



سجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال دوازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۹
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.12, No. 2, Summer 2020

۳۳-۴۴

بکارگیری فناوری اینترنت اشیا در برآورد میزان تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره ای

سهیل رادیوم^{۱*}، حسین عقیقی^۲، حمید صالحی شهرابی^۳

۱. استادیار پژوهشگاه فضایی ایران

۲. استادیار مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید بهشتی

۳. دانشجوی دکتری سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۱۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۲۹

چکیده

تبخیر و تعرق، یکی از اجزای مهم بیلان انرژی و آب است. کارآمدترین روش محاسبه میزان تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس وسیع، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سنجش از دور است. اجرای الگوریتم‌های محاسبه تبخیر و تعرق مانند سیال نیازمند محاسبه تبخیر تعرق مرجع و در نتیجه بدست آوردن مقادیر دما و رطوبت هوا و سرعت باد است. معمولاً در محاسبات مربوط به تبخیر و تعرق از اطلاعات بدست آمده از نزدیکترین ایستگاه (های) هواشناسی به منطقه مورد مطالعه استفاده می‌شود که می‌تواند همراه با خطا باشد. به همین دلیل در این مطالعه، از سنسورهای اینترنت اشیا، برای اندازه‌گیری دقیق دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین و همچنین رطوبت هوا و سرعت باد در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، مزارع شرکت کشت و صنعت مغان در استان اردبیل است. در این تحقیق، تعداد ۲۳ نود در تعدادی از مزارع شرکت کشت و صنعت مغان نصب و راه اندازی شد. الگوریتم بیلان انرژی سطح زمین (سیال)، به‌منظور محاسبه میزان تبخیر و تعرق با تصاویر لندست ۸ سال ۱۳۹۴ مورد استفاده قرار گرفت.

کلید واژه‌ها: تبخیر-تعرق، سنجش از دور، مدل سیال، اینترنت اشیا، سنسورهای بی سیم، کشاورزی دقیق

* نویسنده مکاتبه‌کننده: پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، طرشت، بلوار شهید تیموری، نرسیده به بزرگراه شیخ فضل الله نوری، شماره ۱۸۲،

کدپستی: ۱۴۵۹۷۷۵۱۱، تلفن ثابت: ۶۶۰۶۵۰۶۸، نمابر: ۶۶۰۰۸۶۱۵.

۱. مقدمه

ایران کشوری با اقلیم عمدتاً گرم و خشک است که جمعیت آن در طی نه دهه، از حدود هشت میلیون نفر در سال ۱۳۰۰ به حدود ۸۰ میلیون نفر در سال ۱۳۹۵ رسیده است. در دوره زمانی مشابه، میزان سرانه آب تجدیدپذیر سالانه کشور از ۱۳۰۰۰ مترمکعب به ۱۴۰۰ مترمکعب کاهش یافته است (ببران و هنربخش، ۱۳۸۶). منابع آب تجدیدپذیر کل ایران به ۱۳۰ میلیارد مترمکعب بالغ می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که در سال ۱۳۸۶ از منابع تجدیدشونده کشور حدود ۸۹/۵ میلیارد مترمکعب آب برای مصارف کشاورزی، صنعت و معدن و خانگی برداشت شده است که حدود ۹۳ درصد آن (۸۳ میلیارد مترمکعب) به تنهایی به بخش کشاورزی و مابقی به بخش صنعت و خانگی اختصاص داشته است (احسانی و همکاران، ۱۳۸۲). این در حالی است که تنها ۱۵ درصد از مساحت کشور زیر کشت می‌رود، تنها ۱۰ درصد تولید ناخالص ملی کشور از راه کشاورزی به دست می‌آید و حدود ۱۷ درصد نیروی کار کشور در این بخش مشغول به کار هستند (مرکز پژوهش‌های مجلس، ۱۳۹۸).

تبخیر-تعرق^۱ یکی از اجزای کلیدی بیلان انرژی و آب بوده و نقش آن در درک فرایندهای عمده سیستم زمین حیاتی است. کمی‌سازی تبخیر-تعرق از پیچیده‌ترین اجزای بیلان هیدرولوژیکی و بیلان انرژی است. روش‌های مستقیم اندازه‌گیری تبخیر-تعرق پرزحمت و هزینه‌بر بوده و در مقیاس منطقه‌ای محدودیت دارند. اما داده‌های ماهواره‌ای امکان برآورد تبخیر-تعرق در سطح وسیع بدون نیاز به محاسبه فرایندهای هیدرولوژیکی پیچیده را فراهم کرده است.

در دو دهه اخیر روش‌های تخمین تبخیر-تعرق بر پایه سنجش از دور به‌عنوان جایگزین مناسبی برای روش‌های قبل تکامل یافته‌اند که این امر در نتیجه‌ی پیشرفت‌های اخیر در فن‌آوری‌های محاسباتی و توانایی سنجش از دور در ارائه یک دید سینوپتیک وسیع از توزیع مکانی-زمانی تبخیر-تعرق در یک منطقه بزرگ

است (Bastiaanssen et al., 1998a; Allen et al., 2007; Allen et al., 2011). با کمک فناوری سنجش از دور، تبخیر-تعرق بدون نیاز به کمی‌سازی پارامترهای پیچیده هیدرولوژیکی، با استفاده از کمترین داده‌های میدانی برای سطوح وسیع، با تأخیر زمانی کم و با هزینه بسیار مقرون بصره قابل محاسبه است.

یکی از الگوریتم‌هایی که به منظور برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مورد توجه فراوان قرار گرفته است الگوریتم توازن انرژی سطحی زمین (سبال)^۲ (Bastiaanssen et al., 1998a, 1998b; Bastiaanssen, 2000) است. باستانسین و همکاران در سال ۱۹۹۸ یک مدل چند مرحله‌ای مبتنی بر فیزیک، با استفاده از معادله بیلان انرژی سطح و توزیع مکانی انرژی را ارائه کردند. این الگوریتم از دمای سطحی، انعکاس سطحی و شاخص تفاضلی نرمال‌شده گیاهی (NDVI) و روابط دورنی آنها جهت برآورد شارهای سطحی برای پوشش‌های سطح زمین استفاده می‌کند. ارتباط بین انرژی طیف مرئی و اشعه مادون قرمز حرارتی در نواحی با تباین هیدرولوژیکی زیاد، اساس رابطه‌بندی سبال را تشکیل می‌دهد. مزایای دیگر مدل سبال مانند قابلیت کاربرد در اقلیم‌های مختلف بدلیل عدم نیاز به نقشه کاربری اراضی؛ استفاده از این مدل را در بین محققان نسبت به سایر روش‌های موجود با استقبال بیشتری مواجه کرده و از سال ۱۹۹۸ تا به امروز در سطح جهان مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج مطالعات حاکی از تطابق بالای نتایج مدل سبال با میزان واقعی تبخیر-تعرق بوده است (Ruhoff et al., 2012; Bastiaanssen et al., 2005; Teixeira et al., 2009; Paiva et al., 2011; Bhattarai et al., 2012).

بر اساس پیش‌بینی سازمان کشاورزی و غذای ملل متحد (FAO) در سال ۲۰۵۰ جمعیت جهان به بیش از ۹.۶ میلیارد خواهد رسید و برای تامین مواد غذایی میزان تولید باید بیش از ۷۰ درصد رشد داشته باشد. اما چالش‌های فراوانی در مسیر این رشد وجود دارد.

1. Evapotranspiration

در این تحقیق، میزان تبخیر و تعرق مزارع شرکت کشت و صنعت مغان در استان اردبیل با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر لندست ۸ در سال ۱۳۹۴ برآورد شده است. مهمترین نوآوری این تحقیق نسبت به موارد مشابه، نصب، راه اندازی و استفاده از سنسورهای IoT یا اینترنت اشیا جهت بدست آوردن داده‌های دما و رطوبت هوا و سرعت باد و استفاده از آنها در محاسبه تبخیر و تعرق است.

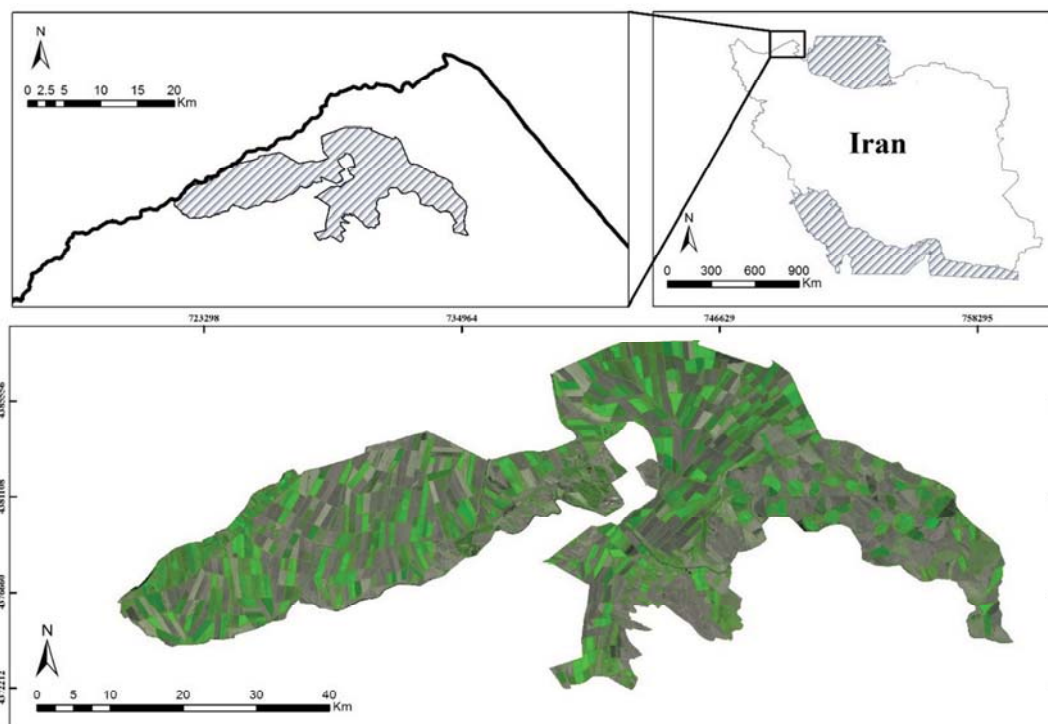
۲. مواد و روش ها

۲.۱ منطقه مورد مطالعه

مزارع کشاورزی شرکت کشت و صنعت و دامپروری مغان در استان اردبیل به عنوان منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شد. مزارع این شرکت در شهرستان پارس‌آباد در شمال استان اردبیل و در نزدیکی مرزهای ایران و جمهوری آذربایجان قرار گرفته است. مساحت مزارع کشاورزی شرکت کشت و صنعت مغان، نزدیک به ۲۰ هزار هکتار است.

نرخ رشد پایین، محدودیت و کمبود زمین‌های کشاورزی، محدودیت روزافزون منابع آبی، تغییرات آب و هوایی، کمبود منابع انرژی و افزایش قیمت حامل‌های انرژی و تغییر بافت جمعیتی مولد در حوزه کشاورزی و مهاجرت روستاییان به شهر و مناطق صنعتی از چالشهای پیش روی توسعه کشاورزی در تمامی دنیا است.

بر اساس توصیه FAO، یکی از راهکارهای غلبه بر این محدودیت‌ها و چالش‌ها استفاده از تکنولوژی‌ها و ابزارهای نوآورانه در حوزه کشاورزی است (Tilman et al, 2011). در این راستا از تکنولوژی‌های دیجیتال و فناوری اطلاعات به صورت گسترده‌ای در هوشمندسازی و بهینه‌سازی فرآیندهای کشاورزی از کاشت تا برداشت استفاده می‌شود. با توجه به توسعه و بلوغ روزافزون ایده تکنولوژی اینترنت اشیا و قابلیت بکارگیری آن در حوزه کشاورزی، بهره‌مندی از این ابزار می‌تواند بستر بسیار موثری در تحقق کشاورزی هوشمند/کشاورزی دقیق مهیا سازد. (Nawandar and Satpute, 2019)



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲.۲ داده های مورد استفاده

در این تحقیق، از ۹ تصویر ماهواره لندست ۸ در تاریخ‌های ۷ اردیبهشت، ۲۴ خرداد، ۲ تیر، ۹ تیر، ۱۰ مرداد، ۱۹ مرداد، ۲۶ مرداد، ۳۰ آبان و ۹ آذر سال ۱۳۹۴ به منظور برآورد تبخیر و تعرق استفاده شد. برای به دست آوردن داده‌های زمینی هواشناسی نیز از داده‌های سنسورهای نصب شده اینترنت اشیا در مزارع و ایستگاه هواشناسی پارس آباد استفاده شد. همچنین تبخیر و تعرق مرجع نیز با روش پنمن - مانیتث و نرم افزار CROPWAT (Clarke et al, 2001) محاسبه شده است.

۳.۲ نصب و راه اندازی سنسورهای بی سیم اینترنت اشیا

سنسورهای نصب شده در دشت مغان، پارامترهای هدایت الکتریکی خاک (شوری خاک)، دما و رطوبت خاک، دما و رطوبت هوا، فشار هوا، سرعت و جهت باد، میزان بارندگی، میزان شدت تابش خورشید و اشعه ماوراء بنفش را اندازه گیری می نمایند. در این مطالعه، از داده دمایی هوا که توسط این سنسورها در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین برداشت می شود و همچنین رطوبت هوا و سرعت باد استفاده شده است. مزیت مهم استفاده از این سنسورها، دقت بالای اطلاعات جمع آوری شده از آنها نسبت به ایستگاههای هواشناسی نزدیک به منطقه مورد مطالعه است. دفعات اندازه گیری پارامترهای ذکر شده برای این سنسورها هر یک دقیقه یکبار است. تعداد ۲۳ نود در مزارع مختلف کشت و صنعت مغان نصب شد تا بتواند گویای واقعی پارامترهای مورد نظر باشد.

۲.۳.۱ ساختار سنسورهای نصب شده و شبکه ایجاد

شده در مزارع کشت و صنعت مغان

۲.۳.۱.۱ بخش نود LoRa:

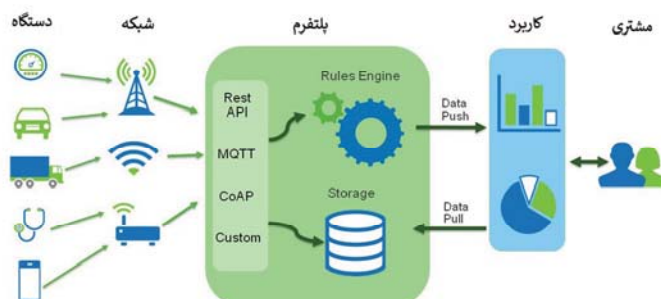
هر نود شامل واحد حسگر، عملگر، واحد پردازش داده‌ها، ارتباط رادیویی بی سیم (فرستنده و گیرنده) و منبع تغذیه است. ملحقات دیگری همچون: واحد متحرک ساز و سیستم مکان یاب نیز ممکن است بسته به کاربرد در نودها در نظر گرفته شوند. واحد پردازش داده شامل یک پردازنده کوچک و یک حافظه با ظرفیت محدود است که اطلاعات حسگر را دریافت نموده و بسته به کاربرد، پردازش محدودی روی آنها انجام می دهد و سپس این اطلاعات، از طریق فرستنده رادیویی به سمت گیتوی ارسال می شوند.

۲.۳.۱.۲ بخش گیتوی!

داده‌های جمع آوری شده توسط نودها از طریق لینک رادیویی به گیتوی انتقال داده می شوند و از این طریق اطلاعات در سرور قرار گرفته و قابل دسترسی خواهند بود.

۲.۳.۲ توصیف اکوسیستم اینترنت اشیا

اکوسیستم اینترنت اشیا را می توان به صورت لایه لایه بررسی نمود، به طوری که در حالت کلی برای این اکوسیستم پنج لایه مشتری، کاربرد، پلتفرم، شبکه و دستگاه ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲. اکوسیستم و زنجیره زیرسیستمها در فناوری اینترنت اشیا

1. Gateway

اصلی اشیا^۱، پلتفرم^۲ و کاربرد^۳ تشکیل شده است. در این معماری، در لایه اشیا، اشیا هوشمند قرار دارند که، عموماً یک یا هر دو قابلیت حسگری^۴ و عملگری^۵ دارند. در لایه کاربرد، کاربردهای متنوعی که بسته به نیاز و هدف، توسعه داده می‌شوند قرار گرفته‌اند. قلب این معماری لایه میانی پلتفرم است. این لایه از یک سو امکان ارتباط برنامه‌های کاربردی با اشیا، را فراهم ساخته و از سوی دیگر ارتباطات فی‌مابین اشیا را برقرار می‌کند. عموماً دو نوع راهکار کلی برای پلتفرم‌های اینترنت اشیا وجود دارد. یک مجموعه از راهکارها، پلتفرم‌هایی است که توسعه دهنده، اصل پلتفرم را در اختیار مشتریان قرار می‌دهد تا در شبکه مد نظر نصب و راه‌اندازی کنند. در مجموعه دوم، خود پلتفرم در اختیار مشتری قرار نمی‌گیرد، بلکه امکانات پلتفرم در قالب سرویس به مشتری ارائه می‌شود. نرم‌افزارهای متن باز عموماً در دسته اول قرار دارند. اغلب راه‌کارهایی که توسط تامین کنندگان بزرگ ارائه می‌شوند غالباً در دسته دوم قرار دارند، بطوریکه پلتفرم اختصاصی آنها در فضای ابری^۶ نصب شده و مشتریان می‌توانند اشیا خود را به آن متصل نموده و برنامه‌های کاربردی مد نظر را در این بستر توسعه دهند.

۲.۳.۳ نحوه ارتباط بین قسمت های مختلف سیستم:

در این مطالعه، پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط سنسورها در بازه‌های زمانی قابل برنامه‌ریزی از طریق درگاه سریال RS485 به نود منتقل می‌شوند و نود اصلی که بر اساس استاندارد LoRa طراحی شده است تمامی اطلاعات جمع‌آوری شده توسط بخش مخابراتی را ارسال می‌کند. در این بخش از آی‌سی SX1276 شرکت Semtech استفاده شده است. این آی‌سی، امکان پیاده‌سازی و برقراری شبکه LoRa را فراهم می‌سازد.

هر یک از لایه‌های فوق، وظایف مختلفی را در اکوسیستم اینترنت اشیا، ایفا می‌کنند که در ادامه به شرح آنها خواهیم پرداخت:

لایه مشتری: شامل مشتریان صنعتی، مشتریان دولت و مشتریان شخصی است که استفاده‌کنندگان نهایی از خدمات هوشمند هستند.

لایه کاربرد: مجموعه کاملی از برنامه‌های کاربردی مورد نیاز برای گروه‌های مختلف مانند: سیستم اطلاعات معادن هوشمند، سیستم نرم‌افزاری هوشمند محافظت از آب، سیستم اطفاء حریق، سیستم اندازه‌گیری هوشمند، سیستم حمل و نقل هوشمند، سیستم کنترل ترافیک و ... است.

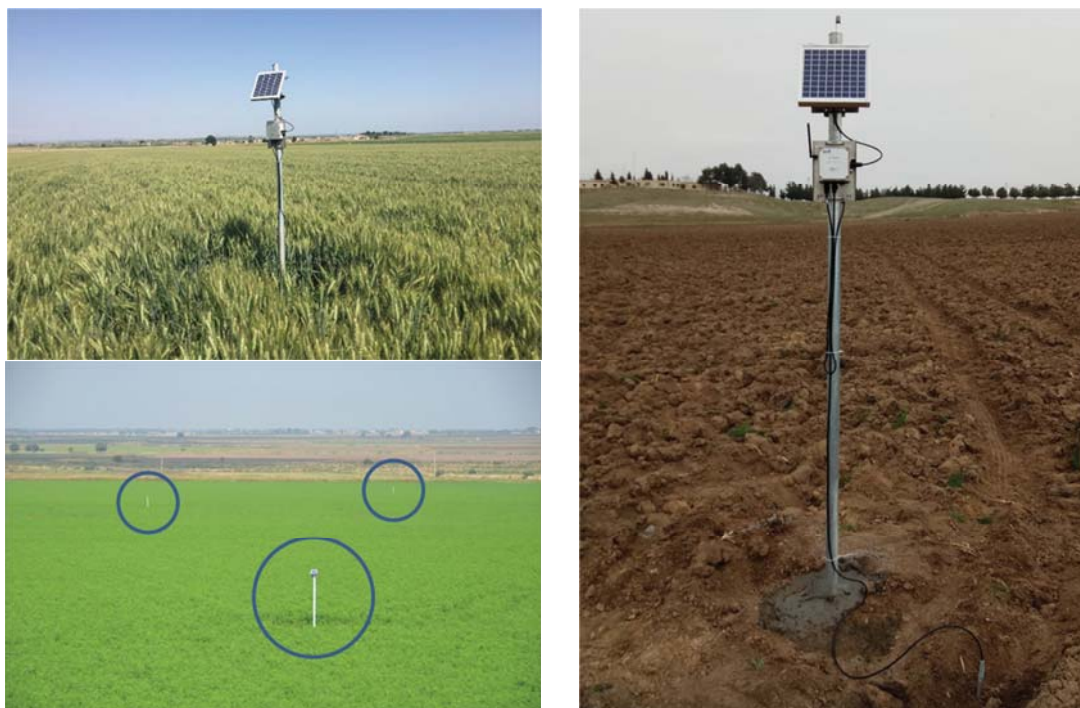
لایه پلتفرم: این لایه ارتباط برنامه‌های کاربردی را با شبکه ارتباطی فراهم می‌کند.

لایه شبکه: ارتباط بین دستگاه‌ها و مرکز جمع‌آوری لایه پلتفرم توسط این لایه انجام شده و قابلیت‌های کنترل ارتباطات شبکه‌ای را فراهم می‌آورد. نمونه‌ای از این قابلیت‌ها عبارتند از: توابع کنترل برای حساب کاربری، دسترسی و کنترل منابع، احراز هویت. تمرکز اصلی لایه شبکه بر روی برقراری ارتباط به‌منظور انتقال داده‌های سرویس‌های مختلف و هم‌چنین بررسی و مدیریت اطلاعات کنترلی مرتبط با آن است.

لایه دستگاه: در این لایه اجزایی مانند عملگرها، وسایل اندازه‌گیری، حسگرها و RFIDها قرار دارند که وظیفه حس کردن محیط اطراف و جمع‌آوری داده را بر عهده داشته و در مواقع لزوم توانمندی واکنش متناسب با رخداد مزبور را دارند.

علاوه بر لایه‌های مذکور، استانداردها و پروتکل‌های امنیتی مختلفی نیز برای فناوری اینترنت اشیا ارائه شده است که جزو اکوسیستم اینترنت اشیا است. با تمام این تفاسیر، هنوز تعریف مشخصی از معماری استاندارد برای IoT وجود ندارد. ولی در یک نگاه کلی، معماری کلان اینترنت اشیا از سه بخش

- | | |
|----------------|-------------|
| 1. Things | 2. Platform |
| 3. Application | 4. sensing |
| 5. Acting | 6. cloud |



شکل ۳. تصاویری از سنسورهای نصب شده در مزارع کشت و صنعت مغان

واحد معادل آب تبدیل کرده و مقدار تبخیر-تعرق را بدست آورد (Bastiaanssen, 1998).

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad \text{رابطه (۱)}$$

در معادله ۱، λET شار گرمای نهان، R_n شار تابش خالص (بیان تابش موج کوتاه و موج بلند ورودی و خروجی به سطح زمین)، G شار گرمای خاک و H شار گرمای محسوس می‌باشد. در ادامه نحوه محاسبه سه پارامتر فوق ارائه می‌شود.

۱.۴.۲. تابش خالص رسیده به سطح زمین

شار تابش خالص رسیده به سطح زمین حاصل موازنه شار تابشی ورودی و خروجی است:

$$R_n = (1 - \alpha) R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0) R_{L\downarrow} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن $R_{S\downarrow}$ تابش طول موج کوتاه ورودی، α آلبیدوی سطحی، $R_{L\uparrow}$ تابش طول موج بلند خروجی،

اطلاعات ارسالی از نود توسط گیتوی و از طریق شبکه 4G و یا از طریق LAN در بستر اینترنت به سرور انتقال داده شده و از آنجا به وسیله پلتفرم نرم‌افزاری قابل دسترسی خواهند بود.

۲. ۴. الگوریتم سبال

در این پروژه، از مدل بیان انرژی سطحی سبال برای تخمین تبخیر-تعرق از تصاویر لندست ۸ استفاده شد. برای محاسبه تبخیر-تعرق با روش سبال که مبتنی بر بیان انرژی زمین است، لازم است سه مؤلفه اصلی شار گرمای خاک، شار گرمای محسوس و تابش خالص رسیده به سطح زمین محاسبه شود. با استفاده از سه پارامتر مذکور شار گرمای نهان محاسبه می‌شود (معادله ۱). از آنجایی که گرمای نهان تبخیر که برابر است با مقدار گرمای جذب شده برای تبخیر یک کیلوگرم آب، مشخص است می‌توان گرمای نهان را به

استفاده می‌شود. $T_s datum$ دمای سطح دیتوم است که بر اساس کاهش دما ناشی از ارتفاع برای هر پیکسل محاسبه می‌شود (معادله ۶).

$$T_s datum = T_s + 0.0065 \times \Delta z \quad (۶)$$

که TS برابر با دمای سطحی اندازه‌گیری شده توسط ماهواره و Δz برابر با ارتفاع هر پیکسل منهای ارتفاع از سطح مبنا (بر حسب متر) است، که معمولاً ارتفاع سطح مبنا برابر با ارتفاع ایستگاه هواشناسی در نظر گرفته می‌شود.

۳. تبخیر-تعرق مرجع

تبخیر-تعرق یک سطح بدون کمبود آب، تبخیر-تعرق سطح مرجع یا تبخیر-تعرق مرجع نامیده شده و با ET_0 نشان داده می‌شود. سطح مرجع، یک گیاه مرجع چمن فرضی یا یونجه با ویژگی‌های مشخص است. فائو در سال ۱۹۹۸ (نشریه ۵۶)، روش فائو-پنمن-مانتیت را به عنوان روش استاندارد برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع معرفی کرد. در این تحقیق، از رابطه زیر برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع به روش فائو-پنمن-مانتیت استفاده شده است (Bastiaanssen, 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma [890 / (T + 273)] U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)}$$

رابطه (۷)

که در آن ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر در روز)، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($Mj m^{-2} d^{-1}$)، T میانگین دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین (متر بر ثانیه)، $e_a - e_d$ کمبود فشار بخار در ارتفاع دو متری (کیلوپاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، γ ضریب رطوبتی (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد) و G شار گرما به داخل خاک ($Mj m^{-2} d^{-1}$) است.

با در دست داشتن شار گرمایی خاک (G)، شار گرمای محسوس (H) و شار تابش خالص (R_n) بخش تبخیری تبخیر و تعرق (EF) محاسبه می‌شود:

$R_{L\downarrow}$ تابش طول‌موج بلند ورودی و ϵ_0 درصد گسیل‌مندی حرارتی سطح زمین است. عبارت $(1 - \epsilon_0)$ معرف کسری از تابش طول‌موج بلند ورودی است که از سطح منعکس می‌شود.

۲.۴.۲. شار گرمای خاک

شار، گرمای خاک تابعی است از شار تابش خالص (R_n)؛ اما آلبیدو (α) و دمای سطحی (T_s) نیز در کنترل آن نقش ایفا می‌کنند:

$$G / R_n = T_s / \alpha (0.0038 \alpha + 0.0074 \alpha^2) \times (1 - 0.98 \times NDVI^4)$$

رابطه (۳)

۲.۴.۲. شار گرمای محسوس

شار، گرمای محسوس نرخ از دست دادن گرما به هوا بوسیله همرفت و انتقال است که به دلیل اختلاف دما رخ می‌دهد. شار، گرمای محسوس تابعی از گرادیان دما، زبری سطح و سرعت باد است و به صورت زیر تعریف می‌شود (Bastiaanssen, 1998).

$$H = (\rho \times Cp \times dT) / rah$$

در رابطه بالا، ρ تراکم هوا بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، Cp گرمای ویژه هوا (۱۰۰۴ ژول بر کیلوگرم بر کلوین)، dT اختلاف دمایی بین دو ارتفاع بر حسب کلوین و rah مقاومت آئروپنامیکی به انتقال گرما (s/m) است.

در این مدل rah از سرعت برون‌یابی شده در ارتفاع خمش در بالای سطح زمین (معمولاً $۲۰۰m - ۱۰۰$) محاسبه می‌شود. برای به‌دست آوردن پارامتر dT بخاطر دشوار بودن برآورد صحیح دمای سطحی از ماهواره از معادله (۵) استفاده می‌شود.

$$dT = b + a * T_s datum$$

که a و b ثابت‌هایی هستند که بطور تجربی برای هر تصویر ماهواره‌ای تعیین می‌شوند. برای تعیین این ضرایب از پیکسل‌های آستانه (سرد و گرم) که برآورد مقدار H در آنها امکان‌پذیر باشد، به عنوان شرایط حدی

داده‌های هواشناسی مورد نیاز برای اجرای مدل عبارتند از دمای حداقل و حداکثر، سرعت باد، رطوبت نسبی و فشار هوا. این داده‌ها از طریق سنسورهای بی سیم نصب شده در مزارع قابل دسترس است.

۴. نتایج

مدل سبال بر روی نه تصویر ماهواره لندست ۸ مربوط به منطقه مغان، اخذ شده در سال ۱۳۹۴ اجرا شد. پس از انجام مطالعه میدانی، نقاط مناسب برای انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم برای یکی از تصاویر (۲۶ مرداد) مشخص شدند. با حضور در منطقه در روز عبور ماهواره، پیکسل سرد در مزارع یونجه شاداب، متراکم و آبیاری شده و پیکسل گرم نیز در مزرعه همجوار آن که آیش بود انتخاب شد. علاوه بر آن، مراحل انتخاب پیکسل سرد و گرم از روی تصویر نیز برای هر نه تصویر اجرا شد. پس از اجرای روند کلی مدل برای هر نه تصویر، در این مرحله نقاط ضعف مدل از جمله در زیربخش‌های تعیین پیکسل‌های سرد و گرم، محاسبه گسیلمندی و حذف مقادیر پرت (outliers) در باندهای حرارتی و مرئی، شناسایی شد. این مرحله به بهینه‌سازی مدل انجامید. توزیع مکانی تبخیر و تعرق برای تصاویر مورد آزمایش در اشکال ۴ و ۵ قابل مشاهده هستند.

$$EF = \frac{Rn-G-H}{Rn-G} \quad \text{رابطه (۸)}$$

بدیهی است که مولفه‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از تصویر ماهواره‌ای، تبخیر-تعرق همان لحظه عبور ماهواره را به دست می‌دهند. این درحالیست که مقادیر روزانه ET کاربردی‌تر از ET لحظه عبور ماهواره است. تبخیر-تعرق روزانه به صورت زیر برآورد می‌شود (Bastiaanssen, 1998):

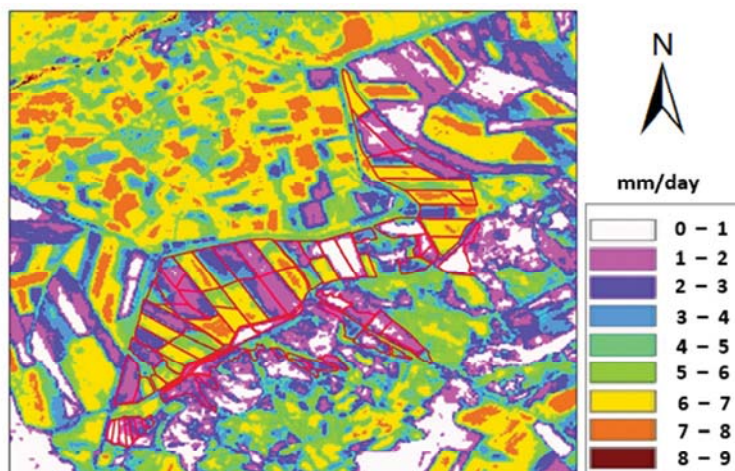
$$ET_{24} = \frac{8.64 \times 10^4 \times EF \times (Rn_{24} - G_{24})}{\lambda \times \rho \omega} \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن میانگین شار تابش خالص روزانه (Rn_{24}) که معادل تفاوت میان تابش خالص موج کوتاه و تابش خالص موج بلند ورودی و خروجی است، از رابطه (۱۰) قابل محاسبه است. میانگین روزانه شار گرمایی خاک (G_{24}) معمولاً برای سطوح خاک و گیاه برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. معرف گرمای نهان بخار (λ) تابعی از دمای سطح زمین (T_s) است که از معادله (۱۱) به دست می‌آید (Bastiaanssen, 1998):

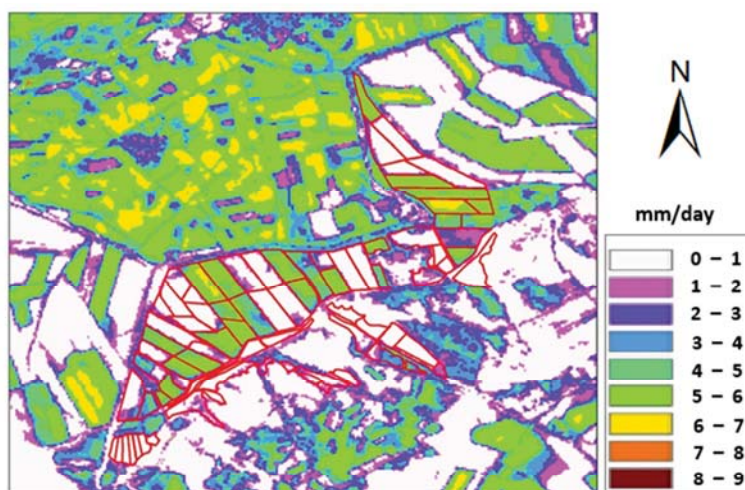
$$Rn_{24} = (1 - \alpha) \times Ra \times \tau_{sw} - 110 \times \tau_{sw} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

در این رابطه Ra تابش خورشیدی فرازمینی است و τ_{sw} ضریب عبور اتمسفری است.

$$\lambda = (2.501 - 0.00236 (T_s - 273.15)) \times 10^6 \quad \text{رابطه (۱۱)}$$



شکل ۴. مقادیر تبخیر-تعرق روزانه در بخش ۹ کشت و صنعت مغان (تاریخ: ۱۰ مرداد ۱۳۹۴)



شکل ۵. مقادیر تبخیر- تعرق روزانه در بخش ۹ کشت و صنعت مغان (تاریخ: ۲۶ مرداد ۱۳۹۴)

سیال بدست آمده است مقایسه شد. این نتایج در جدول ۱ در ۹ تاریخ مختلف در فصول بهار، تابستان و پاییز که تصاویر بدون ابر در دسترس بودند نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر مربوط به نتایج تبخیر و تعرق واقعی فقط مربوط به مناطق دارای کشت است و سایر مناطق از محاسبات حذف شده‌اند.

جدول ۱. نتایج محاسبات تبخیر و تعرق مرجع و مقادیر واقعی

تاریخ	مقدار تبخیر و تعرق مرجع (میلیمتر / روز)	مقدار تبخیر و تعرق واقعی (میلیمتر / روز)
۷ اردیبهشت	۳.۸	۳.۷
۲۴ خرداد	۸.۴۳	۷.۲
۲ تیر	۷.۶۶	۷.۵
۹ تیر	۹.۵۸	۸.۴
۱۰ مرداد	۷.۵۶	۷.۶۸
۱۹ مرداد	۸.۰۲	۷.۲۱
۲۶ مرداد	۸.۶	۷.۹۴
۳۰ آبان	۲.۰۳	۱.۷۵
۹ آذر	۰.۸	۰.۶

نتایج جدول ۱، نشان می‌دهد که بیشترین میزان تبخیر و تعرق در ماه تیر و مرداد بوده و کمترین میزان آن هم در ماه آذر اتفاق افتاده است. مقادیر به‌دست‌آمده برای تبخیر و تعرق واقعی و مقایسه آن با نتایج

نتایج به‌دست آمده از نصب و راه‌اندازی سنسورهای بی‌سیم در قالب اینترنت اشیا نشان داد که جهت راه‌اندازی این سنسورها در ابتدا هزینه بالایی لازم است. به مرور زمان، با استفاده از نتایج بدست آمده از برآورد دقیق تبخیر و تعرق در سطح مزارع و همچنین سایر کاربردهای داده‌های سنسورهای اینترنت اشیا، هزینه‌های انجام شده برای نصب و راه‌اندازی جبران شده و منافع آن نمایان می‌شود.

لازم به ذکر است که مزارع کشاورزی شرکت کشت و صنعت مغان دارای مشکلاتی هستند. از جمله این مشکلات، عدم تسطیح زمین، وجود آفات و بیماری‌ها در برخی مناطق به دلیل بالا بودن رطوبت خاک و همچنین عدم آبیاری مزارع به صورت یکسان در تمام سطح مزرعه است. در این تحقیق، با استفاده از داده‌های سنسورهای اینترنت اشیا توانستیم مقدار تبخیر و تعرق واقعی را با دقت مناسبی برآورد نموده و از نتایج به‌دست آمده از میزان تبخیر و تعرق مشکلات آبیاری زمین‌ها و همچنین سایر مشکلات را ابتدا شناسایی نموده و برای آنها راه حل ارائه نماییم.

با توجه به عدم وجود لایسی‌متر در سطح دشت مغان جهت اعتبارسنجی نتایج بدست آمده، در اینجا میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش پنمن - مانیتینگ محاسبه شد و با مقادیر واقعی آن که از مدل

منابع

آسیب شناسی سیاست های حمایت از بخش کشاورزی ایران، معاونت پژوهش های زیربنایی و امور تولیدی، مرکز پژوهش های مجلس شورای اسلامی، ۱۳۹۸.

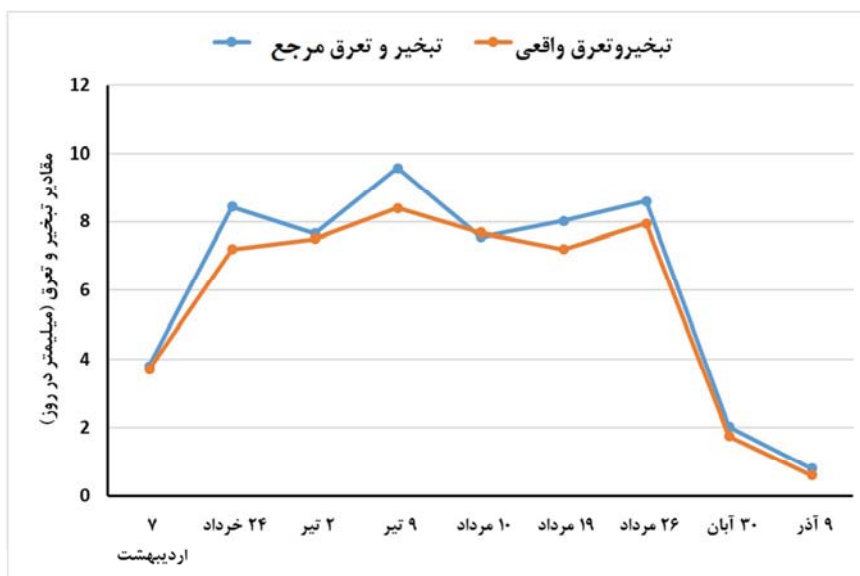
احسانی، م. و خالدی، ه.، ۱۳۸۲، شناخت و ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی به منظور تأمین امنیت آبی و غذایی کشور، ۱۳۸۲ یازدهمین همایش ملی کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

اکبری، م.، سیف، ز. و زارع ابیانه، ح.، ۱۳۹۰، برآورد میزان تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل در شرایط اقلیمی مختلف با استفاده از سنجش از دور، نشریه آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۴، صص ۸۴۴ - ۸۳۵.

بیران، ص. و هنربخش، ن.، ۱۳۸۶، بحران وضعیت آب در ایران و جهان، پژوهشنامه مطالعات توسعه پایدار و محیط زیست، شماره اول، تهران، اندیشه برتر پویا.

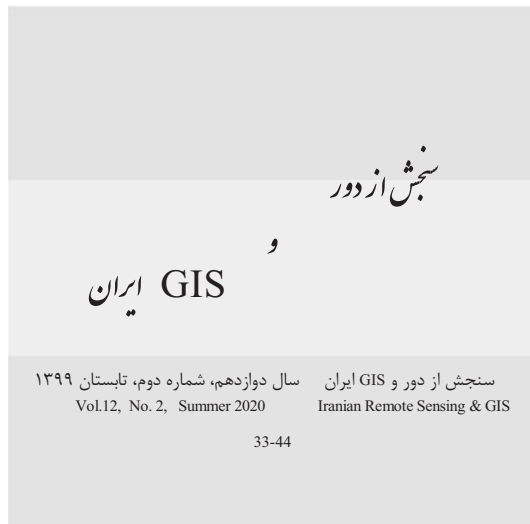
تبخیر و تعرق مرجع، مشخص می‌کند که در برخی از روزها (۷ اردیبهشت، ۲ تیر، ۱۰ مرداد و ۹ آذر) میزان اختلاف بین مقدار تبخیر و تعرق مرجع و واقعی بسیار کم است در حالی که در روزهای ۲۴ خرداد، ۹ تیر و ۱۹ مرداد این اختلاف بیشتر است. میزان اختلاف بین مقادیر تبخیر و تعرق واقعی و تبخیر و تعرق مرجع می‌تواند ناشی از عوامل همچون آبیاری مزارع در روز تصویر برداری، شرایط هواشناسی در روز مورد مطالعه و همچنین شرایط رشد محصولات مزارع باشد. با توجه به اینکه در ابتدا و انتهای دوره مورد مطالعه، آبیاری کمتری در مزارع صورت می‌گیرد، اختلاف بین مقادیر تبخیر و تعرق واقعی و مرجع نیز کمتر است.

نکته دیگر در نتایج مقادیر تبخیر و تعرق واقعی همواره کمتر از تبخیر و تعرق مرجع هستند که این یافته با نتایج اکبری و همکاران (۱۳۹۰) نیز مطابقت دارد. با توجه به اینکه میزان تبخیر و تعرق مرجع، حداکثر ظرفیت تبخیر و تعرق از مزرعه را نشان می‌دهد، نتایج به دست آمده در بسیاری از منابع علمی نیز تایید شده است. در شکل ۶، نیز مقادیر تبخیر و تعرق واقعی و مرجع با هم مقایسه شده است.



شکل ۶. مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق واقعی و مرجع در کشت و صنعت مغان

- Allen, R.G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J.L. & Bastiaanssen, W., et al., 2007, **Satellite-based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Applications**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133, 395-406.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Howell, T.A. & Jensen, M.E., 2011, **Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy**, *Agric. Water Manag.*, 98, 899-920.
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A. & Holtslag, A.A.M.A., 1998, **Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): 1. Formulation**, Journal of Hydrology, 212-213, 198-212.
- Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F. & Roerink, G.J., et al, 1998, **A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): 2. Validation**, Journal of Hydrology, 212-213, 213-229.
- Bastiaanssen, W.G.M., **SEBAL-based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey**, Journal of Hydrology, 2000, 229, 87-100.
- Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B.P., & Allen, R.G., 2005, **SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water Resources Management under Actual Field Conditions**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131, 85-93.
- Bhattarai, N., Dougherty, M., Marzen, L.J., & Kalin, L., 2012, **Validation of Evaporation Estimates from a Modified Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) Model in the South-Eastern United States**, Remote Sensing Letters, 511-519.
- Clarke, D., Smith, M. & El-Askari, K., 2001, **CropWat for Windows: user guide**, IHE.
- Nawandar, N.K. & Satpute, V.R., 2019, **IoT based low cost and intelligent module for smart irrigation system**, Computers and Electronics in Agriculture, 162, 979-990.
- Paiva, C.M., Franca, G.B., Liu, W.T.H. & Rotunno Filho, O.C., 2011, **A Comparison of Experimental Energy Balance Components Data and SEBAL Model Results in Dourados, Brazil**, International Journal of Remote Sensing, 32, 1731-1745.
- Ruhoff, A.L., Paz, A.R., Collischonn, W., Aragao, L.E., Rocha, H. R., & Malhi, Y.S.A., 2012, **MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savannas**, Remote Sensing, 4: 703-25.
- Teixeira, A.H.d.C., Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M.D. & Bos, M.G., 2009, **Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil: part A: calibration and validation**, *Agricultural and Forest Meteorology*, 149 (3-4), 462-476.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B.L., 2011, **Global food demand and the sustainable intensification of agriculture**, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 108, 20260-20264.



Adoption of IoT technology to estimate evapotranspiration from satellite imagery

Radiom, S.*¹, Aghighi, H.², Salehi Shahrabi, H.³

1. Assistant Prof., Iranian Space Research Center
2. Assistant Prof., Dept. of RS & GIS, Shahid Beheshti University
3. PhD student of RS & GIS, Shahid Beheshti University

Abstract

Evapotranspiration is one of the most important components of energy and water balance. The most important way to get real large-scale evapotranspiration is to utilize satellite imagery and remote sensing. Implementation of evapotranspiration calculation algorithms such as SEBAL demands calculation of reference evapotranspiration and thus measuring air temperature, humidity and wind speed. Calculation of evapotranspiration is usually based on obtained information from the nearest weather stations to the study area, which can be error-prone. Therefore, in this study, IoT sensors were used to accurately measure air temperature at 2 m above the ground, as well as air humidity and wind speed in the study area. The study area is the farms of Moghan Agricultural Company in Ardabil province. In this study, 23 nodes were installed in a number of farms. The ground-based energy balance algorithm (SEBAL) was used to calculate the evapotranspiration using Landsat 8 images in 2015.

Keywords: Evapotranspiration, Remote Sensing, SEBAL Model, IoT, Wireless Sensors, Precision Agriculture

* Correspondence Address: Iranian Space Research Center, No. 182, Shahid Teymouri Blvd., Tarasht, Tehran, Iran, Postal Code: 1459777511, Telephone: +9821 6606 5068, Fax: +9821 6600 8615
Email: soheil.radiom@gmail.com