

Introduction and Development of Actual Evapotranspiration Estimation Toolbox by Using METRIC Algorithm (Case study: Urmia Plain)

J. Rahmani¹, M. Danesh-Yazdi^{2*}, and M. Tajrishy³

Abstract

Evapotranspiration is one of the key components of water balance in a basin. In recent decades, several methods and models have been developed for estimating evapotranspiration using remotely sensed data. In this context, utilizing the surface energy balance equation has led to the development of Surface Energy Balance (SEB) models, such as SEBAL and METRIC. Despite the extensive usage of these models, their application is still challenging due to the underlying algorithm complexity and the time-consuming process of selecting cold and hot pixels by an experienced user. The goal of this study is to develop and introduce a new toolbox within the MATLAB environment for estimating actual evapotranspiration using the METRIC algorithm and Landsat 8 imagery. Unlike the previously developed models based on the METRIC algorithm, the selection of hot and cold pixels has been made automatic in this new toolbox. The toolbox was also used to estimate actual monthly evapotranspiration of the Urmia plain in 2016, and the results were compared with those obtained from the MODIS images to highlight the applicability of high spatial resolution imagery in water and agricultural management studies.

Keywords: Evapotranspiration, METRIC Algorithm, Landsat, Remote Sensing, Urmia Plain.

Received: June 15, 2020

Accepted: September 16, 2020

توسعه و معرفی جعبه ابزار برآورد نرخ تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم METRIC و تصاویر ماهواره Landsat 8 (مطالعه موردی: دشت ارومیه)

جواد رحمانی^۱، محمد دانش یزدی^{۲*} و مسعود تجریشی^۳

چکیده

تبخیر- تعرق یکی از مؤلفه‌های مهم بیلان آب در یک حوضه آبریز می‌باشد. در دهه‌های اخیر، روش‌ها و مدل‌های زیادی برای تخمین نرخ تبخیر- تعرق واقعی بر اساس داده‌های حاصل از سنجش از دور توسعه داده شده است. در این راستا، استفاده از معادله بیلان انرژی در سطح زمین منجر به توسعه مدل‌های بیلان انرژی سطح (SEB) از قبیل SEBAL و METRIC شده است. با وجود استفاده گسترده از این الگوریتم‌ها، کماکان در به کارگیری آن‌ها چالش‌هایی از قبیل پیچیدگی الگوریتم و فرآیند زمان‌بر انتخاب پیکسل گرم و سرد توسط کاربر با تجربه، وجود دارد. هدف از این پژوهش، توسعه و معرفی جعبه ابزاری جدید در محیط MATLAB برای تخمین نرخ تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم METRIC و تصاویر Landsat 8 است که بر خلاف مدل‌های قبلی توسعه داده شده، انتخاب پیکسل گرم و سرد به صورت خودکار انجام می‌پذیرد. همچنین به کمک این جعبه ابزار، تبخیر- تعرق ماهانه برای دشت ارومیه در سال ۲۰۱۶ میلادی تخمین زده شده و با نتایج مطالعات پیشین در این دشت با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس مقایسه گردیده است تا کارایی استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا در مطالعات کاربردی مربوط به مدیریت آب و کشاورزی تبیین گردد.

کلمات کلیدی: تبخیر- تعرق، الگوریتم METRIC، ماهواره Landsat، سنجش از دور، دشت ارومیه.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۳/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۶/۲۵

1- M.Sc. Student of Civil Engineering, Department of Civil Engineering; Remote Sensing Research Center, Sharif University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering; Remote Sensing Research Center, Sharif University, Tehran, Iran. Email: danesh@sharif.edu

3- Professor, Department of Civil Engineering; Remote Sensing Research Center, Sharif University, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، مرکز تحقیقات سنجش از دور، دانشگاه صنعتی شریف.

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، مرکز تحقیقات سنجش از دور، دانشگاه صنعتی شریف.

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران، مرکز تحقیقات سنجش از دور، دانشگاه صنعتی شریف.

*- نویسنده مسئول

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

تعرق واقعی پرداخته‌اند. از جمله، در مطالعه‌ای Ghamarnia et al. (2017) با استفاده از الگوریتم SEBAL و تصاویر ماهواره Landsat 8 به برآورد تبخیر- تعرق واقعی دشت سراب نیلوفر کرمانشاه پرداختند. در مطالعه دیگری، Gosheghir et al. (2018) در راستای بهبود کیفیت نتایج، تصاویر ماهواره MODIS (با قدرت تفکیک زمانی مناسب) و تصاویر ماهواره Landsat 8 (با قدرت تفکیک مکانی مناسب) را با یکدیگر ادغام کرده و به محاسبه تبخیر- تعرق با استفاده از الگوریتم SEBAL پرداختند. در مطالعه Allen et al. (2002) الگوریتم SEBAL اصلاح و سپس مدل جدید METRIC (برای تخمین نرخ تبخیر- تعرق در قدرت تفکیک مکانی بالا با واسنجی داخلی) در مطالعه Allen et al. (2005) ارائه شد که توسعه‌ی بیشتر این مدل در مطالعه Allen et al. (2007) انجام گردید. الگوریتم اصلاح‌شده‌ی SEBAL و الگوریتم METRIC از شباهت‌های زیادی برخوردارند. تفاوت مدل METRIC با مدل SEBAL در استفاده از نرخ تبخیر- تعرق مرجع مبتنی بر داده‌های هواشناسی برای ایجاد شرایط توازن انرژی در یک پیکسل (پیکسل سرد) و برون‌یابی زمانی تبخیر- تعرق لحظه‌ای به مقیاس روزانه است. لازم به ذکر است که در الگوریتم اصلاح‌شده SEBAL تفاوت‌هایی که به آن‌ها اشاره شد، رفع شده و فقط در برخی روابط جزئی اختلاف‌هایی وجود دارد. در سال ۲۰۰۵، Allen et al. (2005) الگوریتم METRIC را در منطقه‌ای در آیداهوی آمریکا پیاده‌سازی نموده و با داده‌های اندازه‌گیری شده با لایسیمتر مقایسه نمودند. نتایج مقایسه‌ی آن‌ها نشان داد که مقدار نرخ تبخیر- تعرق در فصل رشد گیاهان برای چمن و چغندر قند به ترتیب چهار و یک درصد خطا دارد. در همین سال، Tasumi et al. (2005) تفاوت بین مقادیر نرخ تبخیر- تعرق ساعتی محاسبه شده با استفاده از مدل METRIC و اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر را برای محصولات سیب‌زمینی، چغندر قند، نخودفرنگی و یونجه به ترتیب برابر با ۰/۰۶، ۰/۰۳، ۰ و ۰/۰۵- میلی‌متر در ساعت به دست آوردند. در سال ۲۰۰۹، Folhes et al. (2009) با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat 8 و مدل توازن انرژی METRIC مقادیر نرخ تبخیر- تعرق را در برزیل محاسبه نمودند. نتایج نشان داد که مدل METRIC می‌تواند به منظور برآورد مصرف آب و بهبود مدیریت آب در نواحی نیمه‌خشک و تحت آبیاری شمال شرق برزیل به خوبی بکار رود.

الگوریتم METRIC (2007) مانند الگوریتم SEBAL برای محاسبات نرخ تبخیر- تعرق واقعی، از دو پیکسل مبنا به نام "پیکسل سرد" و "پیکسل گرم" برای تعیین حدود بالا و پایین بیلان انرژی در سطح استفاده می‌کند. این دو پیکسل بر اساس نظر کاربر تعیین شده و متکی بر تجربه است. انتخاب این پیکسل‌ها تأثیر عمده‌ای در دقت

وجود اطلاعات دقیق از مؤلفه‌های مختلف بیلان آب می‌تواند کمک بسزایی برای مدیریت و برنامه‌ریزی دقیق‌تر منابع آب در اختیار مدیران قرار دهد. در این میان، نقش تبخیر- تعرق^۱ به عنوان بزرگترین مؤلفه‌ی مربوط به اتلاف آب قابل توجه می‌باشد. میزان نرخ تبخیر- تعرق را می‌توان به صورت مستقیم، با استفاده از لایسیمتر، تکنیک نسبت Bowen و تکنیک‌های همبستگی Eddy با دقت بالا محاسبه کرد. اما این روش‌ها تنها اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای را فراهم می‌کنند که نمی‌توانند الگوی مکانی نرخ تبخیر- تعرق در مناطق وسیع را به نمایش بگذارند. به همین دلیل برای محاسبه نرخ تبخیر- تعرق واقعی روش‌های غیرمستقیم بر اساس بیلان آب یا بیلان انرژی توسعه داده شده است. در روش بیلان آب نیاز هست تا فرایندهای هیدرولوژیکی پیچیده دیگر، مانند آب زیرزمینی و آب سطحی در نظر گرفته شوند، که این خود باعث پیچیدگی روش می‌شود. امروزه با استفاده از بیلان انرژی و فناوری سنجش از دور می‌توان تغییرات مکانی نرخ تبخیر- تعرق را در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف، بدون نیاز به در نظر داشتن دیگر فرایندهای پیچیده هیدرولوژیکی، مورد بررسی قرار داد. در این راستا الگوریتم‌های مختلفی همچون SEBS^۲، SEBAL^۳ و METRIC^۴ توسعه داده شده است که هر کدام نرخ تبخیر- تعرق را با دقت‌های مختلفی محاسبه می‌کنند.

الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین (SEBAL) توسط Bastiaanssen (1995) ارائه شده است و از جمله روش‌هایی است که در برآورد نرخ تبخیر- تعرق در سایر نقاط دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم SEBAL یک مدل مبتنی بر روابط تجربی و فیزیکی است که ابتدا در مصر و اسپانیا با تصاویر Landsat برای برآورد نرخ تبخیر- تعرق واقعی در مناطق کشاورزی، تعیین یکنواختی محصول، تنش آبی و مدیریت شبکه‌های آبیاری بکار گرفته شد. میزان مصرف آب در بخش آبیاری با استفاده از تصاویر سنجنده AVHRR در پاکستان نیز مورد بررسی قرار گرفت (Bastiaanssen., 1995). در مطالعه دیگری که برای محاسبه‌ی توزیع مکانی کارایی آب در هشت سیستم آبیاری گندم انجام شد، نرخ تبخیر- تعرق و کارایی آب با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم SEBAL محاسبه شد. مقادیر نرخ تبخیر- تعرق تخمین زده شده برای مناطق آبیاری شده گندم در دره Yaqui کشور مکزیک اعتبارسنجی شد که دقت بالایی را نشان می‌داد (۸٪ اختلاف برای ۱۰۰۰ روز). این مطالعه نشان داد که با بهبود کارایی می‌توان بدون کاهش محصول، میزان نرخ تبخیر- تعرق را ۱۴٪ کاهش داد (Bastiaanssen and Zwart., 2007). در ایران نیز مطالعات مختلفی با استفاده از الگوریتم SEBAL به تخمین تبخیر-

زمستان‌های سرد و مرطوب می‌باشد. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی ارائه شده است. دشت ارومیه یکی از مهمترین دشت‌های کشاورزی در حوضه دریاچه ارومیه محسوب می‌شود و به همین دلیل برای هدف این پژوهش انتخاب شده است.

۲-۲- داده‌های هواشناسی و کاربری اراضی

۲-۲-۱- داده‌های هواشناسی

انجام مطالعات مبتنی بر سنجش از دور مستلزم استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی است. در این مطالعه، از داده‌های ثبت شده توسط ایستگاه سینوپتیک ارومیه در سال ۲۰۱۶ استفاده شده است که این داده‌ها عبارت‌اند از: دمای هوا (برحسب درجه سانتی‌گراد) به صورت دمای کمینه و بیشینه و دمای متوسط روزانه، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری (برحسب متر بر ثانیه) که در محاسبات به ارتفاع ۲ متری تبدیل می‌گردد، تعداد ساعت آفتابی (برحسب ساعت) و رطوبت نسبی (برحسب درصد).

۲-۲-۲- لایه کاربری اراضی

لایه کاربری اراضی برای مشخص کردن مناطق زراعی برای انتخاب خودکار پیکسل سرد و گرم لازم می‌باشد. در این مطالعه از لایه کاربری تهیه شده در مطالعه Youneszadeh et al. (2016) برای سال ۲۰۱۳، در توان تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شده است.

۲-۳- داده‌های ماهواره‌ای

در این مطالعه از تصاویر ماهواره Landsat 8 استفاده شده است. توان تفکیک مکانی تصاویر این سنجنده ۳۰ متر و توان تفکیک زمانی آن ۱۶ روز می‌باشد. برای هر ماه از سال ۲۰۱۶ میلادی یک تصویر با درصد ابر کم انتخاب شده است. تاریخ روزهای مورد بررسی در هر ماه عبارتند از: ۳۱ ژانویه، ۱۶ فوریه، ۱۹ مارس، ۲۰ آوریل، ۲۲ می، ۲۳ ژوئن، ۲۵ ژوئیه، ۱۰ اوت، ۱ سپتامبر، ۱۳ اکتبر، ۱۴ نوامبر و ۱۶ دسامبر.

۳- روش تحقیق

۳-۱- الگوریتم METRIC

برای محاسبه‌ی نرخ تبخیر- تعرق در لحظه‌ی عبور ماهواره، الگوریتم METRIC یک شار لحظه‌ای نرخ تبخیر- تعرق محاسبه می‌کند. شار گرمای تبخیر برای هر پیکسل تصویر از رابطه (۱) تخمین زده می‌شود:

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

در این رابطه، λET شار گرمای نهان تبخیر- تعرق ($W m^{-2}$)، R_n شار تشعشع خالص در سطح زمین ($W m^{-2}$)، G شار گرمایی زمین (W)

محاسبات نرخ تبخیر- تعرق دارد، به طوری که یکی از پرچالش‌ترین بخش‌های اجرای این مدل‌ها، انتخاب پیکسل سرد و گرم می‌باشد. مدل‌های SEBAL و METRIC علی‌رغم موفقیت بالایی که در محاسبه نرخ تبخیر- تعرق داشته‌اند، متکی به فردی متخصص برای انتخاب پیکسل گرم و سرد بوده و قابل استفاده برای کاربرهای کم تجربه نیستند. اخیراً مطالعاتی در راستای رفع این محدودیت انجام گرفته است. در سال ۲۰۱۳، Allen et al. (2013) به منظور تعیین خودکار پیکسل گرم و سرد، فیلترهایی را روی ویژگی‌های مختلف پیکسل‌های تصویر مورد نظر اعمال نمودند و سپس با استفاده از روش‌های آماری، پیکسل‌های گرم و سرد را انتخاب کردند. از جمله معایب روش ارائه شده توسط Allen و همکاران، نیمه اتوماتیک بودن روش و استفاده از میانگین دمای پیکسل‌های منتخب برای تعیین پیکسل‌های سرد و گرم است که این امر منجر به از دست رفتن خصوصیات واقعی پیکسل گرم و سرد می‌شود و لزوماً نمی‌تواند معیار خوبی برای تعیین این پیکسل‌ها باشد. در سال ۲۰۱۷، Bhattarai et al. (2017) روشی کاملاً اتوماتیک برای تعیین پیکسل سرد و گرم ارائه نمودند که بر خلاف روش قبلی نیازی به انتخاب پیکسل گرم و سرد توسط کاربر ندارد و همچنین از میانگین‌گیری دمای سطح پیکسل‌ها استفاده نمی‌کند.

در این پژوهش با استفاده از الگوریتم METRIC و روش ارائه شده توسط Bhattarai et al. (2017) برای انتخاب خودکار پیکسل گرم و سرد، جعبه ابزاری در محیط MATLAB توسعه داده شده است که به برآورد نرخ تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از تصاویر سنجنده Landsat 8 می‌پردازد. سپس با استفاده از این جعبه ابزار به برآورد نرخ تبخیر- تعرق واقعی دشت ارومیه در سال ۲۰۱۶ میلادی پرداخته شده و نتایج حاصل با نتایج مطالعات پیشین در این دشت که در همین بازه‌ی زمانی با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS استخراج شده است، مقایسه می‌گردد.

۲- منطقه‌ی مطالعه و داده‌های تحقیق

۲-۱- منطقه‌ی طرح

منطقه‌ی مطالعه، دشت ارومیه با طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۳ دقیقه و ۳۹ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲ دقیقه و ۱۷ ثانیه در شمال غرب ایران با متوسط بارندگی ۳۰۴ میلی‌متر در سال و اقلیمی سرد و خشک می‌باشد. این دشت با مساحت ۹۸۱۰۰ هکتار در اراضی ساحلی و کم شیب ضلع غربی دریاچه ارومیه واقع شده است. این منطقه از نظر آب و هوایی دارای تابستان‌های نسبتاً معتدل و خشک و

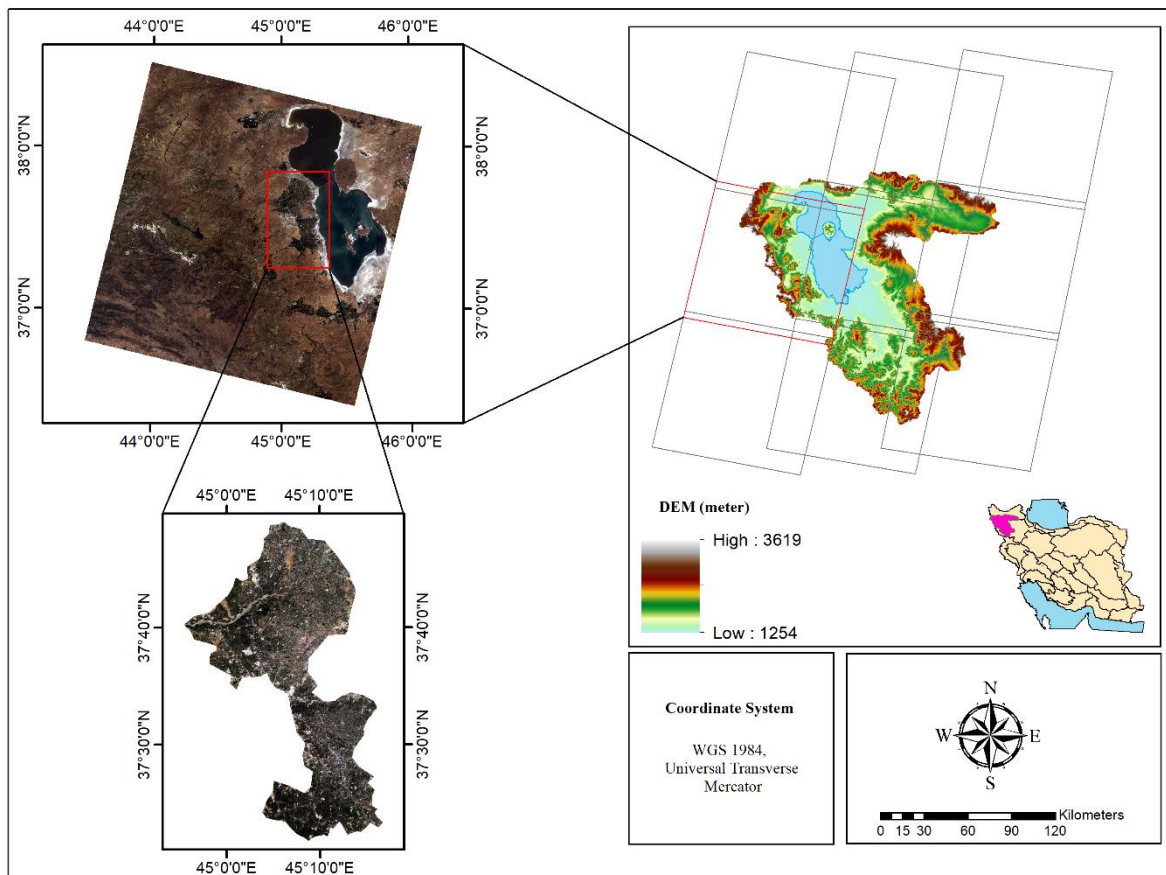


Fig. 1- Geographical location of the Urmia plain in the West Azerbaijan province

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت ارومیه در استان آذربایجان غربی

L عامل تعدیل کننده اثر خاک است که از شیب منحنی خاک محاسبه می‌شود. دامنه‌ی L بین صفر برای پوشش گیاهی متراکم و یک برای پوشش گیاهی با تراکم اندک است. برای مقادیر متوسط پوشش گیاهی، L حدود ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. ρ_5 و ρ_4 به ترتیب بازتابش باندهای محدوددهی قرمز و محدوده‌ی مادون قرمز می‌باشند. شار گرمایی زمین (G) نرخ ذخیره حرارت در خاک و گیاه در اثر رسانش^۸ است. این شار که بر اثر تابش خورشید در طول روز ایجاد می‌شود به اعماق نیمرخ خاک، تغییرات درجه حرارت، ظرفیت گرمایی خاک و ضریب هدایت گرمایی خاک بستگی دارد. در سال ۲۰۰۷، Tasumi et al. (2007) روش زیر را برای محاسبه‌ی شار گرمایی خاک در مدل METRIC پیشنهاد کرد که معادلات آن به صورت زیر می‌باشند.

$$\frac{G}{R_n} = 0.05 + 0.18e^{-0.521LAI} \quad LAI \geq 0.5 \quad (5)$$

$$\frac{G}{R_n} = \frac{1.80(T_s - 273.15)}{R_n} + 0.084 \quad LAI < 0.5 \quad (6)$$

شار حرارتی محسوس (H) جریان انرژی انتقال یافته به ذرات هوا به صورت همرفت^۹ و رسانش بر اثر اختلاف دما می‌باشد. تفاوت اصلی الگوریتم‌های سنجش از دور در برآورد نرخ تبخیر- تعرق، روش

(m^2) و H شار گرمایی محسوس به سمت جو ($W m^{-2}$) می‌باشد. شار تشعشع خالص در سطح زمین از رابطه (۲) بدست می‌آید.

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

در این رابطه، $R_{s\downarrow}$ تابش ورودی طول موج کوتاه، $R_{L\downarrow}$ تابش ورودی طول موج بلند و $R_{L\uparrow}$ تابش خروجی طول موج بلند می‌باشند (واحد تمامی متغیرهای فوق برحسب وات بر مترمربع می‌باشند). α سپیدایی^۶ (بدون بعد) و ϵ_0 گسیلندگی سطح (بدون بعد) می‌باشند که تابعی از شاخص سطح برگ^۵ هستند. شاخص سطح برگ برابر با نسبت مساحت تمامی برگ‌های یک گیاه به کل مساحت اشغال شده توسط آن گیاه است که از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد (Bastiaanssen, 1998):

$$LAI = - \frac{\ln\left(\frac{0.69 - SAVI}{0.59}\right)}{0.91} \quad (3)$$

در معادله فوق SAVI شاخص پوشش گیاهی با تنظیم انعکاس خاک^۷ می‌باشد که با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود (Huete, 1988):

$$SAVI = (1 + L) \frac{\rho_5 - \rho_4}{L + \rho_5 + \rho_4} \quad (4)$$

محاسبه‌ی این متغیر است. رابطه‌ی بکار رفته برای محاسبه‌ی این مؤلفه مطابق زیر است (Allen et al., 2002):

$$H = \frac{\rho \times C_p \times dT}{r_{ah}} \quad (7)$$

که در آن، ρ چگالی هوا [225 kg m^{-3}], C_p گرمای ویژه در فشار معین [$1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$], dT اختلاف دمای هوای بین دو ارتفاع مشخص که طبق پیشنهاد (Allen et al., 2002) در این مطالعه 0.1 متر و 2 متر در نظر گرفته شده است. r_{ah} مقاومت آئروپنمیک در برابر انتقال حرارت [day m^{-1}] است. حل رابطه (7) به دلیل وجود دو پارامتر نامشخص r_{ah} و dT چالش برانگیز است. برای تسهیل این محاسبه، از دو پیکسل "سرد" و "گرم" (که در آن‌ها می‌توان H را پیش‌بینی نمود) dT را تخمین زد) و سرعت باد در یک ارتفاع مشخص استفاده شده است. پیکسل "سرد" مربوط به منطقه‌ای با پوشش گیاهی متراکم و آبیاری مناسب می‌باشد. در این پیکسل دمای سطح زمین نزدیک به دمای هوا می‌باشد و مقدار نرخ تبخیر-تعرق واقعی در این پیکسل برابر نرخ تبخیر-تعرق مرجع است (با توجه به منطقه‌ی مورد مطالعه این ضریب می‌تواند کم یا زیاد شود که در این مطالعه از ضریب $1/0.5$ استفاده شده است). پیکسل گرم مربوط به زمین کشاورزی بدون پوشش گیاهی و خشک می‌باشد. برای انتخاب خودکار پیکسل "سرد" و "گرم" از روش ارائه شده در مطالعه (Bhattarai et al., 2017) استفاده شده است. این روش شامل دو مرحله‌ی اصلی است که در مرحله‌ی اول با اعمال فیلترهای مختلف، یک‌سری از پیکسل‌هایی که می‌توانند نماینده‌ای از پیکسل گرم و سرد باشند انتخاب گردیده و در مرحله بعد با استفاده از روش 'ESA'، پیکسل گرم و سرد انتخاب می‌شود. پس از انتخاب پیکسل سرد و گرم، مقدار dT در این دو پیکسل محاسبه می‌شود و در نهایت با برازش خط مستقیم $dT = aT_s + b$ بین این دو نقطه، مقدار dT در هر پیکسل بر اساس دمای سطح آن پیکسل محاسبه می‌شود.

در پیکسل گرم، فرض می‌گردد که نرخ تبخیر-تعرق واقعی برابر صفر است. بنابراین، با استفاده از رابطه (1) و (7) مقدار dT در پیکسل گرم

(dT_{hot}) محاسبه می‌شود. مقدار H و dT در پیکسل سرد نیز به ترتیب مطابق روابط (8) و (9) قابل محاسبه می‌باشد:

$$H_{cold} = R_n - G - 1.05\lambda ET_{ref} \quad (8)$$

$$dT_{cold} = \frac{H_{cold} \times r_{ah,cold}}{\rho_{cold} \times c_p} \quad (9)$$

برای محاسبه نرخ تبخیر-تعرق مرجع از شکل استاندارد شده‌ی رابطه ASCE-EWRI (ASCE Penman-Monteith استفاده شده است) (2005). رابطه (10) شکل استاندارد شده‌ی نرخ تبخیر-تعرق گیاه مرجع ASCE برای گام‌های زمانی ساعتی و روزانه را نشان می‌دهد:

$$ET_{ref} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (10)$$

در این رابطه، ET_{ref} نرخ تبخیر-تعرق گیاه مرجع (mm day^{-1}) یا MJ m^{-2} ، R_n تشعشع خالص در سطح پوشش گیاهی ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) یا G شار گرمایی خاک ($\text{MJ m}^{-2} \text{ hour}^{-1}$) یا میانگین روزانه یا ساعتی دمای هوا در ارتفاع 2 متری ($^\circ\text{C}$)، u_2 میانگین روزانه یا ساعتی سرعت باد در ارتفاع 2 متری (m s^{-1})، e_s میانگین فشار بخار اشباع در ارتفاع 2 متری (kPa)، e_a میانگین فشار بخار واقعی در ارتفاع 2 متری (kPa)، Δ شیب منحنی دما-فشار بخار ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$) و γ ثابت سایکرومتریک ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$) می‌باشد. مقادیر ثابت‌های C_n و C_d از جدول 1 تعیین می‌گردد.

با محاسبه dT_{hot} و dT_{cold} و با استفاده از دمای سطح پیکسل‌های مورد نظر می‌توان مقادیر a و b در معادله $dT = aT_s + b$ را به دست آورد. بدین ترتیب در هر پیکسل، مقدار dT به عنوان تابعی از دمای سطح آن قابل تعیین است.

در این مرحله با استفاده از رابطه γ مقدار شار حرارتی محسوس (H) برای هر پیکسل در شرایط اتمسفری خنثی به دست می‌آید. برای وارد نمودن تأثیرات شناوری که از گرم شدن سطح ناشی می‌شود، الگوریتم METRIC از تئوری Monin-Obukhov در یک روند تکراری استفاده می‌کند.

Table 1- C_n and C_d constant values in Eq. (10)

جدول 1- مقادیر ثابت C_n و C_d در رابطه (10)

Time step	Longtime ET_{ref}		ET_{ref} unit
	C_n	C_d	
Daily or monthly	1600	0.38	mm.d^{-1}
Hourly during daylight	66	0.25	mm.d^{-1}
Hourly during nighttime	66	1.7	mm.d^{-1}

تصویر است:

$$ET_{24} = ET_r F \times ET_{r-24} \quad (14)$$

برای تبدیل نرخ تبخیر- تعرق روزانه به فصلی، ابتدا باید معین گردد که هر تصویر ماهواره نماینده‌ی کدام یک از روزهای نزدیک به تاریخ عبور ماهواره است؛ سپس ET_r تجمعی برای دوره‌ی زمانی که تصویر ثبت شده نماینده‌ی آن می‌باشد، با جمع مقادیر ET_r روزانه در آن دوره زمانی محاسبه می‌گردد و در نهایت نرخ تبخیر- تعرق تجمعی در هر دوره‌ی زمانی از رابطه (۱۵) بدست می‌آید:

$$ET_{\text{period}} = ET_r F_{\text{period}} \sum_1^n ET_{r-24} \quad (15)$$

در این رابطه، $ET_r F_{\text{period}}$ نماینده‌ی $ET_r F$ در آن دوره، ET_{r-24} مقدار روزانه ET_r و n تعداد روزهای دوره زمانی می‌باشد. واحد ET_{period} میلی‌متر و ET_{r-24} برحسب mm day^{-1} می‌باشد. در نهایت، ET فصلی از مجموع مقادیر ET_{period} برای طول فصل بر حسب میلی‌متر به دست می‌آید.

۳-۲- توسعه جعبه ابزار تخمین نرخ تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم METRIC در محیط MATLAB

در این مطالعه، الگوریتم محاسبه‌ی نرخ تبخیر- تعرق واقعی در محیط MATLAB توسعه داده شده است که دارای واسط گرافیکی کاربر (GUI) استاندارد بوده و قابلیت اجرا در سیستم‌عامل‌های مختلف مانند Windows، Linux و Macintosh را دارد. در توسعه‌ی این جعبه ابزار ۳۰۰۰ خط کد در قالب ۶۵ تابع نوشته شده است. در شکل ۲، نمایی از واسط کاربری تهیه شده در محیط MATLAB مشاهده می‌شود. ورودی‌های این جعبه ابزار به سه دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند. دسته‌ی اول شامل باندهای مختلف تصاویر سطح ۱ سنجنده Landsat 8، لایه رقوم ارتفاعی منطقه، لایه شیب، لایه جهت شیب، لایه زبری سطح و لایه پوشش گیاهی است. لایه پوشش گیاهی در فرآیند انتخاب خودکار پیکسل گرم و سرد مورد استفاده قرار می‌گیرد، بنابراین در صورتی که کاربر بخواهد پیکسل گرم و سرد را خود به برنامه بدهد، وارد کردن لایه پوشش گیاهی لازم نمی‌باشد. دسته‌ی دوم شامل داده‌های ایستگاه هواشناسی می‌باشد که شامل سطر و ستون ایستگاه هواشناسی در تصویر ورودی، دمای هوا، سرعت باد و نرخ تبخیر- تعرق مرجع می‌باشد. دسته‌ی سوم مشخصات اجرایی مدل را مشخص می‌کنند که عبارتند از تعداد تکرار حلقه‌ی محاسبه‌ی شار حرارتی محسوس (H)، حد همگرایی و دو آستانه‌ی ارتفاعی حداقل و حداکثر. نکته‌ای که در مورد الگوریتم باید به آن اشاره نمود، اعمال اصلاحات برای مناطق کوهستانی است. الگوریتم با دریافت دو آستانه‌ی ارتفاعی حداقل و حداکثر (شکل ۲، مستطیل شماره‌ی یک)

شرایط پایداری اتمسفر، بخصوص در شرایط خشک، تأثیر زیادی بر مقاومت آئرو‌دینامیکی (r_{ah}) داشته و لازم است در محاسبه شار حرارتی محسوس (H) در نظر گرفته شود. طول Monin-Obukhov (L) برای تعیین شرایط پایداری اتمسفر از رابطه ۱۱ بدست می‌آید:

$$L = - \frac{\rho C_p u_*^3 T_s}{kgH} \quad (11)$$

در این رابطه، ρ چگالی هوا (kg m^{-3})، C_p حرارت مخصوص هوا ($1001 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)، u_* سرعت اصطکاکی (m s^{-1})، T_s دمای سطح (K)، k ثابت بدون بعد فون کارمن (0.41)، g ثابت جاذبه (9.81 m s^{-2})، و H شار حرارتی محسوس (W m^{-2}) است. مقادیر L شرایط پایداری اتمسفر را تعریف می‌کند. اگر $L < 0$ ، اتمسفر غیر پایدار، اگر $L > 0$ اتمسفر پایدار و اگر $L = 0$ اتمسفر خنثی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شرایط اتمسفری، مقادیر اصلاح پایداری برای مومنتوم (Ψ_m) و انتقال حرارت (Ψ_h) با استفاده از روابط ارائه شده در پژوهش (Allen et al. 2007) محاسبه می‌گردد. سپس سرعت اصطکاکی (u_*)، مقاومت آئرو‌دینامیکی (r_{ah}) و شار حرارتی محسوس (H) با توجه به شرایط اتمسفر و مقادیر Ψ_h و Ψ_m دوباره محاسبه می‌شوند. این روند تکراری آن قدر ادامه پیدا می‌کند تا dT_{hot} و r_{ah} در پیکسل گرم به مقداری پایدار میل پیدا کند. در نهایت، مقدار نهایی شار حرارتی محسوس در هر پیکسل قابل محاسبه می‌باشد. با استفاده از شار تشعشع خالص در سطح زمین، شار گرمایی زمین و شار حرارتی محسوس محاسبه شده برای هر پیکسل و رابطه (۱) می‌توان مقدار شار گرمای نهان تبخیر- تعرق (λET) در هر پیکسل را تخمین زد و با استفاده از رابطه (۱۲) مقدار نرخ تبخیر- تعرق واقعی برای لحظه‌ی عبور ماهواره را محاسبه نمود:

$$ET_{\text{inst}} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda \rho_w} \quad (12)$$

در این رابطه، ET_{inst} نرخ تبخیر- تعرق لحظه‌ای (mm hr^{-1})، عدد ۳۶۰۰ ضریب تبدیل زمان از ثانیه به ساعت، λ گرمای نهان تبخیر یا گرمای جذب شده برای تبخیر یک کیلوگرم آب (J kg^{-1}) و چگالی آب (معادل 1000 Kg m^{-3}) می‌باشد. نسبت ET مرجع ($ET_r F$) نیز به عنوان نسبت ET لحظه‌ای (ET_{inst}) در هر پیکسل به ET مرجع (ET_r) که با استفاده از رابطه (۱۰) به دست آمده است، مطابق رابطه (۱۳) تعریف می‌شود.

$$ET_r F = \frac{ET_{\text{inst}}}{ET_r} \quad (13)$$

برای محاسبه نرخ تبخیر- تعرق روزانه فرض می‌گردد که $ET_r F$ لحظه‌ای معادل میانگین ۲۴ ساعته این متغیر است. بنابراین، ET_{24} برحسب (mm day^{-1}) از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود که در آن ET_{r-24} مقدار تجمعی ET_r ۲۴ ساعته در روز عبور ماهواره و ثبت

۴- نتایج و تحلیل

در شکل ۳ نقشه‌های نرخ تبخیر- تعرق واقعی ماهانه‌ی محاسبه شده با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat 8 نشان داده شده است. میزان نرخ تبخیر- تعرق تخمین زده شده در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس که در فصل سرما قرار دارند بسیار کم می‌باشد. در ماه‌های بعد شاهد افزایش میزان نرخ تبخیر- تعرق می‌باشیم به طوری که در ماه‌های گرم سال (ژوئن تا سپتامبر) نرخ تبخیر- تعرق به بیشترین مقدار خود می‌رسد و با شروع دوباره فصل سرما، کاهش می‌یابد. میزان نرخ تبخیر- تعرق واقعی در ماه‌های اوت، ژوئیه و ژوئن به ترتیب با مقادیر میانگین ۱۵۳، ۱۳۸ و ۱۳۰ میلی‌متر بیشترین مقدار و در ماه‌های دسامبر و فوریه به ترتیب با مقادیر ۷ و ۱۶ میلی‌متر کمترین مقدار را در دشت ارومیه داشته است. در ماه‌های سرد سال تفکیک مکانی خاصی در نقشه‌های نرخ تبخیر- تعرق مشاهده نمی‌شود؛ اما در ماه‌های گرم سال و یا به عبارت دیگر در دوره‌ی کشت گیاهان (مه تا اکتبر) که پوشش گیاهی زمین‌های کشاورزی با هم تفاوت دارند، از لحاظ مکانی تفکیک بهتری بین قسمت‌های مختلف دشت ارومیه دیده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که قسمت‌های شمال غربی و جنوب غربی دشت ارومیه در دوره‌ی کشت گیاهان، به دلیل وجود باغ‌های فراوان از جمله باغ سیب در این منطقه، از مقادیر بالای نرخ تبخیر- تعرق نسبت به سایر نقاط دشت ارومیه برخوردار هستند.

نرخ تبخیر- تعرق به دست آمده را متناسب با ارتفاع قرارگیری پیکسل مورد محاسبه، اصلاح می‌کند. پس از وارد کردن داده‌های فوق، کاربر باید مشخص کند که انتخاب پیکسل‌های گرم و سرد به صورت خودکار انجام پذیرد یا توسط خود کاربر. در صورت انتخاب روش خودکار، بعد از مشخص کردن خروجی‌های مورد نظر در پنل مربوطه و فشردن دکمه‌ی اجرا، برنامه به طور کامل اجرا شده و خروجی‌های مورد نظر تولید می‌شود. اما در صورتی که کاربر بخواهد پیکسل گرم و سرد را خود انتخاب کند، بعد از انتخاب خروجی‌های مورد نظر و فشردن دکمه‌ی اجرا، الگوریتم تا بخش محاسبه‌ی لایه‌های شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی^{۱۳} و لایه دمای سطح اجرا می‌شود، سپس این دو لایه را به کاربر نمایش می‌دهد و منتظر می‌ماند تا کاربر با استفاده از این لایه‌ها و تجربه و شناخت خود از منطقه، پیکسل‌های گرم و سرد را انتخاب کند و پنل مربوط به سطر و ستون پیکسل‌های گرم و سرد را تکمیل کرده و دکمه‌ی ادامه را فشار دهد. نکته‌ی مهمی که در توسعه‌ی این مدل در نظر گرفته شده این است که اگر کاربر بخواهد با سعی و خطا و مشاهده‌ی نتایج مدل، پیکسل گرم و سرد را محاسبه کند، نیاز نیست که مدل را دوباره از ابتدا اجرا کند؛ تنها کافی است که سطر و ستون پیکسل‌های سرد و گرم جدید را در پنل آخر تغییر دهد و دکمه اجرا را فشار دهد.

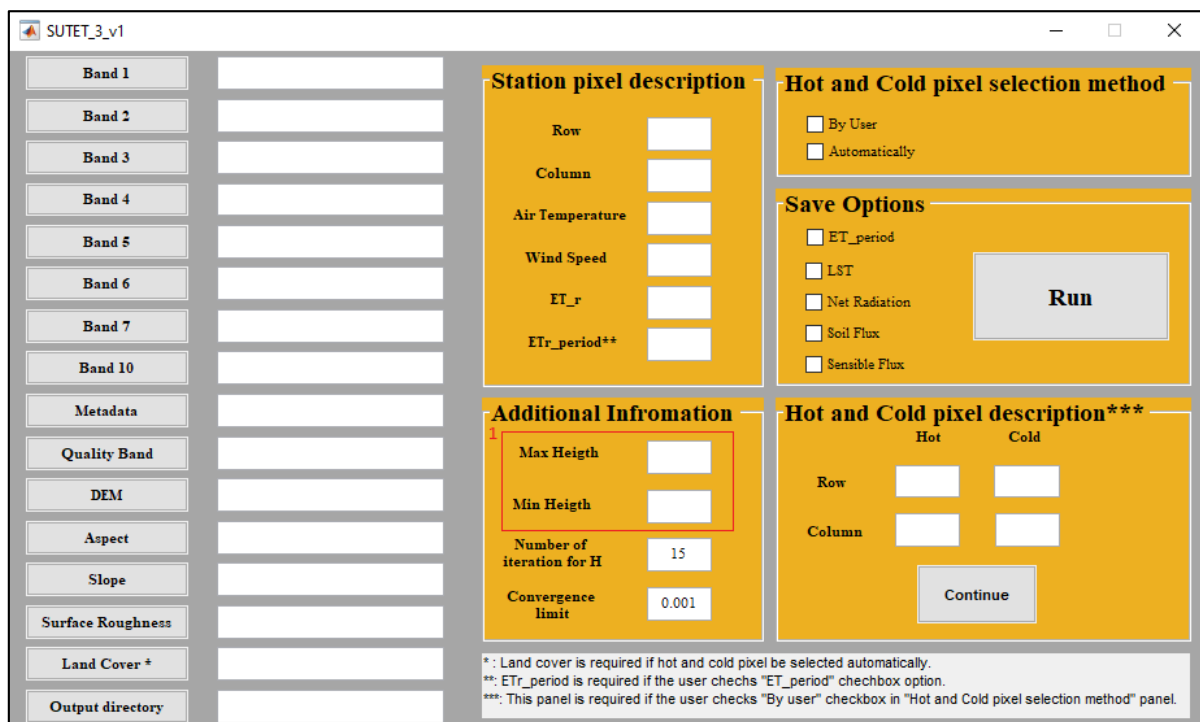


Fig. 2- Schematic of the GUI_based toolbox

شکل ۲- نمای کلی واسط کاربری تهیه شده در برنامه MATLAB

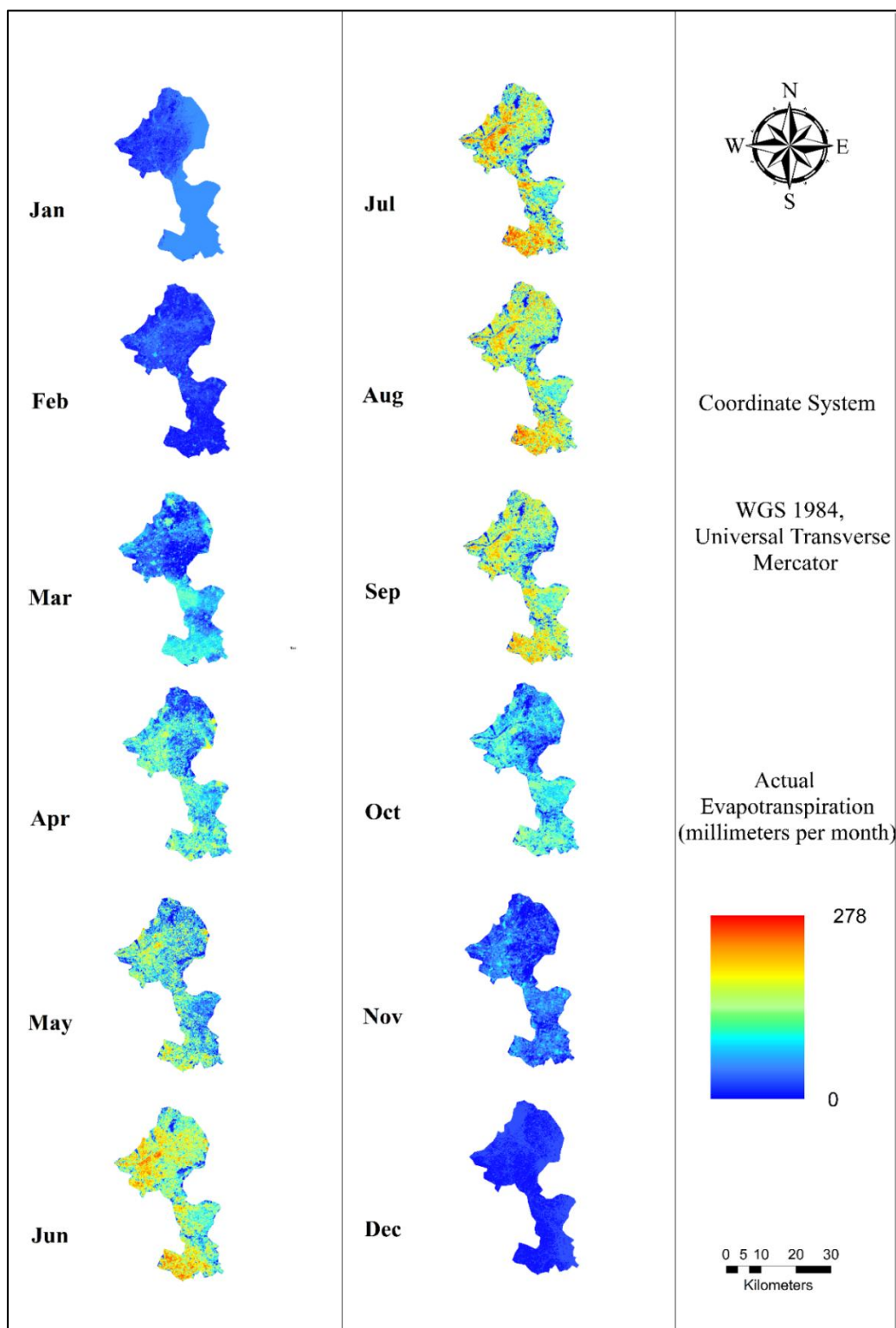


Fig. 3- Monthly actual ET maps from Landsat 8 in Urmia plain (2016)

شکل ۳- نقشه‌های نرخ تبخیر- تعرق واقعی ماهانه دشت ارومیه، حاصل از تصاویر ماهواره Landsat 8 در سال ۲۰۱۶ میلادی

در شکل ۴ میانگین نرخ تبخیر- تعرق واقعی ماهانه‌ی محاسبه شده با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat 8 با نتایج مطالعه Remote Sensing Research Center (2019) که در آن از تصاویر سنجنده MODIS با توان تفکیک مکانی یک کیلومتر استفاده شده است،

تبخیر- تعرق زمین‌های کشاورزی با نوع کشت غیر یکنواخت نخواهد بود، چرا که معمولاً ابعاد زمین‌های کشاورزی بسیار کوچک‌تر از یک کیلومتر می‌باشد؛ در حالی که با استفاده از تصاویر سنجنده Landsat با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر می‌توان میزان نرخ تبخیر- تعرق واقعی در هر قطعه زمین را محاسبه و زمین‌های با مصرف آب بالا را شناسایی نمود. اهمیت این اطلاعات در شناسایی آن دسته از مناطقی است که در آنها می‌توان سیاست‌های تغییر الگوی کشت به سمت محصولات با نیاز آبی کمتر و یا تغییر روش‌های آبیاری را پیاده نمود.

۵- خلاصه و جمع‌بندی

برآورد هر چه دقیق‌تر نرخ تبخیر- تعرق واقعی در مدیریت منابع آبی و توسعه‌ی مدل‌های هیدرولوژیکی اهمیت بسزایی دارد. یکی از مدل‌های متداول در استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای تخمین نرخ تبخیر- تعرق واقعی، مدل METRIC است که پیاده‌سازی و اجرای این مدل به دلیل پیچیدگی بالای آن همواره با چالش‌هایی همراه است. یکی از مهمترین این چالش‌ها، انتخاب پیکسل سرد و گرم برای کاربر کم تجربه می‌باشد. در این پژوهش، جعبه ابزاری برای محاسبه‌ی نرخ تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat 8 توسعه داده شده است که از یک طرف مشکل پیچیدگی پیاده‌سازی

مقایسه شده است. با توجه به این شکل، میزان نرخ تبخیر- تعرق واقعی در ماه‌های مختلف برای نتایج حاصل از تصاویر ماهواره Landsat 8 و MODIS روندی تقریباً مشابه دارند. اختلاف بین مقادیر نرخ تبخیر- تعرق واقعی محاسبه شده با ماهواره Landsat 8 و مقادیر محاسبه شده با سنجنده MODIS در ماه‌های ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر قابل توجه است. در واقع، نتایج استفاده از تصاویر MODIS در این ماه‌ها دارای نوسانات بیشتری نسبت به نتایج حاصل از استفاده از تصاویر ماهواره Landsat 8 است. برای مشاهده‌ی بهتر این تفاوت‌ها، نقشه‌های نرخ تبخیر- تعرق حاصل از دو سنجنده در دو ماه اوت و سپتامبر، در شکل ۵ نمایش داده شده است. میزان نرخ تبخیر- تعرق سالانه‌ی محاسبه شده با استفاده از جعبه ابزار توسعه داده شده برابر با ۹۰۴/۴ میلی‌متر و مقدار محاسبه شده در مطالعه Remote Sensing Research Center (2019) ۹۰۵/۶ میلی‌متر می‌باشد.

یکی از مهم‌ترین مسائل برای کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی شناسایی مناطق مستعد تغییر الگوی کشت از منظر مصرف آب می‌باشد. برای پاسخ به این مسأله می‌باید زمین‌های کشاورزی با مصرف آب بالا را شناسایی نمود. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در صورت استفاده از تصاویر MODIS با توان تفکیک مکانی یک کیلومتر در الگوریتم METRIC، مدل قادر به محاسبه نرخ

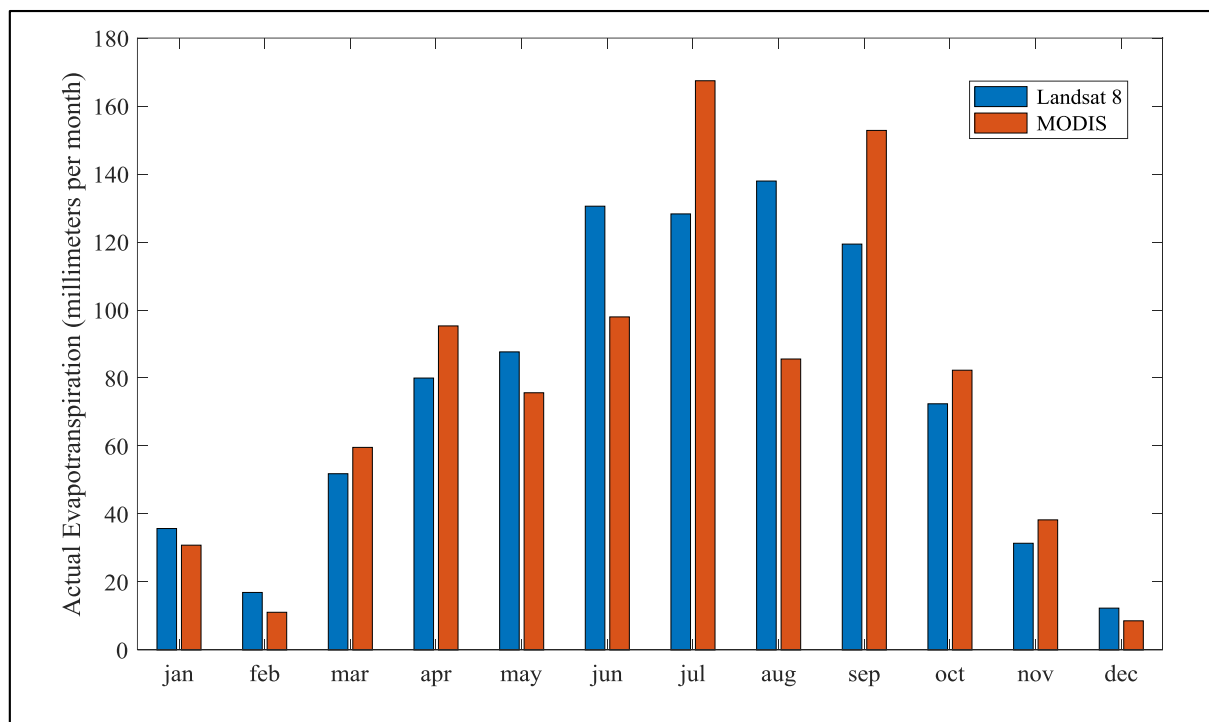


Fig. 4- Comparison between monthly ET from MODIS and Landsat 8, in Urmia plain (2016)

شکل ۴- مقایسه نتایج نرخ تبخیر- تعرق ماهانه دشت ارومیه بین سنجنده MODIS با ماهواره Landsat 8 در سال ۲۰۱۶ میلادی

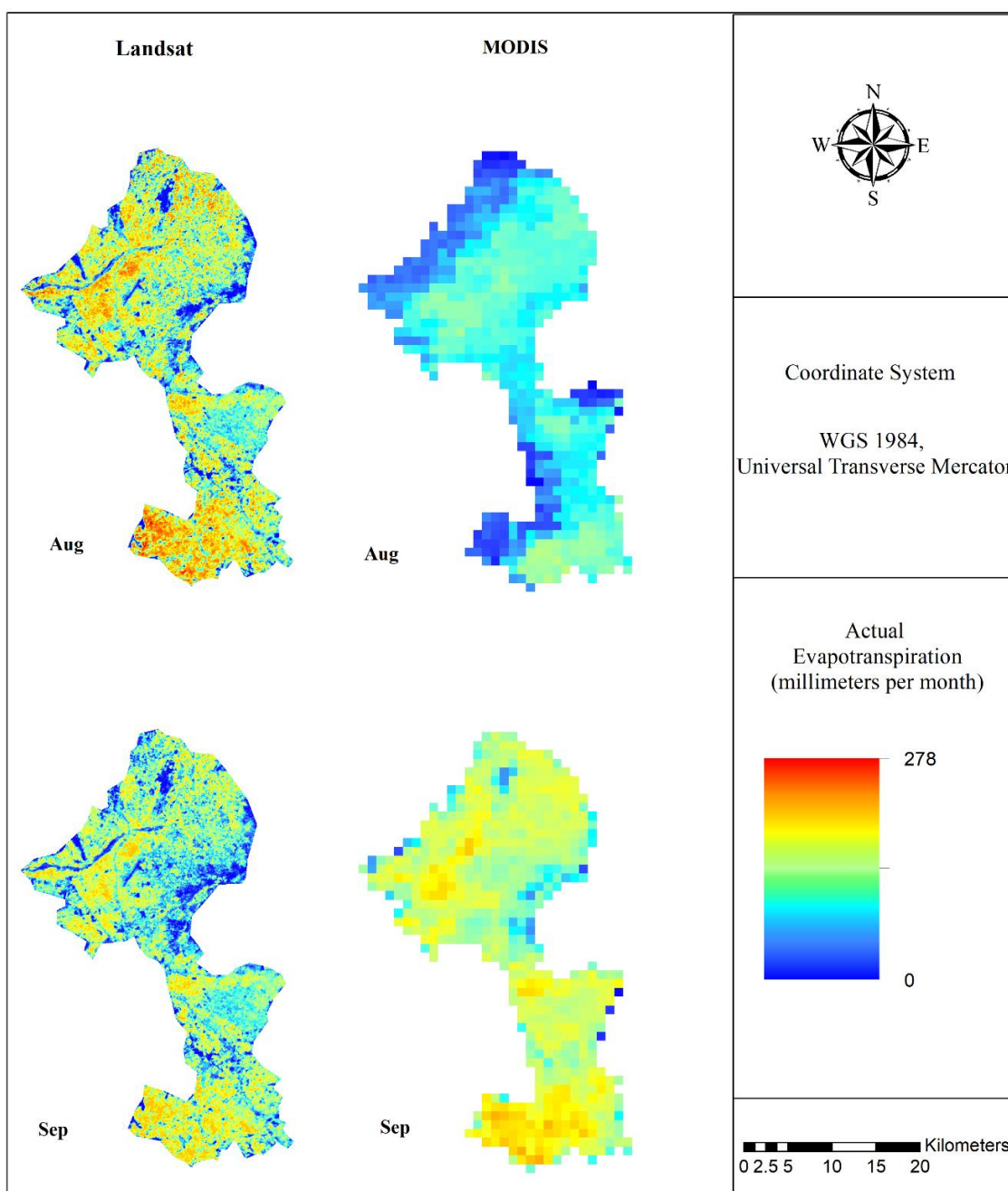


Fig. 5- Comparison between monthly ET maps from MODIS and Landsat 8 for August and September, in Urmia plain (2016)

شکل ۵- مقایسه نقشه‌های نرخ تبخیر- تعرق ماهانه‌ی دشت ارومیه بین سنجنده MODIS و Landsat 8 در ماه سپتامبر و اوت سال ۲۰۱۶

شده و سپس نتایج حاصل با نتایج نرخ تبخیر- تعرق محاسبه شده توسط مطالعات پیشین در این دشت با استفاده از تصاویر با توان تفکیک مکانی یک کیلومتر مقایسه گردید که حکایت از تطابق بالای هر دو نتایج دارد. استخراج نرخ تبخیر- تعرق واقعی با دقت بالا این امکان را فراهم آورده تا به طور غیرمستقیم، میزان آب قابل صرفه‌جویی

مدل را بر طرف کرده و از طرفی پیکسل گرم و سرد را به صورت خودکار انتخاب می‌کند. البته این جعبه ابزار این امکان را نیز به کاربر می‌دهد تا با توجه به تجربه و میزان شناخت از منطقه، پیکسل گرم و سرد را خود نیز انتخاب نماید. توسط جعبه ابزار توسعه داده شده، نرخ تبخیر- تعرق ماهانه‌ی دشت ارومیه برای سال ۲۰۱۶ میلادی محاسبه

Bastiaanssen WGM (1998) Remote sensing in water resources management: The state of the art. International Water Management Institute

Bastiaanssen WGM (1995) Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. A Remote Sensing Approach Under Clear Skies in Mediterranean climates 271

Bhattarai N, Quackenbush LJ, Im J, Shaw SB (2017) A new optimized algorithm for automating endmember pixel selection in the SEBAL and METRIC models. Remote Sensing of Environment 196:178-192

Folhes MT, Rennó CD, Soares JV (2009) Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. Agricultural Water Management 96(10):1398-1408

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)

Goshehghir A, Golabi M, Naseri A (2018) Comparison of actual evapotranspiration estimated using gram-schmidt method and SEBAL algorithm with Lysimetric data (Case study: Amir Kabir Sugarcane Argo-Industry). Iran-Water Resources Research 14(1):125-139 (In Persian)

Huete AR (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment 25(3):295-309

Remote Sensing Research Center (RSRC) Sharif University (2019) Evapotranspiration estimation methodology using METRIC algorithm and MODIS imagery in Urmia lake basin (Manuscript in preparation). Technical Report (In Persian)

Tasumi M, Trezza R, Allen RG, Wright JL (2005) Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid US. Irrigation and Drainage Systems 19(3-4):355-376

Younesazadeh S, Kamali M, Daneshkar Arasteh P (2016) Analytical study of land use changes (irrigated agriculture) in the watershed of lake Urmia using Landsat imagery. Journal of Hydrology and Soil Science 20(4):15-28 (In Persian)

Zwart SJ, Bastiaanssen WG (2007) SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems. Agricultural Water Management 89:287-296

در یک منطقه‌ی طرح در مقیاس مزرعه نیز قابل تخمین باشد. به طور مشخص، با توجه به نیاز روزافزون کشور برای جلوگیری از هدررفت یا مصرف مازاد آب در بخش کشاورزی چه از طریق تغییر الگوی کشت و چه تغییر در روش‌های آبیاری، به‌کارگیری ابزار توسعه داده شده در این پژوهش می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در اختیار متخصصین و مدیران بخش آب و کشاورزی قرار دهد.

۶- تشکر

نویسندگان این مقاله از آقایان سینا جهانگیر و علیرضا عربزاده و همچنین سرکار خانم فاطمه کردی برای کمک به توسعه‌ی این جعبه ابزار نهایت تشکر و قدردانی را دارند.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Evapotranspiration
- 2- Surface Energy Balance System (SEBS)
- 3- Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL)
- 4- Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration
- 5- Leaf Area Index (LAI)
- 6- Albedo
- 7- Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)
- 8- Conduction
- 9- Convection
- 10- Exhaustive Search Algorithm
- 11- Von Karman's Constant
- 12- Graphical User Interface (GUI)
- 13- Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI)

۷- مراجع

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(4):380-394

Allen RG, Tasumi M, Morse A (2005) Satellite-based evapotranspiration by METRIC and Landsat for western states water management. US Bureau of Reclamation Evapotranspiration Workshop, pp. 8-10

Allen R, Tasumi M, Trezza R, Waters R, Bastiaanssen W (2002) SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms For Land). Advance Training and Users Manual-Idaho Implementation, version, 1, 97