس مورد استفاده در این تحقیق ۱۶ تصویر مربوط به تاریخ‌های ۱۱ تا ۲۷ مهرماه ۱۳۹۳، ۱۶ تصویر مربوط به تاریخ‌های ۱ تا ۱۶ مهرماه ۱۳۹۴ و ۱۶ تصویر مربوط به تاریخ‌های ۱۰ تا ۲۶ مهرماه ۱۳۹۵ می‌باشد. به‌طور کلی ۴۸ تصویر ماهواره مودیس در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین به‌منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از روش سنجنش از دور از داده‌های لایسیمتری شرکت

قدرت تفکیک بالاتر حضور داشته باشد. هر چند استفاده از داده‌هایی با قدرت تفکیک مکانی بالا نیازمند بهبود و توسعه روش‌های ادغام داده را دارد، اما امکان بهره‌گیری از مزایای سنجنده‌های مختلف در این زمینه وجود دارد (Moghimi et al., 2016).

Table 2- The fusion bands characteristics of Landsat 8 and MODIS images
جدول ۲- مشخصات باندهای تلفیق شده دو ماهواره لندست ۸ و مودیس

The number of band/ Satellite	Wavelength(micro meter)
Band2/Landsat 8	0.45 - 0.515
Band3/MODIS	0.459 - 0.479
Band3/Landsat 8	0.525 - 0.6
Band4/MODIS	0.545 - 0.565
Band4/Landsat 8	0.63 - 0.68
Band1/MODIS	0.62 - 0.67
Band5/Landsat 8	0.845 - 0.885
Band2/MODIS	0.841 - 0.874
Band6/Landsat 8	1.56 - 1.66
Band6/MODIS	1.62 - 1.65
Band7/Landsat 8	2.1 - 2.3
Band7/MODIS	2.10 - 2.15
Band10/Landsat 8	10.6 - 11.2
Band31/MODIS	10.7 - 11.2

الگوریتم گرام اشمیت روشی است که به کمک آن می‌توان از یک پایه دلخواه، پایه‌ی یکای متعامد ساخت. در تحقیق حاضر تلفیق باندها با استفاده از این الگوریتم توسط نرم‌افزار ENVI 4.8 انجام گرفت، به این صورت که ابتدا باند طیفی با قدرت تفکیک مکانی کمتر را به نرم‌افزار معرفی کرده و نرم‌افزار بر روی آن تبدیل مؤلفه‌های اصلی اعمال می‌کند و مؤلفه اول آن را به منظور تعدیل اطلاعات با باند با قدرت تفکیک مکانی بالاتر استفاده می‌نماید. پس از تعدیل اطلاعات، معکوس تبدیل مؤلفه‌های اصلی بر روی مؤلفه‌ها اعمال می‌شود و در آخر باند طیفی با قدرت تفکیک مکانی بالا به دست می‌آید (Craig et al., 2000). بدین ترتیب تصویری حاصل می‌شود که تفکیک مکانی آن مانند ماهواره لندست ۸ و تفکیک زمانی آن مانند ماهواره مودیس است.

۲-۳-۳- الگوریتم سبال

الگوریتم سبال میزان تخبیر- تعرق واقعی را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و حداقل داده‌های زمینی مورد نیاز و بر اساس معادله توازن انرژی محاسبه می‌نماید. از آن‌جا که تصاویر ماهواره‌ای تنها می‌تواند

در ادغام زمانی- مکانی تصاویر، در گام اول بایستی سیستم مختصات دو تصویر یکسان باشند. اما به دلیل این که سیستم‌های مختصاتی تصاویر لندست و مودیس یکسان نمی‌باشند، در وهله‌ی اول، بایستی سیستم مختصاتی تصاویر مودیس نسبت به سیستم مختصاتی تصویر لندست تغییر یابند. برای این کار با مرجع قرار دادن تصویر لندست به عنوان مبنا، سیستم مختصاتی مودیس با انتخاب نقاط متناظر در دو تصویر با سیستم تصویر لندست یکسان شد. در مرحله‌ی تصحیح رادیومتریکی، چون هدف در ادغام زمانی- مکانی، فقط پیش‌بینی تصاویر لندست است، و از آن جهت که نحوه‌ی تشکیل تصویر از یک صحنه در دو سنجنده‌ی مذکور یکسان نیست، بنابراین بایستی مقادیر خام تصاویر دو سنجنده‌ی مذکور تبدیل به بازتابندگی سطح زمین شوند.

باندهای مورد استفاده برای تخمین تخبیر- تعرق به روش سبال شامل باندهای دو تا هفت و باند حرارتی ده و یازده ماهواره لندست ۸ می‌باشد. از آن‌جایی که در ادغام زمانی- مکانی تصاویر ماهواره‌ای، از دو تصویر با قدرت تفکیک زمانی بالا و قدرت تفکیک مکانی بالا استفاده می‌گردد، از این رو، انتخاب مناسب باندها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. هدف اصلی در ادغام زمانی- مکانی در تصاویر ماهواره‌ای، بهبود قدرت تفکیک مکانی یک تصویر با قدرت تفکیک زمانی بالا است، از این رو طی فرآیند مذکور، بایستی طیف مواد موجود در صحنه دچار تغییر قابل ملاحظه‌ای شود (به طوری که ماهیت آن را تغییر دهد). زیرا هدف اصلی، افزایش قدرت تفکیک مکانی تصویر است. از این جهت، یکسان بودن محدوده‌ی طیفی تصاویر انتخاب شده به منظور ادغام زمانی- مکانی، پارامتری بسیار مهم است (Fakhimi et al., 2016).

برای تلفیق دو تصویر لندست ۸ و مودیس باندهای متناظر (از لحاظ اندازه طول موج) این دو سنجنده مربوط به تاریخ‌های ۱۱ مهر ۱۳۹۳، ۱۶ مهر ۱۳۹۴ و ۱۰ مهر ۱۳۹۵ با دستور گرام- اشمیت نرم‌افزار ENVI 4.8 تلفیق شدند. جدول ۲ مشخصات باندهای دوه‌دو تلفیق شده‌ی دو ماهواره را نشان می‌دهد.

۲-۳-۲- روش گرام اشمیت

هنگام ادغام داده‌های چند سنجنده با یکدیگر به منظور شناسایی تغییرات، باید از یک روش مناسب جهت پردازش داده‌ها بهره برد. از آن‌جا که متفاوت بودن ابعاد پیکسل به طور مستقیم بر روی نتایج طبقه‌بندی مؤثر است، ممکن است برخی از عوارض در طبقه‌بندی یک تصویر با قدرت تفکیک پایین از دست برود در حالی که در تصویری با

شار گرمای خاک (G)، میزان انتقال گرما در خاک و پوشش گیاهی در اثر هدایت مولکولی است. در مدل سیال G را از نسبت G/Rn ارائه شده توسط Bastiaanssen et al. (1999) از رابطه ۶ تعیین گردید:

$$\frac{G}{R_n} = \frac{\tau_s \times R_n}{\alpha} (0.0032\alpha + 0.0062\alpha^2) \times (1 - 0.978NDVI^4) \quad (6)$$

در این رابطه؛ Ts دمای سطحی بر حسب درجه سانتی‌گراد، شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی NDVI که با استفاده از رابطه ۷ محاسبه گردید و α آلبیدوی سطحی می‌باشد (Allen et al., 2005):

$$NDVI = \frac{\rho NIR - \rho R}{\rho NIR + \rho R} \quad (7)$$

در این رابطه؛ ρR انعکاس در باند قرمز (بازتاب طیفی باند سه) و ρNIR انعکاس در باند مادون قرمز نزدیک (بازتاب طیفی باند چهار) می‌باشند. این شاخص در حقیقت نشان‌دهنده تراکم پوشش گیاهی است و هر قدر پوشش گیاهی متراکم‌تر باشد مقدار آن بیشتر است. مقدار تغییرات NDVI بین مثبت و منفی یک بوده، سطوح دارای پوشش گیاهی دارای NDVI بین صفر و یک، آب و ابر معمولاً دارای NDVI کمتر از صفر می‌باشد. چنانچه مقدار NDVI کمتر از صفر باشد، سطح مذکور آب تلقی شده و نسبت G/Rn برای آن برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. مناطقی که دارای مقدار Ts کمتر از چهار درجه سانتی‌گراد و α بیشتر از ۰/۴۵ باشند، مناطق پوشیده از برف فرض می‌شوند و نسبت G/Rn برای این مناطق نیز ۰/۵ لحاظ می‌گردد (Allen et al., 2011).

در روش سیال برای برآورد شار گرمای محسوس (H)، ابتدا دو پیکسل شاخص انتخاب می‌شوند، یکی از این پیکسل‌ها که پیکسل سرد نامیده می‌شود مربوط به منطقه‌ای کاملاً پوشیده از گیاه و آبیاری شده می‌باشد که دمای سطح زمین در این پیکسل نزدیک به دمای هواست و تبخیر-تعرقی برابر با تبخیر-تعرق مرجع دارد. پیکسل دوم که پیکسل گرم نام دارد زمین کشاورزی بدون پوشش گیاهی و خشک می‌باشد، بنابراین مقدار شار گرمای نهان تبخیر در این پیکسل صفر فرض می‌شود (Sanaei Nezhad et al., 2011). در روش سیال طبق رابطه ۱ و بر اساس مقادیر تبخیر و تعرق دو پیکسل مذکور، شار گرمای محسوس سایر پیکسل‌ها تخمین زده می‌شود. مقدار شار گرمای محسوس از معادله ۸ محاسبه می‌گردد (Allen et al., 2002):

$$H = \frac{\rho_{air} \times C_{air} \times dt}{rah} \quad (8)$$

در این رابطه؛ ρ_{air} چگالی هوا (کیلوگرم بر مترمکعب)، C_{air} گرمای ویژه هوا (ژول بر کیلوگرم بر کلون)، dt اختلاف دمای بین دو ارتفاع

اطلاعاتی در زمان گذر ماهواره ارائه دهند، لذا سیال می‌تواند مقدار شار تبخیر و تعرق لحظه‌ای را در زمان تصویر، برآورد نماید. شار تبخیر تعرق برای هر پیکسل تصویر، به صورت باقی‌مانده توازن انرژی سطح می‌باشد که از رابطه ۱ به دست می‌آید:

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

در این رابطه؛ λET شار گرمای نهان تبخیر (W/m^2)، R_n تابش خالص در سطح زمین (W/m^2)، G شار گرمای خاک (W/m^2)، و H شار گرمای محسوس (W/m^2) می‌باشد.

تابش خالص عبارت است از اختلاف جریان تابش خروجی و ورودی و معیاری از مقدار انرژی موجود در سطح زمین به شمار می‌رود. میزان تابش خالص و اجزای آن در سطح زمین از رابطه ۲ تعیین می‌گردد (Bastiaanssen et al., 1998):

$$R_n = (1 - \alpha)R_s \downarrow + RL \downarrow - RL \uparrow - (1 - \epsilon_0)RL \downarrow \quad (2)$$

در این رابطه؛ $R_s \downarrow$ تابش طول موج کوتاه ورودی (وات بر متر مربع)، $RL \downarrow$ تابش طول موج بلند ورودی (وات بر مترمربع)، $RL \uparrow$ تابش طول موج بلند خروجی (وات بر متر مربع)، α ضریب آلبیدوی سطحی و ϵ_0 ضریب انتشار سطحی می‌باشد. تابش ورودی موج کوتاه ($R_s \downarrow$) تابش خورشیدی مستقیم و پراکنده‌ای است که به زمین رسیده و مقدار آن برای زمان تصویر با فرض شرایط آسمان صاف، از رابطه ۳ محاسبه شد (Allen et al., 2002):

$$R_s \downarrow = G_{sc} \times \cos \theta \times dr \times \tau_{sw} \quad (3)$$

در این رابطه؛ G_{sc} ثابت خورشیدی برابر با ۱۳۶۷ (وات بر مترمربع)، dr معکوس مربع فاصله نسبی بین زمین و خورشید و τ_{sw} ضریب شفافیت اتمسفر می‌باشد. تابش موج بلند ورودی $RL \downarrow$ شار تابش حرارتی از جو به سمت پایین است که از رابطه ۴ تعیین گردید:

$$RL \downarrow = \epsilon_a \times \sigma \times T_a \quad (4)$$

در این رابطه؛ ϵ_a گسیلندگی جو، σ ثابت استفان-بولتزمن ($5/67 \times 10^{-8}$ وات بر مترمربع بر توان چهارم درجه کلون) و T_a دمای هوای نزدیک سطح (کلون) است. تابش موج بلند خروجی ($RL \uparrow$)، شار تابش حرارتی گسیل شده از سطح زمین به جو می‌باشد و با استفاده از رابطه ۵ محاسبه گردید (Allen et al., 2002):

$$RL \uparrow = \epsilon_s \times \sigma \times T_s^4 \quad (5)$$

در این رابطه؛ ϵ_s گسیلندگی سطحی عریض باند، σ ثابت استفان-بولتزمن ($5/67 \times 10^{-8}$ وات بر مترمربع بر توان چهارم کلون) و T_s دمای سطحی (کلون) است.

از جمله بزرگترین مزایای الگوریتم سبال این است که برای محاسبه تبخیر تعرق واقعی به حداقل اطلاعات هواشناسی نیازمند است. در این تحقیق سرعت باد و رطوبت جو از ایستگاه سینوپتیک کشت و صنعت امیرکبیر اخذ شد. به طور کلی شکل ۲ فلوجارت الگوریتم سبال را نشان می‌دهد.

۲-۴- اندازه‌گیری لایسیمیتری

در این مطالعه از لایسیمیترهای زهکش‌دار شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر به عرض جغرافیایی $31^{\circ}04'N$ و طول جغرافیایی: $E 49^{\circ}19'$ جهت صحت‌سنجی نتایج حاصل از سنسجش از دور استفاده شد. مساحت این لایسیمیترها ۱۲۰ متر مربع است و از ۱۰ لایسیمیتر کوچکتر با ابعاد 2×6 متر، با کف شیب‌دار و عمق حدود ۲ متر و شیب $0.05/$ تشکیل شده است. این لایسیمیترها در یک پلات از اراضی کشت و صنعت قرار دارند و تمام زمین‌های اطراف آن تحت کشت آبی نیشکر است. معادله حاکم بر لایسیمیترها، معادله بیلان به صورت رابطه ۱۲ می‌باشد:

$$ET_c = I + P - \Delta W - D \quad (12)$$

که در آن؛ ET_c ، تبخیر تعرق واقعی (mm/day)، I ، ارتفاع آب آبیاری (mm)، P ، ارتفاع آب بارندگی (mm)، ΔW ، تغییرات رطوبتی (mm/day) و D ، ارتفاع زه آب (mm).

Z_2 و Z_1 (کلوبین) و rah مقاومت آیرودینامیکی برای انتقال گرما (ثانیه بر متر) می‌باشد. پس از آنکه مقدار شار گرمای محسوس براساس شرایط جوی تصحیح گردید. مقدار شار گرمای نهان تبخیر بر اساس رابطه ۱ برای هر پیکسل محاسبه می‌گردد و سپس با استفاده از رابطه ۹ تبخیر و تعرق لحظه‌ای (ET_{ins}) برآورد می‌گردد (Allen et al., 2002):

$$ET_{ins} = 3600 \frac{\lambda_{ET}}{\lambda} \quad (9)$$

در این رابطه؛ λ گرمای نهان تبخیر بوده که از رابطه ۱۰ محاسبه می‌گردد:

$$\lambda = [0.2501 - 0.00236(T_s - 273)] \times 10^6 \quad (10)$$

الگوریتم سبال ET_{24} را با فرض این‌که، ET_{rf} لحظه‌ای به صورت میانگین ۲۴ ساعته است، یعنی در طول ۲۴ ساعت تقریباً ثابت است، در نظر می‌گیرد. ET_{24} را می‌توان از رابطه ۱۱ محاسبه نمود (Allen et al., 2002):

$$ET_{24} = ET_{rf} \times ET_{r-24} \quad (11)$$

در این رابطه؛ ET_{r-24} مجموع ET_r در طی ۲۴ ساعت برای همان روز تصویربرداری می‌باشد که با جمع کردن مقادیر ساعتی ET_r محاسبه شده در نرم‌افزار REF-ET با یکدیگر در روز گذر ماهواره تعیین گردید.

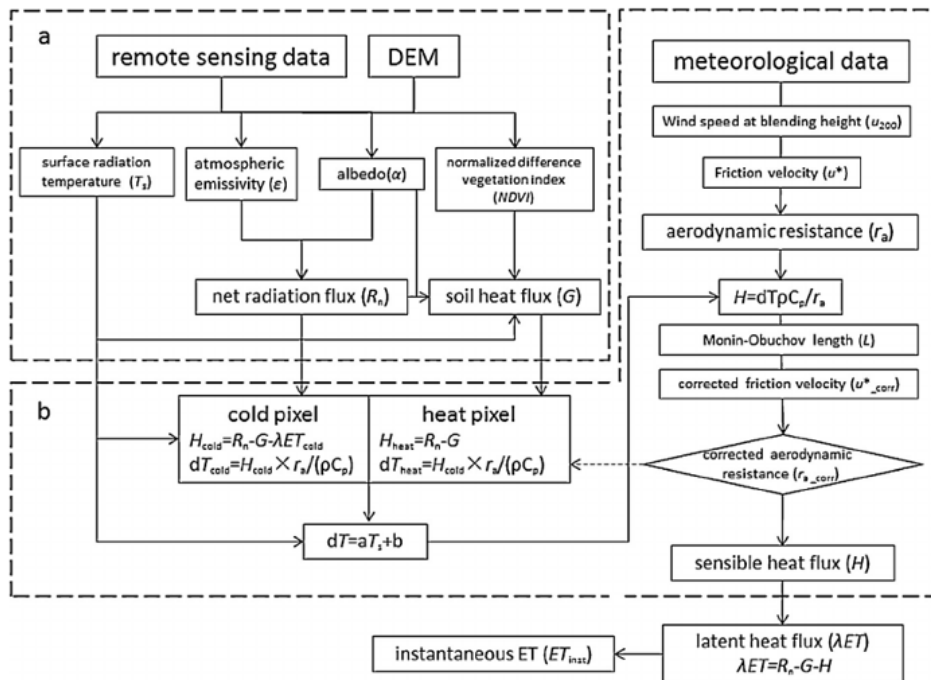


Fig. 2- The flowchart of SEBAL method for calculating evapotranspiration (Bastiaanssen et al., 1999) شکل ۲- فلوجارت روش سبال برای محاسبه تبخیر- تعرق

می‌باشد. پارامتر MAD نشان می‌دهد که اولاً آیا مدل مقدار متغیر مورد نظر را کم یا زیاد برآورد می‌کند و ثانیاً مقدار کمی آن چقدر است. زمانی که MAD برابر صفر است، مشخص می‌شود که مدل فضای مطالعه شده را خوب برآورد کرده و هیچ‌گونه انحرافی وجود ندارد. RMSE نیز نشان می‌دهد که مدل تا چه حد، مقادیر مورد نظر را بیشتر یا کمتر تخمین زده است. هر چه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد بیانگر نزدیکی مقادیر برآوردی به واقعی است و افزایش مقدار آن اختلاف زیاد بین داده‌های واقعی و برآوردی را نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

به منظور برآورد تبخیر- تعرق ابتدا همان‌طور که گفته شد، لازم بود مقادیر تابش خالص و شار گرمای خاک برای پیکسل‌های سرد و گرم به دست آید. نتایج به تفکیک روش و تاریخ تصاویر در جدول ۳ ارائه شده است.

مطابق جدول ۳ مقادیر تابش خالص در دو روش مورد استفاده برای پیکسل‌های سرد بیشتر از پیکسل‌های گرم بوده، که بیانگر صحت نتایج به دست آمده می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان بیان نمود که در روش استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ میزان تابش خالص پیکسل‌های سرد بیشتر از روش تلفیقی تصاویر لندست ۸ و مودیس می‌باشد. در حالی که میزان تابش خالص پیکسل‌های گرم روش تلفیقی بیشتر از روش تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ و الگوریتم سبال به دست آمده است. همچنین شار گرمای خاک در دو روش مورد استفاده برای پیکسل‌های سرد کمتر از گرم به دست آمده که صحت نتایج را نشان می‌دهد.

برای اندازه‌گیری ارتفاع آب آبیاری و زه‌آب، از پیمانانه و کرنومتر و برای اندازه‌گیری میزان بارندگی از داده‌های ایستگاه هواشناسی شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر استفاده شد. برای تعیین تغییرات رطوبت خاک، نمونه‌هایی از خاک لایسیمتر تهیه و با روش وزنی، درصد رطوبت حجمی، تعیین شد. مقدار تبخیر- تعرق با توجه به مقادیر آب آبیاری، آب زهکشی شده و تغییرات رطوبتی خاک محاسبه گردید. متوسط تبخیر تعرق روزانه در هر دوره از تقسیم تبخیر- تعرق ده روزه بر ده محاسبه گردید.

۲-۵- تحلیل نتایج

پس از ادغام تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ و مودیس به منظور دست‌یابی به تصاویر با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا به روش گرم اشمیت میزان تبخیر تعرق با استفاده از الگوریتم سبال محاسبه می‌شود. همچنین میزان تبخیر- تعرق با استفاده از تصویر لندست ۸ و الگوریتم سبال برآورد گردید و در نهایت نتایج با داده‌های لایسیمتری مقایسه گردید و مورد تحلیل آماری قرار گرفت. به منظور تحلیل آماری نتایج از شاخص‌های تفاضل مطلق، میانگین تفاضل مطلق و میانگین ریشه دوم خطا و آزمون تی استفاده شده است. رابطه‌های مربوط به این آمارها به صورت معادلات ۱۳ تا ۱۵ می‌باشند (Gervasio et al., 2008):

$$AD = |E_{oi} - E_{si}| \quad (13)$$

$$MAD = |(E_{oi} - E_{si})|/n \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} (\sum (E_{si} - E_{oi})^2)} \quad (15)$$

که در آن‌ها، مقادیر E_{oi} و E_{si} و n به ترتیب مربوط به تبخیر- تعرق برآوردی به روش‌های سنجش از دور، لایسیمتری و تعداد داده‌ها

Table 3- The amount of net radiation and soil heat flux

جدول ۳- مقادیر تابش خالص و شار گرمای خاک

Method	Date	Pixel	Net Radiation R_n (W/m ²)	Soil Heat Flux G (W/m ²)
Landsat 8 + MODIS (fusion)	19 October 2014	Cold	457.00	56.50
		Hot	394.00	68.00
	6 October 2015	Cold	496.00	58.00
		Hot	417.00	100.00
	17 October 2016	Cold	470.00	69.00
		Hot	386.00	76.00
Landsat 8	19 October 2014	Cold	489.00	59.30
		Hot	374.00	92.00
	6 October 2015	Cold	473.69	65.11
		Hot	351.00	90.40
	17 October 2016	Cold	519.19	66.89
		Hot	298.00	80.62

پس از بررسی پارامترها و شاخص‌های مهم قابل استخراج از تصاویر ماهواره‌ای تبخیر- تعرق واقعی روزانه بر حسب میلی‌متر بر روز با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر ادغام شده ماهواره لندست ۸ و مودیس در شکل ۳ و نقشه تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از تصاویر لندست ۸ و روش سبال در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

نقشه تبخیر- تعرق واقعی حاصل از ادغام تصاویر مودیس و لندست ۸ به روش گرام اشمیت و الگوریتم سبال نشان می‌دهد که حداقل و حداکثر مقدار تبخیر- تعرق در ۱۹ اکتبر ۲۰۱۴ به ترتیب ۲/۵۱- و ۵/۷۱ میلی‌متر در روز می‌باشد. همچنین در تاریخ ۶ اکتبر ۲۰۱۵ مقادیر ۰/۵۵- و ۴/۷۰ میلی‌متر بر روز به‌عنوان بیشترین و کمترین مقدار تبخیر- تعرق به‌دست آمد. در ۱۷ اکتبر ۲۰۱۶ حداکثر تبخیر- تعرق واقعی ۵/۷۲ میلی‌متر در روز و حداقل آن ۲/۵۱- میلی‌متر در شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر برآورد گردید. علامت منفی تبخیر- تعرق مربوط به مناطقی است که آب وجود دارد مانند کانال‌های آبیاری. براساس نتایج به‌دست آمده حداقل تبخیر- تعرق واقعی از سال ۲۰۱۴ به ۲۰۱۵ افزایش، سپس از سال ۲۰۱۵ به ۲۰۱۶ کاهش یافته است. همچنین حداکثر تبخیر- تعرق واقعی نیشکر در این بازه زمانی روند منظمی را نشان نمی‌دهد از سال ۲۰۱۴ به سال ۲۰۱۵ کاهش و از ۲۰۱۵ به ۲۰۱۶ افزایش ملاحظه می‌گردد.

شکل ۴ تبخیر- تعرق واقعی حاصل از تصاویر لندست ۸ و الگوریتم سبال نشان می‌دهد که حداقل و حداکثر مقدار تبخیر- تعرق در ۱۹ اکتبر ۲۰۱۴ به ترتیب ۰/۵۵- و ۵/۵۲ میلی‌متر در روز می‌باشد. همچنین در تاریخ ۱۶ اکتبر ۲۰۱۵ مقادیر ۰/۵۵- و ۵/۷۱ میلی‌متر بر روز به‌عنوان بیشترین و کمترین مقدار تبخیر- تعرق به‌دست آمد. در ۱۷ اکتبر ۲۰۱۶ حداکثر تبخیر- تعرق واقعی ۵/۲۲ میلی‌متر در روز و حداقل آن ۰/۵۱- میلی‌متر در شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر برآورد گردید. براساس نتایج به‌دست آمده حداقل تبخیر- تعرق واقعی از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ تقریباً افزایش یافته است. این در حالی است که حداکثر تبخیر- تعرق واقعی نیشکر در این بازه زمانی روند منظمی را نشان نمی‌دهد. از سال ۲۰۱۴ به سال ۲۰۱۵ افزایش و از ۲۰۱۵ به ۲۰۱۶ کاهش ملاحظه می‌گردد. نتایج این قسمت برخلاف نتایج مربوط به روش گرام اشمیت می‌باشد. همچنین به ازای تبخیر- تعرق استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای به دو روش تلفیق و مجزا سطح تحت پوشش نیز از تصاویر استخراج شدند. نتایج در جدول ۵ ارائه شده است.

پس از مقادیر تابش خالص و شار گرمای خاک برای پیکسل‌های سرد و گرم، شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی NDVI و شاخص سطح برگ LAI از تصاویر استخراج شدند. جدول ۴ میانگین مقادیر به‌دست آمده را نشان می‌دهد.

Table 4- The average amount of normalized difference vegetation index and leaf area index
جدول ۴- مقادیر میانگین شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ

Method	Date	NDVI	LAI
Landsat 8+	19 October 2014	0.45	1.51
MODIS	6 October 2015	0.47	1.60
(fusion)	17 October 2016	0.48	1.83
	19 October 2014	0.62	2.12
Landsat 8	6 October 2015	0.64	2.61
	17 October 2016	0.63	2.44

براساس جدول ۴ میزان شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی روش تلفیقی کمتر از روش استفاده از یک تصویر به‌دست آمده است. به لحاظ رابطه‌ای این موضوع به این معنا است که در حالت استفاده از تلفیق تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ و مودیس تفاضل باندهای سه و چهار کمتر می‌باشد. همچنین شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی در حقیقت نشان دهنده تراکم پوشش گیاهی است و هر قدر پوشش گیاهی متراکم‌تر باشد مقدار آن بیشتر است. مقدار تغییرات NDVI بین مثبت و منفی یک بوده، سطوح دارای پوشش گیاهی دارای NDVI بین صفر و یک و آب، ابر معمولاً دارای NDVI کمتر از صفر می‌باشد. زمین‌های شامل پوشش گیاهی متراکم دارای مقادیر مثبت ۰/۳ تا ۰/۸ هستند، که اعداد به‌دست آمده نیز با دامنه ارائه شده تطابق دارد.

علاوه بر شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ که نسبت سطح برگ به سطح زمین اشغال شده توسط محصول است، نیز برای روش‌های ذکر شده از تصاویر استخراج شد. مطابق جدول ۴ شاخص سطح به‌دست آمده در تاریخ‌های مورد مطالعه در روش تلفیقی کمتر می‌باشد. این شاخص همچنین به لحاظ زمانی از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ برای روش تلفیقی افزایش یافته، در حالی که برای روش دوم از سال ۲۰۱۴ به ۲۰۱۵ افزایش و پس از آن کاهش را نشان می‌دهد.

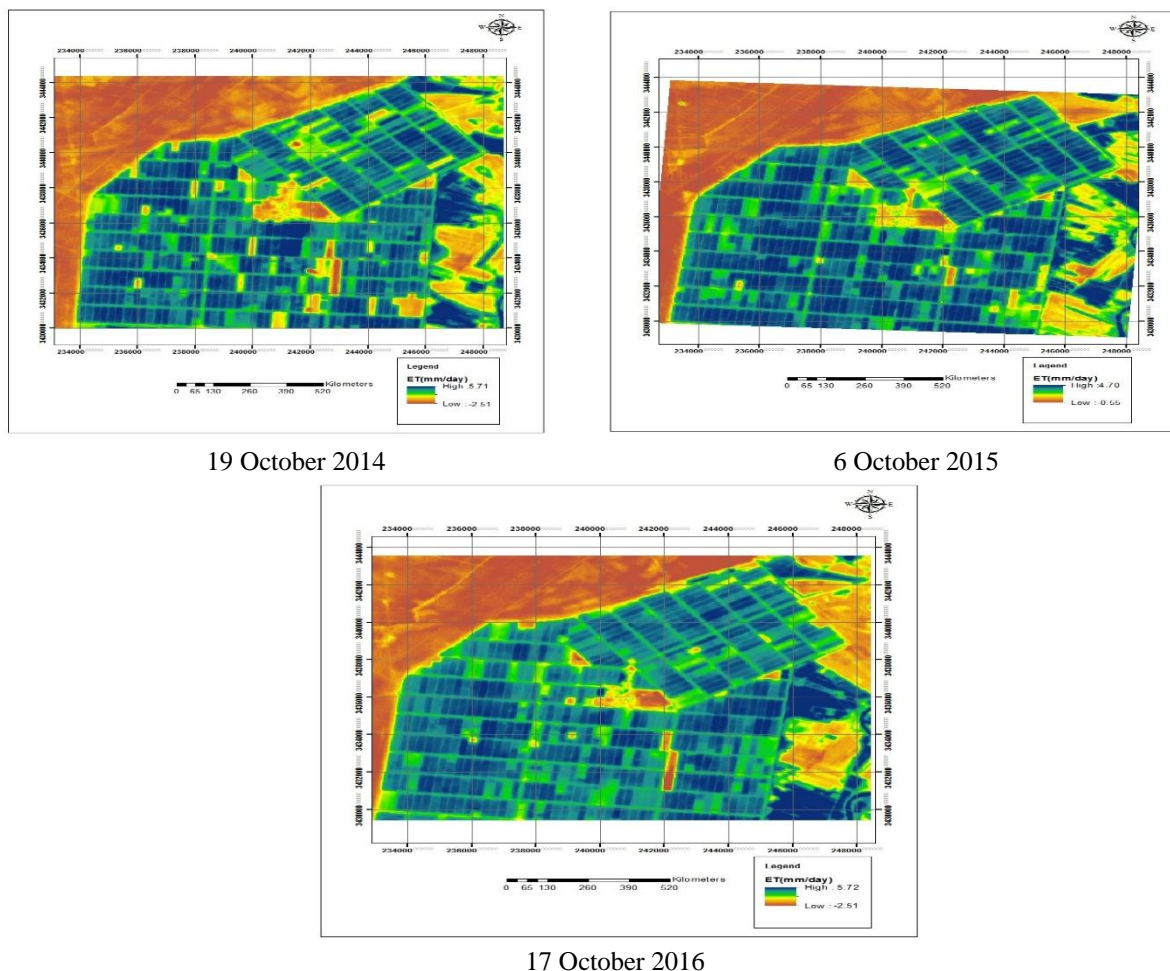


Fig. 3- The maps of actual evapotranspiration from Landsat 8 and MODIS fusion images and SEBAL algorithms

شکل ۳- نقشه تبخیر- تعرق واقعی حاصل از ادغام تصاویر مودیس و لندست ۸ و الگوریتم سبال

تطابق خوبی وجود دارد. همچنین مقدار میانگین ریشه دوم خطا مقدار $0/56$ برآورد گردید که مقدار مناسبی می باشد. مقدار زیاد RMSE نشان می دهد که برآورد بیش از حد یا کمتر از حد مدل، در مقایسه با مشاهدات چقدر است. پس از مقایسه تبخیر- تعرق واقعی حاصل از تلفیق تصاویر و داده های لایسیمیتری، نتایج حاصل از تصاویر ماهواره لندست ۸ با داده های زمینی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج در جدول ۷ ارائه شده است.

نتایج جدول ۷ نشان دادند که میانگین تفاضل مطلق بین نتایج ماهواره لندست ۸ و داده های لایسیمیتری $0/063$ میلی متر بر روز به دست آمد که بیانگر این است که بین مقادیر تخمین زده شده و اندازه گیری شده تطابق بسیار خوبی وجود دارد. همچنین مقدار میانگین ریشه دوم خطا مقدار $0/068$ برآورد گردید که مقدار ایده آلی می باشد. نزدیک بودن

بر اساس نتایج جدول ۵ سطح تحت پوشش تبخیر- تعرق $4-5$ میلی متر در روز بیشتر از سایر بازه ها می باشد. به طور کلی از سال 2014 تا سال 2016 در دو روش کاربردی سطح افزایش یافته است. اما سطوح برآورد شده از روش تصاویر ماهواره لندست ۸ و الگوریتم سبال بیشتر از روش تلفیقی تصاویر لندست ۸ و مودیس بوده است.

پس از بررسی نقشه های به دست آمده نتایج مورد تحلیل آماری قرار گرفتند. جدول ۶ مقایسه آماری تبخیر- تعرق حاصل از روش ادغام تصاویر ماهواره های لندست ۸ و مودیس را با لایسیمتر نشان می دهد.

طبق جدول ۶ میانگین تفاضل مطلق بین نتایج تلفیق لندست ۸ و مودیس و داده های لایسیمیتری $0/055$ میلی متر بر روز به دست آمد. که بیانگر این است که بین مقادیر تخمین زده شده و اندازه گیری شده

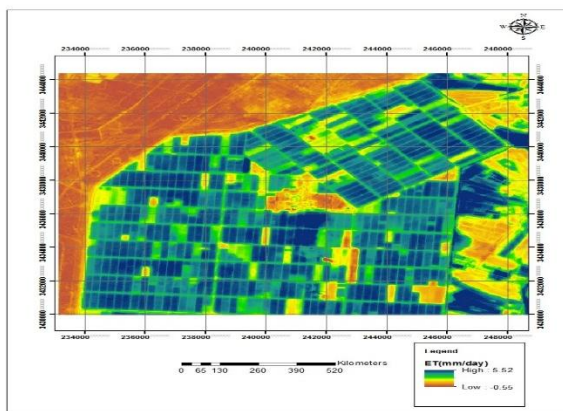
به صورت تصادفی، مقایسه شد. با توجه به نتایج جدول ۹ در سطح پنج درصد تفاوت معنی داری بین داده‌های دو روش وجود ندارد. همان‌طور که ذکر شد، تصاویر ماهواره لندست ۸ دارای تفکیک مکانی ۳۰ متر و فاصله‌ی زمانی ۱۶ روز و تصاویر ماهواره مودیس دارای قدرت مکانی ۱۰۰۰ متر بوده که به صورت روزانه در دسترس می‌باشد. به همین دلیل در بسیاری از تحقیقات تفکیک زمانی تصاویر ماهواره لندست ۸ و تفکیک مکانی تصاویر ماهواره مودیس به عنوان نقطه ضعف معرفی شده است.

علاوه بر این اغلب نتایج سنجش از دور با روش‌های محاسباتی نظیر پنمن-مانتیت مورد مقایسه قرار گرفته، لذا در تحقیق حاضر به منظور برآورد نیاز آبی به روش سنجش از دور و تبدیل روش‌های سخت‌افزاری به نرم‌افزاری و به منظور پوشش این نقاط ضعف از روش گرام اشمیت و الگوریتم سیال و مقایسه نتایج با داده‌های لایسمتری بهره گرفته شد.

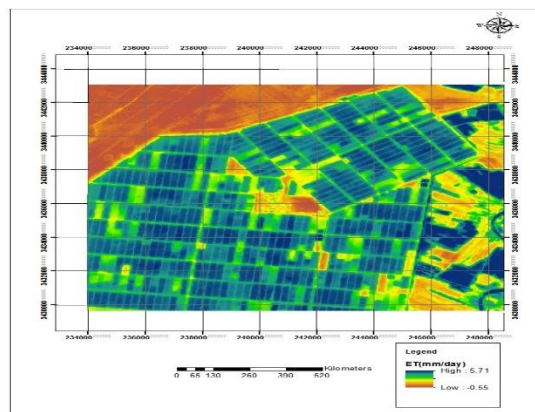
شاخص مذکور به صفر بیانگر نزدیکی داده‌های برآورد شده توسط مدل و اندازه‌گیری شده را دارد. سرانجام نتایج دو روش تلفیق تصاویر دو ماهواره لندست ۸ و مودیس و تصویر لندست ۸ به وسیله الگوریتم سیال مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج در جدول ۸ ملاحظه می‌شود.

طبق جدول ۸ میانگین تفاضل مطلق بین نتایج تلفیق لندست ۸ و مودیس و داده‌های ماهواره لندست ۸، 0.58 میلی‌متر بر روز به دست آمد که بیانگر این است که بین مقادیر تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده تطابق خوبی وجود دارد. همچنین مقدار میانگین ریشه دوم خطا مقدار 0.58 برآورد گردید که مقدار مناسبی می‌باشد. در پایان هم آزمون T-test بین نتایج دو روش تلفیق تصاویر و تصویر لندست ۸ انجام شد. نتایج در جدول ۹ ارائه شده است.

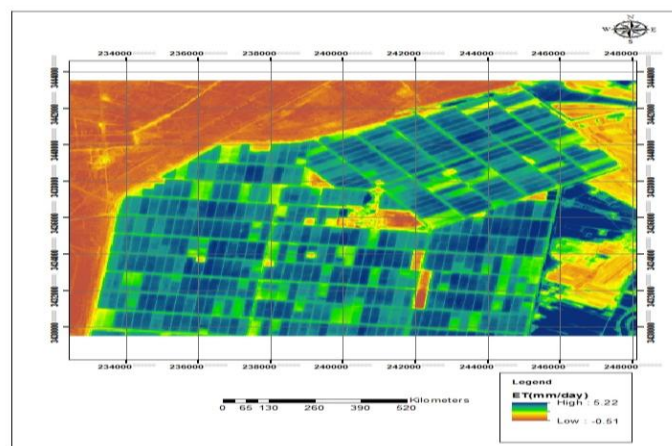
در جدول ۹ نتایج آزمون تی بعد از مقایسه داده‌های دو تصویر نشان داده شده است. بدین منظور داده‌های ۱۰۰ پیکسل از دو تصویر



19 October 2014



6 October 2015



17 October 2016

Fig. 4- The maps of actual evapotranspiration from Landsat 8 and SEBAL algorithms

شکل ۴- نقشه تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از تصاویر لندست ۸ با استفاده از الگوریتم سیال

Table 5- The surface covered by evapotranspiration estimated from studied satellite images

جدول ۵- سطح تحت پوشش تبخیر- تعرق برآورد شده از تصاویر ماهواره‌ای مورد مطالعه

Method	Date	ET (mm/day)	Area%
Landsat 8+ MODIS (fusion)	19 October 2014	<1	0.02
		1.1-2	2.01
		2.1-3	11.02
		3.1-4	34.95
		4.1-5	52.00
	6 October 2015	<1	0.05
		1.1-2	2.36
		2.1-3	12.84
		3.1-4	30.21
		4.1-5	54
	17 October 2016	<1	0.01
		1.1-2	1.6
2.1-3		8.8	
3.1-4		34.07	
4.1-5		55.53	
Landsat 8	19 October 2014	<1	0.63
		1.1-2	3.64
		2.1-3	14.92
		3.1-4	27.07
		4.1-5	53.74
	6 October 2015	<1	0.96
		1.1-2	3.76
		2.1-3	15.51
		3.1-4	23.73
		4.1-5	56.03
	17 October 2016	<1	0.59
		1.1-2	2.19
2.1-3		12.33	
3.1-4		26.88	
4.1-5		58	

Table 6- Comparison of actual evapotranspiration from Landsat 8 and MODIS fusion images (Gram-Schmidt method and SEBAL algorithm) and lysimeter data

جدول ۶- مقایسه تبخیر- تعرق واقعی حاصل از تلفیق تصاویر لندست ۸ و مودیس (روش گرام اشمیت و الگوریتم سبال) و داده‌های لایسیمتر

Date	Evapotraspiration (mm/day)		Absolute difference	The mean absolute difference (mm/day)	RMSE
	Lysimeter	Landsat 8+ MODIS			
19 October 2014	4.25	4.9	0.65		
6 October 2015	4.5	5.1	0.6	0.55	0.56
17 October 2016	4.6	5	0.4		

Table 7- Comparison of actual evapotranspiration from Landsat 8 images (SEBAL algorithm) and lysimeter data

جدول ۷- مقایسه تبخیر- تعرق واقعی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (الگوریتم سبال) و داده‌های لایسیمتر

Date	Evapotraspiration (mm/day)		Absolute difference	The mean absolute difference (mm/day)	RMSE
	Lysimeter	Landsat 8			
19 October 2014	4.25	4.3	0.05		
6 October 2015	4.5	4.6	0.1	0.063	0.068
17 October 2016	4.6	4.56	0.04		

Table 8- Comparison of actual evapotranspiration from Landsat 8 and MODIS fusion images (Gram-Schmidt method) and Landsat 8 images using SEBAL algorithm

جدول ۸- مقایسه تبخیر- تعرق واقعی حاصل از تلفیق تصاویر لندست ۸ و مودیس (روش گرام اشمیت) و تصاویر لندست ۸ با استفاده از الگوریتم سبال

Date	Evapotraspiration (mm/day)		Absolute difference	The mean absolute difference (mm/day)	RMSE
	Landsat 8	Landsat 8+ MODIS			
19 October 2014	4.3	4.9	0.6		
6 October 2015	4.6	5.1	0.7	0.58	0.58
17 October 2016	4.56	5	0.44		

به علاوه رابطه مستقیم بین تابش خالص خورشیدی و شارگرمای خاک که در واقع میزان انتقال گرما در خاک و پوشش گیاهی را در اثر هدایت مولکولی نشان می‌دهد، نیز در این قسمت به دست آمد. مشابه روش تلفیقی تصاویر میزان تبخیر تعرق روند منظم و مشابهی را نشان نداد. از سال ۲۰۱۴ به ۲۰۱۵ افزایش تبخیر- تعرق و از سال ۲۰۱۵ به ۲۰۱۶ کاهش تبخیر- تعرق حاصل شده است. این موضوع را می‌توان به شرایط محیطی ارتباط داد.

نتایج نشان دادند که علیرغم زیر سؤال بردن تصاویر ماهواره لندست به لحاظ زمانی جهت برآورد نیاز آبی (زیرا نیاز آبی روزانه حائز اهمیت است) با توجه به شاخص‌های محاسبه شده تفاوت چندانی را با داده‌های زمینی لایسیمیتری نشان نمی‌دهد و در مقایسه با روش تلفیق تصاویر که به منظور پوشش ضعف زمانی تصویر لندست ۸ با تصویر مودیس (که تفکیک زمانی قابل قبولی دارد)، دارای دقت بیشتری می‌باشد.

مقایسه تحقیق حاضر با سایر پژوهش‌های انجام شده نشان داد که Ramos et al. (2009) و Karimi et al. (2012) میانگین تفاضل مطلق بین تبخیر تعرق حاصل از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و لایسیمتر را ۰/۵۳ میلی‌متر در روز به دست آوردند، این در حالی است که در تحقیق حاضر برای روش‌های تلفیقی- لایسیمتر، لندست- لایسیمتر و تلفیقی- لندست به ترتیب ۰/۵۵، ۰/۶۳ و ۰/۵۸ میلی‌متر در روز به دست آمد که مقادیر قابل قبولی می‌باشند.

۵- نتیجه‌گیری

اهمیت تخمین دقیق نیاز آبی در مدیریت بهینه‌ی منابع آب کشاورزی و وابستگی میزان تبخیر- تعرق گیاه به تغییرات زمانی و مکانی کم،

Table 9- T-test results between the amount of evapotranspiration of Landsat satellite images and Landsat 8 and MODIS fusion images

جدول ۹- نتایج آزمون تی بین مقادیر تبخیر- تعرق تصاویر ماهواره لندست ۸ و تصاویر ادغام شده مودیس و لندست ۸

Date	t	sig	Std. Error Difference
19 October 2014	-0.093	0.96	0.09328
6 October 2015	-0.191	0.853	0.06944
17 October 2016	-0.092	0.96	0.16781

بررسی‌ها بیانگر این مطلب بود که در تصاویر تلفیقی مربوط به سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ شاخص سطح برگ و شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی افزایش یافته است. از آنجایی که NDVI تراکم پوشش را نشان می‌دهد، رابطه مستقیم این شاخص با LAI تأییدی است بر صحت نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر. همچنین میزان تابش خالص خورشیدی و شارگرمای خاک نیز رابطه‌ی مستقیمی را در تصاویر تلفیقی نشان دادند، که رابطه‌ی ۱ این مطلب را تأیید می‌نماید. میزان حداکثر تبخیر- تعرق در تصاویر تلفیقی از سال ۲۰۱۴ به سال ۲۰۱۵ کاهش و از سال ۲۰۱۵ به ۲۰۱۶ افزایش یافته است. با توجه به مقادیر و روند تغییرات شاخص سطح برگ و شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی انتظار می‌رفت که روند افزایشی باشد، بنابراین می‌توان بیان نمود که عواملی محیطی نظیر دما، میزان رطوبت نسبی هوا و سرعت باد نیز می‌تواند بر میزان تبخیر تأثیرگذار باشد.

همچنین در بررسی شاخص‌های و پارامترهای مذکور در تصویر لندست ۸ به صورت مجزا از سال ۲۰۱۴ به سال ۲۰۱۵ افزایش شاخص سطح برگ و از سال ۲۰۱۵ به ۲۰۱۶ کاهش سطح برگ مشاهده شد. نتایج مشابهی برای شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی نیز به دست آمد که در این قسمت هم رابطه مستقیم این دو شاخص تأیید گردید.

۶- مراجع

- Allen R, Tasumi M, Trezza R, Waters R, Bastiaanssen W (2002) SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Advance Training and User's Manual-Idaho Implementation. Version, 1:97
- Allen RG, Tasumi M, Trezza R, Bastiaanssen W, Morse T, Kramber W, Wright J (2005) METRIC: High Resolution Satellite Quantification of Evapotranspiration. Part Two – Energy Balance, University of Idaho, Kimberly, Idaho
- Allen R, Irmak A, Trezza R, Hendrickx JM, Bastiaanssen W, Kjaersgaard J (2011) Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrological Processes*, 25(26):4011-4027
- Bastiaanssen WGM, Menenti M, Feddes RA, Holtslag AAM (1998) A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212:198-212
- Bastiaanssen WGM, Thiruvengadachari T, Sakthivadivel R, Molden DJ (1999) Satelliteremote sensing for estimating productivities of land and water. *International Journal of Water Resources Development*, 15:181-196
- Craig A, Bernard L, Brower V (2000) Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening”, United States Patent, Appl. No: 09/069,232, 2000
- Fakhimi M, Smael A, Shah Pasandzadeh, M (2016) Evaluating different method of fusion images of IRS and ASTER. The 2nd International Congress of Earth Sciences and Urban Development (In Persian)
- Gervasio Pineiroa G, Perelman S, Guerschman JP, Paruelo JM (2008) How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological modeling*, 316-322
- Ghamarnia H, Rezvani SV (2014) Calculation and zoning of evapotranspiration using SEBAL method in the west of Iran (Mian Darband Plain). *Journal of water and soil*, 28(1):72-81 (In Persian)
- Ghamarnia H, Gholamian SM, 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)
- Karimi AR, Farhadi Bansouleh B, Hesadi, H (2012) Estimation of regional evapotranspiration using LANDSAT TM images and SEBAL Algorithm.
- ایجاب می‌کند برای محاسبه تبخیر- تعرق واقعی گیاه از تصاویر ماهواره‌ای با تفکیک مکانی و زمانی مناسب در مقایسه با روش‌های متداول محاسبه تبخیر- تعرق استفاده شود؛ زیرا در روش‌های سنجش از دور می‌توان داده‌ها را در مقیاس منطقه‌ای به‌دست آورد. در مقاله حاضر که تبخیر- تعرق واقعی گیاه نیشکر در شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر استان خوزستان به دو روش سنجش از دور (تلفیق تصاویر لندست ۸ و مودیس به روش گرام اشمیت و تصویر لندست به صورت مجزا و الگوریتم سبال) و لایسیمتر بررسی و مورد مقایسه قرار گرفتند و نتایج زیر به‌صورت خلاصه به‌دست آمد:
- نتایج نشان دادند که تلفیق تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ و مودیس به روش گرام اشمیت و سپس برآورد تبخیر- تعرق واقعی نیشکر با استفاده از الگوریتم سبال و مقایسه آن با داده‌های لایسیمتری از دقت قابل قبولی برخوردار است.
- بررسی‌ها مشخص نمود که برآورد تبخیر- تعرق واقعی نیشکر با استفاده از تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ و الگوریتم سبال و مقایسه با داده‌های لایسیمتری دارای تفاضل مطلق قابل قبولی می‌باشد.
- مقایسه دو روش تلفیق تصاویر و استفاده از تصویر ماهواره لندست به‌صورت مجزا تفاوت معنی‌داری را در سطح پنج درصد نشان نداد.
- از آنجایی که هر تحقیق دارای محدودیت‌هایی می‌باشد، پژوهش حاضر نیز از این امر مستثنی نبوده لذا پیشنهاد می‌گردد برای تحقیقات آتی به منظور حصول نتایج دقیق‌تر در اراضی کشت و صنعت برای انجام امور تحقیقاتی از لایسیمتر وزنی استفاده شود. همچنین به منظور تلفیق تصاویر لندست و مودیس و افزایش دقت نهایی الگوریتم گرام اشمیت، باید منابع مختلف خطا کنترل شوند. برای سنجش کارایی این روش پیشنهاد می‌شود این الگوریتم با استفاده از نرم‌افزارهایی هم‌چون MATLAB نیز بر روی تصاویر انجام و نتایج آن مورد ارزیابی قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود از این روش در اراضی یکنواخت و هم‌وزن استفاده شود، چرا که یکنواختی پیکسل‌ها در افزایش دقت این روش بسیار تأثیرگذار خواهد بود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model
- 2- Principal Component Spectral Sharpening
- 3- CN Spectral Sharpening

- Sanaei Nezhad SH, Noori S, Hasheminia SM (2011) Estimation of evapotranspiration using satellite image data in Mashhad area. *Journal of water and soil*, 25(3):540-547 (In Persian)
- Safi R, Mirlatifi SM, Akbari M (2016) Assessment of water productivity of the Amirkabir Sugarcane Agro-Industry farms using Landsat 8 Satellite data. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 10(1):36-47 (In Persian)
- Simaie E, Homae M, Norouzi AA (2013) Evaluating SEBAL model to estimate evapotranspiration using MODIS and TM sensors data. *Water and soil resources conservation journal*, 2(4):29-40 (In Persian)
- Soheylifar Z, Mirlatifi SM, Naseri AA, Assari M (2012) Estimating actual evapotranspiration of sugarcane by remote sensing. (A case study: Mirza Kochakkhan Sugarcane Agro-Industry Company Farms). *Journal of water and soil science*, 23(1):151-163 (In Persian)
- Steele D, Thoreson B, Hopkins D, Clark B, Tuscherer S, Gautam R (2015) Spatial mapping of evapotranspiration over Devils Lake basin with SEBAL: application to flood mitigation via irrigation of agricultural crops. *Irrigation Science*, 33(1):15-29
- Zhuang X, Shi R, Liu Ch (2011) Data fusion satellite remotely sensed images and its application in agriculture. *Photonics and Imaging for Agricultural Engineering*, doi:10.1117/12.888029
- Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 4(6):353-364 (In Persian)
- Kathryn A, Semmens A, Martha C, Anderson A, et al. (2016) Monitoring daily evapotranspiration over two California vineyards using Landsat 8 in a multi sensor data fusion approach. *Remote Sensing of Environment*, 185:155-170
- Makari M, Ghahraman B, Sanaei Nejad SH, Alizadeh A (2015) Temporal and spatial downscaling of actual evapotranspiration based-Landsat and MODIS Images. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 5(9):710-719 (In Persian)
- Miryaghoubzadeh M, Solaimani K, Habibnejad Roshan M, Shahedi K, Abbaspour K, Akhavan S (2014) Estimation and assessment of actual evapotranspiration using remote sensing data (Case study: Tamar basin, Golestan province, Iran). *Irrigation and water engineering journal*, 4(15):89-102 (In Persian)
- Moghimi A, Ebadi H, Sadeghi V (2016) Review of change detection methods from multitemporal satellite images by pixel-based and object-based approach. *Geospatial Engineering Journal*, 7(2):99-110 (In Persian)
- Ramos JG, Cratchley CR, Kay JA, Casterad MA, Martinez-cob A, Dominguez 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*, 96:638-652