

تخمین بهره‌وری آب کشاورزی به کمک فناوری سنجش از دور (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت قزوین)

فرانک خوشنواز^۱، تورج هنر^{۲*}، پیمان دانش کار آراسته^۳

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۰۱ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۲۵

^۱ دانشجوی سابق کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

^۲ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

^۳ استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: toorajhonar@yahoo.com

چکیده

امروزه کاربرد داده‌های سنجش از دور در منابع آب، به‌ویژه در مدیریت آبیاری به‌طور گسترده‌ای مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این تحقیق، امکان یابی کاربرد مدل توازن انرژی به‌منظور تخمین تبخیر-تعرق و ارزیابی بهره‌وری آب کشاورزی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در منطقه وسیعی از شبکه آبیاری دشت قزوین مورد بررسی قرار گرفت. لذا، از الگوریتم بیان انرژی سطح (SEBAL) برای محاسبه تبخیر-تعرق استفاده گردید. الگوریتم SEBAL از قابلیت بازتاب‌پذیری خورشید که توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای دریافت می‌شود، استفاده می‌کند و براساس باقی‌مانده معادله انرژی، تبخیر-تعرق واقعی را محاسبه می‌نماید. در مطالعه حاضر با استفاده از تصاویر گرفته شده از سنجنده ETM+ ماهواره Landsat 7 برای شرایط اقلیم نیمه‌خشک دشت قزوین و با استفاده از روش FAO-56، مقادیر تبخیر و تعرق برای سال ۲۰۰۱ اصلاح و تعدیل گردید. مقایسه نتایج تبخیر-تعرق سال ۲۰۱۰ توسط معادله فائو پنمن-مانتیت با نتایج به‌دست آمده از داده‌های واقعی تصاویر Landsat 7 ETM+ در سال ۲۰۱۰، حاکی از انطباق نتایج دو روش است. نتایج الگوریتم سنجش از دوری به‌کار رفته نشان داد که مقادیر تبخیر-تعرق واقعی روزانه در محدوده ۳/۸ تا ۶/۷ میلی‌متر بر روز متغیر است. همچنین، میزان بهره‌وری آب در تولید ماده خشک به‌ترتیب ۰/۹۲ و ۱/۲۲ کیلوگرم در مترمکعب برای داده‌های زمینی و تصاویر Landsat 7 ETM+ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب کشاورزی، تبخیر-تعرق، دشت قزوین، سنجش از دور، لندست

Estimation of Agricultural Water Productivity Using Remote Sensing Technology (Case Study: Qazvin Plain Irrigation Network)

F Khoshnavaz¹, T Honar^{*2}, P Daneshkar-Arasteh³

Received: 21 January 2014

Accepted: 14 February 2015

¹- Former M.Sc. Student of Irrigation and Drainage, Faculty of Agric., Shiraz Univ., Shiraz, Iran

²- Assoc. Prof. of Water Eng. Dept., Faculty of Agric., Shiraz Univ., Shiraz, Iran

³- Assist. Prof. of Water Eng. Dept., School of Eng. & Tech., Imam Khomeini International Univ., Qazvin, Iran

* Corresponding Author, Email: toorajhonar@yahoo.com

Abstract

Nowadays, application of remote sensing data in water resources, particularly in irrigation management has been widely acknowledged by researchers. In this research feasibility of the use of energy balance model for estimation of evapotranspiration and assessment of agricultural water productivity in a large irrigated area of the Qazvin plain irrigation network was studied, using satellite data. The SEBAL Energy balance algorithm was used to calculate evapotranspiration. SEBAL uses the reflectance capability of solar radiation that is received by satellite sensors and estimates the evapotranspiration from the residue of energy balance equation. In this study, moderate-spatial resolution of Landsat 7 ETM+ images for the semi-arid climate of the study area of Qazvin Plain were considered and the resulted evapotranspiration values were modified and adapted using the FAO-56 methodology for 2001. The results showed a good agreement between FAO Penman- Monteith data and the resulted actual ET values from Landsat 7 ETM+ images in 2010. Values of total daily evapotranspiration varied from 3.8 to 6.7 mm per day. Also, agricultural water productivity for dry biomass was estimated to be about 0.92 and 1.22 kg m⁻³ based on ground data and the resulted data from Landsat 7 ETM+ images, respectively.

Keywords: Agricultural water productivity, Evapotranspiration, Landsat, Qazvin Plain, Remote sensing

مقدمه

تعرق یا تخمین میزان آب مصرفی گیاهان، یکی از اساسی‌ترین اطلاعات، به‌منظور بهبود مدیریت مصرف آب و در نهایت افزایش بازده آب مصرفی می‌باشد (علی اصغر زاده و ثنائی نژاد ۱۳۸۵). تبخیر- تعرق از مؤلفه‌های اصلی بیلان آبی هر منطقه و همچنین از عوامل کلیدی برای برنامه‌ریزی درست و مناسب آبیاری در بهبود بازده آب مصرفی در اراضی فاریاب می‌باشد (لی و همکاران ۲۰۰۳). از طرف دیگر، تبخیر- تعرق اثر قابل ملاحظه‌ای در وضعیت اقلیم از طریق چرخه هیدرولوژی ایفا می‌نماید و تخمین آن، کاربردهای مهم و فراوانی در پیش‌بینی رواناب، پیش‌بینی عملکرد محصول و کاربری اراضی (کاستاس

ایران کشوری است که به لحاظ اقلیمی، جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌گردد به طوری که از یک سو متوسط بارندگی سالانه آن حدود یک سوم متوسط بارندگی خشکی‌ها و از سوی دیگر، میزان تبخیر و تبخیر- تعرق آن حدود ۳ برابر مقدار متوسط این کمیت در خشکی‌های زمین می‌باشد. با توجه به این که در کشور ما بخش کشاورزی سهم عمده ای از کل آب مصرفی را به‌خود اختصاص می‌دهد (علی اصغر زاده و ثنائی نژاد ۱۳۸۵)، با بهبود مدیریت مصرف آب در این بخش و افزایش راندمان مصرف و بهره‌وری آب، می‌توان به نحو قابل ملاحظه‌ای در مصرف آب صرفه‌جویی نمود. برآورد دقیق تبخیر-

در حوضه کنشت کرمانشاه، محاسبه کردند. آنان با استفاده از هم‌پوشانی نقشه پوشش گیاهی برای هر پیکسل از نقشه، مقدار ضریب گیاهی را به صورت حاصل تقسیم دو مقدار تبخیر تعرق واقعی از معادله عمومی بیلان انرژی و تبخیر تعرق مرجع از معادله هارگریوز-سامانی، محاسبه نمودند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که بین دو مقدار معادله عمومی توازن انرژی (تصاویر ماهواره‌ای) و معادله هارگریوز-سامانی (استفاده از ضریب گیاهی مناسب) در برآورد تبخیر-تعرق گیاهان، همبستگی بسیار بالایی وجود دارد.

عمادزاده (۱۳۸۶) به بررسی کارایی آب در زیر حوضه قره‌سو پرداخته و برای محاسبه تبخیر تعرق از فنون سنجش از دور و الگوریتم بیلان انرژی SEBAL بهره جست. تصاویر بکار رفته در مطالعه وی مربوط به NOAA-AVHRR با اندازه سلول یک کیلومتر بود. وی در این پژوهش با مقایسه کارایی آب در زیر حوضه قره‌سو و سایر نقاط کشور پایین بودن بهره‌وری آب کشاورزی را در این حوضه نشان داد و با توجه به گستردگی سطح کشت دیم در زیر حوضه مورد پژوهش، انجام آبیاری تکمیلی برای افزایش چشم-گیر بهره‌وری آب را لازم دانست.

حصادی (۱۳۸۷) با استفاده از الگوریتم SEBAL و داده‌های دورسنجی ماهواره‌های LANDSAT 5 و LANDSAT 7، و TERRA-MODIS نسبت به بررسی و برآورد تبخیر-تعرق در حوضه مرگ که دربرگیرنده منطقه ماهیدشت کرمانشاه می‌باشد، اقدام نمود. بررسی انجام شده در این حوضه نشان داد که از میان مدل‌های شناخته شده برآورد تبخیر-تعرق، روش پنمن-مانتیت هم‌خوانی خوبی با برآوردهای لایسیمیتری داشته است. همچنین، پردازش تصاویر TERRA-MODIS نشان داد که برآوردهای تبخیر-تعرق کمتر از حد مورد انتظار به دست می‌آید و اگر به جای این تصاویر از داده‌های ماهواره LANDSAT 7 استفاده شود، برآوردها تا حد قابل توجهی به برآوردهای حاصل از روش پنمن-مانتیت نزدیک خواهد شد. کریمی و همکاران (۱۳۹۱) در همین منطقه اقدام به تخمین تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال نمودند و ضمن مقایسه با

و نورمان (۱۹۹۶)، طراحی کانال‌های آبیاری و ابنیه توزیع آب دارد (میکائیل و باستانیسن ۲۰۰۲) و همچنین، بررسی بلایای طبیعی نظیر خشکسالی دارد (اگاوا و همکاران ۱۹۹۹).

پیشرفت روزافزون فن‌آوری سنجش از دور و به ویژه تصاویر ماهواره‌ای، امکان برآورد تبخیر-تعرق واقعی و توزیع زمانی و مکانی آن را در سطح وسیع فراهم نموده است و سبب گردیده که استفاده از مدل‌ها و فن‌آوری‌های ماهواره‌ای مورد توجه خاصی قرار گیرد. از علل اصلی این توجه، می‌توان به دقت مکانی و زمانی قابل قبول در این روش اشاره نمود. تاکنون، مطالعات زیادی به منظور تعیین صحت و سقم نتایج حاصل از کاربرد مدل‌ها و فناوری‌های ماهواره‌ای در تعیین مدیریت آبیاری شبکه‌های آبیاری انجام گردیده و نتایج نسبتاً رضایت بخشی ارائه شده است (باستانیسن و همکاران ۲۰۰۰). لی و همکاران (۲۰۰۸)، با استفاده از تصاویر ماهواره NOAA-AVHRR و نیز به-کارگیری الگوریتم SEBAL به بررسی میزان آب مصرفی و بهره‌وری آب در شمال چین پرداختند. این محققان، ابتدا به محاسبه تبخیر-تعرق گیاه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پرداخته، سپس به منظور مقایسه با روش‌های زمینی، از معادله هارگریوز-سامانی و داده‌های هواشناسی و همچنین داده‌های لایسیمتر وزنی استفاده نمودند. خطای نسبی بین مقادیر تبخیر-تعرق فصلی اندازه‌گیری شده زمینی و تبخیر-تعرق محاسبه شده توسط SEBAL در این تحقیق، ۴/۳ درصد گزارش شده است. در تحقیق مورد اشاره، بهره‌وری آب از ۰/۵ تا ۱/۶۷ کیلوگرم در مترمکعب تغییر داشته است. در سال‌های اخیر در ایران نیز استفاده از داده‌های ماهواره‌ای توأم با اندازه‌گیری‌های زمینی در تخمین تبخیر-تعرق و بهره‌وری از آب کشاورزی متداول گشته است. در همین راستا، علی اصغر زاده و ثنایی نژاد (۱۳۸۵)، در مطالعه‌ای با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 7 ETM+، نقشه‌های توپوگرافی، پوشش گیاهی و همچنین داده‌های هواشناسی، ابتدا تبخیر-تعرق واقعی گیاه مرجع را توسط معادله عمومی توازن انرژی و معادله نیمه‌تجربی هارگریوز-سامانی

پوشش بتنی، طول ۹۴ کیلومتر و از ظرفیت آبدهی ۳۰ متر مکعب در ثانیه در ابتدا و ۳ متر مکعب در ثانیه در انتها برخوردار می‌باشد (شکل ۱). الگوی کشت محدوده مورد مطالعه به صورت ۵۰ درصد کشت پاییزه و در اکثر موارد به گندم و جو اختصاص یافته است. البته، ۱۵ تا ۲۵ درصد آن نیز به کشت بهاره و ۲۵ تا ۳۵ درصد نیز در آیش می‌باشد.

آماده‌سازی داده‌ها

در این تحقیق، پیش از تحلیل داده‌های به‌دست آمده از الگوریتم SEBAL، مقادیر داده‌های به‌دست آمده با داده‌های قابل اعتماد دیگر مورد ارزیابی و در صورت نیاز واسنجی گردید. بنابراین، از روش‌های مختلف تخمین تبخیر-تعرق شامل معادله‌های فائو پنمن-مانتیت، هارگریوز-سامانی و بلینی-کریدل استفاده و برای تعیین قابلیت اعتماد معادلات و انتخاب بهترین معادله تخمین تبخیر-تعرق، مقایسه‌ای میان معادلات برآورد تبخیر-تعرق با اطلاعات لایسیمتری انجام گرفت که در نهایت معادله پنمن-مانتیت که شامل هر دو سازوکار انرژی و آیرودینامیکی در پدیده تبخیر می‌باشد، به‌عنوان بهترین روش منطبق با شرایط منطقه انتخاب شد (خوشنواز ۱۳۹۰). لازم به ذکر است که گیاه کشت شده در لایسیمتر چمن بود که در واقع همان گیاه مرجع است. لذا، مدل پنمن-مانتیت که برای گیاه مرجع تعریف شده با آنچه در لایسیمتر کشت شده مطابقت دارد. از آنجا که لایسیمتر، تبخیر-تعرق واقعی را به‌دست می‌دهد، واسنجی مدل پنمن-مانتیت مربوط به گیاه مرجع، منجر به توسعه مدلی بر پایه معادله پنمن-مانتیت برای تخمین تبخیر-تعرق واقعی گردید که همجنس تخمین‌های ماهواره‌ای است (الگوریتم‌های ماهواره‌ای تبخیر-تعرق واقعی را به‌دست می‌دهند). در این بخش از داده‌های ایستگاه سینوپتیک اسماعیل‌آباد که در مجاورت لایسیمتر واقع شده، استفاده گردید.

اندازه‌گیری‌های لایسیمتر در سال ۱۳۸۹ نشان دادند که اختلاف نتایج کمتر از ۱۰ درصد است. آنان از تصاویر LANDSAT 5 TM در تحقیق خود استفاده نمودند. از دیگر فعالیت‌های صورت گرفته می‌توان به تحقیقات کاویانی و همکاران (۲۰۱۱، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲) اشاره نمود. در این سلسله تحقیقات، کاویانی و همکاران با استفاده از الگوریتم سبال و داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای NOAA-AVHRR و TERRA-MODIS نسبت به تخمین تبخیر-تعرق واقعی و بهره‌وری آب کشاورزی اقدام نمودند. آنان بهره‌وری آب کشاورزی را در دشت قزوین معادل ۰/۳ تا ۱/۵۶ و ۰/۱۲ تا ۱/۳۰ کیلوگرم در مترمکعب به‌ترتیب برای تصاویر AVHRR و MODIS برآورد نمودند.

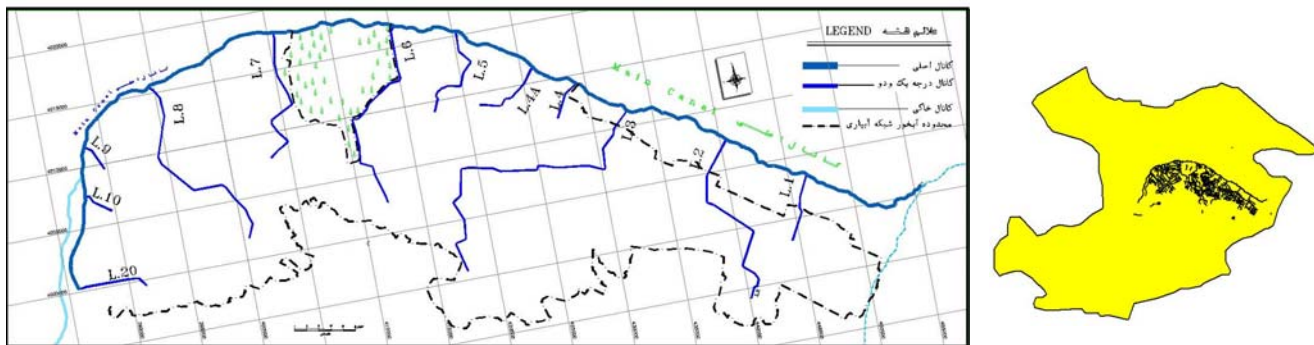
هدف از تحقیق حاضر، تخمین بهره‌وری آب در شبکه آبیاری دشت قزوین با استفاده از معادله توازن انرژی سبال می‌باشد. چنان‌که ذکر شد از محاسن آن نیاز به داده‌های زمینی کم در محاسبه تبخیر-تعرق در مقیاس‌های وسیع بوده که مناسب مناطقی است که از داده‌های آماری اندکی برخوردار می‌باشند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت قزوین به‌همراه زیرحوضه‌های آن با مساحتی معادل ۹۳۰۰ کیلومترمربع در محدوده جغرافیایی ۴۹ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. مساحت دشت قزوین حدود چهارصد و پنجاه هزار هکتار است که شهرهای آبیک، قزوین، تاکستان و بوئین زهرا در حاشیه شمالی و جنوبی آن قرار دارند. بزرگترین و مهم‌ترین منطقه مسکونی در محدوده مورد مطالعه، شهر قزوین مرکز استان قزوین می‌باشد.

شبکه آبیاری قزوین با هدف انتقال آب از سد انحرافی زیاران به دشت قزوین احداث گردیده و محدوده پنجاه و هشت هزار هکتار از اراضی دشت قزوین که دارای خاک‌های حاصل‌خیزی از درجه ۱ و ۲ می‌باشد را تحت پوشش قرار داده است. شبکه اصلی با



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه (شبکه آبیاری) در دشت و استان قزوین.

جمله تصحیحات رادیومتری و هندسی که برای تحلیل شارهای انرژی و پارامترهای دیگر مورد نیاز می‌باشند نیز به‌عنوان اولین گام در پردازش تصاویر ماهواره‌ای انجام پذیرفت.

الگوریتم بیلان انرژی

در این پژوهش، از روش الگوریتم بیلان انرژی SEBAL استفاده گردید. روش SEBAL یک روش ترکیبی بینابینی است که از روابط تجربی و نیز از عوامل فیزیکی به‌طور همزمان استفاده می‌کند. این مدل نیازمند تشعشع ورودی، نقشه دمای سطح زمین، شاخص تغییرات گیاهی نرمال شده (NDVI) و نقشه‌های آلبیدو می‌باشد (کورالت و همکاران ۲۰۰۵). الگوریتم SEBAL وابسته به عوامل توازن انرژی و شارهای انرژی سطحی است که بر اساس اندازه‌گیری‌های طیفی ماهواره‌ها تعیین می‌گردد. البته، SEBAL یک روش نیمه‌تجربی تکرار شونده است که در نتیجه آن تابش، گرما و شارهای تبخیری به‌دست می‌آید. اجزای الگوریتم SEBAL عمدتاً عوامل هواشناسی بوده و نیاز به اطلاعات زمینی (تابش ورودی خورشید، دمای هوا و داده‌های سرعت باد) کمتری دارد. این مدل، شامل تعدادی گام‌های محاسباتی برای پردازش تصویر، محاسبه نهایی تبخیر-تعرق به علاوه تبدلات انرژی میان زمین و اتمسفر می‌باشد (کینوتی موتیگا و همکاران ۲۰۱۰). الگوریتم SEBAL، به‌صورت ویژه داده‌های ورودی مادون قرمز حرارتی، مادون قرمز نزدیک و طیف

برای دستیابی به اطلاعات ماهواره‌ای مورد نیاز از ماهواره Landsat 7 ETM+ با دوره تناوب ۱۶ روزه برای سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۰ برای ردیف/ ستون ۰۳۵/ ۱۶۵ از تارنمای USGS استفاده گردید. لازم به ذکر است که تصاویر سنجنده مورد استفاده از سال ۲۰۰۳ معیوب بوده و در برخی خطوط برداشت تصویر فاقد مقدار می‌باشد. در تحقیق حاضر از داده‌های اصلاح شده توسط USGS که مشکل آن برای برخی تاریخ‌ها رفع شده، استفاده شده است. نهایتاً با تلفیق اطلاعات ماهواره‌ای و اطلاعات ایستگاه سینوپتیک قزوین و سایر اطلاعات زمینی به پردازش تصاویر ماهواره‌ای برای تخمین تبخیر-تعرق منطقه‌ای به‌کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی و نرم افزار ILWIS پرداخته شد. این تصاویر با رابطه فائو پنمن-مانتیت و اسنجی شد تا به‌عنوان معیاری برای ارزیابی نتایج SEBAL استفاده گردد. با توجه به سطح زیر کشت و میزان تولید مزرعه ذرت، عملکرد مزرعه نیز محاسبه گردید و سپس کلیه عوامل تولید بر حسب هکتار تعدیل شدند. اطلاعاتی از جمله عملکرد محصول (برحسب تن در هکتار)، تاریخ برداشت محصول در سال انتخابی (برحسب روز)، سطح زیر کشت (برحسب هکتار) و حجم آب آبیاری (برحسب مترمکعب در هکتار) تهیه گردید. با توجه به این‌که محصول ذرت برای این پژوهش انتخاب گردیده، دوره کشت آن از ابتدای خرداد ۱۳۸۹ آغاز و تا ۲۰ مهر ۱۳۸۹ در نظر گرفته شد. همچنین، پردازش‌هایی از

نامیده می‌شود، می‌باشند و مقدار ε° معادل $2/5 \text{ MJ}^{-1} \text{ g}$ می‌باشد.

بهره‌وری آب

پس از محاسبه کمیت‌های واسط در مراحل فوق، بهره‌وری آب کشاورزی به شکل زیر تعریف و محاسبه گردید. همچنین، توسط رابطه ۸ بهره‌وری آب به صورت نسبت کیلوگرم ماده خشک تولیدی به متر مکعب آب مصرفی در سطح مزرعه محاسبه می‌شود:

$$WP = Biomass / V \quad [A]$$

که در آن $Biomass$ میزان جرم گیاه تولید شده خشک در سطح زمین (kg ha^{-1}) و V حجم آب مصرفی در سطح مزرعه ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) می‌باشند.

بدین ترتیب، برای محاسبه بهره‌وری آب کشاورزی (WP) مقادیر عملکرد محصول اصلی گیاهان (توده گیاهی) و آب تحویلی در یک ناحیه به یکدیگر تقسیم و به صورت یک نسبت بر حسب کیلوگرم محصول اصلی به ازاء یک متر مکعب آب تحویلی به دست آمد.

نتایج و بحث

تبخیر- تعرق

پیش از تحلیل داده‌های به دست آمده از الگوریتم SEBAL، مقادیر تبخیر- تعرق به دست آمده توسط معادله پنمن- مانتیث با داده‌های ماهواره‌ای برای سال آبی ۲۰۰۱ واسنجی شدند. برای دستیابی به این هدف، با مقایسه مقادیر میانگین و انحراف معیار تبخیر- تعرق معادله پنمن- مانتیث و ماهواره‌ای (جدول ۱)، مشاهده شد که مقادیر انحراف معیار نمونه‌ها پایین بود. در نتیجه، مقادیر ارائه شده در جدول نشان‌دهنده پراکندگی کم داده‌ها نسبت به میانگین می‌باشد. اما، مقادیر متوسط تبخیر- تعرق در تاریخ‌های ذکر شده تفاوت زیادی نسبت به هم دارند. بنابراین، نیاز به یک معادله واسنجی برای این سری داده‌ها برای تبخیر- تعرق به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و تبخیر- تعرق معادله پنمن- مانتیث می‌باشد که معادله مورد نظر به صورت زیر تعیین گردید:

قابل دید تصاویر ماهواره‌ای را نیاز دارد و اساس این الگوریتم بر اساس معادله ۱ می‌باشد:

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad [1]$$

که در آن λET گرمای نهان تبخیر- تعرق، R_n تشعشع خالص در سطح زمین، G جریان گرمایی زمین و H جریان گرمای محسوس می‌باشند که کلیه پارامترها بر حسب (W m^{-2}) می‌باشد. با توجه به این که روند محاسبه تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم SEBAL طولانی و نیاز به سعی و خطا دارد از مدل‌های کامپیوتری برای اجرای الگوریتم SEBAL بر روی هر یک از تصاویر استفاده گردید.

محاسبه عملکرد محصول از الگوریتم‌های SEBAL و CASA

خلاصه نظری گام‌های محاسبه مقادیر عملکرد محصول اصلی گیاهان از داده‌های سنجنش از دور به صورت ذیل می‌باشد:

$$NDVI = f(\text{Band 4, Band 3}) \quad (\text{توکر } 1979) \quad [2]$$

$$Biomass = f(APAR) \quad (\text{سامارا سینگا } 2003) \quad [3]$$

$$FPAR = f(NDVI) \quad (\text{داتری و همکاران } 1992) \quad [4]$$

$$PAR = f(K \downarrow) \quad (\text{کریستین سن و گودریان } 1992) \quad [5]$$

$$Biomass = APAR * \varepsilon \quad (\text{فیلد و همکاران } 1995) \quad [6]$$

که در آن ε بهره‌وری استفاده از نور (g MJ^{-1})، $NDVI$ شاخص گیاهی تغییرات نرمال شده گیاهی، $APAR$ تشعشع موثر جذب شده در فتوسنتز (W m^{-2})، $Biomass$ زیست توده گیاهی- میزان توده خشک در سطح زمین در مدت زمان t (g m^{-2})، $FPAR$ مقدار بی‌بعد $APAR$ ، $K \downarrow$ تابش خورشیدی دریافتی در سطح و PAR تابش فعال در فتوسنتز می‌باشند.

$$\varepsilon = \varepsilon^{\circ} \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot W \quad (\text{فیلد و همکاران } 1995) \quad [7]$$

مقادیر T_1 و T_2 وابسته به دمای دوره‌ای که مقدار $NDVI$ بیشینه است و W نسبت شار گرمای نهان به اختلاف شار تابش خالص از شار گرمای خاک که نسبت تبخیری

نتایج چهار تاریخ تصویر برداری در سال ۲۰۰۱ حاکی از مقدار RMSE معادل ۰/۳۶ میلی متر در روز بود.

در شکل‌های ۲ و ۳ میزان تبخیر- تعرق واقعی قبل و بعد از واسنجی توسط معادله رگرسیونی ۹ برای تاریخ ۶ اوت ۲۰۱۰ نشان داده شده است. همچنین، متوسط تبخیر- تعرق واقعی روزانه در تاریخ‌های تصویربرداری در سال ۲۰۱۰ در جدول ۲ ارائه شده است.

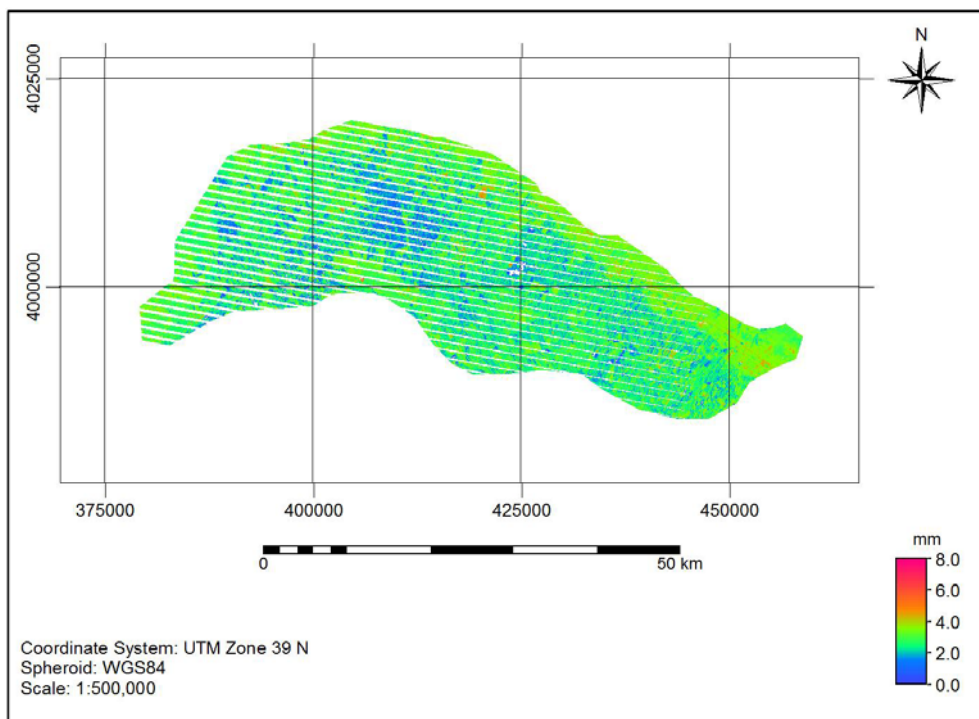
$$ETa_{PM} = 3.546 + 0.435 ET_{RS} \quad (R^2 = 0.78) \quad [9]$$

(n = 1566418)

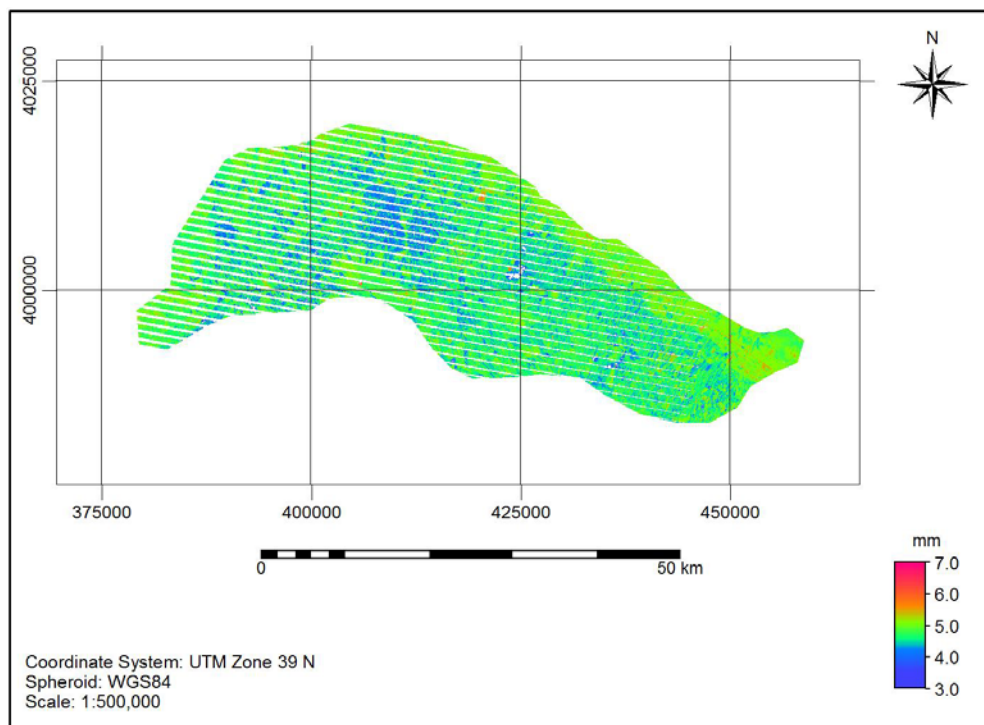
که در آن ET_{RS} مقدار تبخیر- تعرق واقعی به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و ETa_{PM} مقدار تبخیر- تعرق واقعی حاصل از معادله پنمن-مانتیت واسنجی شده با داده‌های لایسیتر می‌باشد. از این معادله برای واسنجی تصاویر ماهواره‌ای سال ۲۰۱۰ میلادی استفاده گردید. مقایسه

جدول ۱- مقایسه برآورد تبخیر- تعرق ماهواره‌ای با مدل پنمن-مانتیت.

تاریخ تصویر	ET(mm day ⁻¹) (Landsat 7 ETM+)		ET(mm day ⁻¹) (Penman-Monteith)	
	متوسط	SD	متوسط	SD
۹ می ۲۰۰۱	۲/۹۵	۰/۳۹	۴/۷۲	۰/۵۴
۲۶ ژوئن ۲۰۰۱	۲/۲۱	۰/۳۵	۴/۹۲	۰/۳۲
۱۳ اوت ۲۰۰۱	۱/۹۴	۰/۳۸	۴/۳۹	۰/۳۹
۱۷ نوامبر ۲۰۰۱	۰/۵۷	۰/۵۴	۰/۹۲	۰/۸۴



شکل ۲ - تبخیر تعرق واقعی (از اطلاعات ماهواره‌ای) در سطح شبکه آبیاری دشت قزوین قبل از واسنجی (mm day⁻¹).



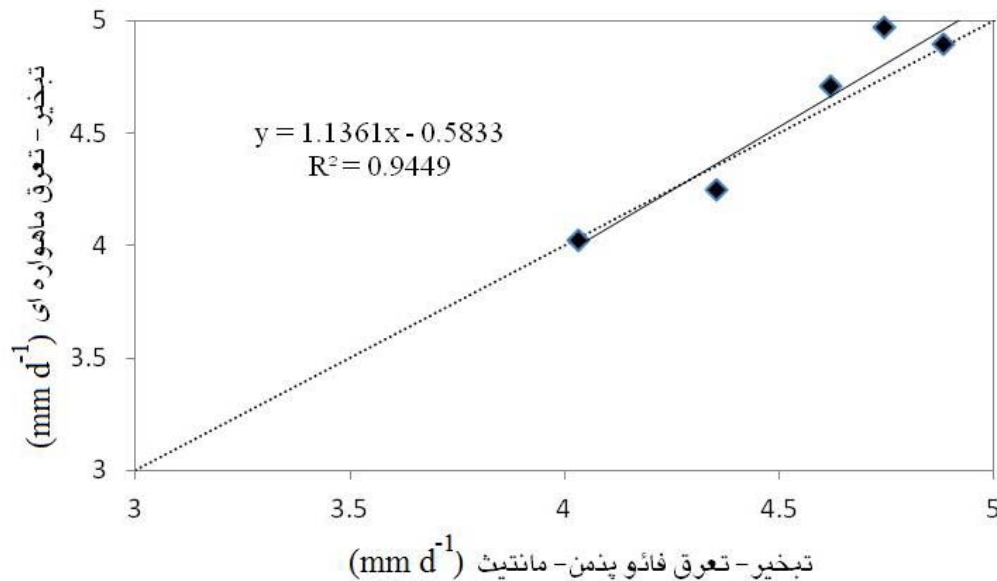
شکل ۳- تبخیر تعرق واقعی (از اطلاعات ماهواره‌ای) در سطح شبکه آبیاری دشت قزوین بعد از واسنجی (mm day^{-1}).

جدول ۲- متوسط تبخیر تعرق واقعی روزانه در شبکه آبیاری دشت قزوین.

تاریخ (شمسی)	تاریخ (میلادی)	متوسط ET (mm day^{-1})	کمینه ET (mm day^{-1})	بیشینه ET (mm^{-1}day)	SD
۱۳ خرداد	03-Jun	۴/۰۳	۳/۵۴	۶/۰۵	-/۳۱
۲۹ خرداد	19-Jun	۴/۲۵	۳/۵۷	۶/۷۷	-/۳۶
۱۴ تیر	05-Jul	۴/۷۱	۳/۵۵	۶/۹۶	-/۴۹
۳۰ تیر	21-Jul	۵/۰۵	۴/۵۳	۷/۰۲	-/۳۱
۱۵ مرداد	06-Aug	۴/۸۹	۳/۵۵	۶/۶۶	-/۳۴
۳۱ مرداد	22-Aug	۴/۹۷	۳/۷۸	۶/۵۸	-/۴۴

در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به رابطه به دست آمده همبستگی بالایی میان نتایج دو روش برآورد تبخیر- تعرق مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده صحت نتایج به- دست آمده می‌باشد.

برای دستیابی به صحت نتایج تبخیر- تعرق سال ۲۰۱۰، به کمک داده‌های هواشناسی در تاریخ‌های عبور ماهواره، میزان تبخیر- تعرق توسط معادله پنمن- مانتیث واسنجی شده به دست آمد و با متوسط تبخیر- تعرق تصحیح شده ماهواره‌ای مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج



شکل ۴- رابطه تبخیر- تعرق فائو پمنن- مانتیث و تصاویر ماهواره‌ای برای تاریخ‌های تصویربرداری در سال ۲۰۱۰.

بهره‌وری آب کشاورزی

با توجه به این‌که امکان دسترسی به تصاویر ماهواره لندست برای ماه‌های شهریور و مهر در سال ۲۰۱۰ وجود نداشت (به علت معیوب بودن تصاویر)، به دست آوردن میزان بهره‌وری در سطح شبکه تا ابتدای شهریور نشان‌دهنده میزان بهره‌وری در فصل کشت نمی‌باشد. در نتیجه، برای تخمین بهره‌وری آب کشاورزی از روش تخمینی برای محاسبه بهره‌وری آب استفاده گردید. برای این منظور، نقشه‌های توده زنده گیاهی تا ابتدای شهریور از سنجش از دور تهیه شد و برای مقادیر متوسط نقشه توده زنده گیاهی و مقادیر مربوط به پیکسل مورد نظر مزرعه ذرت انتخابی در تاریخ‌های عبور ماهواره از ابتدای فصل کشت رابطه‌ای تهیه گردید که نتایج آن در شکل ۵ و نیز روابط ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.

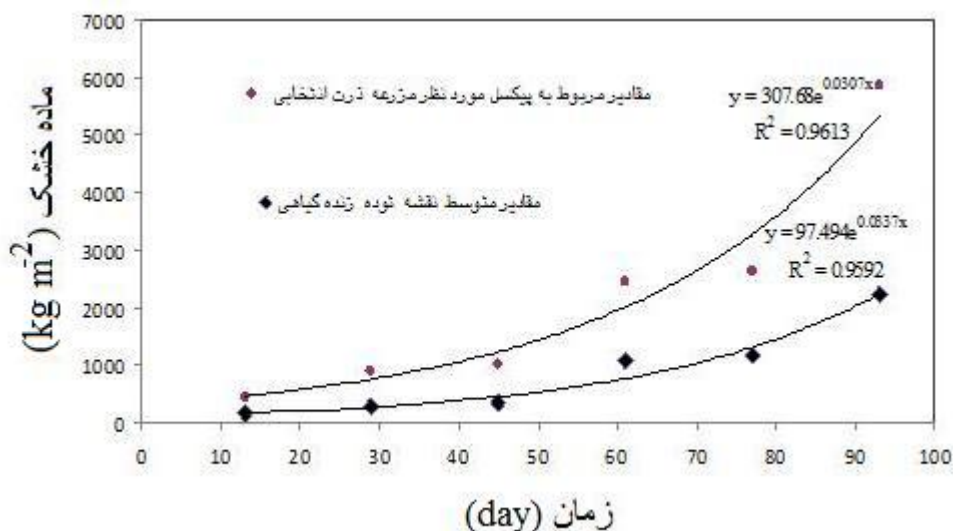
$$Biomass = 97.494 e^{0.0337t} \quad R^2=0.96 \quad [10]$$

(مقادیر متوسط نقشه توده زنده گیاه)

$$Biomass = 307.68 e^{0.0307t} \quad R^2=0.96 \quad [11]$$

(مقادیر مربوط به پیکسل مورد نظر مزرعه ذرت انتخابی) در روابط بالا t روز از شروع دوره رشد محصول می‌باشد.

مقدار توده خشک اندام هوایی برای مدت ۱۴۴ روز تا تاریخ برداشت محصول ذرت در مزرعه برابر ۲۵/۵۸ تن در هکتار و مقدار متوسط آن در نقشه‌ها برابر با ۱۲/۴۹ تن در هکتار به دست آمد که در این شرایط مقدار بهره‌وری آب به ترتیب برای مزرعه ذرت مورد مطالعه و متوسط شبکه آبیاری دشت قزوین به ترتیب مقادیر ۰/۹۲ و ۰/۴۵ کیلوگرم ماده خشک در مترمکعب آب تعیین گردید.



شکل ۵ - رابطه توده خشک اندام هوایی و دوره کشت گیاه ذرت برای سال ۲۰۱۰.

اندازه‌گیری نموده و بهره‌وری آب کشاورزی را ۲/۵۸ کیلوگرم ماده خشک در مترمکعب آب گزارش نمودند که با صرف نظر از اختلافات اقلیمی موجود، نتایج هر دو تحقیق با نتایج به‌دست آمده در پژوهش حاضر مطابقت نسبی دارد.

نتیجه‌گیری کلی

بهره‌وری آب کشاورزی در این پژوهش به صورت نسبت تولید ماده خشک یا تر به کل آب تحویلی تعریف گردید. تاکنون، روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق ارائه گردیده است که از جمله آنها می‌توان به روش بیلان انرژی اشاره نمود که تبخیر تعرق را به عنوان باقی‌مانده این رابطه تعیین می‌نماید. فنون سنجش از دور از جمله ابزارهای پیشرفته‌ای می‌باشند که برای تعیین مؤلفه‌های این رابطه کاربرد مناسبی دارند. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم SEBAL که بر پایه رابطه بیلان انرژی در سطح زمین استوار است، مقدار تبخیر-تعرق در سطح شبکه آبیاری دشت قزوین برای سال‌های آبی ۲۰۰۱ و ۲۰۱۰ به دست آمد. این محاسبات در محیط GIS و در نرم افزار ILWIS انجام گرفت. همچنین، برای به‌دست آوردن نتایج دقیق

تخمین بهره‌وری آب کشاورزی WP در سطح مزرعه میزان محصول ذرت در مزرعه انتخابی، به‌ترتیب ۱۵ و ۲۶/۴ تن در هکتار ماده خشک شامل کل اندام هوایی خشک و تر، برداشت شد. از آنجا که در طول فصل کشت در واحد سطح ۱۲۳۰۰ مترمکعب آب در هکتار تحویل مزرعه شده بود، میزان بهره‌وری آب برای ماده خشک، ۱/۲۲ کیلوگرم در هکتار و برای ماده تر ۲/۱۵ کیلوگرم در مترمکعب به‌دست آمد. به‌کمک تصاویر ماهواره‌ای مقدار بهره‌وری در مزرعه انتخابی برای ماده خشک و تر ۰/۹۲ و ۱/۶۱ کیلوگرم در مترمکعب تعیین شد که نشان‌دهنده اختلاف تقریبی معادل ۲۵٪ در نتایج بهره‌وری ماهواره‌ای و اندازه‌گیری زمینی در سطح مزرعه است و حاکی از نیاز به واسنجی مقادیر بهره‌وری ماهواره‌ای می‌باشد. طی پژوهشی منتظر و کوثری (۲۰۰۷) میزان بهره‌وری آب را برای محصول ذرت دانه‌ای در ۹ منطقه مطالعاتی در استان‌های اصفهان، خراسان، قزوین، تهران و کرمان، مورد بررسی قرار دادند. این محققان میزان بهره‌وری آب در تولید ذرت دانه‌ای را در مناطق مورد مطالعه ۰/۶ تا ۱/۹۸ کیلوگرم ماده خشک در مترمکعب آب ارائه نمودند. همچنین، روستایی و همکاران (۱۳۹۱) در پاکدشت برای سال ۱۳۸۹ تولید زیست توده ذرت را ۲۲ تن در هکتار

کیلوگرم محصول تولید شده به ازاء مصرف یک مترمکعب آب ناخالص تعیین گردید. با توجه به تخمین بهره‌وری آب به کمک تصاویر ماهواره‌ای مقدار بهره‌وری در مزرعه انتخابی به مساحت ۶۰ هکتار معادل ۰/۹۲ و ۱/۶۱ کیلوگرم در مترمکعب به ترتیب برای ماده خشک و تر و توسط داده‌برداری‌های زمینی در مزرعه انتخابی، ۱/۲۲ و ۲/۱۵ کیلوگرم در مترمکعب به دست آمد که در حدود ۲۵٪ اختلاف دارند.

تبخیر- تعرق، مقایسه‌ای بین تبخیر- تعرق گیاه مرجع به دست آمده از رابطه فائو پنمن-مانتیث و الگوریتم SEBAL برای سال آبی ۲۰۰۱ انجام گرفت و رابطه واسنجی ارائه گردید (معادله ۹) و از این رابطه برای تخمین تبخیر- تعرق واقعی سال آبی ۲۰۱۰ استفاده شد. در ادامه این تحقیق، مقادیر بهره‌وری آب در سطح شبکه محاسبه گردید که در آن مقادیر عملکرد محصول اصلی گیاهان (بلال ذرت) و آب تحویلی مورد استفاده در یک ناحیه به یکدیگر تقسیم و به صورت یک نسبت بر حسب

منابع مورد استفاده

- حصادی ه، ۱۳۸۷. کاربرد سنجش از دور ماهواره‌ای در تخمین تبخیر-تعرق منطقه‌ای در حوزه آبریز کرخه علیا (مطالعه موردی منطقه ماهیدشت کرمانشاه). رساله دکتری تخصصی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- خوشنواز ف، ۱۳۹۰. تخمین بهره‌وری آب کشاورزی در شبکه آبیاری و زهکشی دشت قزوین به کمک تصاویر ماهواره‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.
- روستایی م، سهرابی ت، مساح یوانی ع و احمدی م ص، ۱۳۹۱. بررسی عملکرد و بهره‌وری آب گیاه ذرت در سطوح مختلف ریسک تحت تاثیر تغییر اقلیم در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰. نشریه آب و خاک، جلد ۲۶، شماره ۲، صفحه‌های ۳۶۱ تا ۳۷۱.
- علی اصغر زاده ح و ثنائی نژاد ح، ۱۳۸۵. تخمین تبخیر- تعرق با استفاده از داده‌های سنجش از دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در آبخیز تنگ کنشت کرمانشاه. صفحه‌های ۱ تا ۹. اولین همایش ملی مدیریت آبیاری و زهکشی. ۱۲ الی ۱۴ اردیبهشت. دانشگاه شهید چمران اهواز.
- عماد زاده م، ۱۳۸۶. کاربرد سنجش از دور در تخمین کارایی آب در مقیاس حوضه‌ای: مطالعه موردی در زیرحوضه قره‌سو. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- کاوایی ع، سهرابی ت و دانش کار آراسته پ، ۱۳۹۰. کاربرد الگوریتم سبال در تخمین تبخیر- تعرق و بهره‌وری آب کشاورزی در دشت قزوین و مقایسه نتایج آن با داده‌های لایسیمتر. مجله آبیاری و زهکشی ایران، جلد ۵، شماره ۲، صفحه‌های ۱۷۵ تا ۱۶۵.
- کاوایی ع، سهرابی ت و دانش کار آراسته پ، ۱۳۹۲. تخمین بهره‌وری آب کشاورزی در دشت قزوین با استفاده از تصاویر MODIS، AVHRR و داده‌های لایسیمتر. پژوهش آب ایران، جلد ۷، شماره ۱۳، صفحه‌های ۱ تا ۱۰.
- کریمی ع، فرهادی ب و حصادی ه، ۱۳۹۱. برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر لندست. آبیاری و زهکشی ایران. جلد ۶، شماره ۴، صفحه‌های ۳۶۲ تا ۳۵۳.
- Bastiaanssen WGM, Molden DJ and Makin IW, 2000. Remote sensing for irrigation agriculture: examples for research and possible applications. *Agricultural Water Management* 46: 137-155.
- Christensen S and Goudriaan J, 1993. Deriving light interception and biomass from spectral reflection ratio. *Remote Sensing of Environment* 48: 87-95.
- Courault D, Seguin B and Olioso A, 2005. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: from empirical to numerical modeling approaches. *Irrigation and Drainage Systems* 19: 223-249.
- Daughtry CST, Gallo KP, Goward SN, Prince SD and Kustas WP, 1992. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. *Remote Sensing of Environment* 39:141-152.
- Field CB, Randerson JT and Malmstrom CM, 1995. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 51: 74-88.

- Kaviani A, Sohrabi T and Arasteh PD, 2011. Estimation of productivity of agricultural water in Qazvin Plain using images of AVHRR. *Ecology, Environment and Conservation* 17(1): 11-19.
- Kinoti Mutiga J, Su Zh 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* 12:100-108.
- Kustas, WP and Norman JM, 1996. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal* 41(4): 495-516.
- Li YL, Cui JY, Zhang TH and Zhao HL, 2003. Measurement of evapotranspiration of irrigated spring wheat and maize in a semi-arid region of north china. *Agricultural Water Management* 61: 1-12.
- Li H, Li ZY, Lei C, Li ZL and Shengwei Z, 2008. Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology. *Agricultural Water Management* 95: 1271-1278.
- Michael MG and Bastiaansen WGM, 2002. A new simple method to determine crop coefficient for water allocation planning from satellites: results from Kenya. *Irrigation and Drainage Systems* 14: 237-256.
- Montazar A and Kosari H, 2007. Water productivity analysis of some irrigated crops in Iran. In : Lamaddalena N., Bogliotti C., Todorovic M. and Scardigno A. (eds.). *Water saving in Mediterranean agriculture and future research needs* [Vol. 1]. Bari: CIHEAM, 2007. p. 109 -120.
- Ogawa S, Murakami T, Ishitsuka N and Saito G, 1999. Evapotranspiration estimates from fine-resolution NDVI. National Institute of Agro- Environmental, Japan.
- Samarasingha GB, 2003. Growth and yields of Sri Lanka's major crops interpreted from public domain satellites. *Agricultural Water Management* 57: 145-157.
- Tucker CJ, 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150.