

تخمین بهره‌وری آب کشاورزی در دشت قزوین با استفاده از تصاویر MODIS و AVHRR و داده لایسی متر

عباس کاویانی^{1*}، تیمور سهرابی² و پیمان دانش کار آراسته³

چکیده

مفهوم بهره‌وری آب کشاورزی برای سیاست‌گذاران بخش آب و غذا در سطوح وسیع و حوضه آبریز دشت اهمیت دارد. همین امر لزوم استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور را گوشزد می‌کند که طی دهه‌های گذشته به شدت در مطالعات به کار برده می‌شوند. این پژوهش در پایین‌دست شبکه دشت قزوین انجام شده است، با استفاده از تصاویر MODIS و AVHRR مقادیر تبخیر- تعرق و ماده خشک تولیدی واقعی با استفاده از الگوریتم سبال محاسبه شد. در انجام این پژوهش از چهار تصویر بدون ابر AVHRR و MODIS که تطابق زمانی با داده‌های لایسی‌متری دارد، استفاده شد. در اجرای الگوریتم سبال در تصاویر به طور همزمان نرم‌افزارهای ENVI و ILWIS به کار گرفته شد. نتایج حاصل از الگوریتم در هر چهار تصویر با یکدیگر و با داده‌های لایسی‌متر زهکش‌دار موجود در منطقه در هر چهار روز به طور جداگانه ارزیابی شد. مقایسه مقادیر تبخیر- تعرق به دست آمده از تصاویر با داده‌های لایسی‌متر، دقت نتایج به دست آمده از تصاویر بدون ابر MODIS و AVHRR را به ترتیب $R^2=0.92$ و $R^2=0.81$ برآورد کرده است. پس دقت تصاویر MODIS در برآورد تبخیر- تعرق و بهره‌وری آب با استفاده از الگوریتم سبال بیشتر است. متوسط بهره‌وری آب کشاورزی برای گندم در دشت قزوین از تصاویر MODIS دارای مقدار 0.76 و در تصاویر AVHRR دارای مقدار $1/0.3$ کیلوگرم در مترمکعب و از داده‌های لایسی‌متر $0/9$ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمده‌اند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم سبال، بهره‌وری آب، سنجش از دور، قزوین.

ارجاع: کاویانی ع. سهرابی ت. و دانش کار آراسته پ. ۱۳۹۲. تخمین بهره‌وری آب کشاورزی در دشت قزوین با استفاده از تصاویر MODIS و AVHRR و داده لایسی‌متر. مجله پژوهش آب ایران. ۱۳۷(۱): ۱-۱۰.

۱- عضو هیأت علمی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

۲- استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

* نویسنده مسئول: abbass_kaviani@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۸/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۳/۲۲

مقدمه

فتوسنتز به تعرق میزان بهره‌وری آب کشاورزی را افزایش دادند.

روش‌های سابق مدیریت منابع آب به دنبال ذخیره‌سازی آب در مزرعه بودند در حالی که در مدیریت جدید منابع آب نگرش از سطح مزرعه به سطح حوضه توسعه یافته و به این ترتیب آب هدر رفته از سطح یک مزرعه را می‌توان در نقاط پایین‌دست حوضه مورد استفاده مجدد قرار داد. هدف از این شیوه مدیریتی کاهش ET_{act} و افزایش تولید در سطح حوضه است. لذا در این روش که مدنظر نویسندگان این مقاله می‌باشد، آبی برای استفاده مجدد در پایین‌دست حوضه وجود ندارد.

لی و همکاران (۲۰۰۸) در مقاله خود اعلام کردند سنجنده AVHRR تنها سنجنده‌ای بود که تا سال ۲۰۰۰ تصاویر را به صورت روزانه و با توان تفکیک زمینی ۱۱۰۰ متر در اختیار کاربر قرار می‌داد. سپس بر اساس ضرورت در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۲ سنجنده MODIS به ترتیب روی ماهواره‌های Terra و Aqua نصب شد.

همان‌گونه که در معادله ۱ دیده می‌شود مقدار بهره‌وری بستگی به مقدار تبخیر- تعرق و مقدار ماده خشک تولید شده دارد. لذا هر دو مقدار باید از طریق تصاویر ماهواره‌ای تأمین شود. باستیانس و همکاران (۲۰۰۲) طی مطالعه‌ای استفاده از تصاویر ماهواره‌ای را برای به کارگیری الگوریتم‌های بیلان انرژی برای تعیین تبخیر- تعرق واقعی و تعیین مقدار ماده خشک تولید شده بسیار مناسب تشخیص دادند. این پژوهشگران الگوریتم سبال^۱ را از جمله الگوریتم‌های بیلان انرژی روی سطح معرفی کردند که کاربرد آن در اراضی صاف و در مناطق نیمه‌خشک نتیجه مطلوبی را از خود نشان داده است و برای محاسبه گرمای نهان به عنوان باقی‌مانده معادله بیلان انرژی مورد استفاده زیادی دارد. الگوریتم سبال توسط خانهاز (۲۰۰۶) در بیش از ۱۵ منطقه مطالعاتی که دارای شرایط اقلیمی متفاوتی بودند آزمایش شده و در تمامی موارد نتایج حاصل دارای تطابق خوبی به داده‌های لایسی‌متری بوده است. لی و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از تصاویر ماهواره نوآ و الگوریتم سبال به بررسی میزان آب مصرفی و بهره‌وری آب در دشت‌های شمال چین که از ۸۳ استان تشکیل شده بود، پرداختند. این محقق خطای نسبی بین مقادیر تبخیر- تعرق فصلی را با داده‌های لایسی‌متری مورد مقایسه

نتایج به دست آمده از پژوهش‌های مؤسسه بین‌المللی سیاست‌گذاری آب و غذای سازمان ملل ثابت کرده است که روند فعلی رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی و گسترش صنایع تا سال ۲۰۲۵ میزان آب قابل تخصیص به بخش کشاورزی را محدودتر خواهد کرد (تونگو و همکاران، ۱۹۹۹). نتیجه کاهش سهم کشاورزی از کل آب شیرین، به خطر افتادن میزان تولید غذا را به دنبال خواهد داشت. همین موضوع تفکر تولید غذای بیشتر به ازای مصرف آب کمتر را که همان بهره‌وری آب کشاورزی است را تقویت خواهد کرد. این مفهوم از دیدگاه تخصص‌های مختلف کشاورزی دارای تعاریف متنوعی است. ولی می‌توان عصاره اصلی و ساختار بنیادی مفهوم بهره‌وری آب کشاورزی را در استفاده صحیح از آب به همراه افزایش تولید محصول نامید. به استناد پژوهش انجام شده توسط وزارت و همکاران (۲۰۰۴) که در سطح وسیع و حوضه آبخیز انجام شده است، پژوهش حاضر نیز مفهوم بهره‌وری از دیدگاه یک سیاست‌گذار منابع آبی حوضه مطابق معادله ۱ مورد توجه قرار خواهد گرفت.

$$(1) \quad \text{ماده خشک تولید شده} = \frac{\text{میزان آب مصرفی}}{\text{بهره‌وری آب}}$$

بخش کشاورزی بزرگترین مصرف کننده آب شیرین شناخته شده است و بنابراین لازم است روی اصلاح بهره‌وری آب در این بخش از دو روش افزایش تولید به ازای یک واحد مصرف آب و یا تولید همان مقدار محصول به ازای کاهش مصرف آب اقدام کرد. بیشترین مطالعه در یک سال در سطح بین‌المللی روی بهره‌وری آب کشاورزی توسط باستیانس (۱۹۷۶) انجام شده است. وزارت و همکاران (۲۰۰۴) نیز مطالعاتی را روی فاکتور K_y (ضریب ثابت رابطه خطی بین مقدار تبخیر- تعرق واقعی و مقدار تولید محصول) در رابطه بین ET_{act} و y_{act} انجام دادند. کیجن و همکاران (۲۰۰۳) چندین راهکار را برای افزایش بهره‌وری آب در وسعت اکولوژی مطرح نمودند. که از این میان کنترل تنش شوری و خشکی، کاربرد کم آبیاری، اصلاح تاریخ کشت با هدف کاهش تبخیر- تعرق و افزایش نفوذ عمقی بهترین روش‌ها شناخته شدند. تونگو (۱۹۹۹) در مقاله‌ای کاهش دوره رشد برنج را روشی کارآمد در افزایش میزان بهره‌وری آب کشاورزی معرفی کرد. پنگ و همکاران (۱۹۹۸) طی مطالعاتی با تغییر در نسبت

این لایسی متر در مرکز زمینی به مساحت ۱۶۰۰ مترمربع و در مختصات جغرافیایی $36^{\circ} 15' 24''$ شمالی و $54^{\circ} 35'$ 49° شرقی مقادیر تبخیر- تعرق گندم و گیاه مرجع چمن را اندازه گیری کرده است.

داده برداری های لایسی متری از تاریخ ۲۵ مهرماه سال ۱۳۷۹ (۱۷ اکتبر سال ۲۰۰۰) آغاز و در فواصل هفت روزه تا تاریخ ۱۲ تیرماه سال ۱۳۸۰ (۲ جون ۲۰۰۱) ادامه یافته است. پس از اتمام دوره کشت مقدار وزن کل و وزن دانه نیز تعیین شده است.



شکل ۱- محدوده مطالعاتی شبکه آبیاری قزوین

یکی از مزایای استفاده از تصاویر ماهواره ای، استخراج همزمان اطلاعات از مناطق وسیع است که تحت پوشش تصویر قرار گرفته است.

MODIS سنجنده ای است که روی ماهواره های Aqua و TERRA قرار داده شده است و تصاویر با توان تفکیک مکانی ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر در ۳۶ باند برداشت می کند. در این مطالعه از تصاویر سنجنده MODIS ماهواره TERRA و از باندهای قرمز، مادون قرمز نزدیک و حرارتی با توان تفکیک زمینی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری و با پوشش سطح ۱۰۰ هکتاری استفاده شده است.

از دیگر تصاویر مورد استفاده در این مطالعه تصاویر ماهواره AVHRR نوآ است. این سنجنده دارای باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک به صورت کالیبره شده در اختیار می باشد که اطلاعات آن در جدول ۱ آورده شده است.

قرار داده و مقدار خطا را $\frac{3}{4}$ درصد برآورد کردند. از سوی دیگر بیشترین و کمترین مقدار بهره‌وری به ترتیب ۱/۶۷ و ۰/۵ کیلوگرم بر هر مترمکعب آب مصرفی برآورد کردند.

اکبری و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از الگوریتم سبال عملکرد چهار شبکه آبیاری استان اصفهان را ارزیابی کردند و مقدار بهره‌وری آب را در این چهار شبکه به ترتیب از ۰/۷۹ تا ۰/۹۱ کیلوگرم بر هر مترمکعب برآورد کردند.

با عنایت به عدم دسترسی آسان به تصاویر با توان تفکیک زمینی بالا و لزوم بدون ابر بودن تصاویر و نگاه حوضه ای و کلان به مقوله بهره‌وری آب در سطح حوضه دشت قزوین لازم است تا از تصاویر با توان تفکیک زمینی پایین و در مقابل با توان تفکیک زمانی بالا استفاده شود. در این صورت دسترسی ساده و ارزان قیمت و از همه مهم تر دسترسی روزانه به این تصاویر باعث می شود تا به صورت روزانه مقادیر تبخیر- تعرق و بهره‌وری آب در سطح کلان دیده شود. در این پژوهش که در محدوده شبکه آبیاری دشت قزوین انجام شده است الگوریتم سبال در چهار زمان که اطلاعات لایسی متری در آن تاریخها بوده و با تصاویر AVHRR و MODIS دارای تطابق است اجرا شده و نتایج حاصل از اجرای الگوریتم در تصاویر بدون ابر با اطلاعات لایسی متری ارزیابی شد.

مواد و روشها

محدوده مورد مطالعه اراضی پایین دست شبکه آبیاری دشت قزوین می باشد که در فاصله ۱۵۰ کیلومتری غرب پایتخت و بین عرضهای شمالی $36^{\circ} 00' 00''$ تا $36^{\circ} 20' 00''$ و طولهای شرقی $49^{\circ} 40' 00''$ تا $49^{\circ} 35' 35''$ قرار دارد. شبکه آبیاری قزوین (شکل ۱) با هدف انتقال آب از سد انحرافی زیاران به دشت قزوین احداث شده و محدوده ۵۸۰۰۰ هکتار از اراضی دشت قزوین را که خاک این محدوده ها از نظر حاصل خیزی دارای درجه ۱ و ۲ است را تحت پوشش قرار داده است.

در محدوده مورد مطالعه یک لایسی متر زهکش دار به ابعاد $1/2 \times 2/4$ مترمربع و به عمق ۱/۵ متر احداث شده است.

جدول ۱- اطلاعات تصاویر AVHRR ماهواره نوآ مورد استفاده در این مطالعه

باند	۱	۲	۳A	۳B	۴	۵
مشخصات طیفی (میکرومتر)	۰/۶۸-۰/۵۸	۱-۰/۷۲۵	۱/۶۴-۱/۵۴	۳/۹۳-۳/۵۵	۱۱/۳-۱۰/۳	۱۲/۵-۱۱/۵

تعرق عمل می‌کند. از آنجایی که روند محاسبه تبخیر-تعرق با استفاده از این الگوریتم بسیار طولانی است، لذا در این بخش تنها به ارایه شکل ۲ اکتفا می‌شود. با توجه به این که روند محاسبه تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال طولانی و نیاز به سعی و خطا دارد لذا از نرم‌افزار Fortran و VisualBasic برای اجرای الگوریتم سبال روی هر یک از تصاویر استفاده می‌شود. در این پژوهش از مدل ENVI و نرم‌افزار ILWIS برای اجرای الگوریتم بیلان انرژی در تصاویر استفاده شده است.

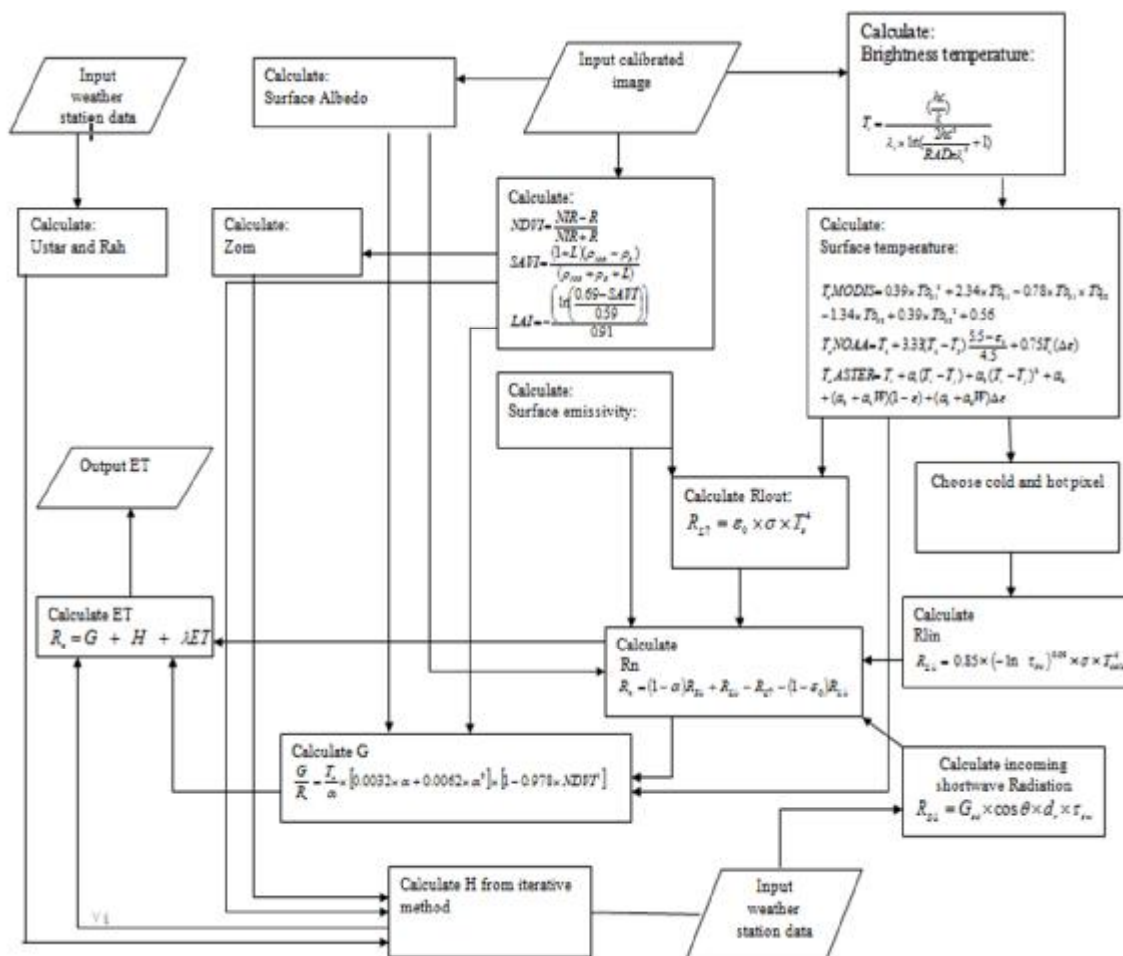
اطلاعات هواشناسی

از جمله بزرگترین مزایای الگوریتم سبال که علت اصلی به کارگیری توسط پژوهشگران مختلف است برآورد صورت کسر بهره‌وری آب کشاورزی (تبخیر-تعرق واقعی) با جمع‌آوری حداقل اطلاعات هواشناسی و تکیه بر تصاویر ماهواره‌ای است. در این پژوهش سرعت باد و رطوبت جو از ایستگاه سینوپتیک قزوین و سایت سازمان هواشناسی کشور تأمین شده است.

در این پژوهش از بین ۱۸ تصویر که در طول فصل رشد گیاه در منطقه گرفته شده بود تنها قادر به استفاده از چهار تصویر (تاریخ تصاویر ۸۰/۲/۱۱، ۸۰/۲/۲۵، ۸۰/۳/۸، ۸۰/۴/۱۲) شده است. زیرا تصاویر مورد استفاده باید دارای همزمانی برداشت و بدون لکه‌های ابر باشند در غیر این صورت برآورد صحیح مقدار بیلان انرژی و کاربری اراضی دچار اشکال شده و مقادیر بهره‌وری محاسبه شده اشتباه خواهد بود.

الگوریتم بیلان انرژی

در این پژوهش از الگوریتم سبال به عنوان الگوریتم بیلان انرژی برای تعیین تبخیر-تعرق واقعی استفاده شده است. این الگوریتم در پژوهش‌های زیادی مورد ارزیابی و کالیبراسیون شده است که از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به پژوهش باستیانس و همکاران (۲۰۰۲)، لیانگ و زوارت و همکاران (۲۰۰۴)، کنراد و همکاران (۲۰۰۷) اشاره نمود. الگوریتم سبال از جمله روش‌های برآورد تبخیر-تعرق واقعی گیاهان زراعی و باغی است که بر پایه بیلان انرژی و با محاسبه تمامی مؤلفه‌های بیلان انرژی به جزء تبخیر-



شکل ۲- فلوچارت روند محاسبه تبخیر و تعرق با استفاده از الگوریتم سبال (باستیانس و همکاران، ۲۰۰۲)

نتایج و بحث

پیش از تحلیل داده‌های به دست آمده از الگوریتم سبال لازم است تا مقادیر داده‌های به دست آمده باداده‌های قابل اعتمادی ارزیابی و در صورت نیاز کالیبره شود. با عنایت به روند الگوریتم سبال که در شکل ۲ آورده شده است انجام عملیات کالیبراسیون روی پارامتر L وجود دارد که در یک روند سعی و خطا و با تغییر مقادیر L امکان پذیر است. الگوریتم سبال نیاز به تصاویر بدون ابر دارد. از میان پنج تصویر MODIS و پنج تصویر AVHRR تهیه شده در دوره رشد گندم چهار تصویر در تاریخ‌های یازدهم، بیست و پنجم اردیبهشت، هشتم و چهارم تیرماه سال ۱۳۸۰ بدون ابر و به دلیل تطابق با داده‌های لایسی متری مدنظر گرفته شدند.

در روند اجرای متدولوژی الگوریتم سبال شاخص SAVI تعریف شده است که اثرات خاک را روی NDVI کم می‌کند. این شاخص اثرات رطوبت خاک را در NDVI تعدیل کرده و از معادله زیر به دست می‌آید.

$$SAVI = \frac{(1+L)(r_4-r_1)}{(L+r_4+r_1)} \quad (2)$$

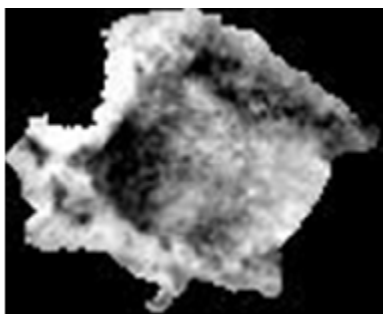
که در معادله فوق L ضریب ثابت، r_4 باند قرمز و r_1 باند مادون قرمز نزدیک است. اگر L برابر صفر باشد، SAVI معادل NDVI است. با توجه به تغییرات شدید مقدار L و ارتباط آن با رطوبت خاک مقادیر آن متفاوت و از سوی دیگر این مقدار تأثیر زیادی روی برآورد صحیح تبخیر-تعرق خواهد داشت. لذا می‌توان این پارامتر را به عنوان اصلی‌ترین پارامتر در برآورد صحیح مقادیر تبخیر-تعرق واقعی و بهره‌وری آب معرفی کرد. بدین ترتیب از این پارامتر برای کالیبراسیون الگوریتم استفاده می‌شود. مقادیر L از صفر در مناطق مرطوب تا یک در مناطق خشک متغیر است.

برای یافتن این ضریب از چهار تصویر MODIS و AVHRR با قدرت تفکیک مکانی به ترتیب ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ متر استفاده شده است. در هر تصویر ۴ منطقه که نشانگر نقاط خاک لخت بدون پوشش گیاهی در حالت مرطوب و خشک (خاک با رنگ‌های تیره و روشن) و مناطقی با پوشش گیاهی اندک هستند، انتخاب شد. سپس مقادیر SAVI در هر تصویر با استفاده از مقادیر L از صفر تا یک در نقاط مدنظر محاسبه شد. مقادیر پایین انحراف معیار در هر دسته از مقادیر SAVI به دست آمده، نشان دهنده حداقل شدن اثر خاک است.

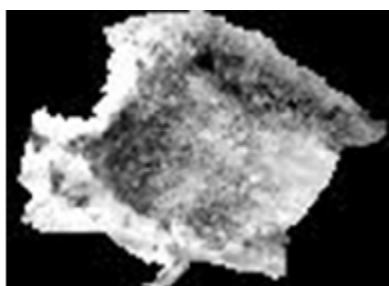
نتایج در تصاویر حاصل از هر دو سنجنده نشان می‌دهد که به ازای L های کوچکتر، انحراف معیار SAVI بزرگتر بوده و در L های بزرگتر به سمت مقادیر ثابتی میل می‌کند (جدول‌های ۲ و ۳). این موضوع به این معنی است که در L های کوچک در منطقه اثرات خاک خود را بیشتر نشان می‌دهد (جدول ۲) و به این دلیل است که انحراف معیار در SAVI حاصل از مقادیر $L=1$ به حداقل رسیده که با توجه به اقلیم نیمه‌خشک و سرد منطقه مقادیر بهینه L در حد یک برآورد می‌شود. نکته دیگری که با مشاهده این شکل‌ها حاصل می‌شود حاکی از این است که با زیاد شدن L شاخص SAVI کاهش می‌یابد. این کاهش نیز موجب کاهش شاخص سطح برگ می‌شود. به نحوی که در L های بزرگ و در خاک‌های تیره یا پوشش‌های گیاهی بسیار اندک، LAI مفهوم فیزیکی خود را از دست داده و منفی می‌شود که در محاسبات صفر در نظر می‌شود. در واقع به این طریق می‌توان نقاطی را که دارای پوشش گیاهی هستند، مشخص کرد.

در این مقاله فقط به روند به دست آمدن تصویر تبخیر-تعرق روزانه و بهره‌وری آب اشاره می‌شود. با وجود این که مقدار آلبیدو در هر دو سنجنده از یک روند تبعیت می‌کند ولی مقادیر آلبیدو به دست آمده از سنجنده MODIS بزرگتر از AVHRR است و این بدان معناست که مقادیر بازتابش در تصاویر AVHRR کمتر است و مقدار انرژی بیشتری را در خود حفظ می‌کند. دمای سطح زمین از طریق معکوس رابطه پلانک برآورد شده و در شکل ۳ به نمایش گذاشته شده است. نقاط سفید روی نقشه نشانگر دمای سطح زمین کمتر از ۲۷۳ درجه کلوین است، که به دلیل وجود لکه‌های ابر موجود در منطقه است ولی به دلیل فاصله زیاد محل اراضی کشاورزی از این محل امکان استفاده از این تصویر وجود دارد. کاربرد همزمان معادلات بیلان انرژی و استفان-بولتزمن تابش خالص را تولید می‌کند که برآیند تابش طول موج کوتاه ورودی و خروجی و تابش طول موج بلند ورودی و خروجی معرفی می‌شود و نتیجه آن را در شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد. همان‌طور که انتظار می‌رفت مقادیر مجدداً در دمای سطح و تابش‌ها هم متفاوت است. با توجه به این که مقادیر بازتاب شده به وسیله زمین که با آلبیدو مشخص شده بود در تصاویر AVHRR کمتر بوده است لذا همان‌طور که انتظار می‌رفت مقدار دمای سطح زمین در رابطه با تصاویر AVHRR

ماهواره‌ای از یک مسیر تبعیت می‌کند ولی در کل مقادیر تبخیر- تعرق در تصویر AVHRR کمتر از MODIS است.



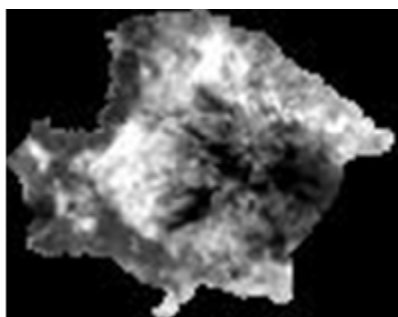
(الف)



(ب)

شکل 3- مقادیر دمای سطح زمین در محدوده دشت قزوین یازدهم اردیبهشت ماه 1380

(الف: سنجنده MODIS، ب: سنجنده AVHRR)



(الف)



(ب)

شکل 4- مقادیر تابش خالص خورشیدی در محدوده دشت قزوین یازدهم اردیبهشت ماه 1380

(الف: سنجنده MODIS، ب: سنجنده AVHRR)

بیشتر از MODIS است که البته این امر در تصاویر هر چهار روز مشهود است.

نقاط تیره (قرمز رنگ) موجود در نقشه نشان دهنده تابش خالص بسیار زیاد و مربوط به نقاط کوهستانی هستند. از آنجا که این مقاله با هدف تعیین مقادیر بهره‌وری آب کشاورزی در اراضی زراعی و در سطح حوضه می‌باشد، لذا ارقام موجود در این نقشه‌ها در اراضی کشاورزی صحت دارد. زیرا پیکسل سرد که مبین تابش طول موج بلند ورودی است و برای تعیین میزان تبخیر- تعرق واقعی استفاده می‌شود از مزارع زراعی انتخاب شده است. لازم به ذکر است با توجه به این که ابعاد پیکسل در تصاویر سنجنده AVHRR بزرگتر است، لذا در نقاط مشابه روی دو تصویر یک مقدار مشابه استخراج نمی‌شود زیرا در سلول بزرگتر عوارض بیشتری وجود دارد که باعث می‌شود بازتاب برآیند از سلول در دو تصویر متفاوت بوده و فقط در مزارع از یک روند در دو تصویر تبعیت می‌شود.

برآورد گرمای محسوس به یک فرآیند تکرار نیاز دارد که از شاخص‌های گیاهی استفاده می‌کند. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد در مناطق فاقد پوشش گیاهی مقدار LAI به دست آمده از فرمول کمتر از صفر می‌شود که در محاسبات مقدار صفر برای آن منظور می‌شود. در نهایت گرمای محسوس به دست می‌آید (شکل 5) و تصاویر تبخیر- تعرق حاصل برآیند شار گرمای خالص، گرمای محسوس و شار گرمای خاک می‌باشد که در شکل 6 آورده شده است. با توجه به شکل‌ها مشخص می‌شود که تبخیر- تعرق زیادتر در سلول‌هایی که با تابش خالص زیادتر در نقاطی با دمای سطح زمین کمتر (طول موج بلند خروجی کمتر) و پوشش گیاهی بیشتر (شار گرمای خاک کمتر) است به دست می‌آید. این مطلب در ارتباط با هر دو تصویر و در هر چهار روز صادق است. نتایج تبخیر- تعرق این روز نشان می‌دهد که بیشترین مساحت مناطق کشاورزی دارای تبخیر- تعرقی در بازه بین 2/6 تا 6/4 میلی‌متر در روز برای تصویر MODIS و 2/2 تا 6/1 میلی‌متر در روز برای تصویر AVHRR قرار دارند. مقایسه تصاویر دو ماهواره در این روز نشان دهنده اختلاف در میزان تبخیر- تعرق وجود دارد که این اختلاف به لحاظ چشمی نیز قابل تشخیص است و از قبل هم قابل انتظار بوده است. البته روند رشد و کاهش مکانی تبخیر- تعرق در هر دو تصویر

جدول ۲ نشان می‌دهد که تطبیق خوبی بین داده‌های لایسی‌متری و داده‌های واقعی حاصل از تصاویر MODIS وجود دارد که البته لازم به ذکر است در پژوهش‌های متعددی این امر به اثبات رسیده است و استفاده از الگوریتم سبال در تصاویر MODIS بیشتر توصیه شده است. میزان RMSE در واقع میزان خطای مطلق را نشان می‌دهد. با این وجود مقادیر RMSE اندازه نسبی خطا و طبیعت آن پدیده را در اختیار قرار نمی‌دهد، لذا از پارامتر CRM (ضریب جرم باقی‌مانده) برای برآورد طبیعت خطا و اندازه نسبی آن استفاده می‌شود.

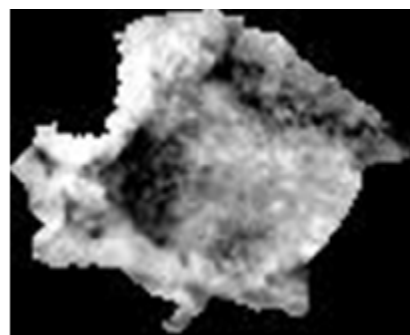
$$RMSE = \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n \left(\hat{x}_i - x_{ref} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{x}_i - \sum_{i=1}^n x_{ref-i}}{\sum_{i=1}^n x_{ref-i}} \quad (4)$$

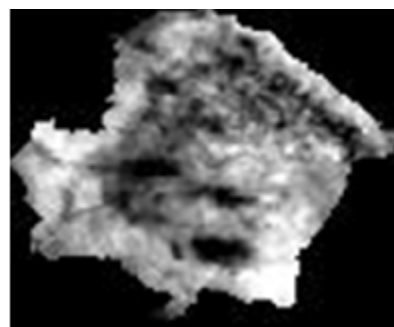
که در آن \hat{x}_i پارامتر شبیه‌سازی شده و x_{ref} پارامتر اندازه‌گیری شده (پایه) است.

مقادیر منفی CRM نشان از تمایل مدل به تخمین کم و مقادیر مثبت نشان از تمایل به تخمین بیشتر دارد. همان طور که در جدول ۲ نیز مشخص شده است مقدار CRM در برآورد تبخیر- تعرق با استفاده از تصاویر MODIS همواره منفی است که نشان از تبخیر- تعرق کمتر مدل نسبت به مقادیر لایسی‌متر است. یک دلیل این امر می‌تواند شرایط ایده‌آل لایسی‌متر جهت تبخیر- تعرق باشد که این امکان برای مناطق همجوار آن وجود ندارد، بنابراین با توجه به این که اندازه پیکسل‌ها بزرگتر از لایسی‌متر است و زمان و مقدار آبیاری در مزارع مجاور با مقدار و زمان آبیاری در لایسی‌متر هماهنگ نیست برآورد کمتر توسط مدل می‌تواند قابل توجیه باشد.

با توجه به جدول ۲ مقدار RMSE در مورد مقادیر روزانه، ۰/۰۷۲ می‌باشد مقدار CRM نشان می‌دهد که مدل مقادیر کمتری از تبخیر- تعرق واقعی را برآورد کرده است. مقادیر متوسط خطای واقعی نیز در $L=1$ به حداقل می‌رسد. مقادیر متوسط خطای واقعی در مورد تبخیر- تعرق روزانه ۰/۲۵ است. متوسط خطای نسبی در مورد تبخیر- تعرق روزانه ۰/۸ می‌باشد. مقادیر ضریب همبستگی سبال با مقادیر برآورد شده تبخیر- تعرق روزانه در زمانی

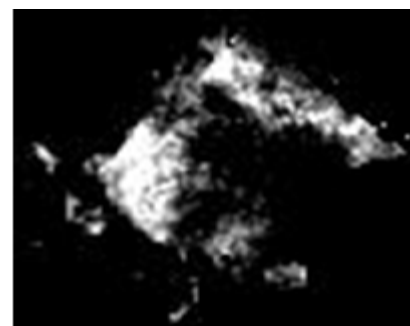


(الف)

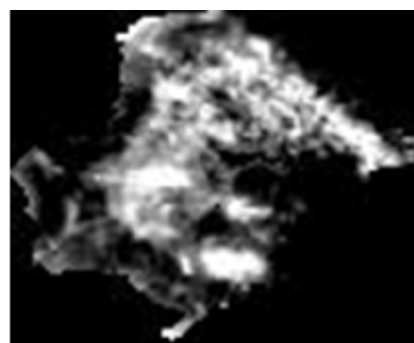


(ب)

شکل 5- مقادیر شار گرمای محسوس در محدوده دشت قزوین یازدهم اردیبهشت ماه 1380
(الف: سنجنده MODIS، ب: سنجنده AVHRR)



(الف)



(ب)

شکل 6- مقادیر تبخیر- تعرق روزانه در محدوده دشت قزوین یازدهم اردیبهشت ماه 1380
(الف: سنجنده MODIS، ب: سنجنده AVHRR)

که $L=1$ بیشترین مقدار است. در ارتباط با تصاویر AVHRR مقادیر تبخیر-تعرق روزانه بالاتر از مقادیر به دست آمده از لایسی‌متر می‌باشد. از سوی دیگر مقدار خطای نسبی برآورد تبخیر-تعرق روزانه بالاتر است.

جدول 2- نتایج مقایسه تبخیر-تعرق واقعی تصاویر MODIS و لایسی‌متر

تاریخ تصویر	پارامتر	مقادیر تبخیر-تعرق روزانه لایسی‌متر (میلی‌متر بر روز)	مقادیر تبخیر-تعرق روزانه با استفاده از مدل سبال (میلی‌متر بر روز)	خطای نسبی (درصد) $L=1$
۱۳۸۰/۲/۱۱		۴/۶	۴/۴۵۰۸	-۸
۱۳۸۰/۲/۲۵		۴/۴۵	۴/۰۳۳۷	-۶
۱۳۸۰/۳/۸	---	۳/۷	۳/۴۳۳۵	-۱۲
۱۳۸۰/۳/۲۲		۴/۷۸	۴/۵۶۷۲	۳
۱۳۸۰/۴/۴		۴/۰۴	۳/۹۴۸۷	-۲
---	RMSE	---	۰/۰۷۲۲	---
---	MAE	---	۰/۲۵۸۷	---
---	CRM	---	-۰/۰۴۷۶	---

جدول 3- نتایج مقایسه تبخیر-تعرق واقعی تصاویر AVHRR و لایسی‌متر

تاریخ تصویر	پارامتر	مقادیر تبخیر-تعرق روزانه لایسی‌متر (میلی‌متر بر روز)	مقادیر تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از مدل سبال (میلی‌متر بر روز)	خطای نسبی (درصد) $L=1$
۱۳۸۰/۲/۱۱		۴/۶	۴/۷۵	-۱۹
۱۳۸۰/۲/۲۵		۴/۴۵	۴/۸۳	-۱۵
۱۳۸۰/۳/۸	---	۳/۷	۴/۳۲	-۳
۱۳۸۰/۳/۲۲		۴/۷۸	۵/۳۲	-۱۴
---	RMSE	---	۰/۱۹	---
---	MAE	---	۰/۶۳۳۸	---
---	CRM	---	۰/۱۲۸۳	---

پس از محاسبه مقدار تبخیر-تعرق واقعی لازم است تا مقدار ماده خشک تولید شده نیز محاسبه شود. برای این امر در ادامه الگوریتم سبال معادلات اصلاحی ارائه شده است که بر اساس شادابی گیاه و تأثیر مستقیم آن بر مقدار NDVI مقدار ماده خشک قابل مشاهده روی سطح زمین برآورد می‌شود.

$$f_{PAR} = -0.161 + 1.257 NDVI \quad (۶)$$

$$Y_{act} = \frac{h_{ind} B_{act}}{1 - m_{oi}} \quad (۷)$$

که در آن m_{oi} محتوی رطوبتی محصول در زمان برداشت و h_{ind} شاخص برداشت است.

پس از محاسبه مقدار تبخیر-تعرق واقعی لازم است تا مقدار ماده خشک تولید شده نیز محاسبه شود. برای این امر در ادامه الگوریتم سبال معادلات اصلاحی ارائه شده است که بر اساس شادابی گیاه و تأثیر مستقیم آن بر مقدار NDVI مقدار ماده خشک قابل مشاهده روی سطح زمین برآورد می‌شود.

$$B_{act} = e \sum (0.48 K_{24}^{\downarrow} f_{PAR,i} t) \quad (۵)$$

که در آن، B_{act} مقدار ماده خشک روی سطح زمین در دوره t برحسب $\frac{kg}{m^2}$ و ε راندمان مصرف روشنایی بر حسب

از اراضی دشت قزوین در ایران مقادیر بهره‌وری آب کشاورزی از طریق اجرای الگوریتم سبال در تصاویر ماهواره‌ای MODIS و AVHRR تعیین شد. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم سبال در تصاویر MODIS در مقایسه با تصاویر AVHRR انطباق بهتری را با داده‌های لایسی‌متری تولید کرده است. متوسط بهره‌وری آب کشاورزی محدوده مورد مطالعه ۰/۷۶ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد که به متوسط بهره‌وری آب اعلام شده در ایران نزدیک است.

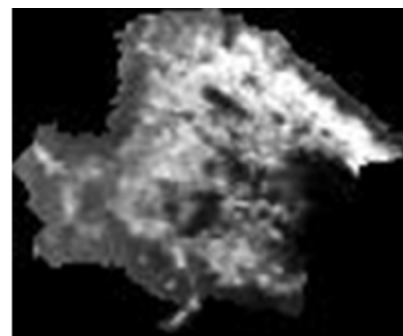
منابع

1. Akbari M. Toomanian N. Droogers P. and Bastiaanssen, W. G. M. 2007. Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran using NOAA satellite imagery. *Agricultural water Management*. 88(1-3):99-109.
2. Bastiaanssen W. G. M. 2002. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus basin. *Water Resource Research*. 38(12):1273.
3. Bastiaanssen W. G. M. Pelgrum H. Wang J. Ma J. F. Moreno G. J. and Vanderwal T. 2002. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Validation. *Journal of Hydrology*. (212-213):213-229.
4. Chemin Y. Platonov A. UI-Hassan M. and Abdullaev I. 2004. Water depletion assessment at administrative and irrigation levels, Case study of Ferghana province using public remote sensing data. *Agricultural Water Management*. 64(3):183-196.
5. Conrad C. Dech S. W. Hafeez M. Lamers J. Martius C. and Strunz G. 2007. Mapping and assessing water use in a central asian irrigation system by utilizing MODIS remote sensing products. *Irrigation Drainage System*. 21(3-4):197-218.
6. Doorenbos J. and Kassam A. H. 1976. *Yeild Response to Water*. FAO Irrigation and Drainage paper 33. FAO. Rome, Italy.
7. Envi user guide. 2001. Research system of Kodak company. 275 p.
8. Immerzeel W. W. Gaur A. and Zwart S. J. 2008. Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment. *Agricultural Water Management*. 95(1):11-24.
9. Ilwis applications guide. Ilwis department. 1997. International Institute for aerospace survey and earth sciences, Enschede, Netherlands. 542 p.
10. Jensen J. R. 2000. *Remote Sensing of The Environment: An Earth Resource Prespective*, Upper saddle river. Prentice Hall. 544 p.
11. Keller A. and keller J. 1995. Effective efficiency: a water use concept for allocating freshwater resources. *Resources and Irrigation*

در نهایت از تقسیم مقادیر تبخیر- تعرق واقعی و ماده خشک تولیدی بر یکدیگر نقشه جدیدی به نام نقشه بهره‌وری آب کشاورزی در سطح دشت حاصل می‌شود که در شکل ۷ آورده شده است. مقادیر محاسبه شده در سطح دشت بدون توجه به نوع محصول از ۰/۱۲ تا ۱/۳ کیلوگرم بر هکتار در تصویر MODIS و از ۰/۳ تا ۱/۵۶ کیلوگرم بر هکتار در تصویر AVHRR متغیر است. مقادیر به دست آمده از لایسی‌متر ۰/۹ کیلوگرم بر هکتار می‌باشد که نتایج به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای را تأیید می‌کند. مقدار بهره‌وری آب کشاورزی حاصل از اجرای الگوریتم سبال در تصاویر MODIS و AVHRR و در مختصات لایسی‌متر به ترتیب ۰/۷۸ و ۱/۰۱ کیلوگرم بر هکتار برآورد شده است.



(الف)



(ب)

شکل 7- مقادیر بهره‌وری در محدوده دشت قزوین تاریخ یازدهم اردیبهشت‌ماه 1380
(الف: سنجنده MODIS، ب: سنجنده AVHRR)

نتیجه‌گیری

رشد جمعیت جهان و تأمین نیاز غذای این جمعیت از طریق بخش کشاورزی از یک سو و کمبود منابع آب از سوی دیگر باعث شده است که مفهوم بهره‌وری آب کشاورزی در بین سیاست‌گذاران بخش آب و غذا از اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش که در وسعت ۵۸۰۰۰ هکتار

- tropical japonica rice grown under irrigated conditions, *Euphytica*. 103(1):103-108.
16. Singh R. Helmers M. J. and Zhiming Q. 2006. Calibration and validation of DRAINMOD to design subsurface drainage systems for Iowa's tile landscapes. *Agricultural Water Management*. 85(3):221-232.
17. Tungo T. P. 1999. Productive water use in rice production: opportunities and limitations. *Journal of Crop Production*. 2(2):241-264.
18. Zhang W. Chen J. Katsuro O. and Yasushi Y. 2005. An approach to estimating evapotranspiration in Urumqi River Basin, Tianshan, China, by means of remote sensing and a geographical information system technique. *Journal of Hydrological Processes*. 19(9):1839-1854.
19. Zwart S. J. and Bastiaanssen W. G. M. 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural water management*. 69(2):115-133.
- division discussion paper 22. Winrock International, Arlington.
12. Kijne J. W. Tungo T. P. Bennett J. Bounman B. and Owies T. 2003. Ensuring food security via important in crop water productivity. In: Challenge program on water and food: Background papers to the full proposal. The challenge program on water and food consortium. Colombo, Sri Lanka. 42 p.
13. Li H. Li Zh. Yuping L. Chunqiang L. Zhijun L. and Shengwei Zh. 2008. Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in north china plain using remote sensing technology. *Agricultural Water Management*. 95(11):1271-1278.
14. Liang S. 2004. Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces. John. Wiley and Sons Inc. Hoboken. New Jersey, USA. 562 p.
15. Peng S. Laza R. C. Khush G. S. Sanico A. L. Visperas R. M. and Garcias F. V. 1998. transpiration efficiencies of indica and improved