



سنگش از دور & GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال چهارم، شماره اول، بهار ۱۳۹۱
Vol.4, No.1, Spring 2012

۸۱-۹۶

مقایسه مدل‌های سنجش از دور تک‌منبعی و دومنبعی شار انرژی در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دشت تبریز

محمدحسین باقری هارونی^۱، صالح ارشد^۲، ابوالفضل مجنون^۳، سعید مرید^{۴*}

۱. دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان

۳. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه تبریز

۴. استاد گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۵/۲۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۸/۱۷

چکیده

تبخیر و تعرق واقعی از مهم‌ترین اجزای بیلان آب است که برآورد آن پیچیدگی‌های خاصی دارد. امروزه استفاده از فناوری سنجش از دور، با توجه به امکان برآورد مکانی اطلاعات و حداقل ساختن داده‌های هواشناسی، کاربرد وسیعی در این زمینه یافته است. بدین‌منظور مدل‌ها و روش‌های متفاوتی برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی با این فناوری شرح و بسط یافته که در میان آنها مطالعات محدودی در خصوص مقایسه و ارزیابی آنها گزارش گردیده است. در پژوهش حاضر، سه دسته کلی این روش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، که عبارت‌اند از: (۱) مدل‌های تک‌منبعی SEBAL و METRIC که در آنها خاک و پوشش گیاهی به عنوان منبع واحدی در نظر گرفته می‌شوند که استفاده‌شان نیز رو به گسترش است؛ (۲) مدل‌های دومنبعی TSEB و STSEB که خاک و پوشش گیاهی را به صورت دو جزء جداگانه در توازن انرژی سطحی به‌کار می‌گیرند؛ و (۳) مدل تک‌منبعی SETEB که ترکیبی از مدل‌های SEBAL و TSEB است. به‌منظور پیاده‌سازی این پنج مدل، داده‌های سنجش از دور سنجنده MODIS در ۶ روز از ژوئیه ۲۰۱۱ تهیه شد و برای ارزیابی و مقایسه آنها، مقادیر تبخیر و تعرق لایسیمتر واقع در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تبریز نیز برای روزهای گذر ماهواره اندازه‌گیری گردید. نتایج تحقیق حاکی از عملکرد منطقی و مورد قبول کلی مدل‌ها دارد. ولی در مقام مقایسه، SETEB با خطای مطلق ۸/۷۳ و TSEB با خطای مطلق ۲۷/۹۴ به ترتیب بهترین و بدترین عملکرد را داشتند. مدل‌های تک‌منبعی SEBAL و METRIC با اینکه از فرضیات پیچیده مدل‌های دومنبعی بهره‌ای نگرفته بودند، نتایج مناسبی ارائه کردند و برای کار در سطوح بالا نیز توجیه دارند. همچنین مدل ترکیبی SETEB با وضعیتی پذیرفتنی روبه‌رو بود که برای استفاده از مدل‌های دومنبعی در مقیاس‌های وسیع مناسب‌تر به نظر می‌رسد.

کلیدواژه‌ها: تبخیر و تعرق واقعی، سنجش از دور، مدل‌های شار انرژی، MODIS.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی، مرکز مدیریت منابع آب

۱- مقدمه

مدل‌سازی کمتری دارند ولی در عوض مدل‌های دومنبعی با توجه به مدل‌سازی مجزای خاک و پوشش گیاهی، به واقعیت نزدیک‌ترند. از نمونه مدل‌های مطرح در زمینه تک‌منبعی می‌توان به مدل‌های EBAL (Bastiaanssen et al., 1998, Bastiaanssen, 2000) و در زمینه دومنبعی به مدل‌های TSEB (Norman et al., 1995, Kustas and Norman, 1997) و STSEB (Su, 2002) METRIC (Allen et al., 2007) و (Sánchez et al., 2008) اشاره کرد. به تازگی از ترکیب دو مدل SEBAL و TSEB یک مدل دومنبعی ساخته و پرداخته شده است (Yao et al., 2010) که در این تحقیق به اختصار^۳ SETEB نامیده می‌شود. French و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از تصاویر ASTER و مقایسه مقادیر مشاهداتی با نتایج حاصل از مدل‌های SEBAL و TSEB به این نتیجه رسیدند که هر دو مدل در زمینه برآورد مقادیر اجزای شار انرژی قوی هستند و می‌توان از خطای سیستماتیک آنها در مدل‌سازی صرف‌نظر کرد. به‌طور کلی این پژوهشگران در اراضی با پراکندگی پوشش گیاهی، مدل TSEB را پیشنهاد کردند. نوع تصاویر و قدرت تفکیک^۴ آنها نیز در برآورد تبخیر و تعرق در این روش‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

در این مورد به منظور مقایسه مدل‌های تک‌منبعی و دومنبعی، در بررسی‌ای با استفاده از تصاویر TIMS^۵ و TMS^۶ با قدرت تفکیک مکانی ۱۲ متر، نتایج تقریباً یکسانی در دو مدل TSEB و SEBAL مشاهده شد (Timmermans et al., 2007). حال آنکه در تحقیق دیگر برای دو مدل مذکور با تصاویر ASTER، عملکرد بهتر مدل SEBAL گزارش گردید (Wang and Sun, 2005). در مقایسه مدل‌های ذکر شده با مدل رطوبتی SWAP نیز عملکرد مشابهی میان آنها گزارش گردید

تبخیر و تعرق واقعی، از مهم‌ترین اجزای چرخه هیدرولوژی و بیلان به‌شمار می‌آید که اندازه‌گیری مستقیم آن مستلزم هزینه و دقت بالایی است (Kondo and Ishida, 1997, Allen et al., 1998). تخمین میزان تبخیر و تعرق بر مبنای روابط تجربی، همواره مورد توجه بوده است. مبنای اکثر روش‌های ارائه‌شده، روابط بین پارامترهای هواشناسی است که کمبود و یا نقصان‌شان، استفاده از این روش‌ها را در عمل با محدودیت روبه‌رو می‌کند (Ayenew, 2003). از سوی دیگر، این اطلاعات، نقطه‌ای و مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی است و برآورد منطقه‌ای آن با استفاده از روش‌های آماری دشواری دیگری است که آن هم عدم قطعیت‌های مربوط به خود را دارد. در چند دهه اخیر، مطالعات زیادی در زمینه برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از فناوری سنجش از دور صورت گرفته است (Anderson et al., Olioso et al., 1999, Mauser and Schadlich, 1998, Diak et al., 2008, 2007). به‌طور کلی این روش‌ها، به دو دسته مدل‌های تک‌منبعی^۱ و دومنبعی^۲ تقسیم می‌شوند. مدل‌های تک‌منبعی، مجموعه خاک و گیاه را به عنوان منبعی واحد به نام «برگ بزرگ» در نظر می‌گیرند (Nishida et al., 2003) و تنها از یک مقاومت آبرودینامیکی در فرایند انتقال آب - گرما استفاده می‌کنند. در این مدل‌ها فرض می‌شود که تمامی سطح، تحت تأثیر دما و رطوبت یکسان قرار دارد. حال آن که مدل‌های دومنبعی ضمن تفکیک خاک و گیاه در سرتاسر فرآیند مدل‌سازی - برخلاف مدل‌های تک‌منبعی - از چندین مقاومت آبرودینامیکی مجزا برای خاک و گیاه استفاده می‌کنند (Huntingford et al., 2000). برای شرایطی که پوشش گیاهی کم و یکنواخت در منطقه غالب است، مدل‌های تک‌منبعی می‌توانند مناسب باشند اما در نواحی‌ای با پوشش گیاهی پراکنده، مدل‌های دومنبعی توصیه می‌شوند (Norman et al., 1995). بدین ترتیب مدل‌های تک‌منبعی با ساده‌سازی‌های اندرکنش بین لایه‌های خاک و پوشش گیاهی، حجم معادلات و روابط

1. Single-Source
2. Two-Source
3. SEBAL_TSEB
4. Resolution
5. Thermal Infrared Multi-spectral Scanner
6. Thematic Mapper Simulator

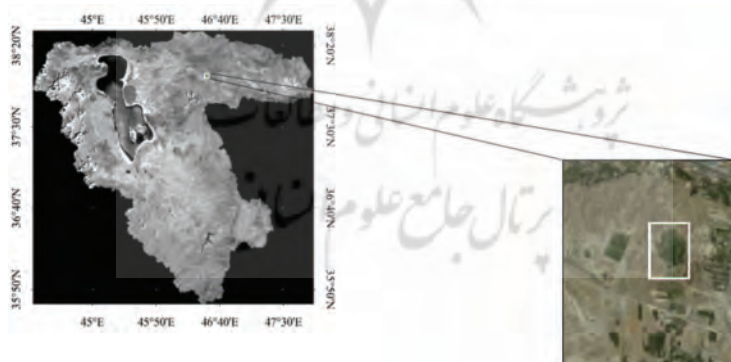
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی و داده‌ها

منطقه خلعت‌پوشان مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تبریز است که مجهز به لایسیمتر و دستگاه‌های اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی است. این ناحیه در قسمت شرقی حوضه ارومیه در مختصات جغرافیایی $38^{\circ} 26' 26''$ شمالی و $46^{\circ} 19' 19''$ شرقی و ارتفاع 1670 متری از سطح دریا واقع است. به منظور انجام این تحقیق از تصاویر سنجنده MODIS استفاده می‌گردد که با توجه به ابری بودن برخی از تصاویر، ۶ تصویر مربوط به روزهای ۴، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۵ و ۱۸ ژوئیه ۲۰۱۱ میلادی (روزهای ژوئیه^۳ ۱۸۵، ۱۸۹، ۱۹۱، ۱۹۲، ۱۹۶ و ۱۹۹) انتخاب گردید. تصاویر مورد نظر از وبسایت سازمان ملی هوانوردی و فضایی امریکا (NASA^۴) (<http://lance-modis.eosdis.nasa.gov>) تهیه و زمین مرجع شدند. کلیه تصاویر براساس سامانه جغرافیایی جهانی^۵ زمین مرجع گردیدند. شکل ۱ تصویر ماهواره‌ای منطقه مطالعاتی و محل قرارگیری لایسیمتر را نشان می‌دهد.

(Minacapilli et al., 2009). در پژوهش انجام شده، تصاویر ATM^۱ با قدرت تفکیک مکانی ۳ و ۱۵ متر مورد استفاده قرار گرفت. Choi و همکاران (۲۰۰۹) نیز با به‌کارگیری مدل‌های METRIC، TSEB و TIM^۲ برای تصاویر لندست، برتری مدل TSEB را در مقایسه با دو مدل دیگر نتیجه گرفتند.

همان‌گونه که ملاحظه شد، مقایسه مدل‌ها در تحقیقاتی که تاکنون صورت گرفته، محدود و برای تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا بوده است. اما در پژوهش حاضر تلاش شده است طیف بیشتری از این مدل‌ها شامل SEBAL، METRIC، TSEB و STSEB و مدل ترکیبی (تک‌منبعی - دومنبعی) SETEB با تصاویر با قدرت تفکیک مکانی پایین مورد ارزیابی قرار گیرند. تصاویر مورد استفاده، مربوط به سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ متر و ناحیه مطالعاتی نیز قسمت کوچکی از حوضه ارومیه موسوم به منطقه خلعت‌پوشان شهرستان تبریز است. به‌منظور مقایسه نتایج مدل‌ها با یکدیگر، در برآورد تبخیر و تعرق واقعی و بررسی دقت آنها از مقادیر اندازه‌گیری لایسیمتری دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز استفاده می‌شود.



شکل ۱. تصویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS از منطقه مطالعاتی و مزرعه محل نصب لایسیمتر

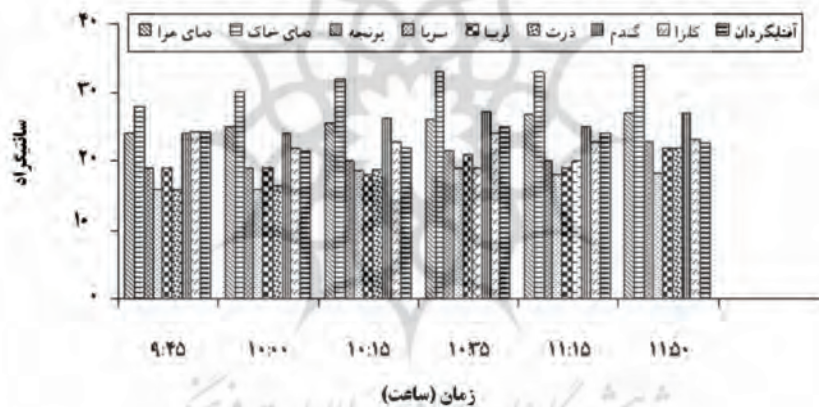
1. Airborne Thematic Mapper
2. Trapezoid Interpolation Model
3. Julian day
4. National Aeronautics and Space Administration
5. WGS

در شکل ۲ ارائه شده است. شرح بیشتر در مورد نحوه اندازه‌گیری‌های فوق را می‌توان در تحقیق باقری (۲۰۱۲) مشاهده کرد.

مقادیر متوسط دمای گیاهان برای سه روز ژوئیه ۱۸۹، ۱۹۱ و ۱۹۲، به همراه دمای هوا، دمای خاک و سرعت باد در جدول ۱ ارائه می‌گردد.

از مهم‌ترین داده‌های لازم برای مدل‌های تک‌منبعی، دمای سطح زمین (LST^1) و برای مدل‌های دومنبعی، دمای رادیومتریک (T_{rad}^2) است. ماهیت دمای سطح زمین و دمای رادیومتریک یکسان و کاربرد آن در مدل‌های تک‌منبعی و دومنبعی متفاوت است. یادآوری می‌گردد که منظور از دمای سطح زمین، دمای جنبشی سطح خاک و سطح پوشش گیاهی است.

مدل‌های برآورد شار انرژی اعم از دومنبعی و تک‌منبعی، به داده‌های هواشناسی نیاز دارند؛ بدین منظور داده‌های ساعتی ایستگاه سینوپتیک تبریز تهیه گردید. مدل دومنبعی STSEB به مقادیر اندازه‌گیری‌شده دمای خاک و پوشش گیاهی نیز نیاز دارد که برای سه روز ژوئیه ۱۸۹، ۱۹۱ و ۱۹۲ این مقادیر به همراه سرعت باد و دمای هوا اندازه‌گیری گردیده است. از آنجا که امکان اندازه‌گیری برای روزهای دیگر ژوئیه وجود ندارد، متوسط اختلاف دمای هوا با دماهای خاک و پوشش گیاهی در این سه روز برای دیگر روزها نیز فرض می‌گردد. مقادیر اندازه‌گیری‌شده دماهای گیاهان غالب منطقه مطالعاتی، دمای خاک (برای عمق صفر تا پنج سانتی‌متر) و دمای هوا برای روز ژوئیه ۱۹۲



شکل ۲. مقادیر اندازه‌گیری‌شده دمای گیاهان غالب منطقه، دماهای خاک و هوا برای روز ژوئیه ۱۹۲ در محدوده زمانی گذر ماهواره

جدول ۱. مقادیر سرعت باد و دماهای خاک، پوشش گیاهی و هوا برای سه روز ژوئیه ۱۸۹، ۱۹۱ و ۱۹۲ در لحظه گذر ماهواره

روز ژوئیه	دمای هوا (°C)	دمای خاک (°C)	متوسط دمای گیاهان (°C)	سرعت باد m/s
۱۸۹	۳۷	۴۴	۳۳	۲/۳
۱۹۱	۳۲/۵	۳۸	۲۹/۳	۱/۹
۱۹۲	۳۰	۳۵	۲۵/۶	۱/۹

1. Land Surface Temperature
2. Radimetric-Temperature

تصاویر ماهواره‌ای LST با قدرت تفکیک مکانی بالا استفاده گردید (Townshend and Justice, 1988). در پژوهش حاضر، دمای سطحی که از تصاویر سنجندهٔ مودیس با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر استخراج می‌شود بایستی به قدرت تفکیک مکانی بالاتر (حداقل ۲۵۰ متر)، معادل قدرت تفکیک شاخص پوشش گیاهی (NDVI^۲) زیرپیکسل^۳ گردد. برای این مورد از روش پیشنهادی کاستاس و همکاران (۲۰۰۳) استفاده می‌شود که در آن ابتدا از نقاط مختلف تصویر، مربعی از پیکسل‌های NDVI (۴×۴) که معادل یک پیکسل LST است انتخاب می‌شود و سپس با برقراری رابطه همبستگی بین NDVI و LST نظیر هم (رابطه ۱)، دمای سطحی با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر برآورد می‌گردد.

رابطه (۱)

$$T_{s_{250}} = -20/61NDVI + 315/9, R^2 = 0/82$$

با به‌کارگیری رابطه (۱)، دمای سطح زمین با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر از تصاویر NDVI به دست می‌آید. در شکل ۳ قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ و ۲۵۰ متر را می‌توان مشاهده کرد.

دمای مذکور در اصطلاح ترمودینامیکی به انرژی جنبشی مولکول‌های جسم اطلاق می‌شود. برای برآورد دمای سطح زمین، لازم است ابتدا دمای روشنایی^۱ برای باندهای حرارتی (به‌عنوان مثال برای سنجنده MODIS: باندهای ۳۱ و ۳۲) محاسبه شود. دمای روشنایی، دمای متناظر با انرژی تابشی دریافتی از سطح یک پدیده به‌وسیلهٔ سنجنده است. این دما به علت پدیده جذب و پخش در اتمسفر، کمتر از دما در سطح زمین است. دمای درخشندگی از مقادیر تابش طیفی باند حرارتی و به‌کارگیری معکوس رابطهٔ معروف پلانک، و دمای سطح زمین از دمای درخشندگی قابل محاسبه است (Noori et al., 2010, Bastiaanssen et al., 2002). در مدل‌های دومنبعی، دمای سطحی رادیومتریک نقش محوری در محاسبهٔ دمای خاک و دمای گیاه دارد (Kustas and Norman, 1999). اما در مواردی که تصویر دمای رادیومتریک در دسترس نباشد، می‌توان از تصویر دمای سطح زمین (LST) به عنوان جایگزین استفاده کرد (Kustas et al., 2003, Anderson, 2011). در ادامه به منظور ارزیابی دقیق تغییرات پوشش گیاهی و خاک، پیشنهاد می‌شود از



(ب)

(الف)

شکل ۳. تصاویر مربوط به دمای سطحی زمین با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر (الف) و قدرت تفکیک زیرپیکسل شدهٔ آن به ۲۵۰ متر (ب)

1. Brightness Temperature
2. Normalized Difference Vegetation Index
3. Subpixel

۲-۲-۲- مدل‌های برآورد شار انرژی

همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، در این تحقیق مدل‌های تک‌منبعی SEBAL و METRIC و مدل‌های دومنبعی TSEB و STSEB به همراه مدل ترکیبی (تک‌منبعی - دومنبعی) SETEB با یکدیگر مقایسه می‌شوند. به طور کلی تمامی مدل‌های برآورد اجزای شار انرژی براساس معادله توازن انرژی مطابق رابطه (۲) تبیین می‌شود.

رابطه (۲) $R_n = G + H + LET$ که در آن R_n تابش خالص (W/m^2)، G شار گرمای خاک (W/m^2)، H شار گرمای محسوس (W/m^2) و LET شار گرمای نهان (W/m^2) است. با محاسبه مقادیر G ، R_n و H می‌توان مقدار LET^1 را برآورد کرد. در ادامه به تفکیک اجزای رابطه (۲)، شباهت‌ها و اختلافات هر پنج مدل بررسی می‌گردد.

۲-۲-۱- شار تابش خالص

فرآیند محاسباتی R_n در هر پنج مدل تقریباً یکسان است و در آنها تابش خالص، اختلاف بین جریان تابش‌های فرودی و بازتابیده است و معیاری از مقدار انرژی موجود در سطح زمین به شمار می‌رود. تابش خالص براساس رابطه (۳) برآورد می‌گردد:

رابطه (۳)

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow}$$
 در رابطه (۳)، α آلبیدوی سطحی، $R_{S\downarrow}$ تابش موج کوتاه (۰/۳ تا ۳ میکرومتر) فرودی (W/m^2)، $R_{L\downarrow}$ تابش موج بلند (۳ تا ۱۰۰ میکرومتر) فرودی (W/m^2)، $R_{L\uparrow}$ تابش موج بلند بازتابیده (W/m^2)، و ε_0 گسیلمندی سطحی پهن باند است.

محاسبات شار تابش در همه مدل‌ها به جز METRIC همانند SEBAL است. از تفاوت‌های SEBAL و METRIC در مراحل محاسباتی R_n ، برآورد شفافیت جوی (τ_{sw}) است؛ که در هر دو مدل برای برآورد تابش فرودی موج کوتاه ($R_{S\downarrow}$) به کار می‌رود. شفافیت جوی به ترتیب در دو مدل با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

رابطه (۴)

$$\tau_{sw} = 0/75 + 2 \times 10^{-5} \times z$$

رابطه (۵)

$$\tau_{sw} = 0/35 + 0/627 \times \exp\left[\frac{-0/00146p}{k_t \cos \theta_{hor}} - 0/75 \left(\frac{w}{\cos \theta_{hor}}\right)^{0/4}\right]$$

در روابط فوق z ارتفاع ایستگاه هواشناسی، p فشار اتمسفر (kpa)، w آب قابل بارش (mm)، θ_{hor} زاویه زینت خورشیدی و k_t ضریب مه‌آلودگی است که بدون بعد است ($0 < K_t \leq 1$)؛ و مقدار $k_t = 1$ برای هوای تمیز و $k_t = 0/5$ برای هوای غباری و مه‌آلود در نظر گرفته می‌شود.

(Bastiaanssen et al., 2002, Allen et al., 1998)

۲-۲-۲- شار گرمای خاک

شار گرمای خاک (G) میزان انتقال گرما در داخل خاک و پوشش گیاهی در اثر هدایت مولکولی است که در هر پنج مدل به عنوان ضریبی (C_G) از تابش خالص (R_n) در نظر گرفته می‌شود:

رابطه (۶)

$$G = C_G R_n$$

ضریب C_G در مدل‌های مختلف متفاوت است. در SEBAL، این ضریب تابعی از دمای سطحی (Bastiaanssen et al, 2002) و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) است و مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

رابطه (۷)

$$C_G = \frac{T_s}{\alpha} \times [0/0032 \times \alpha + 0/0062 \times \alpha^2] \times [1 - 0/978 \times NDVI^4]$$

در این رابطه، T_s دمای سطحی بر حسب درجه سانتی‌گراد و α آلبیدوی سطحی است. برای METRIC، رابطه (۸) برای محاسبه ضریب فوق پیشنهاد شده است (Tasumi, 2003):

رابطه (۸) است. اندازه‌گیری یا برآورد دمای آیرودینامیک، در عمل غیرممکن و پیچیده است و لذا مدل‌های مختلف، الگوریتم‌های متفاوتی را برای برآورد اختلاف دمای هوا و آیرودینامیک (dT) به کار می‌برند. در SEBAL و METRIC، به منظور برآورد dT از فرایندی تکراری استفاده می‌شود که در آن رابطه‌ای رگرسیونی (رابطه ۱۱) برای دمای سطح زمین (T_s) و dT در دو پیکسل شاخص (سرد و گرم) برآورد می‌شود و سپس این رابطه در تمامی پیکسل‌های تصویر اعمال می‌گردد (Bastiaanssen et al., 1998).

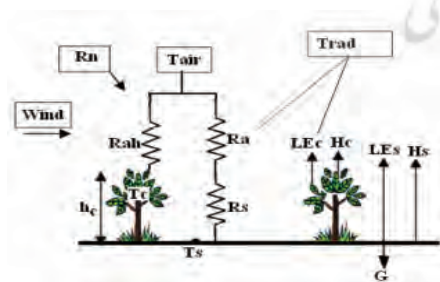
رابطه (۱۱)

$$dT = aT_s + b$$

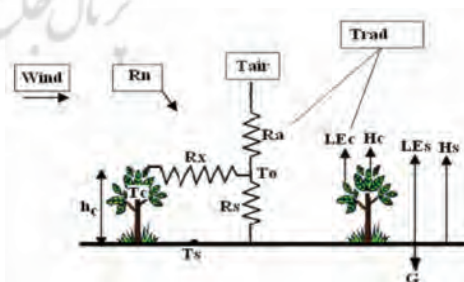
در مدل‌های دومنبعی، شار گرمای محسوس همانند تابش خالص و شار گرمای نهان به دو جزء خاک (H_s) و پوشش گیاهی (H_c) تفکیک می‌شود (Norman et al., 1995).

$$H = H_c + H_s \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

برحسب سازوکار انتقال گرما به هوا و اندرکنش مقاومت‌های گرمایی، مدل‌های دومنبعی به دو حالت موازی و سری تبادل انرژی می‌کنند، که الگوریتم محاسباتی شار گرمای محسوس نیز برای هر یک از این حالت‌ها متفاوت است. شکل ۴ نمایی از تبادل گرمای مدل‌های دومنبعی را برای دو حالت موازی و سری نشان می‌دهد.



ب



الف

شکل ۴. نمایی از تبادل گرما در مدل‌های دومنبعی برای دو حالت الف: سری، ب: موازی

رابطه (۸)

$$C_G = 0.05 + 0.18e^{-0.521LAI} \quad LAI \geq 0.5$$

$$C_G = 1/8(T_s - 273/15)/R_n + 0.084 \quad LAI < 0.5$$

در روابط فوق، LAI^1 شاخص سطح برگ و T_s دمای سطح زمین برحسب کلون است. در مدل‌های دومنبعی مانند TSEB و SETEB، شار گرمای خاک ضربی از تابش خالص جزء خاک ($R_{n,s}$) است (تابش کل ورودی (R_n) مجموعی از تابش خالص جزء خاک ($R_{n,s}$) و جزء پوشش گیاهی ($R_{n,c}$) است). در TSEB و SETEB، ضریب شار گرمای خاک، عددی بین ۰/۲ تا ۰/۵ را اختیار می‌کند که اکثر پژوهشگران آن را ۰/۳۵ در نظر می‌گیرند (Kustas and Norman, 1999). برای SETEB این ضریب معادل ۰/۱۵ در نظر گرفته می‌شود (Yao et al, 2010).

۳-۲-۲- شار گرمای محسوس

شار گرمای محسوس (H) میزان هدررفتی از انرژی (یا گرما) است که در اثر اختلاف دما به هوا منتقل می‌شود و برای آن رابطه (۱۰) برقرار است.

$$H = \rho_{air} \cdot C_p \cdot \frac{T_0 - T_{air}}{R_{ah}} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

در رابطه فوق T_0 دمای آیرودینامیک هوا، T_{air} دمای هوا (کلون)، ρ_{air} چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا ($J/kg/K$) و R_{ah} مقاومت آیرودینامیکی هوا

1. Leaf Area Index

رابطه (۱۵)

$$T_{rad}(\theta)^4 \approx f_c(\theta) T_C^4 + (1 - f_c(\theta)) T_s^4$$

در رابطه (۱۵) جزء پوشش گیاهی $f_c(\theta)$ مطابق Kustas and Norman, (۱۹۹۵) برآورد می‌گردد (۱۹۹۹):

رابطه (۱۶)

$$f_c(\theta) = 1 - \exp\left(\frac{-0.5 LAI}{\cos \theta}\right)$$

همان‌طور که بیان گردید از مشکلات مدل TSEB برآورد مقادیر شار گرمای محسوس خاک و پوشش گیاهی است. لذا در مدل ترکیبی SETEB به منظور رفع این پیچیدگی‌ها، ابتدا میزان شار گرمای محسوس کل از طریق الگوریتم SEBAL به دست می‌آید و سپس با استفاده از رابطه پریستلی - تیلور (Priestley and Taylor, 1972) و تخمین اولیه‌ای از میزان تعرق، می‌توان H_c و H_s را بدون داشتن دمای خاک و دمای پوشش گیاهی برآورد کرد. مدل STSEB کاملاً شبیه به مدل TSEB است، ولی در آن از مقادیر اندازه‌گیری شده دماهای خاک و پوشش گیاهی استفاده می‌شود (Sánchez et al., 2008).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقایسه نسبی مدل‌ها

به منظور مقایسه نتایج مدل‌ها، هر یک از آنها برای ۶ تصویر متفاوت (۶ روز مختلف) اجرا گردیده است. اما به دلیل حجم بالای خروجی‌ها، ابتدا فقط نتایج مربوط به تصویر روز ژوئیه ۱۹۲ (روز ۲۰۱۱/۷/۱۱) ارائه می‌گردد. از پارامترهای مورد نیاز پنج مدل، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص سطح برگ (LAI) و دمای سطح زمین است که به طور یکسان و با روابط مشابه برای هر ۵ مدل از تصاویر سنجنده MODIS استخراج شده است. شکل ۵ توزیع پراکندگی این پارامترها را برای روز ژوئیه ۱۹۲ در سطح منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد.

نورمن و همکاران (۱۹۹۵) ضمن ارائه الگوریتم‌های جداگانه برای حالت‌های سری و موازی، یکسان بودن نتایج آنها را گزارش دادند و از آنجا که مراحل محاسباتی در حالت موازی ساده‌تر است، در اغلب تحقیقات از آن استفاده می‌کنند (Timmermans et al., 2007). در این مقاله نیز حالت موازی روش TSEB به کار گرفته شده است و بدین منظور برای حالت موازی H_c و H_s به ترتیب از روابط زیر استفاده می‌گردد:

رابطه (۱۳)

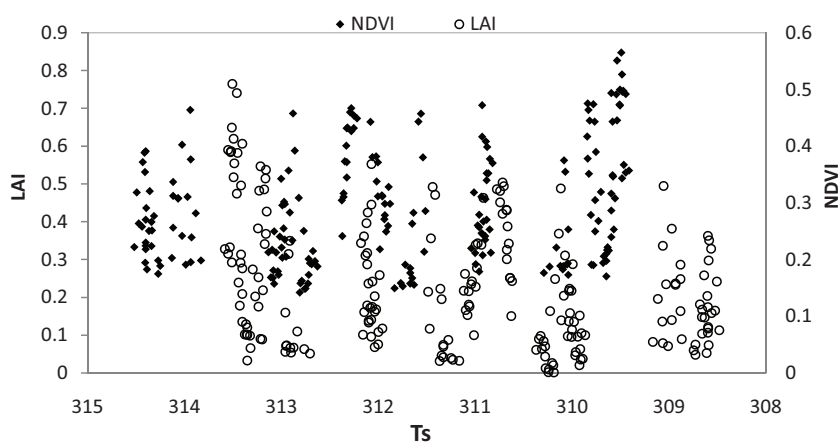
$$H_s = \rho_{air} \cdot C_p \cdot \frac{T_s - T_{air}}{R_s + R_a}$$

رابطه (۱۴)

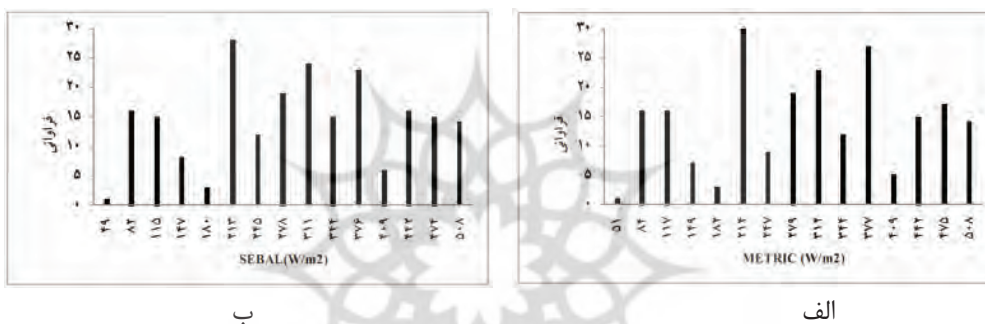
$$H_c = \rho_{air} \cdot C_p \cdot \frac{T_c - T_{air}}{R_{ah}}$$

در روابط فوق T_s ، T_c و T_{air} به ترتیب دماهای خاک، پوشش گیاهی و هوا بر حسب کلون هستند. R_s مقاومت آیرودینامیک به انتقال گرما از خاک، R_a مقاومت آیرودینامیک به انتقال گرما از هوای سطح بالای پوشش گیاهی (معادل $Z_{om} + d_0$ که در آن Z_{om} طول زبری مونتوم و d_0 ارتفاع جابه‌جایی است) و R_{ah} نیز مقاومت آیرودینامیک به انتقال هواست. R_{ah} در مدل TSEB از روابط و الگوریتم SEBAL (Bastiaanssen et al., 2002) استفاده می‌کند با این تفاوت که در مدل‌های تک‌منبعی $\ln(Z_{om}/Z_{oh})$ که با نام KB^{-1} از آنها یاد می‌شود، برابر با $2/3$ فرض می‌گردد. حال آنکه در TSEB این نسبت برابر با ۲ است (Timmermans et al., 2007). جزئیات محاسبه دیگر مقاومت‌های آیرودینامیکی مدل‌های دومنبعی (R_a و R_s) را سانچز و همکاران (۲۰۰۸) ارائه کرده‌اند. از مؤثرترین پارامترهای مجهول در روش‌های دومنبعی، دماهای خاک و پوشش گیاهی (T_c و T_s) است. به منظور برآورد این دو مقدار، تصویر رادیومتریک مربوط به سنجنده در زاویه نادر θ ($T_{rad}(\theta)$) به وسیله رابطه (۱۵) و با سعی و خطا (ن.ک. نورمن و همکاران (۱۹۹۵)) به دو دمای خاک و پوشش گیاهی تفکیک می‌شود:

مقایسه مدل‌های سنجش از دور تک‌منبعی و دومنبعی شار انرژی در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دشت تبریز



شکل ۵. توزیع شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص سطح برگ (LAI) و دمای سطح زمین (Ts) برای روز ژوئیه ۱۹۲

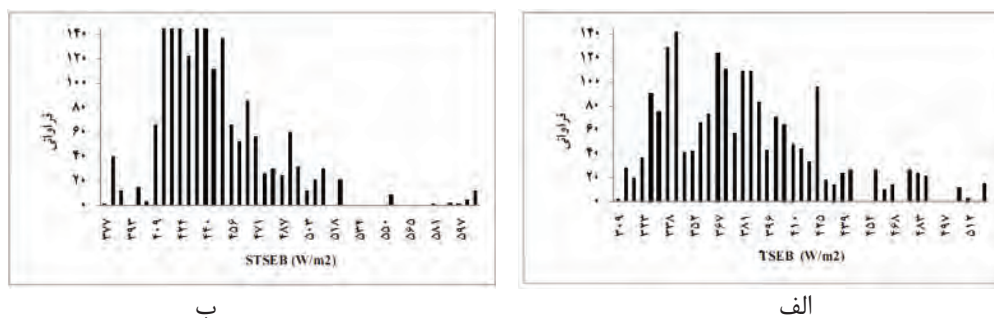


شکل ۶. هیستوگرام شار گرمای نهان مدل‌سازی شده در روز ژوئیه ۱۹۲ برای مدل‌های تک‌منبعی (الف) METRIC و (ب) SEBAL

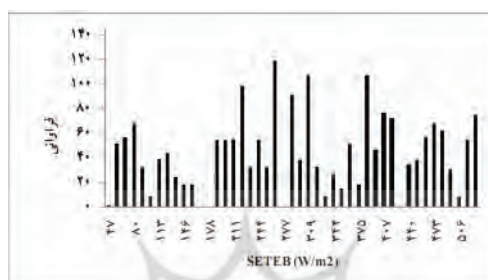
(H) خودداری می‌شود. تبخیر و تعرق واقعی (ET) را به راحتی می‌توان از شار گرمای نهان (LET) برآورد کرد؛ بدین منظور هیستوگرام فراوانی مقادیر شار گرمای نهان (نمایانگر تبخیر و تعرق واقعی) به تفکیک مدل‌های تک‌منبعی و دومنبعی برای روز ژوئیه ۱۹۲ در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شد، توزیع پراکندگی شار گرمای نهان (W/m^2) مدل‌های تک‌منبعی METRIC و SEBAL تقریباً وضعیت مشابهی با یکدیگر دارند. این تشابه، به علت فرضیات و روند مدل‌سازی نسبتاً یکسان دو مدل مذکور است. اما برخلاف مدل‌های تک‌منبعی، مدل‌های دومنبعی TSEB و STSEB پراکندگی‌های بیشتری دارند (شکل ۷).

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، توزیع شاخص NDVI در محدوده صفر تا ۰/۵۷ متغیر است و این در حالی است که برای LAI این محدوده از صفر تا ۰/۸ را پوشش می‌دهد. مقادیر پایین این دو شاخص به دلیل زمان تصویر برداشت محصول غالب منطقه (گندم)، نشان از ضعیف بودن پوشش گیاهی در منطقه دارند. به همین ترتیب مقادیر بالای دمای سطح زمین (۳۰۷ تا ۳۱۵ کلوین) نیز به همین موضوع اشاره دارد. بنابراین نتایج این قسمت با واقعیت‌های منطقه مطالعاتی سازگاری مناسبی دارد. اما با توجه به هدف نهایی، مقایسه مدل‌ها از منظر برآورد تبخیر و تعرق واقعی است و به دلیل دسترسی به لایسومتر و اندازه‌گیری‌های آن، در ادامه به ارائه و تحلیل نتایج مربوط پرداخته می‌گردد و از ذکر اجزای دیگر (R_n , G و



شکل ۱. هیستوگرام شار گرمای نهان مدل‌سازی‌شده در روز ژوئیه ۱۹۲ برای مدل‌های دومنبعی الف (TSEB) و ب (STSEB)



شکل ۲. هیستوگرام شار گرمای نهان مدل‌سازی‌شده در روز ژوئیه ۱۹۲ برای مدل ترکیبی (تک‌منبعی - دو منبعی) SETEB

علت این اختلاف، در دماهای خاک و پوشش گیاهی است که نقش اساسی در مدل‌های دومنبعی دارند. همان‌گونه که قبلاً نیز ذکر شد، در TSEB الگوریتم سعی و خطا به منظور برآورد دماهای خاک و پوشش گیاهی استفاده می‌شود حال آنکه در STEB به منظور رفع این پیچیدگی از اندازه‌گیری مستقیم دماهای خاک و پوشش گیاهی استفاده می‌شود. بدیهی است که توزیع پراکندگی مدل SETEB، با توجه به الگوریتم ترکیبی آن از SEBAL و TSEB، وضعیت متفاوتی از مدل‌های دیگر خواهد داشت (شکل ۸).

۳-۲- مقایسه مدل‌ها و ارزیابی نتایج

به‌منظور ارزیابی عملکرد و نیز مقایسه مدل‌های تک‌منبعی و دومنبعی، برای ۶ روز ژوئیه مورد نظر (۱۸۵، ۱۸۹، ۱۹۱، ۱۹۲، ۱۹۶، ۱۹۹) مقادیر لایسیمتر در منطقه مطالعاتی اندازه‌گیری شد. لایسیمتر مزرعه از نوع تفاضلی است که در آن تبخیر و تعرق براساس بیلان آب موجود در خاک اندازه‌گیری می‌شود. لایسیمتر تفاضلی براساس رابطه بیلان (۱۷) استوار

است:
 رابطه (۱۷) $ET = I + P - D \pm \Delta S$
 که در آن I میزان آب آبیاری، P میزان بارندگی اندازه‌گیری شده، D میزان آب زهکشی‌شده از لایسیمتر و ΔS میزان تغییرات رطوبت خاک است. به‌منظور برآورد تبخیر و تعرق روزانه از تبخیر و تعرق لحظه‌ای ماهواره، از نسبت تبخیر و تعرق گیاه مرجع روزانه به ساعتی استفاده گردید. برای این منظور، تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مقیاس ساعتی (میلی‌متر در ساعت) در لحظه گذر ماهواره (ET_{r-inst}) و همچنین میزان آن در مقیاس روزانه برحسب میلی‌متر در روز (ET_{r-24}) برای ایستگاه هواشناسی معرف منطقه محاسبه شد. سپس از رابطه (۱۸) میزان تبخیر و تعرق واقعی روزانه مدل‌های ماهواره‌ای (ET_{act-24}) برحسب میلی‌متر در روز برآورد گردید (Bastianssen et al., 2002).

$$ET_{act-24} = ET_{r-24} \frac{ET_{inst}}{ET_{r-inst}} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

مقایسه مدل‌های سنجش از دور تک‌منبعی و دومنبعی شار انرژی در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دشت تبریز

در جدول ۳. مقادیر خروجی مدل، O_i مقادیر مشاهداتی، n تعداد مشاهدات و $\bar{O} = \frac{1}{n} \sum n_i$ است. نتایج این پارامترها در جدول ۴ ارائه می‌گردد. به‌طور کلی مقادیر پارامترهای آماری جدول ۴، نشان‌دهنده وضعیت پذیرفتنی و عملکرد منطقی هر پنج مدل در زمینه برآورد تبخیر و تعرق واقعی است، و خطای پایین آنها (مقادیر RMDS بین ۱/۱۵ تا ۲/۹۴) نیز مؤید همین مطلب است. مقایسه دقت تک‌تک مدل‌ها با مقادیر مشاهداتی لایسیمیتر، نشان می‌دهد که مدل دومنبعی STSEB با مقادیر MAPD و RMSD به ترتیب برابر ۸/۷۳ و ۱/۱۵، نتایج بهتری ارائه کرده‌اند.

برای برآورد تبخیر و تعرق‌های مرجع روزانه و ساعتی از روش پنمن - مانیت - فائو استفاده شد (Allen et al., 1998). مقادیر تبخیر و تعرق خروجی به‌وسیله مدل‌های شار انرژی به همراه مقادیر مشاهداتی لایسیمیتری و تبخیر و تعرق مرجع در جدول ۲ ارائه شده است. به‌منظور ارزیابی مقادیر تبخیر و تعرق مدل‌سازی‌شده و مقایسه با مقادیر مشاهداتی (لایسیمیتر)، از پارامترهای آماری جدول ۳ استفاده می‌گردد. پارامترهای آماری به‌کار رفته، همگی میزان خطای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در هر یک از مدل‌ها را در مقایسه با مقادیر مشاهداتی (لایسیمیتر) بیان می‌کنند.

جدول ۲. مقادیر خروجی تبخیر و تعرق واقعی از مدل‌های شار انرژی به همراه مقادیر مشاهداتی لایسیمیتر و تبخیر و تعرق مرجع روزانه (میلی‌متر در روز)

روز ژوئیه	TSEB	SETEB	SETEB	METRIC	SEBAL	لایسیمیتر	ET _{T-24}
۱۸۵	۶/۲۵	۷/۲۸	۷/۷۰	۶/۴۰	۶/۴۱	۸/۰	۶/۶۱
۱۸۹	۷/۶۶	۷/۹۲	۷/۷۷	۷/۱۳	۷/۰۷	۱۰/۰	۸/۳۰
۱۹۱	۷/۵۴	۸/۵۳	۸/۶۶	۷/۵۴	۷/۵۹	۱۰/۲	۸/۴۸
۱۹۲	۷/۲۴	۸/۴۲	۷/۳۳	۷/۰۵	۷/۰۴	۸/۷	۷/۲۴
۱۹۶	۵/۲۷	۹/۸۸	۹/۲۲	۸/۰۶	۸/۱۵	۹/۸	۸/۰۸
۱۹۹	۶/۳۰	۱۰/۲۵	۹/۹۷	۹/۴۸	۹/۷۵	۱۰/۲	۸/۴۶

جدول ۳. پارامترهای آماری به‌منظور مقایسه نتایج خروجی مدل‌ها

پارامتر آماری	توصیف	رابطه
Δ_i	درصد خطای برآورد مدل برای روز i ام	$\frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100$
MAPD ^۱	میانگین درصد اختلاف مطلق	$\frac{100}{\bar{O}} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i - O_i \right]$
RMSD ^۲	ریشه میانگین مربع اختلافات	$\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{1/2}$

1. Mean absolute percent difference
2. Root-mean-square difference

جدول ۴. آنالیز پارامترهای آماری برای مقایسه مدل‌های شار انرژی در برآورد تبخیر تفرق واقعی

پارامترهای آماری	روز جولایی	TSEB	STSEB	SETEB	METRIC	SEBAL
Δ_i	روز جولایی ۱۸۵	-۲۱/۷	-۸/۸	-۳/۵	-۱۹/۹	-۱۹/۷
	روز جولایی ۱۸۹	-۲۳/۶	-۲۱/۰	-۲۲/۵	-۲۸/۸	-۲۹/۵
	روز جولایی ۱۹۱	-۲۶/۳	-۱۶/۷	-۱۵/۵	-۲۶/۴	-۲۵/۹
	روز جولایی ۱۹۲	-۸/۰	-۳/۷	-۱۶/۲	-۱۹/۴	-۱۹/۴
	روز جولایی ۱۹۶	-۴۶/۱	۱/۱	-۵/۷	-۱۷/۵	-۱۶/۵
	روز جولایی ۱۹۹	-۳۸/۴	۰/۲	-۲/۴	-۷/۳	-۴/۷
MAPD		۲۷/۹۴	۸/۷۳	۱۱/۱۳	۱۹/۸۶	۱۹/۲۵
RMSD		۲/۹۴	۱/۱۵	۱/۳۰	۲/۰۲	۲/۰۰

نشان از دقت کافی این نوع مدل‌ها با سنجنده MODIS برای برآورد تبخیر و تفرق واقعی دارد؛ این در حالی است که داده‌ها و اطلاعات ورودی نیز برای آن به راحتی در دسترس قرار می‌گیرد و نیاز به اطلاعات خاص میدانی - نظیر دمای خاک و یا اطلاعات پوشش گیاهی - نیست.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدل‌های تک‌منبعی SEBAL و METRIC و دو منبعی TSEB و STSEB به همراه مدل ترکیبی SETEB برای برآورد تبخیر و تفرق واقعی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. مبنای مقایسه مدل‌های مورد نظر، داده‌های اندازه‌گیری شده به وسیله لایسیومتر (متعلق به دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز) برای ۶ روز مقارن با گذر ماهواره MODIS از منطقه مطالعاتی (ناحیه خلعت‌پوشان شهرستان تبریز) است. از تحلیل‌های به عمل آمده در پژوهش حاضر، می‌توان

بدیهی است که بخشی از علت آن مربوط به به‌کارگیری مقادیر مشاهداتی دمای خاک و دمای پوشش گیاهی است، که نقش مهمی در عملکرد مدل‌های دومنبعی دارد. در مدل TSEB به منظور برآورد دماهای خاک و پوشش گیاهی، از تصاویر دمای سطحی و الگوریتم سعی و خطا استفاده می‌شود. البته تحقیقاتی که از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا استفاده کرده‌اند، نتایج بهتری نیز به دنبال داشته‌اند. (Timmermans et al., 2007, French et al., 2005). با توجه به مقادیر پارامترهای آماری جدول ۴، مدل SETEB بعد از مدل STSEB وضعیت بهتری نسبت به مدل‌های دیگر دارد. این مدل با وجود تفکیک اجزای شار انرژی به دو جزء خاک و پوشش گیاهی، به دماهای خاک و پوشش گیاهی نیاز ندارد و از ورودی‌های مدل SEBAL استفاده می‌کند، به همین دلیل قدرت تفکیک مکانی پایین سنجنده MODIS تأثیر کمتری بر روی مدل و نتایج آن خواهد داشت. به طور کلی مقادیر خطای مدل‌های تک‌منبعی SEBAL و METRIC

۶- منابع

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998, **Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO**, Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300: 6541.

Allen, R.G., Tasumi, M. and Trezza, R., 2007, **Satellite-based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133: 380.

Anderson, M.C., 2011, **Personal Comunication**.

Anderson, M.C., Norman, J.M., Mecikalski, J.R., Otkin, J.A. and Kustas, W.P., 2007, **A Climatological Study of Evapotranspiration and Moisture Stress Across the Continental United States Based on Thermal Remote Sensing: 1, Model formulation**, Journal of geophysical research, 112: D10117.

Ayenew, T., 2003, **Evapotranspiration Estimation Using Thematic Mapper Spectral Satellite Data in the Ethiopian Rift and Adjacent Highlands**, Journal of Hydrology, 279: 83-93.

Bagheri H., M.H., 2012, **Assessment of Remote Sensing Technique for Estimation of Water Balance Components in Basin Scale, Emphasizing on Net Groundwater Exploitation: a case study on Urmia lake basin**, Master of Science Thesis, University of Tarbiat Modares, 126.

نتایج زیر را به عنوان جمع‌بندی ارائه کرد:

۱- مقایسه نتایج تبخیر و تعرق حاصل از مدل‌های مورد نظر با مقادیر لایسیمتر، نشان از دقت و عملکرد مورد قبول آنها با تصاویر سنجنده MODIS دارد.

۲- از میان روش‌های مورد استفاده، STSEB و TSEB به ترتیب بالاترین و کم‌ترین دقت را داشته‌اند؛ که هر دو از مدل‌های دومنبعی هستند. اختلاف این دو مدل تنها در به‌کارگیری دماهای خاک و پوشش گیاهی است.

۳- خطای بالاتر TSEB می‌تواند به میزان درشت‌نمایی پایین تصاویر سنجنده MODIS (۲۵۰ تا ۱۰۰۰ متر) باشد، که برای این مدل کافی نیست و بهتر است برای آن از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا استفاده گردد.

۴- مدل SETEB به‌رغم سادگی الگوریتم، دارای خطای پایین و در حد مدل STSEB است، که عملکرد مورد قبولی را با سنجنده MODIS برای آن نشان می‌دهد. بنابراین در صورت تأکید و الزام در به‌کارگیری مدل دومنبعی برای مقیاس‌های استانی یا حوضه‌ای، مدل SETEB توصیه می‌شود.

۵- بررسی نحوه محاسبات و حجم اطلاعات مورد نیاز نشان داد که به‌کارگیری مدل‌های دومنبعی در سطح حوضه دریاچه ارومیه دشوار و تاحدی غیرعملیاتی است؛ بنابراین در این مقیاس، نتایج تحقیق مدل‌های تک‌منبعی SEBAL و METRIC را پیشنهاد می‌کند. ضمن اینکه مدل‌های تک‌منبعی به‌رغم استفاده نکردن از فرضیات پیچیده مدل‌های دومنبعی، جواب‌های پذیرفتنی را نیز ارائه داده بودند.

۵- سپاس و قدردانی

بدین‌وسیله از همکاری گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز، آقایان دکتر فاخری، دکتر اسدی و مهندس صالحی که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

- 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., 1998, **A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)**, 1. Formulation, Journal of Hydrology, 212: 198-212.
- Bastiaanssen, W.G.M., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R. and Waters, R., 2002, **SEBAL Surface Energy Balance Algorithms for Land**, Idaho Implementation, Advanced Training and Users Manual, Version 1.0, Funded by: a NASA EOSDIS/Synergy grant from the Raytheon Company through The Idaho Department of Water Resources. 1-98.
- Choi, M., Kustas, W.P., Anderson, M.C., Allen, R.G., Li, F. and Kjaersgaard, J.H., 2009, **An Intercomparison of Three Remote Sensing-based Surface Energy Balance Algorithms over a Corn and Soybean Production Region (Iowa, US) during SMACEX**, Agricultural and Forest Meteorology, 149: 2082-2097.
- Diak, G., Kustas, W.P. and Moran, M.S., 2008, **Evapotranspiration**, Remote Sensing.
- French, A., Jacob, F., Anderson, M., Kustas, W., Timmermans, W., Gieske, A., Su, Z., Su, H., McCabe, M. and Li, F., 2005, **Surface Energy Fluxes with the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) at the Iowa 2002 SMACEX site (USA)**, Remote Sensing of Environment, 99: 55-65.
- Huntingford, C., Verhoef, A. and Stewart, J., 2000, **Dual Versus Single Source Models for Estimating Surface Temperature of African Savannah**, Hydrology and Earth System Sciences, 4: 185-191.
- Kondo, J. and Ishida, S. 1997, **Sensible Heat Flux from the Earth's Surface under Natural Convective Conditions**, Atmos. Sci., 54.
- Kustas, W.P. and Norman, J.M., 1997, **A Two-Source Approach for Estimating Turbulent Fluxes Using Multiple Angle Thermal Infrared Observations**, Water Resources Research, 33: 1495-1508.
- Kustas, W.P. and Norman, J.M., 1999, **Evaluation of Soil and Vegetation Heat Flux Predictions Using a Simple Two-Source Model with Radiometric Temperatures for Partial Canopy Cover**, Agricultural and Forest Meteorology, 94: 13-29.
- Kustas, W.P., Norman, J.M., Anderson, M.C. and French, A.N., 2003, **Estimating Subpixel Surface Temperatures and Energy Fluxes from the Vegetation Index-Radiometric Temperature Relationship**, Remote Sensing of Environment, 85: 429-440.
- Mausser, W. and Schadlich, S., 1998, **Modelling the Spatial Distribution of Evapotranspiration on Different Scales Using Remote Sensing Data**, Journal of Hydrology, 212: 250-267.

- Minacapilli, M., Agnese, C., Blanda, F., Cammalleri, C., Ciraolo, G., D'urso, G., Iovino, M., Pumo, D., Provenzano, G. and Rallo, G., 2009, **Estimation of Actual Evapotranspiration of Mediterranean Perennial Crops by Means of Remote-Sensing Based Surface Energy Balance Models**, Hydrology and Earth System Sciences, 13: 1061-1074.
- Nishida, K., Nemani, R.R., Running, S.W. and Glassy, J.M., 2003, **An Operational Remote Sensing Algorithm of Land Surface Evaporation**, Journal of geophysical research, 108: 4270.
- Noori, S., Sanaeinejad, H. and Hashemina, M., 2010, **Estimation of Land Surface Temperature Using MODIS Image in Mashhad Basin**, The First International Conference on Plant, Water, Soil & Weather modeling, High Technology Environmental Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.
- Norman, J.M., Kustas, W.P. and Humes, K.S., 1995, **Source Approach for Estimating Soil and Vegetation Energy Fluxes in Observations of Directional Radiometric Surface Temperature**, Agricultural and Forest Meteorology, 77: 263-293.
- Oliosio, A., Chauki, H., Courault, D. and Wigneron, J.P., 1999, **Estimation of Evapotranspiration and Photosynthesis by Assimilation of Remote Sensing Data into SVAT Models**, Remote Sensing of Environment, 68: 341-356.
- Priestley, C. and Taylor, R., 1972, **On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-scale Parameters**, Monthly weather review, 100: 81-92.
- Sánchez, J., Kustas, W., Caselles, V. and Anderson, M., 2008, **Modelling Surface Energy Fluxes over Maize Using a Two-Source Patch Model and Radiometric Soil and Canopy Temperature Observations**, Remote Sensing of Environment, 112: 1130-1143.
- Su, Z., 2002, **The Surface Energy Balance System (SEBS) for Estimation of Turbulent Heat Fluxes**, Hydrology and Earth System Sciences, 6: 85-99.
- Tasumi, M., 2003, **Progress in Operational Estimation of Regional Evapotranspiration Using Satellite Imagery**.
- Timmermans, W.J., Kustas, W.P., Anderson, M.C. and French, A.N., 2007, **An Intercomparison of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and the Two-source Energy Balance (TSEB) Modeling Schemes**, Remote Sensing of Environment, 108: 369-384.
- Townshend, J. and Justice, C., 1988, **Selecting the Spatial Resolution of Satellite Sensors Required for Global Monitoring of Land Transformations**, International Journal of Remote Sensing, 9: 187-236.
- Wang, Y. and Sun, D., 2005, **The ET Estimation from ASTER Image Based on SEBAL and TSEB Methods**, p. 604532.
- Yao, W., Han, M. and Xu, S., 2010, **Estimating the Regional Evapotranspiration in Zhalong Wetland with the Two-Source Energy Balance (TSEB) Model and Landsat7/ETM+ Images**, Ecological Informatics, 5: 348-358.