

برآورد آب مصرفی بخش کشاورزی کشور ایران و ارزیابی نتایج به دست آمده از سامانه WaPOR با داده‌های زمینیحسین یوسفی^{۱*}، فاطمه کردی^۲، فرهاد محبتی^۲، لیلا قاسمی^۴

۱. دانشیار دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲. کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۳. دانش‌آموخته دکترای فیزیولوژی گیاهان زراعی، مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران

۴. کارشناسی ارشد اکوهیدرولوژی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۱۲/۰۱، تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۵/۱۵)

چکیده

در این مطالعه میزان مصارف آب کشور ایران با استفاده از محصول تبخیر- تعرق واقعی WaPOR که توسط FAO توسعه داده شده، در سطح همه استان‌های کشور برآورد شده است. با در نظر گرفتن دشت‌هایی که بیشتر مصارف کشاورزی ایران را دارند، میزان حجم آب مصرف شده طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ میلادی به تفکیک استانی تخمین زده شد. سپس، برای هر استان به صورت جداگانه شیب تغییرات مصارف کشاورزی استخراج شد. حجم آب مصرفی در بخش کشاورزی استان‌های خوزستان، تهران، گیلان به ترتیب طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ بیشترین روند افزایشی را داشته‌اند و به بیانی، دارای شیب تغییرات مثبت هستند. استان‌های هرمزگان و کرمانشاه نیز بیشترین روند کاهشی در میزان حجم آب مصرفی در بخش کشاورزی را داشته‌اند. نتایج بررسی این دوره آماری هفت‌ساله، بیانگر آن است که مصرف آب کشاورزی در سطح کشور و حجم آبیاری از سال‌های ۲۰۱۳ به بعد روند افزایشی داشته است. برای بررسی دقت محصول WaPOR، مقادیر آن با تبخیر و تعرق حاصل از الگوریتم SEBAL و آمار ایستگاه لایسیمتری در دشت میان‌دوآب مقایسه شد. نتایج بیانگر آن است که در غالب مناطق، مقادیر تبخیر- تعرق الگوریتم SEBAL نسبت به سامانه WaPOR بیشتر است که با حرکت به سمت ارتفاع ۲ هزار متر این اختلاف به بیشترین مقدار خود می‌رسد. مقادیر تبخیر- تعرق واقعی لایسیمتر دانشگاه تبریز همخوانی قابل قبولی با مقادیر محاسباتی الگوریتم SEBAL داشت، در نتیجه حجم آب مصرفی محاسبه شده با WaPOR کمتر از مقدار واقعی برآورد شده است.

کلیدواژگان: ایران، تبخیر- تعرق، مصارف کشاورزی، WaPOR، SEBAL.

مقدمه

منابع آب یکی از ابزارهای مهم رشد و توسعه شناخته شده‌اند. بر اساس گزارش فائو (۲۰۱۲) حدود ۷۰ درصد از آب موجود مصرف شده در جهان در بخش کشاورزی، ۱۱ درصد آن در بخش شهری و ۱۹ درصد در سیستم‌های صنعتی مصرف می‌شود؛ بنابراین بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در جهان است [۱]. افزایش جمعیت و نیاز به افزایش ۵۰ درصدی تولیدات این بخش تا سال ۲۰۳۰ (OECD, 2010) نشان‌دهنده اهمیت آب مصرفی در بخش کشاورزی است. یکی از ابزارها و شاخص‌های کلیدی در برنامه‌ریزی‌های کلان مربوط به تأمین، تخصیص و مصرف اصولی از آب در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، تخمین و یا تعیین مقدار آب در دسترس است [۲].

بلاچفورد و همکاران طی پژوهشی روی مناطق کشاورزی کوچک و متوسط مقیاس، تأثیر مقیاس استفاده‌شده در ارزیابی‌های مکانی بر شاخص‌های عملکرد آبیاری را بررسی کردند. مجموعه داده‌های استفاده‌شده در مطالعه یادشده، از طریق سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد (FAO) و بهره‌وری آب از طریق WAPOR تهیه شد. در مطالعه یادشده در پنج طرح آبیاری، سه شاخص عملکرد زراعی و بهره‌وری، برای سه تفکیک مکانی ۲۵۰، ۱۰۰ و ۳۰ متر ارزیابی شد. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش یادشده نشان‌دهنده اهمیت انتخاب تفکیک مکانی مناسب برای طرح مورد نظر، هنگام ارزیابی عملکرد آبیاری با استفاده از سنجش از دور بود [۳].

بلاچفورد و همکاران در تحقیق دیگری، تبخیر-تعرق محصولات زراعی کشور آفریقا را با استفاده از WAPOR V2 ارزیابی کردند. FAO به‌منظور نظارت بر بهره‌وری آب، داده‌های تبخیر-تعرق واقعی و برگاب (WPR-ETIa) را در سراسر آفریقا و خاورمیانه به‌صورت ۱۰ روزه و از سال ۲۰۰۹ به بعد در سه تفکیک مکانی ارائه می‌دهد. ارزیابی کیفیت WPR-ETIa محصول با ترکیب روش‌های ارزیابی چندگانه افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش یادشده نشان می‌دهد مجموعه داده WPR-ETIa از کیفیت کافی برای کمک به درک و نظارت بر فرایندهای آب‌های محلی و قاره‌ای و مدیریت آب برخوردار است [۴].

کائونه و اوپستال گزارشی در مورد بهره‌وری آب کشاورزی تهیه کردند که در آن، ارزیابی پایه‌ای از بهره‌وری آب برای محصولات کشاورزی ذرت، سورگوم، لوبیا، برنج، گوجه‌فرنگی، سیب‌زمینی، کلم و پیاز در سه مکان مختلف در موزامبیک

(نماتاندا، مواتیزه و بارو) صورت گرفت. در پژوهش یادشده نوعی مدل رشد محصول (FAO AquaCrop) در برابر عملکرد محصول مشاهده‌شده برای مناطق مورد نظر کالیبره شد و نتایج شبیه‌سازی بهره‌وری آب برای هر محصول در هر مکان به دست آمد. همچنین، در مقیاس زیرحوضه و حوضه برای محاسبه مقادیر پایه بهره‌وری آب زیست‌توده از داده WAPOR استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش یادشده نشان داد مطالعه انجام‌شده با داده WAPOR با استفاده از داده‌های میدانی می‌تواند مفید واقع شود [۵].

کنراد و همکاران در پژوهشی روی سیستم‌های آبیاری حوضه دریای آرال (ASB)، کاربری اراضی، وضعیت خاک و پوشش گیاهی، تولید محصولات و مصارف آب را بر اساس سنجش از دور ارزیابی کردند. بدیهی است که استفاده از RS باعث افزایش تنوع در تولید محصولات کشاورزی، الگوهای مکانی-زمانی تخریب زمین و تأثیرات مختلف آب در افزایش محصول می‌شود. مدل‌سازی عملکرد محصول و تبخیر-تعرق در مقیاس‌های مختلف، نشان‌دهنده بهره‌وری نسبتاً متوسط آب در سیستم‌های آبیاری حوضه دریای آرال بود. به همین منظور، روش‌های انتقال دانش مبتنی بر RS در عمل با استفاده از ابزار آنلاین WUEMOCA که از ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ در طرح ابتکاری آب آلمان در آسیای مرکزی (CAWa) توسعه داده شد، مورد بحث قرار گرفت. درنهایت، مطالعه یادشده با استفاده از ابزارهای آنلاینی مانند WUEMOCA، اطلاعات و منابع لازم برای تصمیم‌گیری و همچنین، الزامات مربوط به تلفیق بهتر اطلاعات مبتنی بر سنجش از دور را فراهم می‌کند [۶].

فریتز و همکاران در مقاله‌ای هشت سیستم اصلی نظارت بر کشاورزی در مقیاس جهانی و منطقه‌ای را بررسی کردند. آنها این سیستم‌ها را بر اساس داده‌های ورودی و مدل‌های استفاده‌شده، بازده‌های تولیدشده و سایر ویژگی‌ها مانند نقش تحلیلگر، تعامل آنها با سایر سیستم‌ها و مقیاس جغرافیایی که در آن فعالیت می‌کنند، مقایسه کردند. با وجود پیشرفتی که در دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای با وضوح زیاد، طی دهه گذشته صورت گرفته است و همچنین، استفاده از محصولات مختلف مبتنی بر سنجش از دوری که توسط سیستم‌های مختلف انجام می‌شود، هنوز هم شکاف‌های اساسی در این زمینه وجود دارد. درنهایت، توصیه شد که برای رفع این شکاف‌ها از طریق بهبود مداوم در سنجش از دور، کنترل جریان داده‌های جدید و نوآورانه و اشتراک‌گذاری بیشتر داده‌ها اقدام شود [۷].

روند تغییرات آبیاری در سال‌های خشک و تر نشان داد بیشترین میزان اختلاف در این دو حالت برای محصولات مثل یونجه بود که طی بهار و تابستان کشت می‌شد. در نهایت، تغییر میزان آبیاری طی سال‌های ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۶ بررسی شد که نتایج بیانگر افزایش میزان آب آبیاری مصرف‌شده طی دوره مورد نظر بود [۱۴].

توسعه ماهواره‌های سنجنش از دور، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به دلیل پوشش وسیع مکانی، قدرت تفکیک زیاد، هزینه کم و آرشو زمانی باعث شده است استفاده از تصاویر ماهواره‌ای رشد چشمگیری داشته باشد. استفاده از داده‌های سنجنش از دور این امکان را ایجاد می‌کند که مقادیر مصرف آب اعم از سطحی و زیرزمینی، تخمین زده شده و با توجه به تولید نقشه‌های توزیع مکانی تبخیر- تعرق، موقعیت آن نیز تعیین شود؛ امکانی که به علت استفاده‌های غیرمجاز از آب به‌خصوص در آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های زمینی امکان‌پذیر نیست.

از اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی، سنجنش از دور در تخمین تبخیر- تعرق نیز به کار گرفته شده است. تا کنون روش‌های مختلفی برای برآورد تبخیر- تعرق واقعی بر مبنای داده‌های سنجنش از دور به کار رفته است. همان‌طور که گفته شد، تبخیر- تعرق از گیاه، خاک، سطوح مناطق شهری، جنگل و پوشش گیاهی طبیعی، بیشترین سهم مصرف آب را دارد و از آنجا که تخمین آبیاری در مناطق کشاورزی، به ارزیابی دو پارامتر بارش مؤثر و میزان مصرف آب بستگی دارد، در این مطالعه که هدف آن، برآورد حجم آبیاری در بخش کشاورزی استان‌های کشور است، از محصول W_aPOR^1 که بر پایه تصاویر ماهواره‌ای و علم سنجنش از دور به تخمین و برآورد میزان تبخیر و تعرق می‌پردازد، استفاده شد. این سامانه توسط گروه تکنولوژی اطلاعات FAO و کارشناسان آب و خاک آژانس تخصصی سازمان ملل با هدف تحت پوشش قرار دادن کشورهایی که با کم‌آبی فیزیکی یا زیرساختی در آفریقا و خاورمیانه مواجه هستند و یا به‌زودی دچار بحران می‌شوند، طراحی شده است. سامانه W_aPOR ، مقدار تبخیر- تعرق واقعی را با هدف تقویت بهره‌وری کشاورزی و با استفاده از پیشرفته‌ترین فناوری‌های ماهواره‌ای و الگوریتم جدید ETLook تخمین می‌زند [۱۵]. الگوریتم ETLook در محاسبه بیلان انرژی سطح به جای استفاده از دمای سطح، رطوبت

کای و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای میزان مصارف محصولات کشاورزی را با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای MODIS، JRS، Landsat (ETM+) و Quickbird در تفکیک‌های مختلف طیفی، فضایی، رادیو متریک و زمانی، تخمین زدند. نتایج پژوهش آنها نشان داد برای افزایش بهره‌وری آب می‌توان از طریق روش‌های بهتر مدیریت آب و گیاهان زراعی، به‌طور چشمگیری امنیت غذایی را افزایش داد [۸].

ایران نیز همانند سایر کشورها، بخش قابل توجهی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی خود را در بخش کشاورزی استفاده می‌کند. تا کنون حجم آب مصرفی در بخش کشاورزی به‌طور دقیق تعیین نشده و این مسئله همچنان به‌عنوان یکی از دغدغه‌های اصلی متولیان و برنامه‌ریزان منابع آب کشور مطرح است.

مصرف آب در کشور برای سال‌های ۱۳۷۵ و ۱۳۸۰ به‌ترتیب ۸۶/۸ و ۹۳/۱ میلیارد مترمکعب و مصرف آب در بخش کشاورزی ۸۱/۴ و ۸۶ میلیارد مترمکعب گزارش شده؛ برای سال ۱۴۰۰ نیز مصرف آب در کشور و بخش کشاورزی به‌ترتیب برابر ۱۱۳/۲ و ۱۰۳ میلیارد مترمکعب پیش‌بینی شده است [۹]. در گزارش ارائه‌شده توسط وزارت نیرو، حجم مصرف آب در کشور ۸۸/۵ میلیارد مترمکعب و مصرف آب در بخش کشاورزی ۸۳ میلیارد مترمکعب بیان شده است [۱۰].

در مطالعات مختلف با توجه به شیوه تعریف آب استفاده‌شده در آبیاری، روش‌های مختلفی برای محاسبه آب آبیاری مصرف‌شده، با تکیه بر داده‌های زمینی و ماهواره‌ای تبیین شده است. کرینر و همکاران (۱۹۹۴) میزان خالص آب آبیاری مورد نیاز (NIR) را با استفاده از رابطه $NIR = PE - ETM$ تعریف کردند که در آن ETM بیشینه تبخیر- تعرق و PE بارش مؤثر در یک سیستم آبیاری است. بر این اساس، اگر مقدار آبیاری بیشتر از شاخص NIR شود، سیستم در معرض آبیاری بیش از حد قرار گرفته است [۱۱]. به‌طور مشابه، فاسی و همکاران نیز شاخص عملکرد آبیاری فصلی (SIPI) را به‌عنوان درصد فصلی از NIR به‌صورت حجم آب آبیاری تحویل داده‌شده به اراضی کشاورزی، تعریف کردند [۱۲]. برای محاسبه میزان آب آبیاری از شاخص آب مصرف‌شده برای آبیاری $IWCU = ETa - Pe$ نیز استفاده شده که از اختلاف بین تبخیر- تعرق واقعی و میزان بارش تعیین می‌شود [۱۳]. در مطالعه دیگری، نیاز آبی محصولات از اختلاف دو پارامتر تبخیر- تعرق گیاه (ETc) و بارش مؤثر (efP) منطقه ($IR = ETc - efP$) محاسبه شده است. بررسی

پوشش زمین/ طبقه‌بندی محصولات، بارش، تبخیر- تعرق مرجع و واقعی را در بر می‌گیرد [۱۵]. در این مطالعه محصول تبخیر- تعرق واقعی WaPOR با قدرت تفکیک زمانی سالانه برای سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ دانلود شده و برای منطقه مطالعه‌شده ارزیابی شد. همچنین، به‌منظور اعتبارسنجی نتایج، از داده‌های زمینی لایسیمتر تبخیر- تعرق و همچنین، تبخیر- تعرق محاسبه‌شده از سنجنده‌های MODIS و Landsat8 با استفاده از الگوریتم SEBAL در دشت میاندوآب استفاده شد.

به‌منظور استخراج کلاس اراضی کشاورزی به تفکیک هر استان، از محصول آماده کاربری اراضی MODIS (MCD12Q1) با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر استفاده شد. برای برآورد آب آبیاری مصرفی در منطقه، داده‌های تبخیر- تعرق و بارش مورد نیاز است. توزیع مکانی تبخیر- تعرق با استفاده از محصول WaPOR تخمین زده شد. همچنین، داده‌های بارش مورد نیاز از ایستگاه‌های هواشناسی مرکز هر استان استخراج شد.

شیوه برآورد مصرف آب در بخش کشاورزی با استفاده از

محصول WaPOR

ابتدا میانگین تبخیر- تعرق واقعی در کل سطح هر استان بدون احتساب پهنه‌های آبی و پس از آن، میانگین تبخیر- تعرق واقعی استان‌ها در اراضی کشاورزی به دست آمد. طبق مطالعه صورت‌گرفته در مرکز سنجش از دور (RSRC) پیرامون ارزیابی محصولات آماده کاربری اراضی، محصول MODIS (MCD12Q1) در برابر دیگر محصولات دقت بیشتری دارد [۱۵]، به این منظور، برای استخراج کلاس اراضی کشاورزی از این محصول استفاده شد.

مجموع سطح‌هایی که در محصول مادیس به‌عنوان اراضی کشاورزی طبقه‌بندی شده بود با مجموع سطوح آبی محصولات زراعی و سطوح آبی بارور محصولات باغی ارائه‌شده در آمارنامه‌های جهاد کشاورزی، مقایسه شدند. به دلیل اینکه هدف اصلی مطالعه، برآورد آبیاری است، از اطلاعات آمارنامه که مربوط به سطح‌های آبی زیر کشت بود، استفاده شد. با توجه به اینکه محصول کاربری اراضی استفاده‌شده مربوط به سال ۲۰۱۳ میلادی بود، آمار مربوط به سال زراعی ۱۳۹۱-۱۳۹۲ که منطبق با سال ۲۰۱۳ میلادی بود، ارزیابی شد [۱۹].

تخمین آب آبیاری مصرف‌شده

میزان آب مصرفی در واقع عمق آب آبیاری است که برای

خاک استخراج‌شده از سنسور ماکروویو غیرفعال را استفاده می‌کند. داده‌های ماکروویو به دلیل اینکه کمتر تحت تأثیر پوشش ابری قرار می‌گیرند، می‌توانند اطلاعات مربوط به زمان‌هایی که بارندگی اتفاق افتاده است را در اختیار قرار دهند. مطالعات معدودی در مورد این الگوریتم صورت پذیرفته است. باستیان سن و همکاران در حوضه Indus طی پژوهشی که با استفاده از الگوریتم ETLook انجام داد، به این نتیجه رسید که این الگوریتم دقت زیادی در این مناطق دارد و حتی در روزهای ابری نیز توانایی زیادی از خود نشان می‌دهد [۱۶].

گروه تکنولوژی اطلاعات سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی ملل متحد (FAO)، «سامانه بهره‌وری آب با دسترسی آزاد ۵» را با هدف تحت پوشش قرار دادن کشورهایی که با کم‌آبی فیزیکی یا زیرساختی در آفریقا و خاورمیانه مواجه بوده‌اند و یا به‌زودی دچار بحران می‌شوند، طراحی کرده‌اند. تبخیر- تعرق واقعی یکی از محصولات مهم این سامانه است که به‌صورت سالانه و ۱۰ روزه با تفکیک مکانی ۲۵۰ متری طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۶ با استفاده از الگوریتم ETLook ارائه می‌کند [۱۷].

در این مطالعه با استفاده از محصول WaPOR میزان مصارف به تفکیک هر استان تخمین زده شد. سپس، با استخراج مقدار بارش سالانه در ایستگاه سینوپتیک مرکز استان‌ها و با لحاظ کردن ضریب ۰/۶۹ به‌عنوان بارش مؤثر برای هر استان محاسبه شد. در پایان، با کاستن حجم بارش مؤثر از حجم آب مصرف‌شده، میزان حجم آب آبیاری اعمال‌شده برای تمامی اراضی کشور تخمین زده شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه‌شده

منطقه بررسی‌شده در این مطالعه، پهنه سرزمین کشور ایران است. کشور ایران بخشی از سرزمین کوهستانی و بلند فلات ایران است. این فلات از شمال، به دریای مازندران و استپ‌های ترکمن؛ از جنوب، به خلیج فارس و دریای عمان؛ از غرب، به جلگه بین‌النهرین و دامنه‌های غربی رشته‌کوه‌های زاگرس و از شرق، به جلگه رود سند و کوه‌های پامیر محدود است. حدود جغرافیایی کشور ایران از ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۶۳ درجه طول شرقی گسترش دارد [۱۸].

مجموعه داده‌های استفاده‌شده

سامانه WaPOR مجموعه‌ای از داده‌های ارزیابی بهره‌وری آب،

حدود ۱۲/۲ میلیون هکتار بوده که از این مقدار ۵۱/۸ درصد سهم اراضی با کشت آبی و ۴۸/۲ درصد سهم اراضی با کشت دیم بوده است. در این سال زراعی استان خوزستان با ۹/۱ درصد سهم در سطح برداشت محصولات زراعی، بیشترین سطح برداشت شده را نسبت به استان‌های دیگر به خود اختصاص داده و استان‌های خراسان رضوی با سهم ۶/۹ و کردستان با ۶/۵ درصد در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. کمترین سطح محصولات زراعی با سهم ۰/۳ درصد متعلق به استان یزد بوده است [۲۱].

در مورد سطح زیر کشت محصولات زراعی آبی که مد نظر مطالعه حاضر بوده، بیشترین سطح برداشت شده محصولات زراعی آبی متعلق به استان خوزستان است، به طوری که ۱۴/۳ درصد از سطح اراضی زراعی آبی کشور در این استان برداشت شده است. استان‌های خراسان رضوی با سهم ۹ و فارس ۹/۸ درصد سطح برداشت محصولات زراعی آبی کشور در رتبه‌های دوم و سوم هستند و این سه استان در مجموع حدود ۳۳/۱ درصد از سطح برداشت محصولات زراعی آبی کشور را به خود اختصاص داده‌اند. کمترین سطح برداشت شده محصولات زراعی آبی متعلق به استان‌های کهگیلویه و بویراحمد با سهم ۰/۶ و یزد با ۰/۷ درصد است [۲۱]. نتایج این مقایسه در شکل ۱ ارائه شده است. مساحت اراضی کشاورزی محاسبه شده برای کل کشور با استفاده از محصول مادیس برابر با ۷۳۱۰۸ کیلومترمربع است، در حالی که مساحت این اراضی در آمارنامه ۷۸۵۳۵ کیلومترمربع گزارش شده است. اختلاف بین دو مقادیر یادشده ۵۴۲۷ کیلومترمربع است. نتایج به دست آمده میان مقادیر محاسبه شده از محصول مادیس با وجود اینکه سازگاری مناسب با مطالعات قبلی صورت گرفته داشته، ولی همان‌طور که مشهود است در برخی از استان‌ها از اختلاف عددی قابل توجهی با آمار جهاد کشاورزی برخوردار است. از آنجا که مطالعات و بررسی‌ها نشان می‌دهد اطلاعات آمارنامه از صحت و درستی چندان زیادی برخوردار نیست، بنابراین در این مطالعه از نتایج محصول مادیس به منظور محاسبه میزان آب مصرفی به علت نبود داده دیگری بهره گرفته شد.

تولید محصول مناسب مورد نیاز است. با توجه به اینکه میزان بارش برآوردشده به طور متوسط کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر بوده است (اقلیم گرم و خشک)، در محاسبه میزان آب آبیاری، مقدار رطوبت خاک در نظر گرفته نشده و آب آبیاری مصرف شده (U) فقط با کسر تبخیر- تعرق واقعی محصول (ET) از مقدار آب در دسترس محصول از طریق بارش مؤثر (fe) به دست می‌آید (رابطه ۱) [۲۰]:

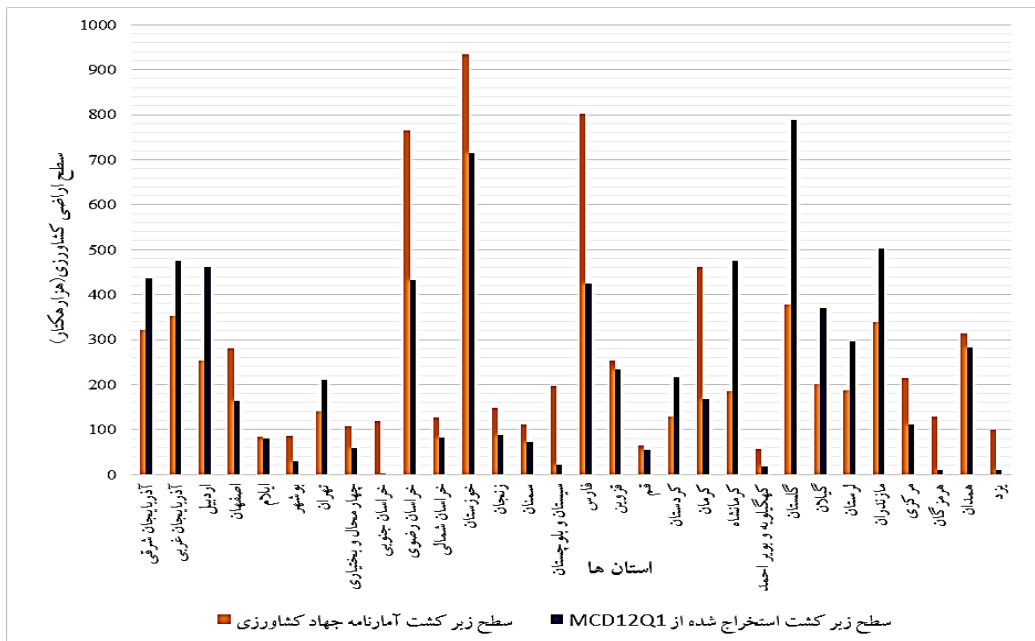
$$U = ET - fe \quad (1)$$

برای تخمین حجم آب آبیاری مصرفی در اراضی کشاورزی، باید سطح زیر کشت اراضی کشاورزی در مقدار U (ارتفاع آب آبیاری مصرف شده بر حسب میلی‌متر) با احتساب بازده ۶۴ درصد ضرب شود.

نتایج

اراضی کشاورزی استان‌های کشور برگرفته از محصول مادیس
مساحت اراضی کشاورزی محاسبه شده برای کل کشور با استفاده از محصول مادیس برابر با ۷۳۱۰۸۰۰ هکتار بود که استان‌های گلستان، خوزستان و مازندران به ترتیب بالاترین سطح اراضی کشاورزی کشور را نسبت به استان‌های دیگر داشتند. کمترین سطح زیر کشت متعلق به استان‌های یزد و خراسان جنوبی است.

در سال ۱۳۹۲ سطح محصولات باغی کشور (اعم از غیر بارور و بارور) حدود ۲/۵۹ میلیون هکتار بوده است که ۸۵ درصد آن، آبی و بقیه، دیم است. سطح بارور باغ‌های کشور حدود ۲/۱۹ میلیون هکتار برآورد شده که معادل ۸۵ درصد از کل سطح باغ‌های کشور است. در این سال استان فارس با داشتن سهم ۱۴ درصدی از کل سطح محصولات باغی، بالاترین سطح باغ‌های کشور را نسبت به استان‌های دیگر دارد و پس از آن، استان‌های کرمان با سهم حدود ۱۲ درصد، خراسان رضوی با ۱۱ درصد، مازندران با ۶ درصد، گیلان با ۴ درصد، آذربایجان شرقی با ۳/۹ درصد، رتبه‌های دوم تا ششم قرار دارند. این شش استان در مجموع ۵۰/۳ درصد از سطح باغ‌های کشور را به خود اختصاص داده‌اند. کمترین سطح محصولات باغی با سهم ۰/۲ درصد متعلق به استان ایلام است [۲۱]. در سال زراعی ۱۳۹۱-۱۳۹۲ سطح محصولات زراعی

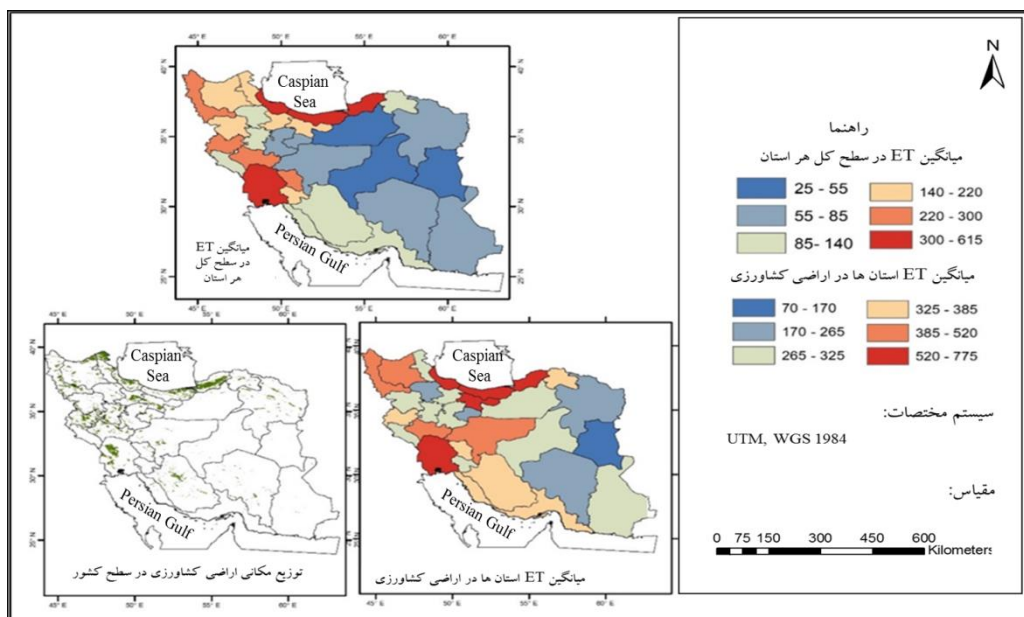


شکل ۱. مقایسه سطح زیر کشت استان‌های کشور تهیه شده از آمارنامه جهاد کشاورزی با سطح زیر کشت برگرفته از محصول مادیس

استان‌ها و میانگین تبخیر- تعرق واقعی در اراضی کشاورزی استان‌ها را برای سال ۲۰۱۶ میلادی نشان می‌دهد. در نهایت، حجم آب آبیاری مصرفی در اراضی کشاورزی برای هر یک از استان‌های کشور با استفاده از محصول تبخیر- تعرق WaPOR طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۶ تخمین زده و محاسبه شد.

حجم آب آبیاری مصرف شده

نقشه‌های میزان تبخیر- تعرق برای همه استان‌های کشور و اراضی کشاورزی استان‌ها با توجه به سامانه WaPOR برای سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ میلادی محاسبه شد. شکل ۲ توزیع مکانی میانگین تبخیر- تعرق واقعی محصول WaPOR برای همه استان‌های کشور، توزیع مکانی اراضی کشاورزی در سطح



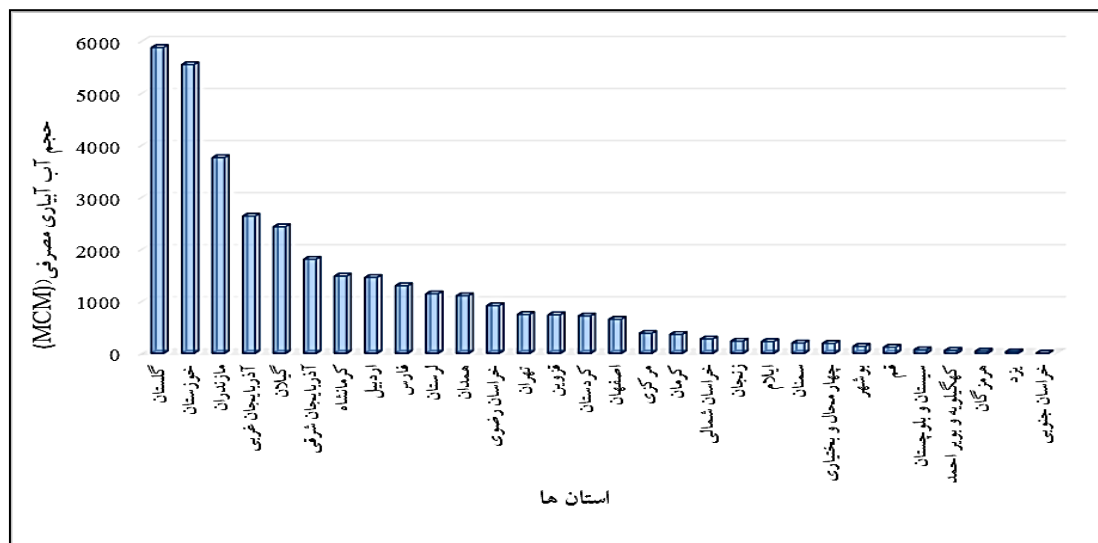
شکل ۲. توزیع مکانی تبخیر- تعرق واقعی کشور ایران در سال ۲۰۱۶ میلادی

در اراضی کشاورزی به ترتیب برای استان‌های گلستان، خوزستان و مازندران و کمترین حجم آب آبیاری مصرف شده

بررسی‌های انجام شده طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ میلادی بیانگر آن است که بیشترین حجم آب آبیاری مصرفی

نشان دادن رتبه‌بندی استان‌ها، انتخاب و نمودار مربوط به آن در شکل ۳ رسم شد.

به ترتیب برای استان‌های خراسان جنوبی، یزد و هرمزگان است. حجم آب آبیاری مصرفی کشور در سال ۲۰۱۶ به منظور

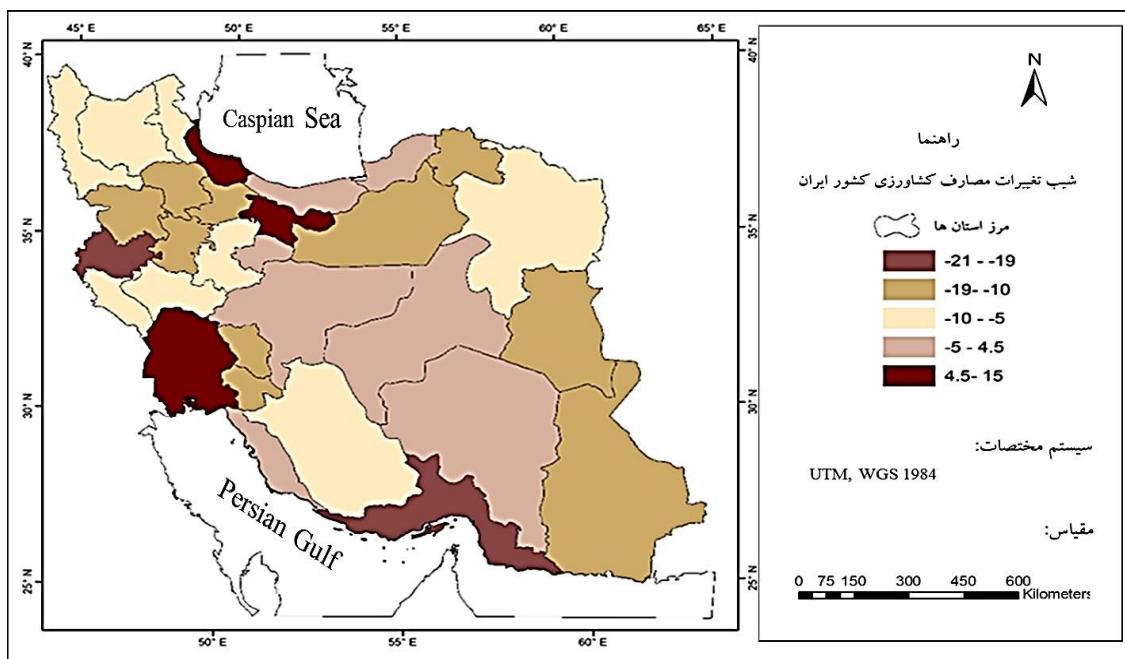


شکل ۳. حجم آب آبیاری مصرفی استان‌های کشور سال ۲۰۱۶ میلادی برحسب میلیون مترمکعب (MCM)

مصرفی استان‌های خوزستان، تهران، گیلان به ترتیب طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ میلادی بیشترین روند افزایشی را داشته و به بیانی، دارای شیب تغییرات مثبت بودند. استان‌های هرمزگان و کرمانشاه، به ترتیب دارای روند کاهشی و دارای شیب تغییرات منفی در میزان حجم آب آبیاری مصرفی بوده‌اند.

بررسی شیب روند تغییرات مصارف کشاورزی طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

با محاسبه حجم آب آبیاری مصرفی استان‌های کشور طی سال‌های یادشده برای هر استان به صورت جداگانه معادله خطی به دست آمد و بر اساس آن، شیب تغییرات برای هر استان استخراج شد. با توجه به شکل ۴ حجم آب آبیاری

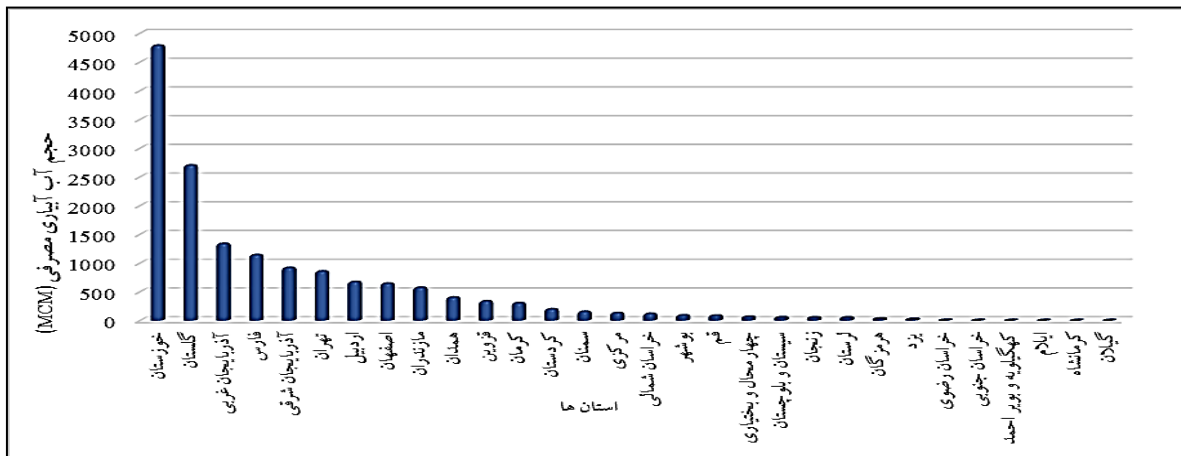


شکل ۴. شیب روند تغییرات آبیاری مصرف‌شده در بخش کشاورزی طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ میلادی

داده‌اند. استان‌های گیلان، کرمانشاه، ایلام، کهگیلویه و بویراحمد و خراسان جنوبی به ترتیب کمترین میزان حجم آبیاری اعمال شده را در این بازه زمانی بررسی شده داشته‌اند. برای بهتر نشان دادن اختلاف حجم آبیاری بین استان‌های کشور نیز نمودار حجم آبیاری اعمال شده سال ۲۰۱۶ میلادی برای استان‌ها رسم شده و در شکل ۵ قابل مشاهده است.

محاسبه حجم آبیاری اعمال شده

با کاستن حجم بارش مؤثر از حجم آب آبیاری مصرف شده، حجم آب آبیاری اعمال شده نیز قابل محاسبه است. استان‌های خوزستان، گلستان، آذربایجان غربی، فارس و آذربایجان شرقی به ترتیب رتبه‌های یکم تا پنجم در بیشترین میزان حجم آب آبیاری اعمال شده را به خود اختصاص

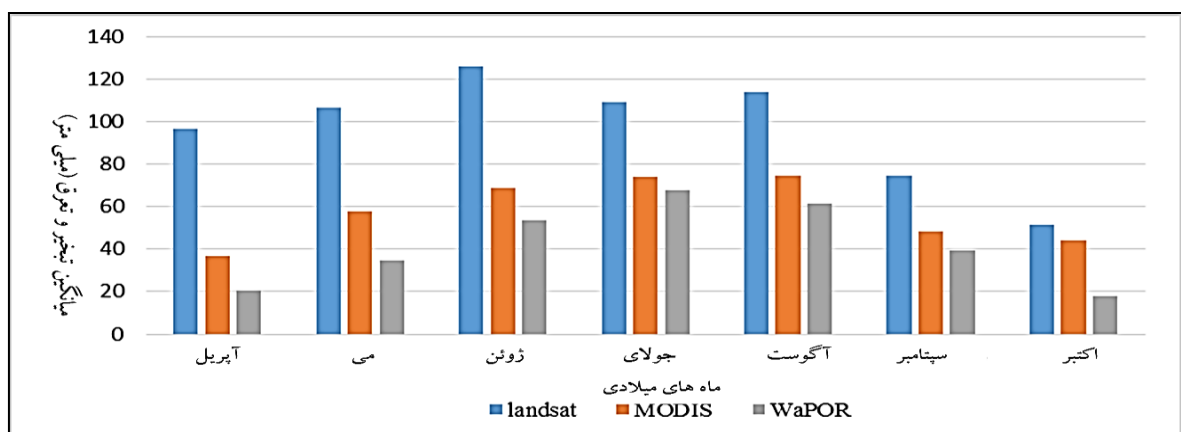


شکل ۵. حجم آب آبیاری مصرفی در استان‌های کشور در سال ۲۰۱۶ میلادی بر حسب میلیون مترمکعب (MCM)

حاصل از این دو سنجنده در کنار مقادیر خروجی الگوریتم ETLlook در داخل زیرحوضه میاندوآب در ماه‌های آوریل، می، ژوئن، ژوئیه، اوت، سپتامبر و اکتبر سال ۲۰۱۴ میلادی در شکل ۶ خلاصه شده است.

مقایسه مقادیر الگوریتم SEBAL حاصل از سنجنده‌های مختلف با سامانه WaPOR

به منظور ارزیابی تأثیر سنجنده‌های مختلف بر نتایج محاسبه تبخیر-تعرق ماهانه SEBAL، از محاسبات بر پایه تصاویر MODIS-Terra و OLL_Landsat8 استفاده شد و نتایج



شکل ۶. نمودار میانگین ارتفاع تبخیر-تعرق در دشت میاندوآب (Landsat, MODIS, و سامانه WaPOR)

سامانه WaPOR در فاصله ماه‌های ژوئن و ژوئیه رخ داده و در مقایسه تبخیر-تعرق SEBAL با سنجنده MODIS و سامانه WaPOR تفاوت در ماه‌های ژوئیه و اوت مشاهده می‌شود.

بر اساس شکل ۶، میزان تبخیر-تعرق در ماه‌های مختلف روند افزایشی و کاهشی تقریباً مشابهی دارند. تنها تفاوت در روند تغییرات تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط ماهواره لندست و

این اختلاف باعث می‌شود تأثیر اختلاط پیکسلی قابل توجه باشد، اما با توجه به اینکه اطراف این لایسیمتر تا فاصله زیادی پوشیده از یونجه و کشت‌های دیگر است، می‌توان با تقریب خوبی این مقدار را به‌عنوان ET پیکسل‌های SEBAL و WaPOR پذیرفت.

نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه، به‌روز کردن و تخمینی از برآورد حجم آب آبیاری اعمال‌شده در بخش کشاورزی در کشور طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ میلادی است. حجم آب آبیاری اعمال‌شده برای سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ حدود ۱۳ میلیارد مترمکعب و برای سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ حدود ۱۶ میلیارد مترمکعب با استفاده از محصول WaPOR برآورد شد. مصرف آب در سطح کشور، در بخش کشاورزی و حجم آبیاری از سال‌های ۲۰۱۳ به بعد دارای روند افزایشی بوده است. حجم آبیاری صورت‌گرفته در بعضی از استان‌های کشور از جمله استان‌های خوزستان، گلستان، آذربایجان غربی، فارس و آذربایجان شرقی بیشتر از سایر استان‌های کشور دیده شد که دلیل اصلی آن را می‌توان بالا بودن سطوح زیر کشت در این مناطق دانست.

نقشه‌های تولیدشده توسط سامانه WaPOR از لحاظ مقیاس زمانی و مکانی عملکرد بهتری نسبت به SEBAL داشت که از دلایل این امر می‌توان به توانایی الگوریتم ETLook در محاسبه تبخیر- تعرق در شرایط ابری اشاره کرد. مقادیر عددی نقشه‌های خروجی از سامانه WaPOR بسیار کمتر از میزان تبخیر- تعرق محاسبه‌شده توسط الگوریتم SEBAL بود و با حرکت از مناطق کم‌ارتفاع حوضه به سمت تراز ارتفاعی ۲ هزار متر این اختلاف به بیشترین مقدار خود می‌رسید. مقادیر لایسیمتر مستقر در دانشگاه تبریز همخوانی قابل قبولی با مقادیر محاسباتی مطالعه الگوریتم SEBAL داشت که به دلیل بزرگ بودن اندازه پیکسل‌های دو روش نمی‌تواند شرط مناسبی برای نتیجه‌گیری از عملکرد آنها باشد؛ با این‌وجود سامانه WaPOR نتایج ضعیفی را در این مقایسه ارائه می‌کند. ارزیابی تبخیر- تعرق در مقابل بارش در اراضی کشت دیم حکایت از برتری مقادیر تبخیر و تعرق سامانه WaPOR دارد؛ در حالی که در اراضی کشت دیم میزان بارش از تبخیر- تعرق محاسباتی توسط الگوریتم SEBAL کمتر شد که قابل قبول نیست.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، مقادیر محاسباتی توسط مطالعه الگوریتم SEBAL بیشتر از مقادیر سامانه WaPOR و مقادیر محاسبه‌شده توسط ماهواره لندست بیشتر از مقدار محاسبه‌شده توسط سنجنده MODIS است. بیشترین مقدار اختلاف تبخیر- تعرق بین نقشه‌های خروجی از ماهواره لندست و سامانه WaPOR وجود دارد که مربوط به ماه آوریل است و مقادیر آنها به ترتیب حدود ۹۶/۵ و ۲۰/۷ میلی‌متر در ماه است. نکته قابل توجه کاهش میزان اختلاف بین مقادیر محاسباتی الگوریتم SEBAL و سامانه WaPOR با حرکت به سمت ماه اکتبر، است. یک دلیل محتمل برای این موضوع کاهش میزان تبخیر و تعرق ماهانه در فصول سردتر است.

مقایسه مقادیر برآوردشده با داده‌های زمینی

با توجه به اطلاعات موجود از ایستگاه لایسیمتر داخل مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تبریز و روزها و ماه‌های مطالعه‌شده، فقط داده‌های چهار تاریخ یعنی بیست و هفتم می، سوم ژوئن، نهم و سی‌ام جولای ۲۰۱۰ میلادی قابل مقایسه است. نتایج داده‌های اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه لایسیمتری، داده‌های محاسبه‌شده در نقشه‌های تولیدی به روش الگوریتم SEBAL اصلاح‌شده و اطلاعات خروجی از نقشه‌های تبخیر- تعرق سامانه WaPOR در جدول ۱ نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد مقادیر لایسیمتر با مقادیر محاسبه‌شده توسط مطالعات الگوریتم SEBAL توسط سنجنده MODIS مشابهاً قابل قبولی دارد، در حالی که اختلاف درخور توجهی گاهی بیش از ۹۰ درصد (در ۲۷ می) با نتایج سامانه WaPOR وجود دارد.

جدول ۱. مقایسه مقادیر ثبت‌شده ارتفاع تبخیر- تعرق واقعی در ایستگاه لایسیمتر تبریز و مقادیر تخمین‌زده‌شده توسط الگوریتم SEBAL اصلاح‌شده (برحسب میلی‌متر)

Date of 2010	Lysimetre ET	SEBAL ET	WaPOR ET
May 27	۵	۴/۷	۰/۴
June 03	۴/۱	۳/۸	۱/۳
July 09	۱۰/۵	۸/۱	۱/۹
July 30	۲/۲	۳/۱	۱/۵

درخور یادآوری است که لایسیمتر یادشده درون مزرعه است و فقط ۷۰۰ مترمربع مساحت دارد، در حالی که مساحت پیکسل الگوریتم SEBAL برابر یک کیلومترمربع و مساحت پیکسل محصول WaPOR ۶۲۵۰۰ مترمربع است.

- Jacquesc S, Becker-Reshefd I, et al. A comparison of global agricultural monitoring systems and current gaps. *Agricultural Systems* 168. 2019; 258-272.
- [8]. Cai C, Thenkabail PS, Biradar CM, Platonov A, Gumma M, Dheeravath V, et al. Water productivity mapping using remote sensing data of various resolutions to support "more crop per drop". *Journal of Applied Remote Sensing*, 2009; Vol. 3, 033557.
- [9]. Samani m. Water resources management and Sustainable development. Parliamentary infrastructure studies office of the Islamic Parliament. 2005; Repotr No. 7374, 35 pages. [Persian]
- [10]. Abbasi F, Naseri A, Sohrab F, yaghani J, Abbasi N, Akbari M. Improving water consumption efficiency. Institute of technical and agriculture research. 2015. [Persian]
- [11]. Krinner W, Garc'ia A, Estrada F. Method for estimating efficiency in Spanish irrigation systems. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 120 (5). 1994, 979-986.
- [12]. Faci JM, Bensaci A, Salti A, Playán E. A case study for irrigation modernisation. I. Characterisation of the district and analysis of water delivery records. *Agric. Water Manage.* 2000; 42, 315-334.
- [13]. Burt CM, Clemmens AJ, Strelkoff TS, Solomon KH, Bliesner RD, Hardy LA, et al. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 123 (6). 1997, 423-442.
- [14]. Castaño S, Sanz D. Gómez-Alday JJ. Methodology for quantifying groundwater abstractions for agriculture via remote sensing and GIS. *Water Resources Management*, 2010. 24(4), 795-814
- [15]. Remot Sensing Research Center (RSRC). Introducing and comparing the FAO Portal and the activities of the Remot Sensing Center in estimating productivity in agriculture sector. Sharif University of Technology. 2017. [Persian]
- [16]. Bastiaanssen WGM, Cheema M J M, Immerzeel WW, Miltenburg IJ, Pelgrum H. Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model. *Water Resour. Res.*, 48, W11512, 2012.
- [17]. FAO and IWMI. Stakeholder mapping and capacity needs assessment, Ethiopia. *Remote Sensing for Water Productivity Technical Report: Capacity Development Series*. Rome, FAO. 2018, 56 pages. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- [18]. Al yasin A. Water crisis. Iranian Society of Consulting Engineers, 2007, 964-06-6404-9, 518 pages. [Persian]
- [19]. Agriculture statistics, Office of Statistics and Information Technology. Tehran, the Ministry of

نکته قابل توجه اینکه نباید این مقوله مانند یک مسئله و پدیده تصادفی یا آماری صرف (محض) ارزیابی شود و نیازمند توجه بیشتری است. درخور یادآوری است برآورد مصرف آب در بخش کشاورزی دارای محدودیت‌ها و ساده‌سازی‌های غیرقابل‌اعتماد است که باید به آنها توجه کرد. برای مثال، در بخش محاسبه بارش مؤثر فقط از داده‌های ایستگاه سینوپتیک مرکز استان‌ها استفاده شده و به کل استان تعمیم داده شد که این مسئله سبب عدم قطعیت در نتایج می‌شود. همچنین، توصیه می‌شود علاوه بر روش درصدی از سایر روش‌های با دقت بیشتر به‌منظور محاسبه بارش مؤثر استفاده شود. همچنین، طبق مطالعات صورت‌گرفته، محصول WaPOR که از الگوریتم ETLook استفاده می‌کند، به‌رغم داشتن توزیع مکانی مناسب، از نظر مقداری نسبت به داده‌های زمینی، مقادیر کمتری را برآورد می‌کند که گاه این اختلاف قابل توجه است. درواقع، استفاده از محصولات آماده تبخیر-تعرق نیز به دلیل عدم بومی‌سازی الگوریتم‌های استفاده‌شده و همین‌طور عدم واسنجی در مکان‌های مختلف، توصیه نمی‌شود؛ اما همچنان برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجش از دور در اولویت کار پژوهشگران قرار دارد.

منابع

- [1]. Frenken K, Kiersch B. Monitoring agricultural water use at country level. Experiences of a pilot project in Benin and Ethiopia. FAO Land & Water Discussion Paper 9. Rome: Food and Agriculture Organisation, Rome. 2011.
- [2]. Parris K. Sustainable management of water resources in agriculture. OECD Publishing; 2010.
- [3]. Blatchford ML, Mannaerts CM, Zeng Y, Nouri H, Karimi P. Influence of Spatial Resolution on Remote Sensing-Based Irrigation Performance Assessment Using WaPOR Data. *Remote Sens.* 2020; 12, 2949.
- [4]. Blatchford ML, Mannaerts CM, Njuki SM, Nouri H, Zeng Y, Pelgrum H, et al. Evaluation of WaPOR V2 evapotranspiration products across Africa. *Hydrol. Process.* 2020.
- [5]. Kaune A, Opstal JV. Water Productivity Technical Report. Agência de desenvolvimento do Vale Zambeze (ADVZ). 2020; FutureWater Report 195.
- [6]. Conrad C, Usman M, Morper-Busch M. Schonbrodt-Stitt. Remote sensing-based assessments of land use, soil and vegetation status, crop production and water use in irrigation systems of the Aral Sea Basin. *Water Security*, 11, 2020, 100078.
- [7]. Fritza F, Sea L, Bayasa JCL, Waldnerb F,

[21]. Agriculture statistics, Office of Statistics and Information Technology. Tehran, the Ministry of Agriculture Jihad, Deputy of Planning and Economy, garden product, 2013. [Persian]

Agriculture Jihad, Deputy of Planning and Economy. Crop product, 2013. [Persian]
[20]. Dalton JC. Irrigation water requirements. Cody, Wyoming, United States of America. 2003 Mar 1.