

برآورد تبخیر- تعرق گندم در شرایط تحت تنش به کمک سنجش از دور و آلوگوریتم

توازن انرژی، مطالعه موردی: دشت آزادگان، خوزستان

محمدحسن رحیمیان^{1*}، سمانه پورمحمدی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب دانشگاه شهرکرد، کارشناس مرکز ملی تحقیقات شوری؛

mbrahimian@gmail.com

دانشجوی دکتری آبخیزداری دانشگاه یزد، دانش آموخته مدیریت مناطق بیابانی (گرایش آب)؛

s.poormohammadi@gmail.com

چکیده

روش توازن انرژی سطحی برای زمین (سبال) یکی از راه‌های برآورد تبخیر- تعرق واقعی است که امروزه در بسیاری از نقاط دنیا از جمله ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد. نظر به اینکه دشت آزادگان در استان خوزستان یکی از مناطقی است که بدلیل مدیریت غیراصولی زمین و آب، توپوگرافی، اقلیم و شرایط هیدرولوژیکی دچار مشکلاتی نظیر شوری و ماندابی است، لذا برآورد تبخیر- تعرق گیاه در شرایط واقعی (تحت تنش‌های مذکور) و توصیه آن در منطقه می‌تواند از آبیاری‌های بی‌رویه و بروز مسائل حادث‌تر در آینده جلوگیری نماید. به همین منظور در تحقیق حاضر پس از تهیه تصاویر ماهواره‌ای مودیس، اقدام به محاسبه تبخیر- تعرق واقعی گندم در طول فصل زراعی 1387-1386 گردیده است. نتایج این تحقیق که به صورت نقشه‌های تبخیر- تعرق روزانه و فصلی ارائه گردیده، حاکی از آن است که تبخیر- تعرق واقعی گندم در منطقه مطالعاتی بین 214 تا 440 میلیمتر است و بدلیل قرار گرفتن تحت تنش‌های محیطی مختلف از جمله شوری خاک، شوری آب زیرزمینی و بالا بودن سطح ایستابی کمتر از مقداری است که تحت عنوان تبخیر- تعرق استاندارد گندم در منطقه توسط روابط تجربی بدست می‌آید (580 میلیمتر) و توصیه می‌شود. نتایج این تحقیق همچنین بر ضرورت توجه به نیاز آبی گیاه در شرایط طبیعی حاکم بر مزارع تاکید داشته و آنرا عاملی برای غلبه بر مشکلات ناشی از آبیاری‌های بی‌رویه و غیراصولی می‌داند.

واژه‌های کلیدی: سبال، مودیس، شوری، مدیریت آبیاری

مقدمه

انتقال و تاسیسات انحراف آب در یک منطقه به شمار می‌آید. در شرایط غیر تنش⁴ (استاندارد) نیاز آبی گیاه بر اساس تبخیر-تعرق بعلاوه مقداری آبی که صرف آبشویی نمک‌های تجمع یافته در منطقه توسعه ریشه

تعیین تبخیر- تعرق² و نیاز آبی³ گیاهان از ضرورت‌های اساسی در تعیین میزان تخصیص آب به یک محدوده کشاورزی، طراحی سیستم آبیاری، کانالهای

1. آدرس نویسنده مسؤول: یزد، انتهای بلوار آزادگان، خ نهالستان، مرکز ملی تحقیقات شوری، صندوق پستی 315-89195

* دریافت: بهمن، 1390 و پذیرش: اردیبهشت، 1391

² - Evapotranspiration

³ -Irrigation water requirement

⁴ -Unstressed conditions

برای تعیین ET_a وجود دارند که روش‌های موسوم به توازن انرژی³ از جمله آنها محسوب می‌شوند (آلن و همکاران 2005، باستیانسن و همکاران 1998، باستیانسن 2000، باستیانسن و همکاران 2005).

در ایران نیز از این روش‌ها در چندین نقطه کشور استفاده شده است (شریفی و همکاران 2008، اکبری و همکاران 2007، مختاری 2005، خاوریان نهزک 1383، اصغر زاده و ثنایی نژاد 1385، یعقوبی فشکی و همکاران 1388، پورمحمدی 1388، پورمحمدی و همکاران 2011). این روش‌ها نیازمند حل معادله بیلان انرژی است که در آن تبخیر-تعرق واقعی (یا همان شار گرمای نهان، LE) بعنوان جزء باقیمانده اختلافات بین تشعشع خالص ورودی به سطح زمین (R_n) و شار گرمای محسوس خارج شده از سطح (انرژی مورد استفاده جهت گرم نمودن هوای مجاور، H) و نیز شار گرمایی ورودی به زمین (انرژی ذخیره شده در خاک و پوشش گیاهی G) قابل محاسبه می‌باشد:

$$LE = R_n - G - H \quad \text{معادله 1}$$

محاسبه R_n و G در معادله فوق از طریق روابط فیزیکی، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و برخی داده‌های اقلیمی قابل تعیین است. مقدار R_n تفاضل بین شارهای تشعشعی خروجی (\uparrow) و ورودی (\downarrow) است که به صورت طول موجهای بلند (L) و کوتاه (s) به محدوده مجاور سطح زمین وارد و خارج شده و تابعی از مقادیر آلبیدی⁴ سطحی (α_0) و ضریب گسیلندگی⁵ سطحی (ε_0) است.

معادله 2

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha_0 R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0) R_{L\downarrow}$$

که در این معادله $R_{s\downarrow}$ تشعشع ورودی به صورت طول موج کوتاه، $R_{L\downarrow}$ و $R_{L\uparrow}$ تشعشع‌های ورودی و خروجی به صورت طول موج بلند می‌باشند که همگی بر حسب وات بر متر مربع محاسبه می‌شوند. ضرایب α_0 و ε_0 بدون بعد

شده و به صورت نفوذ عمقی خارج می‌گردد، محاسبه خواهد شد. روش متداول در تعیین تبخیر-تعرق استاندارد یا بالقوه¹ گیاه یا همان ET_c استفاده شده در مدیریت آبیاری، شامل محاسبه نیاز تبخیری جو یا تبخیر-تعرق مرجع² (ET_0) و یک عامل وابسته به گیاه (K_c) به صورت $ET_c = K_c * ET_0$ است (آلن و همکاران 1998، رایت 1982، دورنیاس و پروت 1977).

این روش تا کنون در علوم مهندسی آبیاری به صورت موفقیت آمیزی مورد استفاده قرار گرفته است (مکونن و همکاران، 2000) و اهمیت قابل توجهی خصوصاً در مرحله طراحی پروژه‌های آبیاری داشته و برای تعیین وسعت قابل کشت بر اساس منبع آب موجود، تدوین تقویم آبیاری، انتخاب الگوی کشت و نوع گیاهی که قرار است بعد از احداث کانال‌های آبیاری و تاسیسات انحراف آب کشت شود، مفید می‌باشد. اما در یک پروژه در حال اجرای آبیاری، تعیین مجدد تبخیر-تعرق گیاه در یک منطقه وسیع (برای ارزیابی و تعیین دقت مقادیر ET_c مرحله طراحی) کاری دشوار است. تحقق این امر به کمک روش فوق در گرو تعیین مقادیر دقیق ضریب گیاهی (K_c) برای انواع گیاهان کشت شده در محدوده تحت آبیاری که هر یک دارای مراحل رشدی متفاوت، درصد پوشش متفاوت، شرایط مدیریتی و محیطی مختلف هستند، می‌باشد.

پهمنچین در صورت قابل توجه بودن وسعت منطقه تحت آبیاری، نیاز به پهنه‌بندی ET_0 و توجه به الگوی تغییرات مکانی آن نیز هست. در چنین شرایطی عموماً از داده‌های مرحله طراحی برای تعیین تبخیر-تعرق گیاه در طول فصل آبیاری استفاده می‌شود و لذا تمایزی بین تبخیر-تعرق استفاده شده در مرحله طراحی (ET_c) و تبخیر-تعرق واقعی مزرعه (ET_a) بوجود نخواهد آمد (مکونن و همکاران، 2000). در حالی که این دو پارامتر متفاوت از همدیگر بوده و مقدار عددی این تفاوت وابسته به شرایط محیطی و مدیریتی حاکم بر مزرعه است. در مقابل روش‌های متعدد برای محاسبه ET_c ، روشهای زیادی نیز

3. Energy balance

4. Albedo

5. Emissivity

1. Potential evapotranspiration

2. Reference evapotranspiration

H توسط یک سری روابط رفت و برگشتی و تا زمان ثابت

شدن یک عامل به نام طول مونین - ابخوف³ (L) تعیین می‌گردد. شکل شماره 1 نشان دهنده فرایند تعیین H است که جزئیات بیشتر آن در راهنمای سبال (باستیانسن و همکاران، 2002) وجود دارد.

در تحقیق حاضر پس از تهیه تصاویر سنجنده مودیس⁴ مربوط به ماهواره ترا⁵ از منطقه دشت آزادگان در استان خوزستان و پردازش آنها، اقدام به محاسبه تبخیر - تعرق واقعی گندم در طول فصل زراعی 1387-1386 گردیده است. نظر به اینکه دشت آزادگان یکی از مناطقی است که بدلیل آبیاری‌های بی‌رویه و مدیریت غیراصولی زمین و آب، زهکشی طبیعی ضعیف، وضعیت اقلیمی و هیدرولوژیکی خاص خود اکنون دچار مشکلاتی نظیر شوری و ماندابی اراضی کشاورزی است، لذا این کار خواهد توانست به مدیریت منابع آب در دشت کمک نموده و از بروز مسائل حادثر در آینده جلوگیری نماید

هستند. مقدار G نیز توسط رابطه تجربی باستیانسن (2000) به صورت تابعی از دمای سطحی زمین (T_0)، آلبدوی سطحی زمین و شاخص معروف NDVI قابل محاسبه است:

$$\frac{G}{R_n} = (T_0 - 273.15)(0.0038 + 0.0074\alpha_0)(1 - 0.98NDVI^4)$$

یکی دیگر از اجزای معادله بیلان انرژی شار گرمای محسوس (H) است. راه‌حلهای متعددی برای محاسبه این جزء از معادله انرژی وجود دارد که سبال¹ (باستیانسن و همکاران، 1998) و متریک² (آلن و همکاران، 2007) از معتبرترین و پرکاربردترین الگوریتم‌ها برای محاسبه H در سطح دنیا است. روابط آیرودینامیکی موجود بیانگر ارتباط شار گرمای محسوس (H) با اختلاف دمای بین سطح زمین و هوای مجاور چسبیده به سطح (dT) بین دو ارتفاع (z_1 و z_2) است که به صورت زیر قابل تخمین است:

$$H = \rho_{air} C_p \frac{dT}{r_{ah}} \quad \text{معادله 4}$$

که ρ_{air} چگالی هوا، C_p گرمای ویژه هوا در فشار ثابت و r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی بین دو ارتفاع z_1 و z_2 است. مقدار

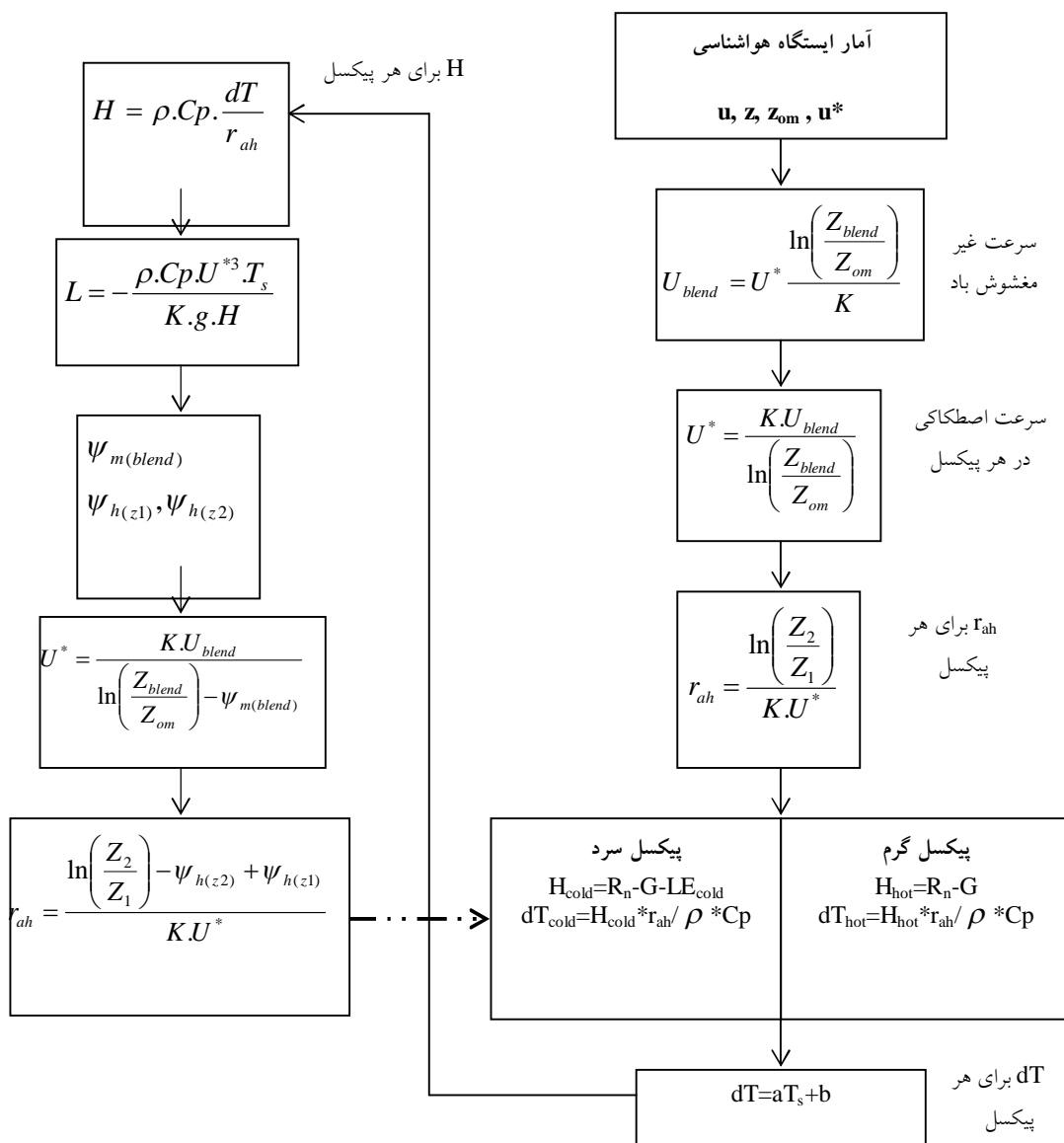
¹. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land)

². METRIC (Mapping EvapoTranspiration at high Resolution using Internalized Calibration)

³. Monin-Obukhov length

⁴. MODIS

⁵. TERRA



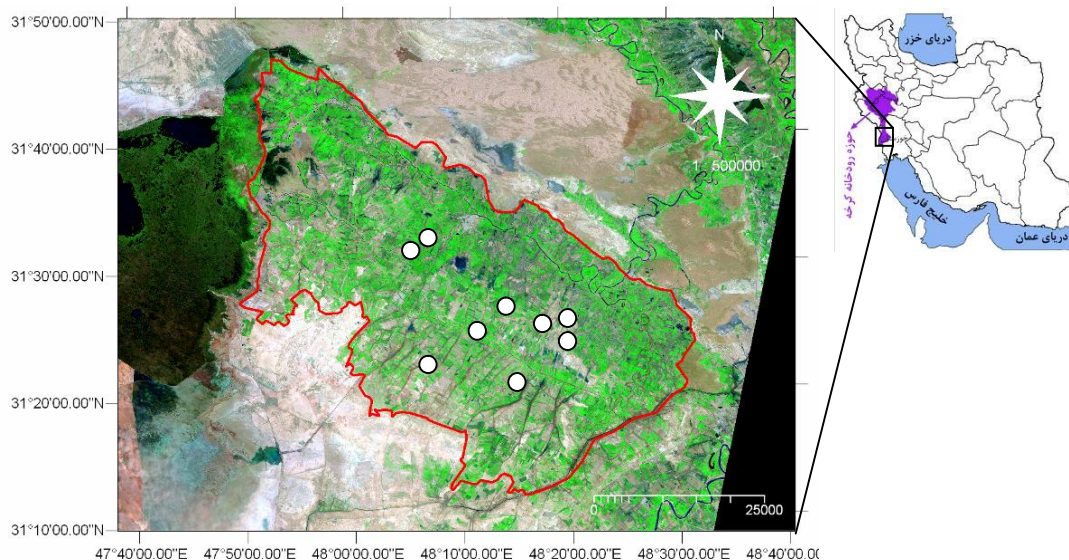
1- مراحل محاسبه شار گرمای محسوس (H) بر حسب وات بر متر مربع (به نقل از باستیانس و همکاران، 2002)، در این شکل u سرعت باد (متر بر ثانیه) در ارتفاع z متری از سطح زمین، ρ چگالی هوا (کیلوگرم بر مترمکعب)، C_p گرمای ویژه هوا (1004 ژول بر کیلوگرم بر درجه کلوین)، T_s دمای سطح زمین (کلوین)، dT اختلاف دما بین دو ارتفاع z_1 و z_2 (کلوین)، r_{ah} مقاومت آیرودینامیک در برابر انتقال حرارت (ثانیه بر متر)، u^* سرعت اصطکاکی (متر بر ثانیه)، K ثابت ون کارمن (0/41)، Z_{om} طول زبری مومنتوم (متر)، Z_{blend} ارتفاعی از سطح زمین که باد حالت اغتشاش ندارد (متر)، L طول مومین:ابوخوف، g شتاب ثقل (9/81 متر بر مجذور ثانیه)، ψ_m و ψ_h ضرایب تصحیح پایداری برای انتقال حرارت و مومنتوم است.

مواد و روشها

- معرفی منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی در این تحقیق حدود 150 هزار هکتار از اراضی دشت آزادگان واقع در استان خوزستان و 60 کیلومتری شمال غربی اهواز بوده که بر اساس گزارشهای موجود، این محدوده بخش اصلی دشت که دارای فعالیتهای کشاورزی است را پوشش می‌دهد. مساحت کل دشت آزادگان حدود 334000 هکتار گزارش شده است (مه‌اب قدس، 1372). منطقه مطالعاتی از شمال به مسیر اصلی رودخانه کرخه، از شرق به حمیدیه، از غرب به هورالهویزه در مرز ایران و عراق و از جنوب به حاشیه پایینی کرخه نور و انشعابات آن محدود می‌شود. شکل شماره 2 موقعیت منطقه مطالعاتی را بر روی نقشه کشور و نقشه استانی نشان می‌دهد. بر اساس آمار و اطلاعات موجود، دشت آزادگان دارای تابستانهای گرم و

زمستانهای معتدل و کوتاه بوده و حداقل و حداکثر دما به ترتیب در ماههای دی با 5 درجه سانتیگراد و تیر و مرداد با 43/2 درجه سانتیگراد گزارش شده است. بر اساس آمار بارندگی ده ساله منطقه، حداکثر بارندگی در آذر ماه با 44/1 میلیمتر و حداقل آن در خرداد، تیر، مرداد و شهریور ماه بدون هیچ گونه بارندگی رخ می‌دهد. بیشترین تبخیر - تعرق مربوط به تیرماه با 303/6 میلیمتر و کمترین آن مربوط به دی ماه با 42/7 میلیمتر گزارش شده است. بر اساس همین گزارشات میزان کل بارندگی و کل تبخیر سالانه در منطقه به ترتیب برابر با 175 و 2004 میلیمتر می باشد. از لحاظ ژئومورفولوژی دشت آزادگان را یک دشت آبرفتی می‌نامند که قسمت های عمیق آن از رسوبات کواترنری انباشته شده است (مه‌اب قدس، 1373).



شکل 2- تصویر ماهواره‌ای دشت آزادگان و مزارع گندم مورد بررسی به همراه موقعیت قرارگیری دشت بر روی نقشه کشور

خواهد پرداخت. بدین منظور ابتدا اقدام به کسب اطلاعات لازم در مورد گندم در منطقه مطالعاتی شده است. در جدول شماره 1 فنولوژی رشد گندم در دشت آزادگان دیده می‌شود. همانطوری که ملاحظه می‌گردد، طول دوره رشد گندم (از زمان کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیکی) در این منطقه حدود 165 روز است که از

کشت غالب در منطقه مورد مطالعه گندم است که عمدتاً ارقام چمران و وریناک می باشند. همچنین انواع سبزیجات، علوفه و حتی در مواردی برنج نیز در سطوح کوچکتر به چشم می‌خورد. بدلیل وسعت و نیز گستردگی گندم در سرتاسر دشت، این تحقیق به محاسبه تبخیر- تعرق واقعی این محصول به کمک سنسچس از دور

در حالی است که قبل از این مرحله درصد تاج پوشش کمتر بوده و لذا سطوح لخت با پوشش خاکی نیز در بین بوته‌های گندم دیده می‌شود (مهتاب قدس، 1372).

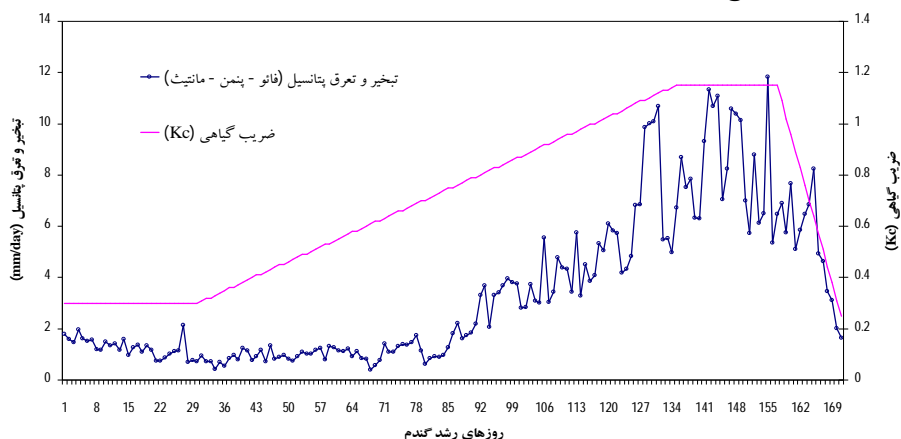
نیمه آبان تا اوایل اردیبهشت به طول می‌انجامد. زمان برداشت نیز اواسط اردیبهشت است. تاج پوشش گیاهی گندم پس از خروج از مرحله خوشه دهی و شروع گلدهی به حداکثر خود رسیده و 100 درصد می‌گردد. این

جدول 1- فنولوژی گندم در دشت آزادگان - استان خوزستان در سال مورد مطالعه

روز از زمان کشت	تاریخ	نام مرحله
0	15 آبان	کاشت (Planting)
3	18 آبان	جوانه زنی (Germination)
8	23 آبان	رویش (Emergence)
38	23 آذر	پنجه زنی (Tillering)
98	23 بهمن	ساقه رفتن (Jointing)
123	18 اسفند	تشکیل غلاف (Booting)
128	23 اسفند	خوشه دهی (Ear emergence)
135	1 فروردین	گل دهی (Flowering)
142	8 فروردین	شیری شدن (Milk Stage)
150	16 فروردین	خمیری شدن (Dough Stage)
165	5 اردیبهشت	رسیدن فیزیولوژیک (Ripening)
180	20 اردیبهشت	برداشت (Harvesting)

تبخیر - تعرق استاندارد گندم (ET_0) در طی فصل زراعی 1386-1387 محاسبه گردیده است. در شکل شماره 3 نمودار مربوط به تغییرات ضریب گیاهی و تبخیر - تعرق استاندارد گندم در طول فصل رشد آورده شده است. طبق برآوردهای صورت گرفته به این روش، تبخیر - تعرق گندم در منطقه مطالعاتی و در دوره مورد نظر حدود 580 میلیمتر است.

جهت حصول شناخت کافی از میزان مصرف آب گندم در دشت آزادگان، ابتدا نیاز آبی آن در طول دوره رشد از طریق روشهای متداول محاسبه گردیده است. بدین منظور ابتدا تبخیر - تعرق مرجع روزانه (ET_0) به روش فائو - پنمن - مانتیث محاسبه و سپس با در نظر گرفتن ضریب گیاهی موجود در جداول (آلن و همکاران، 1998) و تصحیح آن برای شرایط منطقه،



شکل 3- تغییرات ضریب گیاهی و تبخیر - تعرق استاندارد (پتانسیل) گندم در دشت آزادگان - سال زراعی 1386-1387

- محاسبه تبخیر - تعرق واقعی

برای انجام محاسبات مربوط به تبخیر - تعرق واقعی گندم در دشت آزادگان از یک سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سنجنده مودیس، اطلاعات هواشناسی مربوط به

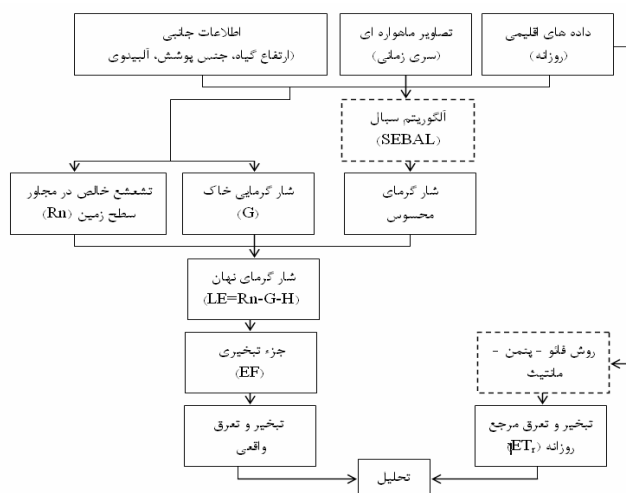
ایستگاه سینوپتیک بستان واقع در درون منطقه مطالعاتی و نیز برخی اطلاعات محلی و بازدیدهای صحرایی بهره‌گیری شده است. در جدول شماره 2 خصوصیات تصاویر مورد استفاده برای انجام این تحقیق آورده شده است.

جدول 2- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده برای محاسبه تبخیر - تعرق گندم در منطقه مطالعاتی (سنجنده مودیس)

شماره تصویر	شماره روز ژوئیه	تاریخ میلادی	تاریخ شمسی	ساعت اخذ داده (بر اساس زمان گرینویچ)	روز از شروع فصل رشد گندم در منطقه
1	309	05-Nov-2007	14 آبان 1386	8: 00 am	0
2	330	26-Nov-2007	5 آذر 1386	8: 10 am	21
3	346	12-Dec-2007	21 آذر 1386	8:20 am	37
4	357	23-Dec-2007	2 دی 1386	8: 00 am	48
5	3	03-Jan-2008	13 دی 1386	8:20 am	59
6	17	17-Jan-2008	27 دی 1386	7:55 am	73
7	33	02-Feb-2008	13 بهمن 1386	7:55 am	89
8	40	09-Feb-2008	20 بهمن 1386	8: 10 am	96
9	45	14-Feb-2008	25 بهمن 1386	8: 00 am	101
10	53	22-Feb-2008	3 اسفند 1386	8:20 am	109
11	61	01-Mar-2008	11 اسفند 1386	7:50 am	117
12	65	05-Mar-2008	15 اسفند 1386	7:55 am	121
13	74	14-Mar-2008	24 اسفند 1386	8: 00 am	130
14	81	21-Mar-2008	2 فروردین 1387	7:55 am	137
15	85	25-Mar-2008	6 فروردین 1387	8: 10 am	141
16	93	02-Apr-2008	14 فروردین 1387	8:20 am	149
17	101	10-Apr-2008	22 فروردین 1387	8: 00 am	157
18	103	12-Apr-2008	24 فروردین 1387	8:20 am	159
19	113	22-Apr-2008	3 اردیبهشت 1387	7:55 am	169

در تحقیق حاضر جهت تخمین تبخیر - تعرق واقعی از الگوریتم توازن انرژی سبال (باستیانسن و همکاران، 1998) استفاده گردیده است. همانطوری که قبلاً عنوان شد این الگوریتم امروزه مقبولیت فراوانی داشته و در اکثر نقاط دنیا و نیز ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تحقیق

حاضر از روش ارائه شده توسط پورمحمدی (1388) برای تخمین تبخیر - تعرق واقعی گندم در طی یک فصل زراعی استفاده شده است. مراحل مختلف انجام این روش به صورت نمودار در شکل شماره 4 نشان داده شده است.



شکل 4- مراحل مختلف محاسبه تبخیر - تعرق واقعی با بکارگیری الگوریتم سبال (به نقل از پورمحمدی، 1388)

-تعمیم نتایج حاصله به سایر روزهای فصل زراعی

همانطوری که عنوان شد، در این تحقیق از 19 تصویر ماهواره‌ای استفاده گردیده که فاصله زمانی اخذ آنها بین 3 تا 20 روز است (جدول شماره 2). بنابراین می‌توان کل فصل زراعی را به 19 بازه زمانی متناوب تقسیم نمود بطوریکه در روز میانی هر کدام از این بازه‌ها، یک تصویر ماهواره‌ای موجود باشد. با توجه به محاسبه مقادیر تبخیر - تعرق واقعی روزانه در هر یک از روزهای میانی این بازه‌های زمانی (ET_{a-day})، برای محاسبه تبخیر - تعرق تجمعی در طول یک فصل کامل رشد، ابتدا مقادیر ET_{a-day} به مقادیر تبخیر - تعرق تجمعی در هر بازه زمانی ($ET_{a-period}$) تبدیل شدند:

$$\left(ET_{a-period}\right)_i = \frac{\left(ET_{a-day}\right)_i}{\left(ET_o\right)_i} \sum_{n=1}^n \left(ET_o\right)_n \quad \text{معادله 7}$$

و سپس با تجمیع آنها، مقدار تبخیر - تعرق واقعی در فصل زراعی 1386-1387 ($ET_{a-season}$) محاسبه گردید:

$$ET_{a-season} = \sum_{i=1}^{19} \left(ET_{a-period}\right)_i \quad \text{معادله 8}$$

که در این روابط i شمارنده بازه‌های زمانی مورد نظر (از 1 تا 19)، n شمارنده روزهای واقع در درون هر یک از این بازه‌های زمانی (بین 3 تا 20 روز)، ET_o تبخیر - تعرق مرجع

اجزای بیان انرژی محاسبه شده در روش سبال به صورت لحظه‌ای¹ و مربوط به زمان گذر ماهواره بوده و لذا جهت تعمیم آن به طول روز (جهت محاسبه تبخیر - تعرق روزانه)، از پارامتر جزء تبخیری² (EF) استفاده گردیده است (باستیانسن، 2000) که روش محاسبه آن به صورت زیر است.

$$EF = \frac{LE}{LE + H} \quad \text{معادله 5}$$

فرضیه استفاده شده در این روش ثابت بودن جزء تبخیری در طول روز و یا به عبارتی دیگر برابری جزء تبخیری لحظه‌ای و روزانه می‌باشد (شاتل‌ورث و همکاران 1989، بروتشرت و چن 1996) و بسیاری از محققان نیز از همین فرضیه برای تعمیم نتایج لحظه‌ای به مقادیر روزانه استفاده نموده‌اند. با بدست آمدن جزء تبخیری برای هر یک از روزهای دارای تصویر، تبخیر - تعرق واقعی 24 ساعته (روزانه) توسط رابطه زیر محاسبه شد:

$$ET_{a-24h} = \frac{EF * R_{n-24h}}{28.588} \quad \text{معادله 6}$$

که در این معادله مقدار R_{n-24h} تشعشع خالص روزانه است که تابعی از آلیدوی سطح، قابلیت انتقال³ و طول موج کوتاه ورودی در ناحیه بالایی اتمسفر است.

¹. Instantaneous

². Evaporative fraction

³. Transmissivity

منطقه مطالعاتی پیش‌بینی شده است. فرمول ارائه شده به صورت زیر است:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_p}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_c}\right) \quad \text{معادله 9}$$

که با حل آن تبخیر- تعرق واقعی به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$ET_a = ET_c \left(1 - \frac{1 - \frac{Y_a}{Y_p}}{K_y}\right) \quad \text{معادله 10}$$

مهمترین جزء محاسباتی این فرمول عملکرد پتانسیل (Y_p) است که از یک روش زراعی اکولوژیکی که بر پایه روش دویت² (1965) استوار می‌باشد، استفاده گردیده است (دورنباس و همکاران، 1979). پارامترهای مورد استفاده جهت محاسبه عملکرد بالقوه گندم در جدول شماره 3 دیده می‌شود. مقدار عددی برخی از این پارامترها وابسته به موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی، برخی وابسته به متوسط ساعات آفتابی (به کمک آمار هواشناسی بدست آمده است) و برخی دیگر به کمک شاخص‌های اگرونومیکی گندم در منطقه مطالعاتی تعیین می‌شوند. جزئیات بیشتر در مورد این پارامترها و نحوه تعیین آنها در نشریه شماره 33 آبیاری و زهکشی فائو ارائه شده است (دورنباس و همکاران، 1979).

روزانه، $(ET_o)_i$ و $(ET_{a-day})_i$ تبخیر- تعرق مرجع و واقعی مربوط به روزی از بازه i است که دارای تصویر ماهواره‌ای است. با انجام این مراحل نقشه تبخیر - تعرق واقعی یک فصل زراعی در سطح کل منطقه مطالعاتی تهیه گردید. بدلیل اینکه منطقه مطالعاتی عمدتاً زیر کشت گندم است، لذا این نقشه می‌تواند جهت تخمین تبخیر- تعرق صورت گرفته از مزارع گندم در نقاط مختلف دشت مورد استفاده و بهره‌برداری قرار گیرد. همچنین بدلیل اینکه نقشه مذکور رقمی¹ نیز هست، لذا امکان استخراج داده، تجزیه و تحلیل هیستوگرام آن و نیز سایر محاسبات در آن وجود داشته و می‌تواند در آینده برای مدیریت منابع آب دشت مورد استفاده قرار گیرد.

- ارزیابی نتایج

چنانچه آب داده شده به گیاه در حدی نباشد که بتواند نیاز آبی آنرا تامین نماید و یا شوری خاک منطقه توسعه ریشه جذب آب توسط گیاه را مختل نماید، تبخیر- تعرق واقعی گیاه (ET_a) به کمتر از حد پتانسیل (ET_c) آن خواهد رسید. تحت چنین شرایطی تنشهای شوری و رطوبتی تاثیر منفی بر رشد گیاه گذاشته که نهایتاً منجر به کاهش عملکرد آن خواهد شد (دورنباس و همکاران، 1979). بنابراین عملکرد حداکثر یا بالقوه محصول (Y_p) به مقدار واقعی خود (Y_a) تقلیل خواهد یافت. در تحقیق حاضر از تابع تولید محصول ارائه شده توسط دورنباس و همکاران (1979) استفاده گردید و تبخیر- تعرق واقعی گندم بر اساس عملکرد بالقوه و واقعی محصول در

¹Digital

²De Wit

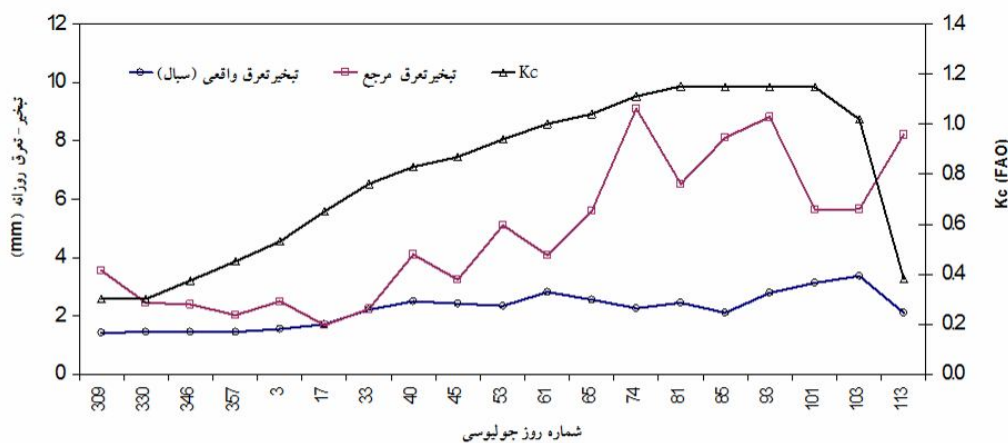
جدول 3- پارامترهای مورد استفاده جهت محاسبه عملکرد بالقوه گندم در دشت آزادگان - استان خوزستان

مقدار	نام پارامتر
31/5	عرض جغرافیایی (درجه)
170	طول دوره رشد (روز)
16/5	متوسط دمای هوا در طول دوره رشد (درجه سانتیگراد)
600	متوسط تشعشع ورودی با طول موج کوتاه در طول فصل رشد (cal/cm ² /day)
3/0	متوسط شاخص سطح برگ (LAI)
0/41	تصحیح مربوط به توسعه گیاه در طول زمان و سطح برگ (cL)
0/6	تصحیح مربوط به تولید ماده خشک (cN)
0/35	تصحیح مربوط به شاخص برداشت (cH)
242	حداکثر تشعشع فعال با طول موج کوتاه (cal/cm ² /day)
165	تولید ناخالص ماده خشک در روزهای ناصاف (kg/ha/day) yo
327	تولید ماده ناخالص ماده خشک در روزهای صاف (kg/ha/day) yc
20/5	نرخ تولید حداکثری ماده خشک ناخالص برگ (kg/ha/day) ym
-0/3	جزئی از طول روز با آسمان ابری

نتایج و بحث

تبخیر - تعرق واقعی، تبخیر - تعرق مرجع و ضریب گیاهی گندم در روزهای مورد مطالعه است. همانطوری که ملاحظه می‌گردد این پارامترها با گذشت زمان از تاریخ کشت گندم، روندی صعودی دارند. مقادیر ضریب گیاهی و تبخیر - تعرق واقعی در انتهای فصل رشد (در زمان رسیدن فیزیولوژیکی گندم) کاهش می‌یابند.

همانطوری که در مواد و روشهای این تحقیق عنوان شد ابتدا نقشه‌های تبخیر - تعرق واقعی 24 ساعته در روزهایی از سال زراعی 1386-1387 که تصویر ماهواره‌ای موجود بود، تهیه و با استفاده از نقشه موقعیت مکانی تعدادی از مزارع گندم در منطقه مطالعاتی (شکل 2)، روند تغییرات تبخیر - تعرق در این مزارع بررسی شد. شکل شماره 5 نشان دهنده تغییرات



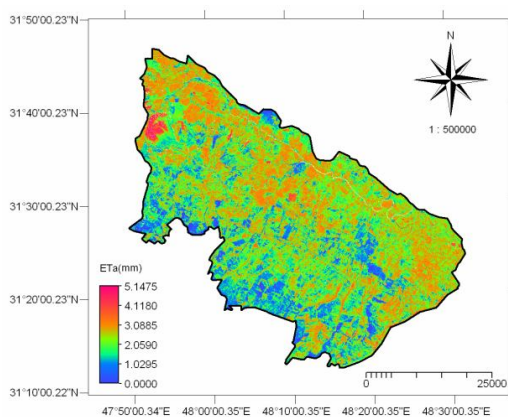
شکل 5- تغییرات ضریب گیاهی، تبخیر - تعرق واقعی و مرجع در مزارع تحت کشت گندم دشت آزادگان در طی فصل زراعی 1386-1387

ابتدایی پس از کاشت بذر، زمینه خاک نسبت به پوشش گندم غالب بوده و با توجه به اینکه در این مواقع بخش عمده ای از منطقه تحت آبیاریهای وسیع قرار دارد، لذا فرآیند تبخیر از سطح خاک و نیز سطح آبهای رها شده در کانالها بر تعرق از گیاه غلبه خواهد کرد. لذا مقادیر برآورد شده تبخیر- تعرق توسط تصاویر ماهواره ای مودیس و آنگوریتیم سبال در روزهای ابتدایی از فصل زراعی بیشتر از حد مورد انتظار برای تبخیر- تعرق گیاه گندم در این روزها (که بر اساس روش های تجربی محاسبه می شود) بوده و اصطلاحاً دارای بیش برآورد¹ خواهد بود.

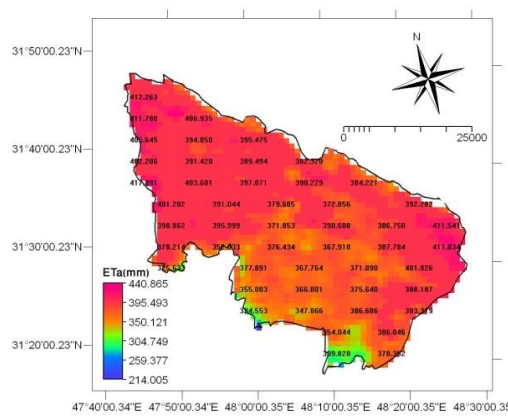
با تعیین تبخیر- تعرق واقعی در روزهای دارای تصویر ماهواره ای (19 روز از فصل رشد)، تبخیر- تعرق تجمعی در طول یک فصل کامل زراعی (170 روز) تخمین زده شد. در شکل شماره 6-الف نقشه نهایی تبخیر- تعرق تجمعی دشت آزادگان در فصل زراعی 1386-1387 نشان داده شده است. علاوه بر نقشه نهایی (تهیه شده توسط تصاویر مودیس)، از یک تصویر ماهواره ای لندست نیز برای نمایش بهتر تغییرات مکانی تبخیر- تعرق واقعی در یکی از روزهای سال استفاده شده است. شکل 6-ب نشان دهنده نقشه مذکور است.

نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان می دهد که تبخیر- تعرق واقعی گندم در روزهای مورد مطالعه در طول فصل رشد از 1/4 شروع و در زمان اوج نیاز آبی به 3/3 رسیده و نهایتاً در زمان رسیدگی فیزیولوژیکی به 0/84 میلیمتر در روز کاهش می یابد (انحراف معیار=0/6 میلیمتر در روز). این در حالی است که تبخیر- تعرق مرجع از تغییرات زیادتری در طول فصل رشد برخوردار است (انحراف معیار=2/5 میلیمتر در روز). این پارامتر از 3/6 شروع شده، به 1/7 کاهش یافته و سپس روندی افزایشی داشته و به 9/1 میلیمتر در روز نیز رسیده است.

یکی از دلایل عمده کاهش دامنه تغییرات تبخیر- تعرق واقعی محاسبه شده توسط تصاویر ماهواره ای مودیس، به سطح مورد مطالعه بر میگردد. مقادیر ارائه شده در این نمودار نمایشی از تبخیر- تعرق واقعی هزاران پیکسل با مقادیر متفاوت ET_a است که با میانگین گیری از آنها، نوعی تعدیل بر روی مقادیر ET_a انجام شده است. این در حالی است که مقادیر تبخیر- تعرق مرجع این نمودار ماهیتاً نقطه ای بوده (مربط به ایستگاه هواشناسی بستان) و لذا نمیتوانند پراکنش مکانی تغییرات موجود در سطح منطقه را در نظر بگیرند. یکی دیگر از دلایل این امر به قدرت تفکیک مکانی تصاویر مودیس و عدم توانایی آنها در تفکیک تبخیر از سطح خاک و تعرق از سطح گیاه بر می گردد. پر واضح است که در روزهای



(ب)



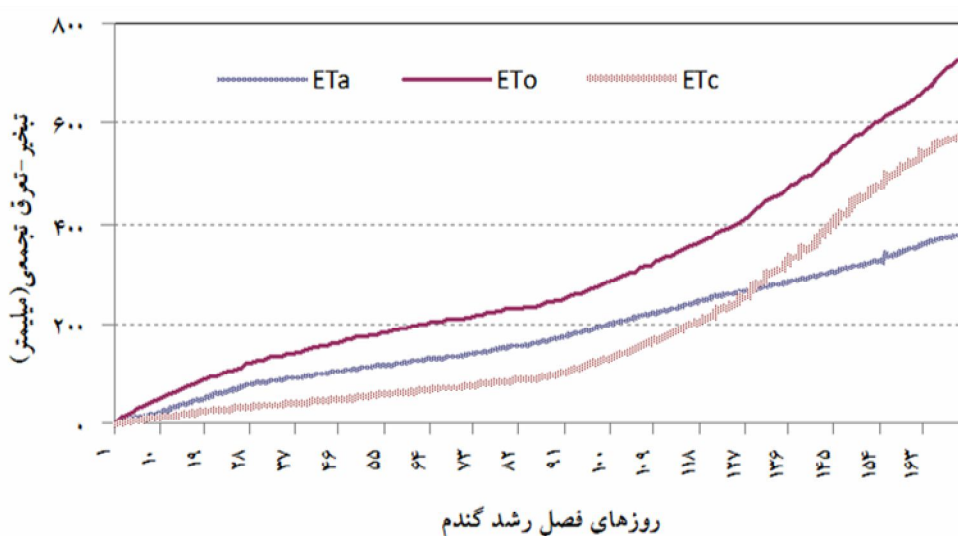
(الف)

شکل 6-الف) نقشه تبخیر- تعرق تجمعی دشت آزادگان در فصل زراعی 1386-1387 که توسط تصاویر مودیس تهیه شده و (ب) تبخیر- تعرق واقعی محاسبه شده توسط تصویر ماهواره ای لندست برای نمایشی از تغییرات مکانی ET_a در منطقه مطالعاتی

¹. Over estimate

تبخیر- تعرق گیاه گندم از روی نقشه مذکور، تعدادی از نقاط مربوط به مزارع گندم در منطقه مطالعاتی شناسایی (شکل 2) و با کمک نقشه فوق، میانگین تبخیر- تعرق بدست آمده در محل این نقاط تعیین و تحلیل آماری شد. شکل شماره 7 روند تغییرات تبخیر - تعرق تجمعی (مرجع، استاندارد و واقعی) در تعدادی از مزارع گندم دشت آزادگان را نشان می‌دهد که به کمک داده‌های روزانه هواشناسی و نیز تصاویر ماهواره‌ای مودیس بدست آمده است.

همانطوری که در راهنمای نقشه دیده می‌شود، تبخیر- تعرق واقعی در سرتاسر دشت از 214 تا 440 میلیمتر متغیر است. اگر چه کشت غالب در منطقه مطالعاتی گندم است، ولی با شناخت از این منطقه، تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های کاربری‌های اراضی مشخص شد که مقادیر حداقل نقشه مذکور مربوط به اراضی بایر و مقادیر حداکثر مربوط به مناطق ماندابی، مزارع تحت کشت سبزی و صیفی‌جات و همچنین مساحت‌های محدودی از شالیزار است که در درون محدوده مذکور قرار گرفته‌اند. به منظور تعیین دقیق‌تر



شکل 7- تبخیر- تعرق تجمعی (مرجع، استاندارد و واقعی) در مزارع تحت کشت گندم دشت آزادگان در فصل زراعی 1387-1386

برمی‌گردد که قبلاً نیز اشاره شد. بیش‌برآوردهای سبب در روزهای اولیه از فصل رشد چون به صورت تجمعی در آمده‌اند، در مقادیر ET_a سایر روزهای فصل رشد (روزهای میانی) نیز وارد گردیده و باعث شده که اثرات این بیش‌برآوردها تا روز 128 نیز بر روی نمودار دیده شود. در خصوص دلایل بیش‌برآورد در روزهای اولیه از فصل رشد قبلاً به برخی موارد از قبیل قدرت تفکیک مکانی ضعیف تصاویر مودیس اشاره شده است. در این روزها اگرچه ممکن است مقدار عددی ET_o در منطقه مطالعاتی زیاد باشد، اما تبخیر-تعرق استاندارد گندم $(ET_o * K_c)$ بدلیل کوچک در نظر گرفتن مقدار عددی K_c

بر این اساس تبخیر- تعرق واقعی برآورد شده توسط سبب (ET_a) برای یک دوره کامل رشد گندم در منطقه مطالعاتی 380 میلیمتر است، در حالی که تبخیر- تعرق مرجع (ET_o) و استاندارد محاسبه شده برای گندم (ET_c) به ترتیب حدود 740 و 580 میلیمتر است. یکی از موارد قابل توجه در این نمودار تفاوت بین ET_a و ET_c تجمعی است. همانطوری که ملاحظه می‌گردد در تعداد قابل توجهی از روزهای سال، مقدار تبخیر- تعرق واقعی تجمعی بیشتر از تبخیر-تعرق استاندارد تجمعی تخمین زده شده است. این امر به بیش‌برآورد الگوریتم سبب در تخمین ET_a روزهای اولیه از فصل زراعی مذکور

طراحی سیستم بوده که خود مستلزم انجام فرآیندهای ارزیابی، اصلاح و حتی طراحی مجدد سیستم پس از اجرای آن است. در این تحقیق مقادیر ET_a گندم در طول یک فصل زراعی (بدست آمده توسط آگوریتم سبال) با مقادیر محاسباتی ET_o گندم در همان فصل زراعی (حاصلضرب K_e اصلاح شده فائو و ET_o فائو- پنمن- ماتیش) مقایسه و مشخص گردید که گیاه الزاماً به اندازه تبخیر-تعرق محاسباتی، آب مصرف نمی‌کند که این امر می‌تواند ناشی از تنش‌های وارده بر گیاه (شوری، خشکی، ماندابی، ...) باشد.

این موضوع (بیش برآورد آب مورد نیاز برای تبخیر-تعرق گیاه و تولید محصول) علاوه بر ایجاد تنش و کاهش محصول نهایی، می‌تواند منجر به تخصیص آب بیش از حد به گیاه شده که خود زوال تدریجی منابع آب و خاک منطقه را باعث خواهد شد. لذا پیشنهاد می‌گردد که از طریق آگوریتم سبال و روش‌های نظیر آن (که به وقت و هزینه کمتری نسبت به سایر روشهای تعیین تبخیر-تعرق واقعی نیاز دارند) اقدام به ارزیابی پارامتر تبخیر-تعرق واقعی گیاهان تحت آبیاری و تخمین آن در هر دشت شده تا به کمک آن منابع و مراجع موجود در زمینه توصیه نیاز آبی گیاه در آن دشت اصلاح شود. این کار ضمن به روزرسانی اطلاعات قدیمی، فرصتی فراهم می‌آورد تا از میزان آب مورد نیاز برای تبخیر-تعرق در هر نوع کشت و یا هر کاربری اراضی آگاه شده و از این طریق دیدگاه‌های مدیریتی حاکم بر منابع آب هر دشت را هدفمند نموده و نهایتاً گامی موثر به سوی اصلاح الگوی مصرف و مدیریت پایدار آب در بخش‌های کشاورزی و منابع طبیعی آن دشت برداشته شود.

مراحل ابتدایی رشد گندم (0/3 تا 0/7)، کمتر از ET_o محاسباتی و حتی کمتر از ET_a تخمینی توسط سبال نیز می‌باشد. از دیگر نکاتی که می‌توان از نمودار مذکور استنباط نمود این است که تنش‌های محیطی و مدیریتی حاکم بر مزارع گندم در منطقه مطالعاتی بیشتر در مراحل میانی و انتهایی فصل رشد وجود دارد. علی‌رغم اینکه این مراحل نقش تاثیرگذاری بر تولید بیومس و عملکرد محصول دارند، اما نتایج این تحقیق نشان‌دهنده این است که گیاه در این مراحل تحت تنش قرار دارد. برای ارزیابی نتایج بدست آمده برای ET_a تجمعی، از مقادیر عملکرد بالقوه (Y_p) و واقعی (Y_a) محصول گندم در منطقه استفاده شده که به ترتیب 5/5 تن در هکتار (بر اساس روش دویت، 1965) و 3 تن در هکتار (میانگین عملکرد مشاهداتی در مزارع انتخابی) است. با توجه به روش عنوان شده برای ارزیابی نتایج، مشخص گردید که تبخیر - تعرق واقعی قابل انتظار برای گیاه گندم در منطقه مطالعاتی حدود 330 میلیمتر بوده که در این مطالعه 13% بیشتر از حد مورد انتظار برآورد گردیده است. بخش عمده ای از این بیش برآورد مربوط به اوایل فصل رشد گندم است که قبلاً به دلایل آن اشاره شده است.

نتیجه گیری و پیشنهادات

روابط تجربی محاسبه تبخیر-تعرق اهمیت قابل توجهی در تخمین نیاز آبی گیاه در مرحله طراحی پروژه‌های آبیاری و تعیین وسعت قابل کشت، انتخاب الگوی کشت و تقویم آبیاری که قرار است بعد از احداث کانالهای آبیاری و تاسیسات انحراف آب تحقق یابد، دارند. اما در مرحله ارزیابی یک پروژه در حال اجرای آبیاری نمی‌توان به راحتی از این روابط استفاده نمود. زیرا آنچه که در یک مزرعه حاکم است متفاوت از شرایط

منابع مورد استفاده

۱. اصغر زاده ح.ع، ثنائی نژاد، ح. 1385. تخمین تبخیر و تعرق گیاهان با استفاده از داده های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در حوزه آبخیز تنگ کنشت کرمانشاه، همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی
۲. پورمحمدی، س. 1388. ارزیابی و برآورد اجزاء بیلان آبی در حوزه های مناطق خشک با بکارگیری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز منشاد یزد)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد
۳. خاوریان نهزک، ح. 1383. برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره ای (مطالعه موردی: مزرعه نمونه ارتش استان گلستان) پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۴. مهتاب قدس. 1372. مطالعه طرح توسعه کشاورزی دشت آزادگان، طرح آبیاری و زهکشی کرخه، مهندسین مشاور مهتاب قدس، تهران.
۵. مهتاب قدس. 1373. مطالعات اصلاح خاک دشت آزادگان، طرح آبیاری و زهکشی کرخه، مهندسین مشاور مهتاب قدس، تهران.
۶. یعقوبی فشکی، م، قبادیان، ر. عقیقی، ر. 1388، کاربرد روش سبال در محاسبه تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره ای، دهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه کرمان
7. Absalan S., Dehghan, E. Abbasi, F. Heydari, N. Farahani, H. Qadir, M. Javadi, A. Siadat, H. Oweis, T. 2007. Evaluation of the Best Management Practices for Improving Water Productivity in the Salt-prone Areas of Lower KRB, Proceedings of the International Workshop on Improving Water Productivity and Livelihood Resilience in Karkheh River Basin in Iran,
8. Akbari M., Toomanian, N. Droogers, P. Bastiaanssen, W. Gieske, A. 2007. Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran, using NOAA satellite imagery, agricultural water management, 88, 99-109.
9. Allen R.G., Pereira, L. Raes, S. Smith, M. D. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements, Irrigation and Drainage Paper no. 56, FAO, Rome, Italy: 300 pp.
10. Allen R.G., Tasumi, M. Morse, A.T. Trezza, R. 2005. A Landsat-based Energy Balance and Evapotranspiration Model in Western US Water Rights Regulation and Planning. *Journal of Irrigation and Drainage Systems*, 19 (3-4): 251-268(18)
11. Bastiaanssen W.G .M. 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates, Ph.D. Dissertation, CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, The Netherlands.
12. Bastiaanssen W .G. M., Menenti, M. Feddes, R.A. Holtslag, A.A.M. 1999, A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1) Formulation. *Journal of Hydrology*, 212 (213):213-229.
13. Bastiaanssen W.G.M., 2000, SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229:87-100.
14. Bastiaanssen W.G.M., Noordman, E.J.M. Pelgrum, H. Davids, G. Thoreson, B.P. Allen, R.G. 2005. SEBALmodel with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131 (1):85-93.
15. Brutsaert W., Chen, D. 1996. Diurnal variation of surface fluxes during thorough drying (or severe drought) of natural prairie. *Water Resour. Res.* 32 (7), 2013–2019.

16. Doorenbos J., Pruitt, W.O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome, 144 pp.
17. Doorenbos J., Kassam, A.H. Bentvelsen, C.L.M. Branscheid, V. Plusje, J.M.G.A. 1979. Yield response to water, In: FAO Irrigation and Drainage Paper (FAO), no. 33 / FAO, Rome (Italy). Land and Water Development Div., 200 p.
18. Heydari N., Cheraghi, S.A.M. 2008. Overview of Soil and Water Resources and Salinity in Lower Karkheh River Basin. In: T. Oweis et al., A compendium of review papers on "Improving on- farm agricultural water productivity in the Karkheh River Basin part 1" Tehran, Iran.
19. Kustas, W. P. 1994. Surface energy balance estimates at local and regional scales using optical remote sensing from an aircraft platform and atmospheric data collected over semiarid rangelands, *Water Resour. Res.*, 30_5_, 1241–1259.
20. Mokhtari M. H. 2005. Agricultural Drought Impact Assessment Using Remote Sensing, Msc thesis, ITC, The Netherland.
21. Mekonnen A, Michael, G. Bastiaanssen, W.G.M. 2000. A new simple method to determine crop coefficients for water allocation planning from satellites: results from Kenya, *Irrigation and Drainage Systems* 14: 237–256.
22. Norman J. M., Kustas, W. P. Humes, K. S. 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature, *Agric. Forest Meteorol.*, 77, 263–293.
23. Poormohammadi, S., Rahimian M. H., Taghvaeian, S. 2010. Applying Remotely Sensed Energy Balance Models in Iran: Potentials and Limitations, Oral presentation in *Remote sensing and Hydrology 2010 International Symposium*, Jackson Hole, Wyoming, USA.
24. Qualls, R., Brutsaert, W. 1996. Effect of vegetation density on the parameterization of scalar roughness to estimate spatially distributed sensible heat fluxes, *Water Resour. Res.*, 32_3_, 645–652.
25. Rahimian M.H., Poormohammadi S., Mokhtari M. H, 2011, Determination of winter wheat crop coefficient using MODIS-derived vegetation indices, A case study of the Azadegan plain, *Proceedings of the 21st International Congress on Irrigation and Drainage*, Tehran, Iran
26. Sharifi, M. A., Bastiaanssen, W.G.M. Zwart, S.J. 2008. Development of a decision support system for natural damage assessment based on remote sensing and biophysical models, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B2.
27. Shuttleworth, W. J., Gurney, R. J. Hsu, A.Y. Ormsby, J.P. 1989. FIFE: the variation in energy partitioning at surface flux sites, remote sensing and large-scale global processes. In: *Proc. Baltimore Symp., IAHS Red Book Series*, vol. 186. pp.67–74.
28. Wright J. L. 1982. new evapotranspiration crop coefficients, *Journal of the Irrigation and Drainage division, ASCE* 108: 57–74.