

برآورد تبخیر - تعرق واقعی نیشکر با استفاده از داده‌های سنجش از دور در اراضی کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان

زهرا سهیلی فر¹، سید مجید میرلطیفی^{2*}، عبد علی ناصری³، مصطفی عصارى⁴

تاریخ دریافت: 90/09/12 تاریخ پذیرش: 91/07/04

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

² دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

³ استاد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

⁴ دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* مسئول مکاتبات: Email: Mirlat_m@modares.ac.ir

چکیده

برآورد دقیق تبخیر- تعرق یا آب مورد نیاز گیاهان نقش مهمی در بهبود مدیریت مصرف آب و در نهایت افزایش راندمان آب مصرفی دارد. با توجه به حضور انواع مختلف پوشش‌های گیاهی و آن هم در سطوح وسیع، محاسبه دقیق نیاز آبی از طریق روش‌های متداول محاسبه تبخیر- تعرق (ET)، امری دشوار و غیر ممکن می‌نماید. در همین راستا به روش‌هایی نیاز است که قادر به محاسبه نیاز آبی گیاهان در مقیاس وسیع بوده و نیز از دقت کافی برخوردار باشند. یکی از مشهورترین الگوریتم‌های سنجش از دور جهت برآورد تبخیر- تعرق واقعی، الگوریتم توازن انرژی در اراضی (سبال) می‌باشد. در مدل سبال از طریق برآورد تمامی مولفه‌های انرژی در سطح تبخیر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای از جمله تابش خالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس و با استفاده از معادله توازن انرژی اقدام به محاسبه تبخیر- تعرق می‌شود. این تحقیق به منظور ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی تبخیر- تعرق واقعی روزانه (ET_a) در محدوده کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان واقع در جنوب استان خوزستان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای 10 روزه سنجنده مودیس در یک فصل زراعی (فصل رشد) در سال 85 صورت گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که مدل سبال از کارایی خوبی جهت برآورد تبخیر- تعرق واقعی در فصل زراعی (فصل رشد) برخوردار است. نقشه‌های تولید شده با نرم‌افزار ERDAS و GIS، بیانگر این مطلب هستند که زمین‌های خیس (خوب آبیاری شده) و یا با پوشش گیاهی خوب بالاترین میزان تبخیر- تعرق را دارند. با دور شدن از زمین‌های کشاورزی و نزدیک شدن به سطوح با پوشش‌های گیاهی کم، میزان تبخیر- تعرق بسیار کاهش می‌یابد. این نقشه‌ها با اطلاعات زمینی مطابقت بسیار زیادی را نشان داد. همچنین مقایسه نتایج حاصل از مدل سبال با نتایج حاصل از تبخیر- تعرق گیاه نشان داد که نتایج مدل سبال در فصل رشد از همبستگی نسبتاً خوبی ($R^2=0.77$) با نتایج حاصل از تبخیر- تعرق گیاه برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم سبال، تبخیر- تعرق واقعی، تصاویر مودیس، جنوب خوزستان، سنجش از دور.

Estimating Actual Evapotranspiration of Sugarcane by Remote Sensing. (A Case Study: Mirza Kochakkhan Sugarcane Agro-Industry Company Farms)

Z Soheylifar¹, SM Mirlatifi^{2*}, AA Naseri³ and M Assari⁴

Received: 3 December 2011 Accepted: 25 September 2012

¹MSc. Student, Dept. of Irrigation and Drainage Engin., Faculty of Agric., Tarbiat Modares Univ., Iran.

²Assoc. prof., Dept. of Irrigation and Drainage Engin., Faculty of Agric., Tarbiat Modares Univ., Iran.

³-Prof., Dept. of Irrigation and Drainage Engin., Faculty of Water Sci., Shahid Chamran Univ., Iran.

⁴Ph.D Student, Dept. of Irrigation and Drainage Engin., Faculty of Agric., Tarbiat Modares Univ., Iran.

*Corresponding Author Email: Mirlat_m@modares.ac.ir

Abstract

Precise estimate of evapotranspiration (*ET*) or crop water requirements crucial for improving water resources management and eventually increasing water use efficiency. Considering the vast varieties of crops cultivated on large scales, calculating precisely the crop water requirement from ordinary methods of estimating reference evapotranspiration is difficult and in some cases even impossible. Therefore, it is necessary to develop methods to compute crop water requirement in large areas with sufficient accuracy. One of such methods is to use remote sensing data which covers a much larger areas as compared with methods depending on field weather data. One of the most well known methods to compute actual *ET* from remote sensing data is SEBAL method (Surface Energy Balance Algorithm on Land). In SEBAL method, all fluxes of the energy balance at the earth's surface including net radiation, soil heat flux, and sensible heat flux are calculated from satellite images and finally actual *ET* is computed based on the energy balance at the earth's surface. It is intended to evaluate spatio-temporal variation of daily *ET* in Mirza Kochakkhan sugarcane Agro-Industry farms located in southern part of the Khozestan province using MODIS images for 10-day periods during a growing season in 2006-2007. The results obtained indicated that the SEBAL method was an efficient method to estimate actual *ET* during the growing season. Maps of actual *ET* generated by ERDAS and GIS software showed that fields which were well irrigated or had a good crop cover had the highest values of *ET*. However, actual *ET* decreased for areas with less crop cover or dry fields. The data obtained from the generated maps of actual *ET* were closer to the data obtained from the field with a coefficient of determination of $R^2=0.77$.

Key words: Actual evapotranspiration, Modis Images, Remote Sensing, Sebal algorithm, South of Khozestan.

مقدمه

فرآیندی که به نام تبخیر- تعرق¹ شناخته می‌شود، در مدیریت منابع آب و کشاورزی از اهمیت بسزایی برخوردار است. محاسبه تبخیر - تعرق، بطریق عملی و آزمایشگاهی با دقت بسیار بالا و با استفاده از روش‌های توزین، همبستگی تلاطمی² و یا تکنیک نسبت باون³ امکان پذیر است. اما این روش‌ها تنها می‌توانند میزان تبخیر- تعرق را در یک نقطه و یا یک منطقه کوچک و برای زمان‌هایی مشخص تعیین کنند و برای ناحیه‌هایی وسیع‌تر عملاً قابل استفاده نیست و بایستی از سایر روش‌ها از جمله مدل‌های برآورد تبخیر- تعرق استفاده گردد. این محدودیت‌ها باعث ایجاد انگیزه در استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در تعیین تبخیر- تعرق در سطوح وسیع شده است. به بیانی جامع‌تر، سنجش از دور با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و حداقل استفاده از داده‌های زمینی و الگوریتم‌های متعدد، تخمین نسبتاً دقیقی از میزان تبخیر- تعرق در مناطق بسیار وسیع ارائه می‌دهد (بستیانسن و چندراپالا 2003). یکی از الگوریتم‌هایی که جهت برآورد تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مورد توجه بسیار قرار گرفته الگوریتم سبال⁴ می‌باشد. به منظور صحت‌یابی الگوریتم بیان انرژی در سطح زمین، بستیانسن و همکاران (1998b) از اطلاعات موجود تبخیر- تعرق مزارع در مقیاس بزرگ در کشورهای چین، هند، اسپانیا و پاکستان استفاده نمودند و اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای تبخیر- تعرق را با نتایج حاصل از الگوریتم بیان انرژی در سطح زمین (با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای) مقایسه کردند. نتایج نشان داد که در 85 درصد موارد داده‌های حاصل از الگوریتم بیان انرژی در سطح زمین

با داده‌های مزرعه‌ای بدون هیچ‌گونه واسنجی مطابقت داشته است. تکنیک سنجش از دور در مطالعات منابع آب، بارها توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته است. تعیین تبخیر- تعرق به عنوان پارامتر موثر در برنامه ریزی آبیاری گیاهان با بهره‌گیری تکنیک‌های مذکور نیز در سال‌های اخیر مورد توجه محققان واقع شده و استفاده از آن رو به گسترش است.

ترزا (2003) نیاز آبی گیاهان را در منطقه‌ای از آیداهو⁵ از داده‌های ماهواره لندست⁶ با استفاده از الگوریتم سبال برآورد کرد و دقت این مدل را با داده‌های لایسیمترهای وزنی واقع در موسسه تحقیقات کشاورزی کیمبرلی⁷ آیداهو، مقایسه کرد. نتایج به این صورت بود که همبستگی بین مقادیر بدست آمده از روش سبال با نتایج حاصل از داده‌های لایسیمترهای وزنی اختلافی کمتر از 5 درصد را نشان داد. همچنین تحقیقاتی در زمینه ارزیابی و برآورد نیاز آبی با استفاده از داده‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، با استفاده از توسعه الگوریتم سبال در منطقه پینتینا- پلین ایتالیا صورت گرفته است. در این تحقیق با استفاده از طبقه- بندی تصاویر لندست و مودیس، نقشه‌های توزیع مکانی ET_c (تبخیر- تعرق واقعی گیاه) و ET_o (تبخیر- تعرق گیاه مرجع) به صورت سالانه در نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی⁸ بدست آمد و در نهایت نیاز آبی را برای کل سطح منطقه بدست آوردند (کاسا و همکاران 2008).

تبخیر- تعرق واقعی 10 روزه در سری لانکا از داده‌های ماهواره نوآ و اطلاعات تکمیلی ایستگاه‌های هواشناسی از جمله سرعت باد، درجه حرارت هوا در زمان تصویر برداری و متوسط ساعات آفتابی در سال 1999 و 2000 برآورد گردید (چندراپالا و ویمالاسوریا

¹ Evapotranspiration² Eddy correlation³ Bowen ratio technique⁴ Surface energy balance algorithm for land (SEBAL)⁵ Idaho⁶ Landsat⁷ Kimberly⁸ Geographic information system (GIS)

زمین و شاخص‌های گیاهی تفاضل نرمال شده گیاهی⁴، شاخص تعدیل شده گیاهی برای خاک⁵ و شاخص سطح برگ⁶ را تعیین کردند و به کمک این شاخص‌ها، سطوح زیر کشت و عملکرد بیولوژیکی محصول و سودمندی آب تعیین شد.

مباشری و خاوریان نهزک (1385) با استفاده از تصاویر مودیس و الگوریتم سبال، مقدار تبخیر و تعرق واقعی برای ناحیه مزرعه نمونه ارتش واقع در استان گلستان در دو تاریخ 5 مه 7 ژوئن سال 2003 میلادی مطابق با 15 اردیبهشت و 17 خرداد سال 1382 برآورد کردند. نتایج نشان داد که با استفاده از باندهای 1 تا 5 و 7 تصویر مودیس نسبت به استفاده تنها از باندهای 1 و 2، برآورد دقیق‌تری از آلبیدوی سطحی بدست می‌آید و در الگوریتم سبال بعلت استفاده از پیکسل‌های سرد و گرم برای تعیین مقدار تبخیر- تعرق سایر پیکسل‌ها، محدوده مقادیر حاصله بطور نسبی منطقی بوده هر چند ممکن است با مقادیر حقیقی تفاوت داشته باشند. لذا این الگوریتم جهت مطالعات تفصیلی بعدی به عنوان یک الگوریتم کاملاً موثر توصیه گردید. در این تحقیق، نیاز آبی واقعی گیاه با استفاده از داده‌های سنجنش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، با در نظر گرفتن الگوریتم سبال برآورد گردید و عملکرد آن در مقیاس منطقه‌ای ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

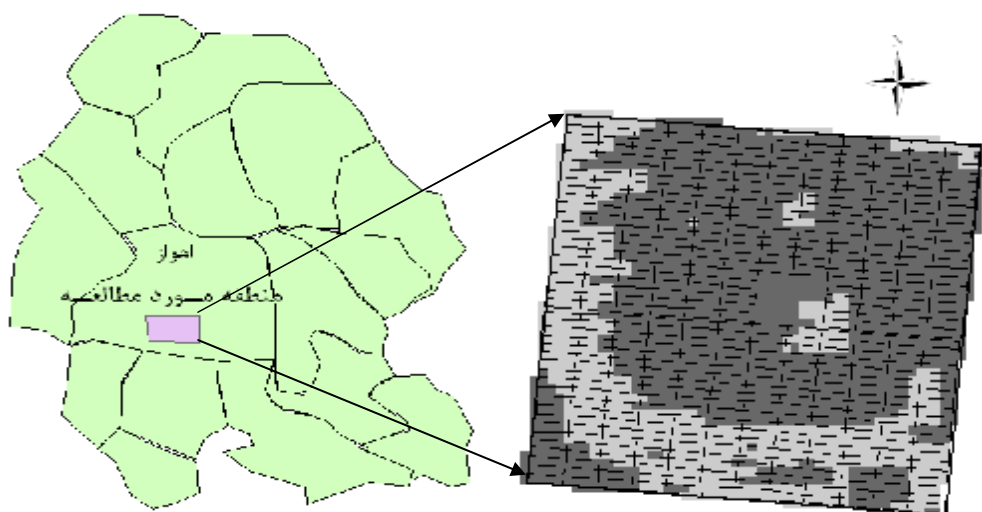
کشت و صنعت میرزا کوچک خان یکی از هفت شرکت توسعه کشت نیشکر و صنایع جانبی در منطقه جنوب استان خوزستان می‌باشد موقعیت جغرافیایی این واحد بدین شرح است: حد شمالی 15° 31°، حد جنوبی 46° 30°، حد شرقی 30° 48° (رودخانه کارون)، حد غربی 12° 48° (جاده اهواز- خرمشهر) می-
⁴ Normalized difference vegetation index
⁵ Soil adjusted vegetation index
⁶ Leaf area index

(2003). محققین مذکور جهت برآورد تبخیر- تعرق واقعی در طی یک دوره 12 ماهه، تصاویر ماهواره‌ای 88 روز را با استفاده از روش بیلان انرژی پردازش و تبخیر- تعرق ده روزه را تعیین کردند. برای تعیین دقت تبخیر- تعرق برآورد شده، این مقادیر با تبخیر- تعرق واقعی برآوردی با کاربرد دستگاه¹ Scintillometer مقایسه گردید. نتایج نشان داد که اختلاف بین مقادیر حاصله از مدل سبال و مقادیر اندازه‌گیری شده در دوره 10 روزه و ماهیانه به ترتیب 17 و 1 درصد می‌باشد.

هرب و همکاران (2008) طی تحقیقی در 3 منطقه مختلف در آمریکا دمای سطح زمین با کاربری- های مختلف را با استفاده از روابط شار گرمایی استخراج نمودند. نتایج نشان داد که تعیین دمای سطح خاک عاری از پوشش گیاهی (لخت) از دقت کمتری نسبت به اراضی دارای پوشش گیاهی برخوردار است. هونگ و همکاران (2009) تبخیر- تعرق روزانه را با استفاده از الگوریتم سبال، برای دو تصویر لندست و مودیس² در نیومکزیکو بدست آوردند، هدف این مطالعه تست پایداری الگوریتم سبال برای سنجنده‌های مختلف ماهواره لندست و مودیس بود. نتایج نشان داد تبخیر- تعرق روزانه حاصل از تصویر لندست دارای انحراف معیار بالاتر و استانداردتر از تصاویر مودیس می‌باشد اما متوسط مقادیر تبخیر- تعرق روزانه برای دو تصویر خیلی مشابه است که تفاوت این دو مقدار در دقت مکانی، هندسی و رادیومتریک این دو تصویر است. اکبری (1383) به منظور مدیریت شبکه‌های آبیاری در حوضه زاینده‌رود، از الگوریتم سبال برای برآورد تبخیرتعرق با استفاده از داده‌های ماهواره لندست و نوا³ استفاده کردند و سپس ضریب بازتابش پوشش سطح
¹ دستگاهی است که برای اندازه‌گیری شار گرمای محسوس از سطح زمین به هوا بکار میرود لذا این دستگاه یک مولفه از معادله بیلان انرژی را اندازه می‌گیرد و با توجه مقادیر سایر مولفه‌ها تبخیر- تعرق واقعی برآورد می‌شود.
² Modis
³ Noaa

هکتاری شبکه‌بندی شده است. شکل شماره 1 موقعیت جغرافیایی محل این کشت و صنعت نشان داده شده است.

باشد. نزدیکترین ایستگاه سینوپتیک به منطقه مورد مطالعه، ایستگاه سینوپتیک اهواز می‌باشد. کل مساحت کشت و صنعت میرزا کوچک خان در حدود 14000 هکتار است که نزدیک به 12000 هکتار آن به مزارع



شکل 1- موقعیت جغرافیایی مزارع شرکت کشت و صنعت میرزا کوچک خان

که در آن جزء تصحیح به زمان منطقه‌ای² بستگی دارد. همچنین برای دستیابی به جزء تصحیح می‌توان طول جغرافیائی مرکز منطقه زمانی را بر 15 تقسیم نمود. برای ایران این طول 52/5 درجه و در نتیجه مقدار تصحیح 3/5 ساعت خواهد بود (مباشری 1385). ایستگاه سینوپتیک اهواز (نزدیکترین ایستگاه به منطقه مورد مطالعه) بعنوان ایستگاه مبنا انتخاب گردید. پارامترهای هواشناسی (به صورت سه ساعته) شامل تابش خورشیدی، رطوبت نسبی، سرعت باد و دما در روزهای گذر ماهواره از اندازه‌گیری‌های ثبت شده توسط این ایستگاه برای روزهای مورد نظر، استخراج گردید. البته فرض شد که تغییرات پارامترهای هواشناسی در دو زمان قبل و بعد از گذر ماهواره به

تصاویر و امکانات مورد استفاده

تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق شامل تصاویر MODIS به صورت سری زمانی 10 روزه در سال 2006-2007 میلادی مصادف با سال زراعی 1385، تهیه گردید. تاریخ و ساعت تصویربرداری ماهواره بکار رفته در این تحقیق در جدول 1 ارائه شده است. زمان تصویربرداری ماهواره برحسب زمان متوسط گرینویچ¹ (GMT) می‌باشد و بایستی به زمان محلی منطقه مورد مطالعه تبدیل شود. جهت پردازش سبال از رابطه زیر استفاده شد (مباشری 1385):

زمان تصویر (به وقت محلی) = زمان تصویر (GMT) + جزء تصحیح.

²Time zone

¹Greenwich mean time

صورت خطی تغییر می‌کند که داده‌های هواشناسی در لحظه گذر ماهواره از میانگین سه ساعت قبل و سه ساعت بعد بدست آمد.

جدول 1- تاریخ (میلادی) و ساعت تصویربرداری (GMT) ماهواره TERRA با سنجنده MODIS

| تاریخ تصویربرداری (به وقت گرینویچ) | ساعت تصویربرداری (به وقت گرینویچ) | تاریخ تصویربرداری (به وقت گرینویچ) | ساعت تصویربرداری (به وقت گرینویچ) | تاریخ تصویربرداری (به وقت گرینویچ) | ساعت تصویربرداری (به وقت گرینویچ) |
|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 2006/3/23 | 8:00 | 2006/8/4 | 7:35 | 2006/11/21 | 7:20 |
| 2006/3/31 | 7:10 | 2006/8/11 | 7:41 | 2006/11/26 | 7:10 |
| 2006/4/14 | 7:25 | 2006/8/20 | 7:25 | 2006/12/19 | 7:20 |
| 2006/4/22 | 7:20 | 2006/9/3 | 7:35 | 2006/12/26 | 7:25 |
| 2006/4/30 | 7:25 | 2006/9/7 | 7:22 | 2007/1/4 | 7:20 |
| 2006/5/14 | 7:35 | 2006/9/19 | 7:47 | 2007/1/15 | 7:00 |
| 2006/5/23 | 7:30 | 2006/9/28 | 7:30 | 2007/1/27 | 7:25 |
| 2006/6/3 | 7:22 | 2006/10/7 | 7:25 | 2007/2/21 | 7:20 |
| 2006/6/21 | 7:00 | 2006/10/18 | 7:05 | 2007/3/4 | 7:00 |
| 2006/7/10 | 7:41 | 2006/11/6 | 7:35 | 2007/3/20 | 7:00 |

بیان انرژی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد (بستیانسن و چندراپالا 2003):

$$R_n = G + H + IET \quad [1]$$

که R_n تابش خالص، G شار گرمای خاک، H شار گرمای محسوس و IET شار گرمای نهان تبخیر است. تمامی واحدها بر حسب W/m^2 است. میزان تابش خالص در سطح زمین و اجزای آن از رابطه زیر تعیین گردید (آلن و همکاران 2002):

$$R_n = (1 - a)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - e_0)R_{L\downarrow} \quad [2]$$

که در آن a آلبیدوی سطحی، $R_{S\downarrow}$ تابش موج کوتاه (0/3 تا 3 میکرومتر) ورودی (W/m^2)، $R_{L\downarrow}$ تابش موج بلند (3 تا 100 میکرومتر) ورودی (W/m^2)، $R_{L\uparrow}$ تابش موج بلند خروجی (W/m^2)، e_0 گسیلمندی سطحی عریض باند می‌باشد. تشعشع خورشید در طول روز سبب گرم شدن خاک می‌شود. در این تحقیق با استفاده

در این تحقیق از نرم‌افزارهای سنجنش از دور ($ERDAS^1$) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شد. نرم افزار ERDAS از نرم افزارهای معروف در زمینه پردازش تصاویر سنجنده‌های ماهواره‌ای می‌باشد که توسط شرکت ESRI طراحی شده است. قابلیت‌های بالای موجود در این نرم افزار، به کاربران اجازه می‌دهد تا داده‌های مختلف در فرمت‌های متفاوت (رستری² و برداری³) را بطور همزمان مورد پردازش و تجزیه و تحلیل قرار دهند. از برتری‌های دیگر این نرم افزار، قابلیت طراحی مدل‌های سنجنش از دور و GIS بصورت توابع گرافیکی و با زبان برنامه نویسی ساده می‌باشد.

الگوریتم بیان انرژی

با صرف نظر کردن از مقدار جزئی انرژی که صرف فتوسنتز و ذخیره گرما در گیاه می‌شود معادله

¹ Earth resources data analysis system

² Raster

³ Vector

گرمای محسوس (H) در هر پیکسل محاسبه شد و در معادله بیلان انرژی برای محاسبه ET لحظه‌ای در هر پیکسل مورد استفاده قرار گرفت. شار گرمای نهان، میزان تلفات گرما از سطح به علت تبخیر- تعرق را نشان می‌دهد که برای هر پیکسل با توجه به رابطه زیر محاسبه گردید:

$$IET = R_n - G - H \quad [5]$$

که IET مقدار لحظه‌ای شار گرمای نهان برای زمان گذر ماهواره می‌باشد (W/m^2). میزان لحظه‌ای ET به صورت عمق تبخیر به صورت زیر محاسبه شد:

$$ET_{inst} = 3600 \times \frac{IET}{I} \quad [6]$$

ET_{inst} تبخیر- تعرق لحظه‌ای (mm/hr)، I گرمای نهان بخار آب یا میزان گرمای جذب شده هنگامی که یک کیلوگرم آب بخار می‌شود (J/kg) و عدد 3600 برای تبدیل زمان ثانیه به ساعت می‌باشد. جهت برآورد تبخیر- تعرق روزانه از تبخیر- تعرق لحظه‌ای، از مفهوم تبخیر- تعرق گیاه مرجع استفاده شد. به این منظور تبخیر- تعرق گیاه مرجع در مقیاس ساعتی در لحظه گذر ماهواره (ET_{r-inst}) و همچنین میزان آن در مقیاس روزانه (ET_{r-24}) برای ایستگاه هواشناسی معرف منطقه محاسبه گردید. سپس نسبت تبخیر- تعرق لحظه‌ای محاسبه شده از مدل سبیل به تبخیر- تعرق گیاه مرجع در مقیاس ساعتی در لحظه گذر ماهواره تعیین شد. حاصلضرب این نسبت در تبخیر- تعرق روزانه گیاه مرجع، میزان تبخیر- تعرق واقعی روزانه (ET_{act-24}) را نشان می‌دهد که از رابطه زیر برآورد گردید:

$$ET_{act-24} = ET_{r-24} \frac{ET_{inst}}{ET_{r-inst}} \quad [7]$$

از معادله تجربی پیشنهادی بستیانسن و همکاران (1998a) به شرح زیر استفاده گردید:

$$G = \frac{T_s R_n}{a} [0.0032a + 0.0062a^2] \times [1 - 0.978NDVI^4] \quad [3]$$

که در آن T_s دمای سطحی ($^{\circ}C$) و a آلبیدوی سطحی و $NDVI$ شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی می‌باشد. شار گرمای محسوس، میزان انتقال گرما به هوا به وسیله همرفت و هدایت مولکولی به علت اختلاف دما می‌باشد که با استفاده از معادله زیر محاسبه گردید (آلن و همکاران 2002):

$$H = \frac{r_{air} \cdot C_p \cdot dT}{r_{ah}} \quad [4]$$

که در آن r_{air} چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا ($J/kg/K^{\circ}$)، dT اختلاف دمای بین دو ارتفاع (K°) و r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی برای انتقال گرما (s/m) می‌باشد. H تابعی از گرادیان دما، زبری سطح و سرعت باد است. در معادله فوق دو مجهول r_{ah} و dT وجود دارد که حل آن را دشوار ساخته است. برای ساده سازی محاسبات، از دو پیکسل سرد و گرم استفاده گردید که ارزیابی محدوده‌ای از تفاوت‌های دمای هوا در نزدیکی سطح را امکان‌پذیر می‌سازد. پس از آن، دمای سطحی با فرض خطی بودن رابطه بین دمای سطحی و شیب انتقال حرارت در راستای قائم در لایه‌های مجاور با لایه‌های مرزی زمین- اتمسفر جهت تفسیر تغییرات عمودی دمای هوا در منطقه به کار می‌رود. برای تصحیح انتقال متلاطم گرما بر اثر نیروی ارضمیدس¹ از تئوری مشابهت مونین- ابوخوف² استفاده گردیده است. در نتیجه برآورد اولیه‌ای از شارگرمای محسوس بدست می‌آید که با وارد شدن در فرایند تکرار، مقدار بهینه شار گرمای محسوس حاصل می‌شود. در پایان، مقادیر اصلاح شده نهایی برای شار

¹ Buoyancy effect

² Monin-Obukhov

انتخاب پیکسل سرد و گرم

در این تحقیق جهت انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم، از دو فاکتور دما و شاخص سطح برگ (LAI) استفاده شد. بدین صورت که پیکسل سرد باید دارای دمای پایین و LAI بالا و پیکسل گرم هم باید دارای دمای بالا و LAI پایین باشد. در تحقیق حاضر بر اساس اطلاعات زمینی می‌توان زمین‌های با پوشش گیاهی کامل و نیز زمین‌های آیش و خشک را بر روی تصاویر ماهواره‌ای مشخص کرد. به علت عدم آگاهی از زمان‌های آبیاری در منطقه، برای مشخص کردن پیکسل سرد از شرط پایین بودن دما استفاده شد. بنابراین پیکسل سرد از بین مزارع نیشکر با پوشش کامل و پیکسل گرم از میان اراضی کشاورزی شخم زده و خشک انتخاب شدند.

نتایج و بحث

تبخیر-تعرق مرجع

در این تحقیق تبخیر-تعرق مرجع ایستگاه هواشناسی اهواز توسط نرم‌افزار Ref-ET بر اساس رابطه فائو-پنمن-مانتیت¹ محاسبه گردید. تبخیر-تعرق گیاه نیز از ضرب تبخیر-تعرق مرجع برآورد شده در ضریب گیاهی به صورت زیر بدست آمد:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad [8]$$

جدول 2 تبخیر-تعرق گیاه در روزهای گذر ماهواره (روز ژولیان) سال 2006-2007 (مصادف با سال 1385 شمسی) را نشان می‌دهد. در تحقیقی که توسط برومند نسب و همکاران (1385) در اراضی کشت و صنعت نیشکر هفت تپه خوزستان انجام دادند نتایج مشابهی از تبخیر-تعرق گیاه بدست آمد. مقدار آلبدوی سطحی، تابش خالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس محاسبه شده

برای پیکسل‌های سرد و گرم در تاریخ 1385/5/20 در جدول 3 نشان داده شده است.

این مقادیر بدست آمده برای پیکسل سرد و گرم در تاریخ 1385/5/20 با تحقیق هونگ و همکاران (2009) مطابقت دارد.

برآورد تبخیر-تعرق لحظه‌ای (ET_{inst})

با به کارگیری رابطه 5 و 6 در نرم‌افزار ERDAS و GIS نقشه تبخیر-تعرق لحظه‌ای (ET_{inst}) تولید شد که نمونه‌ای از آن در شکل 2 در تاریخ 1385/5/20 نشان داده شده است. آنچه که از نقشه نهایی ET_{inst} بر می‌آید آن است که متوسط تبخیر-تعرق لحظه‌ای در منطقه مورد مطالعه در تاریخ مذکور 0/37 میلیمتر بر ساعت برآورد گردید. در جدول 4 متوسط مقادیر تبخیر-تعرق لحظه‌ای (mm/hr) را در سال 85 در مزارع کشت و صنعت نیشکر ارائه شده است.

برآورد تبخیر-تعرق روزانه

جهت برآورد تبخیر-تعرق روزانه از رابطه 7 استفاده شد. در جدول 5 مقادیر تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده از مدل سبال در تاریخ‌های گذر ماهواره ارائه شده است. نقشه تبخیر-تعرق روزانه که در 5 کلاس طبقه‌بندی گردید، توسط نرم‌افزار GIS تولید شد که به عنوان نمونه نقشه تبخیر-تعرق روزانه برای تاریخ 1385/5/20 در شکل 3 ارائه شده است. مقدار متوسط تبخیر-تعرق روزانه استخراج شده در منطقه مورد مطالعه در تاریخ 1385/5/20 مطابق با روز ژولیان 216 سال 2006، مقدار 7/4 میلیمتر را نشان داد.

¹ FAO-Penman-Montith

جدول 2- مقادیر برآورد شده تبخیر- تعرق گیاه (P-M) ETc در تاریخ‌های گذر ماهواره سال 2006 - 2007

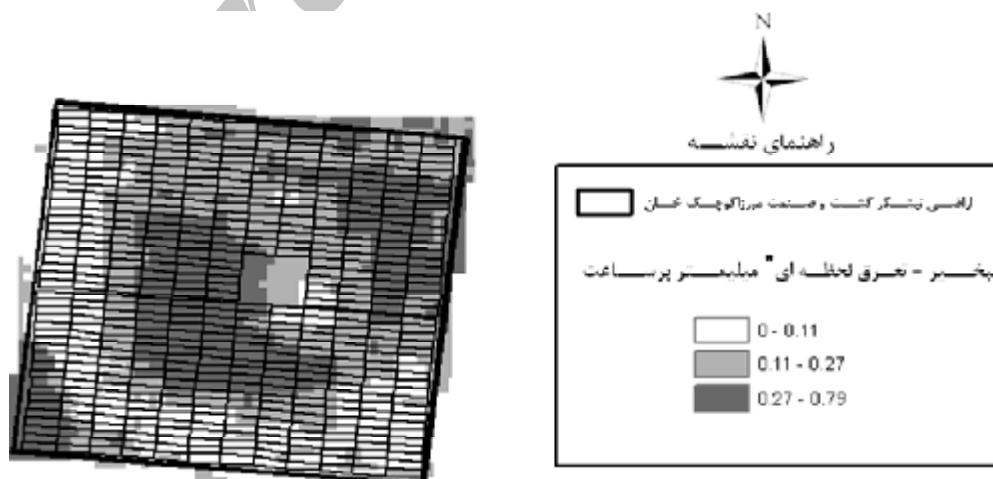
| تاریخ گذر ماهواره | ETc (P-M) (mm/d) | تاریخ گذر ماهواره | ETc (P-M) (mm/d) | تاریخ گذر ماهواره | ETc (P-M) (mm/d) | تاریخ گذر ماهواره | ETc (P-M) (mm/d) |
|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| 1385/11/7 | 1/5 | 1385/7/26 | 5/8 | 1385/4/20 | 8/6 | 1385/1/3 | 5/2 |
| 1385/11/17 | 2/5 | 1385/8/11 | 3/8 | 1385/4/30 | 9/9 | 1385/1/11 | 4/6 |
| 1385/11/23 | 2/6 | 1385/8/15 | 3/0 | 1385/5/13 | 7/7 | 1385/1/25 | 5/8 |
| 1385/12/2 | 2/6 | 1385/8/30 | 4/2 | 1385/5/20 | 8/3 | 1385/2/3 | 6/1 |
| 1385/12/13 | 3/6 | 1385/9/5 | 2/9 | 1385/5/29 | 7/5 | 1385/2/10 | 5/7 |
| 1385/12/29 | 4/3 | 1385/9/13 | 1/9 | 1385/6/12 | 8/7 | 1385/2/24 | 9/2 |
| | | 1385/9/28 | 1/1 | 1385/6/16 | 7/3 | 1385/3/2 | 8/7 |
| | | 1385/10/5 | 1/1 | 1385/6/28 | 6/3 | 1385/3/13 | 7/6 |
| | | 1385/10/14 | 1/2 | 1385/7/6 | 5/2 | 1385/3/23 | 7/3 |
| | | 1385/10/25 | 1/6 | 1385/7/15 | 6/2 | 1385/4/11 | 8/6 |

*شروع سال 2007 میلادی

جدول 3- مقادیر آلبیدو، تابش خالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس محاسبه شده برای

پیکسل‌های سرد و گرم

| تاریخ تصویر | آلبیدو (پیکسل سرد) | آلبیدو (پیکسل گرم) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | 0/298 | 0/429 |
| | تابش خالص (پیکسل سرد) | تابش خالص (پیکسل گرم) |
| | 533/562 | 311/598 |
| 1385/5/20 | شار گرمای خاک (پیکسل سرد) | شار گرمای خاک (پیکسل گرم) |
| | 99/8 | 108/134 |
| | شار گرمای محسوس (پیکسل سرد) | شار گرمای محسوس (پیکسل گرم) |
| | 117/628 | 120/047 |



شکل 2- تبخیر- تعرق لحظه‌ای (mm/hr) مزارع نیشکر واحد میرزا کوچک خان در تاریخ 1385/5/20

جدول 4 - تبخیر - تعرق لحظه‌ای (mm/hr) در تاریخ‌های گذر ماهواره

| $ET_{inst}(mm/hr)$ | تاریخ تصاویر | $ET_{inst}(mm/hr)$ | تاریخ تصاویر | $ET_{inst}(mm/hr)$ | تاریخ تصاویر |
|--------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|
| 0/21 | 1385/8/30 | 0/23 | 1385/5/13 | 0/45 | 1385/1/3 |
| 0/29 | 1385/9/5 | 0/34 | 1385/5/20 | 0/24 | 1385/1/11 |
| 0/28 | 1385/9/28 | 0/15 | 1385/5/29 | 0/30 | 1385/1/25 |
| 0/44 | 1385/10/5 | 0/33 | 1385/6/12 | 0/36 | 1385/2/3 |
| 0/40 | 1385/10/14 | 0/23 | 1385/6/16 | 0/19 | 1385/2/10 |
| 0/45 | 1385/10/25 | 0/34 | 1385/6/28 | 0/19 | 1385/2/24 |
| 0/58 | 1385/11/7 | 0/14 | 1385/7/6 | 0/37 | 1385/3/2 |
| 0/41 | 1385/12/2 | 0/06 | 1385/7/15 | 0/25 | 1385/3/13 |
| 0/37 | 1385/12/13 | 0/17 | 1385/7/26 | 0/20 | 1385/3/31 |
| 0/50 | 1385/12/29 | 0/13 | 1385/8/15 | 0/33 | 1385/4/20 |

شکل 3 - تبخیر-تعرق روزانه (24 ساعته) مزارع نیشکر واحد میرزا کوچک خان در تاریخ 1385/5/20

و اطلاعات زمینی برای نیشکر معمولاً از اوایل فروردین ماه شروع می‌شود و تا مهر ماه ادامه پیدا می‌کند.

مقدار تبخیر-تعرق گیاه در منطقه مورد مطالعه در دهه دوم مرداد ماه برابر 7/5 میلی‌متر بر روز را نشان داد که با مقدار برآورد شده از الگوریتم سبال در تاریخ گذر ماهواره (مطابق با دهه دوم مرداد ماه) همخوانی دارد (جدول 2).

نقشه‌های تولید شده بیانگر این مطلب هستند که زمین‌های خیس (خوب آبیاری شده) بالاترین میزان تبخیر-تعرق را نشان می‌دهند. با دور شدن از زمین‌های کشاورزی و نزدیک شدن به سطوح با پوشش‌های گیاهی کم، میزان تبخیر-تعرق بسیار کاهش می‌یابد. البته تغییر در میزان تبخیر-تعرق می‌تواند به دلیل تغییر در بافت و شوری خاک نیز ایجاد شده باشد. طول دوره رشد با توجه به سری زمانی NDVI محاسبه شده

جدول 5- نتایج تبخیر-تعرق واقعی (میلیمتر بر روز) مدل سببال در روزهای گذر ماهواره سال 2006 - 2007

| زمان (روز ژولیان) | زمان (روز ژولیان) | زمان (روز ژولیان) | زمان (روز ژولیان) | زمان (روز ژولیان) | زمان (روز ژولیان) | زمان (روز ژولیان) | زمان (روز ژولیان) |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 3/29 | 15 | 2/12 | 280 | 4/43 | 182 | 7/60 | 82 |
| 3/97 | 27 | 1/95 | 291 | 4/53 | 191 | 3/20 | 90 |
| 4/32 | 34 | 1/78 | 306 | 4/62 | 202 | 4/85 | 104 |
| 4/66 | 43 | 2/40 | 310 | 7/49 | 216 | 6/1 | 113 |
| 5/68 | 52 | 5/05 | 321 | 3/32 | 223 | 2/85 | 120 |
| 7/25 | 63 | 4/40 | 330 | 7/96 | 232 | 3/03 | 134 |
| | | 3/75 | 338 | 4/12 | 246 | 4/75 | 143 |
| | | 6/19 | 353 | 5/28 | 250 | 4/54 | 154 |
| | | 4/27 | 360 | 2/18 | 262 | 4/14 | 162 |
| | | 6/79 | *4 | 1/5 | 271 | 4/08 | 172 |

*شروع سال 2007 میلادی

جدول 6 - نتایج مقایسه برآوردهای تبخیر - تعرق گیاه (P-M) و مدل سببال (R-S)

| RMSE | Adj R ² | dfe | R ² | SSE |
|------|--------------------|-----|----------------|-----|
| 0/66 | 0/71 | 17 | 0/87 | 7/6 |

در پروژه تحقیقاتی که توسط مباحثی (1385) تحت عنوان "برآورد میزان تبخیر-تعرق روزانه و ماهانه در دشت‌های مرکزی و شمالی خوزستان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست در ماه‌های خرداد، مرداد و دی" صورت گرفت نتایج مشابهی بدست آمد. در تحقیق مذکور بدین صورت نتیجه‌گیری شد که تبخیر-تعرق در روزها و ماه‌های مذکور از همبستگی قابل قبولی برخوردار می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

استخراج میزان تبخیر-تعرق از داده‌های ماهواره-ای راهکاری مناسب برای ارتقاء مدیریت منابع آب است. موارد زیر نتیجه‌گیری کلی از این تحقیق را نشان می‌دهد:

1- در این تحقیق به علت استفاده مناسب از تصاویر مودیس و پیکسل‌های سرد و گرم جهت تعیین مقدار تبخیر-تعرق سایر پیکسل‌ها، محدوده مقادیر حاصل

مقایسه نتایج مدل سببال $ETa(R-S)$ و تبخیر-تعرق گیاه $ETc(P-M)$ در فصل رشد در جدول 6 ارائه شده است. به منظور آنالیز ارتباط میان مقادیر میانگین تبخیر-تعرق گیاه $(ETc-PM)$ به عنوان ثابت و مدل سببال $(ETa-RS)$ به عنوان متغیر در سطح احتمال وقوع 95 درصد از برنامه MATLAB استفاده شد که نتایج نشان داد مقادیر حاصل از مدل سببال پراکنندگی بسیار کمی را داشتند (جدول 6). آنالیزهای آماری انجام شده نیز نشان داد که با توجه به مقادیر کم $RMSE^1$ و SSE^2 و مقدار نسبتاً بالای R^2 ، مدل سببال از دقت خوبی برخوردار می‌باشد. در فصل رشد به دلیل پوشش گیاهی خوب، انتخاب پیکسل سرد و گرم از دقت بالاتری نسبت به دیگر زمان‌ها برخوردار است که دلیل خوبی برای دقت بالای مدل سببال می‌باشد.

¹ Root mean square error

² Sum of square

حدود زیادی قابل استناد است و همچنین با نتایج تروسن و همکاران (2009) مطابقت دارد.

3- با استفاده از نقشه‌های بدست آمده در نرم‌افزارهای ERDAS و GIS می‌توان نواحی مختلف موجود در منطقه را از لحاظ داشتن تبخیر- تعرق بیشتر یا کمتر نسبت به سایر نواحی مشخص کرد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از مسئولین محترم شرکت کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک‌خان جهت در اختیار گذاشتن اطلاعات ارزشمند در مورد منطقه مورد مطالعه و همچنین از مسئولین محترم سازمان فضایی ایران به خاطر در اختیار قرار دادن تصاویر ماهواره‌ای مودیس و سازمان هواشناسی کشور تشکر می‌کنیم.

از سببال در فصل رشد منطقی و از همبستگی بسیار خوبی برخوردار بود.

2- مقایسه مدل سببال و تبخیر - تعرق گیاه محاسبه شده توسط معادله فائو- پنمن- مانیتث نشان داد که نتایج حاصل از مدل سببال برآورد کمتری را نسبت به تبخیر - تعرق گیاه در فصل رشد ارائه می‌دهد. دلیل آن را می‌توان به این صورت بیان کرد که الگوریتم سببال از داده‌های هواشناسی ساعتی (در لحظه گذر ماهواره) جهت برآورد تبخیر - تعرق واقعی استفاده می‌کند در حالیکه جهت محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع از متوسط داده‌های روزانه استفاده می‌شود. از آنجا که تبخیر- تعرق تابعی از دما و سرعت باد است، تأثیر این پارامترها در لحظه گذر ماهواره نقش بسیار مهمی را در برآورد تبخیر- تعرق لحظه‌ای ایفا می‌کند. نتایج بدست آمده از این تحقیق از صحت کافی بر خوردار بوده و تا

منابع مورد استفاده

اکبری م، 1383. بهبود مدیریت آبیاری مزارع با استفاده از تلفیق اطلاعات ماهواره‌ای، مزرعه‌ای و مدل شبیه‌سازی SWAP. رساله دکتری (PhD) علوم و مهندسی آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس. تهران. 193 صفحه.

برومندنسب س، کشکولی ح و خالدیان م، 1385. تعیین نیازآبی و ضرایب گیاهی نیشکر در اراضی کشت و صنعت هفت تپه خوزستان. همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اردیبهشت 1385. دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز. صفحه‌های 1 تا 7.

مباشری م، 1385. برآورد میزان تبخیر- تعرق در دشتهای مرکزی و شمالی خوزستان با استفاده از تصاویر ماهواره- ای لندست ETM+7. گزارش‌های نهائی طرح پژوهشی، سازمان آب و برق خوزستان 1385. صفحه‌های 110 تا 118.

مباشری م و خاوریان نهزک ح، 1385. تجزیه و تحلیل روش‌های استفاده از ماهواره در تعیین میزان تبخیر- تعرق. مجله علوم جغرافیا. دانشگاه تربیت معلم تهران. جلد 3، شماره 3. صفحه‌های 85 تا 95.

Allen RG, Morse A, tasumi M, and Trezza R, 2002. Evapotranspiration from a satellite-based surface energy balance for the Snake Plain Aquifer in Idaho. Pp. 167-178. Proc USCID Conference, July 2002. San Luis Obispo.

Bastiaanssen WGM, and Chandrapala L, 2003. Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. Agric Water Manag 58(2): 171-192.

Bastiaanssen WGM, Menenti M, Feddes R A and Holtslag AAM. (1998a). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL), Part 1: Formulation. J Hydrol 212-213: 198-212.

- Bastiaanssen WGM, Pelgrum H, Wang J, Ma Y, Moreno J, Roerink GJ and van der Wal T, 1998b. The surface energy balance algorithm for land (SEBAL), Part 2: Validation J Hydrol 212-213: 213-229.
- Casa R, Rossi M, Sappa G and Trotta A, 2008. Assessing crop water demand by remote sensing and GIS for the Pontina Plain, Central Italy. Springer Science + Business Media BV 23:1685-1712.
- Chandrapala L, Wimalasuriya M, 2003. Satellite measurement supplemented with meteorological data to operationally estimate actual evaporation of Sri Lanka. J Agric Water Manage 58: 89-107.
- Herb WR, Janke B, Mohseni O and Stefan HG, 2008. Ground surface temperature simulation for different land covers. J of Hydrol 356: 327- 343.
- Hong SH, Hendrickx J and Borchers B, 2009. Up-scaling of SEBAL derived evapotranspiration maps from Landsat (30 m) to MODIS (250 m) scale. J of Hydrol 370: 122-138.
- Trezza R, 2003. Evapotranspiration using a satellite-based surface energy balance with standardized ground control. PhD thesis, Department of Biological and Irrigation Engineering, Utah State Univ., Utah.
- Thoreson B, Clark B, Soppe R, Keller A, Bastiaanssen W and Eckhardt J, 2009. Comparison of evapotranspiration estimates from Remote Sensing (SEBAL), water balance and crop coefficient approaches. Pp. 4346-4360. World Environmental and Water Resources Congress: May 17-21, Kansas City, Missouri.

Archive of SID