

تعیین و ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجش از دور؛ مطالعه موردی حوزه آبخیز تهر، گلستان

میرحسین میریعقوبزاده^۱، کریم سلیمانی^۲، محمود حبیب‌نژاد روشن^۲، کاکا شاهی^۲، کریم عباسپور^۴، سمیرا اخوان^۵

تاریخ دریافت ۱۳۹۲/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۲۵

چکیده

تبخیر و تعرق یکی از عوامل مهم در چرخه هیدرولوژی و از جمله عوامل تعیین کننده معادلات انرژی در سطح زمین و توازن آب می‌باشد. در حقیقت تبخیر و تعرق ایجاد کننده ارتباط مابین امان‌های مهم کره زمین و اتمسفر محسوب می‌شود. اغلب روش‌هایی که تا کنون ارائه شده است از اندازه گیری‌های نقطه ای برای تخمین تبخیر و تعرق استفاده می‌کنند، لذا فقط مناسب مناطق در مقیاسهای بسیار کوچک بوده و به خاطر طبیعت پویا و تغییرات مکانی تبخیر و تعرق قابل تعمیم به حوزه های بزرگ نمی‌باشند. سنجش از دور این قابلیت را دارد تا مقدار تبخیر و تعرق را تخمین زده و حتی توزیع مکانی آن را مورد بررسی قرار دهد. الگوریتم توازن انرژی سطح زمین (SEBAL) الگوریتم نسبتاً جدیدی است که در اکثر نقاط دنیا برای برآورد تبخیر و تعرق و سایر شارهای گرمایی در سطح مورد استفاده قرار گرفته و نتایج رضایت‌بخشی داشته است. در تحقیق حاضر تبخیر و تعرق حاصل از الگوریتم سبال با روش استاندارد فائو در حوزه آبخیز تهر واقع در استان گلستان مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج تحقیق حاکی از آن است که الگوریتم SEBAL قابلیت تعیین میزان تبخیر و تعرق واقعی را در سطح وسیع بدون نیاز به داده‌های هواشناسی زیاد دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم SEBAL میزان تبخیر و تعرق را بین ۱-۰/۵ میلیمتر در روز کمتر از روش پنمن - مانتیث برآورد می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق، سنجش از دور، سبال، پنمن - مانتیث، حوزه آبخیز تهر.

^۱ نویسنده مسئول و کاندیدای دریافت دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گرایش هیدرولوژی و منابع آب، دانشگاه مازندران، پست الکترونیک:

m.miryaghoobzadeh@gmail.com

^۲ استاد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

^۳ استادیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

^۴ استاد موسسه ایواگ، سوئیس

^۵ استادیار دانشکده مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

مقدمه

تبخیر و تعرق یکی از عوامل مهم در چرخه هیدرولوژی و از جمله عوامل تعیین کننده معادلات انرژی در سطح زمین و توازن آب می باشد و برآورد آن در زمینه های مختلف مانند هیدرولوژی، کشاورزی، مدیریت جنگل و مرتع و مدیریت منابع آب مورد نیاز است. ۶۴٪ از بارشها به دلیل تبخیر و تعرق از سطح زمین صورت می گیرد در حقیقت تبخیر و تعرق ایجاد کننده ارتباط مابین امان های مهم کره زمین و اتمسفر محسوب می شود (سو و همکاران، ۲۰۰۶). در بین فرایندهای مختلف چرخه هیدرولوژی، اندازه گیری تبخیر و تعرق واقعی مشکل ترین آنهاست (علیزاده، ۱۳۸۱). در مهندسی هیدرولوژی تبخیر از دو جهت حائز اهمیت است: اولاً تبخیر از رودخانه ها، دریاچه ها و مخازن سدها باعث تلفات آب می شود که لازم است مقدار آن محاسبه شود، ثانیاً تبخیر و تعرق از سطح خاک و پوشش گیاهی در حوزه های آبخیز یکی از اجزای چرخه آب محسوب می شود (علیزاده، ۱۳۸۱). اغلب روشهایی که تا کنون ارائه شده است از اندازه گیری های نقطه ای برای تخمین تبخیر و تعرق استفاده می کنند، لذا فقط مناسب مناطق در مقیاس بسیار کوچک بوده و به خاطر طبیعت پویا و تغییرات مکانی تبخیر و تعرق قابل تعمیم به حوزه های آبخیز بزرگ نمی باشند. تبخیر و تعرق پدیده ای با تغییرات مکانی است نه نقطه ای و با توجه به تغییرات مکانی عوامل دخیل در تبخیر اعم از سطح تبخیر شونده و عوامل محیطی موثر بر آن در برآورد میزان تبخیر و تعرق بایستی اقدام به مدلسازی توزیعی نمود (آلن و همکاران، ۲۰۰۳). به دلیل وجود تغییرات مکانی در کاربری اراضی، پوشش زمین، خواص فیزیکی خاک و جریانات سطحی اکثر پارامترهای هیدرولوژی و هواشناسی با تغییر مکان تغییرات قابل توجهی را از خود نشان میدهند که نمی توان با تعداد محدودی از مشاهدات سینوپتیکی آنها را بدست آورد (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۷). داده های سنجش از دور با افزایش قدرت تفکیک مکانی ابزار مفیدی جهت تهیه اطلاعات در مقیاسهای مکانی و زمانی مختلف می باشد. با استفاده از تکنیک سنجش از دور می توان تبخیر و تعرق را تخمین زده و حتی توزیع مکانی آن را مورد بررسی قرار داد، زیرا تنها روشی است که می تواند

پارامترهای دمای سطح، ضریب آلبدو و شاخصه های پوشش گیاهی را به صورت منطبق یا سازگار با محیط فراهم کرده و همچنین از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد (اصغرزاده و همکاران، ۱۳۸۳). روشهای مختلفی جهت استفاده از این داده ها در رویکردهای برآورد شارهای سطح توسعه یافته اند. الگوریتم توازن انرژی سطح زمین (SEBAL)^۱ الگوریتم نسبتاً جدیدی است که در اکثر نقاط دنیا برای برآورد تبخیر و تعرق و سایر شارهای گرمایی در سطح مورد استفاده قرار گرفته و نتایج رضایت بخشی داشته است. تاکنون مطالعات زیادی انجام شده است که همه نشان دهنده کارایی الگوریتم SEBAL در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه ای و حوزه های بزرگ می باشد (باستیانسن، ۲۰۰۰؛ باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۵؛ سینگ و همکاران، ۲۰۰۸). باستیانسن (۲۰۰۰) طی پژوهشی الگوریتم SEBAL را در حوزه گدیز ترکیه با استفاده از تصاویر ماهواره لندست مورد آزمایش قرار داد. وی از داده های صحرایی جهت تعیین رابطه اختلاف دمای سطح و دمای هوا استفاده کرد. نتایج نشان می دهد که جزء تبخیر در ماه ژوئن به دلیل تابش خورشیدی بیشتر و انرژی خالص در دسترس بیشتر به کاهش شار گرمای نهان منجر شده است. احمد و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیقی میزان آب مصرفی گیاهان را با استفاده از الگوریتم SEBAL در حوزه آبخیز کریشنا واقع در هند از تصاویر ماهواره ای MODIS بدست آورده اند. صالح حمید و همکاران (۲۰۰۹) میزان تبخیر و تعرق را در منطقه ای از شرق سودان بر اساس الگوریتم SEBAL با استفاده از داده های AVHRR تعیین نمودند. تیکسیرا و باستیانسن (۲۰۰۹) پارامترهای ورودی الگوریتم SEBAL را برای اولین بار جهت کالیبراسیون و ارزیابی تبخیر و تعرق و قابلیت تولید آب را با چهار ایستگاه اندازه گیری شار گرمایی و هفت ایستگاه کلیماتولوژی در مقاطع میانی رود سانفرانسیسکو در برزیل مورد استفاده قرار دادند. مقدار ضریب تبیین ۰/۷۵ تا ۰/۹۹ در تمامی پارامترها در تحقیق ایشان بدست آمد که نشان از قابلیت بالای الگوریتم SEBAL در محاسبه تبخیر و تعرق دارد. جرج و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از داده های لایسیمتر میزان

¹ Surface Energy Balance Algorithm for Land

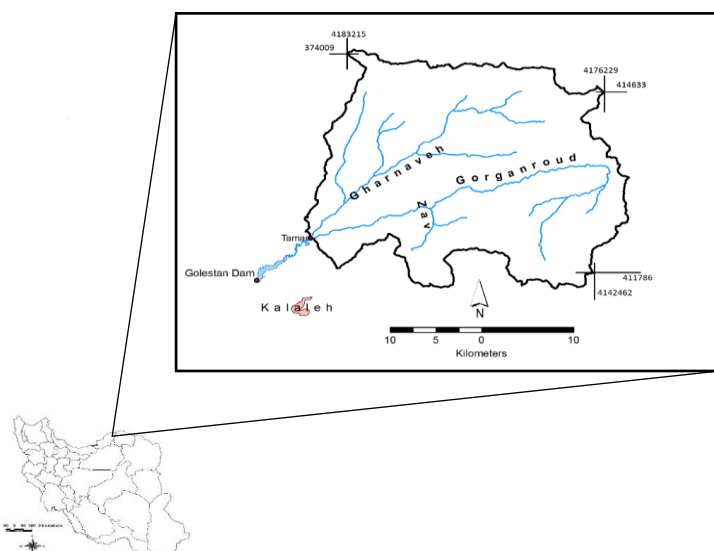
هدف از انجام این تحقیق ارزیابی دقت الگوریتم SEBAL در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در منطقه مورد مطالعه و مقایسه نتایج حاصل با روش استاندارد پنمن - مانیتیت (FAO-56) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز تمر یکی از زیر حوزه‌های حوزه آبخیز گرگانرود می‌باشد که در استان گلستان واقع شده است. مساحت حوزه مورد مطالعه ۱۵۲۵/۳ کیلومتر مربع و از نظر جغرافیایی در محدوده ۲۴° ۳۷' تا ۲۹° ۴۹' عرض شمالی و ۵۵° ۲۹' تا ۵۶° ۰۴' طول شرقی قرار دارد. مرتفع‌ترین نقطه در منطقه خوش بیلاق در جنوب حوزه با ارتفاع ۲۰۹۸ متر و پست‌ترین نقطه سد گلستان با ارتفاع ۱۱۷ متر از سطح دریا می‌باشد. عمده پوشش زراعی منطقه تحت پوشش گندم پائیزه قرار دارد که مجموع سطح زیر کشت گندم پائیزه در شهرستان کلالة ۵۵۶۳۸ هکتار و در شهرستان مراوه تپه ۳۲۷۱۸ هکتار می‌باشد (سازمان جهاد کشاورزی استان گلستان). شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز تمر را در ایران نشان می‌دهد.

تبخیر و تعرق واقعی بدست آمده از الگوریتم SEBAL را در تصاویر حاصل از سکوه‌های هوایی در ایالت تگزاس آمریکا مورد ارزیابی قرار دادند. میزان مربعات خطای بدست آمده از الگوریتم SEBAL حاصل از این تحقیق برابر ۰/۱۵ میلی‌متر در روز بوده است. در داخل کشور نیز طی سالهای اخیر مطالعاتی در زمینه کاربرد الگوریتم SEBAL انجام پذیرفته است. ثنایی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۰) میزان تبخیر و تعرق را در منطقه مشهد با استفاده از الگوریتم SEBAL در تصاویر ماهواره‌ای MODIS تعیین نموده‌اند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که تصاویر ماهواره‌ای MODIS و الگوریتم SEBAL قادر هستند که مقدار تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس روزانه را بخوبی برآورد می‌نماید. حسن پور و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی دو الگوریتم SEBAL و S-SEBI را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS در مزرعه اختصاصی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی واقع در کرج را تعیین نمودند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم SEBAL تبخیر و تعرق را نسبت به الگوریتم S-SEBI بهتر برآورد می‌نماید.



شکل ۱: موقعیت حوزه آبخیز تمر و شهرستان کلالة در استان گلستان، ایران

آماده سازی تصاویر

برای هر پیکسل در زمان تصویربرداری محاسبه می‌کند (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸؛ باستیانسن، ۲۰۰۰؛ چمین و احمد، ۲۰۰۰؛ آلن و باستیانسن، ۲۰۰۲؛ باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۲). روش‌های مبتنی بر توازن انرژی بر ترکیب مدل‌های تجربی و فیزیکی و با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده استوار می‌باشند. بنابراین بیشتر مدل‌های کاربردی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای میزان اختلاف دمای هوا و دمای زمین را محاسبه و بطور مستقیم تبخیر و تعرق را محاسبه می‌نمایند (اینوئی، ۲۰۰۳). معادله کلی الگوریتم توازن انرژی بصورت رابطه ۱ زیر بیان می‌شود:

$$R_n = G + H + \lambda ET \quad \text{رابطه ۱:}$$

که در آن: R_n : شار تابشی کل^۳ بر حسب (W/m^2) ،
 λET : مقدار شار گرمایی نهان در لحظه عبور ماهواره بر حسب (W/m^2) ، H : شار گرمایی محسوس هوا^۴ بر حسب (W/m^2) ، G : شار گرمایی خاک^۵ بر حسب (W/m^2)
 شار تابشی کل محاسبه جبری مابین تمامی تابش های ورودی و بازتابش خروجی از سطح می‌باشد. شار تابشی کل برابر جمع جبری تابش طول موج کوتاه به عنوان تابعی از آلودگی سطح و تابش طول موج بلند که از تفاضل میان طول موج بلند ورودی و خروجی بدست می‌آید. میزان تابش طول موج کوتاه ورودی به زمین ۳-^{۰/۳} میکرومتر می‌باشد. میزان تابش طول موج بلند خروجی از سطح زمین نیز در حدود ۱۰۰-۳ میکرومتر می‌باشد. شار تابشی کل نیز با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

رابطه ۲: $R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow}$
 که در آن: R_n : شار تابشی کل بر حسب (W/m^2) ،
 $R_{s\downarrow}$: تابش امواج کوتاه^۶، α : آلودگی سطح بدون دیمانسینون، $R_{L\downarrow}$: تابش امواج بلند^۷، $R_{L\uparrow}$: بازتابش امواج بلند^۸، ϵ_0 : قابلیت انتشار سطح^۹ بدون دیمانسینون

سنجنده MODIS یکی از دقیقترین پروژه های سیستم مشاهدات زمینی سازمان فضایی آمریکا (ناسا) به شمار می‌آید. مدل پیش از پرتاب سنجنده MODIS^۱ در ۱۸ دسامبر سال ۱۹۹۹ بر روی ماهواره TERRA از سیستم های مشاهدات زمینی سازمان فضایی آمریکا (ناسا) مستقر شد و در مدار زمین قرار گرفته است و اطلاعات بسیار مفیدی از سطح زمین جهت مطالعات زمین و اتمسفر در اختیار محققین علوم زمینی قرار داده است. این پوشش با پرتاب ماهواره Aqua از سری ماهواره های مشاهدات زمینی در ۴ می ۲۰۰۲ افزایش چشمگیری یافته است. سنجنده MODIS دارای ۳۶ باند در محدوده طیفی ۰/۴۱ تا ۱۴/۵ میکرومتر بوده و قدرت تفکیک آن در زاویه عمود به سطح زمین ۲۵۰ متر در ۲ باند طیفی، ۵۰۰ متر در ۵ باند و ۱۰۰۰ متر در ۲۹ باند طیفی می‌باشد. ۲۰ باند آن در ناحیه باند مرئی محدوده ۰/۴۱ الی ۲/۱ میکرومتر بوده و ۱۶ باند طیفی باقیمانده این سنجنده در ناحیه حرارتی بالاتر از ۳/۷ میکرومتر می‌باشد.

در تحقیق حاضر از پنج تصویر سنجنده MODIS طبق جدول^۱ جهت برآورد میزان تبخیر و تعرق استفاده شده است.

جدول ۱: تصاویر مورد استفاده سنجنده Terra-MODIS

زمان تصویربرداری GMT	تاریخ تصویربرداری
۰۷ ۱۷	۱۳۸۸/۰۲/۰۲
۰۷ ۰۵	۱۳۸۸/۰۱/۰۳
۰۷ ۲۳	۱۳۸۸/۰۱/۰۸
۰۷ ۴۲	۱۳۸۸/۰۱/۱۳
۰۶ ۳۲	۱۳۸۸/۰۱/۱۸

الگوریتم SEBAL^۲

در سال ۱۹۸۹ میلادی سنجش از دور برای نخستین بار جهت تعیین تغییرات منابع آب در مصر توسط باستیانسن و منتهی شروع گردید و سپس الگوریتم ارتباط زمین، خاک، پوشش گیاهی و آب در سطح زمین توسط باستیانسن ارائه گردید (تاسومی، ۲۰۰۳). SEBAL یک الگوریتم پردازش تصویر است که تبخیر و تعرق واقعی را

3 net radiation flux

4 sensible heat flux to the air

5 soil heat flux

6 incoming shortwave radiation

7 incoming long wave radiation

8 outgoing long wave radiation

9 surface thermal emissivity

^۱ MODIS Proto Flight Model^۲ Surface Energy Balance Algorithm for Land

نیز بایستی دارای دمای سطح برابر با دمای هوا باشد. واسنجی درونی الگوریتم شار گرمای محسوس توسط الگوریتم SEBAL نیاز به تصحیح اتمسفری توسط مدل‌های تابشی جهت محاسبه دمای سطح و آلبیدو را حذف می‌نماید. این واسنجی درونی علاوه بر این موجب کاهش اثرات خطا در تخمین ضرایب زبری و مقاومت آئروودینامیک می‌شود. با توجه به تعیین پیکسل‌های سرد و گرم رابطه خطی مابین ترم dT و دمای سطح برقرار می‌گردد. شار گرمای محسوس با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$H = (\rho \times C_p \times dT) / r_{ah} \quad \text{رابطه ۴}$$

ρ : چگالی هوا^۷ بر حسب (Kg/m^3) ، C_p : گرمای ویژه هوا^۸ برابر 1.004 $(\text{J}/\text{Kg}/\text{K})$ ، dT : اختلاف دما بین دو ارتفاع Z_1 و Z_2 بر حسب (K) ، r_{ah} : مقاومت آئروودینامیکی در برابر انتقال گرما (s/m)

شار گرمایی خاک^۱: شار گرمایی خاک میزان ذخیره گرمایی خاک در نتیجه گرادیان دمایی مابین سطح خاک و لایه های پایینتر خاک می‌باشد. گرادیان دمایی تابعی از جزء پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ می‌باشد که با ممانعت از ورود نور^۲ به سطح خاک و شکل گیری سایه^۳ در بالای خاک لخت نسبت گرمایی سطح خاک لخت^۴ را بیان می‌کند. از آنجایی که اطلاعات میدانی در مورد قابلیت هدایت گرمایی خاک موجود نیست جهت محاسبه شار گرمایی خاک از روابط تجربی که تابعی از شاخص پوشش گیاهی، آلبدوی سطح و دمای سطح می‌باشد استفاده می‌شود. شار گرمایی خاک با استفاده از رابطه ۳ که توسط باستیانس (۱۹۹۵) ارائه شده است محاسبه می‌شود.

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s / \alpha (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98NDVI^4)}{\quad} \quad \text{رابطه ۳}$$

T_s : دمای سطح بر حسب درجه سانتیگراد، α : آلبدوی سطح، $NDVI$: شاخص پوشش گیاهی

شار گرمای محسوس^۵: شار گرمایی محسوس میزان تلفات انرژی از خاک از طریق همرفت و فرایند انتشار در نتیجه اختلاف دمایی مابین سطح و پایینترین لایه جو^۶ می‌باشد. شار گرمای محسوس با استفاده از سرعت باد، ضریب زبری و اختلاف دمای سطح و هوا مورد محاسبه قرار می‌گیرد. شار گرمایی محسوس یک مانع اساسی در برآورد تبخیر و تعرق بشمار میرود چرا که مقدار ترمهای dT و مقاومت آئروودینامیکی سطح جهت محاسبه شار گرمای محسوس مجهول می‌باشد. محاسبه شار گرمای محسوس طبق شکل ۲ انجام می‌گیرد. جهت محاسبه این مجهولات الگوریتم ابتدا شار گرمای محسوس را در پیکسل های خشک و تر محاسبه می‌نماید. پیکسل خشک یا گرم بایستی در ناحیه خشک و بایر انتخاب شود که تبخیر و تعرق در آن اتفاق نمی‌افتد. پیکسل تر یا سرد

¹ Soil Heat Flux

² Light interception

³ Shadow formation

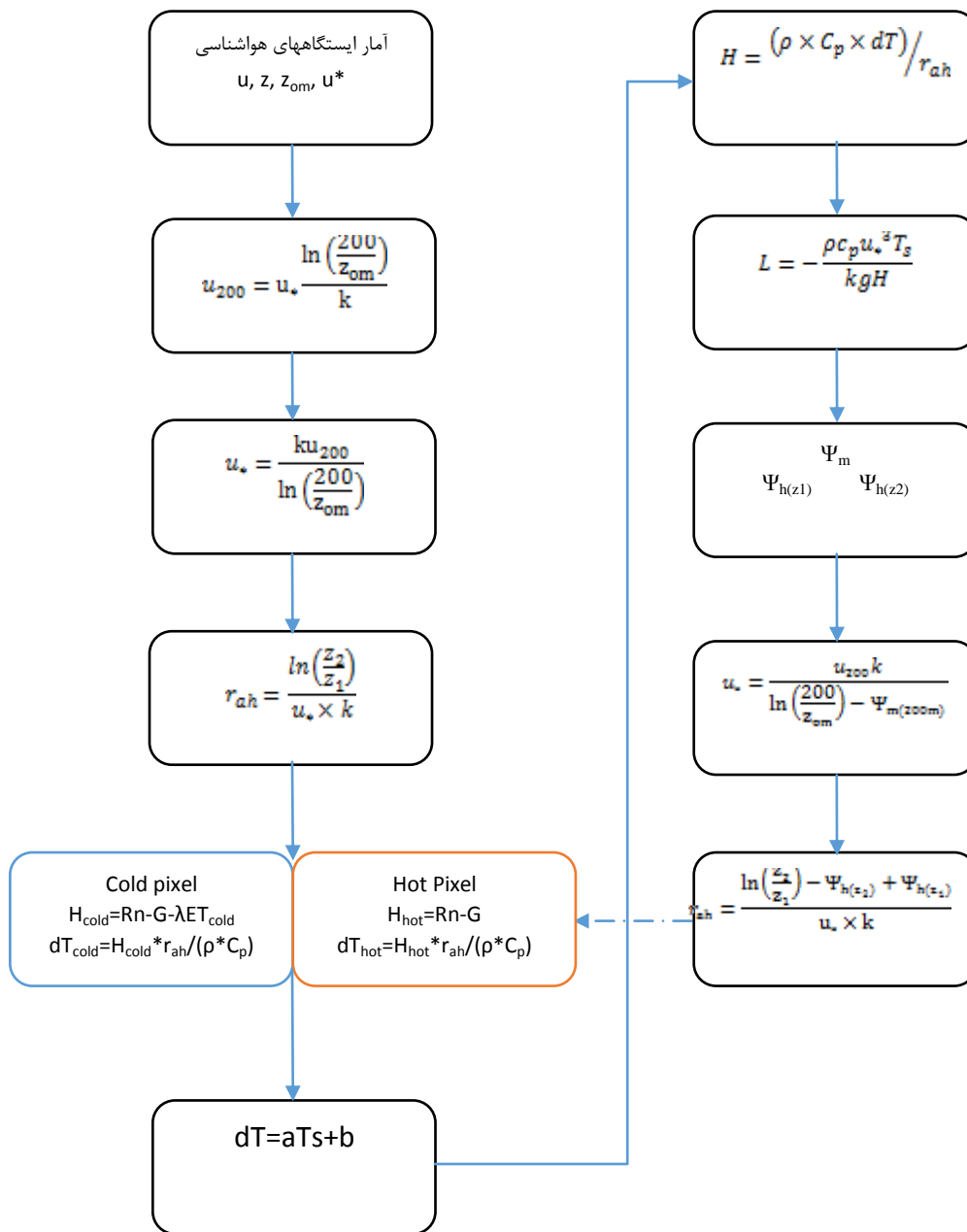
⁴ Bare soil heating

⁵ Sensible Heat Flux

⁶ Lowermost overlying atmosphere

⁷ air density

⁸ air specific heat



شکل ۲: فرآیند محاسبه شار گرمای محسوس (واترز و همکاران، ۲۰۰۲)

رابطه ۵: $ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda}$

که در آن: ET_{inst} مقدار تبخیر و تعرق لحظه‌ای بر حسب (mm/hr)، λ : شار گرمای نهان^۳ و یا میزان گرمایی که در تبخیر یک کیلوگرم آب جذب می‌شود بر حسب (J/kg).

شار گرمای نهان^۱: شار گرمای نهان از تفاضل جبری معادله توازن انرژی محاسبه می‌شود. بعد از محاسبه شار گرمای نهان جزء تبخیری تعیین می‌گردد. با استفاده از جزء تبخیری در هر پیکسل میزان تبخیر و تعرق در ۲۴ ساعت مورد محاسبه قرار می‌گیرد. تبخیر و تعرق لحظه‌ای^۲ با استفاده از معادله ۵ بدست می‌آید.

^۳ latent heat of vaporization

^۱ Latent Heat Flux

^۲ Instantaneous Evapotranspiration

در تمام روشهایی که توسط آنها تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_o) یا تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_p) محاسبه می‌شود برای آنکه بتوان نتایج حاصله را به سطوح پوشش گیاهی مورد نظر مانند پوشش های زراعی، مرتعی، باغات و یا جنگل تعمیم داد لازم است مقادیر بدست آمده را در ضریب گیاهی KC ضرب نمود. ضریب گیاهی علاوه بر تبخیر و تعرق مرجع به نوع گیاه، مرحله رشد و شرایط آب و هوایی محل بستگی دارد.

$$ET_{crop} = k_c(ET_o) \quad \text{رابطه ۷:}$$

باید توجه داشت که ضریب گیاهی یک مقدار ثابت نبوده و مقدار آن در طول دوره رویش گیاه تغییر می‌کند. برای تعیین ضریب گیاهی و استفاده آن جهت تبدیل ET_o به تبخیر و تعرق گیاه مورد نظر بر اساس روش پیشنهادی فائو برای دوره رویش گیاه منحنی تغییرات ضریب گیاهی رسم می‌شود تا در هر مرحله از رشد ضریبی متناسب با همان مرحله اعمال شود (علیزاده، ۱۳۷۹).

نتایج

پیش پردازش تصاویر و اعمال الگوریتم

تصحیحات هندسی تصاویر ماهواره ای با استفاده از روش تصویر به تصویر^۱ با معادله درجه یک و روش نزدیکترین همسایه^۲ صورت پذیرفت. به عبارت دیگر داشتن دانش درباره خطاهای سیستماتیک و نویز در داده‌های رادینانس MODIS قبل از ارزیابی صحت کالیبراسیون و استفاده از داده‌های حرارتی MODIS ضروری و پراهمیت است. بعد از پیش پردازش تصاویر، الگوریتم SEBAL بر روی تصاویر مورد اشاره در جدول ۱ اعمال گردید که شکل ۳ نتایج اعمال الگوریتم را در تصویر ۱۳۸۸/۰۲/۰۲ نشان می‌دهد.

روش پنمن - مانیتیت FAO-56

دقیقترین روش برآورد میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع استفاده از لایسیمتر نامیده شده است. اما از آنجا که احداث لایسیمتر هزینه بسیار زیادی را به همراه دارد و از طرفی آمار این روش معمولاً در اختیار نمی‌باشد، بیشتر از روشهای تجربی برای برآورد تبخیر و تعرق و از روش استاندارد برای مقایسه نتایج با آن استفاده می‌شود (سپاسخواه، ۱۳۷۷). تحقیقات انجام شده در نقاط مختلف جهان نشان دهنده این نکته است که دقت مقادیر تبخیر و تعرق برآورد شده با رابطه پنمن-مانیتیت در مقایسه با مقادیر اندازه گیری شده لایسیمتر از دیگر روابط برآورد ET_o بهتر می باشد و در شرایطی که داده های لایسیمتر در دسترس نباشد به عنوان یک رابطه استاندارد توصیه شده است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ هارگریوز ۱۹۹۴). تبخیر و تعرق از یک سطح مرجع که با کمبود آب مواجه نیست تبخیر و تعرق گیاه مرجع نامیده می‌شود. سطح مرجع عبارت از یک گیاه مرجع چمن با ارتفاع ۰/۱۲ متر، مقاومت سطح ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب بازتاب ۰/۲۳. این سطح مشابه یک سطح وسیع چمن سبزرنگ، خوب آبیاری شده با ارتفاع یکنواخت، با رشد فعال و سایه اندازی کامل می‌باشد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

در روش پنمن مانیتیت گیاه مرجع یک گیاه فرضی با ارتفاع ۱۲ سانتیمتر که ضریب بازتاب تابش در آن ۲۳ درصد و مقاومت روزنه های آن در مقابل تعرق ۷۰ می‌باشد. معادله پنمن مانیتیت بصورت رابطه ۶ خلاصه می‌شود:

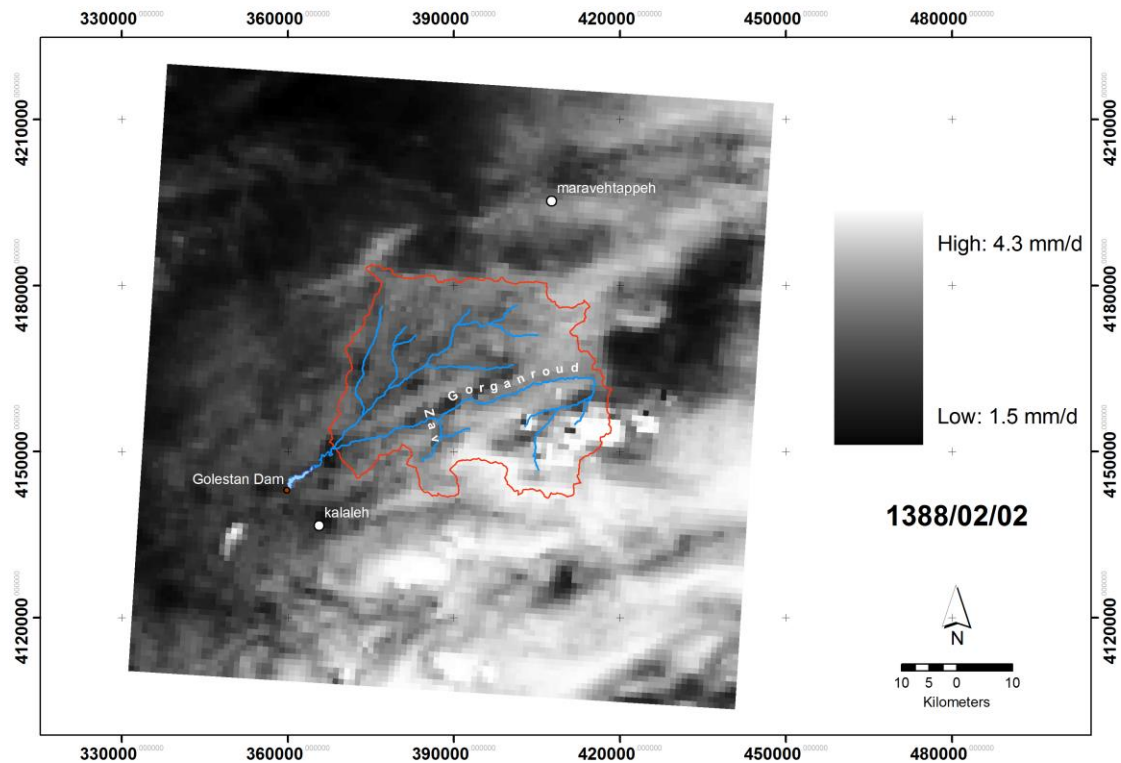
رابطه ۶:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma[890/(T + 273)]U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

که در آن ET_o: تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm/day)، R_n: تابش خالص در سطح پوشش گیاهی (MJm⁻²d⁻¹), T: متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین، U₂: سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (ms⁻¹), e_a-e_d: کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (KPa)، Δ: شیب منحنی فشار بخار (KPaC⁻¹), γ: ضریب سایکرومتری (KPaC⁻¹), G: شار گرما به داخل خاک (MJm⁻²d⁻¹)

¹ Image to Image Registration

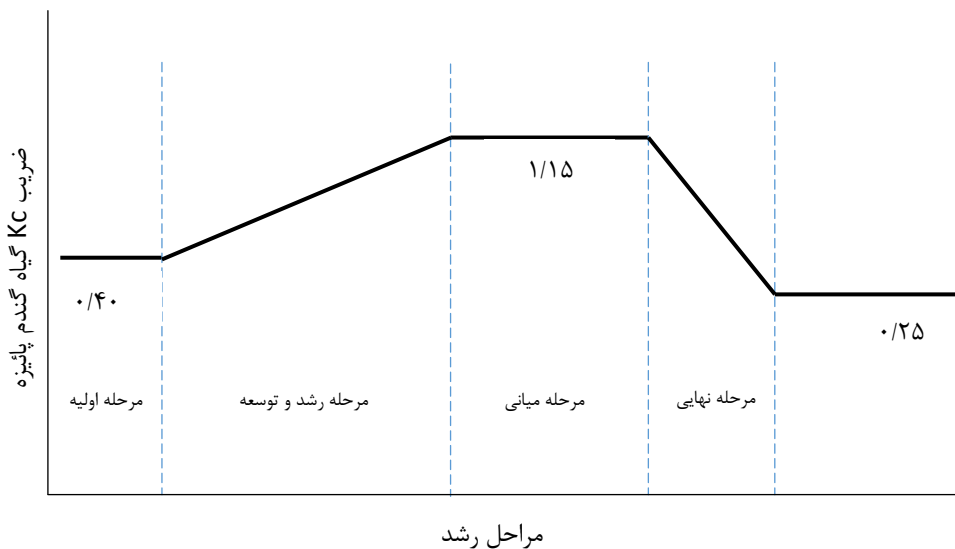
² Nearest Neighbor Method



شکل ۳: تبخیر و تعرق واقعی حاصل از الگوریتم SEBAL در تاریخ ۱۳۸۸/۰۲/۰۲

گندم پائیزه را در طول دوره رشد در منطقه مورد مطالعه ارائه میکند.

ضریب گیاهی گندم پائیزه نیز با استفاده از نرم افزار CROPWAT بدست آمد. شکل ۴ نیز ضریب گیاهی



شکل ۴: ضریب گیاهی گندم در طی مراحل دوره رشد جهت محاسبه تبخیر و تعرق گیاه

۶ بیانگر تفاوت میان تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط الگوریتم SEBAL و پنمن-مانتیت می‌باشد.

جدول ۳ نتایج بدست آمده تبخیر و تعرق واقعی حاصل از الگوریتم SEBAL و روش پنمن-مانتیت در منطقه مورد مطالعه را بیان می‌کند. همچنین اشکال ۵ و

جدول ۴: خلاصه آمار سینوپتیک ایستگاههای سینوپتیک کلاله و مراوه تپه منطقه مورد مطالعه

تاریخ تصویربرداری	ایستگاه	دمای حداکثر (C°)	دمای حداقل (C°)	رطوبت نسبی (درصد)	ساعات آفتابی	سرعت باد (Km/d)
۱۳۸۸/۰۲/۰۲	کلاله	۲۹/۴	۷/۲	۶۲/۰	۱۱/۶	۲۱/۵
۱۳۸۸/۰۱/۰۳	مراوه تپه	۲۵/۲	۱۰/۶	۵۵/۰	۱۲/۴	۳۵/۹
۱۳۸۸/۰۱/۰۳	کلاله	۲۱/۰	۲/۴	۷۵/۰	۱۱/۲	۲۱/۵
۱۳۸۸/۰۱/۰۸	مراوه تپه	۲۱/۴	۴/۶	۵۲/۰	۱۱/۶	۳۵/۹
۱۳۸۸/۰۱/۰۸	کلاله	۲۵/۴	۷/۶	۷۰/۰	۹/۷	۱۰/۸
۱۳۸۸/۰۱/۰۸	مراوه تپه	۲۵/۲	۱۱/۲	۳۹/۰	۱۰/۷	۲۱/۵
۱۳۸۸/۰۱/۱۳	کلاله	۲۱/۸	۴/۶	۶۸/۰	۱۱/۱	۱۰/۸
۱۳۸۸/۰۱/۱۳	مراوه تپه	۱۸	۶/۶	۶۵/۰	۱۱/۷	۱۷/۹
۱۳۸۸/۰۱/۱۸	کلاله	۲۴/۸	۳/۸	۶۲/۰	۱۱/۸	۱۰/۸
۱۳۸۸/۰۱/۱۸	مراوه تپه	۲۱/۲	۹/۴	۴۳/۰	۱۱/۷	۳۹/۵

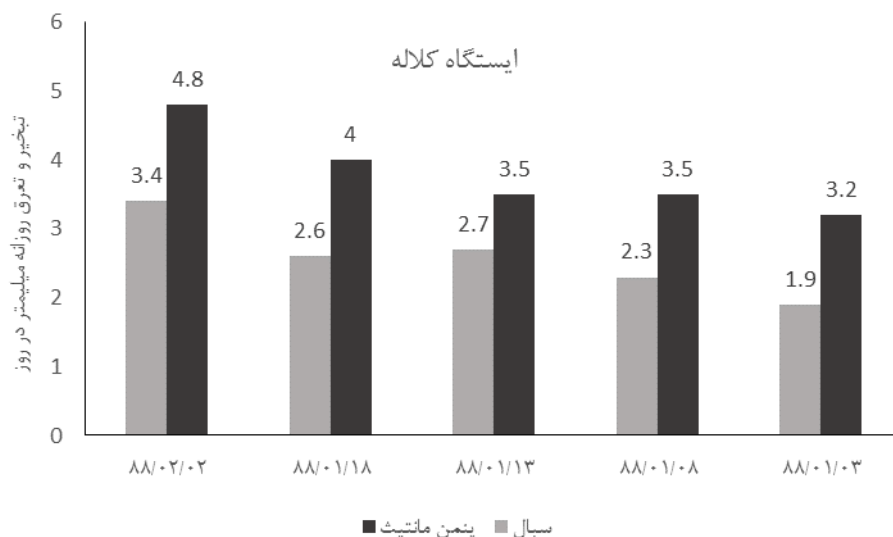
جدول ۵: خلاصه شارهای گرمایی و پارامترهای هواشناسی بدست آمده از الگوریتم SEBAL در ایستگاههای مورد مطالعه

تاریخ تصویربرداری	ایستگاه	تبخیر و تعرق (mm/d)	تابش خالص (W/m ²)	شار گرمایی خاک (W/m ²)	دمای سطح (K)
۱۳۸۸/۰۲/۰۲	کلاله	۲/۳۵	۲۳۳/۸۷	۲۱/۳۴	۳۰۱/۰۷
۱۳۸۸/۰۱/۰۳	مراوه تپه	۲/۱۷	۲۱۱/۲۹	۱۵/۳۵	۳۰۰/۸۴
۱۳۸۸/۰۱/۰۳	کلاله	۱/۲۱	۱۴۴/۳۷	۹/۷۵	۲۹۴/۳۰
۱۳۸۸/۰۱/۰۸	مراوه تپه	۱/۰۱	۱۱۷/۹۳	۵/۷۵	۲۹۴/۱۱
۱۳۸۸/۰۱/۰۸	کلاله	۲/۰۸	۲۴۳/۹۳	۲۴/۶۰	۳۰۳/۷۱
۱۳۸۸/۰۱/۰۸	مراوه تپه	۲/۲۶	۲۵۵/۰۵	۱۵/۷۱	۲۹۶/۴۵
۱۳۸۸/۰۱/۱۳	کلاله	۲/۹۰	۳۱۸/۰۸	۲۱/۶۱	۲۹۴/۴۲
۱۳۸۸/۰۱/۱۳	مراوه تپه	۲/۷۲	۲۹۲/۳۵	۱۳/۶۱	۲۹۳/۲۳
۱۳۸۸/۰۱/۱۸	کلاله	۰/۹۲	۹۸/۰۸	۷/۰۲	۲۹۵/۴۰
۱۳۸۸/۰۱/۱۸	مراوه تپه	۰/۷۱	۷۴/۰	۳/۵۴	۲۹۴/۰۸

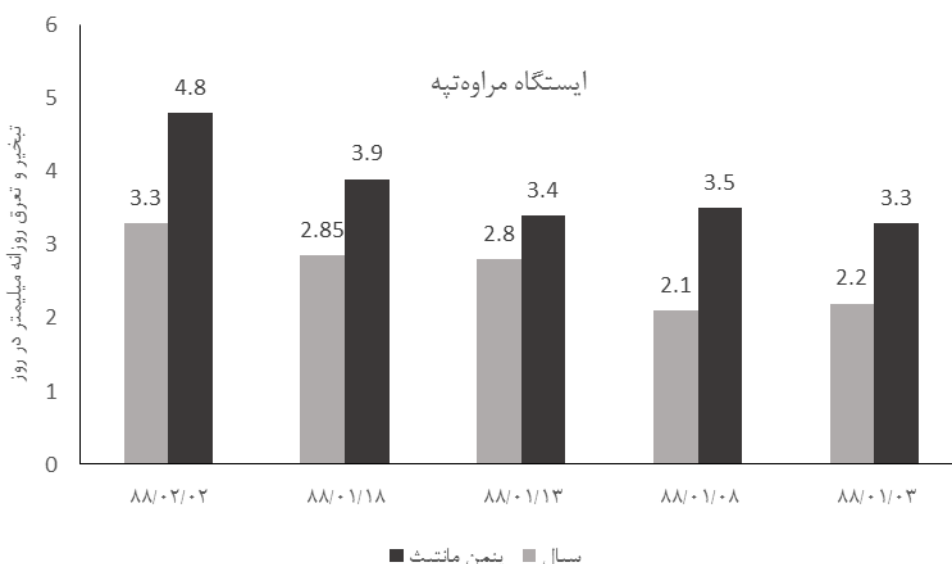
جدول ۳: مقایسه تبخیر و تعرق بدست آمده از الگوریتم SEBAL و پنمن - مانتیت در ایستگاههای سینوپتیک منطقه مورد مطالعه به

میلیمتر

ایستگاه	روش	۰۳/۰۱	۰۸/۰۱	۱۳/۰۱	۱۸/۰۱	۰۲/۰۲	ΔET
کلاله	FAO-56	۳/۲	۳/۵	۳/۵	۴	۴/۸	ΔET
	SEBAL	۱/۹	۲/۳	۲/۷	۲/۶	۳/۴	-۱/۴
مراوه تپه	FAO-56	۳/۳	۳/۵	۳/۴	۳/۹	۴/۸	ΔET
	SEBAL	۲/۲	۲/۱	۲/۸	۲/۸۵	۳/۳	-۱/۵



شکل ۵: مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط الگوریتم SEBAL و پنمن-مانتیت در ایستگاه کلاله



شکل ۶: مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط الگوریتم SEBAL و پنمن-مانتیت در ایستگاه مراوه تپه

بحث و نتیجه گیری

تغییرپذیری مکانی تصاویر ماهواره‌ای پایه‌گذاری شده است که تلاش می‌کند اطلاعات اضافی دیگری از ورودیها را جهت برآورد تبخیر و تعرق مورد استفاده قرار ندهد. الگوریتم SEBAL از اطلاعات مکانی تصاویر جهت استخراج دمای هوا استفاده می‌کند در حالیکه در بسیاری از اوقات تراکم ایسگاههای هواشناسی بسیار ضعیف می‌باشد. این مدل با دقت بسیار خوبی در زمانی که شرایط جوی نسبتاً پایدار می‌باشد و پیکسل سرد و گرم در یک فریم از تصویر موجود باشد عمل می‌کند. در مواقعی که سرعت‌های متفاوت باد وجود دارد مقادیر حدی

برآورد دقیق از فرآیند تبخیر و تعرق در مدیریت بهینه منابع آب هر کشور مساله بسیار مهمی به شمار می‌رود. در اکثر کشورها روش پیشنهادی توسط FAO مورد استفاده قرار می‌گیرد در حالیکه تغییرپذیری متغیرهای سطح در مکان و زمان در این روش مورد توجه قرار نگرفته است. با توجه به اینکه تغییرات مکانی سطح بویژه در پوشش گیاهی سطح زمین و پارامترهای هواشناسی وجود دارد نمی‌توان با تعداد محدودی از مشاهدات زمینی و سینوپتیکی به محاسبه چنین پارامترهایی مبادرت نمود. SEBAL برپایه

واسنجی درونی الگوریتم شار گرمای محسوس توسط الگوریتم SEBAL نیاز به تصحیح اتمسفری توسط مدل‌های تابشی جهت محاسبه دمای سطح و آلبیدو را حذف می‌نماید. این واسنجی درونی علاوه بر این موجب کاهش اثرات خطا در تخمین ضرایب زبری و مقاومت آنرودینامیک می‌شود. نتایج حاصل از الگوریتم SEBAL کاملاً وابسته به انتخاب پیکسل‌های گرم و سرد است و در صورت انتخاب نادرست تاثیر زیادی بر روی دقت نتایج دارد.

با توجه به جدول ۳ و اشکال ۵ و ۶ میزان تبخیر و تعرق واقعی توسط الگوریتم SEBAL کمتر از برآورد تبخیر و تعرق به روش پنمن-مانتیت در حدود ۱/۵-۱ میلی‌متر در روز می‌باشد که با نتایج بدست آمده توسط بشیر و همکاران (۲۰۰۸) و اوبرگ و همکاران (۲۰۰۶) مطابقت دارد. میزان برآورد کم تبخیر و تعرق توسط الگوریتم ممکن است مربوط به مساحت وسیع دربرگیرنده پیکسل‌های سنجنده MODIS باشد که در هر پیکسل تغییرات زیادی در پارامترهای هواشناسی و پوشش سطح ایجاد می‌گردد. همانطور که ذکر گردید میزان تبخیر و تعرق بدست آمده از رابطه پنمن-مانتیت علی‌رغم روش استاندارد معرفی شده توسط FAO نمی‌تواند در سطح وسیع قابل استناد باشد چراکه محاسبه توسط روشهای کلاسیک در نقطه اندازه‌گیری پارامترها قابلیت اطمینان بالایی دارند و تغییرپذیری مکانی پارامترها می‌تواند نتایج را دستخوش تغییر کند.

دمای سطح زمین دچار تغییر می‌شوند و یا اگر پیکسل‌های سرد و گرم در یک فریم از تصویر یافت نشوند نیاز به داده های هواشناسی وجود دارد. روشهای اصلی که به طور کلاسیک جهت برآورد تبخیر و تعرق مورد استفاده قرار می‌گیرند مانند نسبت بوون، کواریانس ادی، بیلان آب و خاک در مقیاس مزرعه می‌باشند. این روشها به محقق اجازه تخمین و برآورد شارهای گرمایی که در سطح وسیع رخ می‌دهند را نمی‌دهد. از آنجایی که تبخیر و تعرق واقعی تحت تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل فاکتورهای گیاهی شرایط مدیریتی و محیطی قرار دارد که همگی تابع تغییرات مکانی و زمانی می‌باشند. لذا کاربرد این روش در سطوح بزرگ تا حدودی بحث برانگیز می‌باشد. از اینرو دقت روش های کلاسیک محاسبه تبخیر و تعرق گیاهان برای استفاده در یک سطح وسیع ممکن است مناسب نباشد و در نتیجه کاربرد کمتری دارند.

ترم‌های معادله انرژی در پوشش های مختلف سطح زمین با یکدیگر تفاوت اساسی دارند. بیشترین شار ایجاد شده در سطح غیر پوشش گیاهی عمدتاً شار گرمای محسوس می‌باشد. در طول دوره رشد قسمت اعظم شار تابشی کل، صرف تبخیر و تعرق شده و از ورود شار تابشی کل به سطح خاک و افزایش دمای هوا و خاک جلوگیری می‌نماید و میزان شار گرمای محسوس کاهش می‌یابد و در سطوح عاری از پوشش گیاهی شار تابشی کل صرف ورود به خاک و کاهش شار گرمایی نهان می‌شود.

منابع

۱. اصغرزاده، ح.ع. ۱۳۸۳. تخمین تبخیر و تعرق گیاهان با استفاده از داده های سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
۲. ثنایی نژاد س.ح، س. نوری و س.م. هاشمی نیا. ۱۳۹۰. برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در منطقه مشهد، نشریه آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۳، ۵۴۰-۵۴۷.
۳. حسن پور ب.، ف. میرزایی، ص. ارشد و ه. کوثری. ۱۳۹۱. مقایسه الگوریتم‌های SEBAL و S-SEBI در برآورد تبخیر و تعرق در منطقه کرج، نشریه آب و خاک، جلد ۲۶، شماره ۶، ۱۳۶۰-۱۳۷۱
۴. جهاد کشاورزی استان گلستان. ۱۳۸۸. آمار تولید زراعی سالانه شهرستانهای کلاله و مراوه‌تپه
۵. سپاسخواه، ع. ۱۳۷۷. نگرشی دوباره بر روشهای محاسبه تبخیر و تعرق گیاهان زراعی، سمینار آموزشی دانشگاه شیراز

۶. قائمی بایگی، م.، م. رائینی سرجاز و م. موسوی بایگی. ۱۳۹۱. ارزیابی و برآورد تبخیر و تعرق گندم در مراحل مختلف رشد با روش تراز انرژی (نسبت باون) و مقایسه آن با نتایج لایسیمتر، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۶، شماره ۵، ۱۱۵۲-۱۱۶۰.
۷. علیزاده، ا. ۱۳۸۱. اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، ۷۳۵ صفحه.
8. Ahmad, M.D., T. Biggs, H. Turrall and C.A. Scott. 2006. Application of SEBAL approach and MODIS time-series to map vegetation water use patterns in the data scarce Krishna river basin of India, *Journal of Water Science & Technology*, 53 (10), 83-90.
9. Allen, R.G., W.G.M. Bastiaanssen, J.L. Wright, A. Morse, M. Tasumi and R. Trezza. 2002. Evapotranspiration from Satellite Images for Water Management and Hydrologic Balances, *Proceedings of the 2002 ICID conference, Montreal, Canada*, 1-12.
10. Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. *Crop Evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, Rome, Italy, 300 pp.
11. Bashir, M.A., T. Hata, H. Tanakamaru, a. W. Abdelhadi & A. Tada. 2008. Satellite-based energy balance model to estimate seasonal evapotranspiration for irrigated sorghum: a case study from the Gezira scheme, Sudan. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(4), 1129-1139.
12. Bastiaanssen, W.G.M. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229: 87-100.
13. 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 condition. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1): 85-93.
14. Bastiaanssen, W.G.M., M. Ahmad and Y. Chemin. 2002. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. *Water Resource Research*. Vol. 38, No. 12.
15. Bastiaanssen, W.G.M. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin Turkey, 229, 87-100.
16. Bastiaanssen, W.G.M., H. Pelgrum, P. Droogers, H.A.R. de Bruin and M. Menenti, 1997. Area-average estimates of evaporation, wetness 3 indicators and top soil moisture during two golden days in EFEDA, *Agr and Forest Met*. 87: 119-137.
17. Bastiaanssen, W.G.M., H. Pelgrum, M. Menenti and R.A. Feddes. 1996. Estimation of surface resistance and Priestley-Taylor α -parameter at different scales, In: Stewart et al., (1996) (eds). *Scaling up in hydrology using remote sensing*, J. Wiley and Sons, Chichester, p.255-262.
18. Bastiaanssen, W.G.M. 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate. PhD. Thesis, Wageningen University, Netherlands, 286pp.
19. Chemin, Y. and M. Ahmad. 2000. Estimating evaporation using the surface energy balance algorithm for land (SEBAL). A Manual for NOAA-AVHRR in Pakistan. International Water Management Institute (IWMI). Report No. R-102.
20. George, Paul, Prasanna, H. Gowda, P.V. Vara, Prasad, Terry A. Howell, Scott A. Staggenborg, Christopher M.U. Neale, 2013. Lysimetric evaluation of SEBAL using high resolution airborne imagery from BEAREX08, *Advances in Water Resources*, in press.
21. Hamid, S., A. Mohamed & A.M. Yasir. 2009. Towards a performance-oriented management for large-scale irrigation systems: case study, rahad scheme, sudan, *Irrigation and Drainage*, 60, 20-34.
22. Hargreaves, G.H. 1994. Defining and using reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(6):1132-39.
23. Inoue, Y. 2003. Synergy of Remote Sensing and Modeling for Estimating Ecophysiological Processes in Plant Production. *Plant Production Science*, 6:3-16.
24. Oberg, J.W. & A.M. Melesse. 2006. Evapotranspiration dynamics at an ecohydrological restoration site: an energy balance and remote sensing approach 1, 33199, 565-582.
25. 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. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(3): 273-283.

26. Su, H., E.F. Wood, R. Wojcik & M. McCabe. 2006. Sensitivity Analysis of Regional Scale Evapotranspiration Predictions to the Forcing Data, American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, abstract #H31A-02.
27. Teixeira, A.H., W.G.M. Bastiaanssen, M.D. Ahmad & M.G. Bos. 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle Sao Francisco River basin, Brazil Part A: Calibration and validation, agricultural and forest meteorology, 149, 462-476.
28. Waters, R., R. Allen, M. Tasumi, R. Trezza and W. Bastiaanssen. 2002. SEBAL, Surface Energy Balance Algorithms for Land. Advanced Training and User Manual. Version1

Estimation and assessment of actual evapotranspiration using remote sensing data (Case study: Tamar basin, Golestan province, Iran)

M. Miryaghoubzadeh¹, K. Solaimani², M. Habibnejad roshan², K. Shahedi³, K. Abbaspour⁴, S. Akhavan⁵

Abstract

Evapotranspiration is one of the most important determinants of the hydrological cycle and surface energy balance. In fact Evapotranspiration cause the relationship between such as atmosphere and earth important elements. Most methods that have been presented use point measurements to estimate evapotranspiration. These methods are only suitable for the Local areas due to dynamic and changing nature of regional evapotranspiration are not generalizable to the Basin. Remote sensing has the capability to estimate and to assess the amount of evapotranspiration and its spatial distribution. Surface energy balance algorithm for land (SEBAL) is a new algorithm for estimating evapotranspiration in most parts of the world and other heat fluxes at the surface and have a satisfactory results. In this research evapotranspiration results derived with SEBAL algorithm was compared with FAO evapotranspiration standard method. The results indicate that the algorithm SEBAL determine the actual evapotranspiration in a large area without the need for more meteorological data. The results show that the obtained rate of evapotranspiration in SEBAL algorithm has less than the Penman – Monteith about 1-1.5 mm/d.

Key words: Evapotranspiration, Remote sensing, SEBAL, Penman-Monteith, Tamar basin.

¹ Corresponding author and PhD candidate in the field of Watershed management & engineering, University of Mazandaran, Iran, Email: m.miryaghoobzadeh@gmail.com

² Professor, Agricultural and natural resources university of Sari, Iran

³ Assistant professor, Agricultural and natural resources university of Sari, Iran

⁴ Professor, EAWAG institute, Switzerland

⁵ Assistant professor, University of Bo-Ali Sina, Hamedan, Iran