



## Sensitivity Analysis of Calculated Evapotranspiration Using Daily Energy Balance Model and Comparing it with SEBAL Model

A. Ramezani Khojeen<sup>۱\*</sup>, M. M. Kheirkhah Zarkesh<sup>۲</sup>,  
P. Daneshkar Arasteh<sup>۳</sup>, A. Moridi<sup>۴</sup> and R.  
Alimohammadi<sup>۵</sup>

### Abstract

Nowadays, a lot of models are offered by researchers to estimate surface evapotranspiration (ET) based on meteorological and remote sensing data. Quality of prepared/processed input data has a pivot role on final accuracy of calculated actual ET. In this regard, inputs of a model should be evaluated cautiously before starting the study regarding the effect of each data on the model outputs as well as the required processing cost and time. In this study, actual ET in Shahrkord plain was calculated using Landsat<sup>۸</sup> satellite images and the proposed daily energy balance model. Results showed a good consistency with lysimeter, pan evaporation and potential ET. The sensitivity of calculated ET to key parameters of the model was then studied with different density of canopy and ET on Julian days of ۱۴۷, ۱۹۵, and ۲۹۱ in ۳۲ control points. Finally, these results were compared with the sensitivity analysis results of SEBAL model studied previously by Khavarian Nahzak (۲۰۰۴). The results showed that the data of group A including air temperature, land surface temperature (LST), income short radiation, and sunny hours, group B including relative humidity and albedo, and group C including the sensitivity of leaf area index and wind have high, medium to high, and low to medium sensitivity, respectively. Thus, it is recommended recording the most sensitive data with more accuracy. Finally, the sensitivity analysis results of proposed daily model showed a considerable similarity with SEBAL model, except for LST.

**Keywords:** Landsat<sup>۸</sup>, Sensitivity Analysis, Energy Balance Algorithm, Remote Sensing, Shahrkord.  
Received: June ۲۰, ۲۰۱۵

۱- M.Sc. Student of Remote Sensing and GIS, Department of Environment and Energy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Ramezani.alireza@gmail.com

۲- Associate Professor of Remote sensing and GIS Group, Department of Environment and Energy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

۳- Associate Professor of Water Sciences and Engineering Department, Faculty of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

۴- Assistant Professor of Civil, water and environmental Engineering Faculty, Abbaspour School of Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

۵- Assistant Professor of Agricultural & Natural resources research centre of Chaharmahal & Bakhtiari province, Shahrkord, Iran.

\*- Corresponding Author

## تحلیل حساسیت تبخیر و تعرق محاسبه شده با استفاده از مدل بیلان انرژی روزانه و مقایسه آن با مدل سبال

علیرضا رضائی خوجین<sup>۱\*</sup>، میرمسعود خیرخواه زرکش<sup>۲</sup>،  
پیمان دانش کار آراسته<sup>۳</sup>، علی مریدی<sup>۴</sup> و رحیم علیمحمدی<sup>۵</sup>

### چکیده

امروزه مدل‌ها و روش‌های زیادی توسط محققین مختلف ارائه شده‌است که بر اساس داده‌های ورودی هواشناسی و سنسجش از دوری اقدام به برآورد تبخیر و تعرق در روی سطح زمین می‌نمایند. بدیهی است که کیفیت جمع‌آوری و پردازش داده‌های ورودی نقش مهمی را در دقت نهایی تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شده خواهد داشت. در این خصوص لازم است قبل از شروع مطالعه، ورودی‌های یک مدل با دقت مضاعفی مطالعه شده و حسب اثرگذاری هر داده در نتایج خروجی یک مدل، هزینه و زمان لازم جهت آماده‌سازی اختصاص یابد. در مطالعه حاضر با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat<sup>۸</sup> و یک مدل بیلان انرژی روزانه که بر اساس آزمون‌های آماری انجام شده نتایج آن تطابق خوبی را با داده‌های لایسمتری، تست تبخیر و تعرق پتانسیل نشان داده بود میزان تبخیر و تعرق واقعی در دشت شهرکرد محاسبه گردید و سپس حساسیت تبخیر و تعرق محاسبه شده نسبت به پارامترهای کلیدی مدل در روزهای ژوئیه ۱۴۷، ۱۹۵ و ۲۹۱ در ۳۲ نقطه با تراکم پوشش گیاهی و تبخیر و تعرق مختلف بررسی گردید و در نهایت نتایج حاصله با نتایج تحلیل حساسیت مدل سبال (۲۰۰۴) Khavarian Nahzak که پیش از آن مطالعه شده بود مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در مدل پیشنهادی داده‌های دمای سطحی، دمای هوا، تابش طول موج کوتاه ورودی و ساعات آفتابی دارای حساسیت بالا و رطوبت نسبی و آلبیدو دارای حساسیت متوسط تا زیاد و باد و شاخص سطح برگ دارای حساسیت کم تا متوسط می‌باشند. از این رو پیشنهاد گردید که داده‌های با حساسیت بالا با دقت بیشتری رکورد و ثبت شوند و در نهایت مقایسه نتایج تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی با مدل سبال نیز نشان داد به جز دمای سطح زمین در بقیه موارد هم‌پوشانی قابل توجهی در بین دو مدل وجود دارد.

**کلمات کلیدی:** Landsat<sup>۸</sup>، تحلیل حساسیت، الگوریتم بیلان انرژی

روزانه، سنسجش از دور، شهرکرد.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۳/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۰/۹

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سنسجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۲- دانشیار دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۴- استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۵- استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، شهرکرد، ایران.

\*- نویسنده مسئول

Accepted: December 30, 2015

---

## ۱- مقدمه

تبدیل کرد بدون آنکه اثر زیانبخشی بر روی آب در دسترس کاربران پایین دست داشته باشد. (۲۰۰۷) Akbari et al. به منظور پایش عملکرد آبیاری در استان اصفهان از این مدل استفاده نمود که نتایج نشان داد که بهره وری سیستم‌های آبیاری شده از آب سطحی بیشتر از سیستم‌های دیگر می‌باشد.

در کشورمان نیز محاسبه تبخیر و تعرق واقعی سطح زمین با روش الگوریتم بیلان انرژی تاکنون در مطالعات گوناگونی و با اهداف متفاوتی مورد استفاده قرار گرفته است. (۲۰۰۴) Mobasheri et al. از تصاویر MODIS و الگوریتم سیال جهت محاسبه تبخیر و تعرق برای مزرعه نمونه ارتش واقع در استان گلستان استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که برآورد آلبیدوی سطحی با استفاده از روش نوین دارای دقت بیشتری می‌باشد، (۲۰۱۱) Kaviani et al. از الگوریتم سیال در تخمین تبخیر و تعرق واقعی و بهره‌وری آب کشاورزی در دشت قزوین استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که دقت تصاویر MODIS در برآورد تبخیر و تعرق و بهره‌وری آب بیشتر از تصاویر AVHRR می‌باشد. (۲۰۱۰) Emadzade et al. با پردازش تصاویر ماهواره‌ای NOAA-AVHRR با استفاده از الگوریتم سیال روند مصرف آب در زیرحوضه قره‌سو مورد بررسی قرار دادند که مقایسه نتایج مربوطه با تشتک تبخیر دقت قابل قبولی را در اکثر ایستگاه‌ها نشان داده است و در مطالعه جداگانه‌ای (۲۰۰۶) Daneshkar Arasteh and Tajrishy با استفاده از تصاویر NOAA-AVHRR میزان تبخیر صورت گرفته از سطح آزاد آب هامون‌های سیستان برآورد نمودند. (۲۰۱۰) Kheirkhah Zarkesh and Mahboobian با بکارگیری تصاویر MODIS و LANDSAT و الگوریتم سیال میزان تبخیر از سطح دریاچه کرخه محاسبه نمودند که اختلاف بین مقادیر محاسبه شده با استفاده از تصویر Landsat<sup>۷</sup> با تشتک تبخیر کمتر از تصاویر MODIS بود.

مدل سیال هم اکنون توسط سازمان ملل پذیرفته شده و در بسیاری از نقاط دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای استفاده از این مدل، انجام کارهای میدانی شامل اندازه‌گیری‌های همزمان، تعیین ضرایب مناسب منطقه برای روابط تجربی، تعیین ماهواره مناسب، تعیین قدرت تفکیک‌های مکانی، زمانی، طیفی و رادیومتری مناسب (حسب اهمیت پروژه)، تعیین گیاه مرجع مناسب برای هر منطقه در فصول مختلف و بسیاری از پارامترهای دیگر الزامی است. در این مدل وجود زمین‌های خشک و زمین‌های مرطوب در دید ماهواره مورد نیاز است. این مسئله استفاده از مدل را منوط به اطلاع قبلی از برنامه

امروزه توسعه فنون سنجش از دور امکان بکارگیری آن به منظور جمع‌آوری اطلاعات منطقه‌ای و گسترش مدل‌های عددی اقلیمی در راستای مطالعه تبخیر و تعرق واقعی سطح زمین را فراهم آورده است. بدین منظور مدل‌های مختلفی توسعه داده شده است که بر اساس داده‌های ورودی هواشناسی و سنجش از دوری اقدام به برآورد تبخیر و تعرق در روی سطح زمین می‌نمایند. هر یک از این روش‌ها حسب نوع و کیفیت داده‌های ورودی و فرضیاتی که در مراحل مختلف کار خود دارند دقت‌های متفاوتی دارند. از نظر تاریخی (۱۹۷۷) Jackson et al. با بدست آوردن تبخیر و تعرق با استفاده از گرماسنج مادون قرمز در مزرعه گندم در آریزونا پیشگام استفاده از سنجش از دور است. در سال‌های بعد تحقیقات زیادی در این خصوص صورت گرفت که از آن جمله می‌توان به برآورد تبخیر و تعرق محلی در مزرعه نیشکر با استفاده از داده سنجنده TM توسط (۱۹۹۷) Yang et al. اشاره نمود. این مطالعه نشان داد که با استفاده از داده‌های سنجنده TM بر اساس مفهوم شاخص VITT<sup>۱</sup> می‌توان نوعی خاص از برآورد تبخیر و تعرق را از مزرعه نیشکر در مقیاس محلی معرفی کرد. سپس یک الگوریتم بیلان انرژی به نام سیال<sup>۲</sup> (SEBAL) توسط (۱۹۹۸) Bastiaanssen et al. توسعه داده شد که یک الگوریتم پردازش تصویری است که تبخیر و تعرق را بصورت لحظه‌ای محاسبه و با لحاظ نمودن فرضیاتی به صورت روزانه و فصلی برآورد می‌کند این الگوریتم تاکنون در مطالعات گوناگونی در نقاط مختلف دنیا به کار رفته و صحت سنجی شده است. (۲۰۰۱) Allen et al. مدل سیال را در مقیاس حوضه‌ای مورد استفاده قرار دادند. (۲۰۰۱) Farah et al. با استفاده از این مدل تبخیر و تعرق را تحت شرایط مختلف آب و هوایی در حوضه ناوایشا در کشور کنیا مدل نمودند. بعد از آن (۲۰۰۲) Hafeez et al. مدل سیال را برای تخمین تبخیر و تعرق واقعی فصلی با استفاده از تصاویر سنجنده‌های ASTER، MODIS و LANDSAT در فیلیپین به استفاده نمودند.

در ادامه این الگوریتم در تحقیقات زیادی مورد استفاده قرار گرفت. (۲۰۰۲) Bastiaanssen et al. به منظور پایش و شناسایی مناطق دارای کاهش تبخیر در حوضه سند پاکستان مورد استفاده قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که اطلاعات فضایی و زمانی تبخیر و تعرق واقعی جهت ارزیابی توزیع و مصرف آب در حوضه‌های بزرگ کمک می‌کند. (۲۰۰۳) Bastiaanssen and Chandrapala برای محاسبه مصارف آب کشاورزی و زیست‌محیطی در کشور سریلانکا که نتایج نشان داد که می‌توان مراتع کم بازده را به اراضی دیم

(مگاژول بر مترمربع بر روز) محاسبه می‌شود. تابش موج بلند خروجی ( $R_{LT}$ ) و تابش موج بلند ورودی ( $R_{LI}$ ) نیز به صورت روزانه محاسبه گردید و در این راستا به منظور محاسبه گسیلندگی سطحی<sup>۴</sup> از روش پیشنهادی سیال استفاده گردید با این تفاوت که به جای SAVI<sup>۵</sup> از MSAVI<sup>۶</sup> استفاده گردید و نیز به جای استفاده از رابطه تجربی موجود مدل سیال جهت محاسبه گسیلندگی هوا<sup>۷</sup>، از معادله Brutsaert et al. (۱۹۷۵) استفاده گردید. در مدل پیشنهادی رویه محاسبه شار محسوس<sup>۸</sup> نسبت به آنچه که در مدل سیال از حل گردشی (Iteration) معادلات استاندارد انتقال حرارت و تکانه بر مبنای اصلاح پایداری مونین - ابوخوف بود متفاوت می‌باشد. رابطه تثبیت شده و متعارف پروفیل شار (Businger et al. ۱۹۷۱) نشان می‌دهد که در زیر لایه سطحی و در غیاب اثر شناوری، پروفیل سرعت میانگین باد در روی یک سطح همگن و نرم به صورت لگاریتمی می‌باشد. با توسعه این قانون لگاریتمی به طرف لایه مرزی حرارتی چینه‌بندی شده تئوری مشابَهت مونین ابوخوف (Monin and Yaglom, ۱۹۷۱) و بعد از محاسبه دمای پتانسیل در سطح و ارتفاع دو متری، اصلاح اثر پایداری و ناپایداری اتمسفر با استفاده از تئوری آیرودینامیک، انتقال مومنتم، بخار آب، اندازه‌گیری دقیق شیب دمای هوا و باد بالای سطح، نسبت به محاسبه شار محسوس اقدام گردید (Businger, ۱۹۸۸) و (Brunel, ۱۹۸۹)). از دیگر تفاوت‌های این مدل نسبت به مدل سیال می‌توان به نحوه محاسبه دمای هوا و دمای سطح و نحوه واسنجی آنها با داده‌های مشاهده‌ای اشاره نمود. ضمناً در این مدل نیازی به استفاده از پیکسل‌های خشک و تر نمی‌باشد.

قبل از استفاده از یک مدل، مطالعه رفتار و حساسیت آن نسبت به پارامترهای ورودی ضروری به نظر می‌رسد. نتایج آنالیز حساسیت مشخص می‌کند که اندازه‌گیری چه پارامترهایی از اهمیت بیشتری برخوردارند تا حداکثر دقت در اندازه‌گیری آنها بکار برده شود. بدیهی است که کیفیت جمع‌آوری و پردازش داده‌های ورودی نقش مهمی را در دقت نهایی تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شده خواهد داشت. در این خصوص لازم است قبل از شروع مطالعه، ورودی‌های یک مدل با دقت مضاعفی مطالعه شده و حسب اثرگذاری هر داده در نتایج خروجی یک مدل، هزینه و زمان لازم جهت آماده‌سازی اختصاص یابد.

مطالعه حاضر بخشی از یک مطالعه با موضوع "برآورد مصارف آب کشاورزی با استفاده از الگوریتم بیلان انرژی" می‌باشد که در آن با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat<sup>۸</sup> و یک مدل بیلان انرژی

آبیاری زمین می‌سازد و این نقیصه بزرگی به حساب می‌آید. بسیاری از پارامترها به صورت تجربی و از معادلاتی تجربی به دست می‌آیند که صحت عمل آنها نیاز به آزمون بیشتری دارد (Mobasheri and Khavarian, ۲۰۰۴).

در مطالعه حاضر به منظور محاسبه تبخیر واقعی در سطح محدوده مطالعاتی شهرکرد از الگوریتم توازن انرژی روزانه برای سطح زمین (Daily Surface Energy Balance Algorithm) استفاده گردید. این الگوریتم بر اساس مدل پیشنهادی این مطالعات که کلیات آن در قسمت مبانی نظری تحقیق آورده شده است با استفاده از ترکیب معادلات بیلان انرژی و روابط آیرودینامیکی و نیز دمای سطح زمین، بازتابندگی سطحی، شاخص‌های وضعیت پوشش گیاهی و روابط درونی آنها، شارهای سطحی را برای انواع پوشش‌های سطح زمین برآورد می‌نماید. در این مدل سعی شده است که بر پایه داده‌های هواشناسی که به طور مستقیم در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود و نیز واقعیت داده‌های موجود در کشور و در نهایت اصل قانون بقای انرژی، بر اساس مدلی که فیزیکی بوده و کمترین فرضیات را داشته باشد نسبت به محاسبه تبخیر و تعرق واقعی و به تبع آن مصارف آب کشاورزی در محدوده مورد مطالعه اقدام شود. الگوریتم پیشنهادی یک الگوریتم سنجش از دور است که بر خلاف بیشتر الگوریتم‌های موجود و شناخته شده (نظیر سیال) از ابتدا به جای استفاده از تعادل انرژی سطحی لحظه‌ای از بیلان انرژی روزانه برای هر پیکسل از تصویر ماهواره‌ای استفاده می‌کند و نیازی به محاسبه ET<sub>RF</sub><sup>۹</sup> و تبخیر و تعرق مرجع نمی‌باشد. در مدل سیال بعد از محاسبه تبخیر و تعرق لحظه‌ای با استفاده از رابطه ET<sub>RF</sub> (کسر ET مرجع ET<sub>RF</sub>) بصورت نسبت ET لحظه‌ای (ET<sub>inst</sub>) محاسبه شده برای هر پیکسل به ET مرجع) تبخیر لحظه‌ای به روزانه تبدیل می‌شود در واقع فرض می‌کند که نسبت تبخیر و تعرق محاسبه شده به تبخیر و تعرق مرجع که با استفاده از داده‌های ایستگاهی محاسبه شده است در لحظه عبور ماهواره و در ۲۴ ساعت یکسان است از سوی دیگر جهت محاسبه ET<sub>RF</sub> از تبخیر و تعرق مرجع استفاده می‌نماید که در واقع یک برآورد است و در محاسبه آن معمولاً از روش‌هایی نظیر بلینی کریدل یا پنمن مانیتیس استفاده می‌شود که این روش‌ها فرضیاتی را در نظر می‌گیرند (مانند لگاریتمی بودن باد و خنثی بودن اتمسفر و ...) که ممکن است این فرضیات در محدوده مطالعاتی صادق نباشند. تفاوت دیگر این مدل با مدل سیال نحوه محاسبه تابش ورودی موج کوتاه ( $R_{SD}$ ) است که به جای استفاده از مدل‌های تجربی و محاسبه آن به صورت لحظه‌ای، با استفاده از مدل آنگستروم و (Duffie and Beckman ۱۹۸۰) به صورت روزانه

ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی فرخشهر، شهرکرد، بروجن، سامان، اردل و فارسان می باشد. موقعیت هر یک از ایستگاه‌های هواشناسی در محدوده مطالعاتی در شکل ۱ آورده شده است. با توجه به رویکرد اولیه مطالعات به منظور استفاده در مدل، همچنین واسنجی سایر داده‌ها و نیز تخمین شرایط محیطی و انجام کنترل‌های لازم روی نتایج مدل، در ایستگاه‌های فوق‌الذکر داده‌های دمای هوا، دمای سطحی زمین، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی، داده‌های لایسیمتری، تابش خورشیدی، بارش روزانه، دمای نقطه شبنم، تبخیر از تشت برای سال ۲۰۱۳ جمع‌آوری و پس از یکسان سازی فرمت داده‌ها در بانک اطلاعاتی طرح قرار داده شد.

ب) داده‌ها و اطلاعات دریافتی از تصاویر ماهواره‌ای - در این مطالعات ۱۳ تاریخ-تصویر ماهواره Landsat ۸ مربوط به سال ۲۰۱۳ از منابع موجود اطلاعاتی تهیه و در بانک اطلاعاتی مطالعات حاضر قرار داده شد. دو تاریخ-تصویر از داده‌های لندست به دلیل ابری بودن و ... کنار گذاشته شد و ۱۱ تاریخ-تصویر از روز ژوئیه ۱۳۱ تا ۲۹۱ جهت استفاده در مطالعات بیلان انرژی و تعیین مصارف کشاورزی دشت شهرکرد مناسب تشخیص داده شد. در نهایت سه تصویر در روزهای ژوئیه ۱۴۷، ۱۹۵ و ۲۹۱ مربوط به اوایل، اواسط و اواخر دوره زراعی جهت تحلیل حساسیت استفاده گردید.

## ۲-۳- روش کار

### ۲-۳-۱- معادله بیلان انرژی

همانگونه که در قسمت مقدمه عنوان شد در این مطالعات به منظور برآورد تبخیر و تعرق روزانه واقعی دشت شهرکرد در طول فصل زراعی ۲۰۱۳ میلادی از الگوریتم بیلان انرژی پیشنهادی استفاده شد

روزانه که بر اساس آزمون‌های آماری انجام شده نتایج آن تطابق خوبی را با داده‌های لایسیمتری، تشت تبخیر و تبخیر و تعرق پتانسیل نشان داده بود میزان تبخیر و تعرق واقعی در دشت شهرکرد محاسبه گردید و سپس حساسیت تبخیر و تعرق محاسبه شده نسبت به پارامترهای کلیدی مدل در روزهای ژوئیه ۱۴۷، ۱۹۵ و ۲۹۱ در ۳۲ نقطه با تراکم پوشش گیاهی و تبخیر و تعرق مختلف بررسی گردید. با توجه به اهمیت و جایگاه الگوریتم سبال در بین مدل‌های موجود و با توجه به اینکه این مدل در پژوهش‌های زیادی مورد ارزیابی و واسنجی قرار گرفته است در مقاله حاضر در نهایت بعد از انجام تحلیل حساسیت مدل بیلان انرژی پیشنهادی، نتایج حاصله با نتایج تحلیل حساسیت مدل سبال که توسط Khavarian Nahzak (۲۰۰۴) انجام یافته بود مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

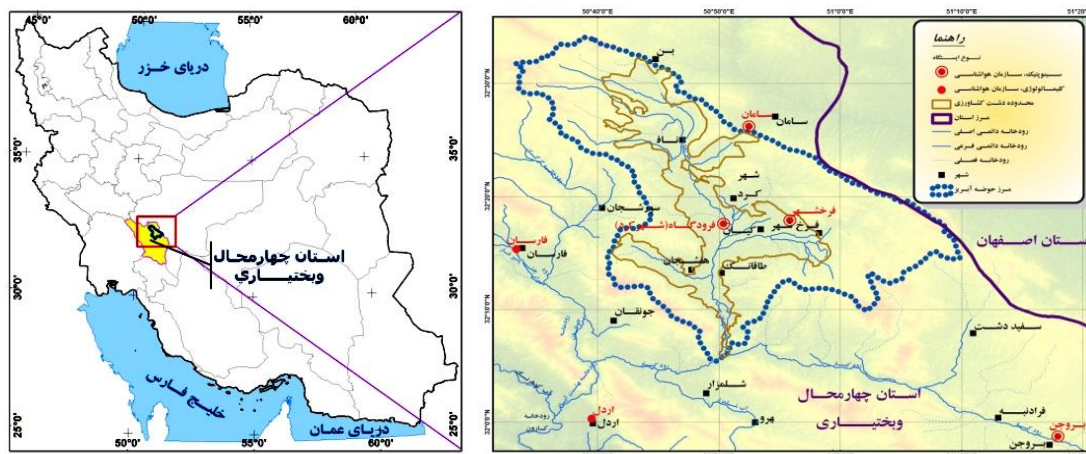
## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- معرفی محدوده مطالعاتی

ناحیه مورد مطالعه در استان چهارمحال و بختیاری و در جنوب غربی اصفهان قرار داشته و شامل دشت شهرکرد می‌باشد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود این دشت با امتداد شمال غرب جنوب شرق در فاصله بین ۳۲ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی قرار دارد.

### ۲-۲- داده‌های مورد استفاده

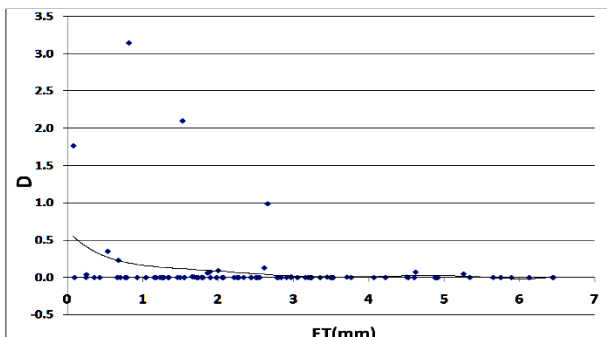
الف) داده‌ها و اطلاعات زمینی - ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در این مطالعات شامل ایستگاه خودکار هواشناسی فرخشهر و



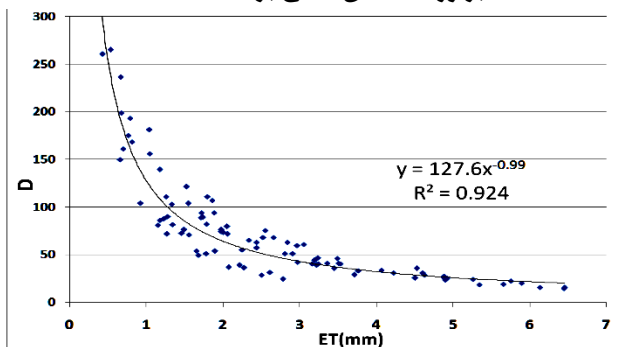
شکل ۱- موقعیت دشت کشاورزی شهرکرد در محدوده مطالعاتی و ایران



حساسیت بالا و با افزایش تبخیر (بالتر از ۵ میلیمتر در روز) حساسیت متوسطی را نسبت به آلبیدو دارد.



شکل ۲- حساسیت تبخیر (ET) به ۵۰ درصد افزایش در برآورد شاخص سطح برگ-LAI



شکل ۳- حساسیت تبخیر (ET) به ۵۰ درصد افزایش در برآورد آلبیدو سطحی-α

۳-۳- بررسی حساسیت به تابش موج کوتاه خورشیدی ( $R_s$ )  
 نمودار تحلیل حساسیت نسبت به تابش خورشیدی نیز که در شکل ۴ ارائه شده است نشان می دهد که تبخیر حساسیت بالایی را نسبت به تابش موج کوتاه خورشیدی بخصوص در نواحی با تبخیر پایین دارد و در نتیجه تابش موج کوتاه خورشیدی باید با دقت بالایی محاسبه شود. در بعضی از ایستگاه‌های هواشناسی کشور مقادیر تابش موج کوتاه خورشیدی در طول روز به صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری می‌شود اما گاهی اوقات متاسفانه مقادیر ثبت شده به دلایل مختلف از جمله خرابی دستگاه و عدم تمیز کردن آن چندان قابل اعتماد نمی‌باشند. راه دیگر استفاده از مدل‌های ریاضی است که در این مطالعات از Duffie & Beckman (۱۹۸۰) استفاده گردیده است.

۳-۴- بررسی حساسیت به دمای سطحی ( $T_s$ )  
 شکل ۵ نیز نشان می‌دهد که تبخیر حساسیت بالایی را نسبت به دمای سطحی بخصوص در نواحی با تبخیر پایین دارد و لذا در مدل پیشنهادی دمای سطحی باید با دقت بالایی محاسبه شود.

منظور مقایسه نتایج، قدر مطلق درصد اختلاف مقادیر هر یک از پارامترهای خروجی در دو حالت جدید نسبت به مقدار همان مؤلفه در شرایط مبنا با استفاده از رابطه ذیل محاسبه گردید. (Akbari, ۲۰۰۴).

$$D = |(M-L)/L| * 100 \quad (6)$$

$D$ : قدر مطلق اختلاف مقادیر هر یک از پارامترهای خروجی نسبت به مقدار همان مؤلفه در شرایط مبنا

$M$ : مقدار بدست آمده پس از تغییر پارامتر مورد نظر

$L$ : مقدار بدست آمده در شرایط مبنا

سپس به شرح ذیل طبقه بندی حساسیت پارامترهای ورودی انجام گرفت (به نقل از (Khavarian Nahzak (۲۰۰۴):

- $D = 0$  حساسیت ندارد
- $0 < D < 5$  حساسیت کم
- $5 < D < 25$  حساسیت متوسط
- $D > 25$  حساسیت زیاد

### ۳- نتایج و تحلیل نتایج

به منظور تحلیل حساسیت تبخیر و تعرق محاسبه شده با استفاده از مدل بیلان انرژی پیشنهادی نسبت به پارامترهای کلیدی موجود در این مدل (نظیر  $\alpha$ ,  $LAI$ ,  $R_s$ ,  $T_s$ ,  $T_a$ ,  $U$ ,  $Rel.H$ , و  $Sun.H$ ) بر روی سه تصویر در تاریخ‌های منتخب، ۳۲ نقطه در مناطق دارای تراکم پوشش گیاهی و تبخیر و تعرق متفاوت جانمایی گردید و با توجه به مشابه بودن حساسیت تبخیر و تعرق نسبت به افزایش و کاهش هر یک از پارامترهای ذکر شده، تنها حساسیت نسبت به افزایش این پارامترها بررسی گردید و نتایج حاصله برای هر پارامتر در نمودار جداگانه‌ای ارائه گردید.

#### ۳-۱- بررسی حساسیت به شاخص سطح برگ (LAI)

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در نواحی با تبخیر و تعرق کمتر از ۳ میلیمتر در روز دارای حساسیت خیلی کمی نسبت به افزایش ۵۰ درصدی در شاخص سطح برگ می‌باشند اما در مجموع دارای حساسیت کمی نسبت به  $LAI$  می‌باشد این نشان می‌دهد که در صورتیکه اندازه‌گیری دقیق  $LAI$  جهت کالیبره کردن روابط موجود نباشد از روابط تجربی می‌توان نسبت به محاسبه آن اقدام کرد.

#### ۳-۲- بررسی حساسیت به آلبیدو سطحی ( $\alpha$ )

بررسی نمودار تحلیل حساسیت آلبیدو سطحی نشان می دهد (شکل ۳) تبخیر در نواحی با تبخیر و تعرق کمتر از ۵ میلیمتر در روز

۳-۵- بررسی حساسیت به دمای هوا ( $T_a$ )

در شکل ۶ تبخیر حساسیت بالایی را نسبت به دمای هوا بخصوص در نواحی با تبخیر پایین دارد و این نشان می‌دهد دمای هوا باید با دقت بالایی محاسبه شود.

۳-۶- بررسی حساسیت به سرعت باد ( $U$ )

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود تبخیر در نواحی با تبخیر و تعرق کمتر از ۰.۵ میلی‌متر در روز حساسیت متوسطی را نسبت به افزایش سرعت باد نشان می‌دهد در فاصله ۰.۵ تا ۳ میلی‌متر در روز حساسیت کم و با افزایش تبخیر این حساسیت ناچیز می‌شود. با توجه به تغییرات لحظه‌ای سرعت باد و با توجه به اینکه معمولاً در ایستگاه‌های سینوپتیک حداکثر ۸ رکورد سرعت باد در طی روز در اختیار کاربران قرار می‌گیرد بهتر است به منظور افزایش دقت داده‌های سرعت باد جهت استفاده در مدل از گراف‌های باد و یا ایستگاه‌های خودکار هواشناسی که در دوره‌های زمانی کوتاه‌تر اقدام به ثبت داده‌های باد می‌نمایند استفاده شود.

۳-۷- بررسی حساسیت به رطوبت نسبی ( $Rel. H.$ )

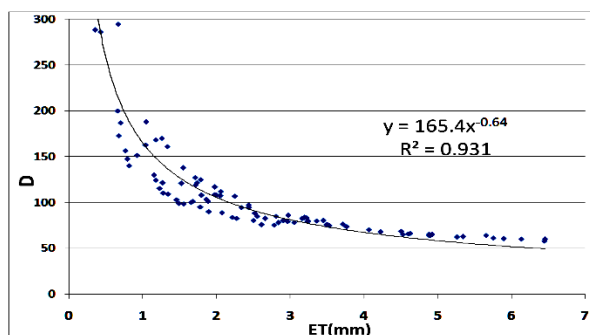
بر اساس شکل ۸ تبخیر در نواحی با تبخیر و تعرق کمتر از ۲ میلی‌متر در روز حساسیت متوسطی را نسبت به افزایش رطوبت نسبی نشان می‌دهد و با کاهش تبخیر این حساسیت افزایش می‌یابد و در محدوده دارای حساسیت بالا قرار می‌گیرد. این حساسیت در مناطق دارای تبخیر کمتر از یک میلی‌متر به شدت افزایش می‌یابد. لذا رطوبت نسبی هوا باید با دقت بالایی محاسبه شود.

۳-۸- بررسی حساسیت به ساعات آفتابی ( $Sun. H.$ )

همانطور که در شکل ۹ نیز ارائه شده است تبخیر حساسیت بالایی را نسبت به ساعات آفتابی بخصوص در نواحی با تبخیر پایین دارد و این نشان می‌دهد ساعات آفتابی باید با دقت بالایی محاسبه شود.

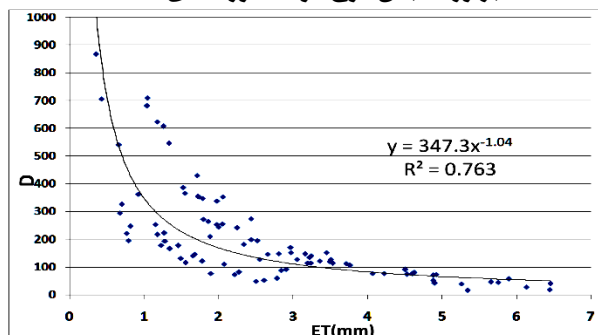
۴- نتیجه گیری

همان‌طور که قبلاً عنوان شد در این مطالعات برای انجام تحلیل حساسیت از روش Lane et al. (۱۹۹۴) استفاده شد. در جدول ۱ نتایج حساسیت تبخیر و تعرق محاسبه شده به افزایش ۵۰ درصدی هر یک از پارامترها ارائه گردیده است.



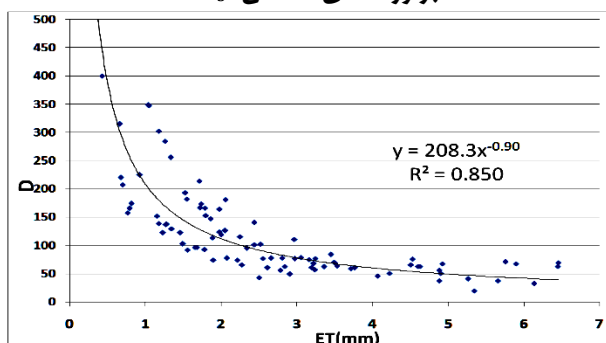
شکل ۴- حساسیت تبخیر (ET) به ۵۰ درصد افزایش در

برآورد تابش موج کوتاه خورشیدی- $R_s$



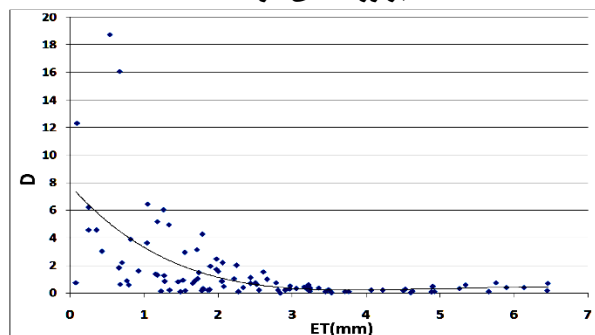
شکل ۵- حساسیت تبخیر (ET) به ۵۰ درصد افزایش در

برآورد دمای سطحی- $T_s$



شکل ۶- حساسیت تبخیر (ET) به ۵۰ درصد افزایش در

برآورد دمای هوا- $T_a$



شکل ۷- حساسیت تبخیر (ET) به ۵۰ درصد افزایش در

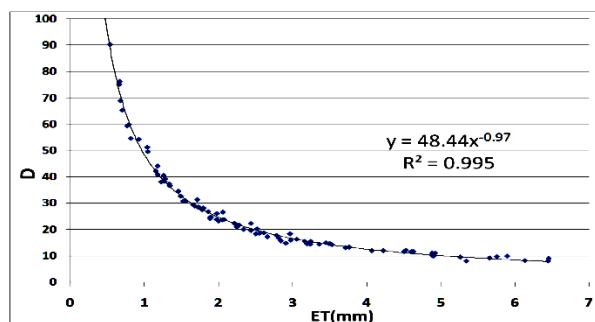
برآورد سرعت باد- $U$



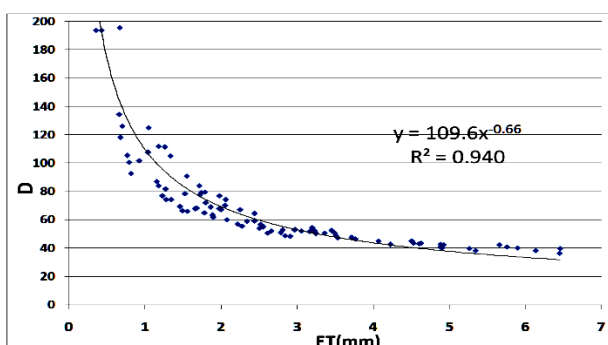
دارای حساسیت متوسط و با کاهش هر چه بیشتر میزان تبخیر و تعرق از ارقام یاد شده میزان حساسیت آنها افزایش یافته و در محدوده حساسیت زیاد قرار می‌گیرند. در این بین کمترین حساسیت محاسبه شده مربوط به سرعت باد و علی‌الخصوص شاخص سطح برگ بود.

در مطالعه تحلیل حساسیت (۲۰۰۴) Khavarian Nahzak بیشترین حساسیت نسبت به تابش موج کوتاه خورشیدی، اختلاف دمای نزدیک سطح ( $dt$ ) و تبخیر و تعرق مرجع بود. آلبیدوی سطحی دارای حساسیت کم تا زیاد و شاخص سطح برگ و دمای سطح زمین دارای حساسیت کم و در مناطق با تبخیر پایین حساسیت آنها متوسط ارزیابی شده بود. با توجه به تفاوت‌های مدل سبال با مدل پیشنهادی، پارامترهای ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و سرعت باد در مدل سبال مورد بررسی قرار نگرفته بود و با توجه به عدم نیاز به اندازه‌گیری  $dt$  و تبخیر و تعرق مرجع در مدل پیشنهادی، این پارامترها تحلیل حساسیت نشدند.

نتایج فوق نشان می‌دهد که در خصوص حساسیت پارامترهای تابش موج کوتاه خورشیدی، آلبیدو و شاخص سطح برگ هم‌خوانی یا هم پوشانی قابل توجهی در بین دو مدل وجود دارد.  $dt$  محاسبه شده در مدل سبال در واقع نشان‌دهنده اختلاف دمای سطح با دمای هوا می‌باشد با توجه به حساسیت بالای پارامتر  $dt$  در مدل سبال می‌توان عنوان نمود که هر گونه کاهش یا افزایش در دمای سطح یا هوا منجر به افزایش یا کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار  $dt$  و به تبع آن در مقدار تبخیر و تعرق محاسبه شده می‌شود که حساسیت بالای مدل پیشنهادی به تغییرات دمای هوا و سطح این موضوع را تأیید می‌نماید و حساسیت پایین مدل سبال به دمای سطح زمین کمی مبهم به نظر می‌رسد و نیازمند بررسی‌های بیشتری می‌باشد.



شکل ۸- حساسیت تبخیر (ET) به ۵۰ درصد افزایش در برآورد رطوبت نسبی- Rel. H.



شکل ۹- حساسیت تبخیر (ET) به ۵۰ درصد افزایش در برآورد ساعات آفتابی- Sun. H.

همانگونه که در جدول نیز آورده شده است تبخیر و تعرق بیشترین حساسیت را به نسبت به کاهش و افزایش پارامترهای تابش طول موج کوتاه خورشیدی، دمای سطح زمین، دمای هوا و ساعات آفتابی از خود نشان می‌دهد لذا به منظور محاسبه و واسنجی آنها باید بیشترین دقت ممکن صورت گیرد. بعد از این داده‌ها، داده‌های آلبیدو سطحی و رطوبت نسبی در درجه دوم اهمیت قرار داشته و در صورتیکه میزان تبخیر و تعرق به ترتیب بیشتر از ۲ و ۵ میلی‌متر باشد

جدول ۱- حساسیت تبخیر و تعرق محاسبه شده به افزایش ۵۰ درصدی هر یک از پارامترها

پارامتر	حساسیت ندارد	حساسیت کم	حساسیت متوسط	حساسیت زیاد
شاخص سطح برگ	$ET > 3$	$ET < 3$		
آلبیدو سطحی			$ET > 0.5$	$ET < 0.5$
تابش موج کوتاه خورشیدی				*
دمای سطح زمین				*
دمای هوا				*
سرعت باد	$ET > 3$	$0.5 < ET < 3$	$ET < 0.5$	
رطوبت نسبی			$ET > 2$	$ET < 2$
ساعات آفتابی				*

\* حساسیت بالا بخصوص در نواحی با تبخیر پایین - تبخیر به mm

روابط تجربی می‌توان نسبت به محاسبه آن اقدام کرد و در این خصوص نیاز به انجام مطالعه جدید احساس نمی‌شود.

## ب - پیشنهاد اصلاح ایستگاه‌های اندازه‌گیری داده‌های هواشناسی

۱- به منظور واسنجی لایه دمای سطح زمین و دمای هوا بدست آمده از مطالعات سنجش از دور، وجود داده‌های زمینی دمای سطوح پوشش گیاهی و خاکی به منظور مدل کردن و محاسبه دمای هوای سطوح مختلف کاربری اراضی آنهم همزمان با عبور ماهواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا پیشنهاد می‌گردد که ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی ادوات و تجهیزات اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی در داخل مزرعه و در شرایط مرجع کار گذاشته شود.

۲- رطوبت نسبی با استفاده از رطوبت سنج‌ها اندازه‌گیری می‌شود. در ایستگاه‌های مکانیکی مستقر در مزرعه، به طور عمده، از رطوبت سنج‌های مویی استفاده می‌شود. با توجه به حساسیت متوسط تا بالای مدل به رطوبت نسبی پیشنهاد می‌شود از رطوبت‌سنج‌های خازنی دی‌الکتریک استفاده شود دقت اندازه‌گیری با این وسایل می‌تواند بیشتر از رطوبت‌سنج‌های مویی باشد.

۳- اکثر مدل‌های تبخیر و تعرق از سرعت باد دو متری در محاسبات استفاده می‌نمایند. با توجه به تقریب‌ها و فرضیاتی که جهت محاسبه باد در ارتفاع دومتری با استفاده از داده‌های ارتفاع ۱۰ متری وجود دارد پیشنهاد می‌شود که در کنار اندازه‌گیری سرعت باد ۱۰ متری، سرعت باد دومتری نیز در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری شود.

۴- در ایستگاه‌های سینوپتیک و کليما تولوژی سرعت باد در بسیاری از رکوردها صفر ثبت می‌شود. که ناشی از حساسیت کم آنها به سرعت‌های پایین باد می‌باشد در مقابل ایستگاه‌های خودکار با توجه ساختار الکترونیکی که دارند حساسیت مناسبی را برای جهت برداشت سرعت‌های پایین باد دارند لذا پیشنهاد می‌شود از داده‌های باد اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه‌های خودکار هواشناسی استفاده گردد.

## ۵- تشکر

بدینوسیله از کلیه کسانی که در انجام این مطالعه همکاری داشتند علی‌الخصوص جناب آقای مهندس عبدالعلی قبادی که در مراحل مختلف مطالعه راهنمایی و کمک نمودند، از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری به جهت در

همانگونه که عنوان شد پارامترهای ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و سرعت باد در مدل سبال تحلیل حساسیت نشده بودند. پارامترهای مذکور به همراه دمای هوا مهمترین متغیرهای ورودی جهت محاسبه تبخیر و تعرق مرجع می‌باشند. از آنجائیکه از یک سو برابند حساسیت مدل پیشنهادی نسبت به پارامترهای ذکر شده و از سوی دیگر حساسیت مدل سبال نسبت به تبخیر و تعرق مرجع بالا می‌باشند می‌توان عنوان نمود که نتایج تحلیل حساسیت دو مدل نزدیک به هم می‌باشد.

متأسفانه در مسیر انجام مطالعه با توجه به کمیت و کیفیت داده‌های برداشت شده از ایستگاه‌های هواشناسی و هواشناسی کشاورزی موجود در منطقه و کشور مشکلات عدیده‌ای در راستای تهیه و واسنجی هر یک از ورودی‌های مدل پیش آمد. با لحاظ نمودن این مشکلات و با توجه به تحلیل حساسیت انجام شده، به منظور استفاده از داده‌های دقیقتر در مدل بیلان انرژی و افزایش هر بیشتر دقت تبخیر و تعرق محاسبه شده راه کارهای ذیل پیشنهاد می‌گردد:

## الف - پیشنهاد انجام مطالعات جدید

۱- با توجه به حساسیت زیاد مدل به پارامترهای دمای هوا و دمای سطح زمین و نیز اهمیت گرادبان دمای هوا بین ارتفاع دو متری و سطح پیشنهاد می‌شود که به منظور واسنجی دقیقتر داده‌های ماهواره‌ای رابطه دمای هوا و دمای سطح در کاربری‌های مختلف مورد مطالعه و بررسی دقیق قرار گیرد.

۲- با توجه به اهمیت داده‌های تابش طول موج کوتاه خورشیدی و حساسیت بالای آن در مدل، پیشنهاد می‌شود مقادیر بدست آمده از رابطه (Duffie and Beckman ۱۹۸۰) با استفاده از مقادیر تابش موج کوتاه خورشیدی که به صورت مستقیم در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود واسنجی شود.

۳- با توجه به حساسیت متوسط تا زیاد مدل نسبت به آلبیدوی سطحی، جهت واسنجی آن می‌توان از مدل‌های اصلاح اتمسفری نظیر Modtran استفاده کرد یا از الگوریتم‌های جدیدتر و دقیق‌تر استفاده نمود.

۴- همانگونه که در قسمت نتایج نیز عنوان شد حساسیت کمی نسبت به تغییرات LAI وجود دارد و این نشان می‌دهد که در صورتیکه اندازه‌گیری دقیق LAI جهت کالیبره کردن روابط موجود نباشد از

- Bastiaanssen WGM, Menenti M, Feddes RA, Holtslag AAM (۱۹۹۸) A remote sensing surface energy balance algorithm for land SEBAL. ۱. Formulation. *Journal of Hydrology* ۲۱۲: ۱۹۸-۲۱۲.
- Bastiaanssen WGM, Pelgrum H, Wang J, Ma Y, Moreno JF, Roerink GJ, Van der Wal T (۱۹۹۸) A remote sensing surface energy balance algorithm for land SEBAL.: Part ۲: Validation. *Journal of Hydrology* ۲۱۲: ۲۱۳-۲۲۹.
- Bastiaanssen WG, Ahmad MUD, Chemin Y (۲۰۰۲) Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. *Water Resources Research* ۳۸(۱۲): ۹-۱۱.
- Brunel JP (۱۹۸۹) Estimation of sensible heat flux from measurements of surface radiative temperature and air temperature at two meters: Application to determine actual evaporation rate. *Agricultural and Forest Meteorology* ۴۶: ۱۷۹-۱۹۱
- Businger JA (۱۹۸۸) A Note on the Businger-Dyer Profiles. *Boundary-Layer Meteorol* ۴۲: ۱۴۵-۱۵۱.
- Businger JA, Wyngaard JC, Izumi Y, Bradley EF (۱۹۷۱) Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.* ۲۸:۱۸۱-۱۸۹.
- Duffie JA, Beckman WA (۱۹۸۰) *Solar engineering of thermal processes* (Vol. ۳). New York etc.: Wiley. ۹۱۰-P.
- Daneshkar Arasteh P, Tajrishy M (۲۰۰۶) Estimation of free water evaporation from hamun wetlands using satellite imagery. *Proceedings of the AECRIS ۲۰۰۶ Conference, Preston, UK*, ۱۳۱-۱۳۵.
- Emadzade M, Tajrishy M, Daneshkar Arasteh P (۲۰۱۰) Estimation of evapotranspiration and efficiency in basin scale using remote sensing. ۵th National Congress on Civil Engineering, Mashad, Iran, May ۴-۶th (In Persian).
- Farah H, Bastiaanssen WG (۲۰۰۱) Impact of spatial variations of land surface parameters on regional evaporation: a case study with remote sensing data, *Hydrological Processes* ۱۵(۹): ۱۵۸۵-۱۶۰۷.
- Hafeez MM, Chemin Y, Van De Giesen N, Bouman B (۲۰۰۲, July) Field evapotranspiration estimation in central Luzon, Philippines using different sensors: Landsat ۷ ETM+, Terra Modis and Aster. In *ISPRS/CIG conference* ۱۲(۸).
- اختیار قراردادن داده‌های لایسیمیتری مورد نیاز و از اداره کل هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری و سازمان هواشناسی کشور به جهت در اختیار قرار دادن آمار و اطلاعات هواشناسی تقدیر و تشکر می‌نماییم.
- پی‌نوشت‌ها**
- ۱-Vegetation Index/Temperature Trapezoid
  - ۲-SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm)
  - ۳-Reference ET Fraction
  - ۴-Surface Emissivity
  - ۵-Soil Adjusted Vegetation Index
  - ۶-Modified Soil Adjusted Vegetation Index
  - ۷-Air Emissivity
  - ۸-Sensible Heat
  - ۹-Net Radiation
  - ۱۰-Soil heat flux
  - ۱۱- Latent heat flux
- ۶- مراجع**
- Akbari M (۲۰۰۴) Improvement of irrigation water management by combining satellite and field data and using SWAP simulation model. Ph.D Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran (In Persian).
- Akbari M, Toomanian N, Droogers P, Bastiaanssen W, Gieske A (۲۰۰۷) Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran. using NOAA satellite imagery. *Agricultural Water Management* ۸۸۱: ۹۹-۱۰۹.
- Alizadeh A (۲۰۰۵) Principle of applied hydrology. Imam Reza University Press, Mashad, ۸۱۵P (In Persian).
- Allen RG, Bastiaanssen W, Tasumi M, Morse A (۲۰۰۱) July. Evapotranspiration on the watershed scale using the SEBAL model and Landsat images. In *ASAE Meeting Presentation paper No. ۰۱-۲۲۲۴*.
- Allen RG, Tasumi M, Trezza R, Waters R, Bastiaanssen W (۲۰۰۲) SEBAL Surface energy balance algorithms for land. *Advance Training and Users Manual-Idaho Implementation, version. ۱*.
- Bastiaanssen WGM (۱۹۹۵) Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. *Land Bouwuniversiteit Wageningen*, p. ۲۷۳.
- Bastiaanssen WGM, Chandrapala L (۲۰۰۳) Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. *Agricultural Water Management* ۵۸۲: ۱۷۱-۱۹۲.

- systems. Proceedings of the Royal Society. Series A. ۴۴۷: ۴۹-۶۳.
- Mobasheri MR, Khavarian H (۲۰۰۴) Analysis of satellite based methods to determine evapotranspiration. Journal of Geographical Sciences ۳-۴ (۳) (In Persian).
- Mobasheri MR, Khavarian H, Ziaeiian P, Kamaly, Gholamali (۲۰۰۴) Evapo-transpiration assessment using Terra/MODIS images in the Gorgan general district. Journal of Spatial Planning ۱۱(۱): ۲۱-۱۴۲ (In Persian).
- Monin AS, and Yaglom AM (۱۹۷۱) Statistical fluid mechanics: mechanics of turbulence. The MIT Press. Cambridge. MA, ۷۶۹ p.
- Yang X, Qiming Z, Melville M (۱۹۹۷) Estimating local sugarcane evapotranspiration using Landsat TM image and a VITT concept. International Journal of Remote Sensing ۱۸(۲):۴۵۳-۴۵۹.
- Jackson RD, Reginato RJ, Idso SB (۱۹۷۷) Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. Water Resources Research ۱۳(۳):۶۵۱-۶۵۶.
- Kaviani A, Sohrabi T, Arasteh P (۲۰۱۱) Evapotranspiration and water productivity estimation using SEBAL algorithm and comparison with lysimeter data. Iranian Journal of Irrigation and Drainage ۵(۲):۱۶۵-۱۷۵ (In Persian).
- Khavarian Nahzak H (۲۰۰۴) Estimation of evaporation using remote sensing, M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran (In Persian).
- Kheirkhah Zarkesh M, Mahboobian A (۲۰۱۰) Evaluation the SEBAL model algorithm efficiency for evaporation estimating. M.Sc. Thesis. Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran (In Persian).
- Lane SN, Richards KS, Chandler JH (۱۹۹۴) Distributed sensitivity analysis in modelling environmental