

برآورد میزان تبخیر-تعرق واقعی و پتانسیل در شرایط اقلیمی مختلف با استفاده از سنجش از دور

مهدی اکبری^{۱*} - زهرا سیف^۲ - حمید زارع ایبانه^۳

تاریخ دریافت: ۸۹/۸/۱۶

تاریخ پذیرش: ۹۰/۳/۱

چکیده

تبخیر-تعرق یکی از اجزای مهم بیلان آب می‌باشد که اندازه‌گیری مقدار واقعی آن مشکل است و روش‌های تعیین آن محدود می‌باشد. روش‌های معمول برآورد تبخیر-تعرق عموماً نقطه‌ای بوده و حداکثر سطح یک مزرعه را پوشش می‌دهد، در صورتیکه جهت مدیریت و برنامه ریزی آبیاری، برآورد تبخیر-تعرق واقعی در سطح شبکه‌های آبیاری که وابسته به گیاه و مدیریت آبیاری می‌باشد، ضروری است. استفاده از مدل‌های مرسوم در برآورد تبخیر-تعرق واقعی به علت نقطه‌ای بودن اطلاعات هواشناسی و عدم در نظر گرفتن تنش‌های آبی و محیطی از دقت پایینی برخوردار است. امروزه با پیشرفت تکنولوژی ماهواره‌ها، امکان برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از تکنیک سنجش از دور در سطح وسیع فراهم شده است. در این تحقیق ضمن بررسی آمار ۲۰ ساله هواشناسی (۱۳۶۸ تا ۱۳۸۸)، سالهای ۱۳۸۶، ۱۳۷۹ و ۱۳۷۴ به عنوان سال‌های پربارش، کم بارش و متوسط انتخاب و تبخیر-تعرق واقعی و پتانسیل شبکه آبیاری ایشار اصفهان با استفاده از تصاویر ماهواره NOAA-AVHRR و به‌کارگیری الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین برآورد گردید. نتایج نشان داد که میزان تبخیر-تعرق در سال کم بارش (۱۳۷۹) به بیشترین میزان (تبخیر-تعرق واقعی تا ۸/۱ میلی‌متر در روز و پتانسیل تا ۹/۵ میلی‌متر در روز) رسیده است. با مقایسه نتایج تبخیر-تعرق به دست آمده از روش سنجش از دور با دو روش برآورد تبخیر-تعرق (هارگریوز و پنمن مانیت) در هر سال مشاهده شد که نتایج به دست آمده از روش سنجش از دور با ریشه میانگین مربعات خطاها ۰/۶۷، میانگین خطای مطلق ۰/۴ و انحراف ۰/۲۶ میلی‌متر در روز مطابقت خوبی با برآوردهای حاصل از روش‌های محاسباتی دارد که نشان‌دهنده امکان استفاده از تکنیک سنجش از دور برای تخمین تبخیر-تعرق مکانی در سطوح مختلف مزرعه و شبکه‌های آبیاری می‌باشد. به طور کلی با برآورد میزان آب مورد نیاز (تبخیر-تعرق واقعی) در نقاط مختلف شبکه می‌توان نسبت به توزیع مناسب آب در سطح شبکه و بهبود مدیریت آبیاری اقدام نمود که تأثیر به‌سزایی در مدیریت بهینه مصرف آب در شبکه دارد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق، سنجش از دور، شبکه‌های آبیاری

مقدمه

و در نهایت افزایش راندمان مصرف می‌شود، برآورد دقیق تبخیر-تعرق یا تخمین میزان آب مصرفی گیاهان می‌باشد. تبخیر-تعرق یکی از مؤلفه‌های اصلی بیلان آبی هر منطقه و همچنین یکی از عوامل کلیدی برنامه ریزی درست و مناسب آبیاری می‌باشد (۱۵). پیشرفت روزافزون تکنولوژی سنجش از دور، امکان برآورد تبخیر-تعرق واقعی و مقدار پتانسیل آن را در سطح وسیعی فراهم نموده است. در تحقیقات زیادی محققین برای تخمین تبخیر-تعرق واقعی و توزیع زمانی و مکانی آن از داده‌های ماهواره‌ای استفاده نموده‌اند (۸ و ۱۰). برآورد تبخیر-تعرق واقعی و پراکنش مکانی آن از مواردی است که به کمک سنجش از دور امکان پذیر بوده و اهمیت زیادی نسبت به روش‌های نقطه‌ای دارد و برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در سطح کلان نیز این پراکنش بسیار مهم است. هرچند از

محدودیت منابع آب و استفاده نامطلوب و غیر اقتصادی از آن عامل اصلی محدود کننده توسعه کشاورزی و افزایش تولیدات غذایی در ایران است. مدیریت بهینه مصرف آب در چند دهه گذشته موضوع بحث بسیاری از محافل تخصصی گشته است، در همه این محافل تأکید بر این نکته بوده که پایش و ارزیابی، کلید موفقیت در این امر می‌باشد. یکی از روش‌هایی که باعث بهبود مدیریت بهره برداری آب

۱- استادیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج
* نویسنده مسئول: (Email: akbari_m43@yahoo.com)
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیار گروه آبیاری زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

معادله‌های توازن انرژی و هارگریوز در سرتاسر حوضه محاسبه کردند، سپس با استفاده از همپوشانی نقشه پوشش گیاهی برای هر پیکسل از هر پوشش گیاهی، مقدار ضریب گیاهی از تقسیم دو مقدار تبخیر-تعرق فوق را محاسبه نمودند. نتایج نشان داد که بین دو روش معادله توازن انرژی (تصویر ماهواره‌ای) و معادله هارگریوز (استفاده از ضریب گیاهی مناسب) در برآورد تبخیر-تعرق گیاهان همبستگی بسیار بالایی وجود دارد ($R^2=0.996$).

در بهره‌وری مصرف آب لی و همکاران (۱۴) با استفاده از تصاویر ماهواره NOAA-AVHRR و به کارگیری الگوریتم سبال به بررسی میزان آب مصرفی و بهره‌وری مصرف آب در شمال چین پرداختند. این محققان ابتدا به محاسبه تبخیر-تعرق گیاه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پرداختند، سپس به منظور مقایسه با روش‌های زمینی، از معادله هارگریوز و داده‌های هواشناسی و ضریب گیاهی گیاه کشت شده در منطقه و همچنین داده‌های لایسیمتر وزنی استفاده نمودند. خطای نسبی بین مقادیر تبخیر-تعرق فصلی اندازه‌گیری شده زمینی و تبخیر-تعرق محاسبه شده توسط سبال ۴/۳ درصد بوده است. بیشترین بهره‌وری، $1/67 \text{ Kg/m}^3$ و کمترین آن $0/5 \text{ Kg/m}^3$ بوده است.

تبخیر-تعرق واقعی ده روزه در سریلانکا، از داده‌های ماهواره NOAA-AVHRR و اطلاعات تکمیلی ایستگاه‌های هواشناسی از جمله سرعت باد، درجه حرارت هوا در زمان تصویربرداری و متوسط ساعات آفتابی در دو سال پیاپی توسط چاندراپالا و ویمالاسوریا (۹) برآورد گردید. این محققین به منظور برآورد تبخیر-تعرق واقعی در طی یک دوره ۱۲ ماهه، اطلاعات ماهواره‌ای ۸۸ روز را با استفاده از روش بیلان انرژی در سطح زمین پردازش و تبخیر-تعرق ده روزه را تعیین نمودند. برای تعیین دقت تبخیر-تعرق برآورد شده، این مقدار را با تبخیر-تعرق واقعی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه Scintillometer مقایسه کردند. نتایج نشان داد که بین مقادیر برآورد شده از اطلاعات ماهواره‌ای و مقادیر اندازه‌گیری شده در دوره ده روزه و ماهیانه به ترتیب ۱۷ و ۱ درصد اختلاف می‌باشد. لذا استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای برای برآورد تبخیر-تعرق توسط پژوهشگران مذکور توصیه شده است.

در پژوهش‌های دیگری تیکسزیا و همکاران (۱۸ و ۱۹) نیز در حوضه رودخانه سائوفرانسیسکو^۳ در برزیل به مرور و استاندارد سازی و اعتبارسنجی پارامترهای ورودی الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین پرداختند. در این تحقیق، مقادیر آلبیدوی سطحی، دمای سطح زمین، گسیلمندی سطحی و اتمسفری، شار گرمای خاک، زبری سطح، تابش خالص، گرادیان دمای هوا، شار گرمای محسوس، شار گرمای نهان، کسر تبخیر و تابش فعال فتوسنتتیکی اندازه‌گیری شد. مقادیر ET با

لحاظ بازه زمانی در روش سنجش از دور با محدودیت‌های بیشتری مواجه هستیم، اما در نهایت استفاده از این روش در سطوح وسیع از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و به عنوان یک روش کاربردی پذیرفته شده است.

جهت تعیین تبخیر-تعرق با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای، الگوریتم‌های متعددی مانند الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین^۱ تدوین شده است. با استفاده از این الگوریتم، مؤلفه‌های بیلان انرژی در مقیاس منطقه‌ای و با کمترین داده‌های زمینی محاسبه می‌شود. به‌طور خلاصه ارتباط بین تشعشعات دریافتی توسط ماهواره‌ها از سطح زمین در باندهای مرئی و مادون قرمز حرارتی و نیز تفاوت پوشش و بازتابش سطوح زمین، پایه و اساس روابط در الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین می‌باشد (۱۷).

به منظور صحت یابی الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین باستانس و همکاران (۷) از اطلاعات موجود تبخیر-تعرق مزارع در مقیاس بزرگ در کشورهای چین، هند، اسپانیا و پاکستان استفاده نمودند و اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای تبخیر-تعرق را با نتایج حاصل از الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین (با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای) مقایسه کردند. نتایج نشان داد که در ۸۵ درصد موارد داده‌های حاصل از الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین با داده‌های مزرعه‌ای بدون هیچگونه واسنجی یا به عبارتی وارد کردن ضریب خاص مطابقت داشته است.

اکبری و همکاران (۳) در تحقیقی با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای، میزان عرضه و تقاضای آب، شاخص‌های عرضه نسبی آب، سودمندی اقتصادی را ارزیابی کردند. این محققین با استفاده از یک سری زمانی از اطلاعات ماهواره NOAA-AVHRR تبخیر-تعرق واقعی گیاه را به روش سنجش از دور تعیین نمودند و به عنوان میزان آب مصرفی گیاه در نظر گرفتند. همچنین آنها با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای، در طول دوره رشد و شاخص گیاهی NDVI^۲، رابطه‌ای بین سطح زیر کشت واقعی شبکه‌های تحت پوشش شهرستان اصفهان و سطح زیر کشت شهرستان تعیین نمودند و از آن برای استخراج داده‌های مورد نیاز شبکه آبیاری مورد مطالعه، از اطلاعات موجود شهرستان اصفهان استفاده کردند.

در سال‌های اخیر استفاده تلفیقی از داده‌های ماهواره‌ای و اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای متداول شده است. در همین راستا علی‌اصغرزاده و ثنائی نژاد (۵) در مطالعه‌ای با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat ETM 7، نقشه‌های توپوگرافی، پوشش گیاهی و همچنین داده‌های هواشناسی، ابتدا تبخیر-تعرق واقعی گیاه مرجع را توسط

1 - Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)

2 - Normalized Difference Vegetation Index

ماهواره NOAA-AVHRR و برآورد شاخص‌های گیاهی، تبخیر-تعرق واقعی و تعیین کارایی مصرف آب در سه دوره خشک، متوسط و مرطوب در منطقه مورد مطالعه با استفاده از تکنیک سنجش از دور پرداخته شد، تا ضمن ارزیابی الگوریتم بیان انرژی در سطح زمین در دوره های تر سالی و خشکسالی، به توان نسبت به بهبود زمانی و مکانی مدیریت آبیاری در منطقه مورد مطالعه اقدام نمود.

مواد و روش ها

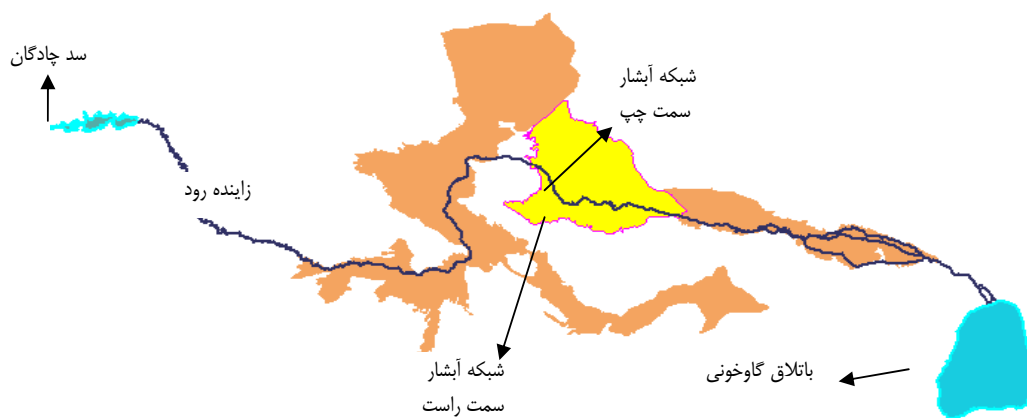
منطقه مطالعاتی

این تحقیق در شبکه آبیاری سمت چپ و راست آبشار با طول جغرافیایی ۵۲ و عرض جغرافیایی ۳۳/۵ درجه، ارتفاع ۱۵۰۰ متر، در سطح ۳۰۰۰۰ هکتار در شرق اصفهان و قسمت مرکزی ایران انجام گردید (شکل ۱). بر اساس آمار و اطلاعات هواشناسی ایستگاه کیوتراآباد اصفهان که در قسمت میانی شبکه آبشار واقع شده است، این شبکه از نظر اقلیمی، خشک و نیمه خشک و متوسط دمای آن در تابستان ۳۰ و در زمستان ۳ درجه سانتیگراد و متوسط بارش سالیانه آن ۱۲۰ میلی‌متر می‌باشد. میزان تبخیر-تعرق در این شبکه حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر در سال است و بدون دسترسی به منابع آب دائمی، کشاورزی در این منطقه از لحاظ اقتصادی سودمند نخواهد بود. در این شبکه در سال دو نوبت کشت انجام می‌شود؛ یک نوبت در تابستان شامل گیاهانی از قبیل برنج، چغندر قند، ذرت علوفه‌ای، سیب زمینی، پیاز و سبزیهای مختلف و یک نوبت در پاییز شامل محصولاتی مانند گندم، جو و سبزی‌ها. علاوه بر این برخی گیاهان دائمی و چند ساله مانند یونجه و درختان میوه نیز کشت می‌گردد. روش آبیاری در این شبکه به طور معمول سطحی است.

استفاده از تصاویر Landsat، و با میزان خطا (RMSE) ۰/۳۸ میلیمتر در روز برای منطقه محاسبه شد. نتایج مقادیر تابش خالص محاسبه شده توسط الگوریتم بیان انرژی و مقادیر اندازه‌گیری شده نشان از $RMSE = 17/5 W/m^2$ و انحراف میانگین ۱ درصد و ضریب همبستگی $R^2 = 0/94$ داشت. در مورد شار گرمای نهان نیز $RMSE = 33/8 W/m^2$ ، $R^2 = 0/93$ و انحراف میانگین ۱۰ درصد بود. شار گرمای محسوس نیز دارای $RMSE = 41/8 W/m^2$ ، $R^2 = 0/83$ و انحراف میانگین ۳ درصد و شار گرمای خاک نیز $RMSE = 0/81$ و انحراف میانگین ۳ درصد و شار گرمای نهان و معادلات است. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده شار گرمای نهان و معادلات کالیبره شده به کار رفته در مدل بیان انرژی در سطح زمین برای تعیین تبخیر-تعرق و تبخیر-تعرق واقعی نشان می‌دهد که تشخیص مقیاس‌های زمانی لحظه‌ای و روزانه اهمیت فراوان دارد.

ارشد (۱) نیز با استفاده از الگوریتم بیان انرژی در سطح زمین در استان کرمانشاه در سه اقلیم گرم، معتدل و سرد میزان تبخیر-تعرق واقعی را در سطح مزارع کشت گندم و جو به دست آورد. در این تحقیق از ۲۷۱ تصویر ماهواره NOAA-AVHRR برای ۱۸ سال در طول دوره رشد گیاه استفاده شد. در این تحقیق جهت بالا بردن دقت بعضی از روابط و پارامترهای مدل بیان انرژی، یکسری داده‌های هواشناسی و محیطی در زمان گذر ماهواره از منطقه مورد مطالعه برداشت شد. محاسبات الگوریتم بیان انرژی به عنوان ورودی‌های مدل پیش بینی عملکرد استفاده شد و نتایج نشان داد این ورودی‌ها قابلیت پیش بینی عملکرد گندم و جو را دارند.

نتایج تحقیقات انجام شده حاکی از آن است که با استفاده از تکنیک سنجش از دور، می‌توان تبخیر-تعرق واقعی گیاه را با دقت خوبی برآورد نمود. لذا در تحقیق جاری برای تعیین نیاز آب مصرفی گیاهان در کشاورزی و جلوگیری از هدر رفت آن، به پردازش تصاویر



شکل ۱ - موقعیت جغرافیایی منطقه و شبکه‌های مطالعاتی در حوضه زاینده رود

داده ها

مختلفی ارائه گردیده است. از مهمترین آن‌ها می‌توان به شاخص-گیاهی NDVI اشاره کرد. این شاخص نقش اساسی در برآورد سطوح زیر کشت و تبخیر-تعرق واقعی دارد. این شاخص به عنوان نمادی از تراکم پوشش گیاهی و شدت و ضعف آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین در برآورد ضریب تابش پوشش سطح زمین، سطح زیر کشت و شدت رشد توده زنده گیاهی استفاده می‌گردد و در الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین، به منظور تعیین زبری سطح و مقاومت آیرودینامیک مورد نیاز است. در این شاخص از محدوده طیفی مادون قرمز نزدیک (NIR) و قرمز (Red) استفاده شده و توسط رابطه زیر تشریح می‌شود (۱۶).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (۱)$$

که در آن NIR، تشعشع ثبت شده در باند مادون قرمز نزدیک ماهواره و Red، تشعشع ثبت شده در باند مادون قرمز ماهواره می‌باشد. مقدار این پارامتر برای پوشش‌های گیاهی متراکم، متوسط و ضعیف به ترتیب ۱، ۰/۵ و ۰/۱ می‌باشد. دامنه تغییرات این شاخص‌ها بین ۱ و -۱ می‌باشد. شاخص گیاهی NDVI از بازتاب تشعشع در باندهای مختلف قابل رؤیت و مادون قرمز تعیین می‌شود. شماره و تعداد این باندها به محدوده باندهای در هر سنجنده و نوع سنجنده متفاوت است (۱۲).

اجزاء بیلان انرژی

برای تعیین تبخیر-تعرق با استفاده از تکنیک سنجنش از دور در این پژوهش از الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین (سبال) استفاده شده است (۷، ۱۸ و ۱۹). در این الگوریتم از انرژی ذخیره شده در تاج گیاهی و انرژی مصرفی در فتوسنتز صرف نظر شده است. تشعشع خالص در سطح زمین بر اساس معادله زیر بین اجزاء بیلان انرژی که شامل تبخیر-تعرق، جریان گرمایی خاک و جریان گرمای محسوس تقسیم می‌گردد.

$$\lambda E = Q^* - G_0 - H_0 \quad (۲)$$

که در آن، λE جریان گرمای نهان تبخیر، Q^* تشعشع خالص در سطح زمین، G_0 جریان گرمایی زمین، H_0 جریان گرمای محسوس می‌باشد. واحد همه این پارامترها بر حسب $(w.m^{-2})$ می‌باشد و به شرح زیر محاسبه شدند.

تشعشع خالص در سطح زمین

میزان تشعشع ورودی و خروجی در سطح زمین شامل تشعشع با طول موج کوتاه و طول موج بلند می‌باشد. میزان تشعشع خالص از

در این تحقیق از اطلاعات روزانه ایستگاه کبوترآباد اصفهان که در قسمت میانی شبکه آبشار واقع شده است، استفاده گردید. برای تهیه لایه‌های اطلاعاتی شبکه آبیاری و زهکشی از نقشه‌های موجود در سازمان آب منطقه‌ای اصفهان استفاده شد. با توجه به اطلاعات هواشناسی و بر اساس میزان بارندگی، درجه حرارت، سرعت باد طی دو دهه گذشته (۱۳۶۸ تا ۱۳۸۸)، ۳ دوره زمانی، سال‌های ۱۳۷۴، ۱۳۷۹ و ۱۳۸۶ به ترتیب به عنوان سال‌های با بارش متوسط، کم و زیاد به عنوان نماد سال‌های کم باران، متوسط و پر باران در نظر گرفته شد. همچنین برای دستیابی به اطلاعات ماهواره‌ای مورد نیاز، یک سری زمانی ده روزه برای سه دوره زمانی مذکور (سال‌های ۱۳۷۴، ۱۳۷۹ و ۱۳۸۶) از اطلاعات ماهواره NOAA-AVHRR تهیه شد. در نهایت با تلفیق اطلاعات ماهواره‌ای و اطلاعات ایستگاه هواشناسی و سایر اطلاعات زمینی به برآورد میزان تبخیر-تعرق واقعی و پتانسیل منطقه در سه دوره زمانی ترسالی، خشکسالی و شرایط متوسط پرداخته شد. سپس نتایج تبخیر-تعرق حاصل از سنجنش از دور در سه دوره با یکدیگر و سایر روشهای تعیین تبخیر-تعرق مانند پنمن مانیتیت و هارکریوز مقایسه گردید.

پیش پردازش و زمین مرجع کردن عکس‌های ماهواره‌ای

اطلاعات ثبت شده در باندهای مختلف ماهواره‌ها به علت‌های مختلف از جمله گردش و کروی بودن زمین و خطای سنجنده دارای خطاهایی می‌باشد که باید با توجه به ضرائب ارائه شده برای هر باند اصلاح گردد. اولین قدم برای آماده سازی اطلاعات ماهواره‌ای تصحیح هندسی است. منظور از تصحیح هندسی یک تصویر، تغییر سیستم مختصات اجزاء سازنده تصاویر و انطباق آن با نقشه‌های نظیر و یا تصویری است که قبلاً بر روی آن تصحیح هندسی صورت گرفته است. با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و نرم افزار ILWIS و با استفاده از نقاط کنترل زمینی و نقشه‌های زمین مرجع شده موجود (۲)، لایه‌های مختلف شامل کانال‌ها و زهکش‌های اصلی و فرعی مشخص شدند و عکس‌های ماهواره‌ای موجود توسط این لایه‌های مشترک با داده‌های قبلی مطابقت داده شد و مختصات مناسب، مطابق با طول و عرض منطقه دریافت نمودند و تصحیح مناسب بر روی آن‌ها انجام گرفت.

برآورد شاخص گیاهی

از تکنیک سنجنش از دور برای ارزیابی انواع پوشش‌های گیاهی از طریق مقایسه بازتاب طیفی گیاهان در محدوده طول موج‌های مادون قرمز و قرمز استفاده می‌شود. بدین منظور شاخص‌های گیاهی

تعیین تبخیر-تعرق پتانسیل روزانه

با توجه به انرژی قابل دسترس، جریان گرمای نهان تبخیر و جرم حجمی آب میزان تبخیر-تعرق پتانسیل روزانه از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$ET_{pot24} = \frac{Q_{24}^*}{\lambda \rho_w} 86400 \times 10^3 \quad (6)$$

که با توجه به آن λ از رابطه زیر حساب می‌شود.

$$\lambda = [2.0501 - (0.002361 \times T_0)] \times 10^6 \quad (7)$$

که در این معادلات، ET_{pot24} تبخیر-تعرق پتانسیل روزانه (mm/day)، λ گرمای نهان تبخیر (j/kg)، ρ_w : جرم حجمی آب (kg/m³) و T_0 درجه حرارت آب (°C) می‌باشد.

تعیین نسبت تبخیر-تعرق لحظه ای و واقعی

با استفاده از میزان تبخیر-تعرق و مقدار پتانسیل آن در زمان تصویربرداری می‌توان نسبت تبخیر-تعرق لحظه ای (Λ) را به دست آورد.

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{Q^* - G_0} = \frac{Q^* - G_0 - H}{Q^* - G_0} \quad (8)$$

حال با استفاده از الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین همچنین از تبخیر-تعرق پتانسیل روزانه و نسبت تبخیر-تعرق لحظه ای، تبخیر-تعرق واقعی روزانه به دست می‌آید.

$$ET_{act24} = ET_{pot24} \times \Lambda \quad (9)$$

در نهایت برای مقایسه تبخیر-تعرق حاصل از اطلاعات ماهواره-ای با روش‌های معمول محاسباتی از جمله روش پنمن مانیتث و هارگریوز، مقادیر تبخیر تعرق به دست آمده از روش سنجش از دور با روش‌های پنمن مانیتث و هارگریوز مقایسه شد. روش پنمن مانیتث (فائو ۵۶) به عنوان رایج ترین و معروفترین روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع در نظر گرفته شد (۶). روش هارگریوز نیز به خاطر سادگی و در نظر گرفتن تشعشعات جوی و مطابقت بیشتر با روش سنجش از دور در نظر گرفته شد (۱۳). از این روش (هارگریوز) زمانی که اطلاعات کافی در دسترس نباشد و یا زمانی که ایستگاه هواشناسی در نزدیکی ناحیه مورد نظر واقع نشده باشد، استفاده می‌شود و به عنوان یک روش کاربردی پذیرفته شده است (۱۱). در نهایت برای سنجش اعتبار و درستی این مدل‌ها از شاخص‌های آماری متفاوتی از جمله ضریب همبستگی^۱ R2، ریشه میانگین مربعات خطا^۲ RMSE، میانگین خطای مطلق^۳ MAE و میانگین انحراف^۴ ME استفاده شد.

تفاضل این تشعشعات ورودی و خروجی حاصل می‌شود که رابطه آن به شرح زیر است.

$$Q^* = R_G^\downarrow - R_G^\uparrow + R_L^\downarrow - R_L^\uparrow \quad (3)$$

که در آن، R_G^\downarrow و R_G^\uparrow به ترتیب تشعشعات ورودی با طول موج کوتاه و بلند و R_L^\uparrow و R_L^\downarrow تشعشعات خروجی با طول موج کوتاه و بلند می‌باشند. واحد همگی پارامترها بر حسب (w.m⁻²) است.

جریان گرمایی خاک

تشعشع خورشید در طول روز سبب گرم شدن خاک می‌شود. جریان گرمایی به اعماق نیمرخ خاک، به تغییرات درجه حرارت، ظرفیت گرمایی خاک و ضریب هدایت گرمایی خاک بستگی دارد و برای محاسبه آن به اندازه‌گیری‌های دقیق مزرعه‌ای نیاز است. برآورد آن در الگوریتم بیلان انرژی بر اساس رابطه زیر صورت می‌گیرد (۲) و (۷).

$$G_0 = \frac{Q^* \times T_0}{\rho_0} \times \left(\frac{0.0032 \times r_0^{ave} + (0.0062 \times (r_0^{ave})^2)}{(1 - (0.978 \times NDVI^4))} \right) \quad (4)$$

که در آن، G_0 جریان گرمایی لحظه‌ای خاک (w.m⁻²)، Q^* تشعشع خالص لحظه‌ای در سطح زمین (w.m⁻²)، r_0^{ave} متوسط ضریب بازتاب روزانه سطح زمین، ρ_0 ضریب بازتاب لحظه ای سطح زمین، T_0 درجه حرارت تشعشعی سطح زمین (C⁰) می‌باشد.

جریان گرمای محسوس

برای محاسبه این مؤلفه به پارامترهایی چون مقاومت آیرودینامیک، اختلاف درجه حرارت پوشش سطح زمین و هوای اطراف آن، گرمای ویژه هوا و چگالی آن نیاز داریم. از آنجا که به دست آوردن مقاومت آیرودینامیک و جریان گرمای محسوس به یکدیگر وابسته است برای به دست آوردن این دو پارامتر از روش سعی و خطا و تکرار معادلات مربوط به این دو با در نظر گرفتن سایر پارامترها استفاده می‌شود. معادله زیر معادله اصلی به دست آوردن جریان گرمای محسوس (H) می‌باشد (۲ و ۷).

$$H = \frac{\rho_{air} \times c_p \times \Delta T_{air}}{r_{ah}} \quad (5)$$

که در آن، ρ_{air} چگالی هوا (Kg.m⁻³)، c_p گرمای ویژه هوا در فشار ثابت ΔT_{air} (j/m³/K) اختلاف درجه حرارت پوشش سطح زمین و هوا در ارتفاع دو متری (k) و R_{ah} مقاومت آیرودینامیک (m/s) می‌باشد.

- 1- Correlation Coefficient
- 2- Root Mean Square Error
- 3- Mean Absolute Error
- 4- Mean Error

نتایج و بحث

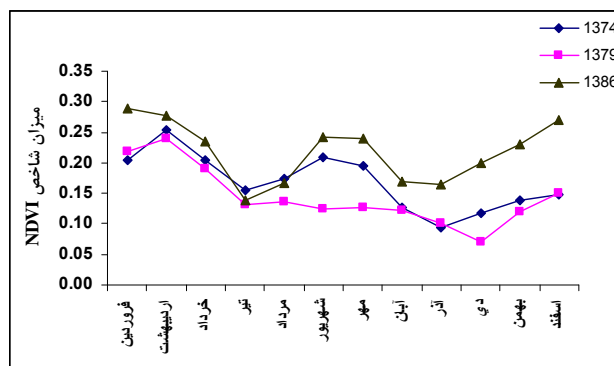
شاخص پوشش گیاهی

نتایج شاخص گیاهی NDVI در کل شبکه آبخیز، طی سه سال ۱۳۷۴، ۱۳۷۹ و ۱۳۸۶ مورد بررسی، و در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج سال ۱۳۷۴ بیانگر این است که متوسط میزان شاخص NDVI در شبکه آبخیز از ماه‌های پایانی زمستان، که زمان شروع رشد پوشش سبز گیاهانی است که در پاییز کشت شده‌اند، افزایش می‌یابد. با شروع فصل بهار رشد محصولاتی مانند جو و گندم سطح زیادی از شبکه آبخیز را تحت پوشش سبز خود قرار می‌دهد که بیشترین نمود آن در ماه اردیبهشت می‌باشد. در تیر ماه به دلیل رسیدن این محصولات، خشک شدن آنها و کم شدن پوشش سبز منطقه از میزان NDVI کاسته شده و دوباره با شروع کشت تابستانه که بیشتر ذرت و ذرت علوفه ای می‌باشد، از اوایل مرداد ماه پوشش منطقه و شاخص NDVI شروع به افزایش می‌کند و در آذر ماه با پایان فصل کشت و سرمای هوا مقدار آن به حداقل مقدار خود می‌رسد. در سال ۱۳۷۹ که به عنوان سال کم بارش در نظر گرفته شده، همانند سال ۱۳۷۴ میزان شاخص NDVI از اوایل فصل زمستان تا اردیبهشت ماه که بیشترین پوشش گیاهی را در شبکه مشاهده می‌کنیم در حال افزایش است و سپس کاهش می‌یابد. بر خلاف سال ۱۳۷۴ این روند سیر صعودی را در تابستان از سر نمی‌گیرد و تا زمستان و دی ماه که کمترین میزان NDVI را شاهد هستیم، سیر نزولی دارد. بر اساس آمار و اطلاعات موجود، این عدم سیر صعودی در تابستان را می‌توان ناشی از بارش بسیار کم در بهار و تابستان و نیز کمبود آب تحویلی به شبکه‌ها و عدم کشت مناسب دانست. در سال ۱۳۸۶ که به عنوان سال پر بارش در نظر گرفته شده روند تقریباً مشابه سال ۱۳۷۴ می‌باشد، البته بیشترین میزان NDVI که نشان دهنده بیشترین پوشش گیاهی است زودتر از سال ۱۳۷۴ و در ماه فروردین مشاهده شده است و کمترین مقدار نیز در ماه آبان و آذر مشاهده می‌شود. نتایج این سال و تفاوت آن با سال ۱۳۷۴ می‌تواند

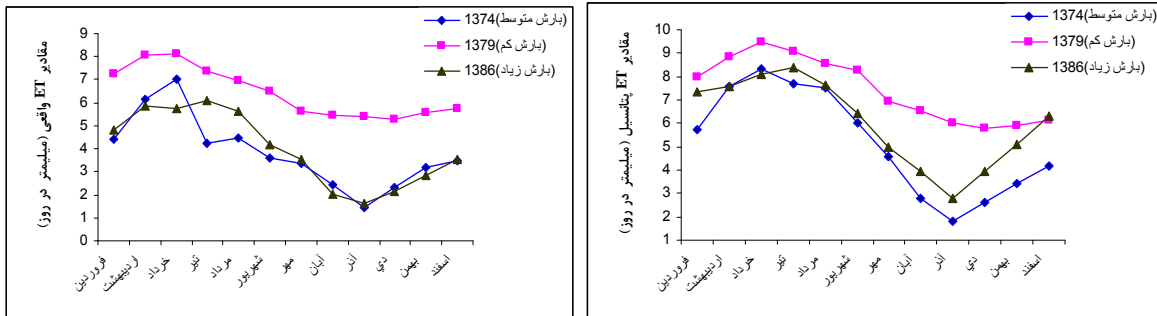
ناشی از رسیدن آب زیاد به شبکه‌ها و کشت زود هنگام در طول سال ۱۳۸۶ باشد. روندهای موجود در هر سال با کمی تغییر در دو شبکه راست و چپ به طور یکسان قابل مشاهده است و در کل نیز با توجه به گستردگی آبخیز سمت چپ، نتایج آن با نتایج حاصل از کل شبکه آبخیز هماهنگی بیشتری را نشان می‌دهد.

تبخیر-تعرق

نتایج تبخیر تعرق واقعی و پتانسیل به دست آمده توسط الگوریتم بیلان انرژی در سطح کل شبکه آبخیز طی سه سال در شکل ۳ آورده شده است. لازم به ذکر است مقادیر به دست آمده تبخیر-تعرق فقط مربوط به مناطق کشت شده می‌باشد، لذا مناطقی که در آنها کشت محصول خاصی صورت نگرفته به حساب آورده نشده است. این موضوع با در نظر گرفتن مناطقی که شاخص NDVI در آنها بالاتر از ۰/۲ می‌باشد صورت گرفته است. در سال ۱۳۷۴ به عنوان سال متوسط بارش، بیشترین میزان تبخیر-تعرق واقعی در خرداد ماه و کمترین آن در آذر ماه می‌باشد و مقدار آن به ترتیب ۷/۱ و ۱/۴ میلیمتر در روز می‌باشد برای تبخیر-تعرق پتانسیل نیز در همین ماه‌ها شاهد حداکثر و حداقل دما به میزان ۸/۴ و ۱/۸ میلیمتر در روز هستیم. در سال ۱۳۷۹ به عنوان سال کم بارش نیز حداکثر و حداقل تبخیر-تعرق در ماه‌های خرداد و دی رخ داده است که مقادیر آن برای تبخیر-تعرق واقعی ۸/۲ و ۵/۲ و برای پتانسیل ۹/۵ و ۵/۸ میلیمتر در روز می‌باشد. در سال ۱۳۸۶ به عنوان سال پر بارش مقادیر حداکثر و حداقل تبخیر-تعرق در ماه‌های تیر و آذر بود و مقدار آن برای تبخیر-تعرق واقعی ۶/۲ و ۱/۶ و برای پتانسیل آن ۸/۵ و ۲/۸ میلیمتر در روز می‌باشد. روند تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل و واقعی در دو شبکه راست و چپ یکسان به دست آمده است و اختلاف اندک آنها نیز ناشی از تغییرات الگوی کشت در دو شبکه است که باعث تغییر ضریب بازتاب سطح می‌گردد.



شکل ۲ - مقادیر شاخص گیاهی NDVI در شبکه آبخیز حوضه زاینده رود در سال های ۱۳۷۹، ۱۳۷۴ و ۱۳۸۶



شکل ۳ - مقادیر تبخیر-تعرق واقعی و پتانسیل در شبکه آبربار حوضه زاینده رود در سال های ۱۳۷۴، ۱۳۷۹ و ۱۳۸۶

۰/۴ و ۰/۱۱۱- میلیمتر در روز بود و نشان داد که روش سنجش از دور از دقت قابل قبولی برخوردار است.

نتیجه گیری

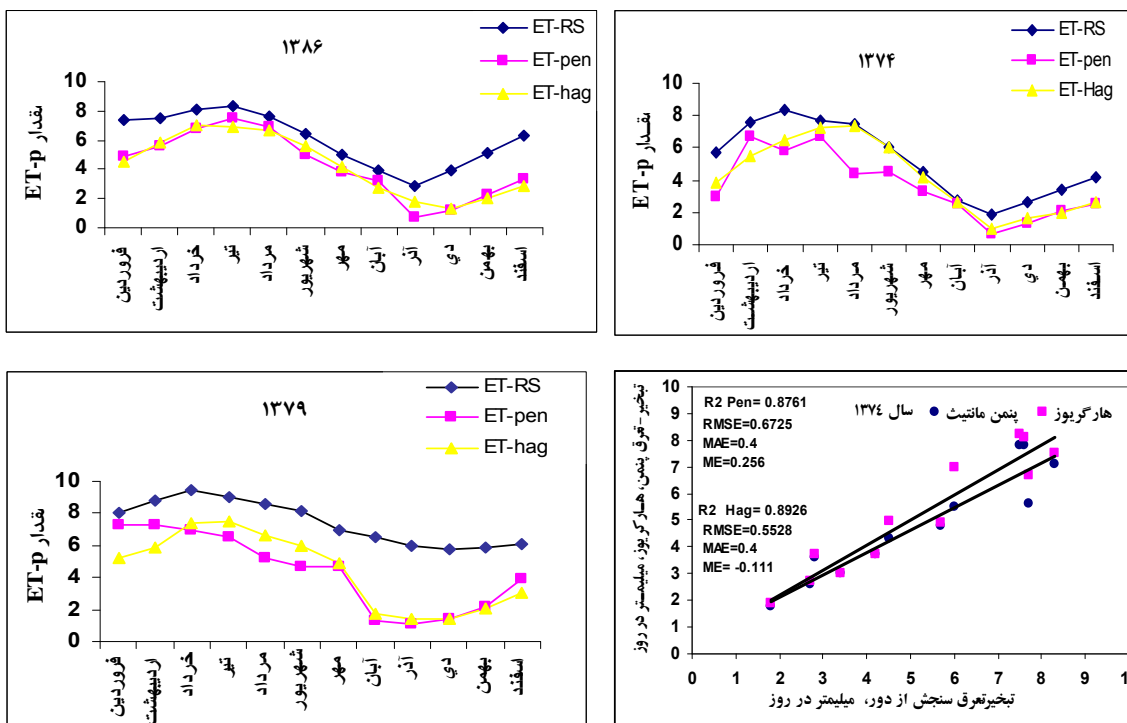
نتایج کلی این تحقیق نشان می‌دهد که تبخیر-تعرق به دست آمده از روش سنجش از دور با دو روش برآورد تبخیر-تعرق (هارگریوز و پنمن مانیتث) مطابقت خوبی با برآوردهای حاصل از روشهای محاسباتی داشته است. در این مطالعه ریشه میانگین مربعات خطاها ۰/۶۷، میانگین خطای مطلق ۰/۴ و انحراف خطا ۰/۲۶ میلیمتر در روز بود که نشان‌دهنده امکان استفاده از تکنیک سنجش از دور برای تخمین تبخیر-تعرق مکانی در سطوح مختلف مزرعه و شبکه‌های آبیاری می‌باشد. همچنین میزان شاخص NDVI محاسبه شده از روش سنجش از دور که بیانگر پوشش سبز منطقه است، مطابقت خوبی با روند توسعه یا کاهش سطح زیر کشت داشته و با افزایش میزان بارش در کل منطقه افزایش می‌یابد که البته در کل سال‌های مورد مطالعه میزان آن در تابستان به حداکثر و با آغاز فصل سرما به حداقل ممکن می‌رسد. نتایج تبخیر-تعرق نیز نشان از هماهنگی آن با نتایج پوشش گیاهی داشت به نحوی که بیشترین میزان تبخیر تعرق مربوط به اوایل تابستان و کمترین آن مربوط به اوایل زمستان بود. همچنین نتایج نشان داد حداکثر تبخیر تعرق در سال خشک اتفاق می‌افتد، درحالیکه از این بابت تفاوت چندانی بین سال مرطوب و سال متوسط از لحاظ بارش وجود ندارد که حاکی از آن است که آب ورودی به شبکه در سال مرطوب بیش از ظرفیت مورد نیاز گیاه بوده است. این نتایج در تبخیر-تعرق واقعی و پتانسیل هماهنگ بوده و فقط در تبخیر-تعرق پتانسیل این تغییرات با یکنواختی بیشتر به چشم می‌خورد. مقایسه نتایج حاصل از سنجش از دور و سایر روش‌های متداول از جمله پنمن مانیتث و هارگریوز می‌توان مشاهده کرد که در سالی که بارش متوسط است نتایج این روش‌ها هر دو به یک میزان با نتایج سنجش از دور قابل مقایسه است و همبستگی نزدیکی را نشان می‌دهد حال آنکه با افزایش بارش و متمایل شدن به سال

مقایسه نتایج تبخیر-تعرق بر آورد شده به روشهای مختلف

در شکل ۴ نتایج مقایسه تبخیر-تعرق به دست آمده از روش سنجش از دور با تبخیر-تعرق محاسبه شده از روش‌های پنمن مانیتث و هارگریوز نشان داده شده است. مقایسه نتایج همبستگی سه روش حاکی از آن است که بیشترین میزان همبستگی بین روش هارگریوز و سنجش از دور مربوط به سال ۱۳۷۹ به عنوان سال کم بارش و خشک و کمترین مقدار آن در سال ۱۳۸۶ به عنوان سال مرطوب و پر بارش می‌باشد. دقیقاً عکس این قاعده در مورد همبستگی بین سنجش از دور و روش پنمن مانیتث رخ داده است و بیشترین همبستگی در سال ۱۳۸۶ و کمترین آن مربوط به سال ۱۳۷۹ است. در سال ۱۳۷۴ که یک سال متوسط از لحاظ بارش می‌باشد، میزان این همبستگی در دو روش فوق‌الذکر نسبت به سنجش از دور تقریباً یکسان است. همچنین با مقایسه همبستگی‌های سه سال و مقایسه مقادیر ماهانه آن با مقادیر روزانه که در این تحقیق به آن پرداخته شد، مشاهده می‌شود که با افزایش بازه زمانی مورد مطالعه میزان همبستگی افزایش می‌یابد. به طوری که در سال ۱۳۷۴ میزان همبستگی روزانه در روش پنمن از ۰/۸۷ به ۰/۹۷ در مقیاس ماهانه افزایش می‌یابد درحالیکه این تغییر در مورد روش هارگریوز بسیار کم بوده است. در سال ۱۳۷۹ در دو روش هارگریوز و پنمن این مقدار از ۰/۹۰ و ۰/۷۷ به ۰/۹۵ و ۰/۸۱ افزایش پیدا می‌کند و در سال ۱۳۸۶ این همبستگی از ۰/۷۹ و ۰/۸۷ در دو روش هارگریوز و پنمن به ۰/۸۶ و ۰/۹۲ در مقیاس ماهانه افزایش می‌یابد که این تغییرات در اکثر پژوهش‌های انجام گرفته قبلی نیز صادق بوده است. همانطوری که در شکل ۴ نشان داده شده است، ضریب همبستگی مقادیر تبخیر-تعرق حاصل از روش سنجش از دور و پنمن مانیتث ۸۷ درصد و ریشه میانگین مربعات خطاها ۰/۶۷ میلیمتر در روز می‌باشد. همچنین شاخص میانگین خطای مطلق و انحراف مدل مبین آن است که مدل باخطای ۰/۴ و انحراف ۰/۲۶ میلیمتر در روز برآورد نموده است. مقادیر این شاخص‌ها برای روش هارگریوز به ترتیب، ۰/۸۹ درصد، ۰/۵۵

واقعی) در نقاط مختلف شبکه می توان نسبت به توزیع مناسب آب در سطح شبکه و بهبود مدیریت آبیاری اقدام نمود که تأثیر به سزایی در مدیریت بهینه مصرف آب در شبکه دارد.

مرطوب این هماهنگی بیشتر با روش پنمن مانیتث برقرار است و با کم شدن بارش در سالهای خشک این هماهنگی با روش هارگریوز وجود دارد. به طور کلی با برآورد میزان آب مورد نیاز (تبخیر-تعرق



شکل ۴ - مقایسه تبخیر-تعرق به دست آمده توسط روش (RS) و تبخیر-تعرق محاسبه شده از روش های پنمن مانیتث و هارگریوز در شبکه آبشار حوضه زاینده رود در سال های ۱۳۷۹، ۱۳۷۴ و ۱۳۸۶

منابع

- ۱- ارشد ص. ۱۳۸۶. ارزیابی ریسک خشکسالی کشاورزی با استفاده از سنجش از دور: توسعه یک مدل اجرایی برای استان کرمانشاه. پایان نامه دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۲- اکبری م. ۱۳۸۳. بهبود مدیریت آبیاری مزارع با استفاده از تلفیق اطلاعات ماهواره‌ای، مزرعه‌ای و مدل شبیه‌سازی SWAP، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۳- اکبری م، میرلطیفی س.م، مرید س.، و دروگرز پ. ۱۳۸۲. کاربرد سنجش از دور در برآورد سودمندی آب در شبکه های آبیاری، مطالعه موردی: شبکه سمت راست آبشار اصفهان. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، شماره ۱۷، جلد ۴ (زمستان): ۶۵-۸۲.
- ۴- بی نام. ۱۳۸۰. آمارنامه کشاورزی سال های زراعی ۷۱-۱۳۷۰ تا ۸۰-۱۳۷۹، انتشارات وزارت جهاد کشاورزی، معاونت برنامه ریزی و اقتصادی، نشریه ۸۰/۰۱.
- ۵- علی اصغرزاده ح.، و ثنائی نژاد س.ح. ۱۳۸۵. تخمین تبخیر و تعرق با استفاده از داده های سنجش از دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در حوضه آبخیز تنگ کنشت کرمانشاه. همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران.
- 6- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage, paper No. 56. UN Food and Agriculture Organisation, Rome, Italy, p. 300.
- 7- 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), 1. Formulation, Journal of Hydrology, 212-213: 198-212.
- 8- Bastiaanssen W.G.M., Molden D.J., and Makin I.W. 2000. Remote sensing for irrigation for agriculture: examples

- for research and possible applications. *Agricultural Water Management*, 46: 137-155.
- 9- Chandrapala L., and Wimalasuriya M. 2003. Satellite measurements supplemented with meteorological data to operationally estimate actual evapotranspiration of Sri Lanka. *Agricultural Water Management*. 58: 89-107.
 - 10- Choudhury B.J., Ahmed N.U., Idso S.B., Reginato R.J., and Daughtry C.S.T. 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*, 50:1-17.
 - 11- Droogers P., and Allen R.G. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation Drainage System* 6(1), 33-45.
 - 12- Gieske A., Toomanian N., and Akbari M. 2000. Monitoring NDVI of the main irrigation systems in the Zayandeh Rud Basin with NOAA/AVHRR during 1995. *IWMI progress Report* 7.
 - 13- Hargreaves G.H., ASCE F., and Allen R.G. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. January-February : 53-63.
 - 14- Li H., Li Z.Y., Lei C., Li Z.L., and Shengwei Z. 2008. Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology. *Journal of Agricultural Water Management* 95:1271-1278.
 - 15- Li Y.L., Cui J.Y., Zhang T.H., and Zhao H. Li. 2003. Measurement of evapotranspiration of irrigated spring wheat and maize in a semi-arid region of North China. *Agricultural Water Management* 61:1-12.
 - 16- Parodi G.N. 2002. AHAS, AVHRR Hydrological Analysis System. Software developed by Institute for Remote Sensing and Earth Sciences- Water Resources Division. The Netherlands.
 - 17- Stewart J.L., Watts C.J., Rodriguer J.C., De Bruin H.A.R., Van De Berg A.R., and Garatuza-Payan J. 1999. Use of satellite data to estimate radiation and evaporation for Northwest Mexico. *Agricultural Water Management*, 38:181-193.
 - 18- Teixeira A.H., Bastiaanssen W.G.M., Ahmad M.D., and Bos M.G. 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle Sao Francisco River basin, Brazil. Part A: Calibration and validation. *Agricultural and Forrest Meteorology*. 149 : 462-476.
 - 19- Teixeira A.H., Bastiaanssen W.G.M., Ahmad M.D., and Bos M.G. 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle Sao Francisco River basin, Brazil. Part B: Application to the regional scale. *Agricultural and Forrest Meteorology*. 149 : 477-490.



Estimation of Evapotranspiration by Remote Sensing Technique under Different Climate Condition

M. Akbari^{1*} - Z. Seif² - H. Zare Abyane³

Received: 7-11-2010

Accepted: 22-5-2011

Abstract

Evapotranspiration (ET) is one of the most important components of the water balance, it is also one of the most difficult to measure. Despite the importance of ET, methods to obtain values of ET are still limited. Conventional methods are very local, ranging from point to field scale. Estimates of the ET over the entire area, especially for irrigated areas, are essential, as these can differ substantially depending on the crop and the management applied. Today, actual and potential evapotranspiration under different conditions can be estimated by using satellites and remote sensing (RS) techniques. So that in this research, recent twenty years metrological data was assessed and based on precipitation, temperature and wind speed, three period include drought, normal and wet years (2000, 1995 and 2007 respectively) was chosen. The actual and potential evapotranspiration was estimated from a time series of NOAA-AVHRR satellite images using the SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) algorithm in Abshar irrigation system in Esfahan during the three selected years. The results show that the maximum evapotranspiration (8.1 mm/day for ET_a and 9.5mm/day for ET_p) occurs in 2000 as a drought year. Comparing the potential evapotranspiration results of SEBAL method with Hargreaves and FAO-56 Penman-monteith methods show that, SEBAL method and conventional methods has the same results under current condition, so remote sensing techniques can estimated actual evapotranspiration and produce high spatial coverage of important terms in the water balance for large areas, but at the cost of a rather sparse temporal resolution. As water is highly manageable in irrigation systems, it is an application typically suitable to establish improvements in irrigation water management at large scale such as basin and irrigation systems.

Keywords: Evapotranspiration, Remote sensing, Water management, Abshar irrigation system

1- Assistant Professor Research, Agricultural Engineering Research Institute, Karaj
(*-Corresponding Author Email: akbari_m43@yahoo.com)

2,3- MSc Student and Assistant Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Agriculture Faculty, Bu-Ali Sina University, Hamedan