

مقایسه الگوریتمهای SEBAL و S-SEBI در برآورد تبخیر و تعرق در منطقه کرج

بهاره حسن پور^۱ - فرهاد میرزایی^{۲*} - صالح ارشد^۳ - هانیه کوثری^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۳/۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۹/۱۲

چکیده

در این مطالعه دو روش برآورد تبخیر و تعرق توسط تصاویر ماهواره ای مورد مقایسه قرار گرفت. اطلاعات مزرعه ای در تابستان سال ۱۳۸۸ با کشت گیاه ذرت در مزرعه اختصاصی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی واقع در کرج به دست آمد. در این مطالعه شارهای گرمایی سطح زمین توسط بیان انرژی نسبت بوون در ۶ روز اندازه گیری شد. متعاقبا تصاویر سنجنده مودیس برای برآورد تبخیر و تعرق منطقه با استفاده از دو الگوریتم SEBAL و S-SEBI مورد استفاده قرار گرفت. تفاوت این دو الگوریتم در برآورد شار گرمای محسوس است. نتایج نشان می دهد که ریشه میانگین مربعات خطا در برآورد شار گرمای خالص و شار گرمای خاک به ترتیب ۴۶ و ۴۳ (w/m^2) بوده است. الگوریتم SEBAL قادر است شار گرمای محسوس را نسبت به الگوریتم S-SEBI به مراتب بهتر برآورد نماید و بنابراین شار گرمای نهان نیز بهتر برآورد می گردد. مقدار ریشه میانگین مربعات خطا شار گرمای محسوس و شار گرمای نهان برآورد شده توسط الگوریتم SEBAL به ترتیب ۵۸ و ۳۱ (w/m^2) بوده و این مقادیر در برآورد الگوریتم S-SEBI به ترتیب ۱۱۱ و ۷۴ (w/m^2) هستند. تفاوت بین این دو الگوریتم به دلیل استفاده از داده های هواشناسی در برآورد شار گرمای محسوس و مقاومت ایروودینامیک در الگوریتم SEBAL است. همچنین نتایج حاصل نشان داد تبخیر و تعرق ساعتی برآورد شده توسط الگوریتم SEBAL، ۰/۵ میلیمتر در ساعت با مقدار اندازه گیری شده، تفاوت دارد که حدود ۱٪ تبخیر و تعرق ساعتی می باشد. حال آنکه در الگوریتم S-SEBI این مقادیر به ترتیب ۰/۱۱ و ۱۱ درصد است. تبخیر و تعرق روزانه برآورد شده توسط الگوریتم SEBAL ۰/۴ میلیمتر در روز با مقدار اندازه گیری شده، تفاوت دارد و ضریب توده باقیمانده ۱ درصد است. حال آنکه در الگوریتم S-SEBI این مقادیر به ترتیب ۱ و ۱۲ درصد است.

واژه های کلیدی: تبخیر و تعرق، بیان انرژی سطح، شار گرمای محسوس، شار گرمای نهان، شار گرمای خالص

مقدمه

برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس منطقه ای دو روش وجود دارد. یکی از این روشها، روش تکمیلی بوچت (۸) و دیگری با استفاده از داده های سنجنش از دور است. داده های سنجنش از دور، می توانند اطلاعات بهنگام از سطح زمین را در اختیار قرار دهند. بدین منظور الگوریتمهای متعددی توسعه یافته اند. برخی از این الگوریتمها پیچیده هستند و برخی نیز بسیار ساده می باشند. انتخاب بین این الگوریتمها در واقع انتخاب بین دقت و انعطاف در برآورد تبخیر و تعرق است. در این تحقیق یک روش پیچیده (SEBAL) و یک روش ساده (S-SEBI) با هم مقایسه خواهند شد.

الگوریتم SEBAL سال ۱۹۹۸ توسط باستیانسن ارائه شد. باستیانسن و همکاران (۵) به ارزیابی الگوریتم پیشنهادی خود پرداختند و نشان دادند ریشه میانگین مربع خطا^۵ جز تبخیر ۰/۱ تا ۰/۲ بوده است. در این تحقیق شارهای انرژی سطح زمین برآورد شده توسط مدل SEBAL بدون واسنجی با مقادیر اندازه گیری شده که

در دهه های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ تصور می شد تبخیر و تعرق در مناطقی که خوب آبیاری شده اند، توسط شرایط اقلیمی کنترل می شود و با تکیه بر این نظر، تفاوت پوشش گیاهی و شرایط خاک مهم تلقی نمی شد. در دهه ۱۹۸۰ تعدادی از مکانیزمهای متغیر زمانی و مکانی و تاثیر گذار بر تبخیر و تعرق، مانند آلبیدوی سطح و عمق ریشه شناخته شدند (۱۱). جهت این امر، مدلهایی توسعه یافت که علاوه بر نیاز اتمسفری، بیان انرژی سطح، و در دسترسی آب و همچنین شرایط بیولوژیکی و فیزیکی را نیز در بر می گرفت. در این زمینه پیشرفتهای بیشتری با استفاده از روشهای نقطه ای دقیق نیز صورت گرفت. برای

۱، ۲ و ۴ - به ترتیب دانشجوی دکتری، استادیار و دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران
(*) نویسنده مسئول: Email: fmirzaei@ut.ac.ir

۳ - مهندس مشاور شرکت فیشل پاد

محاسبه نمودند. ارشد (۱) با استفاده از الگوریتم SEBAL و تصاویر ماهواره نوا در استان کرمانشاه تبخیر و تعرق را در سطح مزارع کشت گندم و جو به دست آورد. در این تحقیق از ۲۷۱ تصویر برای ۱۸ سال در طول دوره رشد گیاه استفاده شد. از مزایای SEBAL میتوان به موارد زیر اشاره نمود.

SEBAL توسط پیکسلهای کلیدی، جایی که تبخیر و تعرق واقعی توسط داده‌های هواشناسی یا ویژگیهای سطح زمین محاسبه می‌شود، شکل می‌گیرد. بنابراین نقشه‌ی تبخیر و تعرق حاصله کاملاً با تبخیر و تعرق سطح سازگار است.

واسنجی درونی ضمنی شار گرمای محسوس توسط SEBAL نیاز به تصحیح اتمسفری توسط مدلهای انتقال تشعشی برای دمای سطح زمین و آلبیدو را حذف می‌نماید. این واسنجی درونی علاوه بر این موجب کاهش اثرات خطا در تخمین ضرایب پایداری ایرودینامیک و زبری می‌شود.

SEBAL قویاً بر استفاده از روابط تئوری و فیزیکی تکیه دارد. با این حال برای دقیق و عملی ساختن اجرای الگوریتم روابط و ضرایب تجربی نیز به کار رفته است (۳).

بسیاری از پارامترهای مورد نیاز سبال از مدلهای اقلیمی مورد تایید فائو قابل محاسبه است (۳). دیگر پارامترهای مورد نیاز مانند دمای سطحی، گسیلمندی سطحی، آلبیدو، دمای هوا، پوشش زمین و شاخص‌های گیاهی است که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای قابل برآوردند.

نیازی به نقشه‌ی کاربری اراضی ندارد و در صورت فقدان آن نیز می‌توان به اجرای الگوریتم پرداخت.

اما نتایج حاصل از اجرای SEBAL کاملاً وابسته به انتخاب پیکسلهای گرم و سرد است و در صورت انتخاب نادرست آنان تاثیر زیادی روی عدم دقت نتایج دارد. در عین حال در این روش شرایط موجود در یک پیکسل مستقل از پیکسلهای دیگر برآورد می‌شود.

الگوریتم S-SEBI نیز توسط روترینک و همکاران (۱۸) ارائه شد. و این محققان نتایج حاصل از S-SEBI را با داده‌های حاصل از نسبت بوون مقایسه نمودند و خطای به دست آمده از نتایج این تحقیق ۸ درصد بوده است. سوبرینو و همکاران (۱۵) الگوریتمی را بر اساس S-SEBI با استفاده از تصاویر ماهواره ای DAIS که در اروپا داده برداری می‌کند، ارائه دادند که خطایی کمتر از یک میلی متر در روز داشت. همچنین سوبرینو و همکاران (۱۶) این مدل را با استفاده از داده‌های AVHRR اجرا کردند و نشان دادند که ریشه میانگین مربع خطا ۱/۴ میلیمتر در روز بوده است.

گلجولیوس و همکاران (۹) دقت مدل S-SEBI را در برآورد تبخیر و تعرق روزانه ۰/۸ میلی متر در روز در باغهای درختان مو برآورد نمودند. همچنین گلجولیوس و همکاران (۱۰) دو روش ساده برآورد تبخیر و تعرق، S-SEBI و WDI را با استفاده از تصاویر

خطاهای دستگاهی نیز در آن‌ها دخیل بوده‌است در چند منطقه مقایسه شد. جهت صحت یابی این الگوریتم نتایج به دست آمده با اطلاعات موجود تبخیر- تعرق مزارع بزرگ مقایسه شد و نتایج حاکی از تطابق نتایج حاصل از الگوریتم SEBAL بدون هیچگونه واسنجی با داده‌های مزارع در ۸۵ درصد مواقع بوده است. همچنین باستانسن و همکاران (۶) با بررسی این الگوریتم در شرایط مختلف آب و هوایی در مقیاس مزرعه‌ای و حوزه‌ای پرداختند. به عنوان مثال مقادیر متوسط تبخیر و تعرق واقعی از حدود کمتر از ۵۰ درصد تبخیر و تعرق پیشینه برای گیاهان مرتعی تا ۷۵ درصد برای گیلاس متغیر بوده است که نشان‌دهنده کم‌آبایی در منطقه‌ای در سریلانکا می‌باشد. دقت SEBAL در مقیاس مزرعه‌ای ۸۵ درصد برای یک روز است و در یک فصل به ۹۵ درصد افزایش می‌یابد و در مقیاس حوزه‌ای دقت تبخیر و تعرق سالانه به ۹۶ درصد می‌رسد. باستانسن (۷) در تحقیق جداگانه‌ای به اجرای الگوریتم در حوزه‌ی رودخانه‌ی گدیز ترکیه با استفاده از تصاویر سنجنده‌ی لندست پرداخت. در این تحقیق از داده‌های میدانی برای تعیین رابطه بین اختلاف دمای سطحی و دمای سطح استفاده شده است. تغییرات زمانی تبخیر و تعرق بین ماههای ژوئن و اگوست بررسی شد. کمتر بودن کسر تبخیر در ماه ژوئن به دلیل تابش خورشیدی بیشتر و انرژی خالص در دسترس بیشتر، منجر به کاهش شار گرمای نهان شده است. تاسومی و همکاران (۱۷) طی تحقیقی در دو منطقه از ایالات متحده، به ارزیابی الگوریتم SEBAL پرداختند. نتایج مقایسه با نشان از تطبیق خوب مقادیر محاسبه شده و داده‌های لایسیمتری داشت. مجموع خطای نسبی در منطقه‌ی کیمبرلی در طول فصل رشد، ۴/۲ درصد بوده است. در منطقه‌ی دشت رودخانه‌ی اسنیک^۱ به دلیل کوچک بودن مزرعه و امکان تاثیر سایر مناطق همجوار در برآورد دمای سطح زمین، متفاوت بودن زمان آبیاری لایسیمتر با سایر نقاط مزرعه، استفاده از داده‌های هواشناسی به طور متوسط روزانه، از دلایل اختلاف مقدار تبخیر و تعرق محاسبه شده با مقدار لایسیمتری بوده است. این محققان اثر دمای سطح زمین، آلبیدوی سطح و تاثیر تصحیح اتمسفری را روی مقادیر محاسبه شده‌ی تبخیر و تعرق توسط SEBAL ناچیز دانسته‌اند. زیرا در حلقه‌ی درون تکرار SEBAL برای محاسبه‌ی شار گرمای محسوس رابطه‌ای خطی بین اختلاف دمای سطحی و دمای سطح وجود دارد که موجب تعدیل این خطا می‌شود. در تحقیقی دیگر در ایالات متحده در دره رودخانه بیر آلن و همکاران (۳) با به کار بردن SEBAL به مقایسه‌ی نتایج با مقادیر لایسیمتری پرداختند. مقادیر تبخیر و تعرق ماهانه ۱۶ درصد و فصلی ۴/۳ درصد با مقادیر لایسیمتری تفاوت داشت. این محققان به این وسیله مقادیر Kc را در طول فصل رشد توسط تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده توسط داده‌های زمینی

گزینه Registration با استفاده از حدود ۳۰ نقطه مشترک و خطایی معادل ۰/۲ پیکسل هم مبنای گردیدند.

الگوریتم SEBAL^۳

در این روش تبخیر و تفرق به عنوان باقیمانده‌ی بیلان انرژی زمین محاسبه می‌شود.

$$R_n = G + H + \lambda ET \quad (۱)$$

که در آن λET 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: تابش خالص به صورت تفاوت بین تابش ورودی و خروجی در همی طول موجها تعریف می‌شود. طبق تعریف این ترم به صورت زیر تعریف می‌شود (۱۴).

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (۲)$$

که در آن α آلبیدوی سطحی، $R_{s\downarrow}$ تابش موج کوتاه ورودی (W/m^2) (طول موج بیشتر از ۴ میکرومتر)، $R_{L\downarrow}$ تابش موج بلند ورودی (W/m^2)، $R_{L\uparrow}$ تابش موج بلند خروجی (W/m^2)، ε_0 گسیلمندی سطحی عریض باند (بدون بعد) می‌باشد.

تابش ورودی موج کوتاه، شار تابش خورشیدی مستقیم و پراکنده است که واقعاً به زمین می‌رسد. با فرض شرایط آسمان صاف، می‌توان آن را به صورت زیر برای زمان تصویر برداری محاسبه کرد:

$$R_{s\downarrow} = G_{sc} \times \cos \theta \times d_r \times \tau_{sw} \quad (۳)$$

که G_{sc} ثابت خورشیدی ($1367W/m^2$)، θ زاویه راس خورشید، d_r معکوس مربع فاصله نسبی زمین تا خورشید و τ_{sw} شفافیت جوی می‌باشد. مقادیر $R_{s\downarrow}$ با توجه به محل و زمان تصویر برداری بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ (W/m^2) متغیر است. لیانگ (۹) رابطه‌ی همبستگی زیر را برای آلبیدوی سطح توسط سنجنده مودیس پیشنهاد نمود:

$$a = 0.16a_1 + 0.291a_2 + 0.243a_3 + 0.116a_4 + 0.112a_5 + 0.081a_7 - 0.0015 \quad (۴)$$

شار تابش حرارتی از جو به سمت پایین با استفاده از رابطه استفان - بولتزمن محاسبه می‌شود.

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad (۵)$$

که ε_a گسیلمندی جو، σ ثابت استفان - بولتزمن ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$) و T_a دمای هوای نزدیک سطح (K) است.

برای محاسبه‌ی تابش موج بلند خروجی نیز از رابطه استفان - بولتزمن استفاده می‌شود.

ASTER مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که دقت S-SEBI ۰/۸ میلی متر در روز و دقت WDI ۱/۱ میلی متر در روز بوده است.

مزایای S-SEBI نیز به شرح زیر است:

۱- می‌توان تنها با استفاده از تصاویر و بدون نیاز به داده‌های هواشناسی به اجرای آن پردازیم. در نتیجه اگر کثرت ایستگاههای هواشناسی در منطقه کم بوده و از مزرحه مورد نظر دور است و یا اطلاعات آن نادقیق است میتوان از این روش بهره گرفت.

۲- نیاز به نقشه کاربری اراضی ندارد.

از جمله معایب این روش اینست که این روش در مواردی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که شرایط اتمسفری در کل تصویر ثابت باشد. بنابراین تنها برای منطقه کوچکی قابل کاربرد است. در عین حال در این روش با توجه به اینکه از چند پیکسل استفاده می‌شود باید دقت داشت که حتما این پیکسلها در مناطق کشاورزی باشند.

با توجه به موارد گفته شده، هدف از این تحقیق مقایسه این دو روش محاسبه تبخیر و تفرق با استفاده از یک نقطه کنترل موجود در سطح زمین است.

مواد و روش ها

تصاویر ماهواره ای

در این تحقیق از تصاویرسنجنده مودیس واقع در ماهواره تراس^۱ برای برآورد تبخیر و تفرق استفاده شده است. این سنجنده دارای ۳۲ باند است که تنها ۹ باند آن در بخش های مرئی و مادون قرمز میانی و حرارتی در برآورد تبخیر و تفرق مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مزایای استفاده از مودیس قدرت تفکیک رادیومتری مناسب (۱۲ بیت) برای محاسبه شاخص های گیاهی و دمای سطح زمین و همچنین قدرت تفکیک زمانی مناسب (یک روز) است (۱۲). قدرت تفکیک مکانی سنجنده مودیس در باند های مرئی ۲۵۰ متر، در باندهای مادون قرمز نزدیک ۵۰۰ متر و در باندهای حرارتی ۱ کیلومتر است.

پیش پردازش تصاویر

تصاویر مودیس به طور رایگان از طریق وبسایت (<http://www.nsof.class.noaa.gov>) در دسترس هستند. این تصاویر کالیبره شده بوده و نیاز به کالیبراسیون مجدد ندارند. تصاویر مودیس هیچگونه موقعیت جغرافیایی نداشته و بنابراین از طریق نرم افزار ENVI، ایکن Basic tools، گزینه Georeferencing زمین مرجع شدند. سپس با تصویری که منطقه مورد نظر در آن در نادر (امتداد شاغولی)^۲ قراردادت توسط نرم افزار ENVI، ایکن map

3- registration

4- Surface Energy Balance Algorithm for Land

1 -terra

2- Nadir

کلوین (K) است. مقادیر $R_{L\uparrow}$ بسته به محل و زمان تصویر برداری از ۲۰۰ تا ۷۰۰ وات بر متر مربع می‌باشد. پارودی (۱۴) رابطه‌ی زیر را برای برآورد دمای سطح زمین توسط سنجنده‌ی مودیس ارائه داد.

$$T_s = 0.39 \times Tb_{31}^2 + 2.34 \times Tb_{31} - 0.78 \times Tb_{31} \times Tb_{32} - 1.34 \times Tb_{32} + 0.39 \times Tb_{32}^2 + 0.56 \quad (7)$$

عمل می‌کنیم:

مدل سبال از دو پیکسل شاخص برای مشخص کردن شرایط مرزی در معادله بیلان انرژی استفاده می‌کند. این دو پیکسل شاخص، تحت عنوان پیکسل‌های سرد و گرم نامیده می‌شوند و در منطقه مورد مطالعه قرار دارند. پیکسل سرد از مزارع با پوشش گیاهی کامل و کاملاً آبیاری شده انتخاب می‌شود که در آن دمای سطحی و دمای هوای نزدیک به سطح برابر فرض می‌شوند و پیکسل گرم از اراضی بدون پوشش و خشک انتخاب می‌شود. تبخیر و تعرق گیاه به دلیل همرفت، $ET_r = 1/0.5$ در نظر گرفته می‌شود. تبخیر و تعرق مرجع از معادله‌ی پنمن-مانتیت محاسبه می‌شود. در این صورت، $ET = Rn - G - 1.05ET_r$ (۱۵). پیکسل گرم جایی است که در آن تبخیر و تعرق وجود نداشته و $H = Rn - G$. انتخاب پیکسل گرم از انتخاب پیکسل سرد مشکل‌تر است. زیرا با توجه به دما پیکسل‌های زیادی برای پیکسل گرم مورد توجه هستند. در پیکسل سرد، شار گرمای محسوس از رابطه‌ی زیر برآورد می‌شود.

$$H_{cold} = R_n - G - \lambda ET_{cold} \quad (13)$$

بر اساس تجارب به دست آمده در ایالت آیداهو نشان داده شد که در پیکسل سرد تبخیر و تعرق حدوداً ۵٪ بیشتر از تبخیر و تعرق گیاه مرجع می‌باشد. در نتیجه ET_{cold} را می‌توان $ET_r \times 1/0.5$ فرض نمود. بنابراین H_{cold} از رابطه‌ی $H_{cold} = R_n - G - 1.05K_c \cdot \lambda ET_r$ محاسبه می‌شود. dt_{cold} نیز از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$dT_{cold} = \frac{H_{cold} \times r_{ah-cold}}{\rho_{cold} \times c_p} \quad (14)$$

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

$$H_{hot} = R_n - G - \lambda ET_{hot} \quad (15)$$

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

$$H_{hot} = R_n - G \quad dT = b + aT_s \quad (16)$$

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \times \sigma \times T_s^4 \quad (6)$$

که ε_0 گسیلمندی سطحی عریض باند، σ ثابت استفان-بولتزمن ($5/67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$) و T_s دمای سطحی بر حسب درجه‌ی

که در این رابطه، T_b درخشندگی باند و اندیس‌های ۳۱ و ۳۲ مربوط به باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده می‌باشند. به طور ساده T_b برای هر باند به صورت زیر به دست می‌آید:

$$T_i = \frac{(c_2)}{\lambda_i \times \ln\left(\frac{c_1}{RAD \pi \lambda_i^5} + 1\right)} \quad (8)$$

در این رابطه، c_1 و c_2 ضرایب ثابت و λ_i طول موج در وسط باند (متر) و رادیانس بر حسب $1 \mu \cdot \text{steradian}^{-1} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ می‌باشد.

شار گرمای خاک: شار گرمای خاک مقدار ذخیره‌ی گرمایی خاک و پوشش گیاهی به دلیل هدایت ملکولی می‌باشد. باستیانسن (۷)، نسبت $\frac{G_0}{R_n}$ برای نیمه روز با استفاده از معادله تجربی زیر ارائه نمود.

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} \times [0.0032 \times \alpha + 0.0062 \times \alpha^2] \times [1 - 0.978 \times NDVI^4] \quad (9)$$

که در آن T_s دمای سطحی ($^{\circ}\text{C}$) و α آلبیدوی سطحی می‌باشد. شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده NDVI: این شاخص، معروفترین و ساده‌ترین شاخص پوشش گیاهی است و بر حسب بازتابش دو باند قرمز و مادون قرمز نزدیک به صورت زیر تعریف می‌شود.

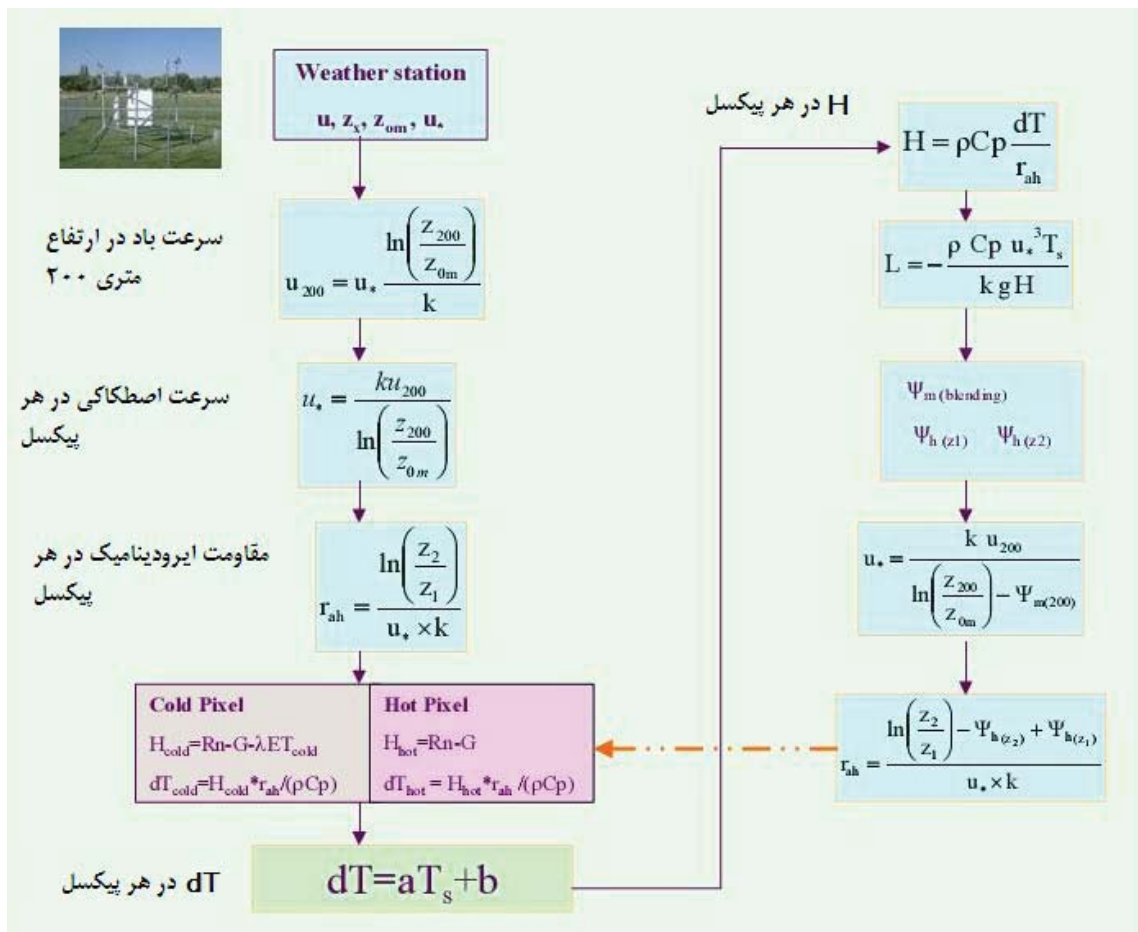
$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (10)$$

مقادیر مختلف NDVI نمایانگر پوشش‌های مختلف بوده و مقدار آن از ۱- تا ۱+ متغیر است.

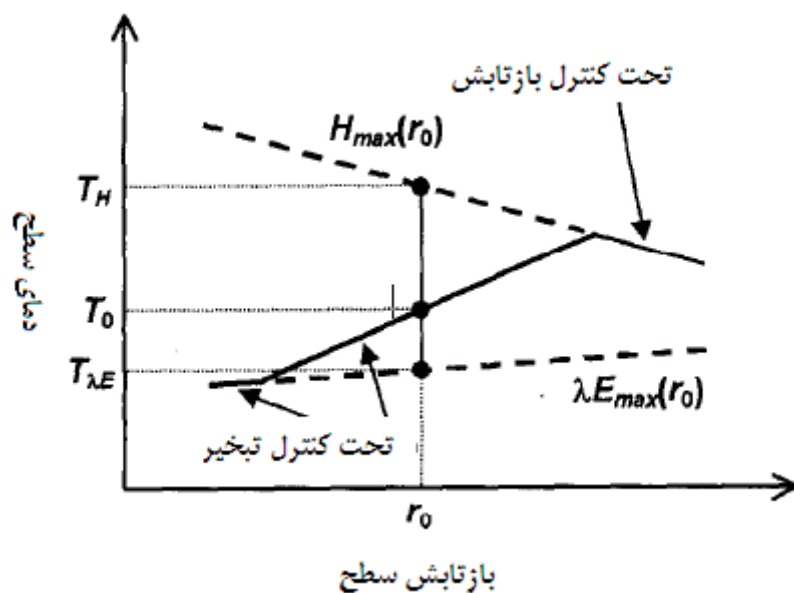
شار گرمای محسوس: در نهایت شار گرمای محسوس که عبارتست از میزان هدر رفت گرما به هوا به وسیله جریان همرفتی و هدایت مولکولی به علت اختلاف دما، با استفاده از معادله زیر برای انتقال گرما محاسبه می‌شود:

$$H = \frac{\rho \cdot C_p \cdot dT}{r_{ah}} \quad (12)$$

که در آن ρ چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا (1.004 J/kg/K)، dT اختلاف دمای بین دو ارتفاع (Z_1 و Z_2) بر حسب درجه‌ی کلوین و r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی برای انتقال گرما (s/m) می‌باشد. Z_1 ارتفاع دقیقاً بالای جابجایی سطح صفر برای سطح یا پوشش گیاهی، Z_2 مقدار کمی بالای سطح جابجایی صفر می‌باشد. در سبال مقادیر $0/1$ برای Z_1 و 2 متر برای Z_2 در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه‌ی شار گرمای محسوس طبق الگوریتم شکل ۱



شکل ۱- الگوریتم محاسبه شار گرمای محسوس (۱۴)



شکل ۲- توضیحی قراردادی بین بازتابش سطح و دمای سطح زمین

بین دما و بازتابش محاسبه می شوند.

$$T_H = a_H + b_H T_{\rho} \quad (20)$$

$$T_{\lambda E} = a_{\lambda E} + b_{\lambda E} T_{\rho} \quad (21)$$

در صورتیکه شرایط اتمسفری در تصویر ثابت بوده و پیکسلهای سرد و گرم کافی در طیف بازتابش وجود داشته باشند، ممکن است. اجرای این الگوریتم با کمک نمودار پراکندگی دمای سطح زمین در مقابل بازتابش صورت می گیرد (شکل ۳). همانطور که قبلاً توضیح داده شد، در آلبیدوهای پایین تغییرات دمای سطح زمین به ازای افزایش آلبیدو کم است. سپس این مقدار افزایش یافته و در نهایت پس از نقطه ای کاهش می یابد. با یافتن روابط موجود این دو حد می توان کسر تبخیر و نهایتاً تبخیر و تعرق را محاسبه نمود. در شکل ۳ نمودار پراکندگی دمای سطح زمین در برابر بازتابش رسم شده است. اگر متوسط دمای سطح زمین به ازای هر الیبودی مشخص رسم شود می توان روابط مربوط به مناطق تحت کنترل بازتابش و تبخیر را پیدا نمود (۱۸).

مشخصات محل انجام مطالعه

اطلاعات مزرعه ای در تابستان سال ۱۳۸۸ در مزرعه اختصاصی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی واقع در کرج (۲۱، ۳۵ عرض شمالی و ۳۸، ۵۱ طول شرقی) به دست آمد. ارتفاع این اراضی از سطح دریا ۱۳۱۲/۵ متر می باشد. برای آماده نمودن زمین، ابتدا در پاییز سال قبل زمین آزمایش شخم عمیق زده شده و در اواخر بهار به محض امکان شروع عملیات کشاورزی اقدام به شخم سبک، کودپاشی، دیسک و ماله برای تسطیح گردید. یک روز قبل از کاشت بذر ۵۰ کیلوگرم کود پتاس به زمین داده شده و سپس کاشت بذر ذرت (ذرت دانه ای رقم دابل کراس ۳۷۰) در تاریخ ۸۸/۳/۲۵ (روز ۱۶۶ از سال ۲۰۰۹) با دستگاه پنوماتیک در ۸۰ ردیف ۴۰ متری با فاصله ردیف های ۷۵ سانتی متری انجام شد. به این ترتیب محل دقیق اجرای طرح مزرعه ای به ابعاد ۴۰ در ۶۰ متر می باشد. شمائی از موقعیت کلی مزرعه در شکل ۴ نشان داده شده است. در اطراف مزرعه مورد آزمایش نیز تا شعاع چند کیلومتری کشت ذرت صورت گرفته بود به جز قسمت غربی که در آن جالیز و سیب زمینی کشت شده بود.

تجهیزات اندازه گیری بیلان انرژی از یک رادیومتر خالص برای اندازه گیری شار تابش خالص، دو حسگر صفحه شار حرارتی برای اندازه گیری شار گرمای ورودی به سطح خاک و یک مجموعه از حسگرها برای اندازه گیری نسبت بوون تشکیل شده است.

$$dT_{hot} = \frac{H_{hot} \times r_{ah-hot}}{(\rho_{hot} \times c_p)} \quad (17)$$

با استفاده از ضرایب همبستگی بین نقاط (T_{s-hot}, dT_{hot}) و (T_{s-cold}, dT_{cold}) ضرایب a و b در فرمول محاسبه می شود.

مقادیر اصلاح شده نهایی برای شار گرمای محسوس (H) در هر پیکسل محاسبه شده و در معادله بیلان انرژی برای محاسبه تبخیر و تعرق لحظه ای در هر پیکسل مورد استفاده قرار می گیرد.

معرفی الگوریتم S_SEBI^۱:

اساس این روش نیز برآورد تبخیر و تعرق بر اساس بیلان انرژی سطح است و از این لحاظ با سبال تفاوتی ندارد. تفاوت عمده این دو روش در برآورد شار گرمای محسوس است (۱۸).

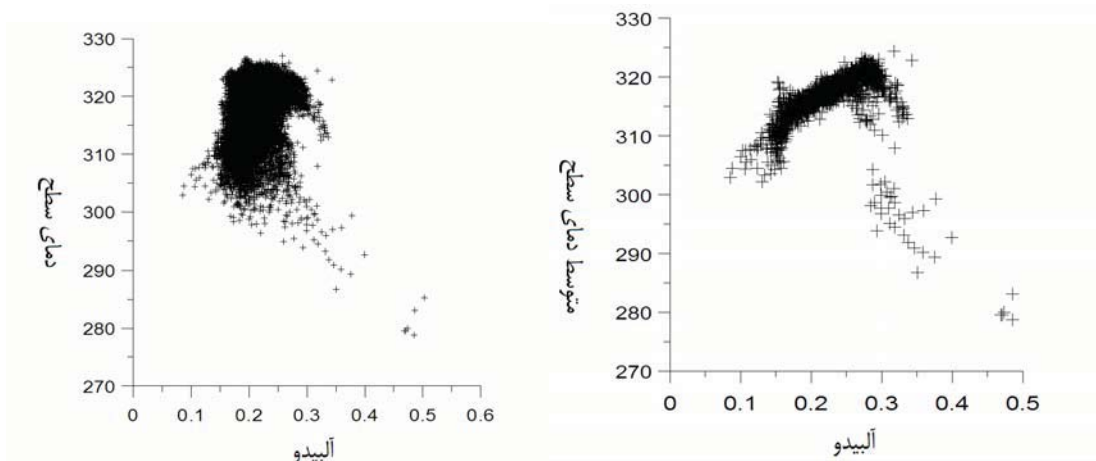
در این روش با فرض ثابت بودن تابش کلی و دمای هوا، توضیحی قراردادی بین بازتابش سطح و دمای سطح زمین برقرار می شود (شکل ۲). در بازتابشهای کم، دمای سطح زمین با افزایش بازتابش کم و بیش ثابت است. این امر بیشتر در سطوح اشباع و مزارع آبیاری و یا آب های آزاد دیده می شود که در آنجا انرژی در دسترس بیشتر صرف تبخیر و تعرق می گردد. با افزایش بازتابش، دمای سطح زمین شروع به افزایش می کند زیرا کم شدن رطوبت خاک تبخیر و تعرق را محدود می کند. پس از حد مشخصی با افزایش بازتابش سطح، دمای سطح کاهش می یابد. دلیل این امر این است که رطوبت به حدی کاهش یافته که دیگر تبخیر و تعرقی صورت نمی گیرد و تمام انرژی برای گرم کردن سطح به کار می رود. به دلیل افزایش بازتابش انرژی در دسترس کاهش می یابد. قسمت اول تحت کنترل تبخیر و قسمت دوم تحت کنترل بازتابش است. کسر تبخیر از رویط زیر محاسبه می شود.

$$\Lambda = \frac{\lambda ET}{\lambda ET + H} = \frac{\lambda ET}{R_n - G} \quad (18)$$

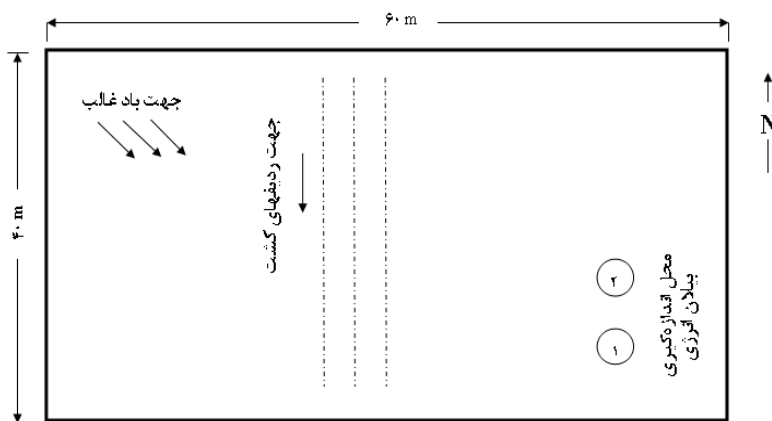
روابط دما- بازتابش برای λET_{max} و H_{max} به ازای بازتابش براساس نمودار بالا قابل تخمین است. با استفاده از رابطه بین دما و بازتابش (دمای وابسته به بازتابش، $T_{\lambda E}$) که در آن $\lambda E_{max}(T_0) = R_n - G$ و $H=0$ و همچنین بین بازتابش وابسته به دما، T_H ، که $H_{max}(T_0) = R_n - G$ و $\lambda E=0$ ، کسر تبخیر از رابطه زیر محاسبه می شود. در نتیجه داریم:

$$\Lambda = \frac{T_H - T_E}{T_H - T_{\lambda E}} \quad (19)$$

در این رابطه T_H و $T_{\lambda E}$ از تصویر و با استفاده از رابطه خطی



شکل ۳- نمودار پراکنندگی آلبیدو و دمای سطح زمین در مناطق کشاورزی استانهای تهران و البرز در روز ۲۰۰۹-۲۳۳



شکل ۴ - شمائی از موقعیت کلی مزرعه و محل‌های اندازه‌گیری بیلان انرژی

مقایسه آماری

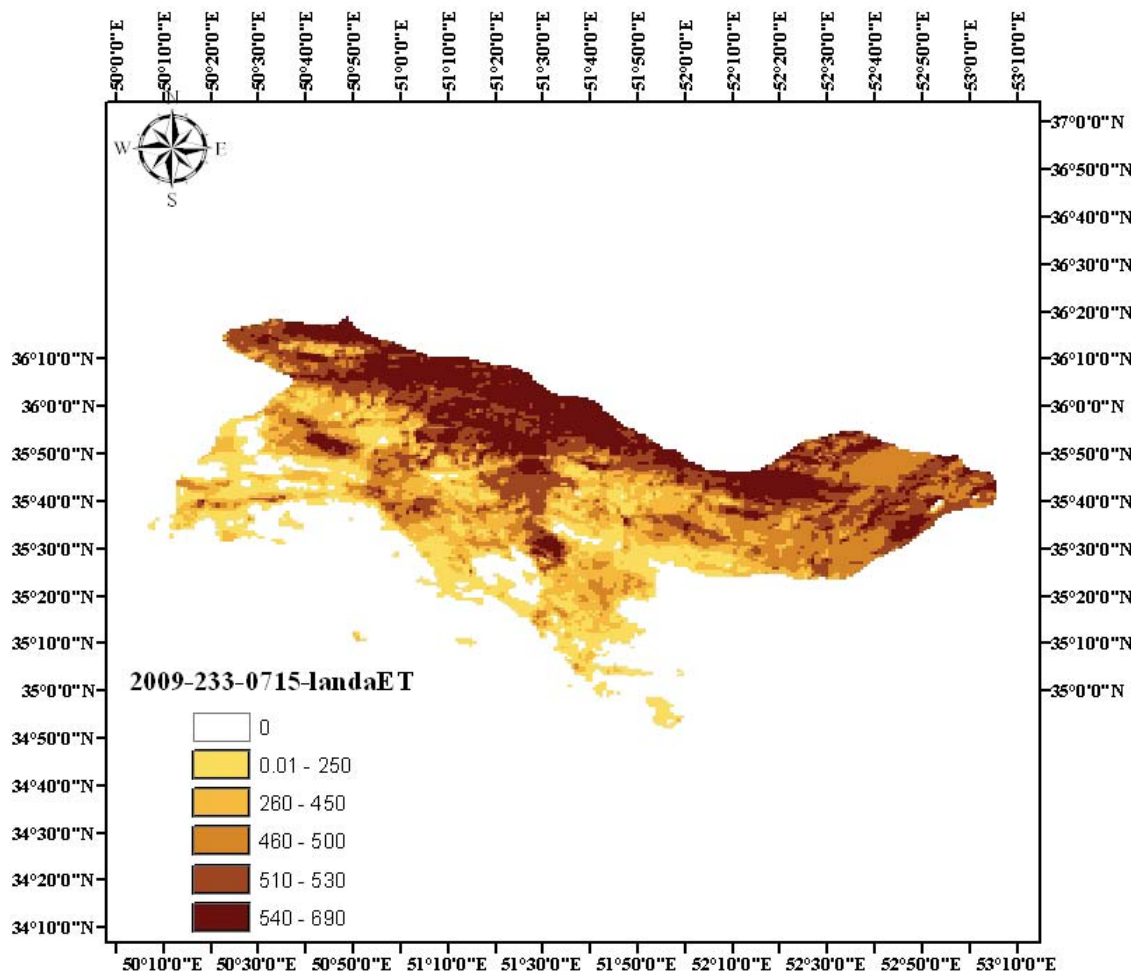
برای مقایسه مقادیر تخمینی با استفاده از سنجش از دور با مقادیر اندازه‌گیری شده بیلان انرژی نسبت بوون در مزرعه از ۳ پارامتر آماری ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین خطای مطلق^۱ و ضریب توده باقیمانده^۲ که طبق روابط زیر تعریف می‌شوند، استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (22)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{n} \quad (23)$$

دو تکرار (که با شماره‌های ۱ و ۲ در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند)، برای استقرار تجهیزات و اندازه‌گیری اجزای بیلان انرژی به فاصله ۵ متر از یکدیگر قرار گرفتند 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 می‌شد. اندازه‌گیریهای مربوط به بیلان انرژی در دوره گلدهی گیاه انجام شد که مربوط به روزهای ۲۰۰۹-۲۱۳، ۲۰۰۹-۲۱۴، ۲۰۰۹-۲۱۵، ۲۰۰۹-۲۳۱، ۲۰۰۹-۲۳۳، ۲۰۰۹-۲۳۴ و ۲۰۰۹-۲۳۴ بوده است.

1- MAE
2 -CRM



شکل ۵- شار گرمای نهان برآورد شده توسط الگوریتم SEBAL

شده در مزرعه حدود ۵۰ وات بر متر مربع است. شاخص ضریب توده باقیمانده بیانگر تخمین کم یا بیش تخمینی است. مقادیر منفی آن نشانگر تخمین بیشتر مدل می باشد. جدول ۱ نشان می دهد که مدل حدود ۷ درصد تابش خالص را بیشتر برآورد نموده است. همچنین این جدول نشان می دهد که در مجموع تفاوت بین شار گرمای خاک برآورد شده با استفاده از سنجش از دور و مقدار اندازه گیری شده در مزرعه حدود ۴۰ وات بر متر مربع است و حدود ۵۰ درصد بیش برآورد گردیده است.

مقایسه شار گرمای محسوس نیز نشان می دهد که در مجموع تفاوت بین شار گرمای محسوس برآورد شده با استفاده از سنجش از دور و الگوریتم SEBAL و مقدار اندازه گیری شده در مزرعه حدود ۶۰ وات بر متر مربع است و حدود ۵۰ درصد بیش برآورد گردیده است. همچنین در جدول مشاهده می شود که مقادیر خطای شار گرمای محسوس در الگوریتم S-SEBI بیشتر بوده است.

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (24)$$

که در این روابط d_i اختلاف بین i امین مقدار اندازه گیری و تخمین زده شده است و n تعداد جفت داده هاست. O نمایانگر داده های مشاهده شده و P نمایانگر داده های شبیه سازی شده است.

نتایج و بحث

پارامترهای آماری مربوط به مقادیر اندازه گیری شده در مزرعه و برآورد شده در بیکسل مربوط به مزرعه در جدول ۱ ارائه شده است. این جدول نشان می دهد که در مجموع ۵ روز تفاوت بین تابش خالص برآورد شده با استفاده از سنجش از دور و مقدار اندازه گیری

آمده و منجر به مقدار نامتناهی برای تبخیر-تعرق می گردد، محاسبه تبخیر-تعرق کل در این روز امکان پذیر نبود و لذا در جدول ۳ هیچ عددی برای این روز منظور نشده است.

با توجه به موارد فوق الذکر می توان اشاره نمود:

ریشه میانگین مربعات خطا گرمای نهان تبخیر به دست آمده توسط الگوریتم SEBAL ۳۰ وات بر متر مربع بوده است که با نتایج به دست آمده توسط باستیانس و همکاران (۵) مطابقت دارد. ریشه میانگین مربعات خطا در برآورد تبخیر و تعرق توسط الگوریتم S-SEBI، ۰/۹۷ میلیمتر در روز است که در مقایسه با ریشه میانگین مربعات خطا که توسط گلجولیوس و همکاران (۹) محاسبه شده بود، بیشتر است. این اختلاف می تواند به دلیل استفاده از سنجنده های مختلف باشد. زیرا در تحقیق گلجولیوس و همکاران (۹) سنجنده ASTER استفاده شد که قدرت تفکیک مکانی به مراتب بالاتری نسبت به سنجنده مودیس در تحقیق حاضر دارد. همچنین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا از مقدار به دست آمده توسط سوپرینو و همکاران (۱۵) کمتر است. این امر نیز ممکن است به دلیل استفاده آنها از سنجنده AVHRR باشد که قدرت طیفی به مراتب کمتری از سنجنده مودیس دارد.

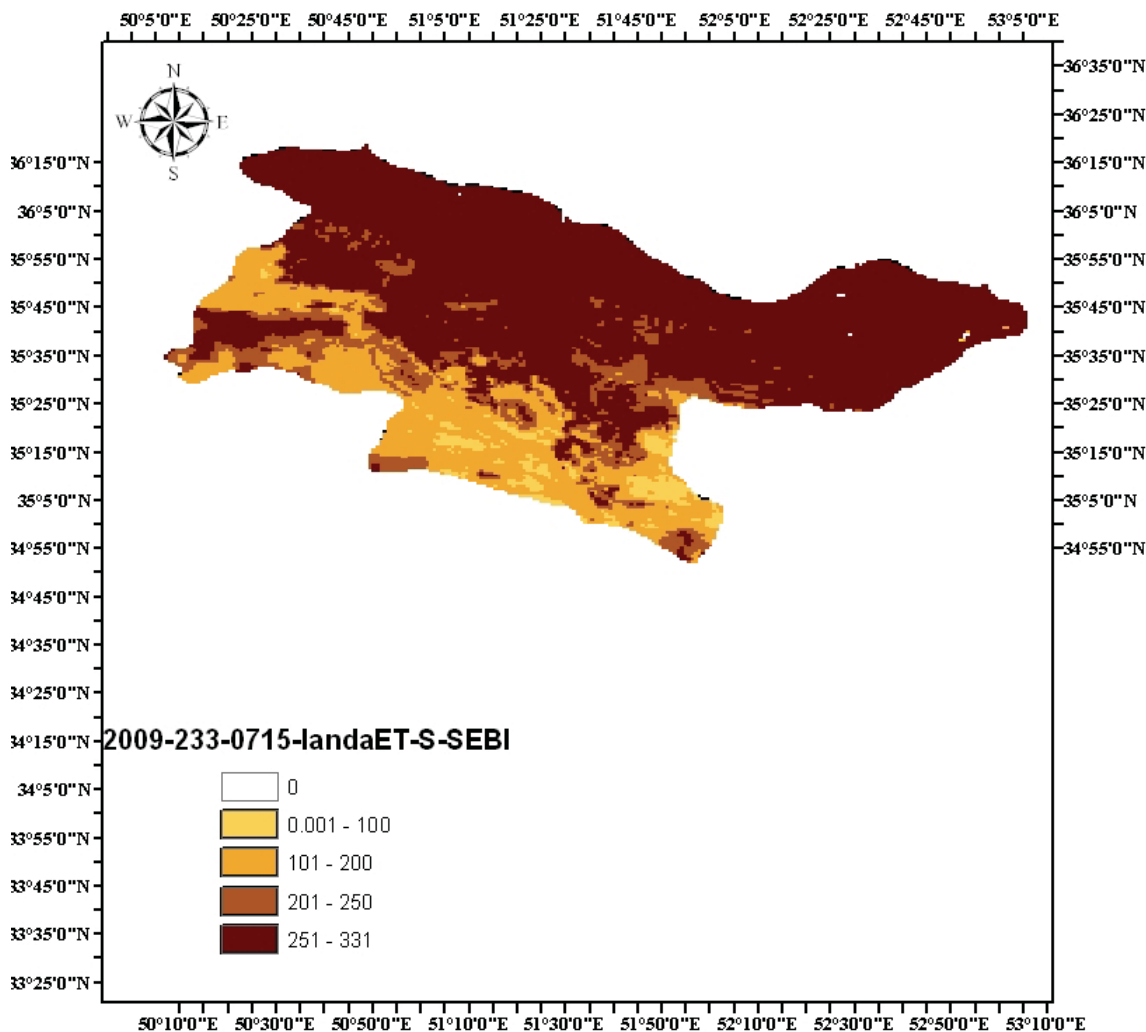
پارامترهای مربوط به مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده شار گرمای نهان نیز در جدول ۱ ارائه شده است. این جدول نشان می دهد که در مجموع تفاوت بین شار گرمای محسوس برآورد شده با استفاده از سنجش از دور و الگوریتم SEBAL و مقدار اندازه گیری شده در مزرعه حدود ۳۰ وات بر متر مربع است و ۱ درصد کم برآورد گردیده است. همچنین مشاهده می شود که مقادیر خطا در الگوریتم S-SEBI بیشتر بوده و حدود ۷۰ وات بر متر مربع می باشد که ۱۱ درصد کم برآورد شده است. شکل ۵ و شکل ۶ به ترتیب شار گرمای نهان برآورد شده توسط الگوریتم SEBAL و S-SEBI را نشان می دهد. مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده تبخیر و تعرق ساعتی توسط الگوریتمهای SEBAL و S-SEBI در جدول ۲ ارائه شده است. این جدول نشان می دهد تبخیر و تعرق ساعتی در زمان گذر ماهواره (حدود ۱۱:۳۰ صبح) برآورد شده توسط الگوریتم SEBAL ۰/۰۵ میلیمتر در ساعت با مقدار اندازه گیری شده، تفاوت دارد که حدود ۱ درصد می باشد. حال آنکه در الگوریتم S-SEBI این مقادیر به ترتیب ۰/۱۱ و ۱۱ درصد است. همانطور که در جدول ۳ مشخص است، تبخیر و تعرق روزانه برآورد شده توسط الگوریتم SEBAL ۰/۴ میلیمتر در روز با مقدار اندازه گیری شده، تفاوت دارد و حدود ۱ درصد از مقدار واقعی آن کمتر می باشد. حال آنکه در الگوریتم S-SEBI این مقادیر به ترتیب ۱ و ۱۲ درصد است. به دلیل اینکه در روز ۲۰۰۹-۲۱۳، نسبت بوون در برخی ساعات روز نزدیک ۱- بدست

جدول ۱- مقایسه نتایج حاصل از الگوریتمهای SEBAL و S-SEBI

CRM	MAE	RSME	جز بیلان انرژی
-۰/۰۷۸	۴۱/۴۲	۴۶/۳۷	تابش خالص
-۰/۴۹	۴۰/۳۸	۴۳/۶۵	شار گرمای خاک
-۰/۴۹	۴۹/۰۳	۵۸/۰۵	شار گرمای محسوس
-۰/۹۰	۸۴/۷۷	۱۱۱/۷۳	شار گرمای نهان
۰/۰۱	۳۴/۷۸	۳۱/۵۶	
۰/۱۱	۵۸/۸۶	۷۴/۳۰	

جدول ۲- مقایسه تبخیر و تعرق ساعتی برآورد شده با استفاده از الگوریتم SEBAL و S-SEBI و مقدار اندازه گیری شده در مزرعه

تبخیر و تعرق محاسبه شده		تبخیر و تعرق اندازه گیری شده (mm/hour)	تاریخ تصویر
(mm/hour)S-SEBI	(mm/hour) SEBAL		
۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۴	۲۰۰۹-۲۱۳
۰/۴۲	۰/۴۰	۰/۴۱	۲۰۰۹-۲۱۴
۰/۵۸	۰/۵۹	۰/۵۲	۲۰۰۹-۲۱۵
۰/۴۸	۰/۶۵	۰/۶۸	۲۰۰۹-۲۳۱
۰/۴۴	۰/۵۹	۰/۵۷	۲۰۰۹-۲۳۳
۰/۵۲	۰/۵۴	۰/۶۲	۲۰۰۹-۲۳۴
۰/۱۱	۰/۰۵		RSME
۰/۰۹	۰/۰۴		MAE
۰/۱۱	۰/۰۱		CRM



شکل ۶- شار گرمای نهان برآورد شده توسط الگوریتم S-SEBI

جدول ۳- مقایسه تبخیر و تعرق روزانه برآورد شده با استفاده از الگوریتم SEBAL و S-SEBI و مقدار اندازه گیری شده در مزرعه تبخیر و تعرق محاسبه شده

تبخیر و تعرق اندازه گیری شده (mm/day)		تاریخ تصویر
(mm/day)S-SEBI	(mm/day) SEBAL	
۴/۳۲	۴/۱۴	۲۰۰۹-۲۱۴
۴/۸۷	۴/۹۶	۲۰۰۹-۲۱۵
۳/۵۴	۴/۷۷	۲۰۰۹-۲۳۱
۳/۹۰	۵/۲۲	۲۰۰۹-۲۳۳
۴/۵۸	۴/۸۰	۲۰۰۹-۲۳۴
۰/۹۷	-/۴۴	RSME
۰/۸۳	-/۳۵	MAE
۰/۱۲	-/۰۱	CRM

باشد و در مواقعی که اطلاعات هواشناسی در دسترس نیست می تواند به کار رود. متأسفانه این روش در مقایسه با SEBAL نتایج قابل اطمینانی ارائه نکرده است. علاوه بر این، این روش در مواردی می

نتیجه گیری

الگوریتم S-SEBI روش ساده ای برای برآورد تبخیر تعرق می

هر چه قدرت تفکیک مکانی و رادیومتری و البته طیفی سنجنده بیشتر باشد نتایج حاصل از آن نیز قابل اطمینان تر خواهد بود.

تواند مورد استفاده قرار گیرد که شرایط اتمسفری در کل تصویر ثابت باشد. بنابراین تنها برای منطقه کوچکی قابل کاربرد است. همچنین

منابع

- ۱- ارشد ص. ۱۳۸۶. ارزیابی ریسک خشکسالی کشاورزی با استفاده از سنجش از دور: توسعه یک مدل اجرایی برای استان کرمانشاه. پایان نامه دکتری، دانشگاه تربیت مدرس. دانشکده کشاورزی. گروه سازه های آبی
- ۲- مباشری م.ر.، خاوریان ح. و موسوی س.ح. ۱۳۸۵. بررسی خطا در برآورد تبخیر و تعرق ناشی از شار گرمای محسوس در مدل SEBAL. اولین همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی. ۱۲ اردیبهشت ۱۳۸۵ تا ۱۴ اردیبهشت ۱۳۸۵. دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب.
- 3- Allen R., Morse A., and Tasumi M. 2003. Application of SEBAL for western US water rights regulation and planning. Proceedings of the International Conference on Irrigation and Drainage, Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions; Montpellier, France.
- 4- Bastiaanssen W.G.M., Menenti M., Fedde R.A., and Holtslag A.A.M. 1998. A remote sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 1. Formulation. Journal of Hydrology 198-212.
- 5- Bastiaanssen W.G.M., Pelgrum H., Wang J., Ma Y., Moreno J.F., Roerink van der Wal G.J.T. 1998. A remote sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2. Validation, Journal of Hydrology 213-229.
- 6- Bastiaanssen W.G.M., Noordman E.J.M., Pelgrum H., David G., Thoreson B.P., and Allen R.G. 2005. SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water Resources Management under Actual Field Conditions. JOURNAL OF IRRIGATION AND DRAINAGE ENGINEERING. Vol.131.no 1, pp85-93.
- 7- Bastiaanssen W.G.M. 2000. SEBAL -based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz. Basin, Turkey. Journal of Hydrology 229: 87-100.
- 8- Bouchet R.J. 1963. 'Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique. In Symposium on Surface Waters. IAHS Publication No. 62. IAHS Press: Wallingford; 134-142
- 9- Galleguillos M., Jacob Frédéric, Prevot L., Lagacherie P., and Liang S.L. 2011. Mapping daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed. Ieee Geoscience and Remote Sensing Letters:8 :168-172.
- 10- Galleguillos M., Jacobb F., Prévot L., French A., and Lagacherie Ph. 2011. Comparison of two temperature differencing methods to estimate daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed from ASTER data. Remote Sensing of Environment, 115: 1326-1340
- 11- Liang S. 2000. 'Narrowband to Broadband Conversion of Land Surface Albedo, I Algorithms.' Remote Sensing of Environment, 76: 213-238
- 12- Nishida K., Nemani R.R., Glassy J.M., and Running S.W. 2003b. Development of an evapotranspiration index from Aqua/MODIS for monitoring surface moisture status. IEEE Trans Geosci Rem Sens 41:493-501.
- 13- Kalma J.D., and Calder I.R. 1994. Land surface processes in large scale hydrology. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, Operational Hydrology Report No. 40, 60
- 14- parody G.N. 2000. AVHRR hydrological analysis system(AHAS).ITC. Water resources division. Enshede. Netherland.
- 15- Sobrino J.A., Gómez M., Jiménez-Muñoz J.C., Oliso A., and Chehbouni G. 2005. A simple algorithm to estimate evapotranspiration from DAIS data: Application to the DAISEX campaigns. 315: 117-125.
- 16- Sobrino J.A., Gómez M., Jiménez-Muñoz J.C., and Oliso A. 2007. Application of a simple algorithm to estimate daily evapotranspiration from NOAA-AVHRR images for the Iberian Peninsula. Remote Sensing of Environment: 110:139-148.
- 17- Tasumi M., Trezza R., Allen R., and Wright J.L. 2003. U.S validation tests on the SEBAL model for Evapotranspiration via satellite. CID workshop on remote sensing of ET for large regions
- 18- Roerink G.J.Z.Su, and Menenti M. 2000 .S-SEBI: A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance. P&s. Chem .Earth (B), Vol. 25, No. 2, pp
- 19- Waters R., Allen R., Tasumi M., Trezza R., and Bastiaanssen W. 2002. SEBAL , Surface Energy Balance Algorithms for Land. Advanced Training and Users Manual. Version 1
- 20- Xu C.Y., and Chen D. 2005. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. Journal of hydrological process 19, 3717-3734.

Comparison of SEBAL and S-SEBI Algorithms in Estimating Evapotranspiration in Karaj Region

B. Hassanpour¹- F. Mirzaei^{2*}- S. Arshad³- H. Kossari⁴

Received: 30-5-2011

Accepted: 2-12-2012

Abstract

In the present study, two methods of predicting evapotranspiration by the use of satellite images were compared. Field data in a corn site was measured at agricultural engineering research institute private farm in 6 days. Consequently MODIS images were used for predicting evapotranspiration by SEBAL and S-SEBI algorithms. These algorithms are different in predicting sensible heat flux. The results show that RSME value for the net radiation and soil heat flux was respectively 46 and 43 (w/m^2). SEBAL algorithm is capable to estimate sensible heat flux more accurate than S-SEBI so it is able to estimate latent heat flux more accurate. The RSME amount in sensible heat flux and latent heat flux for SEBAL algorithm are 58 and 31 (w/m^2) respectively. These amounts in S-SEBI algorithm are 111 and 74 (w/m^2). The differences between two algorithms could be because of the use of meteorological data in predicting sensible heat flux and aerodynamic resistance in SEBAL algorithm. Also the results show that SEBAL algorithm estimates hourly evapotranspiration by the difference of 0.05 mm/hour which is about 1% of hourly evapotranspiration Whereas S-SEBI predicted it by the difference of 0.11 and 11%. The difference between measured daily evapotranspiration and SEBAL -based daily evapotranspiration was 0.4 mm that is about 1% less than measured. Whereas these differences by S-SEBI are 1mm and 12%.

Keywords: Evapotranspiration, Surface Energy Balance, SEBAL, S- SEBI, Karaj

1,2,4- PhD Student, Assistant Professor and Former MSc Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Respectively

(*-Corresponding Author Email: fmirzaei@ut.ac.ir)

3- Consultant Engineer of Fishel Pad Company