

تخمین تبخیر و تعرق واقعی بوسیله مدل آگرو هیدرولوژیکی و تکنیک سنجش از دور

مصطفی یعقوب زاده^{1*} - سعید برومندنسب² - زهرا ایزدپناه³ - حسام سید کابلی⁴

تاریخ دریافت: 1393/12/03

تاریخ پذیرش: 1394/04/01

چکیده

تخمین دقیق تبخیر و تعرق نقش مهمی در بیلان آب در سطح حوضه، دشت و در مقیاس منطقه‌ای برای بهبود و برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب و کشاورزی ایفا می‌کند. روش‌های مختلفی مانند نسبت باون و لایسمتر برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق وجود دارند ولی استفاده از این روش‌ها به دلیل اندازه‌گیری نقطه‌ای تبخیر و تعرق، در سطح یک منطقه وسیع، وقت و هزینه زیادی را بکار می‌گیرد. بدین منظور در این پژوهش برای تعیین تبخیر و تعرق واقعی از دو مدل آگرو هیدرولوژیکی SWAP و مدل سنجش از دور SEBAL با کمک تصاویر مودیس و داده‌های مزارع فاروب و سلیمانی واقع در دشت نیشابور استفاده شده است. برای بدست آوردن پارامترهای بیلان آب مورد نیاز مدل SWAP از شیوه مهندسی معکوس استفاده شده است. با وجود اینکه مدل SWAP مقدار آبیاری و تبخیر و تعرق را با تفکیک زمانی بالا تعیین کند، الگوریتم SEBAL می‌تواند تغییرات محصول مانند شاخص سطح برگ، شاخص NDVI و تبخیر و تعرق را با تفکیک مکانی بالا تخمین بزند. نتایج مدل SWAP با داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک و اسنجی و صحت‌سنجی شده است. مقادیر خطای RMSE برابر 0/635 و 0/674 میلی‌متر بر روز و خطای MAE برابر 0/15 و 0/53 میلی‌متر بر روز و ضریب تبیین (R^2) برابر 0/915 و 0/964 حاصل از مقایسه نتایج الگوریتم SEBAL و مدل SWAP برای دو مزرعه نشان می‌دهد دو مدل تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم SEBAL، تبخیر و تعرق، تصاویر مودیس، مدل SWAP

مقدمه

نتایج رضایت بخشی مبنی بر صحت تعیین مدیریت آبیاری دست یافته‌اند (1). از جمله تکنیک‌های موجود برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای، الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین است که یک مدل با پایه ترمودینامیک بوده و با کاربرد آن در مناطقی که با کمبود داده مواجه هستند می‌توان تبخیر و تعرق (ET) که یکی از اجزای مهم بیلان آب است را تخمین زد. محققان زیادی از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم‌های سنجش از دور مثل SEBAL و SEBS برای تخمین تبخیر و تعرق در مناطق با کمبود داده و مناطق بزرگ و کوهستانی استفاده کردند (5، 10 و 17). همچنین برای ارزیابی الگوریتم سبال، پژوهشگرانی مانند میناکاپیلی و همکاران (11) از الگوریتم‌های سنجش از دور SEBAL و TSEB برای تخمین تبخیر و تعرق واقعی استفاده نموده و برای ارزیابی آن از مدل SWAP صحت‌سنجی شده، استفاده نمودند. دروگرز و همکاران (6) نیز به منظور تعیین نیاز آبیاری، تبخیر و تعرق واقعی را با مدل SWAP و ابزار بهینه‌ساز PEST محاسبه نمودند. آن‌ها برای این منظور از شیوه مهندسی معکوس و شیوه رو به جلو - عقب مانده استفاده نمودند و صحت 90 درصد نیاز آبیاری را نتیجه گرفتند.

تبخیر و تعرق از مهم‌ترین پارامترهای مورد نیاز در برآورد مدیریت آبیاری می‌باشد که اندازه‌گیری آن مشکل و تخمین مقدار آن دارای محدودیت است. پیشرفت روزافزون فناوری سنجش از دور امکان برآورد تبخیر و تعرق واقعی و توزیع زمانی و مکانی آن را در سطح وسیع فراهم نمود و سبب شد که استفاده از مدل‌ها و فن‌آوری‌های ماهواره‌ای جهت بررسی مدیریت آبیاری مورد توجه خاص قرار گیرد. از علل اصلی این توجه می‌توان به دقت مکانی و زمانی قابل قبول در این روش‌ها اشاره کرد. مطالعات زیادی جهت تعیین صحت و سقم نتایج حاصل از کاربرد مدل‌ها و فناوری‌های ماهواره‌ای در تعیین مدیریت آبیاری شبکه‌های آبیاری انجام گردیده است و محققان به

1- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند

(* - نویسنده مسئول: Email: m.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir)

2 و 3- استاد و استادیار دانشکده مهندسی علوم آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

4- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

از مدل SWAP می‌تواند معیار خوبی برای سنجش نتایج حاصل از الگوریتم سنجش از دور سیال باشد تا بدین وسیله پهنه‌بندی مکانی تبخیر و تعرق حاصل از الگوریتم سیال صحت‌سنجی شود.

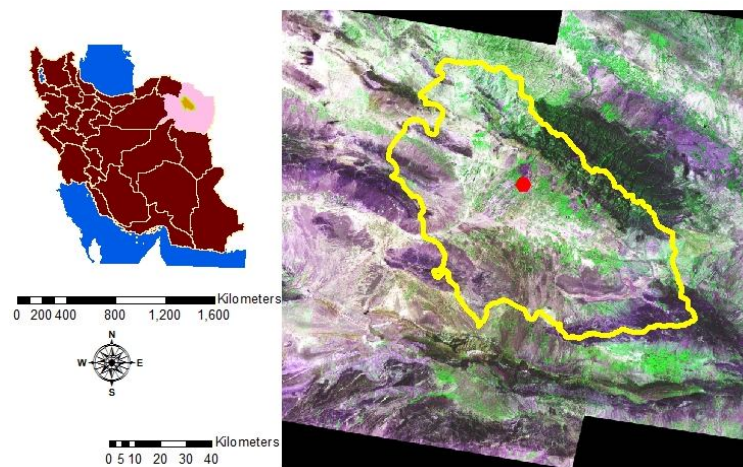
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق دشت نیشابور می‌باشد. این دشت با وسعت 7293 کیلومتر مربع جزئی از حوضه آبریز کویر مرکزی بوده که 4100 کیلومتر مربع آن را دشت (56 درصد) و بقیه را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. از نظر موقعیت جغرافیایی، حوضه مذکور در حد فاصل $13^{\circ} 58'$ تا $30^{\circ} 59'$ طول شرقی و $40^{\circ} 35'$ تا $36^{\circ} 39'$ عرض شمالی قرار دارد. حداکثر و حداقل ارتفاع حوضه بترتیب با 3305 و 1065 متر در قله بینالود و خروجی رودخانه کال شور از حوضه واقع شده است. آب و هوای منطقه نیمه خشک و خشک، متوسط درجه حرارت آن 12 درجه سانتی‌گراد و میزان بارندگی آن بطور متوسط برای کل دشت 292 میلی‌متر گزارش شده است (شکل 1).

با وجود استفاده گسترده از الگوریتم سیال و مدل SWAP در تحقیقات جداگانه برای تعیین رطوبت خاک و تبخیر و تعرق، ولی از مطالعات داخل کشور در زمینه ارزیابی الگوریتم سیال و مدل SWAP با یکدیگر تنها می‌توان به تحقیقات محمدی و همکاران (12) اشاره کرد. آن‌ها میزان مطابقت وضعیت موجود برنامه‌ریزی آبیاری با نیاز آبی گیاه را در منطقه کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان اهواز با استفاده از مدل شبیه‌سازی SWAP مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها به منظور واسنجی و صحت‌یابی مدل SWAP در شرایط محدودیت دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای از تصاویر ماهواره طی فصل رشد نیشکر استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی اجزای بیلان آب توسط مدل واسنجی شده SWAP نشان داد که مقدار آب مصرفی در منطقه بیش از نیاز آبی گیاه بوده و حجم زیادی از آن بصورت نفوذ عمقی از منطقه توسعه ریشه گیاه خارج می‌شود.

در این تحقیق با یک نوآوری در تحقیقات داخل کشور سعی شده است کارایی استفاده از الگوریتم سیال با یک مدل آگرو هیدرولوژیکی به روش مهندسی معکوس مورد ارزیابی قرار گیرد. مدل آگرو هیدرولوژیکی SWAP با داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک، کالیبره و صحت‌سنجی شده است. بنابراین تبخیر و تعرق بدست آمده



شکل 1- موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور و استان خراسان رضوی
Figure 1- Position of case study in country and province of Razavi Khorasan

دشت نیشابور انجام شده است. طول دوره رشد گندم در مزرعه فاروب و سلیمانی به ترتیب 273 و 269 روز می‌باشد. در مزرعه فاروب و سلیمانی، گندم به ترتیب در تاریخ‌های 2008/10/1 (روز ژولیوسی 275) و 2008/10/15 (روز ژولیوسی 289) کاشته شده و در تاریخ 2009/6/30 (روز 181 ژولیوسی) و 2009/7/10 (192 ژولیوسی) برداشت می‌شود. شانزده روز ژولیوسی در طی دوره رشد گندم انتخاب شده است که دارای تصاویر ماهواره‌ای با کمترین درجه ابرناکی و

داده‌ها و نرم‌افزارهای مورد استفاده

در این پژوهش از اطلاعات روزانه منطقه مطالعاتی شامل بارندگی، سرعت باد، تابش خورشیدی، رطوبت، تعداد ساعات آفتابی، میزان ابرناکی، پوشش سطح زمین، خصوصیات خاک، گیاه برای تعیین تبخیر و تعرق پتانسیل، الگوریتم سیال و مدل SWAP استفاده گردید. این تحقیق در دو مزرعه گندم روستاهای فاروب و سلیمانی از

داده رطوبت خاک برای واسنجی و 7 داده رطوبت خاک برای صحت‌سنجی استفاده شده است. در این مطالعه همچنین جهت انجام پردازش‌های تصویری و اجرای مدل سبال از نرم‌افزارهای ERDAS 9.1 و ENVI 4.8، برای تهیه نقشه‌های توزیع مکانی تبخیر و تعرق نرم‌افزار Arc GIS 10.2 و نرم‌افزار Ref-ET برای محاسبه تبخیر و تعرق ساعتی و روزانه مرجع بکار گرفته شده است.

خطاهای تصویر باشند (جدول 1). علت در نظر گرفتن فصل زراعی 2008-2009، اندازه‌گیری میدانی و دقیق رطوبت خاک مورد نیاز مدل SWAP می‌باشد که داده‌های مدل با این داده‌های اندازه‌گیری شده در مزارع واسنجی و صحت‌سنجی شده است. داده‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک از دو مزرعه فاروب و سلیمانی (با توزیع مناسب مزارع در سطح منطقه) قبل و بعد هر نوبت آبیاری در سه تکرار مختلف و از اعماق 10 تا 80 سانتی‌متر گرفته شده است. در هر مزرعه تقریباً از 20

جدول 1- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق
Table 1- Properties of satellite image used in research

شماره تصویر Image number	روز ژولیبوسی Julian day	تاریخ میلادی Gregorian dates	روز از شروع فصل رشد گندم مزرعه فاروب Day of start of wheat growth of Faroub field	روز از شروع فصل رشد گندم مزرعه سلیمانی Day of start of wheat growth of Soleimani field
1	295	21-Oct-2008	21	7
2	308	03-Nov-2008	34	20
3	318	13-Nov-2008	44	30
4	329	24-Nov-2008	55	41
5	334	29-Nov-2008	60	46
6	345	10-Dec-2008	71	57
7	16	16-Jan-2009	108	94
8	45	14-Feb-2009	137	123
9	56	25-Feb-2009	148	134
10	72	13-Mar-2009	164	150
11	83	24-Mar-2009	175	161
12	97	07-Apr-2009	189	175
13	135	15-May-2009	227	213
14	142	22-May-2009	234	220
15	155	04-Jun-2009	247	233
16	170	19-Jun-2009	262	248

تا 3 میکرومتر) بر حسب وات بر متر مربع و ϵ_0 گسیلندگی سطحی عریض باند می‌باشد.

شار گرمای خاک پارامتر دومی می‌باشد که امکان اندازه‌گیری آن بطور مستقیم با باندهای تصاویر ماهواره‌ای وجود ندارد ولی مطالعات بسیاری نشان داد که بین پارامترهایی مثل NDVI، دمای سطح زمین (Ts) و آلبدو با نسبت G/Rn رابطه‌ای وجود دارد. باستانسن نسبت G/Rn را برای نیمه روز با استفاده از معادله تجربی زیر در سال 2000 ارائه کرد که در این تحقیق نیز بکار برده شد:

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

در این رابطه، NDVI شاخص پوشش گیاهی تفاضل نرمال شده، Ts دمای سطحی زمین بر حسب درجه سانتی‌گراد و α آلبدوی سطحی می‌باشد. محاسبه شار گرمای محسوس به عنوان مشکل‌ترین و مهم‌ترین پارامتر در تعیین تبخیر و تعرق شناخته می‌شود. این پارامتر براساس معادله زیر به دست می‌آید:

الگوریتم سبال

الگوریتم سبال اولین بار توسط باستانسن در سال 1989 برای برآورد تبخیر از سفره‌های کم‌عمق آب زیرزمینی استفاده شد. باستانسن در سال 1998 این الگوریتم را توسعه داده و به منظور اعتبارسنجی آن از اندازه‌گیری‌های وسیع میدانی در کشورهای چین، هند، اسپانیا و پاکستان استفاده نمودند (2، 4، 7 و 8). برای اجرای مدل سبال ابتدا نیاز به محاسبه شار تابش خالص می‌باشد. شار تابش در سطح زمین با استفاده از توازن سه شار تابشی شامل تابش طول موج کوتاه ورودی $R_{s\downarrow}$ ، تشعشعات طول موج بلند ورودی از اتمسفر $R_{l\downarrow}$ ، تشعشعات طول موج بلند خروجی از سطح $R_{l\uparrow}$ بدست می‌آید. میزان تابش خالص لحظه‌ای در واحد سطح زمین و اجزای آن با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$R_n = (1 - \alpha) R_{s\downarrow} + R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{l\downarrow} \quad (1)$$

در این معادله، α : آلبدوی سطحی، تابش موج کوتاه ورودی (0/3)

مطابق معادله (6) نسبت تبخیر و تعرق لحظه‌ای محاسبه شده از مدل سبال به تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مقیاس ساعتی در لحظه گذر ماهواره تعیین و حاصلضرب این نسبت در تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع، میزان تبخیر و تعرق واقعی روزانه (ET_{act-24}) می‌باشد.

$$ET_{act-24} = ET_{r-24} \frac{ET_{inst}}{ET_{r-inst}} \quad (6)$$

برای دوره‌های زمانی بزرگ‌تر مانند دوره‌های ده روزه، یک ماهه و فصلی نیز با همین روش می‌توان تبخیر و تعرق واقعی را برآورد نمود. برای محاسبات تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مقیاس زمانی ساعتی و روزانه از گزارش شماره 56 فائو استفاده شده است.

مدل SWAP

مدل SWAP یک عضو از خانواده مدل‌هایی است که توسط دانشگاه‌های وگنینگن و آلترا توسعه یافته است. این مدل دارای اقتباس زیادی از مدل‌های آگروهیدرولوژیکی خاک (SWATRE) و (SWACROP)، مدل انتقال شوری (SWASALT) و مدل انقباض و تورم خاک‌های رسی (FLOCR) است (16). SWAP یک مدل آگروهیدرولوژیکی بسیار جامع برای انتقال آب، گرما و املاح در محیط اشباع و غیراشباع است و شامل زیرمدل‌های فیزیکی برای شبیه‌سازی عملیات آبیاری و رشد گیاه و بیلان آبی می‌باشد. بررسی حرکت آب براساس معادله ریچاردز صورت می‌گیرد که از روش عددی تفاضل محدود و اعمال شرایط مرزی و استفاده از توابع هیدرولیکی خاک استفاده می‌گردد. توابع هیدرولیکی خاک به عنوان روابط بین هدایت هیدرولیکی K ، رطوبت خاک و بار فشاری آب خاک تعریف می‌شوند. در این تحقیق مدل SWAP از مهندسی معکوس برای تعیین تبخیر و تعرق واقعی استفاده می‌کند. بدین طریق که ابتدا رطوبت خاک با مدل SWAP شبیه‌سازی و با داده‌های اندازه‌گیری، کالیبره و صحت‌سنجی شد. سپس از تبخیر و تعرق واقعی به عنوان یکی از خروجی‌های مدل SWAP برای ارزیابی الگوریتم سبال استفاده شد. معادله ریچاردز جریان یک بعدی را در محیط غیراشباع (در حالت کلی) بیان می‌کند.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) - S(h) \right] \quad (7)$$

در این معادله θ : رطوبت حجمی خاک (cm^3/cm^3)، t : زمان (hr)، z : افزایش عمق نسبت به سطح زمین (cm)، $K(\theta)$: هدایت هیدرولیکی (cm/h) و h : بار هیدرولیکی (cm) می‌باشد. در SWAP توابع تحلیلی ارائه شده توسط ون - گنوختن و معلم برای تعریف توابع هیدرولیکی خاک با روابط زیر استفاده می‌شوند.

$$\theta = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (8)$$

$$H = \frac{\rho_{air} \times C_{air} \times dT}{r_{ah}} \quad (3)$$

در این معادله ρ_{air} چگالی هوا (کیلوگرم بر متر مکعب)، C_{air} گرمای ویژه هوا (ژول بر کیلوگرم بر کلوین)، dT اختلاف دمای بین دو ارتفاع Z_1 و Z_2 (کلوین) و r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی برای انتقال گرما (ثانیه بر متر) می‌باشد. برای برآورد شار گرمای محسوس ابتدا باید دو پیکسل آستانه انتخاب شود. پیکسل سرد که به یکی از این دو پیکسل گفته می‌شود منطقه‌ای با پوشش گیاهی خوب و آبیاری شده را شامل می‌شود که دمای سطح زمین در این پیکسل نزدیک به دمای هوا باشد. این پیکسل تبخیر و تعرقی معادل تبخیر و تعرق پتانسیل دارد. پیکسل دوم که پیکسل گرم نام دارد، منطقه‌ای را شامل می‌شود که زمین کشاورزی بدون پوشش گیاهی و خشک با دمای سطح زمین زیاد داشته باشد. در این تحقیق از شاخص NDVI و دمای سطحی زمین T_s و آلبدو برای تعیین پیکسل سرد و گرم طبق نظر باستیانسن و همکاران (3) و مورسه و همکاران (13) استفاده شد. پس از تعیین پیکسل سرد و گرم در سبال باید اختلاف دمای هوای نزدیک سطح (dT) در هر پیکسل محاسبه و با ایجاد رابطه خطی بین پیکسل سرد و گرم می‌توان مقدار dT را برای سایر پیکسل‌های موجود در منطقه بدست آورد و با یک فرآیند تکراری مقدار شار گرمای محسوس را براساس شرایط جوی تصحیح نمود.

مقدار لحظه‌ای تبخیر و تعرق برای زمان گذر ماهواره به کمک شار گرمای محسوس، شار گرمای نهان، میزان تلفات گرما از سطح به علت تبخیر و تعرق برای هر پیکسل با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (4)$$

که λET مقدار لحظه‌ای برای زمان گذر ماهواره می‌باشد (W/m^2) و میزان لحظه‌ای ET به صورت عمق تبخیر به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$ET_{inst} = 3600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (5)$$

ET_{inst} تبخیر و تعرق لحظه‌ای (mm/hr)، λ 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. تبخیر و تعرق لحظه‌ای کاربرد کمی در معادلات و مدل‌های گیاهی دارد. بنابراین به ناچار باید این پارامتر از لحظه‌ای به روزانه تبدیل شود.

جهت برآورد تبخیر و تعرق روزانه از تبخیر و تعرق لحظه‌ای، می‌توان از مفهوم تبخیر و تعرق گیاه مرجع استفاده نمود. به این منظور تبخیر و 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 می‌گردد. سپس

نژاد و همکاران (1390) نیز در تحقیقات خود به رفتار مخالف دمای سطحی زمین و شاخص NDVI نسبت به یکدیگر پی بردند. (14). همچنین از شکل (2) مشخص است در مناطقی از دشت نیشابور که پارامترهای دمای سطحی زمین، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس در آن مناطق بیشترین مقدار را دارند، تشعشع خالص از کمترین مقدار برخوردار می‌باشد. همچنین با توجه به جدول (2) که در آن پارامترهای مدل سبال نشان داده شده است، مشخص است در هر روز ژولیوسی نسبت به روز دیگر که دمای سطحی زمین افزایش پیدا کرده است شاخص پوشش گیاهی عدد با مقدار کمتری را نشان می‌دهد. همچنین نتایج مدل سبال نشان می‌دهد که در روزهای اول کشت که در فصل پاییز و زمستان واقع است، دمای سطح زمین (Ts) پایین و درحد 290 درجه کلوین است و در روزهای آخر کشت به مقدار بالای 310 درجه می‌رسد. شاخص پوشش گیاهی NDVI و شار گرمای خاک (G) تابش خالص (Rn) و شار گرمای محسوس (H) نیز از روز اول کشت بتدریج کم می‌شود و در فصل زمستان به کمترین مقدار خود می‌رسند و در روزهای آخر کشت بتدریج زیاد می‌شود با این تفاوت که شاخص NDVI در روزهای آخر کشت به دلیل نزدیک شدن به زمان برداشت و زرد شدن گندم، مقدار آن کم می‌شود و از حدود 0/331 در اوج مرحله توسعه گیاهی به حدود 0/167 می‌رسد. مقادیر شار گرمای خاک (G) و ضریب آلبیدو (α) در روزهای آخر کشت با گرم شدن سطح خاک افزایش می‌یابد.

در این رابطه، $\theta_{sat} =$ رطوبت حجمی اشباع (cm^3/cm^3) ، $\theta_{res} =$ رطوبت حجمی باقی‌مانده (cm^3/cm^3) ، $\alpha =$ عکس مکش ورود هوا $(1/cm)$ و m و $n =$ فاکتورهای تجربی می‌باشند. با داشتن مقدار رطوبت در هر مکش می‌توان هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک را با استفاده از رابطه معلم بدست آورد.

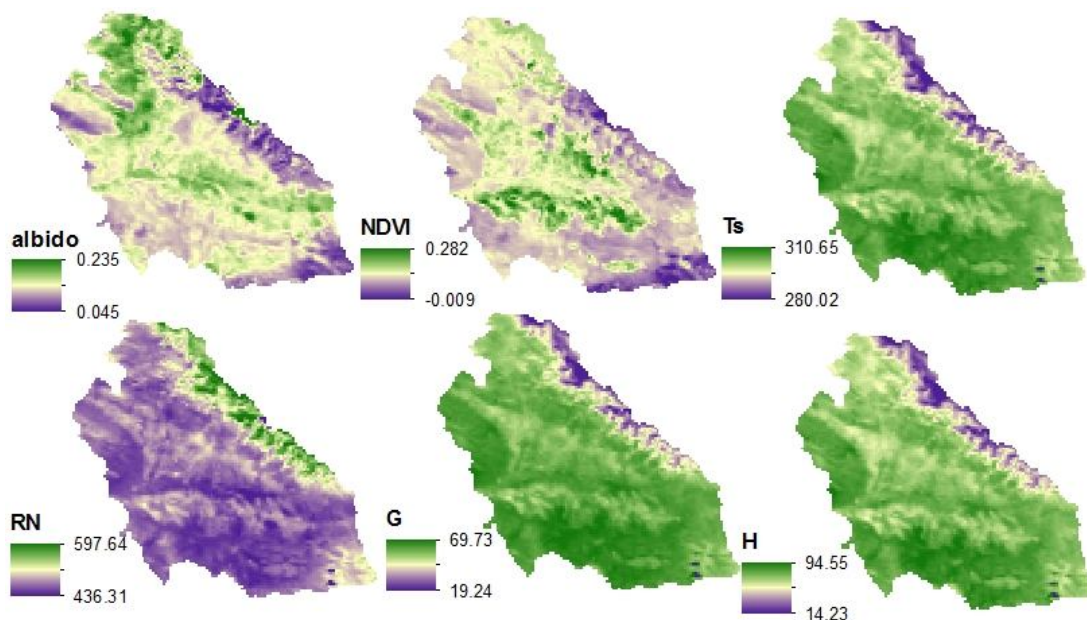
$$k(\theta) = k_{sat} S_e^\lambda \left[1 - (1 - S_e^{n/n-1}) \right]^2 \quad (9)$$

$$S_e = \frac{(\theta - \theta_{res})}{(\theta_{sat} - \theta_{res})} \quad (10)$$

در روابط بالا $K_{sat} =$ هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (cm/d) ، $\lambda =$ فاکتور وابسته تغییرات هدایت هیدرولیکی به تغییرات مکش و $S_e =$ نسبت اشباع می‌باشد.

نتایج و بحث

تبخیر و تعرق بر اساس یک فرآیند طولانی و پیچیده به کمک الگوریتم سبال و تصاویر سنجنده مودیس، برای شانزده روز دارای تصویر ماهواره‌ای با درجه ابرناکی کم بدست می‌آید. در شکل (2) نقشه توزیع مکانی بعضی از پارامترهای الگوریتم سبال برای روز 329 ژولیوسی (4 آذر) نشان داده شده است. این شکل مشخص می‌کند بعضی از پارامترهای الگوریتم سبال مانند دمای سطحی زمین و شاخص NDVI رفتار مخالف با یکدیگر از خود نشان می‌دهند. تنای



شکل 2- نقشه توزیع مکانی پارامترهای الگوریتم سبال برای روز 329 ژولیوسی (4 آذر)

Figure 2- Map of spatial distribution from SEBAL algorithm parameters for 329 July day (24 November)

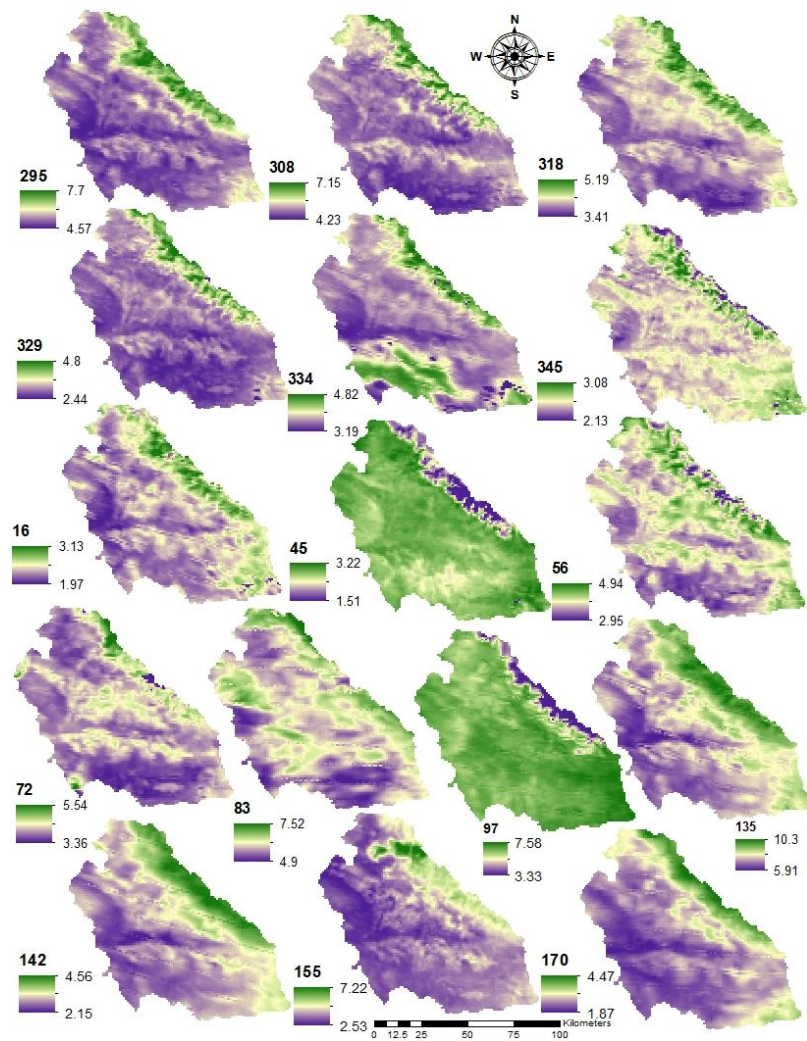
جدول 2- نتایج به دست آمده از مدل SEBAL در مزارع گندم
Table 2- Results obtained of SEBAL model in the wheat fields

روز ژولیوسه ی (Julian Day)	ET (mm/day)		G (w/m ²)		H (w/m ²)		NDVI		Rn (w/m ²)		Ts (°K)	
	سلیمانی Soleima ni	فاروب Farou b	سلیمانی Soleima ni	فاروب Farou b	سلیمانی Soleima ni	فاروب Farou b	سلیمانی Soleima ni	فاروب Farou b	سلیمانی Soleima ni	فاروب Farou b	سلیمانی Soleima ni	فاروب Farou b
295	1.31	1.29	111.5	117.6	46.83	50.43	0.215	0.126	743.4	736.1	304.6	307.1
308	1.46	1.35	65.7	72.5	54.55	63.42	0.17	0.135	556.8	537.3	297.9	301.6
318	0.78	0.81	33.8	34.8	42.66	44.06	0.197	0.107	538.3	543.2	286.6	287.1
329	1.04	0.97	50.7	54.0	53.59	58.93	0.21	0.135	504.0	498.0	298.0	297.1
334	1.29	1.29	47.25	49.75	26.8	29.25	0.179	0.079	499.0	495.3	293.5	295.1
345	1.17	1.18	29.17	31.15	28.54	29.71	0.212	0.152	507.5	507.6	286.4	287.1
16	1.07	1.05	26.27	27.61	38.09	39.72	0.18	0.149	507.2	510.1	284.4	285.2
45	1.97	1.98	37.8	37.52	52.65	52.52	0.247	0.234	599.7	606.5	287.0	286.9
56	2.50	2.47	53.32	55.01	44.93	45.94	0.212	0.176	589.2	59.01	291.3	292.1
72	4.62	4.67	84.23	88.26	50.88	53.48	0.198	0.184	626.5	617.5	299.4	301.1
83	4.84	4.43	60.62	80.67	51.83	70.24	0.258	0.268	688.7	667.4	298.7	296.5
97	2.98	2.97	63.62	68.77	52.98	56.48	0.324	0.255	697.1	711.3	290.5	292.2
135	6.90	7.14	143.0	140.8	81.2	79.97	0.374	0.324	760.8	767.6	310.7	309.5
142	2.97	3.33	79.7	76.46	22.87	20.25	0.292	0.331	386.1	415.3	313.8	310.0
155	3.99	4.81	107.6	92.23	76.85	71.32	0.226	0.167	544.0	577.6	311.5	303.5
170	2.47	2.57	95.82	95.43	44.49	41.99	0.201	0.191	397.7	406.6	316.8	316.1

تغرق، تصاویر روزهای 45 و 97 از بقیه روزها حذف نشد. نقشه تبخیر و تعرق فصلی دشت نیشابور در شکل (4) نشان می‌دهد که حداکثر و حداقل تبخیر و تعرق دشت نیشابور در فصل بهار بین 506/286 و 294/647 میلی‌متر و در فصل زمستان بین 303/22 و 196/12 میلی‌متر تغییر می‌کند. این مقادیر علاوه بر بیشتر بودن تبخیر و تعرق در بهار نسبت به زمستان نشان می‌دهد که تغییرات حداقل و حداکثر تبخیر و تعرق نیز در فصل زمستان از بهار کمتر است. تغییرات سری زمانی اجزای اصلی سیال که بر روی تبخیر و تعرق موثرند، نشان می‌دهد که حداقل شاخص NDVI در فصول سرد پاییز و زمستان ممکن است به کمتر از صفر برسد که نبود پوشش گیاهی در این فصول دلیلی بر پایین بودن شاخص NDVI می‌باشد. روند تغییرات ماکزیمم (max) و مینیمم (min) دمای سطحی زمین نیز در منطقه تقریباً متناسب با افزایش و کاهش دمای هوا در طی دوره رشد گندم می‌باشد (شکل 5).

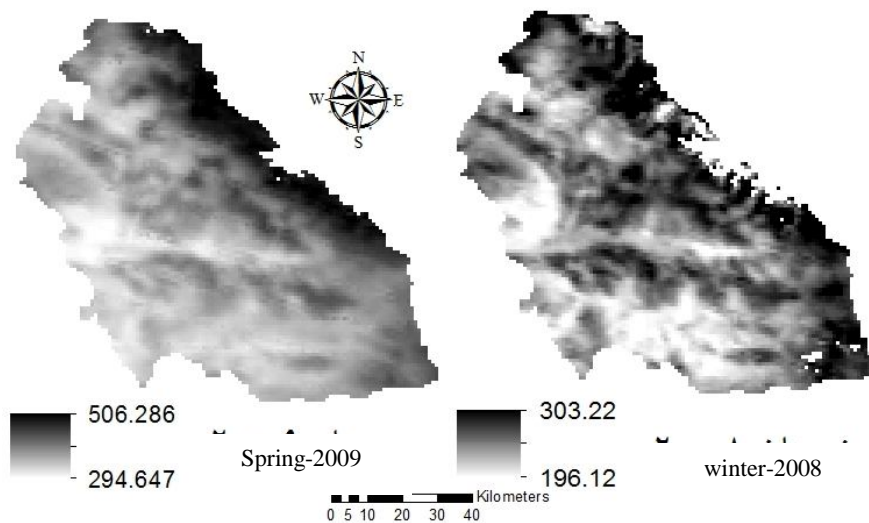
نمودار پراکنندگی اعداد بدست آمده از دو مدل SEBAL و SWAP در شکل (4) نشان داده شده است. ضریب تبیین (R^2) حدود 0/915 برای مزرعه فاروب و 0/964 برای مزرعه سلیمانی حاکی از نزدیک بودن نتایج دو مدل دارد. مقادیر خطای RMSE 0/635 و 0/674 میلی‌متر بر روز و خطای MAE 0/15 و 0/53 میلی‌متر بر روز حاصل از ارزیابی الگوریتم سیال با مدل SWAP برای مزارع فاروب و سلیمانی نشان می‌دهد دو مدل همبستگی زیادی نسبت به همدیگر دارند.

مدل SWAP تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل برای کل فصل کشت گندم در مزرعه فاروب را به ترتیب 669/5 و 1259/6 میلی‌متر و در مزرعه سلیمانی 583/7 و 1331/2 میلی‌متر برآورد نموده است. توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی با الگوریتم سیال در شکل (3) رسم شده است. تبخیر و تعرق برای روزهای اول کشت پایین و در حدود 1 میلی‌متر در روز و در روزهای اوج رشد گیاهی گندم به حدود 9 میلی‌متر می‌رسد و این در حالی است که در روزهای آخر کشت مقدار آن دوباره کاهش و حدود 3 میلی‌متر در روز می‌رسد. همچنین همانطور که در این شکل مشخص است قسمت‌هایی که دارای پوشش گیاهی بیشتر می‌باشند از تبخیر و تعرق بیشتر از نواحی دیگر برخوردارند که این امر با مقایسه شاخص NDVI از شکل (2) و تبخیر و تعرق از شکل (3) کاملاً مشهود است. البته بیشترین تبخیر و تعرق در مناطق کوهستانی مشخص می‌شود که این به دلیل پوشش دامنه‌ای خوب در اطراف مناطق کوهستانی و دمای سطح زمین پایین این نواحی است که سبب افزایش تبخیر و تعرق واقعی شده است. کمترین مقدار تبخیر و تعرق بیشتر در قسمت جنوب دشت نیشابور دیده می‌شود که دارای کاربری مرتع با پوشش گیاهی کم می‌باشد. البته در این میان روزهای 45 و 97 ژولیوسی رفتار مخالف با سایر نقشه‌های توزیع مکانی نشان می‌دهند که وجود ابر در این تصاویر و اشتباه احتمالی در تعیین پیکسل سرد و گرم می‌تواند از عوامل بروز خطا در نقشه‌های توزیع مکانی مربوط به این روزها باشد. به علت مشخص شدن تاثیر تعیین اشتباه پیکسل سرد و گرم بر تبخیر و



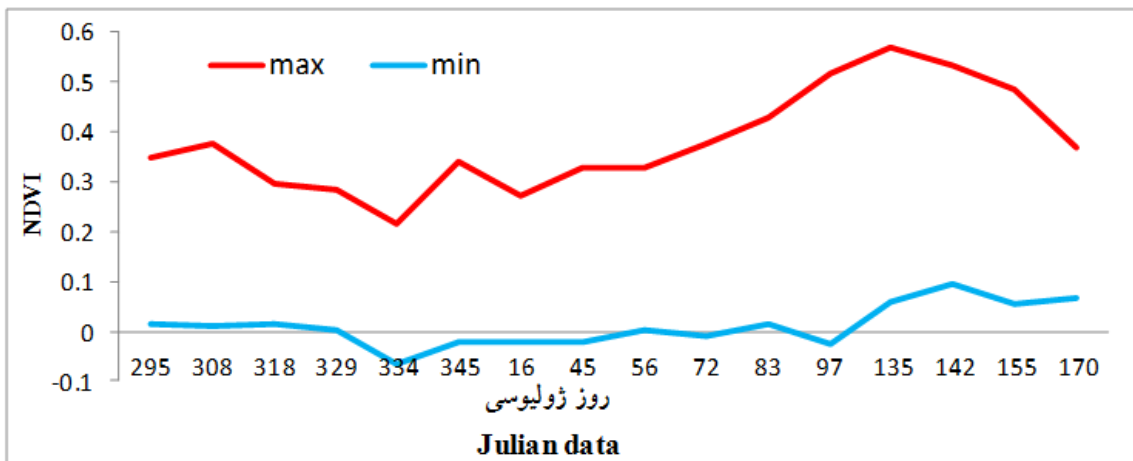
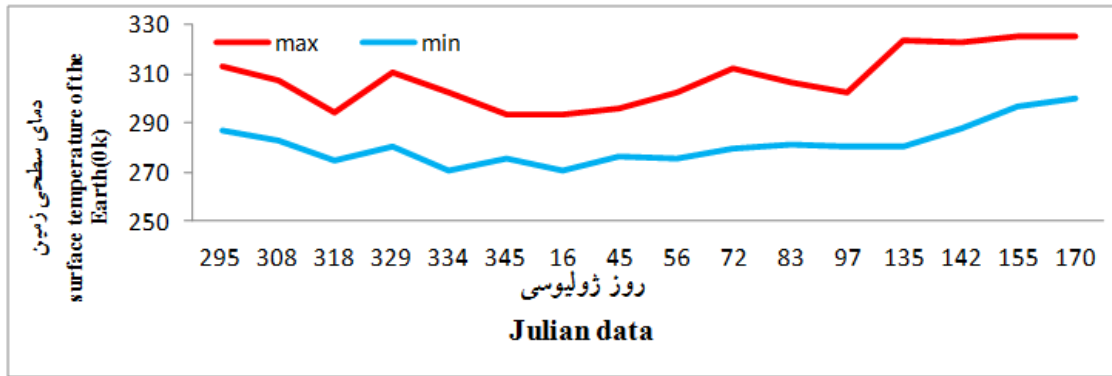
شکل 3- نقشه توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی در طی دوره رشد گندم

Figure 3- The map of spatial distribution for actual evapotranspiration in the during wheat growing season



شکل 4- نقشه تبخیر و تعرق فصلی دشت نیشابور در سال زراعی 2008-2009

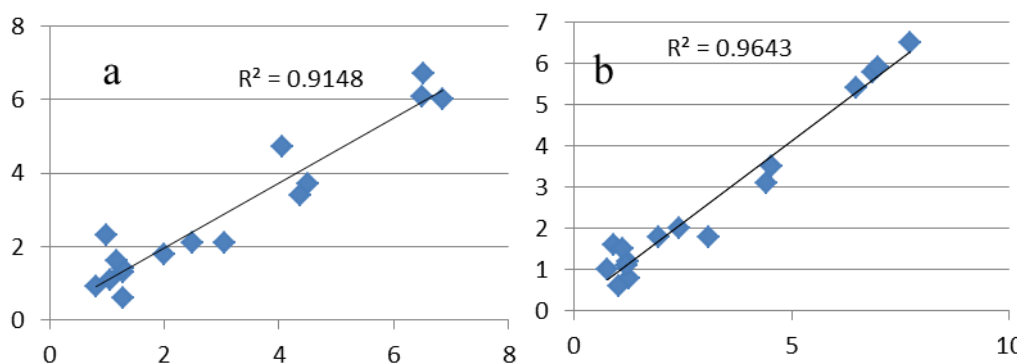
Figure 4- Map of seasonal evapotranspiration of Neyshabour plain in farming year 2008-2009



شکل 5- تغییرات اجزا اصلی الگوریتم سبال (دمای سطحی زمین و شاخص NDVI) دشت نیشابور در طی دوره رشد گندم
 Figure 5- Changes of main components of SEBAL algorithm (land surface temperature and NDVI index) Plain Nishabour during wheat growth

سبال می‌تواند ابزار و الگوریتم مفیدی در جهت تعیین تبخیر و تعرق و نیاز آبی گیاهان باشد.

همچنین وجود این مقادیر خطای پایین با ضریب تبیین بالا بین نتایج سبال و SWAP مشخص می‌سازد که مدل سنجش از دور



شکل 6- مقایسه تبخیر و تعرق بدست آمده از مدل SWAP (محور افقی) و مدل SEBAL (محور عمودی) در مزرعه فاروب (a) و سلیمانی (b)
 Figure 6- Comparison of evapotranspiration obtained from SWAP (Horizontal axis) and SEBAL models (Vertical axis) in Faroub and Soleimani fields

هیدرولوژیکی SWAP به روش مهندسی معکوس استفاده شد. در مدل آگرو هیدرولوژیکی به دلیل اینکه بیلان آب را در نظر می‌گیرد،

نتیجه گیری

در این پژوهش برای ارزیابی الگوریتم سبال از مدل آگرو

در سه نقطه مختلف از منطقه به ترتیب مقادیر RMSE، 1/58، 1/43 و 1/31 میلی‌متر بر روز بدست آوردند.

از نتایج این پژوهش می‌توان دریافت که با استفاده از الگوریتم سبال می‌توان تبخیر و تعرق واقعی و نیاز آبی گیاهان در شرایط مختلف و بخصوص در اراضی وسیع را محاسبه نمود و نقشه توزیع مکانی آن را رسم نمود. با وجود اینکه مدل‌های هیدرولوژیکی و روش‌های محاسباتی تنها امکان محاسبه تبخیر و تعرق بصورت ایستگاهی و نقطه‌ای را فراهم می‌نماید، وجود نقشه با تغییرات مکانی می‌تواند گام مفیدی در توانایی مدیریت مکانی آب و صرفه‌جویی و تخصیص بهینه منابع آب به هر نقطه از یک منطقه یا دشت باشد.

تبخیر و تعرق بدست آمده نزدیک به مقدار واقعی خواهد بود و می‌تواند معیار خوبی برای ارزیابی الگوریتم سبال باشد. نتایج حاصل از مقایسه تبخیر و تعرق واقعی بدست آمده از الگوریتم سبال با تبخیر و تعرق مدل SWAP که با استفاده از داده‌های رطوبت اندازه‌گیری شده واسنجی و صحت‌سنجی شده است، نشان داده است که دو مدل تفاوت معنی‌داری با هم ندارند. این ارزیابی با مقایسه نقاط موجود در دشت بصورت نقطه به نقطه انجام شد و با مقادیر خطای RMSE و MAE پایین و ضریب تبیین بالا بین مقادیر تبخیر و تعرق بدست آمده از مدل‌های SEBAL و SWAP بدست آمده است. سینگ و همکاران (15) نیز از مقایسه الگوریتم سنجش از دور و مدل SWAP

منابع

- 1- Akbari M., and Dehghani-Sanij Heydari N. 2008. Estimation of irrigated area, evapotranspiration and irrigation management using Remote sensing. Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 2(1): 43-52. (in Persian with English abstract)
- 2- Bastiaanssen W.G.M., Menenti M., Feddes R.A., and Holtslag A.A.M. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL), part 1: formulation. Journal of Hydrology, 212-213: 198-212.
- 3- Bastiaanssen W.G.M., Noordman E.J.M., Pelgrum H., Davids G., and Allen R.G. 2005. SEBAL for spatially distributed ET under actual management and growing conditions. Journal of Irrigation. Drainage Engineering, 131(1): 85-93.
- 4- Chemin Y., Platonov A., UI-Hassan M., and Abdullaev I. 2004. Using remote sensing data for water depletion assessment at administrative and irrigation-system levels: Case study of the Ferghana province of Uzbekistan. Agricultural Water Management. 64(3): 183-196.
- 5- Dinesh K.G., Purushothaman B.M., Vinaya M.S., and Suresh Babu S. 2014. Estimation of Evapotranspiration using MODIS Sensor Data in Udupi District of Karnataka, India. International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS, 3(1): 532-543.
- 6- Droogers P., Immerzeel W.W., and Lorite I.J. 2010. Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations. Agricultural Water Management, 97: 1351-1359.
- 7- Gao Y., Long D., and Li Z. 2008. Estimation of daily actual evapotranspiration from remotely sensed data under complex terrain over the upper Chao river basin in North China. International Journal of Remote Sensing. 29(11): 3295-3315.
- 8- Kimura R., Baib L., Fanc J., Takayama N., and Hinokidanid O. 2007. Evapo-transpiration estimation over the river basin of the Loess Plateau of China based on remote sensing. Journal of Arid Environmental, 68(1): 53-65.
- 9- Kiptala J.K., Mohamed Y., Mul M.L., and Van der Zaag P. 2013. Mapping evapotranspiration trends using MODIS and SEBAL model in a data scarce and heterogeneous landscape in Eastern Africa. Water Resources Research, 49: 12. 8495-8510.
- 10- Matin M.A., and Bourque C.P. 2013. Assessing spatiotemporal variation in actual evapotranspiration for semi-arid watersheds in northwest China: Evaluation of two complementary-based methods. Journal of Hydrology, 486: 455-465.
- 11- Minacapilli M., Agnese C., Blanda F., Cammalleri C., Ciraolo G., D'Urso G., Iovino M., Pumo D., Provenzano G., and Rallo G. 2009. Estimation of actual evapotranspiration of Mediterranean perennial crops by means of remote-sensing based surface energy balance Models. Hydrology and Earth System Sciences, 13: 1061-1074.
- 12- Mohamadi S., Mirlatifi S.M., and Akbari M. 2014. Sugarcane irrigation scheduling using a combination of remote sensing data and SWAP model in the sugarcane agro-industry Mirza Kochak Khan of Khuzestan. Journal of Water Research in Agriculture, 28(1): 39-50. (in Persian)
- 13- Morse A., Tasumi M., Allen R.G., and Kramber W.J. 2000. 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. Final Rep., Phase I, Submitted to The Raytheon Systems Company, Earth Observation System Data and Information System Project, by Idaho Department of Water Resources and University of Idaho.
- 14- Sanaei Nejad 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. (in Persian with English abstract)
- 15- Singh U.K., Ren L., and Kang S. 2010. Simulation of soil water in space and time using an agro hydrological model and remote sensing techniques. Agricultural Water Management, 97(8): 1210-1220.

- 16- Van Dam J.C., Huygen J., Wesseling J.G., Feddes R.A., Kabat P., Van Wastlum P.E.V., Groenendijk P., and Van Diepen C.A. 1997. Theory of SWAP version 2.0: Simulation of water flow and plant growth in the soil–water–atmosphere–plant environment. Wageningen Agricultural University and DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands.
- 17- Yang X., Ren L., Jiao D., Yong B., Jiang S., and Song S. 2013. Estimation of Daily Actual Evapotranspiration from ETM+ and MODIS Data of the Headwaters of the West Liaohe Basin in the Semiarid Regions of China. *Journal of Hydrology Engineering*, 18: 11.1530–1538.

Estimation of Actual Evapotranspiration Using an Agro-Hydrological Model and Remote Sensing Techniques

M. Yaghoobzadeh^{1*} - S. Boromandnasab² - Z. Izadpanah³ - H. Seyyed Kaboli⁴

Received: 22-02-2015

Accepted: 22-06-2015

Introduction: Accurate estimation of evapotranspiration plays an important role in quantification of water balance at watershed, plain and regional scale. Moreover, it is important in terms of managing water resources such as water allocation, irrigation management, and evaluating the effects of changing land use on water yields. Different methods are available for ET estimation including Bowen ratio energy balance systems, eddy correlation systems, weighing lysimeters. Water balance techniques offer powerful alternatives for measuring ET and other surface energy fluxes. In spite of the elegance, high accuracy and theoretical attractions of these techniques for measuring ET, their practical use over large areas might be limited. They can be very expensive for practical applications at regional scales under heterogeneous terrains composed of different agro-ecosystems. To overcome aforementioned limitations by use of satellite measurements are appropriate approach. The feasibility of using remotely sensed crop parameters in combination of agro-hydrological models has been investigated in recent studies. The aim of the present study was to determine evapotranspiration by two methods, remote sensing and soil, water, atmosphere, and plant (SWAP) model for wheat fields located in Neishabour plain. The output of SWAP has been validated by means of soil water content measurements. Furthermore, the actual evapotranspiration estimated by SWAP has been considered as the “reference” in the comparison between SEBAL energy balance models.

Materials and Methods: Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) was used to estimate actual ET fluxes from Modis satellite images. SEBAL is a one-layer energy balance model that estimates latent heat flux and other energy balance components without information on soil, crop, and management practices. The near surface energy balance equation can be approximated as: $R_n = G + H + \lambda ET$

Where R_n : net radiation (Wm^2); G : soil heat flux (Wm^2); H : sensible heat flux (Wm^2); and λET : latent heat flux (Wm^2). Simulations were carried out by SWAP model for two different sites in Faroub and Soleimani fields. The SWAP is a physically based one-dimensional model which simulates vertical transport of water flow, solute transport, heat flow and crop growth at the field scale level. The period of simulation covered the whole wheat growing season (from 1st of December 2008 to 30th of July 2009). 16 MODIS images was used to determine evapotranspiration during wheat growing season. Inverse modeling of evapotranspiration (ET) fluxes was followed to calibrate the soil hydraulic. While SWAP model has the advantage of producing the right amount of irrigation and evapotranspiration at high temporal resolution, SEBAL can estimate crop variables like leaf area index, NDVI index, net radiation, Soil heat flux, Sensible heat flux and evapotranspiration at high spatial resolution.

Results and Discussion: Actual and potential evapotranspiration were estimated for SWAP Model during the whole wheat growing season around 669.5 and 1259.6 mm for Farub field and 583.7 and 1331.2 mm for Soleimani field, respectively. In contrast with NDVI and net radiation, spatial distribution of SEBAL parameters indicated that soil heat flux, sensible heat flux, and surface temperature of land have the same behavior. At the planting date, evapotranspiration was low and about 1 mm/day, but at the peak of plant growth, it was about 9 mm/day. Moreover, evapotranspiration declined at late growing season to about 3 mm/day. SWAP model has been calibrated and validated with meteorological data and the data of field measurements of soil moisture. The amount of RMSE of 0.635 and 0.674 (mm/day) and MAE of 0.15 and 0.53 (mm/day) and also coefficient of determination (R^2) of 0.915 and 0.964 obtained from comparison of SEBAL algorithm with SWAP model for Farub and Soleimani fields showed that no significant differences was seen between results of two models.

Conclusion: The present study supports the use of SEBAL as the most promising algorithm that requires minimum input data of ground based variables. Results of comparison of SEBAL and SWAP model showed that

1- Assistant Professor, Department of Science and Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand (*- Coresponding Author Email: m.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir)

2 and 3- Professor and Assistant Professor, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

4- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Jondishapur University of Technology, Dezful

SEBAL can be a viable tool for generating evapotranspiration maps to assess and quantify spatiotemporal distribution of ET at large scales. Also, it feels that SEBAL and SWAP models can be applied in a wide variety of irrigation conditions without the need for extensive field surveys. This helps significantly in identifying performance indicators and water accounting procedures in irrigated agriculture, and to obtain their likely ranges.

Keywords: Actual evapotranspiration, MODIS images, SEBAL algorithm, SWAP model