

توسعه الگوریتم SM-SEBAL به منظور محاسبه تبخیر و تعرق واقعی به کمک سنجش از دور

فرهاد میرزایی^{۱*}، محمدرضا کشاورز^۲، مجید وظیفه دوست^۳

چکیده

روش Surface Energy BALance (SEBAL) یکی از پرکاربردترین روش‌های تعیین تبخیر و تعرق واقعی به کمک سنجش از دور است. با این حال فرض خطی بودن رابطه اختلاف دما و دمای سطح زمین و نیز استفاده از دو پیکسل گرم و سرد که توسط کاربر شناسایی می‌شوند از نقاط ضعف این روش محسوب می‌شود. روش Modified SEBAL (M-SEBAL) علاوه بر اصلاح این مشکل، دو مفهوم جدید لبه سرد و گرم را جایگزین پیکسل‌های سرد و گرم می‌کند که تاثیر بسزایی در افزایش دقت و نیز خودکارسازی اجرای الگوریتم و عدم نیاز به کاربر ماهر دارد. با این حال تعیین لبه گرم نیاز به محاسبات زیاد و در نتیجه بالا رفتن زمان محاسبه و امکان خطای محاسباتی دارد. در این تحقیق، شکلی ساده شده از روش M-SEBAL با نام Simplified M-SEBAL (SM-SEBAL) توسعه یافته است و نتایج حاصل از اجرای سه روش بر روی بیش از ۳۰۰ لایه تصویری MODIS با داده‌های لایسیمتری و نیز داده‌های زمینی بیلان انرژی مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تهران واقع در کرج مقایسه شده است. نتایج حاصل از اجرای سه الگوریتم نشان می‌دهد که الگوریتم SEBAL تبخیر و تعرق را بیش برآورد و دو الگوریتم دیگر آنرا اندکی کم برآورد می‌کنند. بیشترین خطای محاسبه شار گرمای محسوس مربوط به روش M-SEBAL با ۳۳/۸۷ درصد و کمترین میزان خطا مربوط به نتایج روش SEBAL (۱۱/۲۳ درصد) می‌باشد. با این حال حداکثر خطا در مقادیر تبخیر تعرق روزانه در نتایج روش SEBAL (۳/۵۶ درصد) و کمترین میزان خطا در روش SM-SEBAL (۱/۱۸ درصد) مشاهده شد.

واژه های کلیدی: سنجش از دور، تبخیر و تعرق، SEBAL، M-SEBAL، SM-SEBAL

^۱ دانشیار و عضو هیئت علمی آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
Email: fmirzaei@ut.ac.ir تلفن: ۰۹۱۲-۸۶۱۳۸۲۵

^۲ فارغ التحصیل دکتری آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

^۳ عضو هیئت علمی مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان

مقدمه

حدود ۶۰ درصد از ریزش جوی سالانه در کره زمین صرف تبخیر- تعرق می‌شود (Oki and Kanae, 2006). تا کنون روش‌های بسیار زیادی برای محاسبه تبخیر- تعرق واقعی یا پتانسیل در مناطق مختلف اعم از کشاورزی و غیر کشاورزی معرفی شده است. تبخیر- تعرق واقعی را می‌توان با کمک ابزار سنجش از دور با دقت مناسب برآورد نمود (Engman and Gurney, 1991; Kustas and Norman, 1996; Bastiaanssen et al., 1998a, 2002; Kustas et al., 2003).

عمده روش‌های تخمین تبخیر-تعرق بر اساس سنجش از دور بر اساس معادله بیلان انرژی، میزان انرژی ورودی از خورشید که صرف تبخیر- تعرق شده است را تخمین می‌زنند (Granger, 2000). همچنین دقت این روش‌ها در زمان‌ها و مکان‌های مختلف متفاوت است و نمی‌توان به راحتی یکی را بر دیگری ترجیح داد (Liou and Kar, 2014). Bastiaanssen et al. (1998a and 1998b) نسخه اول از الگوریتم SEBAL را برای تعیین اجزای بیلان انرژی در مقیاس منطقه‌ای با کمترین داده زمینی مورد نیاز معرفی کردند. البته پیش از معرفی رسمی الگوریتم، فیزیک این الگوریتم توسط Bastiaanssen et al. (1994) توصیف شده بود و نیز محققینی از نسخه‌های اولیه آن برای تعیین تبخیر- تعرق واقعی در زمین‌های تحت کشت آبی استفاده کرده بودند (Bastiaanssen et al., 1996; Pelgrum and Bastiaanssen, 1996; Roerink et al. 1997; Wang et al., 1998; Timmermans and Meijerink, 1999). Bastiaanssen et al. (1998a and 1998b) پس از معرفی الگوریتم SEBAL، با استفاده از تصاویر Landsat TM در دو روز در اوایل و اواخر تابستان در دو منطقه همگن تحت کشت کتان و یک منطقه ناهمگن (ساحل یک رودخانه)، اجزای بیلان انرژی را با کمک این الگوریتم محاسبه نموده و با داده‌های زمینی مقایسه کردند. در این تحقیق، پیکسل سرد در یک منطقه با پوشش آب انتخاب شد که بتوان شار گرمای محسوس (H) را برای این پیکسل صفر فرض نمود.

با توجه به اینکه SEBAL کمترین داده‌های زمینی را نسبت به سایر الگوریتم‌ها نیاز دارد، تمایل زیادی برای تحقیق روی آن در میان محققین به وجود آمد. علاوه بر

محققینی که به محاسبه تبخیر و تعرق واقعی (ET) به کمک الگوریتم SEBAL و مقایسه آن با داده‌های بدست آمده به صورت مستقیم مانند لایسیمتر و همبستگی ادی (EC) پرداختند و نتایج را رضایت بخش توصیف کردند (Farah 2001; Tasumi et al., 2003; Ahmad et al., 2006; Spiliotopolus et al., 2008; Zeng et al., 2010; Sun et al., 2011; Paul et al., 2013; Al Zayed et al., 2017; Guimarães Santos et al., 2016) و محققینی که به بررسی توانایی مدل در تخمین کارایی مصرف آب (El-Magd and Tanton, 2005; Bandara, 2006; Akbari et al., 2007; Immerzeel et al., 2008; Teixeira et al., 2009a and 2009b; Sari et al., 2013) و بررسی مدیریت و الگوی مصرف آب (Chemin et al., 2004; Ahmad et al., 2006; Zeng et al., 2010; Jian-ying et al., 2015; Mahmoud and Alazba, 2016) پرداختند، عده‌ای از محققین نیز به مقایسه این الگوریتم با سایر الگوریتم‌ها مانند SEBI (Van Den Hurk, 2001)، TSEB (Timmermans et al., French et al., 2005; Allen et al., 2006; Hong et al., 2007) و METRIC (Zhou et al., 2011; Allen et al., 2008) و مدل 3T (SWAP (2014) و یا مدل‌های کامپیوتری مانند (Droogers and Bastiaanssen, 2000) و سایر مدل‌ها (Thoreson et al., 2009; Long and Singh, 2010; Ruhoff et al., 2012; Tang and Li, 2015; Bhattarai et al., 2016) روی آوردند. برخی نیز با فرض دقت بالای SEBAL، به لینک کردن این الگوریتم با سایر الگوریتم‌ها و یا مدل‌های هیدرولوژیکی (Melessa and Dorji, 2003; Naninga, 2005; Wu et al., 2010; Ruhoff et al., 2015; Van Eekelen et al., 2013; Sari et al., 2012) و یا بهبود نتایج مدل‌ها به کمک نتایج حاصل از الگوریتم SEBAL پرداختند (Long and Singh, 2010). Bastiaanssen et al. (2005) ادعا نمودند که الگوریتم SEBAL توانسته است میزان تبخیر- تعرق در ۴۰ مطالعه انجام شده در ۲۵ کشور جهان را با دقت ۸۵٪ در مقیاس روزانه و ۹۵٪ در مقیاس فصلی تخمین بزند. Hemakumara et al. (2003) نتایج ET روزانه بدست آمده از این روش با ماهواره NOAA را با داده‌های واقعی تبخیر- تعرق بدست آمده از مزرعه مقایسه کردند و همبستگی بالا و خطای کمی را خصوصاً در مقیاس زمانی بزرگتر (ماهانه) گزارش نمودند. همچنین، Ruhoff et al. (2012) همبستگی ۶۶٪ تا ۷۶٪ بین نتایج SEBAL با

(et al., 2011). اگرچه کمبود قدرت تفکیک مکانی سنجنده MODIS برای داده‌های LST¹ در دقت محاسبات و نتایج موثر است، با این حال تفکیک زمانی بالا برای اجرایی شدن SEBAL توسط سنجنده MODIS حائز اهمیت زیادی است (Patel et al., 2006). علاوه بر اینکه سنجنده‌ای مانند MODIS علی‌رقم تفکیک مکانی متوسط، پایش مداوم تغییرات کوتاه مدت تبخیر- تعرق با حداقل یک بار عبور در هر روز را مقدور می‌کند (Mallick et al., 2009). (Ruhoff et al., 2012) همبستگی ۰.۶۶ تا ۰.۷۶ را بین نتایج SEBAL بدست آمده از تصاویر MODIS و داده‌های EC گزارش کردند. Long et al. (2011) گزارش کردند که بیشترین حساسیت الگوریتم مربوط به نتایج شار گرمای محسوس (H) است که به دمای سطح خاک و انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم حساس است. (Ruhoff et al., 2012) نتایج SEBAL را به NDVI و گرادبان دمای هوا بسیار حساس یافتند. همچنین Paul et al. (2014) به بررسی تاثیر مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامتر طول زبری انتقال گرما (Z_{oh}) در عملکرد SEBAL در سیستم‌های کشت دیم و آبی در مناطق نیمه بیابانی پرداختند.

با افزایش توجه محققین به الگوریتم SEBAL و تلاش آن‌ها برای بهبود نتایج آن، الگوریتم‌های دیگری مانند SEBS (Su, 2001)، M-SEBAL (Wang et al., 2006)، METRIC (Allen et al., 2007)، SSEB (Senay et al., 2007)، M-SEBAL (Long and Singh, 2012)، SSEBop (Senay et al., 2013) و CYSEBAL (Papadavid et al., 2013) با حفظ اصول کلی SEBAL معرفی شدند که در شرایط مختلف می‌توان از هر یک از آنها استفاده نمود. Norman et al. (2006) نشان دادند که فرض رابطه خطی بین گرادبان دمای هوا و دمای سطح زمین در مساحت‌های بسیار نا همگن نمی‌تواند دقیق باشد. Long and Singh (2012) از یک مفهوم دوزنقه‌ای (رابطه دمای سطح زمین و نسبت پوشش گیاهی) و دو مفهوم لبه سرد و گرم بجای پیکسل سرد و گرم برای اصلاح الگوریتم SEBAL استفاده کرده و الگوریتم بهینه شده M-SEBAL را معرفی کردند. آنها الگوریتم مذکور را با SEBAL نسبت به داده‌های ET بدست آمده از روش EC مقایسه کردند. نتایج نشان داد

MODIS و داده‌های EC گزارش کردند. خطای تخمین ET به روش SEBAL بین ۷٪ تا ۱۵٪ در مقیاس روزانه (Morse et al 2000; Allen et al., 2001; Wang et al) (2003; Xiong et al., 2006) و حدود ۴٪ در مقیاس ماهانه گزارش شده است (Morse et al 2000; Allen et al., 2001). با این حال مقادیر بیشتری از خطا توسط برخی محققین مشاهده شده و بین ۳٪ تا ۳۵٪ خطا در محاسبات ET به روش SEBAL محتمل است (Trezza, 2009; Evans et al 2009). انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم می‌تواند تا ۲۰ درصد در نتایج اختلاف ایجاد کند (Paul et al., 2013). Paul et al. (2013) بین ۲۳ تا ۲۸ درصد خطا در نتایج SEBAL با استفاده از تصاویر هوایی با تفکیک مکانی بالا را گزارش کردند.

Kite and Droogers (2000) در منطقه‌ای تحت آبیاری در ترکیه، H بدست آمده از داده‌های زمینی را متفاوت از آنچه SEBAL بدست میداد گزارش کردند. به نظر میرسد عدم قطعیت در محاسبه H در روش SEBAL به مراتب بیشتر از عدم قطعیت در محاسبه شار گرمای نهان تبخیر است (Marx et al., 2008). Opoku-Duah et al. (2008) از سنجنده‌های MODIS و ASTER برای تخمین ET به کمک SEBAL در منطقه- ای نا همگن استفاده کردند و اعلام نمودند که SEBAL نسبت به داده‌های EC مقدار ET را کم برآورد می‌کند. با این حال، Hendrickx and Hong (2005) گزارشی متفاوت ارائه نمودند که SEBAL تبخیر- تعرق بدست آمده را نسبت به داده‌های EC بیش برآورد می‌کند. اظهار نظر محققین در مورد دقت محاسبه H در الگوریتم SEBAL نیز بعضاً متناقض است. برخی گزارش کرده‌اند که SEBAL، H را بسیار بیش برآورد می‌کند (Melesse and nangia 2005; French et al 2005; Teixeira et al 2009a). در مقابل عده ای نیز معتقدند که اجرای SEBAL موجب کم برآورد پارامتر H می‌شود (Kleissl et al 2008; Singh et al 2008; Marx et al 2008). صورتی که دلیل این امر خطای محاسباتی نباشد، ریشه این اختلافات احتمالاً در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم است (Long and Singh 2012).

ظاهراً بر خلاف سایر الگوریتم‌ها، الگوریتم SEBAL در استفاده از سنجنده با تفکیک مکانی کمتر انحراف معیار کمتری در نتایج ET از خود نشان می‌دهد (Long

¹ Land surface temperature

با سیستم تصویر Sinusoidal ارائه می‌شود از سایت Reverb دریافت شد^۲. شاخص گیاهی NDVI، fc و آلبیدو با استفاده از داده‌های MOD09QG استخراج شد. برای برآورد دمای سطح زمین از داده‌های LST (V005) که در سطح ۳ تولیدات مادیس تحت عنوان MOD11A1 با تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر، گام‌های زمانی روزانه و با سیستم تصویر Sinusoidal ارائه می‌شود استفاده گردید. همچنین این داده‌ها با کمک تصاویر سنجنده ASTER به روش DisTrad (Kustas et al., 2003) و استفاده از شاخص گیاهی NDVI بدست آمده از دو سنجنده MODIS و ASTER و در فواصل زمانی مشخص ریز مقیاس شده و به تفکیک مکانی ۲۵۰ متر بهبود می‌یابد. همچنین این تولیدات MODIS حاوی داده‌های زاویه میل سنجنده و زمان تصویر برداری می‌باشد که از آن در محاسبات SEBAL استفاده می‌شود. به منظور اصلاح هندسی، ابتدا تصاویر با روش نزدیکترین همسایه بازسازی شد و سپس به سیستم تصویر UTM با ژئوئید WGS84 تبدیل گردید. داده‌های LST به منظور همخوانی با داده‌های NDVI به صورت شبکه‌های ۲۵۰ متری بازسازی شد. همچنین داده‌های رقومی ارتفاع SRTM از سایت USGS دانلود شد. برای تشخیص پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه نیز از ترکیب محصول پوشش گیاهی MODIS MCD12C1 و نقشه‌های موجود و پوشش گیاهی استان‌های مختلف با تفکیک مکانی بهتر و ریز مقیاس کردن تصاویر MCD12C1 استفاده شد (شکل ۱). با توجه منطقه‌ای بودن محاسبات، علاوه بر داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، از داده‌های باد و دمای سه ساعته برای روزهای مورد مطالعه (تمامی روزهای سال ۲۰۰۹ که تصاویر MODIS برای آن موجود بوده است) از مدل GLDAS که ترکیبی از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای است با دقت مکانی ۲۵ کیلومتر استفاده شد. محصولات GLDAS سری‌های زمانی از داده‌های زمینی (به عنوان مثال، دما و رطوبت خاک سطحی) و شار (به عنوان مثال، تبخیر و شار حرارت محسوس) شبیه سازی شده توسط چهار مدل سطح زمین (CLM، موزایک، نوح و VIC) می‌باشند^۳. تمامی مراحل این تحقیق (دانلود

الگوریتم جدید خطای کمتری را نسبت به الگوریتم SEBAL دارد که احتمالاً به دلیل عدم وابستگی آن به انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم است. مزیت این الگوریتم این است که با حفظ اصول کلی حاکم بر SEBAL، بدون اینکه نیازی به داده‌های زمینی بیشتری داشته باشد، ایراد SEBAL را که حساسیت به انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم است را ندارد که علاوه بر افزایش دقت، امکان بیشتری برای خودکار کردن اجرای الگوریتم فراهم می‌کند. در این تحقیق، علاوه بر محاسبه تبخیر و تعرق به دو روش SEBAL و M-SEBAL به صورت روزانه برای دو سال به کمک تصاویر سنجنده MODIS، تلاش شده است با الگوگیری از الگوریتم M-SEBAL، یک روش جدید توسعه داده شود (SM-SEBAL) که با حفظ دقت الگوریتم M-SEBAL، روند ساده‌تری را طی نماید.

مواد و روش‌ها

الف) منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه برای اجرای الگوریتم SEBAL باید حتی الامکان وسعت زیادی را با تنوع پوشش گیاهی و اقلیمی در برگیرد. از این رو در این تحقیق از محصولات MODIS در قطاع ۲۲ افقی و ۵ عمودی استفاده شد که از طول جغرافیایی ۴۶/۱۸۸ تا ۴۵/۲۸۱۲ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ تا ۴۰ درجه شمالی را در بر می‌گیرد. از آنجا که برای صحت سنجی مقادیر تبخیر و تعرق بدست آمده نیاز به داده‌های زمینی می‌باشد، از داده‌های اندازه‌گیری شده اجزای بیلان انرژی رسیده به زمین در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج (۳۵/۳۵ شمالی و ۵۱/۵۲۸ شرقی) در سال ۲۰۰۹ استفاده شد. همچنین تصاویر ماهواره‌ای به صورت روزانه برای سال ۲۰۰۹ (بیش از ۳۰۰ تصویر) دانلود و الگوریتم‌های مورد نظر روی هر دو سری داده اجرا شد.

ب) استخراج، آماده‌سازی و پردازش تصاویر

در این تحقیق تصاویر بازتابندگی سطحی تصحیح شده سنجنده MODIS در دو باند مرئی (باند ۱ در محدوده ۶۴۸ nm) و مادون قرمز نزدیک (باند ۲ در محدوده ۸۵۸ nm) که تحت عنوان MOD09QG با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر، با گام‌های زمانی روزانه و

² <https://reverb.echo.nasa.gov>

³

https://disc.gsfc.nasa.gov/giovanni/additional/users-manual/G3_manual_Chapter_20_GLDAS

پیکسل‌های سرد و گرم از یک مفهوم لبه سرد و گرم با استفاده از پراکنش نقطه‌ای شاخص گیاهی f_c در برابر دمای سطح زمین (LST) استفاده می‌کند. روش سوم SM-SEBAL روشی است که در این تحقیق توسعه داده شده است و مشابه M-SEBAL عمل می‌کند با این تفاوت که تعیین لبه گرم با روش متفاوت و بسیار ساده-تری انجام می‌گیرد. نتایج حاصل از این سه روش با یکدیگر و نیز با داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی مقایسه و در بخش نتایج تحلیل شده‌اند.

روش SEBAL

الگوریتم SEBAL یک روش برآورد ET است که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای از طریق محاسبه‌ی بیلان انرژی سطح زمین به محاسبه ET می‌پردازد. در ادامه این روش به صورت خلاصه شرح داده خواهد شد. در روش SEBAL تبخیر و تعرق به عنوان باقیمانده بیلان انرژی زمین محاسبه می‌شود:

$$R_n = G + H + LE \quad (1)$$

که در آن LE شار گرمای نهان، R_n شار گرمای خالص، G شار گرمای خاک و H شار گرمای محسوس است (واحدها بر حسب W/m^2 می‌باشد). تابش خالص به صورت تفاوت بین تابش ورودی و خروجی در همه‌ی طول موجها تعریف می‌شود. طبق تعریف این ترم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_n = (1-\alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1-\varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

که در آن α آلبیدوی سطحی، $R_{S\downarrow}$ تابش موج کوتاه ورودی (W/m^2)، $R_{L\downarrow}$ تابش موج بلند ورودی (W/m^2)، $R_{L\uparrow}$ تابش موج بلند خروجی (W/m^2)، ε_0 گسیلمندی سطحی باند پهن (بدون بعد) می‌باشد. تابش ورودی موج کوتاه، شار تابش خورشیدی مستقیم و پراکنده است که واقعاً به زمین می‌رسد. Bastiaanssen (2000)، نسبت G_0/R_n برای نیمه روز با استفاده از معادله تجربی زیر ارائه نمود.

$$\frac{G}{R_n} = \frac{LST}{\alpha} \times [0.0032 \times a + 0.0062 \times a^2] \times [1 - 0.978 \times NDTV^4] \quad (3)$$

تصاویر، انجام اصلاحات، اجرای الگوریتم‌ها و تولید و نمایش خروجی‌ها) توسط کد نویسی در محیط نرم افزار MATLAB انجام شده است.

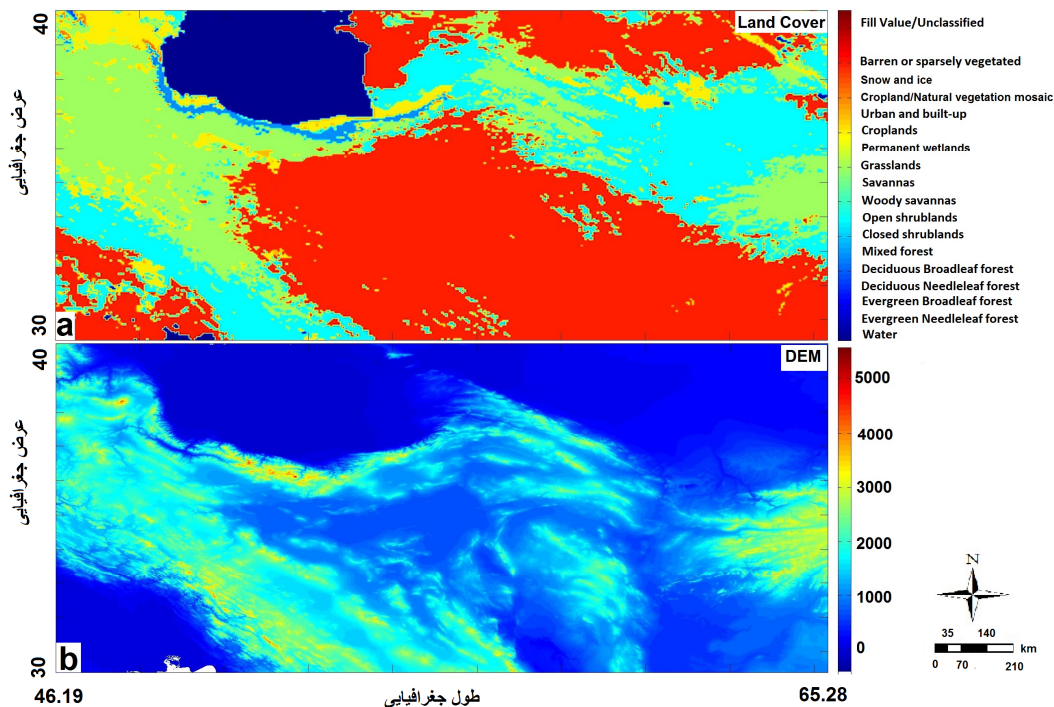
ج) داده‌های مشاهده‌ای

داده‌های مشاهده‌ای شامل داده‌های لایسیمتر وزنی و داده‌های حاصل از سنجش اجزای بیلان انرژی در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج در سال ۲۰۰۹ می‌باشد. محل دقیق اجرای تعیین اجزای بیلان انرژی مزرعه‌ای به ابعاد ۴۰ در ۶۰ متر می‌باشد. این لایسیمتر در مزرعه‌ای با وسعت بیش از ۵ هکتار قرار گرفته است و پوشش یکنواختی با مزرعه داشته و به یک میزان آبیاری می‌شود. شمالی از موقعیت کلی مزرعه در شکل ۲ نمایش داده شده است.

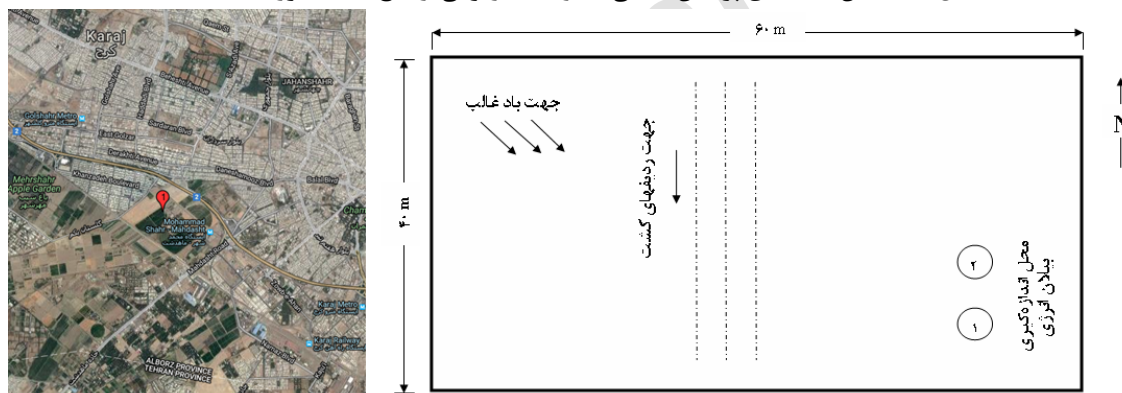
تجهیزات اندازه‌گیری بیلان انرژی شامل یک رادیومتر خالص برای اندازه‌گیری شار تابش خالص، دو حسگر صفحه شار حرارتی برای اندازه‌گیری شار گرمای ورودی به سطح خاک و یک مجموعه از حسگرها برای اندازه‌گیری نسبت بون می‌باشد. دو تکرار (که با شماره‌های ۱ و ۲ در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند)، برای استقرار تجهیزات و اندازه‌گیری اجزای بیلان انرژی به فاصله ۵ متر از یکدیگر منظور شد. مقدار تابش خالص موجود در مزرعه توسط رادیومتر خالص مدل (CNR1, Kipp&Zonnen) با قرارگیری در ارتفاع ۱ متری بالای آسمانه گیاهی اندازه‌گیری شد. شار گرمای ورودی به سطح خاک نیز با قرارگیری صفحات شار حرارتی (MF-180M, EKO Japan) در ۲ سانتی‌متری زیر سطح خاک، یکی در روی ردیف‌های کشت و دیگری در بین ردیف‌های کشت، اندازه‌گیری شد. تمامی داده‌ها توسط دستگاه دیتالاگر (CR23X, Campbell Scientific Inc.) هر دقیقه یکبار اندازه‌گیری و میانگین ۳۰ دقیقه‌ای آن ذخیره شده است.

د) استخراج تبخیر تعرق واقعی

برای استخراج تبخیر و تعرق واقعی به کمک سنجش از دور، در این تحقیق از سه روش استفاده شده است. روش اول روش موسوم به SEBAL می‌باشد. روش دوم M-SEBAL نام دارد که در آن با تغییر روش تعیین



شکل (۱): نمایش نقشه‌های پوشش گیاهی (a) و نقشه راقومی ارتفاع منطقه مورد مطالعه (b)



شکل (۲): شمائی از موقعیت کلی مزرعه و محل‌های اندازه‌گیری بیلان انرژی مزرعه تحقیقاتی کرج (۲۰۰۹)

برای انتقال گرما (s/m) می‌باشد. Z_1 ارتفاع دقیقاً بالای جابجایی سطح صفر برای پوشش گیاهی، Z_2 مقدار کمی بالای سطح جابجایی صفر می‌باشد. در SEBAL مقادیر 0.1 برای Z_1 و 2 متر برای Z_2 در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه شارگرما محسوس به صورت زیر عمل می‌کنیم. مقاومت آیرودینامیک برای انتقال گرما از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u_* \times k} \quad (5)$$

که در آن LST دمای سطحی (°C) و α آلبیدوی سطحی می‌باشد. در نهایت شار گرما محسوس که عبارتست از میزان هدر رفت گرما به هوا به وسیله جریان همرفتی و هدایت مولکولی به علت اختلاف دما، با استفاده از معادله زیر برای انتقال گرما محاسبه می‌شود:

$$H = \frac{\rho \cdot C_p \cdot dT}{r_{ah}} \quad (4)$$

که در آن ρ چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا (1.014 kJ/kg/K)، dT اختلاف دمای بین دو ارتفاع (Z_1 و Z_2) بر حسب درجه‌ی کلون و r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی

است که در آن ET وجود نداشته و $H=Rn-G$. انتخاب پیکسل گرم از انتخاب پیکسل سرد مشکل تر است. زیرا با توجه به دما پیکسلهای زیادی برای پیکسل گرم مورد توجه هستند. در پیکسل سرد، شار گرمای محسوس از رابطه ی زیر برآورد می شود.

$$H_{cold} = R_n - G - LE_{cold} \quad (8)$$

بر اساس تجارب به دست آمده در ایالت آیداهو نشان داده شد که در پیکسل سرد ET حدوداً ۰.۵٪ بیشتر از ET گیاه مرجع یا ET_r می باشد. در نتیجه ET_{cold} را می توان $ET_r \times ۱.۰۵$ فرض نمود. بنابراین H_{cold} از رابطه ی $H_{cold} = R_n - G - 1.05K_c \cdot LE_r$ محاسبه می شود. K_c ضریب گیاهی پوشش پیکسل مورد نظر است. dT_{cold} نیز از رابطه ی زیر به دست می آید.

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

در پیکسل گرم، شار گرمای محسوس از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$H_{hot} = R_n - G - LE \quad (10)$$

ET_{hot} برای یک پیکسل گرم که از مزارع بدون پوشش گیاهی و با لایه خاک خشک انتخاب می شود، صفر فرض می شود. شار گرمای محسوس در پیکسل گرم (H_{hot}) از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$H_{hot} = R_n - G \quad (11)$$

$$dT_{hot} = H_{hot} \times r_{ah-hot} / (\rho_{hot} \times c_p) \quad (12)$$

با استفاده از ضرایب همبستگی بین نقاط (LST_{hot} , dT_{hot}) و (LST_{cold} , dT_{cold}) ضرایب a و b در فرمول ۷ محاسبه می شود. برای محاسبه اثرات نیروی ارشمیدس که به دلیل گرمای سطح به وجود می آید، SEBAL از تئوری مونین-بوخوف در یک فرآیند تکراری استفاده می کند. شرایط پایداری اتمسفر اثرات زیادی در مقاومت آبرودینامیک دارد که باید در محاسبه شار گرمای محسوس، به خصوص در شرایط خشک، مورد توجه قرار گیرد. SEBAL از فرآیند تکراری برای حل H استفاده می کند تا مقدار مقاومت آبرودینامیک ثابت شود. مقادیر

در این رابطه u_* سرعت اصطکاکی بر حسب متر در ثانیه، k ثابت ون کارمن (۰/۴۱) است. سرعت اصطکاکی نوسانات تلاطمی سرعت را در هوا کمی می کند. u_* نیز از رابطه ی زیر به دست می آید.

$$u_* = \frac{k \times u_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{0m}}\right)} \quad (6)$$

u_x سرعت باد در ارتفاع z_x بر حسب متر در ثانیه، z_{0m} طول زبری مومنتم (متر) است. z_{0m} مقدار مقاومت پوسته برای لایه ای از هواست که با نزدیکی زمین در تماس است که در این تحقیق به روش ارائه شده توسط Bastiaansen et al. (1998a and 1998b) محاسبه شده است. سرعت اصطکاکی در ایستگاه هواشناسی برای شرایط اتمسفری خنثی با استفاده از معادله ۶ محاسبه می شود. فرض شرایط اتمسفری خنثی برای ایستگاه هواشناسی در صورتی که اطراف ایستگاه توسط گیاهان خوب آبیاری شده احاطه شده باشد، معقول است.

برای محاسبه شار گرمای محسوس، نیاز به اختلاف دمای نزدیک سطح داریم که با استفاده از $dT=Tz_1-Tz_2$ تعیین می شود. دمای هوا در هر پیکسل مشخص نیست و بنابراین در مدل SEBAL با فرض وجود یک رابطه خطی بین dT و LST ، مقادیر dT را برای هر پیکسل محاسبه می نماید.

$$dT = b + aLST \quad (7)$$

که در آن a و b ضرایب همبستگی می باشند. مدل SEBAL از دو پیکسل شاخص برای مشخص کردن شرایط مرزی در معادله بیلان انرژی و تعیین ضرایب a و b استفاده می کند. این دو پیکسل شاخص، تحت عنوان پیکسل های سرد و گرم نامیده می شوند و در منطقه مورد مطالعه قرار دارند. پیکسل سرد از مزارع با پوشش گیاهی کامل و کاملاً آبیاری شده انتخاب می شود که در آن دمای سطحی و دمای هوای نزدیک به سطح برابر فرض می شوند و پیکسل گرم از اراضی بدون پوشش و خشک انتخاب می شود. بر اساس روش SEBAL، تبخیر و تعرق گیاه در پیکسل سرد، $ET_r \times ۱.۰۵$ در نظر گرفته می شود. ET_r از معادله ی پنمن-مانتیت محاسبه می شود. در این صورت داریم $ET=Rn-G-1.05ET_r$ پیکسل گرم جایی

مکان پیکسل‌ها با نقشه کاربری اراضی یا نقشه‌های پوشش گیاهی مقایسه می‌شود تا اشتباهی در انتخاب این پیکسل‌ها صورت نگیرد. پس از محاسبه H ، شار گرمای نهان (LE) از رابطه ۱ محاسبه شده و توسط معادله زیر میزان لحظه‌ای ET به صورت عمق تبخیر محاسبه می‌شود.

$$ET_{ins} = 3600 \times \frac{LE}{\lambda} \quad (15)$$

در این رابطه ET_{ins} تبخیر تعرق لحظه‌ای (mm/hr)، λ گرمای نهان بخار آب (J/kg) و عدد ۳۶۰۰ ضریب تبدیل زمان از ثانیه به ساعت است. مقادیر ۲۴ ساعته تبخیر و تعرق از طریق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$ET_{24} = ET_r F \times ET_{r-24} \quad (16)$$

$$ET_r F = \frac{ET_{ins}}{ET_r} \quad (17)$$

در این رابطه ET_{r-24} ، ET روزانه گیاه مرجع و $ET_r F$ کسر تبخیر تعرق مرجع است که به صورت نسبت ET لحظه‌ای به ET مرجع در زمان تصویر برداری تعریف می‌شود.

روش M_SEBAL

مراحل محاسبه تبخیر و تعرق با این روش، تا مرحله محاسبه شار گرمای محسوس (رابطه ۴) کاملاً مشابه SEBAL است. برای استخراج ضرایب a و b در رابطه ۷، از مفهومی تحت عنوان لبه سرد و لبه گرم استفاده می‌شود و بر اساس آن به ازای هر کلاس از مقادیر f_c رابطه (۱۸) یک ضریب a و b منحصر به فرد استخراج می‌نماید. لبه سرد معادل دمای میانگین هوای منطقه تصویر برداری و لبه گرم بر اساس روابطی که خواهد آمد و تعیین دو دمای $T_{s,max}$ و $T_{c,max}$ روی نمودار پراکنش نقطه‌ای دمای هوا در برابر f_c (شاخص پوشش گیاهی) رسم خواهد شد (شکل ۴). بنابراین رابطه ۷ با رابطه ۱۹ جایگزین می‌شود.

$$f_{c_j} = 1 - \left(\frac{NDVI_{max} - NDVI_j}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^{0.625} \quad (18)$$

اصلاحی سرعت اصطکاکی و مقاومت آیرودینامیک به قرار زیر خواهد بود:

$$u_* = \frac{k \times u_{200}}{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right) - \psi_{m(200)}} \quad (13)$$

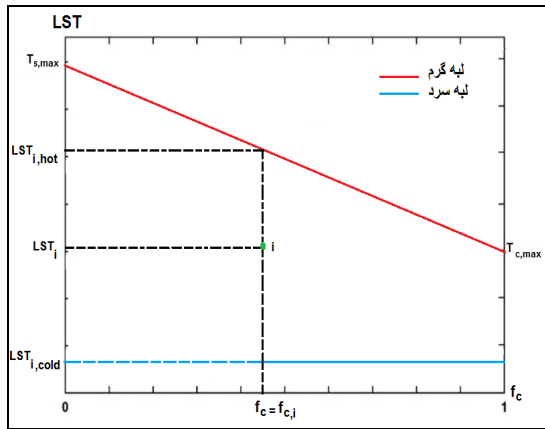
$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \psi_{h(z_2)} + \psi_{h(z_1)}}{u_* \times k} \quad (14)$$

هر یک از پارامترهای این دو روش توسط معادلاتی برآورد می‌شود (Bastiaanssen et al., 1998a). مقادیر اصلاح شده نهایی برای شار گرمای محسوس (H) در هر پیکسل محاسبه شده و در معادله بیلان انرژی برای محاسبه ET لحظه‌ای در هر پیکسل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

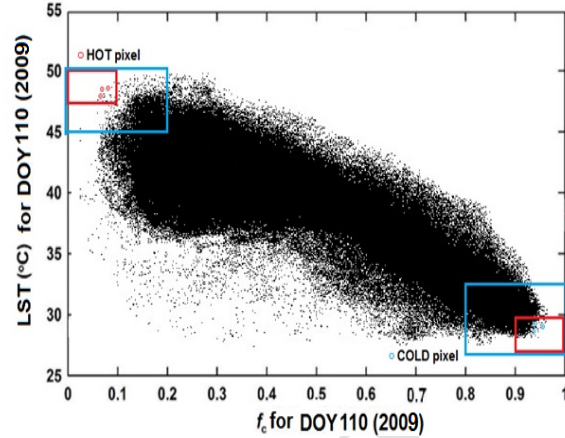
در این تحقیق از روش کمکی ارائه شده توسط Long and Singh (2010) برای تعیین پیکسل‌های سرد و گرم استفاده شد و برای این منظور پراکنش نمایه گیاهی f_c در برابر دمای سطح زمین بکار گرفته شد.

با توجه به تعداد زیاد تصاویر و وجود امکان مقایسه، از پیکسل‌هایی استفاده شده است که در ۸۰ درصد وقایع (تصاویر) دمای این پیکسل‌ها از محدوده ۱۰ درصدی حداکثر و حداقل f_c برای دماهای حداقل و حداکثر در این محدوده تجاوز نکرده باشد. همچنین در سایر موارد نیز بیش از ۱۰ درصد مقدار دما و f_c از محدوده مورد نظر فاصله نگرفته باشند.

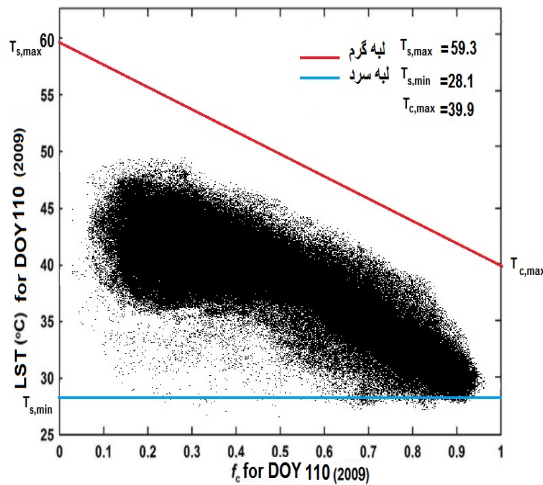
به عنوان مثال اگر دمای سطح زمین در منطقه بین ۲۶ تا ۴۹ درجه سانتیگراد در نوسان باشد، ده درصد از این فاصله حدود ۲/۵ درجه خواهد بود. بنابراین پیکسل‌هایی به عنوان پیکسل سرد و گرم برای هر تصویر انتخاب می‌شوند که علاوه بر واجد شرایط بودن بر اساس شرایط Bastiaanssen et al. (1998a and 1998b)، در ۸۰ درصد از کل تصاویر موجود در محدوده مستطیل‌های قرمز قرار داشته باشند (محدوده ۲/۵ درجه سردترین و گرمترین پیکسل‌ها) و در باقی موارد از مستطیل آبی (محدوده ۵ درجه سردترین و گرمترین پیکسل‌ها) خارج نشوند (شکل ۳). سردترین (برای پیکسل سرد) و گرمترین (برای پیکسل گرم) پیکسلی که در شرایط مذکور بگنجد به عنوان پیکسل سرد و گرم انتخاب خواهد شد. سپس



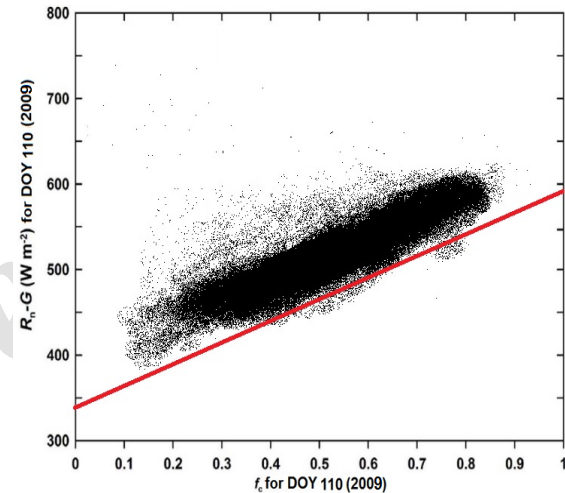
شکل (۴): نمایش لبه‌های سرد و گرم در روش M-SEBAL و چگونگی تعیین برخی پارامترهای مورد نیاز در محاسبات برای پیکسل فرضی i



شکل (۳): نمایش نمونه پراکندگی نمایه گیاهی fc در برابر دمای سطح زمین و محدوده‌های جستجوی برای پیکسل‌های سرد و گرم (روز ژوئیه ۱۱ سال ۲۰۰۹)



شکل (۶): نمایش نمونه نمودار fc -LST برای روز ژوئیه ۱۱ سال ۲۰۰۹ و لبه سرد و گرم استخراج شده به کمک الگوریتم M-SEBAL



شکل (۵): نمایش نمودار پراکندگی تفاضل تابش خالص رسیده و گرمای زمین در برابر نمایه گیاهی fc و خط برازش داده شده مقادیر حداقل دما برای روز ژوئیه ۱۱ سال ۲۰۰۹

که در آن $LST_{i,hot}$ و $LST_{i,cold}$ مقدار دمای سطح زمین ($^{\circ}C$) به ترتیب در لبه گرم و سرد در کلاس fc که هر پیکسل در آن قرار دارد خواهد بود. مقدار $R_{ni,hot}-G_{ihot}$ بر اساس خط برازش داده شده از مقادیر حداقل از رابطه پراکندگی نقطه‌ای fc در برابر مقادیر R_n-G برای هر کلاس (i) مشخص می‌شود (شکل ۵). $\rho_{i,hot}$ چگالی هوای گرم ترین پیکسل واقع در کلاس i (kg/m^3)، و c_p گرمای ویژه‌ی هوا ($J/Kg/K$) است. برای تعیین مقاومت آیرودینامیک برای هر کلاس، $f_{ahi,hot}$ بر اساس رابطه ۱۳ و ۱۴ تعیین می‌شود با این تفاوت که مقدار Z_{om} بر اساس

که در آن $NDVI_{max}$ و $NDVI_{min}$ حداکثر و حداقل مقادیر مشاهده شده $NDVI$ و $NDVI_j$ مقدار $NDVI$ در پیکسل j می‌باشد.

$$dT_i = b_i + a_i LST \quad (19)$$

که در آن i به مقدار یا کلاس fc اشاره دارد. مقادیر a_i و b_i به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$a_i = \frac{r_{ahi,hot}}{\rho_{i,hot} c_p} \times \frac{R_{ni,hot} - G_{ihot}}{LST_{i,hot} - LST_{i,cold}} \quad (20)$$

$$b_i = -a_i LST_{i,cold} \quad (21)$$

نمودار پراکنش نقطه‌ای LST-fc برازش داده شده و به اندازه گرمترین پیکسل به سمت بالا شیفت داده می‌شود (شکل ۸). از این رو دیگر نیاز به ترسیم نمودار آلبیدو در برابر fc (شکل ۷) و نیز روابط ۲۲ تا ۲۶ نخواهد بود. در بخش نتایج به بررسی تاثیر این روش بر نتایج و مقایسه آن با دو روش SEBAL و M-SEBAL پرداخته شده است.

۵) ارزیابی آماری

برای مقایسه آماری بین داده‌های مشاهده‌ای و الگوریتم‌های سه گانه بکار رفته در این تحقیق از سه شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین درصد خطای مطلق (MAPD) و مجموع اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و شبیه سازی شده (Bias) به شرح زیر استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (27)$$

$$MAPD = 100 \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \quad (28)$$

$$Bias = \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (29)$$

همچنین برای مقایسه میانگین مقادیر بدست آمده از سه روش SEBAL، M-SEBAL و SM-SEBAL از آزمون مقایسه میانگین دانکن در دو سطح ۱ و پنج درصد استفاده شده است. این مقایسات در هر مقطع زمانی (هر لایه تصویر) به صورت جداگانه انجام شده است که با توجه به تعداد بسیار زیاد پیکسل‌ها و لایه‌ها، در قالب یک کد در نرم افزار MATLAB نوشته شده و بکار رفته است.

نتایج و بحث

در شکل ۹ نمونه‌ای از نقشه‌های استخراج شده از اجرای الگوریتم SEBAL را برای روز ژوئوسی ۲۰۸ سال ۲۰۰۹ را مشاهده می‌کنید. لازم به ذکر است که مقادیر Rn و G برای سه الگوریتم مشترک و مقادیر H و LE هر الگوریتم متفاوت از دیگری خواهد بود و در این شکل تنها نتایج حاصل از اجرای الگوریتم SEBAL

مقدار fc متوسط در هر کلاس مشخص می‌شود.

برای تعیین مقدار $T_{s,max}$ و $T_{c,max}$ و رسم لبه های سرد و گرم (شکل ۶) از روابط زیر استفاده خواهد شد:

$$T_{s,max} = \frac{R_{n,s0}}{4\varepsilon_s \sigma T_a^3 + \rho c_p / [r_{a,s}(1-c)]} + T_a \quad (22)$$

$$T_{c,max} = \frac{R_{n,c0}}{4\varepsilon_c \sigma T_a^3 + \rho c_p / r_{a,c}} + T_a \quad (23)$$

که در آن T_a دمای هوای میانگین تمامی پیکسل‌ها، ε_s برابر ۰/۹۵ (Tasumi, 2003)، مقدار c برابر ۰/۳۵ خواهد بود. مقادیر $\Gamma_{a,s}$ و $\Gamma_{a,c}$ براساس معادلاتی مشابه رابطه ۱۳ و ۱۴ استخراج خواهد شد (Long and Singh, 2012). مقدار $R_{n,c0}$ و $R_{n,s0}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{n,s0} = (1 - \alpha_s) S_d + (\varepsilon_a - 1) \varepsilon_s \sigma T_a^4 \quad (24)$$

$$R_{n,c0} = (1 - \alpha_c) S_d + (\varepsilon_a - 1) \varepsilon_c \sigma T_a^4 \quad (25)$$

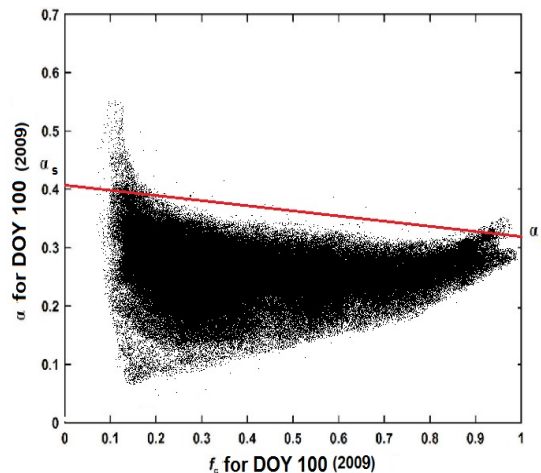
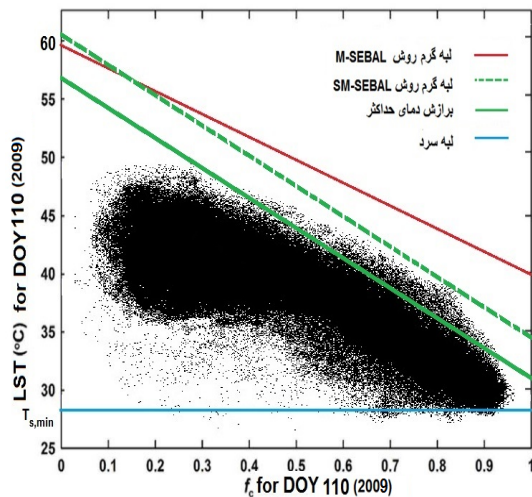
که در آن ε_c برابر ۰/۹۷۸ و مقدار S_d بر اساس رابطه ۲۵ تعیین می‌شود:

$$S_d = \frac{G_{sc}}{d_r^2} \cos(\theta) \tau_{ws} \quad (26)$$

همچنین مقادیر α_s و α_c از محل برخورد خط برازش مقادیر حداکثر آلبیدو به ترتیب با محور $fc=0$ و $fc=1$ در نمودار پراکنش نقطه ای آلبیدو-fc بدست می‌آیند (شکل ۷).

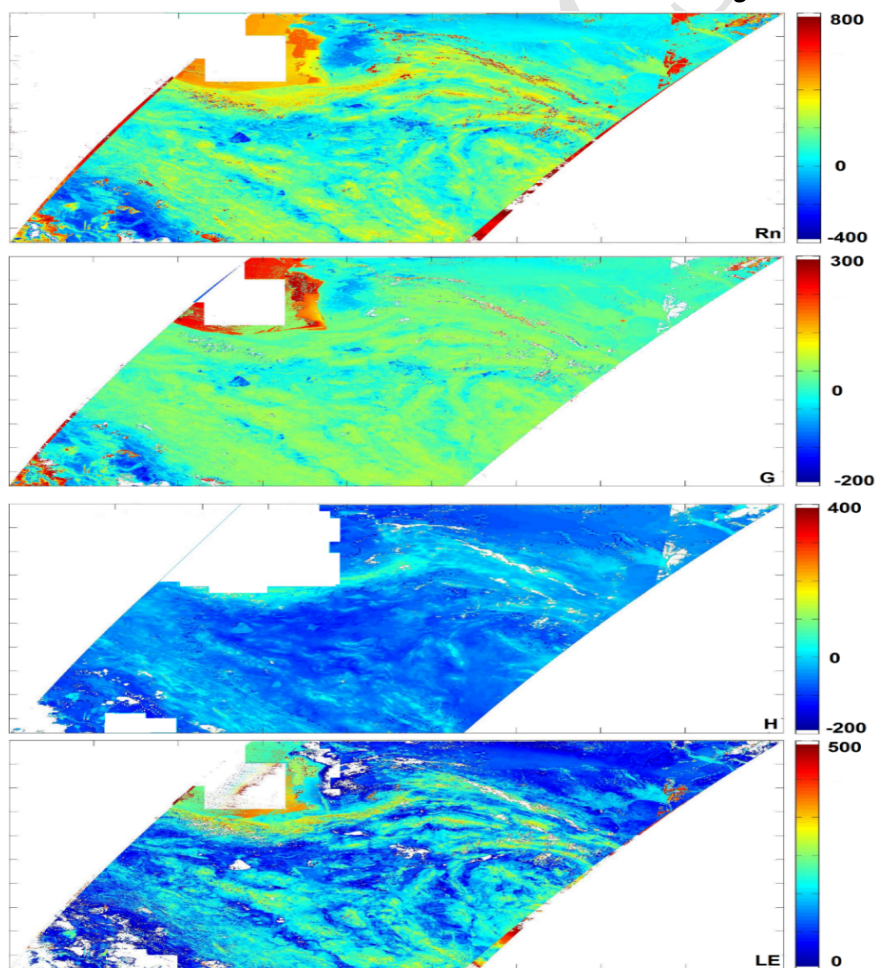
روش SM_SEBAL

همانطور که شرح داده شد، مزیت روش SEBAL اصلاح شده (M-SEBAL) نسبت به SEBAL در این است که برای هر کلاس پوشش گیاهی ضرایب متفاوتی را برای رابطه ۷ تعیین می‌کند و نیازی به انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم ندارد. با این حال تعیین لبه گرم در این روش نیز نیاز به محاسبات زیادی دارد. از این رو در تحقیق حاضر روش ساده‌تری توسعه داده شد (SM-SEBAL: Simplified M-SEBAL) تا پیچیدگی های انتخاب لبه گرم را نداشته باشد و از مزایای M-SEBAL نیز برخوردار باشد. در این روش، خط برازش لبه گرم به سادگی بر اساس حداکثر مقادیر دمای سطح زمین در

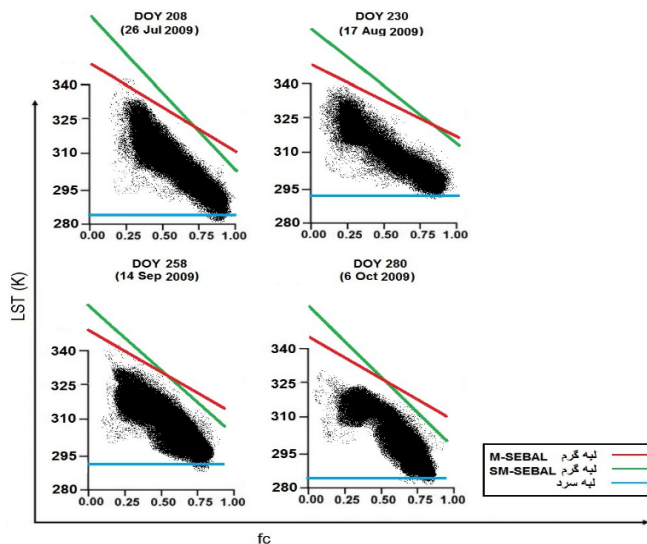


شکل (۸): مقایسه خط برازش داده شده به روش SM-SEBAL در برابر لبه گرم در روش M-SEBAL

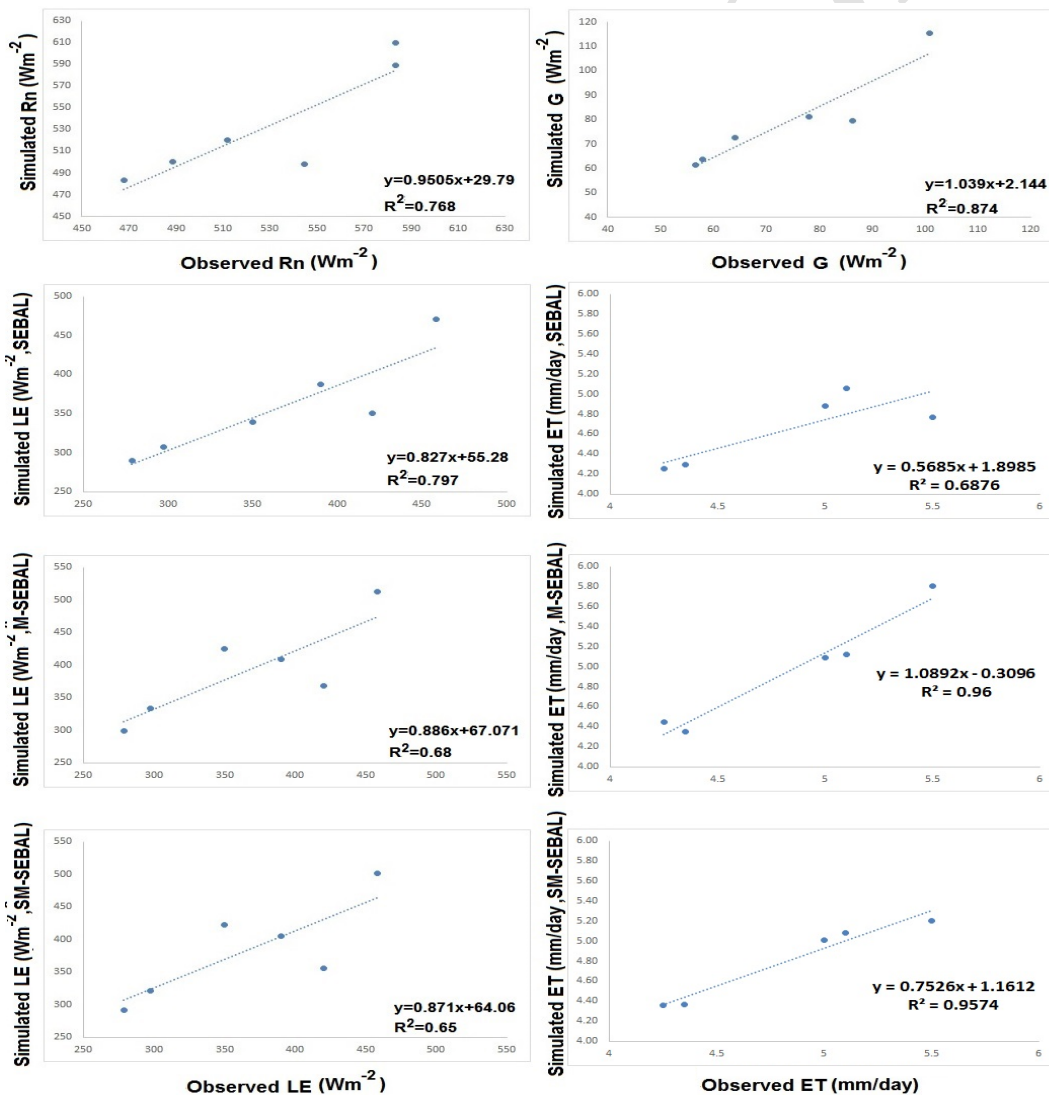
شکل (۷): نمایش نمودار پراکنش نقطه‌ای مقادیر آلبیدو در برابر نمایه گیاهی f_c و خط برازش داده شده مقادیر حداکثر آلبیدو به منظور تعیین مقادیر حدی آلبیدو در روز ژولیوسی ۱۰۰ سال ۲۰۰۹



شکل (۹): نمونه ای از نقشه‌های پراکنش مکانی اجزای بیلان انرژی که از الگوریتم SEBAL استخراج شده است (روز ژولیوسی ۲۰۸ سال ۲۰۰۹)



شکل (۱۰): نمونه‌هایی از نمودارهای پراکنش نقطه‌ای LST-fc و لبه سرد گرم استخراج شده در روزهای مختلف



شکل (۱۱): مقادیر مشاهده‌ای در برابر مقادیر شبیه سازی شده پارامترهای بیلان انرژی و تبخیر و تعرق

Wang et al. و (2006) Xiong et al.، (2000) Morse et al. (2003) می باشد و با نتایج Trezza (2002) همخوانی دارد. دلیل این امر به احتمال زیاد دقت در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم و اعمال شرایط سخت گیرانه نسبت به انتخاب این دو پیکسل در تحقیق حاضر است. همانطور که پیشتر هم اشاره شد، انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم می‌تواند تا ۲۰ درصد در نتایج اختلاف ایجاد کند (Paul et al., 2013). یکی دیگر از دلایل خطای کم مشاهده شده در این تحقیق می‌تواند استفاده از سنجنده MODIS بجای استفاده از سنجنده‌های با تفکیک مکانی بالاتر باشد (Long et al., 2011). همچنین پوشش وسیع تصاویر MODIS که بخش‌های مختلف پوشش گیاهی و تنوع اقلیمی را در بر می‌گیرد و امکان انتخاب دقیق تر پیکسل‌های سرد و گرم را فراهم می‌کند نیز می‌تواند مزید بر علت شود.

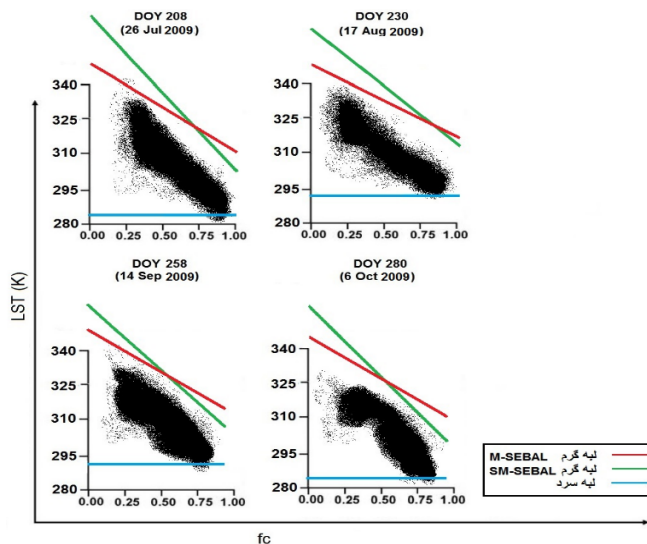
مقایسه مقادیر RMSE نشان می‌دهد که بیشترین دقت در برآورد H مربوط به روش SM-SEBAL (RMSE=6.83) و کمترین دقت مربوط به روش M-SEBAL (RMSE=12) می‌باشد. همچنین کمترین مقدار مشاهده شده RMSE برای پارامتر LE مربوط به روش SEBAL (RMSE=31.08) و حداکثر اختلاف مربوط به روش M-SEBAL (RMSE=47.12) می‌باشد. همچنین در برآورد تبخیر و تعرق روزانه، نتایج دو روش M-SEBAL و SM-SEBAL میزان مشابهی از مقادیر RMSE را نشان می‌دهند (به ترتیب ۰/۱۷ و ۰/۱۴) و برای روش SEBAL مقدار RMSE تقریباً دو برابر و به میزان ۰/۳۳ بدست آمده است.

همچنین بیشترین میزان همبستگی بین داده‌های مشاهده‌ای و نتایج مربوط به H و کمترین میزان همبستگی مربوط به مقادیر LE می‌باشد. مقادیر همبستگی بین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های اندازه گیری شده نتایج Ruhoff et al. (2012) را تایید می‌کند. مطالعه مقادیر Bias نشان می‌دهد که دو روش M-SEBAL و SM-SEBAL مقادیر H را کم برآورد و الگوریتم SEBAL این پارامتر را بیش برآورد می‌کند. عکس این نتایج در بررسی مقادیر LE بدست می‌آید. بدین ترتیب که دو روش SM-SEBAL و M-SEBAL بیش برآورد و SEBAL کم برآورد را در مقادیر LE نتیجه

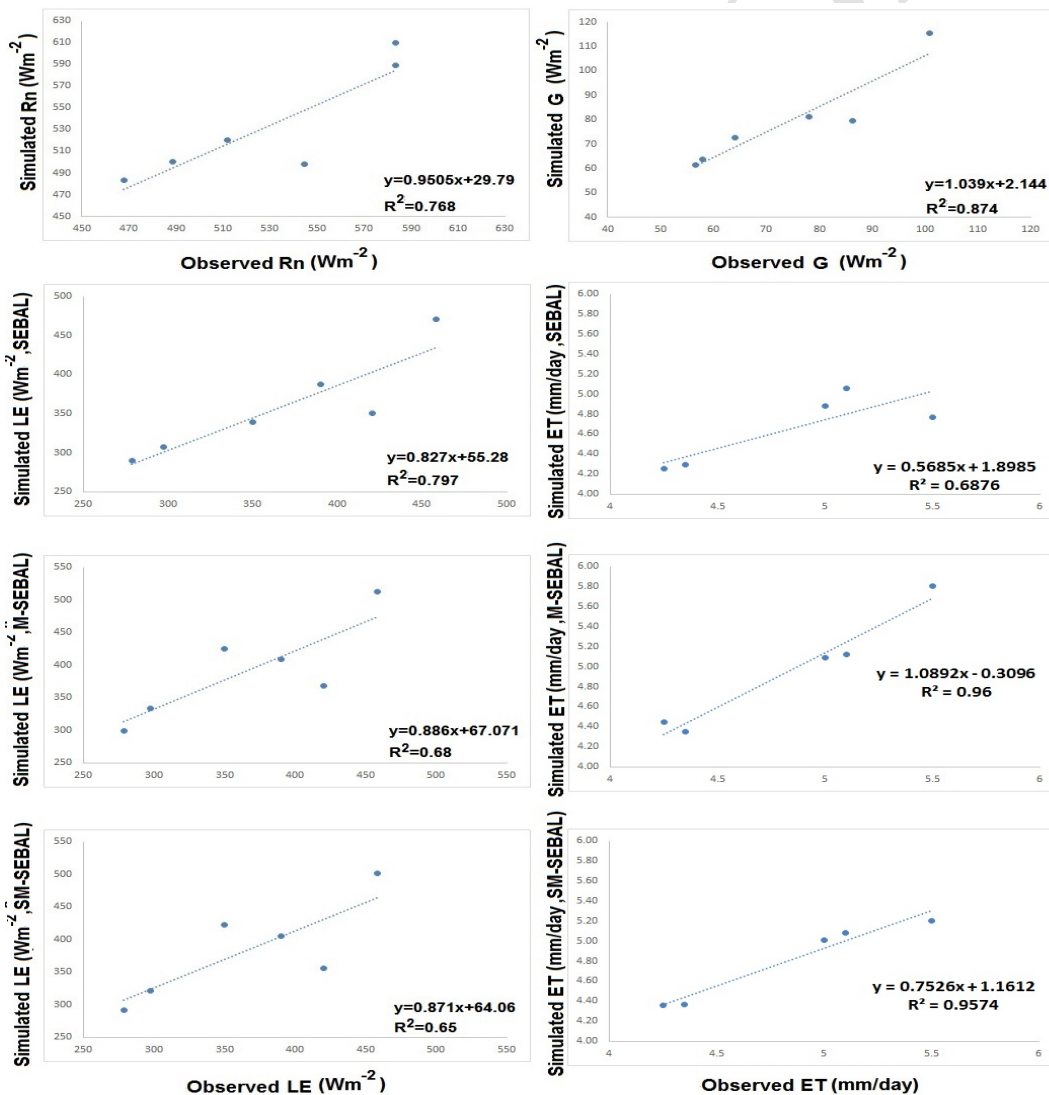
نمایش داده شده است. همچنین نمونه‌ای از نمودارهای پراکنش نقطه‌ای fc-LST و خط طول لبه سرد و گرم دو الگوریتم M-SEBAL و SM-SEBAL برای روزهای مختلف در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

در جدول ۱ مقادیر مشاهده‌ای اجزای بیلان انرژی و مقادیر تبخیر و تعرق نمایش داده شده است. این داده‌ها مربوط به منطقه مورد مطالعه (مزرعه تحقیقاتی کرچ) در سال ۲۰۰۹ است. همچنین در جدول ۲ مقادیر پارامترهای مذکور که از سه الگوریتم مورد مطالعه استخراج شده‌اند و نیز سه پارامتر آماری RMSE، MAPD و Bias نمایش داده شده است. شکل ۱۱، نمودارهای پراکنش نقطه‌ای اجزای بیلان انرژی و مقادیر تبخیر و تعرق مشاهده شده در برابر مقادیر محاسبه شده قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که مقادیر Rn و G در هر سه روش به یک شکل محاسبه شده و مقادیر یکسانی استخراج شده است.

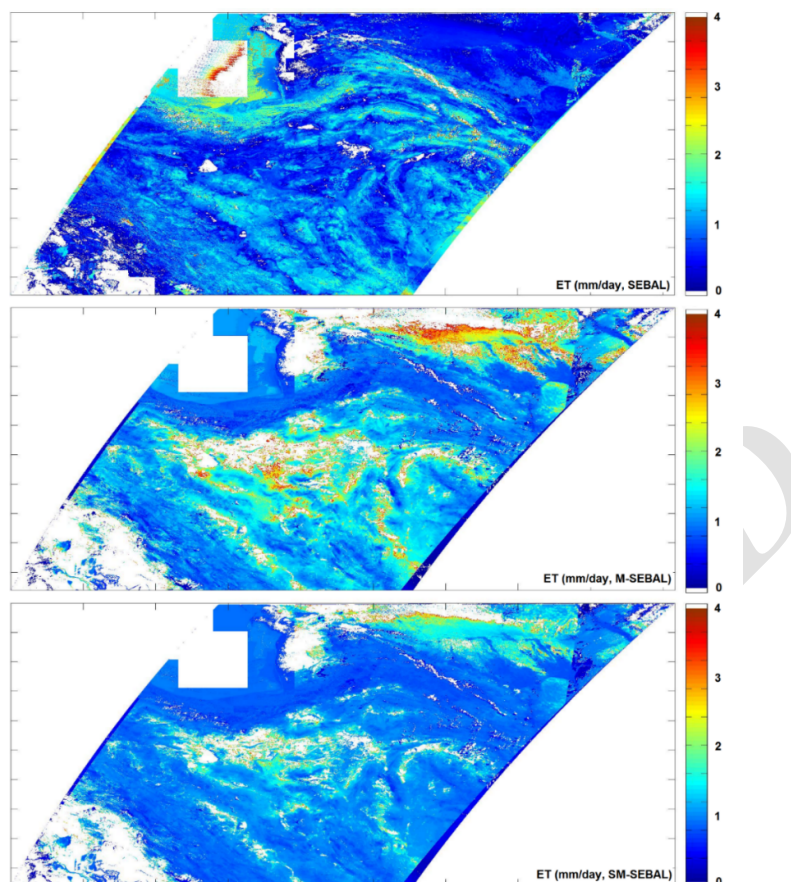
همانطور که در جدول ۲ و شکل ۱۱ قابل مشاهده است، توانایی الگوریتم‌ها در برآورد Rn و G نسبتاً قابل قبول بوده و خطای پایینی خصوصاً در مقادیر Rn مشاهده می‌شود. همچنین هردو پارامتر بین ۲۰ الی ۳۰ واحد بیش برآورد را نسبت به داده‌های مشاهده‌ای از خود نشان می‌دهند. بیشترین در صد خطا (MAPD) را در نتایج شار گرمای محسوس (H) شاهد هستیم (۲۱/۶ درصد میانگین خطای هر سه روش). بیشترین خطای محاسبه H مربوط به روش M-SEBAL با ۳۳/۸۷ درصد و کمترین میزان خطا مربوط به نتایج روش SEBAL (۱۱/۲۳ درصد) می‌باشد. همچنین بیشترین میزان خطا در محاسبه گرمای نهان تبخیر (LE) مربوط به روش M-SEBAL (۱۱/۶۶ درصد) و کمترین میزان خطا مربوط به روش SEBAL (۵/۰۵ درصد) می‌باشد. با این حال حداکثر خطا در مقادیر تبخیر تعرق روزانه در نتایج روش SEBAL (۳/۵۶ درصد) و کمترین میزان خطا در روش SM-SEBAL (۱/۸۱) و سپس در روش M-SEBAL (۲/۴۷ درصد) مشاهده شد. خطای مشاهده شده در میزان تبخیر تعرق واقعی در روش M-SEBAL بسیار کمتر از مقادیر گزارش شده توسط Long and Singh (2012)، (خطای ۶/۳ درصدی) در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. همچنین خطای محاسبه ET در روش SEBAL کمتر از مقادیر گزارش شده توسط Allen et al. (2001)،



شکل (۱۰): نمونه‌هایی از نمودارهای پراکنش نقطه‌های fc -LST و لبه سرد و گرم استخراج شده در روزهای مختلف



شکل (۱۱): مقادیر مشاهده‌ای در برابر مقادیر شبیه سازی شده پارامترهای بیلان انرژی و تبخیر و تعرق



پراکنش جغرافیایی مقادیر تبخیر و تعرق واقعی (mm/day) استخراج شده از سه الگوریتم SEBAL، M-SEBAL و SM-SEBAL (روز ژولیوسی ۲۰۸ سال ۲۰۰۹)

جدول (۱): مقادیر اندازه‌گیری شده اجزای بیلان انرژی و تبخیر و تعرق در لایسمتر کرج

روز ژولیوسی	موقعیت جغرافیایی	Rn (Wm-2)	G (Wm-2)	H (Wm-2)	LE (Wm-2)	ET (mm/day)
۳۵/۳۵N ۵۱/۵۳E		۵۸۳/۴	۶۴/۱۵	۲۲۱/۹۳	۲۹۷/۲۲	-
۳۵/۳۵N ۵۱/۵۳E		۴۸۸/۸	۱۰۰/۸۳	۱۰۹/۵۲	۲۷۸/۴۵	۴/۲۵
۳۵/۳۵N ۵۱/۵۳E		۵۴۴/۸	۸۶/۳۷	۱۰۸/۴۸	۳۴۹/۹۵	۴/۳۵
۳۵/۳۵N ۵۱/۵۳E		۵۱۱/۸	۵۶/۵۵	-۳/۴۸	۴۵۸/۳۳	۵
۳۵/۳۵N ۵۱/۵۳E		۴۶۷/۸	۷۸/۰۲	۰	۳۸۹/۸۸	۵/۱
۳۵/۳۵N ۵۱/۵۳E		۵۸۳/۴	۵۸/۰۲	۱۰۴/۸۵	۴۲/۵۲	۵/۵

نتایج SEBAL گزارش کرده بودند همخوانی ندارد. همچنین روش SM-SEBAL میزان ۰/۱۸ میلیمتر کم برآورد و روش M-SEBAL میزان ۰/۶۱ میلیمتر بیش برآورد را در نتایج تبخیر تعرق از خود نشان می‌دهند. با وجود دقت بالا و خطای نسبتاً کم بدست آمده در این تحقیق برای هر سه الگوریتم مورد استفاده، نمی‌توان بر اساس داده‌های مشاهده‌ای محدودی که در اختیار بود از دقت و قابل استفاده بودن آنها در سایر مناطق نیز

می‌دهد. اگرچه مقادیر درصد خطا و RMSE مشابهی برای روش M-SEBAL در مقادیر LE با گزارش Long and Singh (2012) مشاهده می‌شود، اما میزان بیش برآورد LE در روش M-SEBAL (Bias=152) بسیار بیشتر از مقدار گزارش شده توسط آنها می‌باشد (Bias=-). (4.4)

الگوریتم SEBAL مقادیر تبخیر تعرق را تا ۱ میلیمتر بر روز کم برآورد کرده است که با نتایج Hendrickx and Hong (2005) که بیش برآورد را در

جدول (۲): مقادیر محاسبه شده اجزای بیلان انرژی و مقادیر تبخیر تعرق بدست آمده از سه الگوریتم

SEBAL، M-SEBAL و SM-SEBAL متناظر با مقادیر جدول ۱

روز ژولوسی	Rn (Wm-2)	G (Wm-2)	H (Wm2, SEBAL)	H (Wm-2, M-SEBAL)	H (Wm-2, SM-SEBAL)	LE (Wm2, SEBAL)	LE (Wm-2, M-SEBAL)	LE (Wm-2, SM-SEBAL)	ET (mm/day, SEBAL)	ET (mm/day, M-SEBAL)	ET (mm/day, SM-SEBAL)
	۵۸۹/۲۵	۷۲/۵۴	۲۳۰/۰۰	۲۰۱/۳۸	۲۰۹/۵۷	۳۰۷/۱۷	۳۳۳/۱۶	۳۲۱/۲۱	-	-	-
	۵۰۰/۴۰	۱۱۵/۴۳	۱۲۱/۴۵	۱۰۰/۰۰	۱۱۱/۴۰	۲۹۰/۱۱	۲۹۸/۵۴	۲۹۱/۸۴	۴/۲۵	۴/۴۵	۴/۳۶
	۴۹۸/۳۷	۷۹/۶۹	۱۱۰/۴۶	۹۲/۱۳	۹۸/۲۷	۳۳۹/۶۰	۴۲۵/۵۰	۴۲۲/۳۷	۴/۲۹	۴/۳۵	۴/۳۷
	۵۲۰/۲۵	۶۱/۵۳	-۱/۷۱	۲/۲۰	۰/۰۰	۴۷۰/۶۴	۵۱۲/۰۰	۵۰۱/۴۵	۴/۸۸	۵/۰۹	۵/۰۱
	۴۸۳/۵۰	۸۱/۳۳	۱۲/۰۰	-۳/۰۰	-۲/۰۰	۳۸۸/۰۰	۴۰۹/۴۱	۴۰۴/۶۱	۵/۰۶	۵/۱۲	۵/۰۸
	۶۰۹/۵۸	۶۳/۷۹	۱۰۵/۰۰	۹۷/۵۵	۱۰۳/۰۰	۳۵۰/۲۹	۳۶۸/۴۳	۳۵۵/۲۴	۴/۷۷	۵/۸۰	۵/۲۰
R ²	۰/۷۶۸	۰/۸۷۴	۰/۹۹۶	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	۰/۷۹۷	۰/۶۸	۰/۶۵	۰/۶۹	۰/۹۶	۰/۹۶
RMSE	۲۳/۵۵	۸/۱۴	۷/۷۳	۱۲/۰۷	۶/۸۳	۳۰/۰۸	۴۷/۲۱	۴۵/۳۴	۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۱۴
MAPD	۳/۵۷	۹/۷۱	۱۱/۲۳	۳۳/۸۷	۱۹/۷۴	۵/۰۵	۱۱/۶۶	۱۰/۳۸	۳/۵۶	۲/۴۷	۱/۸۱
Bias	۲۱/۳۵	۳۰/۳۷	۳۵/۹۰	-۵۱/۰۴	-۲۱/۰۶	-۴۸/۶۵	۱۵۲/۵۸	۱۰۲/۲۶	-۰/۹۵	۰/۶۱	-۰/۱۸

توان در انتخاب میانگین دمای هوای روزانه بجای لبه سرد جستجو کرد. بسیاری از پیکسل‌ها خصوصا در مقادیر f_c بالای ۰/۷۵ زیر خط لبه سرد قرار می‌گیرند. با این حال Long and Singh (2012) تاثیر این واقعه در تخمین صحیح تبخیر و تعرق نسبت به حساسیت SEBAL در برابر انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم را ناچیز برشمرده‌اند. الگوریتم SM-SEBAL، احتمالا به دلیل پایین‌تر بودن خط لبه گرم برای بخش وسیعی از دامنه تغییرات f_c نسبت به M-SEBAL، مقادیری بین دو الگوریتم را بدست می‌دهد.

همچنین اجرای روش SEBAL (از مرحله اعمال تصحیحات روی تصویر تا دریافت خروجی) توسط نرم افزار MATLAB علاوه بر زمانی که برای یافتن پیکسل‌های سرد و گرم نیاز دارد، با یک کامپیوتر پیشرفته چهار هسته‌ای حدود ۴۰ دقیقه برای هر تصویر (هر تصویر حاوی بیش از ۲۳ میلیون پیکسل) زمان می‌برد. این زمان محاسبه برای دو روش M-SEBAL حدود ۱۰ دقیقه و برای SM-SEBAL حدود ۷ دقیقه برای هر تصویر است که در مقایسه با زمان محاسبه الگوریتم SEBAL بسیار کمتر است. دلیل این تفاوت فاحش در میانگین زمان اجرای کد بین سه روش احتمالا حذف مرحله سعی و خطا برای یافتن مقادیر H در دو روش M-SEBAL و SM-SEBAL می‌باشد.

اطمینان حاصل کرد. نمونه‌ای از نقشه‌های پراکنش جغرافیایی تبخیر و تعرق برای روز ژولوسی ۲۰۸ سال ۲۰۰۹ در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل قابل مشاهده است، الگوی پراکنندگی مکانی مقادیر تبخیر و تعرق بدست آمده از روش‌های M-SEBAL و SEBAL تشابه بالایی دارند و تفاوت بارزی با الگوی پراکنندگی نتایج حاصل از SEBAL خصوصا در نواحی مرتفع از خود نشان می‌دهند. این تفاوت الگو در سایر روزها خصوصا در ماه‌های سرد سال (روزهای ژولوسی ۲۵۰ تا ۳۶۵ و ۱ تا ۶۰) نیز کمابیش قابل مشاهده است. آزمون مقایسه میانگین دانکن به ترتیب در ۷۳/۰۹ درصد و ۶۹/۸ درصد از روزهای مورد مطالعه، مقادیر تبخیر تعرق بدست آمده از M-SEBAL و SM-SEBAL را به طور معناداری (در سطح ۱ درصد) بیشتر از مقادیر مشابه بدست آمده از روش SEBAL نشان می‌دهد. همچنین در ۴۴/۹ درصد از روزهای مورد مطالعه، میزان مقادیر بدست آمده از روش M-SEBAL به طور معناداری (در سطح ۵ درصد) بیشتر از مقادیر متناظر در روش SM-SEBAL استخراج شده است. این اختلاف میانگین در مقادیر f_c بین ۰/۳ تا ۰/۶ به حداقل می‌رسد و به نظر می‌رسد نتایج سه روش در نواحی با پوشش گیاهی مناسب و در فصول کشت بسیار به هم نزدیک است.

دلیل این تفاوت الگو را علاوه بر بالاتر بودن لبه گرم در هر دو روش M-SEBAL و SM-SEBAL نسبت به پیکسل گرم در روش SEBAL در نمودار f_c -LST می‌-

based energy balance to reference evapotranspiration. In Earth Observation for Vegetation Monitoring and Water Management (AIP Conference Proceedings) (Vol. 852, pp. 127-137.)

3) Allen, R. G., 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.

4) Allen, R., Irmak, A., Trezza, R., Hendrickx, J. M., Bastiaanssen, W., & Kjaersgaard, J. (2011). Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrological Processes*, 25(26), 4011-4027.

5) Allen, R. G., Morse, A., Tasumi, M., Bastiaanssen, W., Kramber, W., & Anderson, H. (2001). Evapotranspiration from Landsat (SEBAL) for water rights management and compliance with multi-state water compacts. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS'01. IEEE 2001 International* (Vol. 2, pp. 830-833). IEEE.

6) Al Zayed, I.S., Elagib, N.A., Ribbe, L., and Heinrich, L. (2016). Satellite-based evapotranspiration over Gezira Irrigation Scheme, Sudan: A comparative study. *Agricultural Water Management* 177: 66–76.

7) Akbari, M., Toomanian, N., Droogers, P., Bastiaanssen, W.G.M., Gieske, A., 2007. Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran, using NOAA satellite imagery. *Agric. Water Manage.* 88, 99–109.

8) Bandara KMPS (2006) Assessing irrigation performance by using remote sensing. Doctoral thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands

9) Bastiaanssen, W.G.M.; Menenti, M.; Feddes, R.A.; Holtslag, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *J. Hydrol.* 1998a, 212–213, 198–212.

10) Bastiaanssen, W.G.M.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Ma, Y.; Moreno, J.F.; Roerink, G.J.; van der Wal, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. *J. Hydrol.* 1998b, 212–213, 213–229.

11) Bastiaanssen, W.G.M., Hoekman, D.H. & Roebeling, R.A. 1994. A methodology for the assessment of surface resistance and soil water storage variability at mesoscale based on remote sensing measurements, a

نتیجه گیری

در این تحقیق، تصاویر و داده‌های مورد نیاز برای اجرای سه الگوریتم محاسبه تبخیر و تعرق واقعی SEBAL، M-SBAL و SM-SEBAL برای سال ۲۰۰۹ به صورت روزانه دانلود و شده و بعد از اعمال تصحیحات مختلف توسط کد نوشته شده در نرم افزار MATLAB سه الگوریتم مذکور بر اساس این داده‌ها به اجرا در آمد. نتایج به صورت بیش از ۳۰۰ لایه نقشه‌های پراکنش مکانی برای هر نوع خروجی (ET, Rn, G, LE و ...) استخراج و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

همچنین دو الگوریتم SEBAL و M-SEBAL و نیز الگوریتمی که در این تحقیق توسعه داده شده بود (SM-SEBAL) به کمک تصاویر سنجنده MODIS بر روی منطقه وسیعی اجرا و سپس با یکدیگر و نیز با داده‌های مشاهده‌ای زمینی در دو مزرعه تحقیقاتی در کرج و کرمان مقایسه شد.

نتایج نشان داد که برای دو منطقه مذکور، هر سه روش از دقت مناسبی در برآورد میزان تبخیر و تعرق واقعی برخوردار بودند. با این حال روند ساده الگوریتم M-SEBAL و الگوریتم ساده شده آن یعنی SM-SEBAL نه تنها دقت بالاتری را از خود در تخمین مقادیر تبخیر و تعرق و نیز اجزای بیلان از خود نشان دادند بلکه زمان بسیار کمتری را در محاسبات و نیز حجم کمتری از معادلات و روابط را برای نمایش خروجی از نیاز دارند. همچنین از امکان خودکار سازی اجرای الگوریتم برخوردار هستند که الگوریتم SEBAL به دلیل نیاز به جستجوی کاربر برای یافتن پیکسل‌های سرد و گرم فاقد این امکان است. همچنین الگوریتم SM-SEBAL به دلیل سادگی بیشتر نسب به دو روش SEBAL و M-SEBAL در عین حفظ دقت، می‌تواند جایگزین مناسبی برای هر دو روش باشد.

منابع

- 1) Ahmad, M. D., Biggs, T., Turrall, H., & Scott, C. A. (2006). Application of SEBAL approach and MODIS time-series to map vegetation water use patterns in the data scarce Krishna river basin of India. *Water science and technology*, 53(10), 83-90.
- 2) Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2006, August). Benefits from tying satellite-

- measure evapotranspiration (ET). In Irrigation and Drainage Conference 2009.
- 22) El Magd, I. A., & Tanton, T. (2005). Remote sensing and GIS for estimation of irrigation crop water demand. *International Journal of Remote Sensing*, 26(11), 2359-2370.
- 23) Engman, E.T. and Gurney, R.J. (1991). *Remote Sensing in Hydrology*, Chapman and Hall, London, UK.
- 24) Farah, H.O. (2001). Estimation of regional evaporation using a detailed agro-hydrological model. *Journal of Hydrology*, 229(1-2), 50-58.
- 25) French, A. N., Jacob, F., Anderson, M. C., Kustas, W. P., Timmermans, W., Gieske, A., ... & Brunsell, N. (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(1), 55-65.
- 26) Guimarães Santos, C.A., da Silva, R.M., Silva, A.M., and Brasil Neto, R.M. (2017). Estimation of evapotranspiration for different land covers in a Brazilian semi-arid region: A case study of the Brigida River basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, doi: 10.1016/j.jsames.2017.01.002.
- 27) Granger, R.J. Satellite-derived estimates evapotranspiration in the Gediz basin. *J. Hydrol.* 2000, 229, 70-76.
- 28) Hemakumara, H. M., Chandrapala, L., & Moene, A. F. (2003). Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer. *Agricultural water management*, 58(2), 109-122.
- 29) Hendrickx, J. M., & Hong, S. H. (2005, May). Mapping sensible and latent heat fluxes in arid areas using optical imagery. In *Defense and Security* (pp. 138-146). International Society for Optics and Photonics.
- 30) Hong, S., Hendrickx, J. M., & Allen, R. G. (2008, December). Comparison of Remote Sensing Energy Balance Models: Sebal VS Metric. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 1, p. 1094).
- 31) Immerzeel, W.W., Gaur, A., Zwart, S.J., 2008. Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a South Indian catchment. *Agric. Water Manage.* 95 (1), 11-24.
- case study with HAPEX-EFEDA data, IAHS Special Publications no. 2, IAHS Press, Institute of Hydrology, Wallingford, UK: pp. 66.
- 12) Bastiaanssen, W.G.M., E.J.M. Noordman, H. Pelgrum, G. Davids, B.P. Thoreson, and R.G. Allen. 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering* 131:85-93.
- 13) Bastiaanssen, W. G. M., Wal, T. van der and Visser, T. N. M.: 1996, Diagnosis of regional evapo-transpiration by remote-sensing to support irrigation performance assessment, *Irr. Drainage Syst.* 10(1), 1-24.
- 14) Bastiaanssen, W.G.M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229, 87-100.
- 15) Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M.D. and Chemin, Y. (2002). Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus. *Water Resources Research*, 38(12), 1273, 1-9.
- 16) Bhattarai, N., Shaw, S.B., Quackenbush, L.J., Im, J., and Niraula, R. (2016). Evaluating five remote sensing based single-source surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in a humid subtropical climate. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 49: 75-86
- 17) Chemin, Y., Platonov, A., Ul-Hassan, M., & Abdullaev, I. (2004). Using remote sensing data for water depletion assessment at administrative and irrigation-system levels: case study of the Ferghana Province of Uzbekistan. *Agricultural Water Management*, 64(3), 183-196.
- 18) Dorji, M. (2003). Integration of SWAP model and SEBAL for evaluation of on-farm irrigation scheduling with minimum field data. *Enschede, ITC*, 100.
- 19) Droogers, P., & Bastiaanssen, W. (2000). Combining remote sensing and hydrological models to enhance spatial and temporal variability. *IAHS-AISH PUBL.*, (267), 574-579.
- 20) Duffie J.A and W.A. Beckman. 1991. *Solar engineering of thermal process*. 2nd Ed. John Wiley and sons, NY
- 21) Evans, R., Bastiaanssen, W. G. M., Molloy, R., Hulbert, S., & Miltenburg, I. (2009, October). Improving the picture for irrigation using SEBAL in Australia to

- 42) Long, D., & Singh, V. P. (2012). A modified surface energy balance algorithm for land (M²SEBAL) based on a trapezoidal framework. *Water Resources Research*, 48(2).
- 43) Long, D., Singh, V. P., & Li, Z. L. (2011). How sensitive is SEBAL to changes in input variables, domain size and satellite sensor?. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 116(D21)
- 44) Mahmoud, S.H., and Alazba, A.A. (2016). A coupled remote sensing and the Surface Energy Balance based algorithms to estimate actual evapotranspiration over the western and southern regions of Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*. (Article in press):
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.05.012>
- 45) Mallick, K., Bhattacharya, B. K., & Patel, N. K. (2009). Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(8), 1327-1342.
- 46) Marx, A., H. Kunstmann, D. Schüttemeyer, and A. F. Moene (2008), Uncertainty analysis for satellite derived sensible heat fluxes and scintillometer measurements over Savannah environment and comparison to mesoscale meteorological simulation results, *Agr. Forest Meteorol.*, 148(4), 656–667.
- 47) Melesse, A. M., and V. Nangia (2005), Estimation of spatially distributed surface energy fluxes using remotely sensed data for agricultural fields, *Hydrol. Processes*, 19(14), 2653–2670.
- 48) Morse, A., Tasumi, M., Allen, R.G., Kramber, W.J., 2000. Application of the SEBAL Methodology for Estimating Consumptive Use of Water and Stream flow Depletion in the Bear River Basin of Idaho Through Remote Sensing [R]. Final report submitted to the Raytheon Systems Company, Earth Observation System Data and Information System Project, by Idaho Department of Water Resources and University of Idaho.
- 49) Norman, J.M.; Anderson, M.C.; Kustas, W.P. Are single-source, remote-sensing surface-flux models too simple? In *Earth Observation for Vegetation Monitoring and Water Management*, D'Urso, G., Osann, Jochum, M.A., Moreno, J., Eds. American Institute of Physics: Melville, New York, USA, 2006; Volume 852, pp. 170-177.
- 32) Jian-ying, Y., Xu-rong, M., Zhi-guo, H., Chang-rong, Y., Hui, J., Feng-hua, Z., and Qin, L. (2015). Water consumption in summer maize and winter wheat cropping system based on SEBAL model in Huang-Huai-Hai Plain, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(10): 2065–2076.
- 33) Keshavarz, M. R., Vazifedoust, M., Alizadeh, A., Ansari, H., and Davari, K. (2011). Using S-SEBI and remote sensing to retrieve ET from vegetated lands. case study: Isfahan. *Journal of Irrigation engineering* (11):11-22. In Farsi.
- 34) Kleissl, J., S.-H. Hong, and J. M. H. Hendrickx (2009), New Mexico scintillometer network supporting remote sensing and hydrologic and meteorological models, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 90(2), 207–218.
- 35) Kite, G., and Droogers, P. 2000. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. *J Hydrol.* 229: 3–18.
- 36) Kustas WP, French AN, Hatfield JL, Jackson TJ, Moran MS, Rango A, Ritchie JC, Schumge TJ (2003) Remote sensing research in Hydrometeorology. *Photogrammetric Eng Remote Sensing* 69(6):631–646
- 37) Kustas, W.P., Norman, J.M. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrol. Sci. J.* 1996, 41, 495–516.
- 38) Kustas, W.P., Norman, J.M. Anderson, M. C., French, A.N. (2003) Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship. *Journal of Remote Sensing Environment.* 85: 429-440.
- 39) Li, Z., Liu, X., Ma, T., Kejia, D., Zhou, Q., Yao, B., and Niu, T. (2013). Retrieval of the surface evapotranspiration patterns in the alpine grassland-wetland ecosystem applying SEBAL model in the source region of the Yellow River, China. *Ecological Modelling* 270: 64–75
- 40) Liou, Y. and Kar, S.K., Evapotranspiration Estimation with Remote Sensing and Various Surface Energy Balance Algorithms—A Review, *Energies* 2014, 7, 2821-2849;
- 41) Long, D., & Singh, V. P. (2010). Integration of the GG model with SEBAL to produce time series of evapotranspiration of high spatial resolution at watershed scales. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 115(D21).

- 60) Senay, G.B., Budde, M., Verdin, J.P., Melesse, A.M., (2007). A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. *Sensors* 7 (6), 979–1000. <http://dx.doi.org/10.3390/s7060979>.
- 61) Senay, G.B., Bohms, S., Singh, R.K., Gowda, P.H., Velpuri, N.M., Alemu, H., Verdin, J.P. (2013). Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: a new parameterization for the SSEB approach. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 49 (3), 577–591. <http://dx.doi.org/10.1111/jawr.12057>.
- 62) Singh, R. K., A. Irmak, S. Irmak, and D. L. Martin (2008), Application of SEBAL model for mapping evapotranspiration and estimating surface energy fluxes in south-central Nebraska, *J. Irrig. Drain. Eng.*, 134(3), 273–285.
- 63) Spiliotopoulos M, Loukas A, Vasiliades L (2008) Actual evapotranspiration estimation from satellite-based surface energy balance model in Thessaly, Greece. EGU General Assembly, 13-18 April 2008, Vienna, Austria, Geophysical Research Abstracts: Vol 10
- 64) Su, Z. A Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes from point to continental scale. In *Advanced Earth Observation—Land Surface Climate*; Su, Z., Jacobs, J., Eds.; Publications of the National Remote Sensing Board (BCRS): Delft, The Netherlands, 2001; Volume 01–02, pp. 91–108.
- 65) Sun, Z., Wei, B., Su, W., Shen, W., Wang, C., You, D., & Liu, Z. (2011). Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3), 1086–1092.
- 66) Tang, R., and Li, Z.L. (2015). Evaluation of two end-member-based models for regional land surface evapotranspiration estimation from MODIS data *Agricultural and Forest Meteorology* 202: 69–82.
- 67) Tasumi, M., Trezza, R., Allen, R.G. and Wright, J.L. (2003). U.S. Validation tests on the SEBAL model for evapotranspiration via satellite. ICID Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions, Montpellier, France, 17 Sept. 2003.
- 68) Teixeira, A.H.D.C.; Bastiaanssen, W.G.M.; Ahmadd, M.D.; Bos, M.G. Reviewing SEBAL input parameters for
- 50) Oki, T. and Kanae, S., (2006) Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313, 1068–1072.
- 51) Opoku-Duah, S.; Donoghue, D.N.M.; Burt, T.P. (2008) Intercomparison of evapotranspiration over the Savannah Volta Basin in West Africa using remote sensing data. *Sensors*, 8, 2736–2761.
- 52) Papadavid, G., Hadjimitsis, D. G., Toullos, L., & Michaelides, S. (2013). A modified SEBAL modeling approach for estimating crop evapotranspiration in semi-arid conditions. *Water resources management*, 27(9), 3493–3506.
- 53) Patel, N. R., Rakhesh, D., & Mohammed, A. J. (2006). Mapping of regional evapotranspiration in wheat using Terra/MODIS satellite data. *Hydrological sciences journal*, 51(2), 325–335.
- 54) Paul, G., Gowda, P. H., Vara Prasad, P. V., Howell, T. A., Staggenborg, S. A., & Neale, C. M. (2013). Lysimetric evaluation of SEBAL using high resolution airborne imagery from BEAREX08. *Advances in Water Resources*, 59, 157–168.
- 55) Paul, G., Gowda, P.H., Vara Prasad, P.V., Howell, T.A., Aiken, R.M., and Neale, C.M.U. (2014). Investigating the influence of roughness length for heat transport (zoh) on the performance of SEBAL in semi-arid irrigated and dryland agricultural systems. *Journal of Hydrology* 509: 231–244.
- 56) Pelgrum, H. and Bastiaanssen, W. G.M.: 1996, An intercomparison of techniques to determine the area-averaged latent heat flux from individual in situ observations: a remote-sensing approach using the EFEDA data, *Water Resour. Res.* 32(9), 2775–2786.
- 57) Roerink, G.J., Bastiaanssen, W.G.M., Chambouleyron, J., Menenti, M., 1997. Relating crop water consumption to irrigation water supply by remote sensing. *Water Resour. Manag.* 11 (6), 445–465.
- 58) Ruhoff, A. L., Paz, A. R., Collischonn, W., Aragao, L. E., Rocha, H. R., & Malhi, Y. S. (2012). A MODIS-based energy balance to estimate evapotranspiration for clear-sky days in Brazilian tropical savannas. *Remote Sensing*, 4(3), 703–725.
- 59) Sari, D.K., Ismullah, I.H., Sulasdi, W.N., and Harto, A.B. (2013). Estimation of water consumption of lowland rice in tropical area based on heterogeneous cropping calendar using remote sensing technology. *Procedia Environmental Sciences* 17: 298 – 307.

- surface parameters in the oasis-desert systems of Northwest China. *Hydrol. Process.* 12, 2133–2147.
- 77) Wang, J., Gao, F., Liu, S., 2003. Remote sensing retrieval of evapotranspiration over the scale of drainage basin. *Remote Sensing Technology and Application* 18 (5), 332–338 (in Chinese.)
- 78) Wang J, Sammis T.W, Meier C.A, Simmons L.J, Miller D.R, Samani Z, 2006, A Modified SEBAL model for spatially estimating pecan consumptive water use for las cruces, New Mexico, Agronomy and Horticulture Departement, New Mexico State Univ. Las Cruces, New Mexico, USA.
- 79) Wu, C. D., Cheng, C. C., Lo, H. C., & Chen, Y. K. (2010). Application of SEBAL and Markov models for future stream flow simulation through remote sensing. *Water resources management*, 24(14), 3773-3797.
- 80) Xiong, J., Wu, B., Zhou, Y., Li, J., 2006. Estimating evapotranspiration using remote sensing in the Haihe Basin. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS IEEE International Conference.* pp. 1044–1047.
- 81) Zeng, L., Song, K., Zhang, B., Wang, Z., 2010, SPATIAL MAPPING OF ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION AND WATER DEFICIT WITH MODIS PRODUCTS IN THE SONGNEN PLAIN, NORTHEAST CHINA, IGARSS IEEE International Conference. pp. 879–882.
- 82) Zhou, X., Bi, S., Yang, Y., Tian, F., and Ren, D. (2014). Comparison of ET estimations by the three-temperature model, SEBAL model and eddy covariance observations. *Journal of Hydrology* 519: 769–776.
- assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part A: Application to the regional scale. *Agric. For. Meteorol.* 2009a, 149, 462-476.
- 69) Teixeira, A.H.D.C.; Bastiaanssen, W.G.M.; Ahmadd, M.D.; Bos, M.G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco river basin, Brazil art B: Application to the regional scale. *Agric. For. Meteorol.* 2009b, 149, 477-490 .
- 70) Thoreson, B., Clark, B., Soppe, R., Keller, A., Bastiaanssen, W., & Eckhardt, J. (2009, May). Comparison of evapotranspiration estimates from remote sensing (SEBAL), water balance, and crop coefficient approaches. In *Proceedings ASCE World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers.*
- 71) Timmermans, W.J., Meijerink, A.M.J., 1999. Remotely sensed actual evapotranspiration: implications for groundwater management in Botswana. *J. Appl. Geohydrol.* 1 (3/4), 222–233.
- 72) Timmermans, W. J., Kustas, W. P., Anderson, M. C., & 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(4), 369-384.
- 73) Trezza R (2002) Evapotranspiration using a satellite-based surface energy balance with standardized ground control. PhD Dissertation, Biological and Irrigation Engineering Department, Utah State University, Logan
- 74) Van den Hurk, B. J. J. M. (2001). Energy balance based surface flux estimation from satellite data, and its application for surface moisture assimilation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 76(1-2), 43-52.
- 75) Van Eekelen, M.W., Bastiaanssen, W.G.M., Jarmain, C., Jackson, B., Ferreira, F., van der Zaag, P., Saraiva Okello, A., Bosch, J., Dye, P., Bastidas-Obando, E., Dost, R.J.J., and Luxemburg, W.M.J. (2015). A novel approach to estimate direct and indirect water withdrawals from satellite measurements: A case study from the Incomati basin. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 200:126–142
- 76) Wang, J., Bastiaanssen, W.G.M., Ma, Y., Pelgrum, H., 1998. Aggregation of land