



Spatio-Temporal Resolution Improvement of Actual Evapotranspiration Using MODIS and Landsat-8 Data Fusion

H. Salehi¹, A. Shamsoddini^{2*} and S.M. Mirlatif³

Abstract

Recently, downscaling algorithms have been developed to obtain ET images with high temporal-spatial resolution. The purpose of the present study is to produce daily ET maps with spatial resolution of 30 m for farmlands of Amirkabir Agriculture & Industry. To reach this goal, two different scenarios were used. In the first scenario, SEBAL algorithm input parameters (surface albedo coefficient, normalized difference vegetation index [NDVI], leaf area index [LAI] and land surface temperature [LST]) calculated from MODIS data were downscaled to spatial resolution of Landsat-8, and then actual ET was calculated. In the second scenario, ET data estimated by MODIS data and SEBAL algorithm was downscaled to Landsat-8 spatial resolution. In the first and second scenarios, downscaling was conducted by applying three methods including ratio, regression and neural network. Also, two approaches were applied in this study. In the first approach, the time lag between the base image (image with higher spatial resolution) and MODIS image varies from 1 to 15 days, whereas in the second approach the time lag was 1 day. Comparing downscaled actual ET with actual ET calculated from Landsat-8 data, the regression method applied in the second scenario and first approach indicated the best result with RMSE=0.87 mm/day and neural network used in the second scenario and second approach showed the worst result with RMSE=2.25 mm/day. However downscaled actual ETs derived from different methods were more accurate than actual ET resulted from MODIS data with RMSE= 3.19 mm/day.

Keywords: Evapotranspiration, MODIS, Landsat-8, Downscaling, SEBAL.

Received: March 1, 2020

Accepted: June 1, 2020

بهبود قدرت تفکیک زمانی- مکانی داده‌های تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از ترکیب داده‌های مادیس و لندست-۸

حمید صالحی^۱، علی شمس‌الدینی^{۲*} و مجید میرلطیفی^۳

چکیده

هدف این مطالعه تولید نقشه‌های تبخیر- تعرق واقعی با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و به صورت روزانه برای اراضی کشت و صنعت امیرکبیر با استفاده از دو سناریو می‌باشد. در سناریوی اول پارامترهای ورودی مورد نیاز الگوریتم سیال حاصل از تصاویر مادیس به قدرت تفکیک مکانی لندست-۸ ریزمقیاس شده، سپس با استفاده از الگوریتم سیال و پارامترهای ورودی ریزمقیاس شده، تبخیر- تعرق واقعی محاسبه شد. در سناریوی دوم تبخیر- تعرق واقعی بدست آمده از سنجنده مادیس به قدرت تفکیک مکانی لندست-۸ ریزمقیاس شد. در سناریوهای اول و دوم ریزمقیاس کردن داده‌ها با سه روش نسبت، رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی و با دو رویکرد مختلف انجام شد. در رویکرد اول فاصله زمانی بین تصویر پایه و تصویر ریزمقیاس شده از ۱ روز تا ۱۵ روز متغیر می‌باشد ولی در رویکرد دوم فاصله زمانی بین دو تصویر پایه و ریزمقیاس شده ۱ روز می‌باشد. با مقایسه تبخیر- تعرق‌های واقعی ریزمقیاس شده با مقادیر تبخیر- تعرق واقعی بدست آمده از تصویر لندست-۸ روش رگرسیون در سناریوی دوم با رویکرد اول با مجذور میانگین مربعات خطا ۰/۸۷ میلی‌متر در روز دارای بهترین نتیجه و روش شبکه عصبی مصنوعی در سناریوی دوم با رویکرد دوم با مجذور میانگین مربعات خطا ۲/۲۵ میلی‌متر در روز دارای بدترین نتیجه بود. اگرچه نتایج محاسبه تبخیر- تعرق واقعی حاصل از ریزمقیاس نمایی در تمامی روشها در هر دو سناریو و با هر دو رویکرد، نسبت به تبخیر- تعرق واقعی بدست آمده از تصویر مادیس با مجذور میانگین مربعات خطا ۳/۱۹ میلی‌متر در روز دارای صحت بهتری بود.

کلمات کلیدی: تبخیر- تعرق، مادیس، لندست-۸، ریزمقیاس نمایی، سیال.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۲/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۳/۱۲

1- Master of Agricultural Engineering (Irrigation), Regional Water Company of Tehran.

2- Assistant professor, Department of Remote Sensing and GIS, Tarbiat Modares University. Email: ali.shamsoddini@modares.ac.ir

3- Associate professor, Department of Irrigation and Drainage, Tarbiat Modares University.

*- Corresponding Author

۱- کارشناس ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، شرکت آب منطقه‌ای تهران.

۲- استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

تحقیقات متعددی، روش سبال را به عنوان یک روش متداول و نیز دارای صحت مناسب به منظور محاسبه تبخیر- تفرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مختلف معرفی نموده‌اند (Hafeez et al., 2002; Chandrapala and wimalasuriya, 2003; Li et al., 2008; Ramosa et al., 2008). در این تحقیقات عمدتاً از مقایسه مقادیر تبخیر- تفرق حاصل از سبال با مقادیر تبخیر- تفرق بدست آمده با استفاده از معادله فائو-پنمن-مانتیث، و یا مقادیر حاصل از دستگاه سنٹیلمتر^۷، استفاده شده است. با توجه به تحقیقات ارائه شده، از آنجایی که عملکرد مدل سبال به منظور تخمین تبخیر- تفرق واقعی خوب ارزیابی شده است لذا در تحقیق حاضر نیز از این مدل برای بدست آوردن تبخیر- تفرق واقعی استفاده شد.

تلفیق تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک‌های مکانی متفاوت یکی از راهکارهایی است که معمولاً به منظور تهیه تصاویری با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. Goshehghir et al. (2018) با استفاده از روش گرام اشمیت داده‌های لندست-۸ و مادیس را ادغام و نتایج حاصل را با داده‌های لایسیمتر مقایسه نمودند و میانگین تفاضل مطلق این مقایسه را ۰/۵۵ میلی‌متر در روز گزارش نمودند. Varvani et al. (2019) نیز با یک روش خطی به نام LinZi اقدام به تلفیق داده‌های لندست-۸ و مادیس به منظور برآورد تصاویر تبخیر- تفرق واقعی با قدرت تفکیک زمانی- مکانی بالا نمودند. نتایج این تحقیقات نشان داد که تلفیق داده‌های ماهواره‌ای منجر به بهبود دقت تبخیر- تفرق برآوردی نسبت به تصاویر لندست-۸ می‌گردد. علاوه بر تلفیق تصاویر، از ریزمقیاس‌نمایی نیز به منظور تهیه تصاویر با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا استفاده می‌شود. به منظور ریزمقیاس کردن داده‌های سنجش از دور تاکنون روش‌های متعددی ارائه شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. (Agam et al., 2007) توابع مبتنی بر ترکیب تصاویر به منظور اصلاح روش DisTrad^۸ برای ریزمقیاس کردن پیکسل‌های دمای سطحی در قدرت تفکیک‌های مکانی کمتر از ۱۰۰m را توسعه دادند و این روش را به TSHARP^۹ تغییر نام دادند. Yang et al. (2010) از روش ترکیبی شبکه‌های عصبی (ANN) و الگوریتم ژنتیک (GA) به منظور استخراج رابطه بین پارامترهای با قدرت تفکیک بالا سطح زمین (شامل شاخص سطح برگ، شاخص پوشش گیاهی و شاخص رطوبت خاک) و دمای سطحی (LST^{۱۰}) بدست آمده از داده‌های استر^{۱۱} استفاده کردند. در مطالعات فوق فقط دمای سطحی ریزمقیاس شده است؛ در حالی که برای بدست آوردن تبخیر- تفرق واقعی با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا علاوه بر دمای سطحی پارامترهای آلبیدوی سطح، شاخص پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ نیز باید ریزمقیاس شوند.

امروزه، محاسبه دقیق نیاز آبی محصول (CWR)^۱ و نیاز آب آبیاری (IWR)^۲ به ویژه در صورت کمبود آب در راستای استفاده مناسب از آب بسیار حائز اهمیت است. بهره‌گیری از فناوری سنجش از دور در مدیریت برنامه‌های آبیاری فرصتی برای کشاورزان به منظور مدیریت مزارع خود برای به حداکثر رساندن سود در مقایسه با تکنیک‌های سنتی فراهم می‌کند (Brisco et al., 2014). فناوری سنجش از دور اطلاعاتی از فرآیندهای فیزیکی که در حال وقوع بر روی زمین می‌باشند را در قدرت تفکیک‌های زمانی و مکانی مختلف ارائه می‌دهد. از این رو کشاورزی دقیق^۳ نیاز به داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا دارد. به طور خلاصه برای مدیریت دقیق آبیاری در سطح مزرعه تصاویر با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا برای ارائه نقشه‌های تبخیر- تفرق واقعی که برای تخمین دقیق CWR و IWR مفید است، ضروری می‌باشند (Ha et al., 2012a). تولید نقشه‌های تبخیر- تفرق روزانه با قدرت تفکیک مکانی بالا همواره یکی از چالش‌های محققین بوده است (Ha et al., 2012b). محصولات ماهواره‌ای معمولاً به تصاویر با قدرت تفکیک مکانی پایین، متوسط و بالا تقسیم می‌شوند. تصاویر با قدرت تفکیک مکانی پایین و متوسط و قدرت تفکیک زمانی بالا برای کاربران در دسترس می‌باشند، در حالی که تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا در اکثر مواقع دارای قدرت تفکیک زمانی بالایی نیستند و یا به صورت تجاری و با هزینه بالا در دسترس می‌باشند. علاوه بر این، تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا معمولاً فاقد باندهای حرارتی بوده و لذا در مدل کردن فرآیندهای طبیعی مانند تبخیر- تفرق با محدودیت کاربرد مواجه هستند (Mahour et al., 2017). بنابراین پایش فرآیندهای محیطی مانند تبخیر- تفرق واقعی با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا توسط سنجنده‌ای واحد، ممکن نمی‌باشد. به منظور آنکه بتوان فرآیندهای محیطی مانند تبخیر- تفرق واقعی را هم از نظر زمانی و هم از نظر مکانی با دقت بالا برآورد نمود، معمولاً از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌شود (Ha et al., 2012b). ریزمقیاس‌نمایی فرآیندی است که تصاویر با قدرت تفکیک مکانی پایین را با استفاده از مدل‌های آماری یا روابط تصادفی بین پارامترها یا فرآیندهای مبتنی بر مدل‌های عددی یا مدل‌های ترکیبی به تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا تبدیل می‌کند (Luo et al., 2008). برای بدست آوردن تبخیر- تفرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای الگوریتم‌های متعددی ارائه شده است که از این میان می‌توان به الگوریتم سبال (SEBAL^۴) (Bastiaanssen, 2000)، الگوریتم سبس (SEBS^۵) (Su, 2002)، الگوریتم متریک (METRIC^۶) (Allen et al., 2007) و الگوریتم SSEBS^۷ (Senay et al., 2007) اشاره نمود. در میان این روش‌ها،

(2011) Hong et al. با دو رویکرد مختلف شامل ریزمقیاس‌نمایی ورودی‌های سبال و ریزمقیاس‌نمایی داده‌های تبخیر- تعرق واقعی حاصل از مادیس به قدرت تفکیک مکانی لندست-7، و با استفاده از دو روش تفریق و رگرسیون تصاویر تبخیر- تعرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک مکانی بالا ایجاد کردند. ایشان برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌ها فقط از روش‌های خطی استفاده نمودند در حالی که برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌ها می‌توان از روش‌های غیرخطی نیز کمک گرفت و نتایج آن را با روش‌های خطی مقایسه نمود. (2013) Brindhu et al. با استفاده از یک روش ترکیبی غیرخطی که NL-DisTrad نامیده می‌شود، دمای سطح زمین بدست آمده از سنجنده مادیس را به قدرت تفکیک مکانی لندست-7 ریزمقیاس کردند. ایشان تبخیر- تعرق بدست آمده از مدل سبال بر اساس LST ریزمقیاس شده با استفاده از روش‌های NL-DisTrad که توسط ایشان به عنوان یک روش ترکیبی غیرخطی پیشنهاد شده بود، TSHARP و آن‌چه که از لندست-7 بدست می‌آمد، مقایسه کردند. در تحقیقی دیگر Mahour et al. (2017) از دو رویکرد شامل ریزمقیاس‌نمایی LST و تبخیر تعرق واقعی بدست آمده از روش سبس و داده‌های مادیس با استفاده از روش کوکریجینگ استفاده نمودند.

دو رویکرد برای دو سناریوی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. در سناریوی اول ابتدا پارامترهای ورودی مورد نیاز الگوریتم سبال ریزمقیاس شدند و سپس تصاویر تبخیر- تعرق روزانه با قدرت تفکیک مکانی 30 متر تولید شدند. درحالی‌که در سناریوی دوم مستقیماً تصاویر تبخیر- تعرق مادیس ریزمقیاس شدند. در سناریوهای اول و دوم از سه روش نسبت، رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی جهت انجام ریزمقیاس‌نمایی استفاده شد. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، مزارع نیشکر کشت و صنعت امیرکبیر می‌باشد که با توجه به موجود بودن داده‌های میدانی انتخاب شد. از طرف دیگر میزان آبی که برای کشت نیشکر در استان خوزستان مصرف می‌شود بسیار بیشتر از مصرف خالص گیاه نیشکر می‌باشد. این امر علاوه بر مصرف بیش از حد آب در این بخش، سبب خروج حجم بالایی از زهاب می‌شود. بنابراین به منظور مدیریت مصرف آب و متناسب با نیاز خالص گیاه وجود نقشه‌های تبخیر- تعرق روزانه با قدرت تفکیک مکانی بالا در این اراضی به منظور مدیریت مصرف آب مورد نیاز می‌باشند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

کشت و صنعت امیرکبیر و صنایع جانبی آن در جنوب استان خوزستان، در طول جغرافیایی $49^{\circ}16'48''$ شرقی و عرض جغرافیایی $32^{\circ}02'31''$ شمالی قرار دارد. مساحت ناخالص اراضی این کشت و صنعت 15000 هکتار و مساحت خالص آن 12000 هکتار می‌باشد که به چندین قطعه 25 هکتاری تقسیم‌بندی شده است (شکل 1). در تحقیق حاضر مجموعه‌ای از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. داده‌های زمینی شامل داده‌های ایستگاه هواشناسی واقع در کشت و صنعت، برداشت‌های مزرعه‌ای مانند ارتفاع گیاهی در دوره‌های مختلف و داده‌های ماهواره‌ای شامل تصاویر مادیس در تاریخ‌های 2017/6/14 تا 2017/6/30 و لندست 8 در تاریخ‌های 2017/06/14 و 2017/06/30 می‌باشند. قدرت تفکیک مکانی باندهای 1 و 2 تصاویر مادیس 250 متر، باندهای 3 تا 7، 500 متر و سایر باندهای این ماهواره 1000 متر می‌باشند. همچنین باندهای بازتابندگی تصاویر لندست-8، به استثناء باند پانکروماتیک که در این مطالعه مورد استفاده قرار نگرفت، دارای قدرت تفکیک مکانی 30 متر و باندهای حرارتی این سنجنده دارای قدرت تفکیک مکانی 100 متر می‌باشند. در این تحقیق جهت تصحیح اثرات جوی تصاویر مادیس و لندست 8 از روشی که توسط Tasumi et al. (2008) ارائه شده، استفاده گردید.

بررسی‌های فوق نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات تنها با ریزمقیاس‌نمایی دمای سطح زمین (LST) به عنوان یکی از پارامترهای ورودی الگوریتم‌های بیان انرژی، داده‌های تبخیر- تعرق با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا را ایجاد نموده‌اند، در حالی که در برخی دیگر از الگوریتم‌های بیان انرژی از جمله سبال، علاوه بر دمای سطح زمین، پارامترهای آلبیدوی سطح، شاخص گیاهی تفاضل نرمال شده و شاخص سطح برگ نیز به عنوان ورودی مورد نیاز می‌باشند. همچنین مقایسه عملکرد روش‌های خطی ریزمقیاس‌نمایی نظیر نسبت و رگرسیون و روش‌های غیرخطی ریزمقیاس‌نمایی مانند شبکه عصبی به منظور ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه تبخیر- تعرق و ریزمقیاس‌نمایی تبخیر- تعرق محاسبه شده از یک تصویر با قدرت تفکیک مکانی پایین به قدرت تفکیک مکانی بالاتر، در مطالعات گذشته کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، در تحقیقات گذشته به منظور ریزمقیاس‌نمایی تصاویر و داده‌های تبخیر- تعرق، برای روزهای مختلف، تنها از یک تصویر با قدرت تفکیک مکانی بالا استفاده شده است. این درحالی است که در تحقیق حاضر، امکان استفاده از تصویر ریزمقیاس‌نمایی شده یک روز، برای ریزمقیاس‌نمایی روز بعد مورد بررسی قرار گرفته است و این رویکرد با رویکرد متداول در تحقیقات گذشته یعنی استفاده از یک تصویر لندست برای ریزمقیاس‌نمایی روزهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است. این

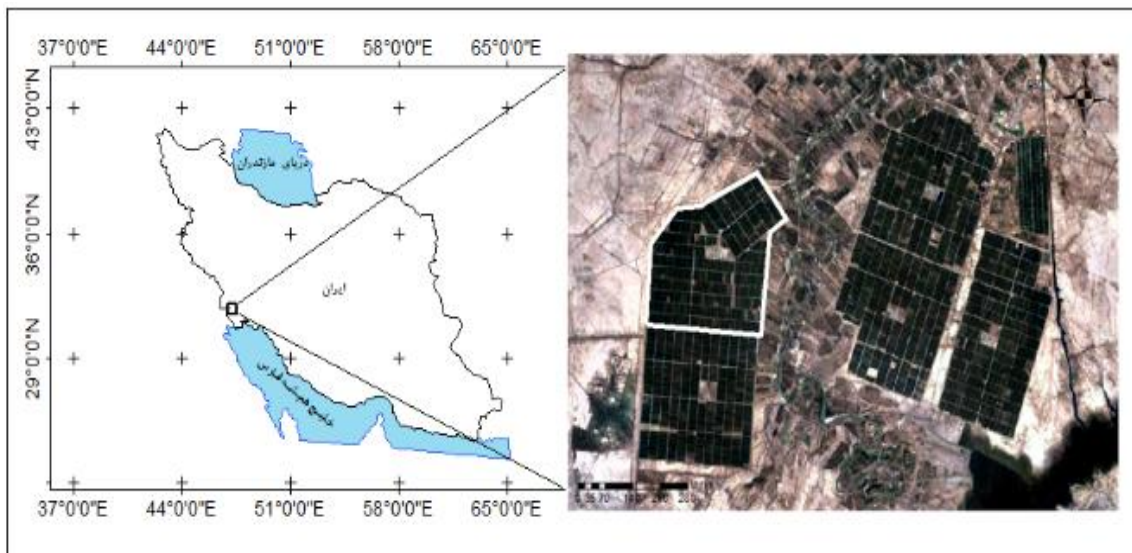


Fig. 1- Geographical location of the case study

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

رگرسیون، تصویر لندست ۸ در زمان دوم ریزمقیاس‌نمایی می‌شود (Hong et al., 2011).

۲-۲-۳- روش شبکه عصبی

روش شبکه عصبی دارای الگوریتم‌های متفاوتی می‌باشد که MLP^{۱۴} یکی از متداول‌ترین آن‌ها است. ساختار MLP از تعدادی لایه و گره^{۱۵} تشکیل شده است. ساختمان MLP شامل یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی می‌باشد. در داخل لایه پنهان واحدهایی به نام نرون قرار دارد. نرون‌ها به وسیله خطوطی بهم متصل‌اند که هر خط اتصال دارای ضریب هدایت برای هر متغیر ورودی می‌باشد. یکی از وجوه تمایز بین شبکه‌های عصبی مختلف متفاوت بودن توابع فعالیت^{۱۶} در آن‌ها می‌باشد. در لایه پنهان MLP اکثراً از سه نوع تابع فعالیت سیگموئید، هیپربولیک و خطی (همانی) استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر از تابع سیگموئید در لایه پنهان استفاده شد. به طور کلی در شبکه‌های MLP برای رسیدن به یک مدل مناسب برای حل یک مسأله خاص باید چند عامل شامل تعداد لایه‌های پنهان^{۱۷}، تعداد نرون‌ها در لایه‌های پنهان، نرخ آموزش^{۱۸}، ممتوم^{۱۹}، و آستانه خطا^{۲۰} به طرز مناسبی تعیین شوند (Shamsoddini et al., 2013). به منظور تعیین این مقادیر از روش آزمایش و خطا استفاده گردید.

۲-۳- الگوریتم سبال

مبنای الگوریتم‌های سنجش از دور برای محاسبه تبخیر- تعرق، معادله

۲-۲- روش‌های ریزمقیاس‌نمایی

به منظور ریزمقیاس‌نمایی داده‌های سنجش از دور شامل پارامترهای ورودی الگوریتم سبال (در سناریو اول) و نیز داده‌های تبخیر- تعرق (در سناریو دوم) در هر دو رویکرد از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی شامل روش نسبت، روش رگرسیون، و روش شبکه عصبی استفاده گردید.

۲-۲-۱- روش نسبت

برای بدست آوردن تصاویر با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و قدرت تفکیک زمانی روزانه با استفاده از روش نسبت ابتدا پیکسل‌های نظیر در دو تصویر مادیس در زمان‌های اول و دوم بر هم تقسیم می‌شوند. با ثابت فرض کردن این نسبت در رابطه با تصویر زمان اول لندست و تصویری که برای زمان دوم قرار است ریزمقیاس‌نمایی شود، برای پیکسل‌های تصاویر لندست ۸ در زمان اول، مقادیر پیکسل‌ها در زمان دوم نسبت‌گیری شده و مقادیر آن‌ها با استفاده از این نسبت بدست می‌آید (Hong et al., 2011). بدین ترتیب یک تصویر جدید با قدرت تفکیک مکانی سنجنده لندست ۸ برای زمان دوم شبیه‌سازی می‌شود.

۲-۲-۲- روش رگرسیون

برای شبیه‌سازی تصویر لندست-۸ در زمان دوم با استفاده از روش رگرسیون، با فرض ثابت بودن رابطه بین دو تصویر مادیس و لندست ۸ در زمان‌های اول و دوم یک رابطه رگرسیونی بین دو تصویر مادیس در زمان اول و دوم برقرار می‌شود. سپس با قراردادن مقادیر مربوط به پیکسل‌های لندست-۸ مربوط به زمان اول در این رابطه

بیان انرژی می‌باشد. معادله کامل بیان انرژی به صورت ذیل بیان می‌گردد (Bastiaanssen et al., 1998a):

$$R_n = G + H + \lambda ET + (\text{ذخیره گرما در زیست توده گیاه}) + (\text{جزء افقی گرمای آشکار و نهان}) \quad (1)$$

در رابطه فوق، R_n تابش خالص، G شار گرمای خاک، H شار گرمای محسوس و λET شار گرمای نهان بوده و تمامی واحدها بر حسب $\frac{W}{m^2}$ می‌باشند. در این معادله می‌توان از دو جزء فتوسنتز و ذخیره گرما در گیاه در معادله بیان انرژی صرف نظر کرد؛ زیرا بیشتر گیاهان کمتر از یک درصد تشعشع خورشیدی رسیده به آن‌ها را در طول دوره زندگی خود برای فتوسنتز استفاده می‌کنند. ذخیره حرارت در گیاهان در طول روز قابل صرف نظر می‌باشد و تنها در زمانی که تغییر درجه حرارت سریع بوده (به ویژه هنگام طلوع و غروب خورشید) و مقادیر R_n ، H و λET کوچک هستند، نسبتاً حائز اهمیت است. همچنین جزء افقی گرمای آشکار و نهان نشان‌دهنده میزان خالص انرژی است که گیاه در راستای افقی تبادل می‌کند. در آب و هوای خشک این جزء ممکن است مساوی با تابش خالص گردد و به رغم اهمیتی که دارد، به علت عدم وجود راه ساده‌ای برای ارزیابی آن، معمولاً در نظر گرفته نمی‌شود. Bastiaanssen et al. (1998a) با توجه به این فرضیات در معادله بیان و حذف این سه جزء از آن، الگوریتم انرژی سطح زمین با استفاده از محاسبات چند مرحله‌ای مبتنی بر روابط فیزیکی را به نام سبال ارائه دادند. روابط موجود و روند محاسباتی برای هر کدام از پارامترهای R_n ، G و H در تحقیق Bastiaanssen et al. (2002) بطور کامل تشریح شده‌اند. همانگونه که در بخش مقدمه عنوان گردید به دلیل کارایی روش سبال در محاسبه تبخیر- تعرق واقعی، از این روش به منظور بررسی کارایی روش‌های ریزمقیاس‌نمایی نسبت، رگرسیون و شبکه‌های عصبی برای محاسبه تبخیر- تعرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک بالا استفاده گردید.

۲-۴- سناریوها و رویکردهای محاسبه تبخیر- تعرق واقعی

در این تحقیق با دو سناریو و دو رویکرد مختلف داده‌های تبخیر- تعرق واقعی با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و قدرت تفکیک زمانی ۱ روز برای اراضی کشت و صنعت امیرکبیر در تاریخ‌های ۲۰۱۷/۰۶/۱۴ تا ۲۰۱۷/۰۶/۳۰ محاسبه گردید. در سناریوی اول پارامترهای ورودی الگوریتم سبال شامل آلبیدوی سطح، شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی، شاخص سطح برگ و دمای سطح زمین در دو رویکرد با سه روش نسبت، رگرسیون و شبکه‌های عصبی ریزمقیاس‌نمایی شدند. سپس با استفاده از پارامترهای ریزمقیاس‌نمایی شده، تبخیر- تعرق

واقعی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر محاسبه گردیدند. در سناریوی دوم ابتدا نقشه‌های تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال برای تصاویر مادیس در تاریخ‌های ۲۰۱۷/۰۶/۱۴ تا ۲۰۱۷/۰۶/۳۰ و تصویر لندست-۸ در تاریخ‌های ۲۰۱۷/۰۶/۱۴ و ۲۰۱۷/۰۶/۳۰ تولید شدند. سپس با دو رویکرد مختلف و اعمال سه روش نسبت، رگرسیون و شبکه‌های عصبی، تبخیر- تعرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر ریزمقیاس‌نمایی شدند.

در رویکرد اول، که همان رویکرد متداول تحقیقات گذشته می‌باشد، به منظور تهیه تصاویر ریزمقیاس شده، از تصاویر مادیس و لندست-۸ اخذ شده در تاریخ ۲۰۱۷/۰۶/۱۴ و نیز تصاویر مادیس بدست آمده برای روزهای ۲۰۱۷/۰۶/۱۴ تا ۲۰۱۷/۰۶/۳۰ به منظور ریزمقیاس‌نمایی و تهیه تصاویر با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و نیز قدرت تفکیک زمانی یک روز استفاده شد. در سناریوی دوم، همین رویکرد برای داده‌های تبخیر- تعرق واقعی اعمال گردید. در رویکرد دوم، به منظور ریزمقیاس‌نمایی تصویر هر روز، از تصویر مادیس و نیز تصویر ریزمقیاس‌نمایی شده مادیس در روز قبل استفاده می‌شود. همچنین برای سناریوی دوم نیز همین رویکرد برای داده‌های تبخیر- تعرق واقعی مورد استفاده قرار گرفت.

۳- نتایج

تبخیر- تعرق‌های واقعی ریزمقیاس شده با دو سناریو و دو رویکرد مختلف، با مقادیر تبخیر- تعرق واقعی بدست آمده از تصویر لندست-۸ در تاریخ ۲۰۱۷/۰۶/۳۰ مقایسه شدند. مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا حاصل از این مقایسه در جدول ۱ ارائه شده‌اند. مجذور میانگین مربعات خطا تبخیر- تعرق واقعی بدست آمده از مدل سبال برای تصویر مادیس در تاریخ ۲۰۱۷/۰۶/۳۰ در مقایسه با تبخیر- تعرق واقعی حاصل از تصویر لندست-۸ در همان تاریخ برابر ۳/۱۹ میلی‌متر در روز محاسبه شد. با توجه به جدول ۱ ملاحظه می‌شود که در هر دو سناریو و برای تمام روش‌ها رویکرد اول دارای نتایج بهتری نسبت به رویکرد دوم می‌باشد. به منظور مقایسه بصری، تبخیر- تعرق واقعی روزانه ریزمقیاس‌نمایی شده با رویکرد اول به قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر برای منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ ارائه شده‌اند. همچنین در شکل ۳ ضرایب تعیین به همراه نمودارهای نقطه‌ای دو بعدی تبخیر- تعرق‌های واقعی ریزمقیاس‌نمایی شده روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر با رویکرد اول و تبخیر- تعرق واقعی حاصل از تصویر لندست-۸ در تاریخ ۲۰۱۷/۰۶/۳۰ ارائه شده‌اند. شکل ۳ نشان می‌دهد به غیر از روش نسبت استفاده شده در سناریوی دوم با رویکرد اول، همبستگی خوبی بین داده‌های تبخیر- تعرق واقعی حاصل از دو تصویر

دوم با رویکرد اول با مجذور میانگین مربعات خطا 0.87 میلیمتر در روز دارای بهترین عملکرد و روش شبکه عصبی مصنوعی در سناریوی دوم با رویکرد دوم با مجذور میانگین مربعات خطا $2/25$ میلیمتر در روز دارای بدترین عملکرد می‌باشد. این عدد در مقایسه با تبخیر- تعرق واقعی بدست آمده از تصاویر مادیس با مجذور میانگین مربعات خطا $3/19$ میلیمتر در روز دارای صحت بهتری می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت تبخیر- تعرق واقعی ریزمقیاس‌نمایی شده در هر دو سناریو و هر دو رویکرد و با استفاده از تمام روش‌ها دارای صحت بهتری نسبت به تبخیر- تعرق واقعی بدست آمده از تصاویر مادیس می‌باشند. در تحقیقی که Hong et al. (2011) با هدف تهیه نقشه‌های تبخیر- تعرق واقعی با قدرت تفکیک مکانی 30 متر و قدرت تفکیک زمانی روزانه انجام دادند، از 4 روش تفریق ورودی، تفریق خروجی، رگرسیون ورودی و رگرسیون خروجی استفاده نمودند. این محققان در روش‌های تفریق ورودی و رگرسیون ورودی ابتدا پارامترهای ورودی الگوریتم سبال را ریزمقیاس نمودند (مشابه کاری که در سناریوی اول انجام شد). Hong et al. (2011) دقت روش رگرسیون ورودی را بالاتر از روش تفریق ورودی بیان نمودند که خود تأییدکننده نتایج تحقیق حاضر می‌باشد. در تحقیقی دیگر که توسط Spiliotopoulos et al. (2013) انجام شد نیز روش رگرسیون نسبت به روش تفریق دارای دقت بهتری بود. با توجه به شباهت بالای روش‌های تفریق و نسبت می‌توان گفت که نتایج حاصل از سناریوی اول با نتایج Hong et al. (2011) و Spiliotopoulos et al. (2013) مشابه است. پایین بودن صحت روش نسبت، در مقایسه با روش رگرسیون و شبکه‌های عصبی دلایل مختلفی می‌تواند داشته باشد.

ریزمقیاس‌نمایی شده و اصلی لندست-8 برای سایر روش‌های استفاده شده در هر دو سناریو با رویکرد اول وجود دارد. با توجه به اینکه روش رگرسیون در سناریوی دوم با رویکرد اول با مجذور میانگین مربعات خطا 0.87 میلیمتر در روز دارای بهترین عملکرد می‌باشد تبخیر- تعرق روزانه ریزمقیاس‌نمایی شده با استفاده از روش رگرسیون در سناریوی دوم با رویکرد اول برای تاریخ‌های مورد مطالعه ($2017/06/14$ تا $2017/06/30$) با مقادیر تبخیر- تعرق‌های روزانه متناظر بدست آمده با روش فائو- پنمن- مانیتث مورد مقایسه قرار گرفتند. لازم به ذکر است که در این تحقیق با توجه به آنکه تبخیر- تعرق حاصل از روش فائو- پنمن- مانیتث، تبخیر- تعرق مرجع می‌باشد، لذا به منظور ایجاد امکان مقایسه با نتایج حاصل از سبال، تبخیر- تعرق مرجع در ضریب گیاهی ضرب گردید تا از این طریق تبخیر- تعرق واقعی بدست آید. در این مقایسه مقدار مجذور میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین به ترتیب برابر $2/56$ میلی‌متر در روز و 0.61 (شکل 4) محاسبه شد. در شکل 5 روند تغییرات تبخیر- تعرق‌های روزانه به دست آمده از مدل سبال با استفاده از روش رگرسیون در سناریوی دوم با رویکرد اول و تبخیر- تعرق‌های روزانه حاصل از رابطه فائو- پنمن- مانیتث آورده شده است. با توجه به شکل 5 ملاحظه می‌شود که مقادیر تبخیر- تعرق‌های روزانه ریزمقیاس‌نمایی شده با استفاده از روش رگرسیون در سناریوی دوم با رویکرد اول با مقادیر تبخیر- تعرق‌های روزانه حاصل از رابطه فائو- پنمن- مانیتث دارای روند مناسبی هستند.

۴- بحث

با توجه به جدول 1 ملاحظه می‌شود که روش رگرسیون در سناریوی

Table 1- Root mean square errors and coefficient of determination of downscaled actual evapotranspiration (AET) and AET estimated from Landsat-8 image

جدول 1- مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین تبخیر- تعرق‌های واقعی ریزمقیاس شده نسبت به تبخیر- تعرق واقعی بدست آمده از تصاویر لندست-8

Scenario	Approach	Method	Root Mean Square Error (mm/day)	R ²
First	First	Ratio	1.43	0.80
		Regression	1.07	0.84
		Neural Network	0.97	0.83
	Second	Ratio	1.43	0.80
		Regression	1.12	0.84
		Neural Network	2.04	0.48
Second	First	Ratio	2.22	0.48
		Regression	0.87	0.85
		Neural Network	1.16	0.84
	Second	Ratio	2.22	0.48
		Regression	1.83	0.85
		Neural Network	2.25	0.80

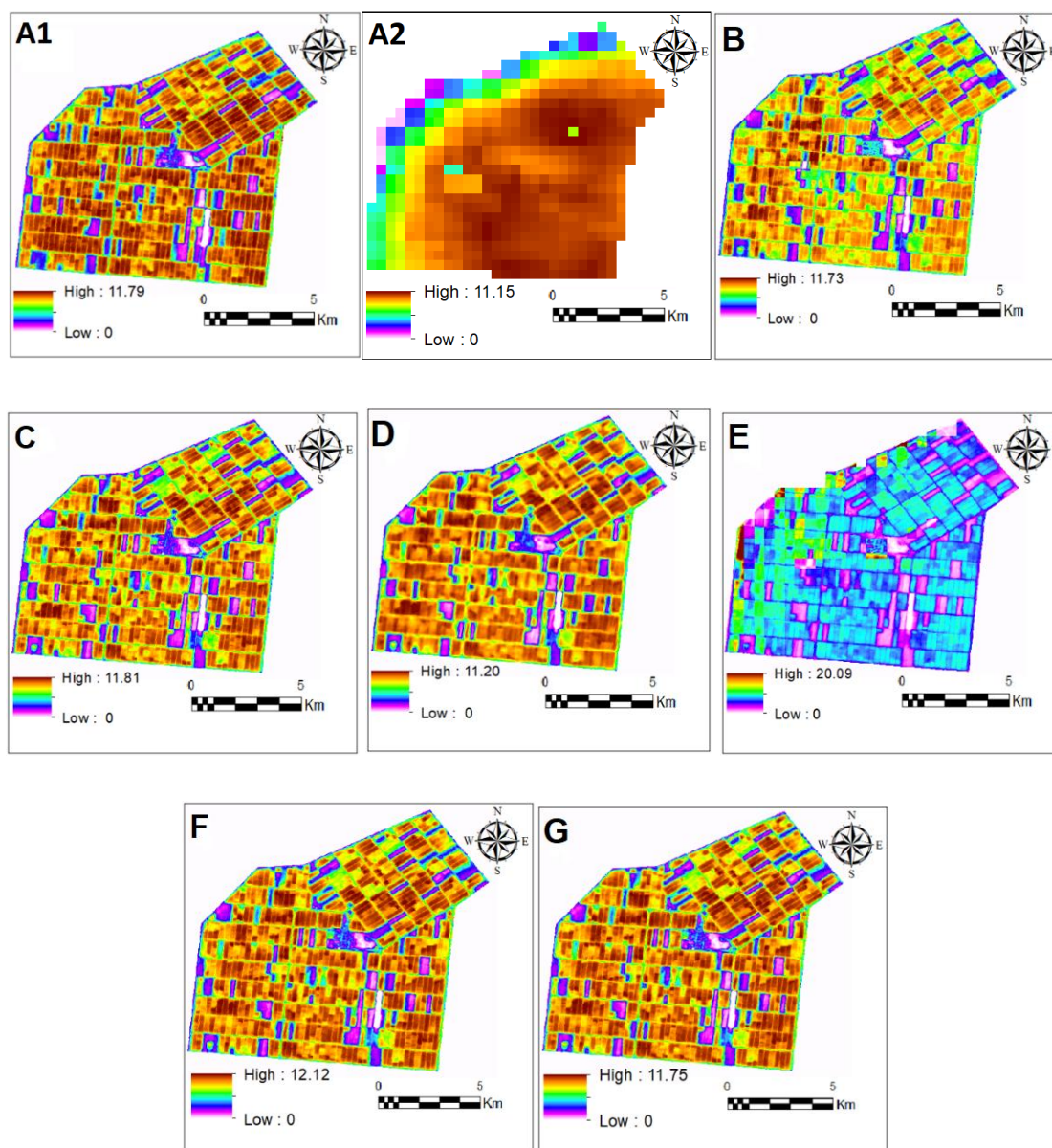


Fig. 2- AET images on 30/06/2017, A1 and A2 obtained from Landsat-8 and MODIS images, respectively. B, C, and D Downscaled based on the first scenario and ratio, regression and neural network methods, respectively. E, F, and G Downscaled on the second scenario and ratio, regression, and neural network methods, respectively (All cases derived from the first approach)

شکل ۲- تصاویر AET در تاریخ ۳۰/۰۶/۱۷۰۲، و A1 و A2 به ترتیب حاصل از تصویر لندست-۸ و تصویر مادیس، B و C و D به ترتیب ریزمقیاس نمایی شده در سناریوی اول با روشهای نسبت، رگرسیون، و شبکه عصبی، E، F و G به ترتیب ریزمقیاس نمایی شده در سناریوی دوم با روشهای نسبت، رگرسیون، شبکه عصبی (در تمامی موارد از رویکرد اول استفاده شده است)

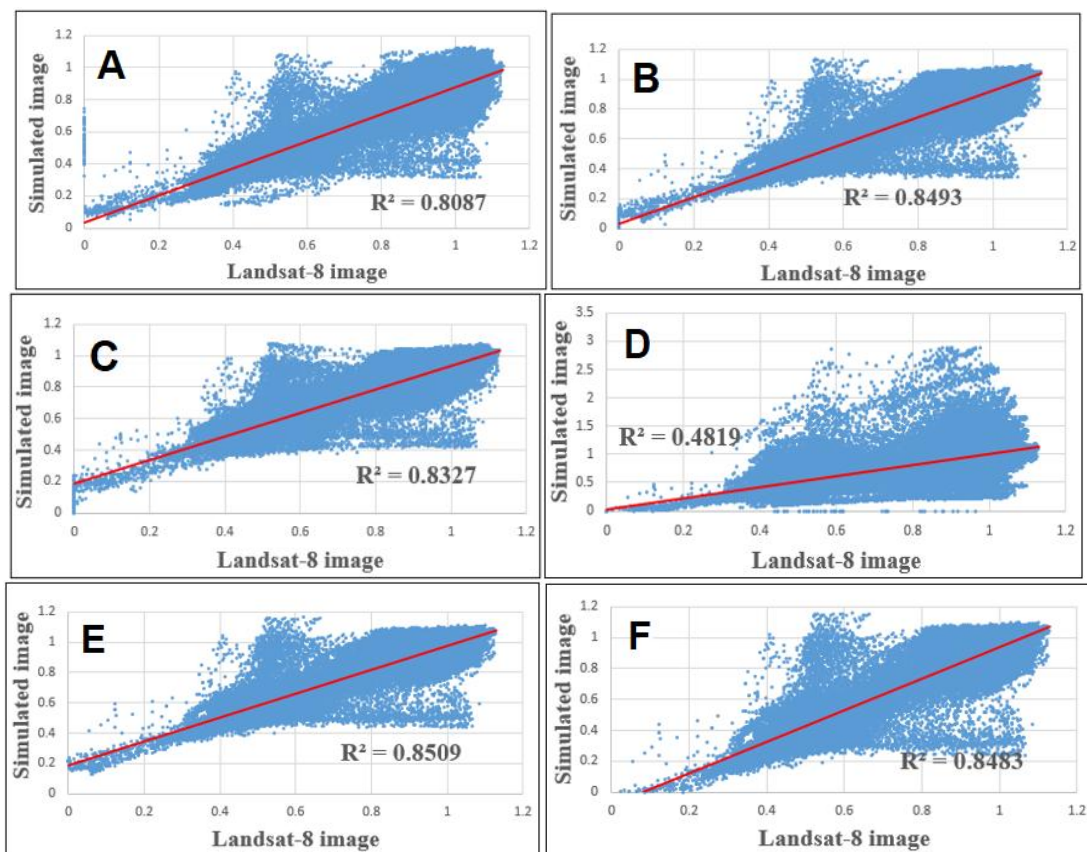


Fig. 3- A, B, and C: the first scenario and ratio, regression, and neural network methods, respectively. D, E, and F: the second scenario and ratio, regression, and neural network methods, respectively (All cases derived from the first approach)

شکل ۳- A، B، C به ترتیب سناریوی اول و روشهای نسبت، رگرسیون، و شبکه عصبی، D، E، F به ترتیب سناریوی دوم و روشهای نسبت، رگرسیون، و شبکه عصبی (در تمامی موارد از رویکرد اول استفاده شده است)

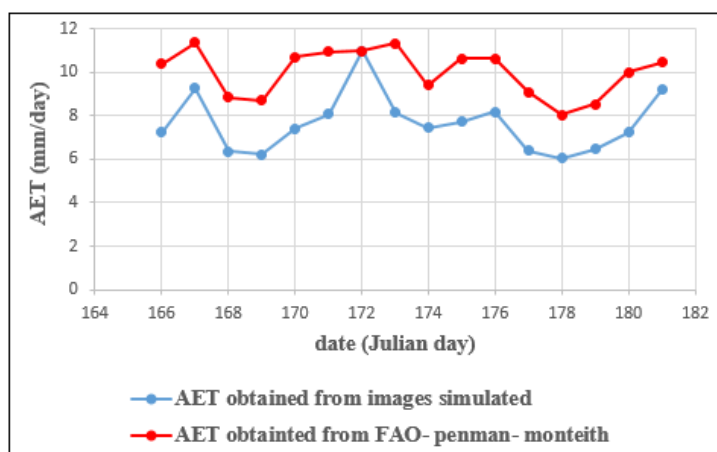


Fig. 4- Daily AET downscaled by the second scenario and first approach with regression method (blue curve) and daily AET obtained from FAO- penman- monteith equation (red curve).

شکل ۴- AET روزانه ریزمقیاس‌نمایی شده با سناریوی دوم و رویکرد اول به روش رگرسیون (منحنی آبی) و AET روزانه حاصل از رابطه فائو- پنمن- مانتیث (منحنی قرمز)

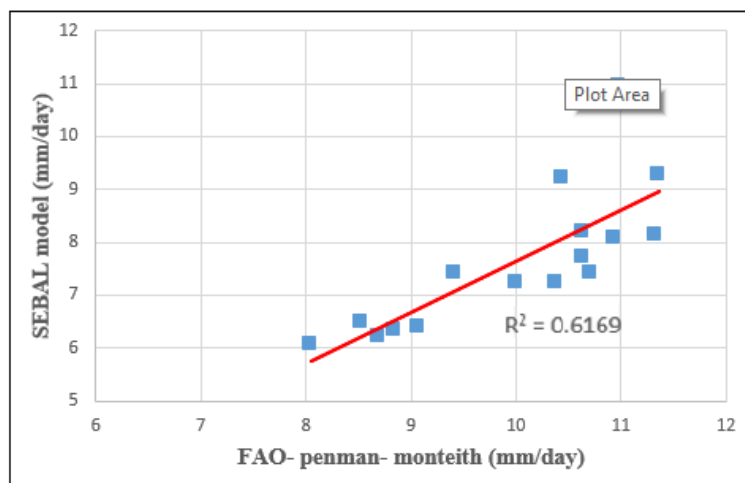


Fig. 5- Daily AET downscaled in the second scenario and first approach with regression method compared to those derived from FAO- penman- monteith equation

شکل ۵- مقایسه مقادیر تبخیر- تعرق روزانه ریزمقیاس‌نمایی شده با سناریوی دوم و رویکرد اول به روش رگرسیون و روش فائو- پنمن- مانتیث

یکی از این دلایل می‌تواند این باشد که در روش نسبت برای هر دو پیکسل مادیس در زمان اول و دوم یک رابطه جداگانه ایجاد می‌شود و این رابطه فقط برای پیکسل‌هایی از لندست که در داخل همان پیکسل مادیس واقع می‌باشند اعمال می‌شود در حالی که در روش رگرسیون و شبکه‌های عصبی فقط یک رابطه حاصل از تمامی پیکسل‌های مادیس در زمان اول و دوم ایجاد می‌شود و این رابطه بر روی تمام پیکسل‌های لندست در زمان اول اعمال می‌شود که این امر باعث می‌شود تصاویر ریزمقیاس شده با استفاده از روش‌های رگرسیون و شبکه‌های عصبی دارای تغییرات شدیدی نباشند، در حالی که تصاویر ریزمقیاس شده با استفاده از روش نسبت در بعضی از پیکسل‌ها دارای تغییرات زیاد و در بعضی از پیکسل‌ها دارای تغییرات خیلی کم می‌باشند. با مقایسه بصری تصاویر شبیه‌سازی شده به روش نسبت با تصاویر اخذ شده توسط لندست-۸ که در شکل ۲ ارائه شده‌اند نیز می‌توان در بعضی از پیکسل‌ها این تغییرات شدید را ملاحظه نمود در حالی که در تصاویر ریزمقیاس‌نمایی شده با روش‌های رگرسیون و شبکه‌های عصبی تغییرات شدیدی ملاحظه نمی‌شود. دلیل دیگر را می‌توان خطای ناشی از عدم مطابقت هندسی کامل تصاویر مادیس و لندست که در فرآیند ژئورفرنس کردن اتفاق می‌افتد، دانست که روش‌های نسبت و تفریق در مقایسه با روش‌های رگرسیون و شبکه‌های عصبی نسبت به این عدم مطابقت هندسی بین تصاویر ماهواره‌ها آسیب‌پذیرتر می‌باشند (Hong et al., 2011). علاوه بر این، منابع دیگری از این عدم اطمینان‌ها مانند تفاوت در زاویه دید سنجنده، زاویه تابش خورشید، زمان دریافت تصاویر، تصحیح اتمسفری و محاسبه گسیلمندی نیز می‌تواند در حصول این نتایج تأثیرگذار باشد (McCabe et al.,

۲۰۱۴; Kim et al., 2012; Singh et al., 2006). با توجه به جدول ۱ ملاحظه می‌شود در سناریوی دوم با رویکرد اول روش رگرسیون به عنوان یک روش خطی دارای عملکرد بهتری نسبت به روش شبکه‌های عصبی به عنوان یک روش غیرخطی می‌باشد. یکی از دلایل اصلی این نتیجه را می‌توان یکنواختی منطقه مورد مطالعه دانست که با توجه به مکانیزم روش رگرسیون می‌توان استنباط کرد که هر چه منطقه یکنواخت‌تر باشد رابطه بین دو تصویر در زمان اول و دوم خطی‌تر بوده و در نتیجه رابطه برازش داده شده با استفاده از یک مدل خطی دارای صحت بهتری خواهد بود.

در این تحقیق از دو رویکرد مختلف به منظور ریزمقیاس‌نمایی استفاده گردید. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱ در روش نسبت رویکردهای اول و دوم در هر دو سناریو هیچ تفاوتی با هم ندارند و دارای عملکرد کاملاً یکسان می‌باشند. دلیل اصلی این مسأله و عدم تفاوت در نتایج رویکردهای اول و دوم برای روش نسبت، آن است که روش نسبت یک روش خطی است و در این روش رابطه ایجاد شده به صورت پیکسل به پیکسل می‌باشد و لذا تغییری در نتایج حاصل از این روش در رویکردهای مختلف ایجاد نمی‌شود. نتایج حاصل از روش رگرسیون با رویکردهای اول و دوم در هر دو سناریو، نشان داد که تبخیر- تعرق‌های واقعی شبیه‌سازی شده به روش رگرسیون با رویکرد اول دارای صحت بهتری نسبت به رویکرد دوم می‌باشد. در روش شبکه‌های عصبی نیز در هر دو سناریو رویکرد اول دارای عملکرد بهتری نسبت به رویکرد دوم می‌باشد. در رویکرد اول فاصله زمانی بین تصویر لندست-۸ (به عنوان تصویر پایه) با تصویرهای ریزمقیاس شده

برای تاریخ‌های مختلف، از ۱ تا ۱۵ روز تغییر می‌نماید، و ممکن است تغییراتی که در طی این مدت در منطقه مورد مطالعه رخ می‌دهد منجر به ایجاد خطا و کاهش صحت تبخیر- تعرق واقعی حاصل از تصاویر ریزمقیاس شده گردد. این درحالی است که در رویکرد دوم اختلاف زمانی بین تصویر ریزمقیاس شده و تصویر پایه (که خود نیز ریزمقیاس شده است)، به یک روز کاهش می‌یابد. ولی به دلیل آنکه در هر روز از تصویر پایه ریزمقیاس شده روز قبل به منظور ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌شود، این موضوع موجب می‌گردد تا با افزایش فاصله زمانی از تصویر لندست-۸، در هر روز اثر ریزمقیاس‌نمایی نسبت به روز قبل افزایش یابد، به عبارت دیگر می‌توان گفت که با افزایش فاصله زمانی تعداد دفعات ریزمقیاس‌نمایی اعمال شده برای ایجاد یک تصویر پایه برای روز بعد به صورت تجمعی بر هم تأثیر منفی ایجاد می‌نمایند. لذا با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که در تصاویر ریزمقیاس شده در رویکرد اول فاصله زمانی ایجاد شده باعث ایجاد خطای کمتری نسبت به استفاده چندباره از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی در رویکرد دوم می‌شود و به همین خاطر نتایج مربوط به رویکرد اول نسبت به رویکرد دوم دارای صحت بالاتری می‌باشد.

با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ ملاحظه می‌شود که مقادیر تبخیر- تعرق‌های روزانه محاسبه شده با روش رگرسیون در سناریوی دوم با رویکرد اول با مقادیر تبخیر- تعرق‌های حاصل از روش فائو- پمن- مانتیت دارای انطباق بالایی هستند. با توجه به نتایج به دست آمده، مقادیر تبخیر- تعرق‌های ریزمقیاس‌نمایی شده کمتر از مقادیر به دست آمده از روش فائو- پمن- مانتیت می‌باشند. یکی از دلایل دستیابی به این نتیجه آن است که روش فائو- پمن- مانتیت تأثیر شرایط محیطی از قبیل تنش شوری، خشکی، امراض مختلف و شرایط مدیریتی آبیاری را در محاسبه تبخیر- تعرق در نظر نمی‌گیرد، در حالی که در واقعیت چنین نبوده و این عوامل در تبخیر- تعرق گیاهان مؤثر هستند. لذا انتظار می‌رود مقادیر تبخیر- تعرق واقعی به دست آمده از روش سبال که شرایط واقعی حاکم بر منطقه مطالعاتی یعنی تنش محیطی و شرایط مدیریتی آبیاری را در نظر گرفته به مراتب کمتر از مقدار به دست آمده از روش فائو- پمن- مانتیت باشد. (Salehi et al. 2018) طی پژوهشی که در کشت و صنعت امیرکبیر انجام دادند به این نتیجه رسیدند که مقادیر به دست آمده از الگوریتم سبال مقداری کمتر از مقادیر فائو- پمن- مانتیت می‌باشند که نتایج ایشان نیز تأییدکننده نتایج بدست آمده در این تحقیق می‌باشد.

همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، میزان تغییرات تبخیر- تعرق واقعی در محدوده مورد مطالعه بالاست. با توجه به تصویر A1 شکل ۲، نقاط صورتی دارای کمترین مقدار تبخیر- تعرق واقعی هستند

که در موقعیت زمین‌های بایر قرار گرفته‌اند و نقاط قهوه‌ای پر رنگ که در موقعیت زمین‌هایی با پوشش گیاهی قرار دارند، دارای بیشترین مقدار تبخیر- تعرق واقعی هستند. در تصویر A2 شکل ۲ مشاهده می‌شود که پیکسل‌های موجود در مرزهای شمالی و شرقی کشت و صنعت امیرکبیر دارای تبخیر- تعرق واقعی کمتر نسبت به سایر نقاط می‌باشند. این مسئله با توجه به اندازه بزرگ پیکسل‌های مادیس (۱۰۰۰×۱۰۰۰ متر) و نیز با توجه به این که اراضی همسایه کشت و صنعت امیرکبیر در مرزهای شمالی و شرقی بایر و بیابانی هستند (شکل ۱) قابل توجیه می‌باشد. به بیان دیگر پیکسل‌های مادیس در مرزهای شمالی و شرقی کشت و صنعت امیرکبیر ترکیبی از زمین‌های کشت شده و بایر می‌باشند که این امر باعث شده مقدار تبخیر- تعرق این پیکسل‌ها نسبت به پیکسل‌های مرکزی کمتر باشد و تنوع در مقادیر تبخیر- تعرق واقعی در نقشه‌های حاصله پدید آید.

از جنبه کاربردی تهیه نقشه‌های تبخیر- تعرق واقعی روزانه می‌تواند کمک بسزایی به مدیریت منابع آب در این کشت و صنعت محسوب گردد. با توجه به وسعت بالای اراضی کشت و صنعت امیرکبیر که بالغ بر ۱۲۰۰۰ هکتار کشت خالص می‌باشد، تهیه نقشه‌های تبخیر- تعرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و با صحت بالا (مجذور میانگین مربعات خطای ۰/۸۷ میلی‌متر در روز)، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با نیاز آبیاری در این منطقه فراهم سازد. با پایش روزانه اراضی کشت و صنعت با استفاده از این تصاویر می‌توان میزان آب مصرفی در هر یک از پلات‌ها را به صورت دقیق محاسبه نمود و با اطلاع از میزان آب مصرفی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، حجم و زمان آبیاری برای هر پلات با دقت مناسب قابل محاسبه خواهد بود و با محاسبه حجم و زمان آبیاری دقیق می‌توان از حجم زهاب خروجی به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاست و کارایی مصرف آب را افزایش داد.

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به منظور شبیه‌سازی تصاویر تبخیر- تعرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر با استفاده از تصاویر مادیس و لندست-۸ از دو سناریو با دو رویکرد متفاوت استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که تصاویر تبخیر- تعرق واقعی ریزمقیاس‌نمایی شده در هر دو سناریو و هر دو رویکرد و با استفاده از روش‌های نسبت، رگرسیون و شبکه عصبی دارای صحت بهتری نسبت به تصاویر تبخیر- تعرق واقعی بدست آمده از تصاویر مادیس می‌باشند. همچنین در این تحقیق در مجموع روش رگرسیون در سناریو دوم و رویکرد اول به منظور تهیه نقشه‌های تبخیر- تعرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک

۶- مراجع

- Agam N, Kustas W P, Anderson M C, Li F, Neale C M U (2007a) A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery. *Remote Sensing of Environment* 107:545-558
- Allen RG, Tasumi M, Trezza R, (2007) Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133:380-394
- Bastiaanssen W (2000) SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology* 229:87-100
- Bastiaanssen W, Menenti M, Feddes R, and Holtslag A (1998a) A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 1, Formulation, *Journal of Hydrology* 212:198-212
- Bastiaanssen W G M, Waters R, Allen R G, Tasumi M, and Terzza R (2002) Advanced training and user's manual of surface energy balance algorithms for Land. Nasa EOSDIS/Synergy Grant from the Raytheon Company through the Idaho Department of Water Resources. 1:1-98
- Brindhu V M, Narasimhan B, Sudheer K P (2013) Development and verification of a non-linear disaggregation method (NL-DisTrad) to downscale MODIS land surface temperature to the spatial scale of Landsat thermal data to estimate evapotranspiration. *Remote Sensing of Environment* 135:118-129
- Brisco B, Brown R J, Hirose T, McNairn H, Staenz K (2014) Precision agriculture and the role of remote sensing, a review. *Canadian Journal of Remote Sensing* 24:315-327
- Chandrapala L and Wimalasuriya M (2003) Satellite measurements supplemented with meteorological data to operationally estimate evaporation in Sri Lanka. *Agricultural Water Management* 58:89-107
- Gao B C, Montes M J, Ahmad Z, Davis C O (2000) Atmospheric correction algorithm for hyperspectral remote sensing of ocean color from space. *Applied Optics* 39(6):887-896
- Ha W, Gowda P H, Howell T A (2012a) A review of downscaling methods for remote sensing-based irrigation management: part I. *Irrig. Sci.* 31, 831-850
- Ha W, Gowda P.H, Howell T.A, (2012b) A review of potential image fusion methods for remote sensing-based irrigation management: part II. *Irrigation Science* 31:851-869
- Hafeez M, Chemin Y, Van De Giesen N and Bouman B (2002) Field evapotranspiration estimation in central Luzon, Philippines using different sensors: Landsat

مکانی ۳۰ متر بهترین نتیجه را نشان داد، البته با توجه به همگنی منطقه مورد مطالعه لازم است تا این عملکرد در مناطق غیرهمگن نیز بررسی شود. مقایسه دو رویکرد مختلف زمانی در این مطالعه نشان داد که در هر دو سناریو رویکرد اول نسبت به رویکرد دوم دارای عملکرد بهتری می‌باشد و فاصله زمانی ایجاد شده بین تصویر پایه لندست-۸ و تصاویر مادیس، تأثیری به مراتب کمتر از اعمال مکرر ریزمقیاس‌نمایی به منظور تولید تصاویر پایه ریزمقیاس شده روزانه به منظور کاهش اختلاف زمانی بین تصویر پایه و تصویر مادیس دارد. البته تفاوت در نتایج حاصل از رویکردها می‌تواند کاملاً متأثر از نوع روش ریزمقیاس‌نمایی باشد به‌گونه‌ای که در روش نسبت رویکردهای اول و دوم در هر دو سناریو هیچ تفاوتی در مقایسه با هم نشان ندادند. همچنین این تحقیق نشان داد که مقادیر تبخیر- تعرق‌های به دست آمده از الگوریتم سبال و با استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی کمتر از مقادیر تبخیر- تعرق محاسبه شده به وسیله روش فائو- پنمن-مانتیت می‌باشند. نتایج این تحقیق می‌تواند به منظور مدیریت بهینه منابع آب خصوصاً در اراضی دارای وسعت بالا، کمک شایان توجهی نماید، به‌گونه‌ای که با استفاده از نقشه‌های تبخیر- تعرق با قدرت تفکیک مکانی بالا، نیاز آبی منطقه و نیز تعیین زمان لازم جهت آبیاری انجام شده و متعاقباً زهاب خروجی از منطقه کاهش یابد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Crop Water Requirement
- 2- Irrigation Water Requirement
- 3- Precision Agriculture
- 4- Surface Energy Balance Algorithm for Land
- 5- Surface Energy Balance System
- 6- Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration
- 7- Scintillometer
- 8- Disaggregation Procedure for Downscaling Radiometric Surface Temperature
- 9- Sharpening Thermal Imagery
- 10- Land Surface Temperature
- 11- ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)
- 12- Median Absolute Deviation
- 13- Nonlinear DisTrad Method
- 14- MultiLayer Perceptron
- 15- Neuron
- 16- Activation Function
- 17- Hidden Layer
- 18- Learning Rate
- 19- Momentum
- 20- Error Threshold

- Salehi H, Shamsoddini A, Mirlatifi SM (2018) MODIS image downscaling using STARFM and SADFAT algorithms for daily Landsat-like spatial resolution evapotranspiration mapping. *Iranian Remote Sensing & GIS* 10(3) (In Persian)
- Shamsoddini A, Trinder J C, and Turner R (2013) Non-linear methods for inferring lidar metrics using spot-5 textural data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5/W2
- Senay G B, Budde M, Verdin J P, Melesse A M (2007) A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. *Sensors* 7:979-1000
- Singh R K, Senay G B, Velpuri N M, Bohms S, Verdin J P (2014) On the downscaling of actual evapotranspiration maps based on combination of MODIS and Landsat-based actual evapotranspiration estimates. *Remote Sensing* 6:10483-10509
- Spiliotopoulos M, Adaktilou N, Toullos L (2013) A spatial downscaling procedure of MODIS derived actual evapotranspiration using Landsat images at central Greece. *Conference Paper in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*
- Su Z (2002) The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Science* 6:85-100
- Hong S H, Hendrickx J M H, Borchers B (2011) Down-Scaling of SEBAL derived evapotranspiration maps from MODIS (250m) to LANDSAT (30m) scale. *International Journal of Remote Sensing* 32: 6437-6456
- Tasumi M, Allen R G, Trezza R (2008) Atsurface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. *Journal of Hydrologic Engineering* 13(2):51-63
- Varvani H, Farhadi Bansouleh B, Sharifi M A (2019) 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). *Iran-Water Resources Research* 15(1):257-266 (In Persian)
- Yang G, PU R, Hung W, Wang J, Zhao C (2010) A novel method to estimate subpixel temperature by fusing solar-reflective and thermal-infrared remote-sensing data with an artificial neural network. *IEEE Trans Geosci Remote* 48:2170-2178
- 7 ETM+, Terra MODIS and ASTER. *ISPRS/CIG conference July*. P. 2002
- Hong S, Hendrickx J M H, Borchers B (2011) Down-Scaling of SEBAL derived evapotranspiration maps from MODIS (250m) to LANDSAT (30m) scale. *International Journal of Remote Sensing* 32(21):6457-6477
- Goshehgir AS, Golabi M, and Naseri AA (2018) Comparison of actual evapotranspiration estimated using Gram-Schmidt method and SEBAL algorithm with lysimetric data (Case study: Amir Kabir sugarcane argo-industry company). *Iran- Water Resources Research* 14(1):125-139 (In Persian)
- Kaufman Y J, Tanre D, Gordon H R, Nakajima T, Lenoble J, Frouin R (1997) Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 102(D14):16815-16830
- Kim J, Hogue T S (2012) Evaluation and sensitivity testing of a coupled Landsat-MODIS downscaling method for land surface temperature and vegetation indices in semi-arid regions. *Journal of Applied Remote Sensing*, doi:10.1117/1.JRS.6.063569
- Li H, Zheng L, Lei Y, Li C, Liu Z and Zhang S (2008) Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology. *Agricultural Water Management* 95:1271-1278
- Luo Y, Liu R, Feng Zhu Y (2008) Fusion of remote sensing image base on The PCA + ATROUS wavelet transform. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVII (Part B7)* 1155-1158
- Mahour M, Tolpekin V, Stein A, Sharifi A (2017) A comparison of two downscaling procedures to increase the spatial resolution of mapping actual evapotranspiration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 126:56-67
- McCabe M F, Wood E F (2006) Scale influences on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors. *Remote Sensing of Environment* 105:271-285
- Ramosa J G, Cratchley C, Kay J A, Casterad M A, Martinez-Cob A, and Dominguez Z (2008) 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 Journal AGWAT*-2701:15-26