

برآورد تبخیر- تعرق واقعی، بهره‌وری تبخیر- تعرق و بازده آبیاری مزارع گندم در سیستم‌های آبیاری سطحی و بارانی با استفاده از سنجش از دور

فاطمه قاسمی سعادت‌آبادی^۱، شاهرخ زند پارسا^{۱*} و مهدی مهدی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۷)

چکیده

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مدیریت منابع آب و بهینه‌سازی مصرف آب در تأمین نیاز آبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌منظور بهینه‌سازی مصرف آب در مزرعه باید از میزان تبخیر- تعرق واقعی آگاه بود تا علاوه بر اجتناب از بروز تنش خشکی و کاهش محصول، از مصرف بیش از اندازه آب نیز جلوگیری شود. از آنجایی که برآورد تبخیر- تعرق واقعی گیاه با استفاده از روش‌های سنتی در مناطق وسیع امکان‌پذیر نیست. بنابراین، استفاده از الگوریتم‌های سنجش از دور برای برآورد آن، در این مناطق توصیه می‌شود. در این تحقیق، تبخیر- تعرق واقعی گندم با استفاده از الگوریتم METRIC (الگوریتم تهیه نقشه تبخیر- تعرق با توان تفکیک بالا به همراه واسنجی درونی)، داده‌های هواشناسی و تصاویر ماهواره Landsat8 در اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در سال ۱۳۹۶-۱۳۹۵ برآورد شد. در فرایند اجرای مدل متریک، جهت محاسبه مقدار شار گرمای محسوس مزرعه گندم که به تازگی آبیاری شده بود به عنوان پیکسل سرد انتخاب شد و در نهایت مقدار تبخیر- تعرق با استفاده از آن برآورد شد. مقادیر حداکثر تبخیر- تعرق برآورد شده با الگوریتم METRIC با استفاده از مقادیر تهیه شده از مدل واسنجی شده AquaCrop با دقت خوبی با NRMSE (ریشه متوسط مربع خطای نرمال شده) برابر ۰/۱۲ اعتبارسنجی شد. در نهایت با استفاده از مقادیر برآورد شده تبخیر- تعرق از تکنیک سنجش از دور با مدل متریک، حجم آب آبیاری و مقدار کل محصول اندازه‌گیری شده، بهره‌وری تبخیر- تعرق و بازده آبیاری برای تمام مزارع گندم به وسعت ۱۷۹ هکتار به ترتیب برابر ۰/۸۶ کیلوگرم بر مترمکعب و ۷۵٪ برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، METRIC، مدیریت آبیاری، Landsat8، بهره‌وری آب، AquaCrop

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: zandparsa@yahoo.com

مقدمه

به گزارش موسسه بین المللی مدیریت آب (IWMI)، کشور ایران برای حفظ وضع فعلی خود تا سال ۲۰۲۵ باید بتواند ۱۱۲ درصد به منابع آب قابل استحصال خود بیفزاید. این امر با توجه به پتانسیل‌ها و نیازهای روزافزون بخش‌های کشاورزی، شرب، صنعت و حفاظت از سایر منابع زیستی بسیار مشکل و حتی ناممکن است. بنابراین، در چنین شرایطی یکی از راهکارهای مؤثر و عملی استفاده بهینه و صرفه‌جویی در مصرف آب است. بخش قابل توجهی از آب مصرفی در کشورهای خشک و نیمه‌خشک مانند ایران به کشاورزی اختصاص دارد، بنابراین بهینه‌سازی و مدیریت منابع آب بدون توجه به مدیریت مصرف آب در کشاورزی موفقیت آمیز نخواهد بود (۱). توسعه کشاورزی و تولید پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک به افزایش کارایی مصرف و بهبود بازده آبیاری بستگی دارد. بهره‌وری (Water Productivity) WP به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است تا نسبت محصول (به صورت محصول فتوسنتز، محصول بیولوژیک، یا محصول اقتصادی) بر واحد حجم آب مصرفی (به صورت حجم آب تعرق شده، تبخیر-تعرق، و یا حجم آب آبیاری) را بیان نماید (۱۲). زارت و باستانسن (۲۱) بر اساس مطالعه ۸۴ منبع تحقیقاتی مربوط به ۲۵ سال اخیر بیان کردند، متوسط شاخص بهره‌وری تبخیر-تعرق (مقدار محصول به حجم تبخیر-تعرق) محصول گندم برابر ۱/۰۹ کیلوگرم بر مترمکعب بود، که دامنه شاخص بهره‌وری تبخیر-تعرق برای گندم ۱/۷-۰/۶ کیلوگرم در مترمکعب بوده است. آنها دلیل تغییرات در مقدار این شاخص را به طور عمده به عوامل اقلیم، مدیریت آبیاری و مدیریت کود نسبت دادند. نتیجه بارز این تحقیق این است که شاخص به مقدار زیادی می‌تواند در صورت کاهش مقدار آبیاری و اعمال کم آبیاری افزایش یابد (۲۱).

معیار ارزیابی روش‌ها و سیستم‌های آبیاری تعیین بازده آبیاری در اجزاء مختلف یک سیستم آبیاری است. بازده آبیاری پروژه‌های آبیاری عبارت است از نسبت آب ذخیره شده در

ناحیه ریشه در مزرعه به آب تأمین‌شده از منبع اصلی آبیاری. مطالعات زیادی در زمینه بازده‌های مختلف آبیاری (شامل بازده کاربرد، انتقال و توزیع، و بازده کل) در کشور انجام شده است. عباسی و همکاران (۱) تحقیقی جامع در زمینه روند تغییرات زمانی و مکانی راندمان‌های آبیاری در کشور انجام داده‌اند و نتایج بیش از ۲۰۰ مطالعه انجام شده طی سال‌های ۱۳۷۰-۱۳۹۴ در کشور را از جنبه‌های مختلف مورد ارزیابی و مقایسه قرار داده‌اند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که بازده کاربرد آب آبیاری در کشور از ۲۲/۵ تا ۸۵/۵ درصد متغیر و میانگین آن ۵۶ درصد بود. متوسط بازده کاربرد در سامانه‌های کرتی، نواری و جویچه‌ای به ترتیب ۵۵/۳، ۵۲/۹ و ۵۲/۵ درصد بود. میانگین بازده کاربرد آب آبیاری در روش‌های آبیاری بارانی حدود ۶۲/۱ و در روش‌های آبیاری قطره‌ای ۷۱/۱ درصد بود. بررسی روند تغییرات بازده طی سال‌های مختلف نشان داد که بازده کاربرد آبیاری در دو دهه ۷۱-۸۰ و ۸۱-۹۰ و نیم‌دهه ۹۱-۹۴ به ترتیب ۵۲، ۵۸/۴ و ۵۸/۸ درصد بوده است. همچنین بررسی‌ها نشان داد بازده انتقال و توزیع (به معنی تلفات آب در کانال‌های انتقال و توزیع) نیز در دهه‌های مذکور به ترتیب ۶۷/۰، ۶۸/۵ و ۷۴/۲ درصد بوده است. بدین ترتیب بازده کل در دهه‌های یاد شده به ترتیب ۳۴/۸، ۴۰/۰ و ۴۳/۶ درصد برآورد شد (۱). سپاسخواه (۱۶) بیان کرد که یکی از علت‌های حصول مقادیر کم بازده آبیاری پروژه‌ها در ایران، روش نه‌چندان درستی است که در اندازه‌گیری بازده کاربرد آبیاری مزرعه به کار گرفته شده است، و با اصلاح روش تعیین بازده کاربرد آبیاری مقادیر قابل قبولی در حد حتی بیش از ۷۰ درصد حاصل گردید.

برای بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی، برنامه‌ریزی و مدیریت درست آبیاری می‌تواند یک راه مفید و مؤثر باشد. در این راستا اندازه‌گیری یا برآورد دقیق تبخیر-تعرق واقعی ضروری است. اندازه‌گیری تبخیر-تعرق و محاسبه آن در شرایط واقعی به روش‌های مختلفی مانند لایسیمتر، ادی‌کوارانس و سایر روش‌ها صورت می‌گیرد. تبخیر-تعرق

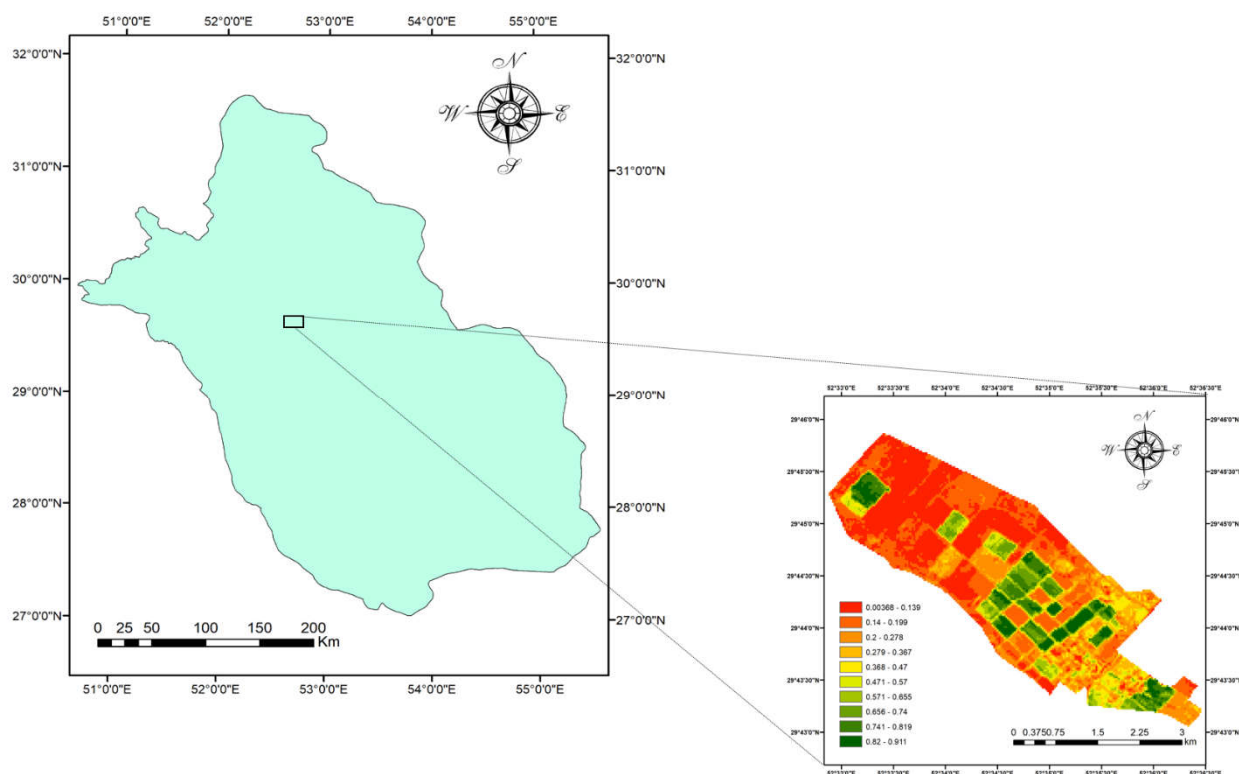
پژوهش‌های انجام شده گویای این است که، الگوریتم METRIC از دقت بالایی در برآورد تبخیر- تعرق واقعی برخوردار است، بنابراین، در این مطالعه تبخیر- تعرق اراضی دانشکده کشاورزی با استفاده از الگوریتم METRIC و تصاویر لندست ۸ محاسبه شد. با استفاده از حجم تبخیر- تعرق محاسبه شده و مقادیر اندازه گیری شده محصول گندم و حجم آب آبیاری و بارندگی، مقدار بهره‌وری تبخیر- تعرق و بازده آبیاری برآورد گردید.

مواد و روش‌ها

این مطالعه روی مزارع گندم دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز (طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی و عرض ۲۹ درجه و ۵۶ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۸۱۰ متری از سطح دریا) در سال ۱۳۹۶-۱۳۹۵ که تقریباً برابر ۱۷۹ هکتار بود انجام شد. آبیاری بیش از نیمی از مزارع به روش آبیاری بارانی و مابقی به روش آبیاری سطحی انجام می‌شد. کل حجم آبیاری اندازه‌گیری شده برای این دوره ۱۶۵۸۴۰۶ متر مکعب بود (۱۳). منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است.

در این پژوهش ۱۵ تصویر لندست ۸ مورد استفاده قرار گرفت. لندست ۸ به عنوان سیستم مناسب از نظر بهبود و دریافت داده‌ها محسوب می‌شود. این ماهواره در ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ بعد از سه ماه آزمون به فضا پرتاب شد و در فاصله ۷۰۵ کیلومتری از سطح زمین با مدار قطبی قرار گرفته و تاکنون در حال تصویربرداری و جمع‌آوری اطلاعات است. لندست ۸ در ۱۶ روز کل زمین را پوشش می‌دهد. ساعت عبور آن از خط استوا ۱۰ صبح به وقت محلی است. دارای دو سنجنده حساس (Operational Land Imager (OLI)) جهت جمع‌آوری داده‌ها از باندهای مرئی، مادون قرمز و طول موج‌های کوتاه مادون قرمز و سنجنده حرارتی مادون قرمز (Thermal InfraRed Sensor) (TIRS) به منظور اندازه‌گیری دمای سطح زمین است. برای تهیه مدل رقومی ارتفاع، ۳۰ متری

واقعی با تغییر روز سال، موقعیت جغرافیایی، ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک، بارش و نوع و تراکم پوشش گیاهی تغییر می‌کند. بنابراین، برآورد آن در مقیاس جغرافیایی وسیع با استفاده از روش‌های سنتی امکان‌پذیر نیست. با استفاده از سنجنش از دور و پردازش تصاویر ماهواره‌ای می‌توان تبخیر- تعرق را برای مناطق وسیع با دقت خوبی برآورد نمود. مدل‌های مختلفی توسط پژوهشگران ارائه شده است که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های زمینی شار انرژی در سطح برآورد می‌شود. این مدل‌ها در مطالعات گوناگونی در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته و اعتبارسنجی شده‌اند. آلن و همکاران (۴) در پژوهشی مقدار تبخیر- تعرق برای چمن و چغندر قند را با استفاده از مدل METRIC برآورد نمودند و نتایج بدست‌آمده را با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر مورد مقایسه قرار دادند. مقدار خطا برای برآورد تبخیر- تعرق را چهار درصد در فصل رشد بدست آوردند. در طی مطالعه‌ای، فولهس و همکاران (۸) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست و مدل توازن انرژی METRIC مقدار تبخیر- تعرق را در برزیل محاسبه کردند. نتایج نشان داد که می‌توان از مدل METRIC به منظور برآورد مصرف آب و بهبود مدیریت آب در نواحی نیمه‌خشک و اراضی فاریاب شمال شرق برزیل استفاده نمود. جمشیدی و همکاران (۱۱) جهت بررسی دقت مدل SEBS و METRIC در برآورد تبخیر- تعرق با تصاویر ماهواره‌ای با وضوح متفاوت، در طی مطالعه‌ای مقدار تبخیر- تعرق را با استفاده از الگوریتم‌های SEBS و METRIC و تصاویر لندست و مادیس برای یک منطقه خشک و نیمه‌خشک به نام گربایگان در جنوب ایران مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که نتایج مقدار تبخیر- تعرق بدست آمده از تصاویر مادیس برای مناطق پوشش گیاهی تنک و ناهمگن کم‌تر از مقدار واقعی بود. و تبخیر- تعرق بدست آمده با استفاده از تصاویر لندست با تفکیک مکانی پایین‌تر در مقایسه با تصاویر مادیس دقت بالاتری داشت. میانگین خطای مدل‌های METRIC و SEBS به ترتیب برابر ۵٪ و ۱۳٪ بود.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

در مدل METRIC تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بر اساس معادله بیلان انرژی محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای مربوط به زمان گذر ماهواره است، مدل METRIC امکان محاسبه شار گرمای نهان لحظه‌ای را در زمان تصویر ممکن می‌سازد. در واقع تابش خالصی که از جو به زمین می‌رسد شامل سه قسمت می‌شود. بخشی باعث گرم شدن هوای بالای سطح زمین، بخشی صرف انتقال به داخل خاک و بقیه باعث تبخیر- تعرق می‌شود. بیلان انرژی را می‌توان به صورت رابطه ۱ بیان نمود:

$$R_n = \lambda ET - G - H \quad (1)$$

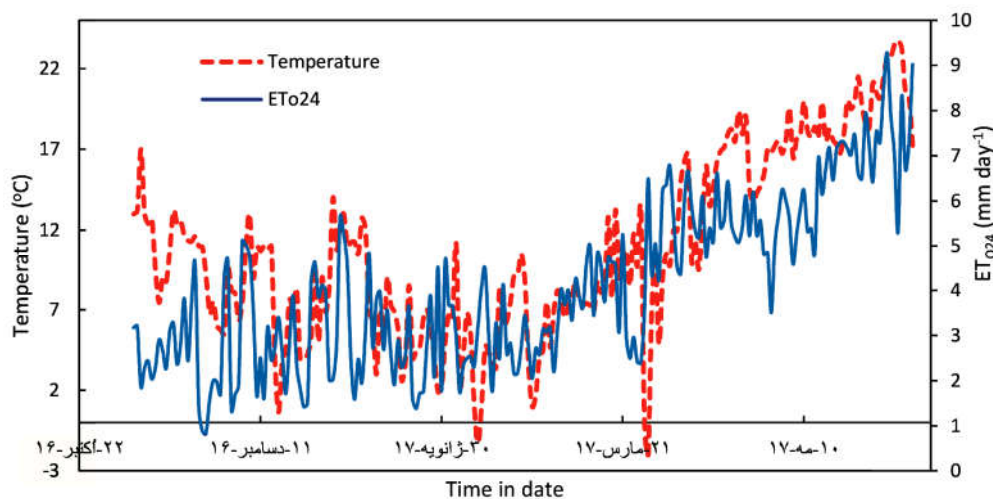
که در آن، λET گرمای نهان مبادله شده برای تبخیر- تعرق واقعی، R_n : شار تابش خالص در زمین، G : شار گرمای خاک و H گرمای محسوس است. در مدل‌سازی صورت گرفته، اجزای معادله بالا بر طبق اساس نظری آن کدنویسی شد (۵).

منطقه از سنجنده SRTM استفاده شد. تصاویر مورد نیاز از مسیرهای ۱۶۲-۳۹ و ۱۶۳-۳۹ به صورت رایگان از سایت (earthexplorer.usgs.gov) تهیه گردید. جهت اجرای مدل از نرم افزار ERDAS Imagine که یکی از نرم افزارهای معروف و محبوب سنجش از دور برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای استفاده شد. با استفاده از توابع تحلیلی این نرم افزار می‌توان پیش‌پردازش و پردازش تصاویر ماهواره‌ای را انجام داد. داده‌های هواشناسی مورد نیاز، از جمله: دمای هوا، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی و تابش خورشیدی (R_s) از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک فرودگاه شیراز اخذ شد. اطلاعات ساعتی هواشناسی در جدول (۱)، تغییرات دما، تبخیر- تعرق گیاه مرجع روزانه در شکل (۲) و مقدار بارش ماه‌های مختلف در طول فصل رشد در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱. داده‌های ساعتی دما (T)، رطوبت نسبی (RH)، سرعت باد (W) (ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی)، تابش خورشیدی (Rs) (ایستگاه هواشناسی سینوپتیک فرودگاه شیراز) و تبخیر- تعرق محاسبه شده گیاه مرجع (ET_o) در لحظه عبور ماهواره لندست برای اراضی

دانشکده کشاورزی

Date	T °C	RH (%)	W (m s ⁻¹)	Rs (W m ⁻²)	ET _o (mm hour ⁻¹)
2016.11.13	20.3	12.6	0.4	630.0	0.4
2016.11.20	17.6	20	0.4	533.4	0.4
2017.01.07	8.3	16.0	0.1	557.3	0.3
2017.03.05	11.9	30.1	0.7	765.9	0.4
2017.03.12	15.8	32.0	2.5	631.4	0.4
2017.03.21	10.9	34.7	1.2	836.4	0.5
2017.03.28	14.6	32.8	1.2	879.9	0.5
2017.04.06	15.1	16.9	1.5	917.8	0.5
2017.04.13	24.4	21.8	0.8	881.1	0.6
2017.04.22	21.3	14.4	2.0	927.2	0.7
2017.04.29	23.8	26.2	0.8	589	0.5
2017.05.08	22.9	39.3	1.3	797.9	0.6
2017.05.15	24.1	19.9	1.0	957.3	0.7
2017.05.24	28.2	17.9	2.4	901.6	0.8
2017.05.31	31.3	10.4	1.7	966.2	0.8
2017.06.09	31.9	9.8	1.4	948.8	0.8



شکل ۲. تغییرات دما (T) و تبخیر- تعرق روزانه محاسبه شده گیاه مرجع (ET_{o24}) در طول فصل رشد گندم زمستانه (ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی)

جدول ۲. مقدار بارش ماهانه (P) در طول فصل رشد (ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی)

تاریخ	مقدار بارش
	mm/month
16.Nov	11.3
16.Dec	7
17.Jan	27.5
17.Feb	186.1
17.Mar	107
17.Apr	6.5
17.May	22.5

شاخص سطح برگ (LAI) (Leaf Area Index)

مقدار شاخص سطح برگ (LAI) برابر با سطح برگ سبز گیاه در واحد سطح زمین است. LAI به صورت مستقیم ساختار سایبان را اندازه‌گیری می‌کند و می‌تواند برای برآورد بهره‌وری اولیه و رشد محصول استفاده شود که به طور معمول در مدل‌های اکوسیستم استفاده می‌شود زیرا تأثیر مهمی بر مبادلات انرژی، بخار آب و دی‌اکسید کربن بین گیاهان و اتمسفر دارد. مقدار LAI می‌تواند از تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از روش‌های مختلف برآورد شود، که در مدل METRIC برای محاسبه LAI از رابطه ۴ استفاده می‌شود (۵):

$$LAI = \frac{\ln[(0.69 - SAVI_{ID}) / 0.59]}{0.91} \quad (4)$$

حداکثر مقدار LAI برابر ۶ است که از مقدار SAVI برابر ۰/۶۹ بدست می‌آید. برای مقادیر SAVI‌های بیشتر از ۰/۶۹ مقدار LAI برابر ۶ است. در مدل METRIC هرگاه SAVI=0.1، مقدار LAI برابر صفر می‌شود. دقت برآورد LAI به ویژگی‌های خاک و محصول بستگی دارد (۵) که ممکن است نیاز به واسنجی محلی یا منطقه‌ای داشته باشد. باین حال تأثیر خطای حاصله از خطای LAI در محاسبه بیلان انرژی مدل METRIC کوچک است.

تابش خالص (R_n)

تابش خالص در سطح نشان‌دهنده تفاضل تابش ورودی و خروجی در سطح است. و از تفاضل تابش‌های خروجی از تابش‌های ورودی محاسبه می‌شود که معادله آن به صورت رابطه ۲ است:

$$R_n = R_{S\downarrow} - \alpha R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - R_{L\downarrow} (1 - \epsilon_0) \quad (2)$$

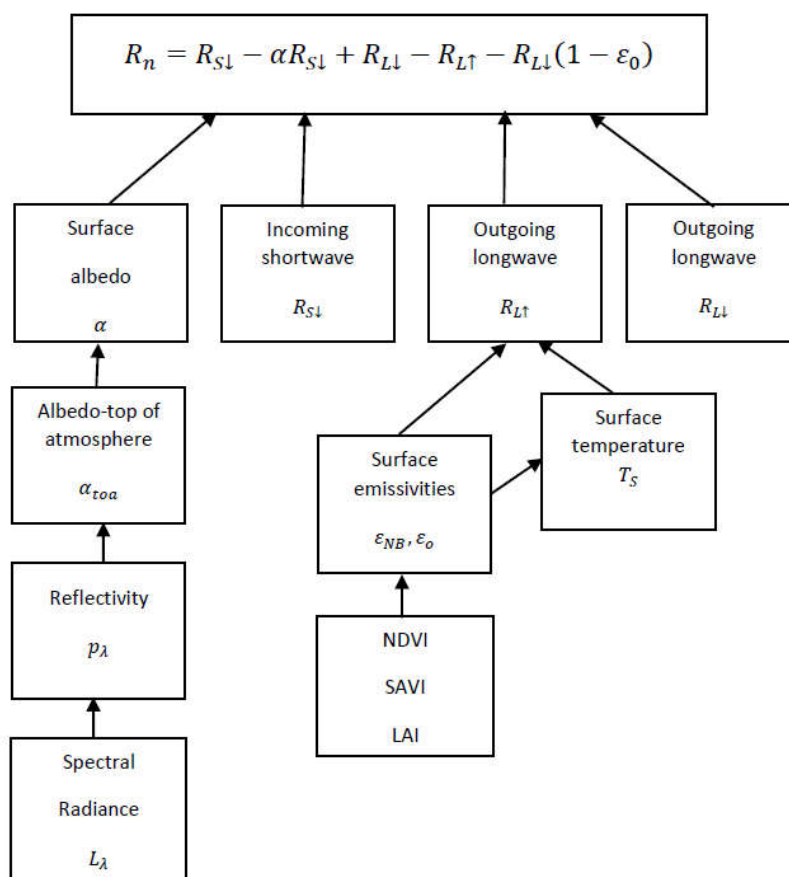
که در آن، $R_{S\downarrow}$ تابش موج کوتاه ورودی ($W m^{-2}$)، $R_{L\downarrow}$ تابش موج بلند ورودی ($W m^{-2}$)، $R_{L\uparrow}$ تابش موج بلند خروجی ($W m^{-2}$)، α ضریب سپیدایی سطحی و ϵ_0 ضریب گسیلمندی حرارتی سطحی (بدون بعد) و $(1 - \epsilon_0)$ معرف کسری از تابش طول موج بلند ورودی است که از سطح منعکس می‌شود. مراحل محاسبه تابش خالص در فلوجارت شکل (۳) نشان داده شده است.

تابش موج بلند خروجی

تابش موج بلند به وسیله معادله استفان بولتزمن به صورت رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$R_{L\uparrow} = \epsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (3)$$

در معادله فوق ϵ_0 گسیلمندی حرارتی سطح زمین (بدون بعد)، σ ثابت استفان بولتزمن و برابر $5.67 \times 10^{-8} (W m^{-2} K^{-4})$ و T_s دمای سطح زمین (K) است.



شکل ۳. فلوچارت محاسبه تابش خالص سطح (۱۰)

شاخص SAVI

استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی سنجش از دور مانند (NDVI) و (SAVI) برای برآورد ضرایب گیاهی در مقیاس مزرعه‌ای و منطقه‌ای بررسی شده است (۷، ۹ و ۱۵). در مناطقی که سطح پوشش گیاهی کم است (به عنوان مثال، کمتر از ۴۰ درصد) و سطح خاک در معرض، بازتابی از نور در طیف‌های قرمز و مادون قرمز قرار گرفته است مقادیر شاخص‌های گیاهی را تحت تأثیر قرار می‌گیرد. SAVI بر اساس بازتاب رسیده به سنجنده (بازتاب در بالای اتمسفر) محاسبه می‌شود (رابطه ۵) (۹):

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{t,5} - \rho_{t,4})}{L + (\rho_{t,5} + \rho_{t,4})} \quad (5)$$

در اینجا SAVI شاخص پوشش گیاهی و خاک، $\rho_{t,5}$ بازتاب طیفی باند ۵ با طول موج ۰/۸۵-۰/۸۸، $\rho_{t,4}$ بازتاب طیفی باند

۴ با طول موج ۰/۶۴-۰/۶۷ و L عددی ثابت است که معمولاً برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. برای استفاده از مدل METRIC در غرب آمریکا با توجه به مطالعه از $L=0.1$ استفاده شد (۱۸). در این مطالعه نیز $L=0.5$ فرض گردید. شاخص NDVI برابر نسبت تفاضل بازتاب‌های باند مادون قرمز و باند قرمز به مجموع آنها است (رابطه ۶).

$$NDVI = \frac{(\rho_{t,5} - \rho_{t,4})}{(\rho_{t,5} + \rho_{t,4})} \quad (6)$$

قانون کلی این شاخص به این صورت است که درجایی که کلروفیل وجود دارد، طیف قرمز باعث جذب قابل توجهی از نور خورشید شده درحالی که ساختمان برگ، فضای بین سلولی و آب داخل سلولی در ساختار اسفنجی مزوفیل برگ، باعث بازتاب شدید طیف مادون قرمز نزدیک (NIR) می‌شود (۱۹).

تابش موج بلند دریافتی

مقدار تابش موج بلند دریافتی با استفاده از معادله استفان بولتزمن به شرح زیر محاسبه می‌شود (رابطه ۷):

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (7)$$

در اینجا ε_a گسیلمندی حرارتی اتمسفر (بدون بعد) و T_a دمای هوای نزدیک سطح (K) است.

شار گرمای خاک

در مدل METRIC مقدار G بر اساس نسبت $\frac{G}{R_n}$ به شرح زیر برآورد می‌شود (رابطه‌های ۸ و ۹) (۵ و ۶):

$$\frac{G}{R_n} = 0.05 + 0.18 \times e^{-0.521 \times LAI} \rightarrow LAI \geq 0.5 \quad (8)$$

$$\frac{G}{R_n} = \frac{1.8 \times (T_s - 273.15)}{R_n} + 0.084 \rightarrow LAI < 0.5 \quad (9)$$

در معادله‌های فوق، a ضریب بازتاب سطح، T_s دمای سطح (K) و NDVI شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی است.

شار گرمای محسوس

شار گرمای محسوس با استفاده از اختلاف دمای هوای بین دو نقطه نزدیک سطح به ارتفاع‌های ۰/۱ و ۲ متر از سطح زمین و مقاومت آئرودینامیک برای انتقال گرما به شرح زیر است (رابطه ۱۰):

$$H = \rho_{air} \times C_p \times \frac{dT}{r_{ah}} \quad (10)$$

که در آن ρ_{air} چگالی هوا (kg m^{-3})، C_p ظرفیت گرمایی هوا در فشار ثابت ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) است. از آنجایی که dT مجهول است، لازم است برای محاسبه H چندین بار سعی و خطا انجام شود. در تکرار اول شرایط پایداری اتمسفر خنثی در نظر گرفته شد. برای محاسبه dT کل پیکسل‌ها، یک رابطه خطی بین dT و دمای سطح زمین به شرح زیر در نظر گرفته شده است (رابطه ۱۱):

$$dT = a + bT_s \quad (11)$$

در اینجا a و b پارامترهای تجربی هستند که براساس دو

پیکسل آستانه گرم و سرد برآورد می‌شوند. پیکسل‌های گرم و سرد به ترتیب نشان‌دهنده مرز بالا و پایین مقدار شار گرمای محسوس برای منطقه مورد مطالعه هستند. پیکسل گرم زمین کشاورزی فاقد پوشش گیاهی است که در صورت خشک بودن می‌توان تبخیر-تعرق آن را صفر فرض کرد. در صورت صفر بودن تبخیر از سطح خاک، مقدار dT_{hot} به شرح زیر در مدل METRIC شبیه سازی می‌شود (رابطه ۱۲):

(۱۲)

$$dT_{hot} = \frac{H_{hot} \times r_{ah}}{\rho_{air} \times C_p} \xrightarrow{\text{if } LE_{hot}=0} dT_{hot} = \frac{(R_n - G) \times r_{ah}}{\rho_{air} \times C_p}$$

در روزهایی که بارندگی رخ داده است و سطح زمین خیس است، ضریب تبخیر از سطح خاک (K_e) محاسبه گردیده و معادله ۱۲ به صورت رابطه ۱۳ درمی‌آید:

$$dT_{hot} = \frac{(R_n - G - K_r \times K_{ex} \times ET_0) \times r_{ah}}{\rho_{air} \times C_p} \quad (13)$$

مقدار K_{ex} حداکثر ضریب تبخیر از سطح خاک (۱/۱) برای خاک اراضی دانشکده کشاورزی است (۲۰) و مقدار K_r ضریب کاهش تبخیر در فاز دوم تبخیر از سطح خاک است که با استفاده از روش آلن و همکاران (۲) به صورت رابطه ۱۴ برآورد می‌شود:

$$K_r = \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} \quad \text{for } D_{e,i-1} > REW \quad (14)$$

که در آن مقدار K_r به تخلیه آب از لایه خاک سطحی بستگی دارد، $D_{e,i-1}$ عمق تجمعی تبخیر (تخلیه) آب از لایه خاک سطحی در پایان روز $i-1$ ام (روز قبل، mm)، TEW حداکثر عمق آب قابل تبخیر (تخلیه) از لایه خاک سطحی (mm) و REW عمق تجمعی تبخیر آسان خاک در پایان مرحله اول تبخیر (mm) هستند. پیکسل دوم، پیکسل سرد نام دارد که مربوط به زمین کشاورزی است که از تراکم پوشش گیاهی بالایی برخوردار بوده و کاملاً آبیاری می‌شود (تنش آبی در آن وجود ندارد) و تبخیر-تعرق در آن حداکثر و در نتیجه دمای آن

دوره روزانه به صورت رابطه ۱۹ است (۲):

$$ET_0 = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta(R_n - G) + pC_p(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})} \frac{1}{r_a} \quad (19)$$

در اینجا، ET_0 تبخیر- تعرق گیاه مرجع ($mm \ day^{-1}$)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع نسبت به دمای هوا ($kpa \ ^\circ C^{-1}$)، R_n تابش خالص ($MJ \ m^{-2} \ day^{-1}$)، G شار حرارتی خاک ($MJ \ m^{-2} \ day^{-1}$)، γ ثابت سایکرومتری ($kpa \ ^\circ C^{-1}$)، P چگالی اتمسفر ($kg \ m^{-3}$)، C_p گرمای ویژه هوا در فشار ثابت ($kJ \ kg^{-1} \ ^\circ C^{-1}$)، e_s میانگین فشار بخار اشباع هوا (kpa)، e_a میانگین فشار بخار واقعی هوا (kpa)، r_c مقاومت سایه انداز، r_a مقاومت آیرودینامیک است. جهت اصلاح معادله پنمن مانیتث برای منطقه کوشک مقدار r_a را برابر $\frac{83.7}{u_2}$ قرار داده شد (۱۴).

تئوری مدل AquaCrop

مدل AquaCrop یک مدل ساده، دقیق و توانمند است و در مقایسه با مدل‌های دیگر به داده‌های ورودی کمتری نیاز دارد. در این مطالعه، از مدل واسنجی شده AquaCrop (زندپارسا و همکاران (۲۰))، در برآورد مقدار تبخیر- تعرق در شرایط استاندارد برای اراضی مورد مطالعه استفاده گردید. مدل AquaCrop به وسیله تفکیک تبخیر- تعرق به تعرق از سطح پوشش گیاهی (T_r) و تبخیر از سطح خاک E بنا شده است. در مدل AquaCrop، مقدار تبخیر- تعرق استاندارد با استفاده از رابطه ۲۰ محاسبه می‌شود:

$$ET = (K_{cb} + K_e) ET_0 \quad (20)$$

که در آن K_e ضریب تبخیر از سطح خاک، K_{cb} ضریب تعرق گیاه و ET_0 تبخیر- تعرق گیاه مرجع است. برای محاسبه تبخیر- تعرق بالقوه گندم به روش ضریب گیاهی دوگانه، از مدل واسنجی شده AquaCrop استفاده شد (۲۰).

پایین‌تر از سایر نقاط است (۵). پس از انتخاب پیکسل سرد مقدار dT_{cold} با استفاده از معادله ۱۵ برآورد می‌شود:

$$dT_{cold} = \frac{H_{cold} \times r_{ah}}{\rho_{air} \times C_p} \quad (15)$$

مقادیر dT و T_s برای هر پیکسل محاسبه می‌شوند و سپس برای محاسبه پارامترهای a و b در معادله ۱۱ جایگذاری می‌شوند. با استفاده از این رابطه می‌توان dT و H را برای هر پیکسل مطابق شکل (۴) محاسبه کرد.

در تکرارهای بعد، از طول Monin-Obukov برای محاسبه پارامترهای ثابت اتمسفر استفاده شد که از آن‌ها برای محاسبه r_{ah} اصلاح شده استفاده می‌شود. پارامترهای اصلاح شده a و b از پیکسل‌هایی که از قبل تعریف شده با مقادیر به روز شده dT پیدا شده است. دوباره از معادله ۱۰ و مقادیر اصلاح شده r_{ah} و dT برای پیدا کردن شار حرارتی معقول استفاده می‌شود و این فرایند تکرار تا زمانی که به یک r_{ah} ثابت برسد ادامه دارد. پس از برآورد مقادیر R_n ، G و H مقدار LE برآورد می‌شود و سپس ET (لحظه‌ای از معادله ۱۶) تعریف می‌شود:

$$ET_{inst} = 3600 \frac{LE}{\lambda} \quad (16)$$

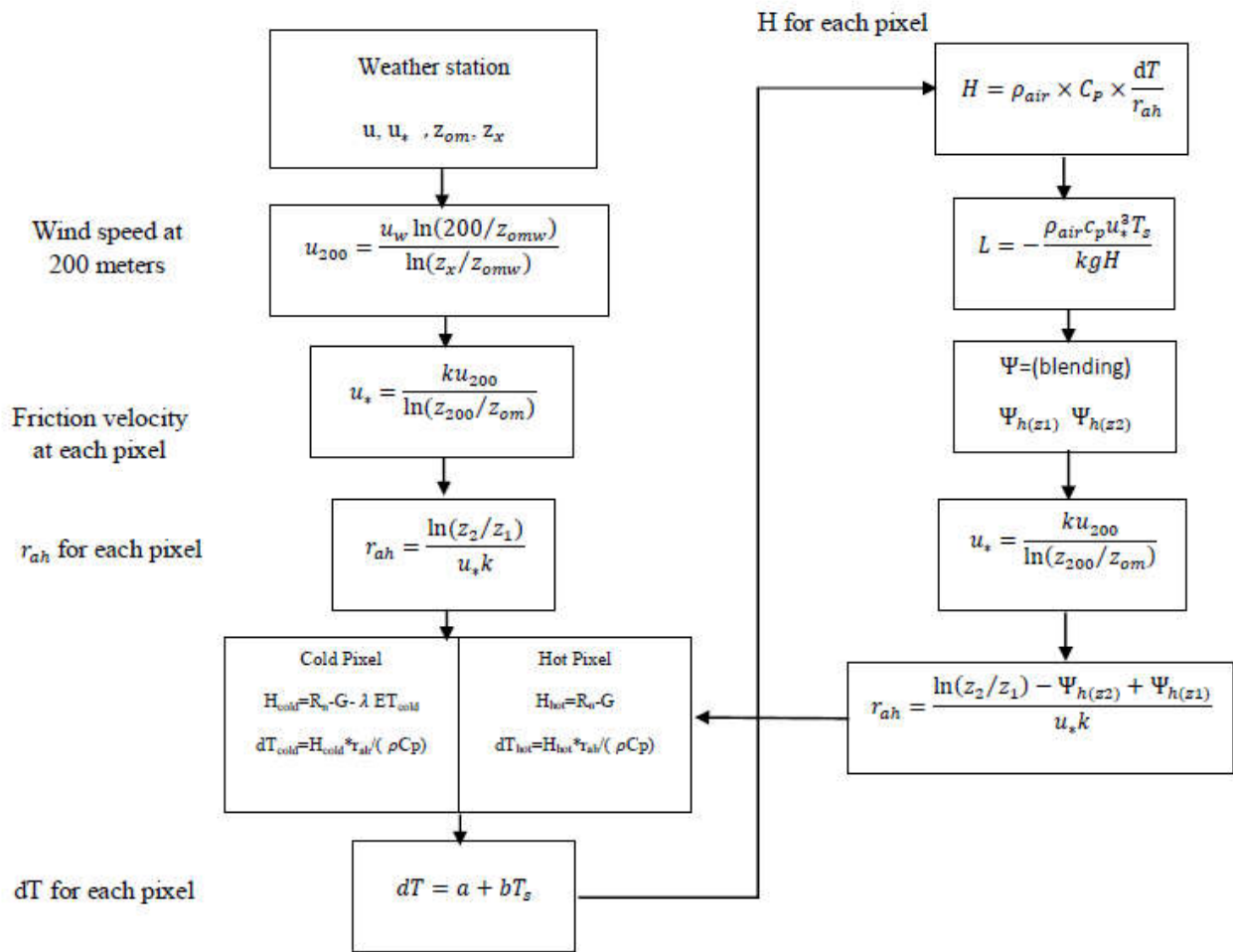
در استخراج مقدار ET روزانه (ET_{24}) از ET لحظه‌ای (ET_{inst}) فرض شده است که نسبت (ET_{inst}) به ET_0 در لحظه عبور لندست برابر با میانگین (ET_rF) در طول آن روز است (رابطه ۱۷):

$$ET_rF = \frac{ET_{inst}}{ET_0} \quad (17)$$

تبخیر- تعرق واقعی روزانه (ET_{24}) با استفاده از مقدار روزانه تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET_{024}) و نسبت ET_rF به صورت رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود:

$$ET_{24} = ET_{024} \times ET_rF \quad (18)$$

برای محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع ساعتی و روزانه از معادله پنمن مانیتث ترکیبی استفاده خواهد شد. این معادله برای



شکل ۴. نمایش طبقه محاسبه گرمای محسوس (۱۰)

بهره‌وری تبخیر- تعرق و بازده آبیاری

بهره‌وری تبخیر- تعرق بر اساس تبخیر- تعرق واقعی و بازده آبیاری به ترتیب از معادله‌های ۲۱ و ۲۲ محاسبه شد:

$$WP_{ET} = \frac{GY}{ET_a} \quad (21)$$

$$WP_{ET} = \frac{GY}{ET_a} \quad (22)$$

که در آن WP_{ET} بهره‌وری تبخیر- تعرق (کیلوگرم بر مترمکعب)، GY محصول دانه (کیلوگرم بر هکتار)، ET_a حجم تبخیر- تعرق واقعی (مترمکعب در هکتار)، E_a بازده آبیاری، PE حجم بارش مؤثر برآورد شده از روش بارش قابل اطمینان

و IRR حجم آب آبیاری (مترمکعب در هکتار) است. به منظور ارزیابی تبخیر- تعرق برآورد شده با استفاده از مدل METRIC، از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده $NRMSE$ و ضریب تبیین R^2 به شرح زیر استفاده شد:

$$R^2 = \frac{[\sum (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (23)$$

$$NRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n \bar{O}^2} \right]^{0.5} \quad (24)$$

که در رابطه‌های ۲۳ و ۲۴، P_i مقادیر برآورد شده به وسیله مدل METRIC، \bar{P} میانگین مقادیر برآورد شده به وسیله مدل

تبخیر- تعرق در منطقه مورد مطالعه به صورت طیف رنگی نشان داده شده است. مناطق قرمز رنگ زمین‌های بایر و فاقد کشت هستند و از کمترین مقدار تبخیر- تعرق یعنی ۱/۳۷ میلی‌متر در روز برخوردارند. مناطق نارنجی رنگ، اراضی هستند که از پوشش گیاهی پراکنده برخوردار هستند و مقدار تبخیر- تعرق در آنها ۲/۷۲-۳/۳۲ میلی‌متر در روز است. مزارع گندم به صورت مناطق سبز روشن و تیره با مقدار تبخیر- تعرق بین ۳/۳۳-۵/۵۹ میلی‌متر در روز هستند. با بررسی سری زمانی نقشه‌های تبخیر- تعرق می‌توان میزان مصرف آب هر یک از مزارع و یا کل آنها را برآورد کرد.

جهت ارزیابی مدل METRIC از مزارعی که به تازگی آبیاری شده بودند استفاده گردید و نتایج آن با تبخیر- تعرق بدست آمده از مدل AquaCrop مورد مقایسه قرار گرفت. البته مدل AquaCrop با این شرط که آبیاری به گونه‌ای انجام شود که رطوبت خاک همیشه در حالت ظرفیت زراعی باشد و در نتیجه تبخیر- تعرق بدست آمده از آن در حالت بالقوه اجرا شد. مقادیر مختلف تبخیر- تعرق بدست آمده از مدل METRIC و AquaCrop در روزهای مختلف بعد از رشد گیاه گندم در شکل (۶) نشان داده شده است. در برخی از روزها که قبل از زمان عبور ماهواره لندست بارندگی وجود داشته است مدل METRIC تبخیر- تعرق را بیشتر از مدل AquaCrop برآورد نموده است. شاخص‌های آماری R^2 ، NRMSE و P-value بدست آمده به ترتیب برابر ۰/۸۴، ۰/۱۲ و ۰/۰۰۰۰۰۶ است که نشان‌دهنده دقت خوب مدل است (شکل ۷).

جمشیدی و همکاران (۱۱) در پژوهشی در منطقه گریباگان برای برآورد تبخیر- تعرق محصولات کشاورزی تابستانه و زمستانه دقت مدل METRIC را با خطای میانگین ۷ درصدی گزارش کردند. جمشیدی و همکاران (۱۰) در تحقیق دیگری در شهرستان کازرون در برآورد تبخیر- تعرق باغات مرکبات این مدل را با خطای میانگین ۸/۷ درصد، گزارش کردند.

بهره‌وری تبخیر- تعرق و بازده آبیاری

بهره‌وری تبخیر- تعرق WP_{ET} (Evapotranspiration Water)

METRIC، O_i مقادیر برآورد شده به وسیله مدل AquaCrop، میانگین مقادیر برآورد شده به وسیله مدل AquaCrop و n تعداد داده‌ها است.

نتایج و بحث

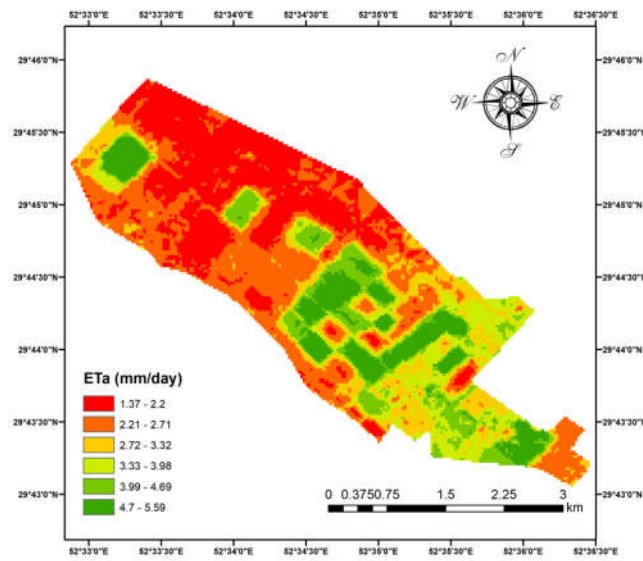
انتخاب پیکسل سرد

در کاربردهای اولیه مدل سبال توسط باستیانس، پیکسل سرد را سطح آب انتخاب نمود، که در این صورت $ET = R_n - G$ که این به این مفهوم است که در پیکسل سرد تمام انرژی در دسترس، صرف تبخیر از سطح آب می‌شود و در نتیجه $H=0$ است (۳). آلن و همکاران (۳) برای محاسبه تبخیر- تعرق برای منطقه آیداهو مزرعه وسیعی از پوشش گیاهی یونجه را به عنوان پیکسل سرد فرض نمودند. آنها بیان کردند که مزرعه‌ای را می‌توان به عنوان پیکسل سرد انتخاب نمود که از تراکم پوشش گیاهی خوبی برخوردار باشد و به خوبی آبیاری شود (تنش آبی در آن وجود نداشته باشد)، از آنجایی که خاک در زیر پوشش گیاهی مرطوب است مقدار تبخیر- تعرق برابر $K_{c \max} \times ET_0$ است ($K_{c \max}$ برابر حداکثر ضریب گیاهی در هر روز است، که از طریق اجرای مدل AquaCrop در شرایط بالقوه برای گیاه گندم در طول فصل رشد برآورد می‌شود) (۳). در این مطالعه برای هر تصویر مزرعه گندمی که به تازگی آبیاری شده بود و از تراکم پوشش گیاهی خوبی برخوردار بود به عنوان پیکسل سرد انتخاب شد، و ضریب گیاهی مناسب با دوره رشد گیاه گندم انتخاب گردید. بنابراین، معادله dT_{cold} (معادله ۲۵) به صورت زیر نوشته می‌شود:

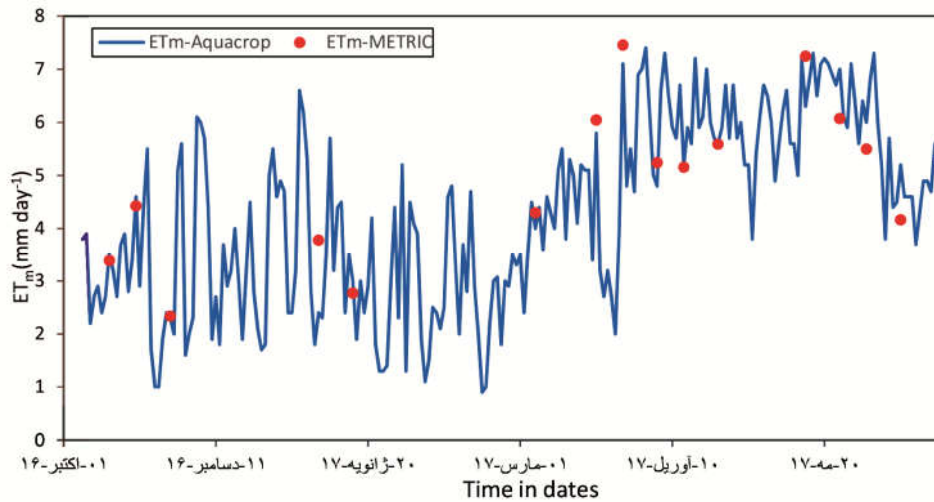
$$dT_{cold} = \frac{(R_n - G - K_{c \max} \times ET_0) \times t_{ah}}{\rho_{air} \times C_p} \quad (25)$$

تبخیر- تعرق واقعی لحظه‌ای و روزانه

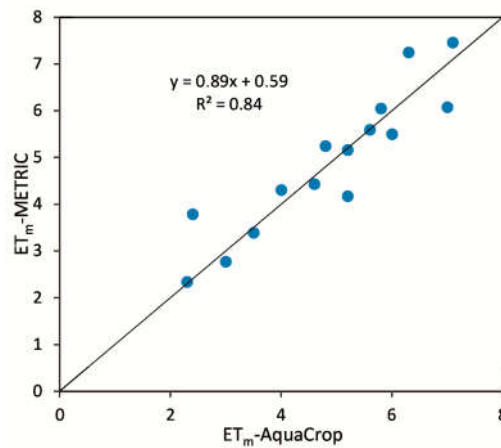
پس از دریافت داده‌های مورد نیاز، مدل METRIC برای تصاویر مختلف دریافت شده برای طول فصل رشد گندم، اجرا شد. شکل (۵) یکی از نقشه‌های تبخیر- تعرق بدست آمده در تاریخ ۱۷ فروردین ۱۳۹۶ را نشان می‌دهد که در آن تغییرات



شکل ۵. تبخیر- تعرق واقعی روزانه در تاریخ ۱۳۹۶/۰۱/۱۷



شکل ۶. مقادیر بالقوه تبخیر- تعرق گندم در طول فصل رشد



شکل ۷. مقایسه مقادیر تبخیر- تعرق روزانه برآوردشده با مدل متریک با مقادیر برآورد شده با مدل AquaCrop در سال ۹۶ برای گندم

همین دلیل استفاده از روش‌های مبتنی بر سنجش از دور مانند مدل متریک توصیه می‌شود. در این پژوهش برای برآورد تبخیر- تعرق به وسیله مدل متریک، به منظور برآورد شار گرمای محسوس، مزارع گندمی که به تازگی آبیاری شده بودند به عنوان پیکسل سرد انتخاب شدند و در نهایت تبخیر- تعرق در طول فصل رشد گندم زمستانه برآورد گردید و برای ارزیابی آن با نتایج تبخیر- تعرق بدست آمده از مدل AquaCrop مورد مقایسه قرار گرفت. شاخص‌های آماری R^2 و NRMSE بدست آمده به ترتیب برابر $0/84$ و $0/12$ هستند که نشان‌دهنده دقت خوب مدل METRIC در برآورد تبخیر- تعرق واقعی و توانایی انتخاب مزارعی غیر از یونجه به عنوان پیکسل سرد است. توسعه کشاورزی و تولید پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک به افزایش بهره‌وری تبخیر- تعرق و بازده آبیاری بستگی دارد. به همین دلیل با توجه به اهمیت برآورد بهره‌وری تبخیر- تعرق و بازده آبیاری در مدیریت منابع آب، مقدار آن برای تمام مزارع گندم اراضی مورد مطالعه برآورد گردید که به ترتیب برابر $0/86$ کیلوگرم بر مترمکعب و 75% بود. این نکته قابل توجه است که آبیاری بیش از نیمی از مزارع به روش آبیاری بارانی و مابقی به روش آبیاری سطحی انجام شده است، اما عوامل دیگری همچون: پایین بودن تلفات آب در مرحله انتقال آب (به دلیل نزدیک بودن چاه‌های تأمین آب به مزارع تحت کشت)، کم‌آبیاری (به دلیل محدودیت منابع آب، نیاز آبی مزارع به طور کامل تأمین نگردیده است)، عدم نفوذ عمقی آب به دلیل بافت خاک منطقه مورد مطالعه، در بالا بودن بازده آبیاری تأثیرگذار بوده‌اند.

(Productivity) مقدار محصول برای هر مترمکعب آب تبخیر- تعرق شده تعریف می‌شود. بنابراین، با استفاده از نتایج تبخیر- تعرق بدست آمده از مدل METRIC و مقدار محصول مزارع گندم منطقه، بهره‌وری تبخیر- تعرق $0/86$ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد. زارت و باستیانس (۲۱) بیان کردند که متوسط شاخص بهره‌وری تبخیر- تعرق محصول گندم برابر $1/09$ کیلوگرم بر مترمکعب است، و دامنه شاخص بهره‌وری تبخیر- تعرق برای گندم $0/6-1/7$ کیلوگرم در مترمکعب بوده است. بازده آبیاری یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کلیدی در برنامه ریزی‌های کلان تأمین، تخصیص و مصرف اصولی آب به شمار می‌رود. بازده پروژه بزرگ درودزن بدون اصلاح باران زمستانه حدود 44% درصد گزارش شده است، ولی با توجه به حجم آب آبیاری، بارندگی و حجم آب زهکشی در شبکه آبیاری و زهکشی مقادیر بازده پروژه‌ها بیش از 50% درصد برآورد شده است (۱۶). مقدار متوسط بازده کاربرد آب در آبیاری جویچه‌ای در مزرعه ذرت در دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در سال 1375 برابر $71/7\%$ درصد گزارش شده است (۱۶). در این مطالعه نیز، با توجه به حجم آبیاری اندازه‌گیری شده، تمام مزارع گندم دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز به وسعت 179 هکتار و حجم تبخیر- تعرق برآوردشده با استفاده از مدل METRIC، که برابر 1698405 مترمکعب بود، مقدار متوسط بازده آبیاری مزارع گندم برابر 75% برآورد گردید.

نتیجه‌گیری

تبخیر- تعرق واقعی به تغییرات زمانی و مکانی، ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک، بارش و نوع و تراکم پوشش گیاهی و اکنتش نشان می‌دهد و اندازه‌گیری آن در سطوح وسیع با استفاده از روش‌های نقطه‌ای مانند لایسیمتر و ادی کواریانس و ... امکان‌پذیر نیست. به

منابع مورد استفاده

1. Abbasi, F., A. Naseri, F. Sohrab, J. Baghani, N. Abbasi and M. Akbari. 2016b. Promoting of Agricultural Water Productivity. Technical Note No. K34/94. Agricultural Engineering Research Institute. Karaj, Iran (In Farsi).
2. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and drainage paper 56, FAO, Rome.
3. Allen, R. G., R. Waters, M. Tasumi, R. Trezza and W. G. M. Bastiaanssen. 2002. SEBAL-Surface Energy Balance Algorithm for Land-Idaho implementation. Advanced Training and Users Manual, Idaho, USA.
4. Allen, R. G., M. Tasumi and R. Trezza. 2006. Benefits from tying satellite based energy balance to ground-based reference evapotranspiration. *In: AIP Conference Proceedings AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics.
5. Allen, R. G., M. Tasumi, A. Morse, R. Trezza, J. L. Wright, W. Bastiaanssen and C. W. Robison. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Applications. *Journal of Irrigation Drainage Engineering* 133(4): 395-406.
6. Bastiaanssen, W. G. M. 1998. Remote Sensing in Water Resources Management: The State of the Art. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute IWMI.
7. Duchemin, B., F. Frappart, P. Maisongrande, M. Magnac, B. Mougenot, A. Chehbouni and G. Dedieu. 2002. Water budget with phenology derived from optical satellite data. *In: Proceedings of the First International Symposium of Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, Valencia, Spain.
8. Folhes, M. T., C. D. Rennó and J. V. Soares. 2009. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. *Agricultural Water Management* 96(10): 1398-1408.
9. Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25(3): 295-309.
10. Jamshidi, S., S. Zand-Parsa, M. Pakparvar and D. Niyogi. 2019. Evaluation of evapotranspiration over a semi-arid region using multiresolution data sources. *Journal of Hydrometeorology* 20(5): 947-964.
11. Jamshidi, S., S. Zand-Parsa and M. Naghdizadegan Jahromi. 2019. Application of a simple landsat-MODIS fusion model to estimate evapotranspiration over a heterogeneous sparse vegetation region. *Remote Sensing* 11(7): 741.
12. Kijne, J. W., R. Barker and D. J. Molden. 2003. Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement. CAB International, Wallingford, UK.
13. Norouzi, S. 2019. Determination of water productivity of lands of agricultural college, Shiraz University. Master of Science Thesis, Water Engineering Department, School of Agriculture, Shiraz University (In Farsi).
14. Razzaghi, F. and A. R. Sepaskhah. 2012. Calibration and validation of four common ET₀ estimation equations by lysimeter data in a semi-arid environment. *Archives of Agronomy Soil Science* 58(3): 303-319.
15. Rouse, J. 1974. Monitoring the Vernal Advancement of Retrogradation of Natural Vegetation. Final Report, College Station, Texas A and M University, USA.
16. Sepaskhah, A. R. 2004. A new perspective on irrigation efficiency research in Iran. *In: 1st Symposium of National Resources Loss Prevention*, Tehran, Iran (In Farsi).
17. Tasumi, M. 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. Appendix C: A step-by-step guide to running SEBAL Final Report, EOSDIS Project, The Raytheon Systems Company, Waltham, Massachusetts, USA.
18. Tasumi, M., R. Trezza, R. G. Allen and J. L. Wright. 2005. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid US. *Irrigation Drainage Systems* 19(3-4): 355-376.
19. Tucker, C. J., H. E. Dregne and W. W. Newcomb. 1991. Expansion and Contraction of the Sahara Desert from 1980 to 1990. *Science* 253: 299-301.
20. Zand-Parsa, S., S. Parvizi, A. R. Sepaskhah and M. Mahbod. 2016. Evaluation of simulated soil water content, dry matter and grain yield of winter wheat (cv. shiraz) using wsm and Aquacrop models. *Journal of Water and Soil Science* 20 (77) :59-70 (In Farsi).
21. Zwart, S. J. and W. G. M. Bastiaanssen. 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigate wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management* 69(2): 115-133.

Estimation of Actual Evapotranspiration, Water productivity, and Irrigation Efficiency of Wheat Fields in Surface and Sprinkler Irrigation Systems Using Remote Sensing

F. Ghasemi-Saadat Abadi¹, S. Zand-Parsa^{1*} and M. Mahbod²

(Received: November 29-2020; Accepted: April 27-2021)

Abstract

In arid and semi-arid regions, water resource management and optimization of applying irrigation water are particularly important. For optimization of applying irrigation water, the estimated values of actual evapotranspiration are necessary for avoiding excessive or inadequate applying water. The estimation of actual crop evapotranspiration is not possible in large areas using the traditional methods. Hence, it is recommended to use remote sensing algorithms for these areas. In this research, actual evapotranspiration of wheat fields was estimated using METRIC algorithm (Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration), using ground-based meteorological data and satellite images of Landsat8 at the Faculty of Agriculture, Shiraz University, in 2016-2018. In the process of METRIC execution, cold pixels are located in well-irrigated wheat fields where there is no water stress and maximum crop evapotranspiration occurred. The estimated maximum values of evapotranspiration using the METRIC algorithm were validated favorably using the obtained values by the AquaCrop model with NRMSE (Normalized Root Mean Square Errors) equal to 0.12. Finally, the values of water productivity (grain yield per unit volume of evapotranspiration) and irrigation efficiency were estimated using the values of predicted actual evapotranspiration using remote sensing technique. The values of measured irrigation water and produced wheat grain yield in 179 ha were estimated at 0.86 kg m⁻³ and 75%, respectively.

Keywords: Optimization, METRIC, Water management, Landsat8, Water efficiency, AquaCrop

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Fars, Iran.

2. Department of Science and Water Engineering, Faculty of Agriculture, Jahrom University, Fars, Iran.

*Corresponding Author, Email: zandparsa@yahoo.com