مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۶۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۴
ص۳۸۵-۳۹۸

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۲/۱۶

برآورد تبخیر و تعرق در حوضهٔ آبخیز طالقان با استفاده از تصاویر MODIS و مدل SEBAL

❖ **کاظم نصرتی***، دانشیار دانشکدهٔ علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی
❖ **محسن محسنی ساروی؛** استاد دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران
❖ **حسن احمدی؛** استاد دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران
❖ **حسین عقیقی؛** کارشناس پژوهشی سازمان فضایی ایران

چکیده

استفادهٔ نامطلوب و بی‌رویه از منابع آب و همچنین آلودگی منابع آب در اثر ورود آلاینده‌ها چالش‌های عمده‌ای را برای تأمین آب ایجاد کرده است. در این زمینه فرایند تبخیر و تعرق در برنامه‌ریزی آبیاری، آبخیزداری، محاسبات بیلان آب، و تخمین میزان رواناب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به محدودیت ایستگاه هواشناسی و هزینهٔ زیاد جمع‌آوری اطلاعات زمینی، کاربرد تصاویر سنجش از دور بر اساس الگوریتم‌های متعدد ابزاری مناسب برای تهیهٔ نقشهٔ مکانی و زمانی تبخیر و تعرق و، در نتیجه، مدیریت منابع آب در مقیاس حوضهٔ آبخیز است. الگوریتم توازن انرژی سطحی برای زمین (SEBAL) روشی جدید است که از آن در برآورد تبخیر و تعرق با کاربردِ تصاویر ماهواره‌ای در برخی از مناطق مسطّح دنیا استفاده می‌شود. در این تحقیق، به منظور بررسی کارایی روش اصلاح‌شدهٔ سبال در محاسبهٔ تبخیر و تعرق در مناطق کوهستانی، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS، تبخیر و تعرق در حوضهٔ آبخیز طالقان طی ۲۲ روز در سال ۱۳۸۵ بررسی شد. نتایج نشان داد مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری‌شدهٔ از همبستگی بالا (۰٫۸۸) برخوردارند. بدین ترتیب، تصاویر سنجندهٔ MODIS و مدل سبال قادرند تبخیر و تعرق واقعی روزانه را در حوضهٔ آبخیز طالقان به‌خوبی برآورد کنند. بنابراین، این مدل را می‌توان پس از اعتبارسنجی در مناطقی با اقلیم متفاوت برای تحقیقات بیلان آبی و اجرای طرح‌های آبیاری در مناطق مختلف با توپوگرافی متنوع پیشنهاد کرد.

واژگان کلیدی: الگوریتم توازن انرژی سطحی برای زمین (سبال)، تبخیر و تعرق، تصاویر سنجندهٔ MODIS، سنجش از دور.

* . نویسندهٔ مسئول: تلفن تماس: ۰۲۱-۲۹۹۰۲۶۰۴
Email: k_nosrati@sbu.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر استفادهٔ نامطلوب و بی‌رویه از منابع آب و همچنین آلودگی منابع آب در اثر ورود فاضلاب‌های صنعتی، بخش کشاورزی کشور را با چالش‌های عمده‌ای در جهت تأمین آب مورد نیاز مواجه ساخته است. از مجموع ۱۶۵ میلیون هکتار اراضی کشور حدود ۳۷ میلیون هکتار برای کشاورزی مناسب است، اما به دلیل محدودیت منابع آب حدود ۷/۸ میلیون هکتار از این اراضی به صورت فاریاب و ۶/۲ میلیون هکتار به صورت دیم زیر کشت محصولات زراعی قرار می‌گیرد و ۴/۵ میلیون هکتار دیگر به صورت آیش است [۱]. ترکیب دو فرایند جداگانهٔ تبخیر آب از سطح زمین و تعرق پوشش‌های گیاهی، تبخیر و تعرق را تشکیل می‌دهد. توانایی پیش‌بینی و برآورد تبخیر و تعرق می‌تواند برای مدیران منابع آبی کشور و توسعهٔ برنامه‌های کشاورزی و وضع قوانین مصرف آب و مطالعات هیدرولوژیکی رودخانه‌ها مفید باشد.

اندازه‌گیری تبخیر و تعرق در یک نقطه با استفاده از روش‌هایی با دقت مناسب، مانند توزین، امکان‌پذیر است، اما این روش‌ها برای مناطق وسیع‌تر کاربردی نیست. این محدودیت باعث کاربردِ داده‌های ماهواره‌ای برای تعیین تبخیر و تعرق در سطوح وسیع شده است [۱۰]. یکی از الگوریتم‌هایی که به آن برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بسیار توجه شده است الگوریتم توازن انرژی سطحی برای زمین[1] SEBAL است [۴، ۵، ۶]. SEBAL از دمای سطحی، انعکاس سطحی، شاخص تفاضل نرمال‌شدهٔ گیاهی NDVI، و روابط درونی آن‌ها برای برآورد شارهای سطحی در انواع پوشش‌های سطحی زمین استفاده می‌کند. در تحقیقی با برآورد تبخیر و تعرق واقعی در منطقهٔ مشهد با استفاده از تصاویر سنجندهٔ MODIS اثبات شد که الگوریتم سبال قادر است مقدار تبخیر و تعرق واقعی را در مقیاس روزانه به‌خوبی برآورد کند [۲۰]. با استفاده از الگوریتم سبال بر اساس تصاویر سنجندهٔ MODIS مقدار تبخیر و تعرق در مقیاس یک مزرعه در استان گلستان برآورد شد. نتایج نشان داد برآورد مقادیر آلبیدوی سطحی با استفاده از روش نو دارای دقت بیشتری است [۱۵]. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای NOAA و بر اساس روش سبال تبخیر و تعرق در اصفهان برآورد و از نتایج آن در پایش اجرای آبیاری استفاده شد و، در نهایت، نتایج در مقایسه با روش‌های سنتی معتبرتر معرفی شد [۱].

در تحقیقی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بر اساس روش سبال تبخیر و تعرق در فلات لسی چین برآورد شد و با مقایسهٔ مقادیر اندازه‌گیری مستقیم نتایج قابل اعتماد معرفی شد [۱۱]. در تحقیقی دیگر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و به‌کارگیری روش سبال، تبخیر و تعرق برآورد و نتایج آن در مدل مدیریت آب در اراضی کشاورزی استفاده شد [۱۱]. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای NOAA و بر اساس روش سبال تبخیر و تعرق در ایالات متحدهٔ آمریکا ارزیابی و نتیجه‌گیری شد که از نتایج این تحقیق می‌توان در مدل‌های هیدرولوژیک و ارزیابی تغییر اقلیم استفاده کرد [۱۳]. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای NOAA و بر اساس روش سبال تغییرات مکانی تبخیر و رطوبت ذخیرهٔ خاک در حوضهٔ نیل

1. Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)

برآورد و نتیجه‌گیری شد که مقادیر برآوردی در مدل‌سازی منطقه‌ای پارامترهای مدل‌های اقلیمی مفید است [۱۶]. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و بر اساس روش سبال تبخیر و تعرق به صورت منطقه‌ای در چین برآورد شد [۲۱]. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بر اساس روش سبال تبخیر و تعرق در شمال چین در مقیاس حوضهٔ آبخیز برآورد شد. نتایج اعتبارسنجی با استفاده از بیلان آبی نشان داد این روش دارای دقت زیادی است [۱۲].

بر اساس بررسی منابع، کشورهای مختلفی مانند چین، ترکیه، مصر، آمریکا، و ایران دربارهٔ روش سبال به تحقیق پرداخته‌اند و از نتایج خروجی آن در مدل‌های مختلف هیدرولوژیک و مدیریت منابع آب استفاده شده است. با وجود این، تحقیقات اندکی دربارهٔ بررسی کارایی آن در ایران، به‌ویژه در مناطق کوهستانی، با توپوگرافی شدید وجود دارد. بنابراین، هدف از این مطالعه بررسی میزان دقت روش سبال در برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در برآورد تبخیر و تعرق در مناطق کوهستانی است.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقهٔ مطالعاتی

حوضهٔ آبخیز طالقان، که یکی از زیرحوضه‌های حوضهٔ آبخیز سفیدرود به‌شمار می‌رود، در دامنهٔ جنوبی رشته‌کوه‌های البرز و در بخش شمال شرقی تهران واقع شده است و ۹۰ کیلومتر با آن فاصله دارد. این حوضه از شمال به حوضهٔ آبخیز الموت، از جنوب به زیاران و صمغ‌آباد، از شرق به بخشی از حوضهٔ آبخیز کرج، و از غرب به حوضهٔ آبخیز شاهرود محدود می‌شود. وسعت منطقهٔ مورد مطالعه ۸۰۴۲۸٫۸۲ هکتار و محیط آن ۱۵۱٫۳ کیلومتر است که بین عرض‌های شمالی ۱۷٫۴۵، ′۵، °۳۶ تا ″۴۵٫۹۳، ′۲۰، °۳۶ و طول‌های شرقی ″۳۳٫۳۹، ′۳۹، °۵۰ تا ″۲۶٫۵، ′۱۱، °۵۱ واقع شده است (شکل ۱).

شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مورد مطالعه

توزیع شیب حوضه بر اساس چهار کلاس با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) تعیین شد که طبقهٔ شیب %40< با مساحت ۳۹۷۰۶٫۷ هکتار یا ۴۹٫۴ درصد بیشترین و طبقهٔ شیب ۰ ـ ۱۰ درصد با مساحت ۶۲۸۴٫۵ هکتار یا ۷٫۸۲ درصد کمترین پراکنش را در سطح حوضه دارند. شیب متوسط وزنی کل حوضه برابر با ۴۱٫۷۶ درصد است.

توده‌های هوایی که منطقهٔ طالقان را تحت تأثیر قرار می‌دهند در زمستان‌ها مدیترانه‌ای از غرب، قطبی بری و بری شمال از قطاع شمالی، و قطبی دریایی از جهت شمال غربی است. در تابستان‌ها تودهٔ هوای غالب جنب حاره‌ای است که همهٔ ایران را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد و منشأ آن کویر یا صحرای عربستان و حتی نوع تغییریافتهٔ اروپای مرکزی است. گاهی نیز غلبهٔ تودهٔ هوای تروپیکال دریایی (گرم و مرطوب) از جهت‌های شمال غرب (نفوذ جریان خزری) یا از سمت جنوب شرق (ادامهٔ جریان موسمی) نیز در تابستان گزارش شده است. از نظر منشأ بارندگی، در حوضهٔ آبخیز طالقان دو منشأ متفاوت را می‌توان برای بارش‌ها درنظر گرفت: یکی، آن عده از سیستم‌هایی که موجب ریزش‌های جوی می‌شوند و از بخش غربی به کشور وارد می‌شوند و موجب بارندگی‌های فلات ایران می‌شوند و فعالیت آن‌ها معمولاً در فاصلهٔ ماه‌های شهریور تا اواسط اردیبهشت محدود می‌شود؛ و دیگری، بخشی از بارندگی‌های سواحل خزر و ارتفاعات دامنه‌های البرز که متأثر از توده‌های هوا بر بستر خزر و پدیده‌های اوروگرافیک وابسته به آن است.

سنجندهٔ MODIS

سنجندهٔ MODIS از ماهوارهٔ TERRA دارای ۳۶ باند (۱۶ باند حرارتی و ۲۰ باند انعکاسی) با محدودهٔ طیفی باندها ۰٫۴ تا ۱۴٫۴ میکرومتر است. دقت آشکارسازهای حرارتی در حد ۰٫۳ تا ۰٫۵ کلوین و محدودهٔ کاری آن‌ها عمدتاً ۲۶۸ درجهٔ کلوین است. قدرت تفکیک مکانی باندهای ۱ و ۲، ۲۵۰ متر، باندهای ۳ تا ۷، ۵۰۰ متر، و سایر باندها ۱۰۰۰ متر است. در این مطالعه از ۲۲ تصویر مربوط به ۲۲ روز مختلف استفاده شد (جدول ۱).

مدل SEBAL

در این تحقیق از چارچوب مدل الگوریتم توازن انرژی سطحی زمین (سبال) [۵] در برآورد تبخیر و تعرق واقعی استفاده شد (شکل ۲).

شکل ۲. چارچوب روش تحقیق و مؤلفه‌های اصلی مدل سبال [۷، ۱۹].

این مدل از سنجش از دور برای تعیین درجهٔ حرارت سطحی به عنوان برآورد شارهای لحظه‌ای تابش خالص (R_n)، گرمای خاک (G)، گرمای نهان (λET)، و گرمای محسوس (H) بر حسب (W/m^2) استفاده می‌نماید. تبخیر و تعرق روزانه (ET_{24}) بر حسب میلی‌متر بر روز از فرمول ۱ محاسبه خواهد شد.

$$ET_{24} = \frac{86400\Lambda(R_{n24} - G_{24})}{\lambda} \qquad (۱)$$

که Λ کسر تبخیر (میلی‌متر بر روز)، λ گرمای نهان تبخیر (J/kg)، R_{n24} متوسط شار تابش خالص ۲۴ ساعته، و G_{24} شار گرمای خاک روزانه را نشان می‌دهد.

شار گرمای نهان (λET) میزان تلفات گرما از سطح به علت تبخیر و تعرق را نشان می‌دهد که برای هر پیکسل با توجه به رابطهٔ ۲ محاسبه می‌شود.

$$\lambda ET = R_n - G - H \qquad (۲)$$

که λET مقدار لحظه‌ای شار گرمای نهان برای زمان گذر ماهواره بر حسب W/m^2 است و R_n، G، و H به‌ترتیب شارهای لحظه‌ای تابش خالص، گرمای خاک، وگرمای محسوس بر حسب W/m^2 است.

مقدار لحظه‌ای تبخیر و تعرق ET_{inst} به صورت رابطهٔ ۳ محاسبه می‌شود [۱۸].

$$ET_{inst} = 3600\frac{\lambda ET}{\lambda} \qquad (۳)$$

که ET_{inst} تبخیر و تعرق لحظه‌ای (mm/hr)، λ گرمای نهان تبخیر یا میزان گرمای جذب‌شده موقعی که یک کیلوگرم آب بخار می‌شود (J/kg)، و عدد ۳۶۰۰ برای تبدیل زمان از ثانیه به ساعت است.

کسر $\frac{G}{R_n}$ برای نیمهٔ روز با استفاده از معادلهٔ تجربی ۴ محاسبه می‌شود [۳].

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha}\left(0.0038\alpha + 0.007\alpha^2\right)\left(1 - 0.98NDVI^4\right) \qquad (۴)$$

که T_s دمای سطحی (C)، α آلبیدوی سطحی، و NDVI شاخص تفاضل نرمال‌شدهٔ گیاهی است. NDVI شاخصی است که به وضعیت و تراکم پوشش گیاهی حساسیت دارد و از رابطهٔ ۵ به‌دست می‌آید:

$$NDVI = \frac{R' - R}{R' + R} \qquad (۵)$$

که R انعکاس در باند قرمز و 'R انعکاس در باند مادون قرمز نزدیک است.

ارزیابی شار گرمای خاک مشکل است و باید در محاسبهٔ آن دقت شود. مقادیر G به‌دست‌آمده باید با اندازه‌گیری‌های زمینی چک شوند. در سبال، نسبت $\frac{G}{R_n}$ برای آب صاف و عمیق و برف برابر ۰٫۵ است.

در صورتی که نقشهٔ کاربری در اختیار نباشد، می‌توان با استفاده از NDVI و آلبیدوی سطحی به‌دست‌آمده و توسط فرمول اصلاح شدهٔ آلن [۲] نیز به صورت رابطهٔ ۶ عمل کرد [۳].

$$z_{om} = \exp\left[\left(a \times NDVI\alpha\right)b\right] \qquad (۶)$$

که a و b ثابت‌های همبستگی‌اند که از پلات بین $\ln(z_{om})$ و کسر $NDVI/\alpha$ برای دو پیکسل یا بیشتر، که معرف انواع پوشش گیاهی منطقه باشند، به‌دست می‌آید.

در سبال برای به‌دست‌آوردن dT در هر پیکسل نخست باید این پارامتر را برای پیکسل‌های سرد و گرم به‌دست آورد، سپس، با ایجاد رابطهٔ خطی بین این دو پیسکل، مقدار dT را برای سایر پیکسل‌ها به‌دست آورد. با استفاده از روابط زیر روابط ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، و ۱۲) می‌توان dT و Tom پیکسل را به‌دست آورد [۱۸].

$$dT_{cold} = \rho C_P \frac{H_{cold}}{r_{ah(cold)}} \quad (۷)$$

$$dT_{hot} = \rho C_P \frac{H_{hot}}{r_{ah(hot)}} \quad (۸)$$

$$H_{cold} = R_n - G - 1.05\lambda ET_r \quad (۹)$$

$$H_{hol} = R_n - G \quad (۱۰)$$

$$dT = a + bT_s \quad (۱۱)$$

$$T_{air} = T_s - dT \quad (۱۲)$$

که dT و T_{air} به‌ترتیب اختلاف دمای هوای نزدیک سطح و دمای هوا برای هر پیکسل است.

رابطهٔ ۱۰ در زمانی که پیکسل گرم کاملاً خشک است صحیح است، اما در حالتی که قبل از زمان تصویر بارندگی داشته باشیم، در آن صورت پیکسل گرم بسته به میزان بارندگی دارای تبخیر خواهد بود؛ در این حالت رابطهٔ ۱۰ به صورت رابطهٔ ۱۳ تغییر می‌یابد [۱۸]:

$$H_{hot} = R_n - G - \lambda ET_{bare\ soil} \quad (۱۳)$$

در حالت کلی، در صورتی که میزان بارندگی در طی ۵ روز قبل از تصویر بیشتر از ۱۵ میلی‌متر باشد، میزان ET از خاک بدون پوشش برابر ET_r، ۰٫۸ ET_r، ۰٫۵ ET_r، ۰٫۳ ET_r، ۰٫۲ ET_r، و ۰٫۱ ET_r به‌ترتیب برای ۱، ۲، ۳، ۴، و ۵ روز قبل از زمان تصویر است [۱۸].

برای پیکسل سرد مقدار تبخیر و تعرق برابر ET_r ۱٫۰۵ درنظر گرفته می‌شود. بر اساس تجارب به‌دست‌آمده در ایالت آیداهو، مقدار ET در پیکسل سرد حدود ۵ درصد بیشتر از ET گیاه مرجع (ET_r) است که دلیل کاربردِ مقدار ۱٫۰۵ در رابطهٔ ۹ بدین علت است.

مقدار تصحیح‌شدهٔ چگالی هوا (ρ_{air}) با استفاده از دمای هوای به‌دست‌آمده برای هر پیکسل (T_{air}) به‌دست می‌آید. بعد از به‌دست‌آوردن مقدار اولیهٔ شار گرمای محسوس برای هر پیکسل، شرط پایداری با محاسبهٔ طول پایداری مانین- ابوخوف (L) را بررسی می‌کنیم و مقادیر تصحیح‌شدهٔ سرعت اصطکاک (u^*) و مقاومت آئرودینامیکی (r_{oh}) را با استفاده از روابط ۱۴ و۱۵ به‌دست می‌آوریم [۱۸]:

$$u^* = \frac{u_{200}k}{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right) - \psi_{m(200m)}} \quad (۱۴)$$

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \psi_{h(z_2)} + \psi_{h(z_1)}}{u^* \times k} \quad (۱۵)$$

که $\psi_{m(200m)}$ تصحیح پایداری برای انتقال تکانه در ارتفاع ۲۰۰ متر و $\psi_{h(z_2)}$ و $\psi_{h(z_1)}$ به‌ترتیب تصحیحات پایداری برای انتقال گرما در ۲ متر و یک متر هستند.

که در این مرحله اولین تکرار انجام شده است. با جایگزینی r_{ah} تصحیح‌شده در رابطه‌های ۷ و ۸ مقدار تصحیح‌شدهٔ dT به‌دست می‌آید و تکرار بعدی شروع می‌شود. این فرایندِ چرخه‌ای برای محاسبهٔ H تا زمانی که مقدار dT ثابت شود ادامه می‌یابد.

همهٔ مراحل در روابط ۱ تا ۱۵ با استفاده از فرایند مدل‌سازی برنامهٔ ERDAS imagine در همهٔ ۲۲ تصویر از ۲۲ روز در منطقهٔ مطالعاتی انجام شد. جزئیات و الگوریتم‌های مدل‌ها در برخی مطالعات [۱۷، ۱۸] ارائه شده است. در نهایت، نتایج حاصل از مدل SEBAL با مقادیر اندازه‌گیری‌شده با لایسیمتر ایستگاه آموزشی دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران در حوضهٔ طالقان مقایسه شد.

نتایج

تصحیح شیب، جهت، و ارتفاع

با استفاده از مدل رقومی (به منظور کاربرد سبال در مناطق کوهستانی) نقشهٔ شیب و جهت استخراج شد و نقشه‌های سینوس و کسینوس شیب و جهت تهیه شد و در نهایت با استفاده از این نقشه‌ها کسینوس زاویهٔ تابش خورشید تهیه گردید. شکل ۳ نقشهٔ

کسینوس زاویهٔ تابش خورشید را در منطقهٔ مطالعاتی نشان می‌دهد. از نقشهٔ کسینوس زاویهٔ تابش خورشید برای تهیهٔ نقشهٔ آلبیدوی سطحی استفاده شد.

شاخص تفاضل نرمال‌شدهٔ گیاهی (NDVI)

NDVI شاخصی است که به وضعیت و تراکم پوشش گیاهی حساسیت دارد. با استفاده از رابطهٔ ۵ نقشهٔ NDVI تهیه شد (شکل ۴). از این نقشه به همراه نقشهٔ آلبیدوی سطحی در تهیهٔ نقشهٔ درجهٔ حرارت سطحی استفاده شد.

شکل ۳. نقشهٔ زاویهٔ تابش خورشید حوضهٔ آبخیز طالقان در تاریخ ۱۳۸۵/۶/۱۲

شکل ۴. نقشهٔ شاخص تفاضل نرمال‌شدهٔ گیاهی حوضهٔ آبخیز طالقان در تاریخ ۱۳۸۵/۶/۱۲

تابش خالص (Rn)

شار تابش خالص در سطح (R_n) با استفاده از همهٔ شارهای تابشی فرودی و خروجی از سطح به‌دست می‌آید. بنابراین، تابش خالص عبارت است از: اختلاف بین جریان تابش خروجی و فرودی، و معیاری از مقدار انرژی موجود در سطح زمین به‌شمار می‌رود. با استفاده از نقشه‌های کسینوس زاویهٔ تابش خورشید نقشهٔ درجهٔ حرارت سطحی و آلبیدوی سطحی نقشهٔ تابش خالص حاصل شد (شکل ۵).

شکل ۵. نقشهٔ تابش خالص در حوضهٔ آبخیز طالقان در تاریخ ۱۳۸۵/۶/۱۲

شار گرمای خاک (G)

شار گرمای خاک میزان انتقال گرما در داخل خاک و پوشش گیاهی در اثر هدایت مولکولی است. این نقشه بر اساس نقشه‌های NDVI، تابش خالص، حرارت سطحی، و آلبیدوی سطحی به‌دست آمد (شکل ۶). از نقشهٔ شار گرمای خاک و تابش خالص کسر تبخیر به‌دست می‌آید.

تبخیر و تعرق واقعی ۲۴ساعته

از رابطهٔ ۱ به منظور محاسبهٔ تبخیر و تعرق روزانه در هر پیکسل از تصاویر منطقهٔ مورد مطالعه استفاده شد. در نهایت، با استفاده از نقشه‌های تولیدشده در مراحل قبل (آلبیدوی سطحی، کسینوس شیب، حرارت سطحی، کسر تبخیر، NDVI، و کسینوس زاویهٔ تابش خورشید) نقشهٔ تبخیر و تعرق واقعی ۲۴ساعته به‌دست می‌آید. شکل ۷ نقشهٔ تبخیر و تعرق واقعی ۲۴ ساعته در حوضهٔ آبخیز طالقان را نشان می‌دهد. این عملیات برای ۲۲ تصویر از منطقه تکرار شد و در هر تصویر تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شد.

شکل ۶. نقشهٔ شار گرمای خاک در حوضهٔ آبخیز طالقان در تاریخ ۱۳۸۵/۶/۱۲

اعتبارسنجی نتایج مدل سبال

روش سبال برای ۲۲ روز مختلف برای تصاویر MODIS اجرا و با مقادیر اندازه‌گیری‌شده با لایسیمتر (جدول ۱) مقایسه شد. نتایج نشان داد میزان همبستگی ۰/۸۸ است (شکل ۸) که نشان‌دهندهٔ مطابقت داده‌های برآوردی و اندازه‌گیری‌شده است.

شکل ۷. نقشهٔ تبخیر و تعرق واقعی ۲۴ ساعته در حوضهٔ آبخیز طالقان در تاریخ ۱۳۸۵/۶/۱۲

جدول ۱. تاریخ تصویرهای مورد استفاده و مقادیر تبخیر و تعرق برآوردی و اندازه‌گیری‌شده

ردیف	روز (تاریخ تصویر)	تبخیر و تعرق برآوردشده از طریق مدل سبال (میلی‌متر در روز)	تبخیر و تعرق اندازه‌گیری‌شده از لایسیمتر (میلی‌متر در روز)
۱	۱۲ شهریور ۱۳۸۵	۰٫۷	۰٫۶
۲	۲۹ شهریور ۱۳۸۵	۳٫۶	۳٫۱
۳	۳۱ شهریور ۱۳۸۵	۱٫۸	۱٫۴
۴	۳ مهر ۱۳۸۵	۵٫۶	۶٫۲
۵	۴ مهر ۱۳۸۵	۳٫۵	۴
۶	۶ مهر ۱۳۸۵	۰٫۶	۰٫۸
۷	۷ مهر ۱۳۸۵	۰٫۸	۰٫۷
۸	۸ مهر ۱۳۸۵	۰٫۲۸	۰٫۴
۹	۱۰ مهر ۱۳۸۵	۲٫۵	۱٫۹
۱۰	۱۲ مهر ۱۳۸۵	۲٫۶	۲٫۱
۱۱	۱۶ مهر ۱۳۸۵	۰٫۵	۰٫۸
۱۲	۱۷ مهر ۱۳۸۵	۱٫۵	۰٫۲
۱۳	۱۸ مهر ۱۳۸۵	۳٫۵	۲٫۱
۱۴	۲۰ مهر ۱۳۸۵	۱٫۴	۱٫۶
۱۵	۲۱ مهر ۱۳۸۵	۰٫۹	۱
۱۶	۸ آذر ۱۳۸۵	۰٫۴	۰٫۸
۱۷	۹ آذر ۱۳۸۵	۰٫۲۵	۰٫۶
۱۸	۱۱ آذر ۱۳۸۵	۰٫۶	۰٫۴
۱۹	۱۲ آذر ۱۳۸۵	۱٫۴	۱٫۲
۲۰	۱۳ آذر ۱۳۸۵	۰٫۶	۰٫۳
۲۱	۱۴ آذر ۱۳۸۵	۰٫۷	۰٫۹
۲۲	۱۶ آذر ۱۳۸۵	۰٫۵	۰٫۶

شکل ۸. رابطهٔ مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری‌شدهٔ تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته در حوضهٔ آبخیز طالقان

بحث و نتیجه‌گیری

کاربرد مطالعات قبلی روش سبال به مناطق کشاورزی بدون توپوگرافی محدود می‌شد؛ در حالی که در حوضهٔ آبخیز طالقان شیب و جهت نقش مهمی در ایجاد توپوگرافی و در نتیجه در میزان رطوبت خاک ایفا می‌کنند. تبخیر و تعرق پیش‌بینی‌شده در مناطقی با پوشش گیاهی طبیعی و شیب و جهت متفاوت دارای اعتبار درستی نیست، بنابراین، مقادیر برآوردی در مناطق کوهستانی با موارد فرض‌شده در مدل سبال دارای خطای قابل ملاحظه‌ای است [۲]. بنابراین، برتری کاربرد روش سبال در این مطالعه نسبت به سایر مطالعات تصحیحات شیب، جهت، و ارتفاع در مدل سبال است. از آنجا که سبال برای مناطق مسطّح طراحی شده است، تفاوت درجهٔ حرارت در شیب‌های شمالی و جنوبی لحاظ نشده و تابش ۲۴ ساعته در شیب جنوبی بیش از شیب شمالی نشان داده می‌شود. بنابراین، در این مطالعه داده‌های ارتفاع، شیب، و جهت در مدل سبال وارد شد تا تخمین درستی از عوامل بیلان انرژی و در نتیجه تبخیر و تعرق در مناطق کوهستانی به‌دست آید.

نتایج این مطالعه با یافته‌های دیگر محققان در سایر نقاط دنیا مطابقت دارد؛ به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود: با استفاده از تصویر MODIS و بر اساس روش سبال تبخیر و تعرق سالانه در کنیا برآورد شد و نتایج در مدت سه سال با مقادیر حاصل از نتایج روش بیلان آبی مقایسه شد. نتایج نشان داد همبستگی بالایی (بیش از ۷۰ درصد) بین مقادیر وجود دارد [۱۹]. در مطالعه‌ای مشابه نتایج حاصل از سبال را با مقادیر تبخیر تعرق روزانهٔ حاصل از داده‌هایی که با برداشت نیم‌ساعته در زمین برآورد شده بود مقایسه کردند؛ بر اساس این مقایسه، همبستگی مقادیر بین ۰٫۵۲ تا ۰٫۸۶ بود [۱۳]. با استفاده از روش سبال و تصویر TM لندست نقشهٔ تبخیر و تعرق در اسپانیا تهیه شد [۱۴]. به دلیل

رضایت‌بخش‌بودن نتایج و بالابودن قدرت تفکیک مکانی، امکان تعیین وضعیت رطوبتی، برنامه‌ریزی برای آبیاری، و ارزیابی سیستم‌های آبیاری در این ناحیه میسّر شد. به منظور اعتبارسنجی روش سبال از اطلاعات موجود تبخیر و تعرق مزارع در مقیاس بزرگ در کشورهای چین، هند، اسپانیا، و پاکستان استفاده شد و اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای تبخیر و تعرق با نتایج به‌دست‌آمده از سبال مقایسه شد. نتایج نشان داد در ۸۵ درصد موارد پارامترهای به‌دست‌آمده از سبال با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای بدون هیچ گونه واسنجی مطابقت داشته است. همچنین، این محققان گزارش کردند که نتایج به‌دست‌آمده از سبال و مدل شبیه‌سازی بیلان آب در دلتای رود مصر در سطح ۷۰۰۰۰۰ هکتار از اراضی آبیاری‌شده اختلافی حدود ۵ درصد را نشان داده است [۵]. نتایج به‌دست‌آمده از این مقایسه نشان داد که تبخیر و تعرق برآوردشده از سبال در سطح حوضهٔ آبخیز طالقان از دقت نسبتاً قابل قبولی برخوردار است و برای مطالعات تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس حوضهٔ آبخیز توصیه‌شدنی است. نتایج مشابهی از کاربرد مدل سبال بر اساس تصاویر سنجندهٔ MODIS در مناطق مشهد و گرگان گزارش شده است [۱۵، ۲۰]. با استفاده از تصاویر NOAA و روش سبال، در طی یک دورهٔ دوازده‌ماهه، تصاویر ۸۸ روز پردازش و تبخیر و تعرق دَه‌روزه در سریلانکا برآورد شد. برای تعیین دقت، تبخیر و تعرق برآوردشدهٔ این مقادیر با تبخیر و تعرق واقعی مقایسه شد. نتایج نشان داد اختلاف بین مقادیر به‌دست‌آمده از سبال و مقادیر اندازه‌گیری‌شده در دورهٔ دَه‌روزه و ماهیانه به‌ترتیب ۱۷ درصد و ۱ درصد است. بنابراین، پژوهشگران مذکور کاربردِ اطلاعات ماهواره‌ای را برای برآورد تبخیر و تعرق توصیه نموده‌اند [۸]. در تحقیقی برای بهبود مدیریت آبیاری مزارع از مدل SWAP با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای AVHRR، ETM+ لندست، و ASTER در منطقه‌ای واقع در استان اصفهان با استفاده از روش سبال به تهیهٔ نقشهٔ تبخیر و تعرق اقدام شد. بر اساس برآوردهایِ تبخیر و تعرقِ روزانهٔ مدیریت آبیاری، نتایج رضایت‌بخشی در مقایسه با روش سنتی به‌دست آمد [۱]. بدین ترتیب، هنگامی که داده‌های مکانی با قدرت تفکیک مکانی مناسب برای کاربرد در هیدرولوژی حوضهٔ آبخیز و کاربردهای آب و هواشناسی در دسترس نباشد، داده‌های MODIS می‌تواند برآورد مناسبی از تبخیر و تعرق در مطالعات پیش‌بینی سیل و خشک‌سالی و مدیریت منابع آب ارائه کند. بدین ترتیب، با توجه به همبستگی بالا بین مقادیر برآوردشدهٔ مدل سبال و مقادیر اندازه‌گیری‌شده توسط لایسیمتر موجود در منطقه می‌توان گفت که تبخیر و تعرق برآوردشده از مدل سبال قابل قبول است و می‌توان از این داده‌ها در برنامه‌ریزی منابع آب استفاده کرد.

تقدیر و تشکر

دانشکدهٔ منابع طبیعی و قطب علمی مدیریت پایدار حوضه‌های آبخیز هزینه‌های این تحقیق را تأمین کرده‌اند؛ نویسندگان این مقاله از مراجع مذکور قدردانی و سپاسگزاری می‌کنند.

References

[1] Akbari, M., Toomanian, N., Droogers, P., Bastiaanssen, W. and Gieske, A. (2007). Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran, using NOAA satellite imagery, *Agricultural Water Management*, 88, 99-109.

[2] Allen, R.G. and Tasumi, M. (2000). Appendix B: Algorithm for applying SEBAL to sloping mountainous areas, Application of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and stream flow depletion in the Bear River basin of Idaho through remote sensing, [PDF format], Idaho Department of Water Resource, http:///www.idwr.state.id.us/gisdata/ET/final_sebal_page.htm.

[3] Bastiaanssen, W.G.M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey, *Journal of Hydrology*, 229, 87-100.

[4] Bastiaanssen, W.G.M., Thiruvengadachari, T., Sakthivadivel, R. and Molden, D.J. (1999). Satellite remote sensing for estimating productivities of land and water, *International Journal of Water Resources Development*, 15, 181-196.

[5] Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A. and Holtslag, A.A.M. (1998a). The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 1 formulation, *Journal of Hydrology*, 212-213, 198-212.

[6] Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J., Roerink, G.J. and Van der Wal, T. (1998b). The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 2 validation, *Journal of Hydrology*, 212-213, 213-229.

[7] Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B.P. and Allen, R.G. (2005). SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions, *ASCE J. Irrig. Drain. Eng.*, 131(1), 85-93.

[8] Chandrapala, L. and Wimalasuriya, M. (2003). Satellite measurement supplemented with meteorological data to operationally estimate actual evaporation of Sri Lanka, *Agricultural Water Management*, 58, 89-107

[9] Ines, A.V.M., Honda, K., Das Gupta, A., Droogers, P. and Clemente, R.S. (2006). Combining remote sensing-simulation modeling and genetic algorithm optimization to explore water management options in irrigated agriculture. Agricultural Water Management 83, 221-232.

[10] Kalma, J., McVicar, T. and McCabe, M. (2008). Estimating Land Surface Evaporation: A Review of Methods Using Remotely Sensed Surface Temperature Data, *Surveys in Geophysics*,29, 421-469.

[11] Kimura, R., Bai, L., Fan, J., Takayama, N. and Hinokidani, O. (2007). Evapo-transpiration estimation over the river basin of the Loess Plateau of China based on remote sensing, *Journal of Arid Environments*, 68, 53-65.

[12] Long, D. and Singh, V.P. (2010). Integration of the GG model with SEBAL to produce time series of evapotranspiration of high spatial resolution at watershed scales, *Journal of Geophysical Research*, 115, D21128.

[13] Lu, X. and Zhuang, Q. (2010). Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data, *Remote Sensing of Environment*, 114, 1924-1939.

[14] Medina, J.L., Camacho, E., Reca, J., Lopez, R. and Roldan, J. (1998). Determination and analysis of regional evapotranspiration in Southern Spain based on remote sensing and GIS, *Physics and Chemistry of the Earth*, 23(4), 427-432.

[15] Mobasheri, M.R., Khavarian, H., Ziaeian, P. and Kamaly, G. (2007). Evapo-transpiration assessment using Terra/MODIS images in the Gorgan general district, *Modarres Human Sciences*, 11, 121-142.

[16] Mohamed, Y.A., Bastiaanssen, W.G.M. and Savenije, H.H.G. (2004). Spatial variability of evaporation and moisture storage in the swamps of the upper Nile studied by remote sensing techniques, *Journal of Hydrology*, 289, 145-164.

[17] MohseniSaravi, M., Nosrati, K., Ahmadi, H. and Aghighi, H. (2009). *Application of SEBAL method to calculate evapotranspiration using remote sensing images*, *Final Report of Research Project*, Faculty of Natural Resources, University of Tehran.

[18] Morse, A., Allen, R.G., Tasumi, M., Kramber, W.j., Trezza, R. and Wright, J.L. (2000). Final Report: Application of the SEBAL Methodology for Estimating Evapotranspiration and Consumptive Use of Water Tthrough Remote Sensing [PDF format], Idaho Department of Water Resources, University of Idaho, Department of Biological and Agricultural, http://www.idwr.state.id.us/gisdata/ET/final_sebal_page.htm, 107pp.

[19] Mutiga, J.K., Su, Z. and Woldai, T. (2010). Using satellite remote sensing to assess evapotranspiration: Case study of the upper Ewaso Ng'iro North Basin, *Kenya. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, S100-S108.

[20] SanaeiNejad, S.H., Noori, S. and Hasheminia, S.M. (2011). Estimation of evapotranspiration using satellite image data in Mashhad area, *Journal of Water and Soil*, 25(3), 540-547.

[21] Yao, W., Han, M. and Xu, S. (2010). Estimating the regional evapotranspiration in Zhalong wetland with the Two-Source Energy Balance (TSEB) model and Landsat7/ETM+ images, *Ecological Informatics*, 5, 348-358.