



ISSN 2251-7480

نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال دوم، شماره چهارم، تابستان ۱۳۹۲

ارزیابی مدل SEBAL برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از اطلاعات سنجنده‌های TM و MODIS**

الهه سیمایی^۱، مهدی همایی^{۲*} و علی اکبر نوروزی^۳

۱) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه خاک‌شناسی؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران؛ ۱۴۱۱۵-۳۳۶۰؛ ایران

۲*) استاد گروه خاک‌شناسی؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران؛ ۱۴۱۱۵-۳۳۶۰؛ ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: mhomaee@modares.ac.ir

۳) استادیار؛ پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری؛ تهران؛ ۱۴۱۱۵-۳۳۶۰؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۹/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۳/۳۰

چکیده

برآورد صحیح مقدار تبخیر و تعرق اهمیت زیادی در حفاظت بهینه از منابع آب موجود در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد. زیرا، تبخیر و تعرق بخش مهمی از بیابان آبی مناطق خشک و نیمه‌خشک است. هدف از این پژوهش، ارزیابی کارایی مدل SEBAL برای تخمین تبخیر و تعرق در یک منطقه نیمه خشک بود. این پژوهش در بخشی از حوزه آبخیز زنجان رود واقع در استان زنجان که کشت غالب آن گندم آبی و دیم است، انجام شد. با استفاده از تصاویر سنجنده‌های MODIS (Terra/Aqua) و TM (Landsat-5)، امکان استفاده از مدل SEBAL با داده‌های بدست آمده از سنجنده‌های مختلف طی ماه‌های خرداد تا مرداد ۱۳۸۷ بررسی شد. سپس تبخیر و تعرق روزانه برآورد شده توسط مدل SEBAL برای اراضی آبی و دیم زیر کشت گندم، با استفاده از ارقام دو تشتک تبخیر ارزیابی شد. نتایج آماره‌های ارزیابی نشان داد، مدل SEBAL از کارایی مناسبی برای تخمین تبخیر و تعرق واقعی اراضی زیر کشت گندم آبی ($RMSE=0.49-1.25$) و دیم ($RMSE=1.3-2.48$) برخوردار است. این مدل، تبخیر و تعرق اراضی آبی را در مقایسه با اراضی دیم با دقتی مطلوب‌تر برآورد نمود. همچنین، نتایج نشان داد که دقت تصاویر سنجنده TM دو و نیم برابر بیشتر از تصاویر MODIS می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سنجنده TM مستقر بر ماهواره Landsat می‌تواند با دقتی بیشتر نسبت به سنجنده MODIS مستقر بر ماهواره Terra مقدار تبخیر و تعرق واقعی را برای منطقه مورد مطالعه برآورد کند.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق؛ MODIS؛ SEBAL؛ TM

** برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد گروه خاک‌شناسی،

دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه

تبخیر و تعرق جزء مهمی از بیلان آب در مناطق خشک و نیمه خشک است و برآورد صحیح آن برای مدیریت بهینه منابع آبی کشور بسیار مهم است. در مناطق خشک ایران، هر ساله بیش از ۸۰ درصد از کل بارش سالانه ۸۰ میلیارد مترمکعبی آن، از راه تبخیر به نیوار باز می‌گردد (سپاسخواه، ۱۳۶۱). بنابراین هرگونه تلاش برای بهبود بازده مصرف آب باید بر پایه‌ی برآوردهای قابل اطمینان تبخیر و تعرق باشد. امروزه استفاده از فناوری سنجنش از دور^۲، با توجه به امکان برآورد مکانی اطلاعات و نیز به حداقل رساندن داده‌های هواشناسی، کاربردی فراگیر یافته است.

از بین روش‌های مطرح در زمینه استفاده از سنجنش از راه دور، روش‌های بیلان انرژی برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی بیشتر استفاده شده است. این روش، روش اندازه‌گیری باندهای مادون قرمز حرارتی، مادون قرمز نزدیک و مرئی داده‌های سنجنش از دور را به عنوان ورودی مؤلفه‌های معادله بیلان انرژی در محاسبه تبخیر و تعرق ارائه می‌دهد. مدل بیلان انرژی سطح زمین (SEBAL)، که نخستین مرتبه توسط Bastiaanssen و همکاران در سال ۱۹۹۸ ارائه شد، بر پایه روابط تجربی و فیزیکی، میزان تبخیر و تعرق واقعی را با حداقل داده‌های زمینی برآورد می‌نماید (Bastiaanssen et al., 1998). از جمله تحقیقاتی که در این زمینه صورت گرفته Tasumi و همکاران (۲۰۰۳) را می‌توان نام برد که طی یک بررسی، نتایج تبخیر و تعرق حاصل از روش SEBAL را با نتایج لایسیمتری در دو منطقه در آیداهو مورد مقایسه قرار دادند. نتایج مطالعات این محققان نشان داد که برآوردهای تبخیر و تعرق حاصل از روش SEBAL با نتایج اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر برای

محصولات کشاورزی در اقلیم‌های نیمه خشک به خوبی منطبق است. همچنین با انجام آنالیز حساسیت، گزارش کردند که روش‌های واسنجی درونی الگوریتم SEBAL، باعث می‌شود که در صورت انجام نشدن تصحیح اتمسفری نیز، برآوردهای رضایت بخشی از دمای سطح زمین و آلودگی به دست آید. برای مطالعه‌ی کارآیی سنجنده‌ها McCabe و Wood (۲۰۰۶) تأثیرات مقیاس بر تخمین تبخیر و تعرق را با استفاده از سنجنده‌های ماهواره‌ای گوناگون بررسی کردند. در پژوهش آن‌ها، درک نقش ناهمگنی و تأثیر آن بر رفتار شار سطحی بدست آمده توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی متفاوت بررسی شده است. تصاویر سنجنده‌های ETM+ (۶۰ متر)، ASTER (۹۰ متر)، و MODIS (۱۰۲۰ متر) و مدل SEBS برای تخمین مستقل تبخیر و تعرق به کار رفته اند و تبخیر و تعرق برآورد شده توسط این سنجنده‌ها با eddy covariance بر حوزه آبخیز Walnut Creek در Iowa مورد مقایسه قرار گرفت. هماهنگی بالایی بین سنجنده‌های ماهواره‌ای با بزرگنمایی بالا (ETM+ و ASTER) مشاهده شد. با وجود اینکه تخمین براساس MODIS قادر به تفکیک تأثیر ناهمگنی سطح در مقیاس مزرعه نبود، اما نتایج آن برای اهداف مدیریت آب و پیش‌بینی سیل مفید گزارش شده است. در مطالعه‌ای دیگر، Opoku-Duah و همکاران (۲۰۰۸) مدل SEBAL را با داده‌های سنجنش از دور گرفته شده از سنجنده‌های ASTER و MODIS برای تخمین تبخیر و تعرق منطقه ساوانا واقع در غرب آفریقا به کار بردند و نتایج حاصل با تبخیر و تعرق به دست آمده از تصاویر سنجنده ETM+ ماهواره Landsat مقایسه شد که طی این مقایسه، MODIS با ضریب تبیین ۰/۷۱ و میزان خطای ۲ میلی‌متر در روز نسبت به سنجنده ASTER عملکرد بهتری از خود نشان داد. در پژوهشی که در برزیل انجام شد، مقادیر تبخیر و

² Remote Sensing

های Landsat 5 TM و MODIS در یک اقلیم نیمه‌خشک بررسی شد.

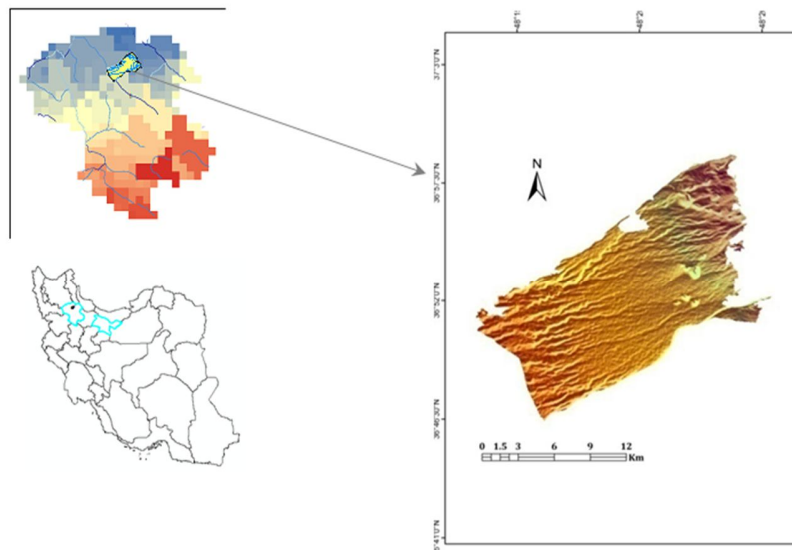
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از حوزه آبخیز سفیدرود و زیر-حوضه زنجانرود (دشت سهرین) می‌باشد که در سمت شمال غربی شهر زنجان واقع شده است. دشت سهرین که شامل اراضی کشاورزی و مرتع است، از شمال به کوه‌های طارم و از جنوب به زنجانرود و از شرق و غرب به آبراهه‌های سهرین و قره چریان محدود می‌گردد. وسعت منطقه مطالعاتی ۱۹۸/۱۶ کیلومتر مربع می‌باشد و از نظر موقعیت جغرافیایی بین ۴۸ درجه و ۱۳ دقیقه و ۲۰ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۲۶ دقیقه و ۲۵ ثانیه طول شرقی و بین ۳۶ درجه و ۴۶ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۵۸ دقیقه و ۴۰ ثانیه عرض شمالی واقع گردیده است.

تعرق را بر اساس مدل SEBAL و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS برای ارزیابی دقت مدل برآورد شد. تبخیر و تعرق برآورد شده لحظه‌ای و روزانه مدل SEBAL در مقایسه با نتایج همبستگی تلاطمی اراضی زیر کشت نیشکر و ساوانا تطابق خوبی داشتند. نتایج مقایسه مقادیر روزانه برای اراضی زیر کشت نیشکر و ساوانا به ترتیب $r^2=0.76$ و $r^2=0.66$ بودند. این محققان همچنین دریافتند شاخص پوشش گیاهی، گرادیان دما و تابش خالص خورشیدی حساس‌ترین ورودی‌های مدل هستند (Ruhoff *et al.*, 2012).

دستیابی به تصاویر بدون ابر طی فصل رشد از یک سنجنده با قدرت تفکیک مکانی زیاد مثل TM عملاً غیرممکن بوده و تصاویر با قدرت تفکیک زمانی زیاد MODIS اطلاعات کافی برای تصمیم‌گیری در زمینه منابع آب در اختیار مدیران نمی‌گذارند (Li *et al.*, 2008)، بنابراین در این پژوهش، امکان استفاده از مدل SEBAL و سنجنده-



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده
داده‌های هواشناسی مورد استفاده در این پژوهش شامل پارامترهای درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به صورت متوسط ۳ ساعته از سازمان هواشناسی کشور برای ایستگاه هواشناسی ماه‌نشان تهیه گردید. در این پژوهش از تصاویر سنجنده

داده‌های مورد استفاده
داده‌های هواشناسی مورد استفاده در این پژوهش شامل پارامترهای درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به صورت متوسط ۳ ساعته از سازمان هواشناسی کشور برای ایستگاه هواشناسی ماه‌نشان تهیه گردید. در این پژوهش از تصاویر سنجنده

جدول ۱- مشخصات باندهای انعکاسی سنجنده MODIS (Terra)

| باند | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۳۱ | ۳۲ |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| سایز پیکسل (m) | ۲۵۰ | ۲۵۰ | ۵۰۰ | ۵۰۰ | ۵۰۰ | ۵۰۰ | ۵۰۰ | ۱۰۰۰ | ۱۰۰۰ |
| پهنای باند (μm) | ۰/۶۲-۰/۶۷ | ۰/۸۴-۰/۸۷ | ۰/۴۶-۰/۴۸ | ۰/۵۴-۰/۵۶ | ۱/۲۳-۱/۲۵ | ۱/۶۳-۱/۶۵ | ۲/۱۱-۲/۱۵ | ۱۰/۸-۱۱/۳ | ۱۱/۸-۱۲/۳ |

جدول ۲- مشخصات باندهای انعکاسی سنجنده TM (Landsat)

| باند | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| سایز پیکسل (m) | ۳۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۱۲۰ | ۳۰ |
| پهنای باند (μm) | ۰/۴۵-۰/۵۲ | ۰/۵۲-۰/۶۰ | ۰/۶۳-۰/۶۹ | ۰/۷۶-۰/۹۰ | ۱/۵۵-۱/۷۵ | ۱۰/۴۲-۱۲/۵۰ | ۲/۰۸-۲/۳۵ |

که در آن، λET شار گرمای نهان (W/m^2)، R_n شار تابش خالص در سطح زمین (W/m^2)، G شار گرمای خاک (W/m^2) و H شار گرمای محسوس (W/m^2) می‌باشد.

رابطه (۱) با استفاده از ابزار ساخت مدل در محیط ERDAS در چندین مرحله (۲۵ معادله) قابل حل است. برای برآورد میزان تبخیر و تعرق واقعی، لازم است اجزای بیان انرژی به طور جداگانه (H و G ، R_n) در رابطه (۱) محاسبه و سپس شدت جریان گرمای نهان (λET) برآورد گردد و در نهایت به میزان تبخیر و تعرق (ET) تبدیل شود.

محاسبه تابش خالص خورشیدی (R_n)

تابش خالص خورشید بر اساس اصل بقای انرژی تعیین می‌شود که مطابق آن مجموع انرژی تابشی ورودی و خروجی از سطح زمین برابر با میزان تابش خالص است:

با توجه به گزارشات استان زنجان تاریخ تصاویر ماهواره‌ای دانلود شده منطبق بر تاریخ رشد گیاه غالب منطقه "گندم آبی" بوده و از آنجا که داده‌های تشتک تبخیر از اردیبهشت آغاز می‌شود، تصاویر مورد استفاده از اردیبهشت تا اواسط مرداد است.

الگوریتم توازن انرژی برای سطح زمین (SEBAL)

یکی از روش‌های مطرح در زمینه برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از فناوری سنجهش از دور و مبتنی بر بیان انرژی می‌باشد، که بر اساس ترکیبی از معادلات فیزیکی و روابط تجربی هستند. در مدل SEBAL، تبخیر و تعرق از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی با استفاده از رابطه بیان انرژی سطحی محاسبه می‌گردد:

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

انتخاب این دو پیکسل است، بنابراین باید پیکسل‌های سرد و گرم با دقت و مهارت انتخاب گردند. در انتخاب پیکسل‌های مذکور از عواملی چون دمای سطحی، آلبیدو و شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده می‌شود.

شار گرمای محسوس (H)

شار گرمای محسوس، میزان هدر رفت گرما به هوا، از طریق همرفت و هدایت مولکولی به علت وجود اختلاف دما می‌باشد که با استفاده از معادله‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

$$H = \frac{\rho \times c_p \times dT}{r_{ah}} \quad (4)$$

که در آن، ρ چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا (1004 J/kg/K)، dT (K) اختلاف دما (T_1-T_2) بین دو ارتفاع (Z_1-Z_2) و r_{ah} مقاومت آئروپونامیکی به انتقال گرما می‌باشد.

حل این رابطه به دلیل وجود دو مجهول dT و r_{ah} دشوار است. به منظور تسهیل محاسبات، از دو پیکسل سرد و گرم و سرعت باد در ارتفاع معین استفاده می‌شود. با توجه به اینکه r_{ah} تابعی از شار گرمای محسوس است، رابطه ۴ دارای حل صریح نمی‌باشد و باید به روش چرخه-ای حل گردد. بنابراین در مرحله اول از توابع پایداری صرف نظر می‌شود. به منظور اعمال تصحیحات پایداری، از طول مانین-آبخوف^۲ استفاده شد:

$$L = -\frac{\rho c_p u_*^3 T_s}{kgH} \quad (5)$$

که در آن، g شتاب جاذبه (9.8 m/s^2) و k ثابت Von Karman می‌باشد. دیگر پارامترها پیشتر معرفی شده‌اند.

مقادیر L شرایط پایداری اتمسفر را تعیین می‌کند. چنانچه $L < 0$ اتمسفر ناپایدار، اگر $L > 0$ اتمسفر پایدار، و اگر L برابر صفر باشد، اتمسفر خنثی در نظر گرفته می‌شود.

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

که در آن، α بازتابش سطح زمین (آلبیدوی سطحی)، $R_{s\downarrow}$ تابش موج کوتاه ورودی (۰/۳ تا ۳ میکرومتر) (W/m^2)، $R_{L\downarrow}$ تابش موج بلند ورودی (۳ تا ۱۰۰ میکرومتر) (W/m^2)، $R_{L\uparrow}$ تابش موج بلند خروجی (W/m^2) و ϵ_0 گسیلمندی سطحی عریض باند می‌باشد.

شدت جریان گرمای خاک

شدت جریان گرمای خاک میزان ذخیره گرمای داخل خاک و پوشش گیاهی در اثر هدایت مولکولی می‌باشد. در مدل SEBAL، ابتدا نسبت $\frac{G}{R_n}$ برای نیمه روز با استفاده از رابطه تجربی توسعه یافته توسط Bastiaanssen (۲۰۰۰) محاسبه می‌شود:

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} \times [0.0032 \times \alpha + 0.0062 \times \alpha^2] \times [1 - 0.978 \times NDVI^4]$$

که در آن، T_s دمای سطحی ($^{\circ}\text{C}$)، α آلبیدوی سطحی، NDVI شاخص پوشش گیاهی و سپس G به آسانی با ضرب کردن نسبت $\frac{G}{R_n}$ در میزان R_n محاسبه شده در مدل محاسبه می‌شود.

انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم^۱

روش SEBAL از دو پیکسل شاخص جهت تعیین شرایط مرزی ثابت در رابطه بیلان انرژی استفاده می‌کند. این پیکسل‌ها، که پیکسل‌های سرد و گرم نامیده می‌شوند باید در محدوده مورد مطالعه قرار داشته باشند. پیکسل سرد از منطقه پوشیده از پوشش گیاهی کامل و کاملاً آبیاری شده انتخاب می‌شود که در آن دمای سطحی برابر با دمای هوای نزدیک سطح فرض می‌شود. پیکسل گرم نیز از یک زمین کشاورزی بدون پوشش گیاهی و خشک که در آن مقدار تبخیر و تعرق صفر فرض می‌شود، انتخاب می‌گردد. کیفیت محاسبات در روش SEBAL وابسته به دقت در

² Monin-Obukhu

¹ Cold and Hot Pixels

تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته

در روش SEBAL، پس از محاسبه مقادیر لحظه‌ای تابش خالص، شدت جریان گرمای خاک و شدت جریان گرمای محسوس، مقدار شار گرمای نهان تبخیر لحظه‌ای و در نهایت مقدار تبخیر و تعرق لحظه‌ای محاسبه می‌شود. از آنجا که مقدار روزانه تبخیر و تعرق کاربردی‌تر از مقادیر لحظه‌ای می‌باشد، مقدار تبخیر و تعرق لحظه‌ای با استفاده از کسر تبخیر و تعرق مرجع (ET_{rF}) به مقدار روزانه تبدیل می‌شود. SEBAL مقدار تبخیر و تعرق روزانه را با فرض اینکه ET_{rF} لحظه‌ای، مشابه با میانگین ET_{rF} در طول ۲۴ ساعت است، محاسبه می‌کند. مقدار تبخیر و تعرق روزانه (mm day⁻¹) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$ET_{r,F} = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (6)$$

$$ET_{24} = ET_{r,F} \times ET_{r,24} \quad (7)$$

که در آن‌ها، ET_{r,24} مجموع ET_rها طی ۲۴ ساعت برای همان روز تصویر می‌باشد و با جمع کردن مقادیر ساعتی ET_r با یکدیگر در روز گذر ماهواره به دست می‌آید.

متأسفانه از آنجا که داده‌های ساعتی برای ایستگاه‌های مورد استفاده در اختیار نبود، از داده‌های ۳ ساعته سینوپتیک استفاده شد. نظر به اینکه برخی از پارامترهای مورد نیاز در روش نسخه فائو-پنمن-ماتیت ۵۶ در ساعات شبانه اندازه‌گیری نمی‌شود و مقدار پارامترهای اندازه‌گیری شده نیز با فاصله سه ساعت و تنها مربوط به لحظه‌ی قرائت توسط دیدبان است، امکان محاسبه ET_r به روش مذکور فراهم نبود و مقدار ۲۴ ساعته ET_r برای روزهای مورد مطالعه، در نرم افزار Excel و با استفاده از روش ارائه شده در نشریه فائو-۵۶ که یکی از معتبرترین روش‌ها برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع است، محاسبه گردید (علیزاده، ۱۳۸۳).

دقت آزمایی

اعتبارسنجی مدل SEBAL برای اراضی آبی توسط مقادیر مشاهداتی تشتک تبخیر در ایستگاه سینوپتیک ماه‌نشان (با اعمال ضریب تشتک از رابطه) انجام گرفت. در این راستا با استفاده از نقشه شاخص NDVI در نرم افزار ENVI اراضی زیر کشت گندم آبی (اراضی با NDVI بیش از ۰/۳) از سایر اراضی تفکیک (Ahmad, 2002)، و با بازدیدهای صحرائی تدقیق شد.

برای بررسی آماری صحت پیش‌بینی مدل‌ها از آماره‌های ریشه‌ی میانگین مربعات خطا^۱ و میانگین انحراف خطا^۲ استفاده شد. مقادیر RMSE نشان‌گر مقدار خطای مدل در برآورد داده‌ها است (Dashtaki et al., 2010). شاخص MBE میل مدل به بیش‌برآوردی^۳ یا کم‌برآوردی^۴ را نشان می‌دهد. شرح ریاضی آماره‌های ذکر شده به صورت زیر است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{est,i} - y_{obs,i})^2} \quad (8)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{est,i} - y_{obs,i}) \quad (9)$$

که در آن‌ها $y_{est,i}$ مقادیر تخمینی، $y_{obs,i}$ مقادیر مشاهداتی و n تعداد داده‌ها می‌باشد (سرائی تبریزی، ۱۳۹۱؛ نوری و همکاران، ۱۳۹۱ (الف)؛ نوری و همکاران، ۱۳۹۱ (ب)؛ باباییان و همکاران، ۱۳۹۲).

نتایج و بحث

نقشه‌های توزیع دمای سطحی، شاخص پوشش گیاهی و تبخیر و تعرق واقعی روزانه در دو تاریخ، در شکل ۲ ارائه شده است. دمای سطحی و شاخص پوشش گیاهی دو پارامتر مهم ورودی مدل SEBAL هستند. این دو شاخص که در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم نیز به کار می‌روند، در شرایطی که آب و مواد غذایی به میزان کافی در دسترس باشد شدیداً همبستگی معکوسی را نشان می‌دهند (Ruhoff et al., 2012)

¹ Root Means Square Error

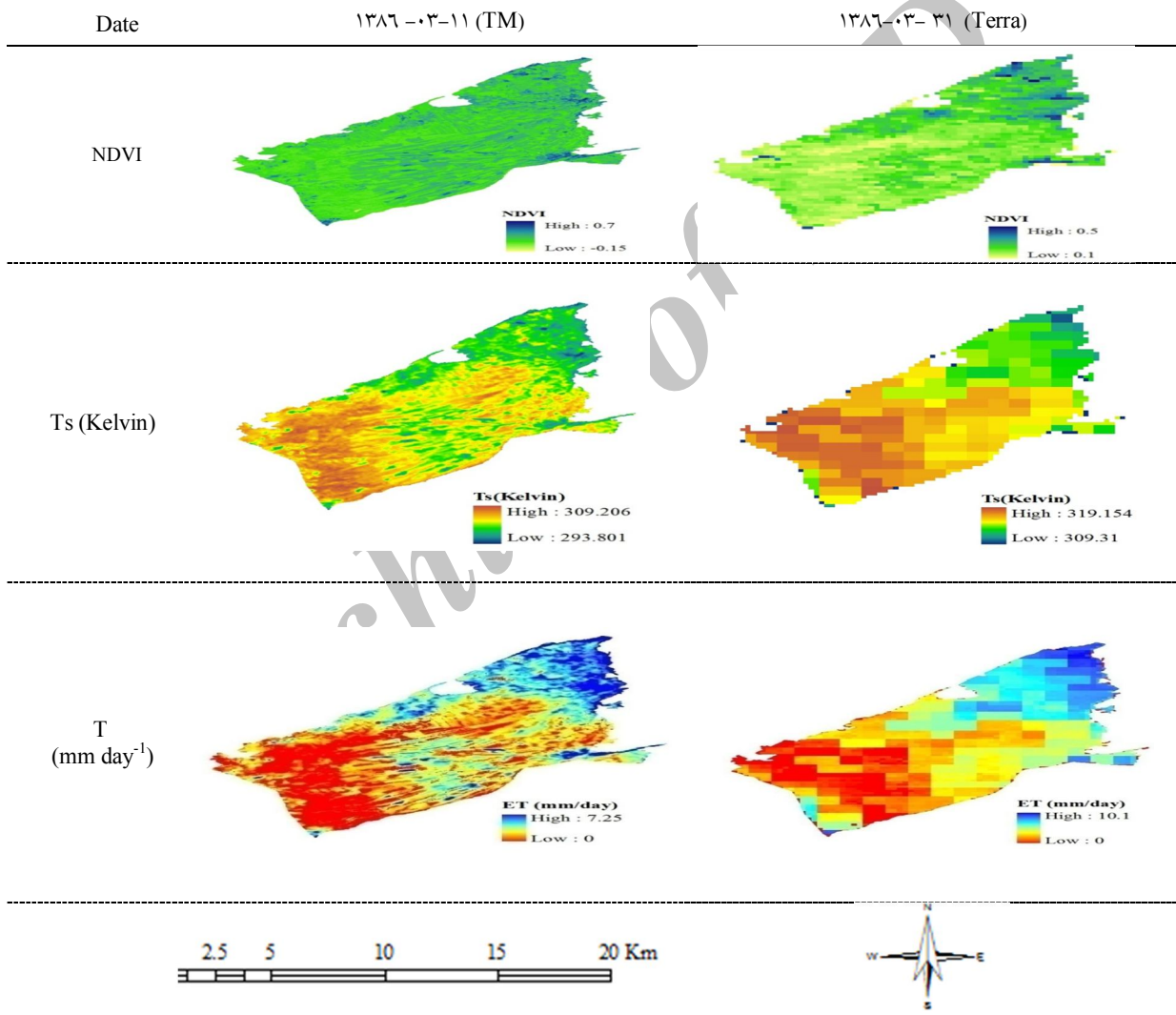
² Mean Bias Error

³ Underestimate

⁴ Overestimate

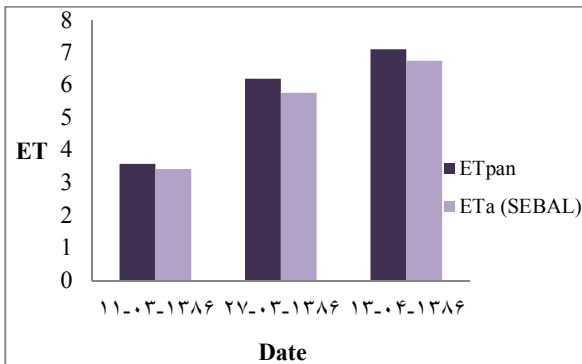
دارای شاخص پوشش گیاهی پایین و دمای بالا (قسمت-های جنوب و شرق منطقه) هستند از میزان تبخیر و تعرق بیشتری برخوردارند. در قسمت‌های جنوبی کمترین میزان تبخیر و تعرق، پوشش گیاهی و بالاترین دما مشاهده می-شود. همچنین با توجه به نقشه توزیع دمای سطحی و شاخص پوشش گیاهی، همبستگی معکوس بین این دو مشاهده می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع تبخیر و تعرق واقعی روزانه، طیف وسیعی از مقادیر را با توجه به پوشش ناهمگون منطقه مورد مطالعه شامل اراضی کشاورزی آبی، دیم و اراضی بایر را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های مربوط به توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی، پوشش گیاهی و دمای سطحی (شکل ۲)، مشاهده می‌شود که نواحی دارای شاخص پوشش گیاهی بالا و دمای پایین (شمال و شمال غرب منطقه) نسبت به سایر نواحی که



شکل ۲- نقشه ET و NDVI با استفاده از سنجنده‌های MODIS (Terra) و Landsat TM

تراکم پوشش گیاهی در مزارع آبی از اواخر خرداد تا اواسط تیرماه می‌باشد.



شکل ۳- مقایسه تبخیر و تعرق اراضی زیر کشت آبی بدست آمده از تصاویر Landsat TM با داده‌های تشنگ تبخیر (میلی‌متر در روز)

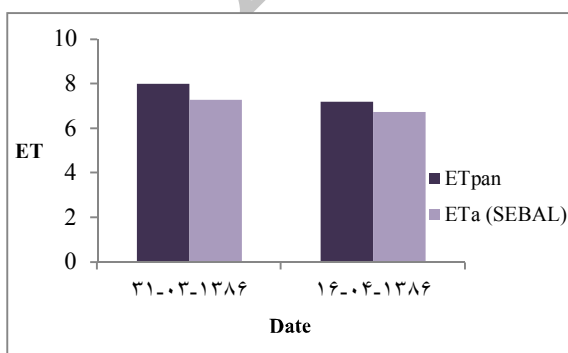
نتایج تبخیر و تعرق روزانه اراضی زیر کشت گندم آبی در جدول‌های ۴ و ۵ و شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. با توجه به پایین بودن مقدار درصد خطا (بین ۴ تا ۸/۹) و مقادیر RMSE می‌توان نتیجه گرفت که نتایج مدل SEBAL با سنجنده‌های با قدرت تفکیک مکانی متفاوت برای برآورد تبخیر و تعرق اراضی گندم آبی در منطقه مورد مطالعه قابل قبول است. همان‌طور که نتایج آماره MBE نشان می‌دهد، مدل SEBAL برای هر دو سنجنده کم برآورد بوده است.

در جدول ۴ و شکل ۴ تبخیر و تعرق برآورد شده مدل SEBAL و سنجنده Landsat5 TM و مقادیر واقعی اراضی زیر کشت گندم آبی قابل مشاهده است، که مقادیر RMSE و MBE برای تبخیر و تعرق برآورد شده سه تاریخ به ترتیب ۰/۴۹ و ۰/۲۸- است. مقادیر برآورد شده دقت رضایت بخشی را نشان می‌دهند. همچنین اراضی زیر کشت گندم آبی روندی صعودی دارد، زیرا بیشترین

جدول ۳- مقایسه نتایج برآورد شده مدل SEBAL و سنجنده Landsat TM با آمار تشنگ (اراضی زیر کشت آبی)

| تاریخ | E pan | Kp | ETpan* | ETa (SEBAL)* | ERROR% | RMSE* | MBE* |
|------------|-------|------|--------|--------------|--------|-------|-------|
| ۱۳۸۶-۰۳-۱۱ | ۴/۹ | ۰/۷ | ۳/۶ | ۳/۴۳ | ۴ | | |
| ۱۳۸۶-۰۳-۲۷ | ۹/۲ | ۰/۶۵ | ۶/۲ | ۵/۷۸ | ۸ | ۰/۴۹ | -۰/۲۸ |
| ۱۳۸۶-۰۴-۱۳ | ۱۰/۱ | ۰/۶۸ | ۷/۲ | ۶/۷۵ | ۷ | | |

* برحسب میلی‌متر در روز



شکل ۴- مقایسه تبخیر و تعرق اراضی زیر کشت آبی بدست آمده از تصاویر MODIS (Terra) با داده‌های تشنگ تبخیر (میلی‌متر در روز)

شکل ۴ و جدول ۵ تبخیر و تعرق برآورد شده مدل SEBAL و سنجنده MODIS و مقادیر واقعی اراضی زیر کشت گندم آبی را نشان می‌دهند. مقادیر RMSE و MBE برای تبخیر و تعرق برآورد شده برای دو تاریخ به ترتیب ۱/۲۵ و ۰/۸۸- است، که دقت نسبتاً مناسبی است. مقدار تبخیر و تعرق تصاویر سنجنده MODIS در ۱۶ تیر نسبت به ۳۱ خرداد کاهش یافته زیرا گیاه در مراحل انتهایی رشد، فعالیتش کمتر می‌شود و میزان تعرق هم کاهش می‌یابد.

جدول ۴- مقایسه نتایج برآورد شده مدل SEBAL و سنجنده MODIS (Terra) با آمار تشتک (اراضی زیر کشت آبی)

| تاریخ | E pan | Kp | ETpan* | ETa (SEBAL)* | ERROR (%) | RMSE* | MBE* |
|------------|-------|--------|--------|--------------|-----------|-------|-------|
| ۱۳۸۶-۰۳-۳۱ | ۱۲/۲ | ۰/۶۲۶ | ۸/۰۱ | ۷/۳ | ۸/۹ | ۱/۲۵ | -۰/۸۸ |
| ۱۳۸۶-۰۴-۱۶ | ۱۱/۶ | ۰/۶۳۹۷ | ۷/۱۹ | ۶/۷۴ | ۶/۳ | | |

* برحسب میلی‌متر در روز

با توجه به نتایج، سنجنده Landsat5 TM دقت بالاتری (تقریباً دو برابر) در برآورد تبخیر و تعرق اراضی زیر کشت گندم دیم در مقایسه با سنجنده MODIS دارد. همان‌طور که جدول‌های ۳-۶ نشان می‌دهند، در اراضی دیم به علت پوشش گیاهی کمتر تبخیر از سطح خاک بیشتر است، اما در مجموع تبخیر و تعرق کمتری نسبت به اراضی آبی دارند (Jovanovic et al. 2011). همچنین بر اساس نتایج بدست آمده از داده‌های اعتبارسنجی، مدل SEBAL تبخیر و تعرق اراضی زیر کشت گندم آبی (RMSE=۰/۴۹-۱/۲۵) را با دقتی بیشتر نسبت به اراضی دیم (RMSE=۱/۳- ۲/۴۸) برآورد می‌کند. مطالعات انجام شده توسط Gowda و همکاران (۲۰۱۱) نیز نشان داده است که مدل SEBAL تبخیر و تعرق اراضی زیر کشت آبی (۰/۷٪) را با خطای کمتری نسبت به اراضی دیم (۲۰٪) برآورد می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر Li و همکاران (۲۰۱۲) مشاهده کردند هرچه تراکم پوشش گیاهی بیشتر باشد برآورد تبخیر و تعرق با خطای کمتری همراه است.

بر اساس نتایج بدست آمده، تصاویر سنجنده TM به علت قدرت تفکیک مکانی زیاد، برآوردی دقیق‌تر و کاربردی‌تری را به ویژه برای مدل‌های هیدرولوژیک در اختیار می‌گذارد زیرا اراضی کشاورزی شخصی^۱ و کوچک، آبراهه‌های اصلی، پستی و بلندی‌هایی که در تصاویر MODIS قابل تشخیص نیستند را متمایز می‌کند (Anderson et al., 2012). تصاویر با بزرگنمایی پایین‌تر حاوی اطلاعات مهم کمتری برای کاربردهای محیط زیستی، مدیریت منابع آب و ارزیابی کارایی مصرف آب گیاهان در مقیاس مزرعه

همان‌طور که از نتایج جدول‌های ۳ و ۴ پیداست، برای اراضی آبی سنجنده Landsat5 TM با RMSE کمتر، برآورد مناسب‌تری را نسبت به سنجنده MODIS ارائه می‌دهد. تبخیر و تعرق اراضی زیر کشت گندم دیم برآورد شده توسط مدل SEBAL نیز با استفاده از ارقام تشتک تبخیر ایستگاه سهرین (واقع در اراضی دیم) ارزیابی شد. بر اساس نتایج آماره‌های ارزیابی، تبخیر و تعرق برآورد شده مدل SEBAL و تصاویر سنجنده Landsat5 TM برای اراضی زیر کشت گندم دیم از دقت نسبتاً مناسبی برخوردار است (RMSE=۱/۳) و حالت کم برآورد را نشان می‌دهد (MBE= -۰/۷۶).

جدول ۵- مقایسه نتایج برآورد شده مدل SEBAL و سنجنده Landsat TM با آمار تشتک (اراضی زیر کشت دیم)

| تاریخ | ETpan* | ETa (SEBAL)* | RMSE* | MBE* |
|------------|--------|--------------|-------|-------|
| ۱۳۸۶-۰۳-۱۱ | ۲/۵۱ | ۲/۲۴ | | |
| ۱۳۸۶-۰۳-۲۷ | ۳/۷۶ | ۲/۷۵ | ۱/۳ | -۰/۷۶ |
| ۱۳۸۶-۰۴-۱۳ | ۴/۱۱ | ۳/۱ | | |

* برحسب میلی‌متر در روز

مقادیر RMSE و MBE برای تبخیر و تعرق برآورد شده مدل SEBAL و تصاویر سنجنده MODIS به ترتیب ۲/۴۸ و -۰/۸۸ است (جدول ۶). نتایج نشان‌دهنده دقتی متوسط و حالت بیش برآورد سنجنده MODIS در برآورد تبخیر و تعرق اراضی زیر کشت گندم دیم است.

جدول ۶- مقایسه نتایج برآورد شده مدل SEBAL و سنجنده (Terra) MODIS با آمار تشتک (اراضی زیر کشت دیم)

| تاریخ | ETpan* | ETa (SEBAL)* | RMSE* | MBE* |
|------------|--------|--------------|-------|------|
| ۱۳۸۶-۰۳-۱۱ | ۴/۴۱ | ۴/۷۸ | | |
| ۱۳۸۶-۰۳-۲۷ | ۳/۶۳ | ۵/۰۴ | ۲/۴۸ | ۰/۸۸ |

* برحسب میلی‌متر در روز

¹ Individual

می باشد (Gupta et al. 1986; Agam et al. 2008). لیکن، تغییرات تبخیر و تعرق و پوشش گیاهی طی ۱۶ روز قابل توجه است و تصاویر سنجنده TM، به تنهایی نمی توانند برای یک فصل رشد گیاه مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین، می توان طی فصل رشد گیاه از ترکیب تصاویر سنجنده ها برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده کرد.

نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که برآورد تبخیر و تعرق اراضی آبی در منطقه مورد مطالعه با کاربرد مدل SEBAL و اطلاعات سنجنده ها با قدرت تفکیک مکانی متفاوت، به ویژه برای اراضی زیر کشت آبی از دقت کافی برخوردار است. با مقایسه تبخیر و تعرق برآورد شده تصاویر سنجنده Landsat5 TM و MODIS در منطقه نیمه خشک زنجان، استفاده از تصاویر Landsat5 TM باعث افزایش دقت برای اراضی آبی به نسبت دو و نیم برابر و برای اراضی دیم دو برابر خواهد شد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که سنجنده TM مستقر بر ماهواره Landsat5 می تواند با دقت بهتری نسبت به سنجنده MODIS مستقر بر ماهواره Terra مقدار تبخیر و تعرق واقعی را برای منطقه مورد مطالعه برآورد نماید و برای مدل های هیدرولوژیک و ارزیابی کارایی مصرف آب که تشخیص بسیاری از جزئیات ضروری است، استفاده از تصاویر Landsat5 TM توصیه می شود. همچنین، بر اساس نتایج بدست آمده کاربرد مدل SEBAL به اراضی کشاورزی آبی محدود نمی شود، اگرچه تبخیر و تعرق اراضی آبی را با دقتی مطلوب تر برآورد می کند.

فهرست منابع

بابائیان، ا.، همایی، م. و نوروزی، ع.ا. ۱۳۹۲. اشتقاق و اعتبارسنجی توابع انتقالی طیفی نقطه ای در گستره-VIS NIR-SWIR به منظور تخمین نگهداشت آب در خاک. حفاظت منابع آب و خاک، ۲(۳): ۲۷-۴۱.

فرخیان فیروزی، الف. و همایی، م. ۱۳۸۴. ایجاد توابع انتقالی نقطه ای برای برآورد منحنی رطوبتی خاک های گچی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۶(۲۴): ۱۲۹-۱۴۲.

قربانی دشتکی، ش. و همایی، م. ۱۳۸۳. برآورد منحنی رطوبتی خاک با استفاده از توابع انتقالی. مجله علوم کشاورزی. ۱۰(۴): ۱۵۷-۱۶۶.

سپاسخواه، ع.ر. ۱۳۶۱. جمع آوری باران به منظور درختکاری دیم. دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، نشریه فنی شماره ۶، صفحه ۱۹.

سرائی تبریزی، م. ۱۳۹۱. شبیه سازی برنامه ریزی آبیاری گیاه سویا با استفاده از مدل BUDGET. حفاظت منابع آب و خاک، ۱(۳): ۴۷-۵۸.

علیزاده، ا. ۱۳۸۳. رابطه آب و خاک و گیاه. انتشارات آستان قدس رضوی. ۴۷۰ صفحه.

کریمی، ع.، همایی، م.، بای بوردی، م. و محمودیان شوشتری، م. ۱۳۹۰. ارزیابی کمی تغییرپذیری مکان پارامترهای مدل های نفوذ آب به خاک در پهنه وسیع با روش های زمین آماری. آبیاری و زهکشی ایران، ۵(۲): ۲۳۳-۲۲۰.

نوری، م.، همایی، م. و بای بوردی، م. ۱۳۹۱ (الف). ارزیابی پارامتریک توانایی نگهداشت خاک در حضور نفت خام در حالت سه فازی. حفاظت منابع آب و خاک، ۲(۲): ۱۵-۲۴.

نوری، م.، همایی، م. و بای بوردی، م. ۱۳۹۱ (ب). بررسی پارامتریک ویژگی های هیدرولیکی خاک در حضور آلانده نفت سفید. حفاظت منابع آب و خاک، ۲(۱): ۳۷-۴۸.

Agam, N., Kustas, W. P., Anderson, M.C., Li, F. and Colaizzi, P.D. 2008. Utility of thermal image sharpening for monitoring field-scale evapotranspiration over rainfed and irrigated agricultural regions. Journal of Geophysical Research, Letters, 35, doi: 0.1029/2007GL032195.

Ahmad, M.D. 2002. Estimation of net groundwater use in irrigated river basins using geo-information techniques: A case study in Rechna Doab, Pakistan, ITC PHD dissertation.

Allen, R., Waters, R., Tasumi, M., Trezza, R., Bastiaanssen, W. 2002. SEBAL, Surface energy balance algorithms for land, Idaho Implementation. Advanced Training and Users Manual, version 1.0.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for

- Li, X., Lu, L., Yang, W. and Cheng, G. 2012. Estimation of evapotranspiration in an arid region by remote sensing a case study in the middle reaches of the Heihe River Basin. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 17: 85-93.
- McCabe, M.F. and Wood, E.F. 2006. Scale influences on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, 105: 271-285.
- Opoku-Duah, S., Donoghue, D.N.M. and Burt, T.P. 2008. Intercomparison of evapotranspiration over the Savannah Volta Basin in West Africa using remote sensing data. *Journal of Sensors*, 8: 2736-2761.
- Ruhoff, A.L., Paz, A.R., Collischonn, W., Aragao L.E.O.C., Rocha, H.R and Malhi, Y.S. 2012. A MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savannas. *Journal of Remote Sensing*, 4: 703-725.
- 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*, 17 Sept.
- Tasumi, M., Trezza, R., Allen, R.G. and Wright, J.L. 2005. Operational aspects of satellite-based energy balance models for crops in the semi-arid U.S. *Journal of Irrigation and Drainage Systems*, 19: 355-376.
- Zarei, Gh., Homae, V and Liaghat, A.M. 2009. Modeling Transient Evaporation from Descending Shallow Groundwater Table Based on Brooks-Corey Retention Function. *Water Resources Manage.* 23:2867-2876.
- Zarei, Gh., Homae, M., Liaghat A.M. and Hoorfar, A.H. 2010. A model for soil surface evaporation based on Campbell's retention curve. *Journal of Hydrology*, 380:356-361.
- computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*, FAO, Rome.
- Anderson, M.C., Allen, R. G., Morse, A. and Kustas, W. P. 2012. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote Sensing of Environment*, 122: 50-65.
- 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., Molden, D.J. and Makin, I.W. 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural water management*, 46: 137-155.
- Dashtaki, S.G., Homae, M. and Khodaverdiloo, H. 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use and Management*, 26(1): 68-74.
- Gowda, P.H., Howell, T.A., Paul, G., Colaizzi, P.D., Marek, T.H., and Copeland, K.S. 2011. SEBAL for Estimating Hourly ET Fluxes Over Irrigated and Dryland Cotton During BEAREX08. *Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress*.
- Gupta, V.K., Rodriguez-Iturbe, I., Wood, E.F. 1986. *Scale Problems in Hydrology*, Reidel Publishing Company: Dordrecht, The Netherlands, p. 260.
- Jovanovic, N.Z., Jarman, C., de Clercq, W.P., Vermeulen, T., Fey, M.V. 2011. Total evaporation estimates from a Renosterveld and dryland wheat/fallow surface at the Voëlville Nature Reserve (South Africa). *Water SA* 37: 471-482.
- Li, F., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Prueger, J. H., and Scott, R. L. 2008. Effect of remote sensing spatial resolution on interpreting tower based flux observations. *Remote Sensing of Environment*, 112, 337-349.

Evaluating SEBAL model to estimate evapotranspiration using MODIS and TM sensors data

Elaheh Simaie¹, Mehdi Homaei^{2*} and Ali Akbar Norouzi³

1) M.Sc. Student; Department of Soil Science; Tarbiat Modares University; Tehran 14115-336; Iran

2) Professor; Department of Soil Science; Tarbiat Modares University; Tehran 14115-336; Iran

*corresponding author email: mhomaei@modares.ac.ir

3) Assistant Professor; Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI); Tehran 14115-336; Iran

Received: 07-12-2012

Accepted: 20-05-2013

Abstract

Accurate estimation of evapotranspiration is crucial for optimal conservation of soil and water resources in arid and semi-arid regions. Evapotranspiration is an important component of water balance in arid and semi-arid regions. The objective of this study was to evaluate SEBAL model to estimate ET_a in a semi-arid area. The study was carried out in Zanjanrood watershed, Zanjan province, which is dominated by both irrigated and rainfed wheat cultivation. Using MODIS (Terra/Aqua) and TM (Landsat-5) satellite data, the feasibility of using SEBAL model with multi sensors data was investigated from June to July 2007. The estimated daily ET_a values which were later obtained by SEBAL model were evaluated based on the two real evaporation pan data. The statistical results indicated that SEBAL model has reasonable potential to estimate ET_a of irrigated (RMSE= 0.49 to 1.25) and dryland (RMSE= 1.3 to 2.48) wheat fields. The SEBAL model evaluates ET_a of irrigated wheat field more accurate than dryland wheat field. The results further indicated that the TM images are 2.5 times more accurate than MODIS images. Furthermore, it can be concluded that the TM sensor located at Landsat satellite can better predict the ET_a values than the MODIS sensor located at Terra satellite sensor in the studied area.

Keywords: evapotranspiration; MODIS; SEBAL; TM