نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۳، ص. ۱۸۲-۱۶۷

Water Management in Agriculture
Vol. 11, No. 1, Spring and Summer 2024, 167-182

مقاله علمی -مروری

بررسی سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری در مدیریت آبیاری در سطح بین‌المللی (مطالعه موردی: IrriSAT، IrriWatch و Manna)

سید حسن طباطبایی[1*] و غزل دهقانی سانیج[2]

چکیده

کاهش دسترسی به منابع آبی، آینده‌ی بخش کشاورزی را با خطرات جدی روبرو کرده است. بهبود برنامه‌ریزی آبیاری با ارتقا بهره‌وری و کارایی مصرف آب یا به‌عبارت‌دیگر محصول برابر به ازای مصرف کمتر آب می‌تواند به‌طور مؤثری اثرات کم‌آبی در کشاورزی آبی را جبران نماید. یکی از روش‌های بسیار مناسب در اصلاح مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری استفاده از حسگرهای اندازه‌گیری رطوبت است. بااین‌وجود در مواقعی که سطح اراضی وسیع است، استفاده از حسگرها، مستلزم هزینه سرمایه‌گذاری بسیار قابل‌توجهی است. نظر به نحوه مدیریت عمده‌ی اراضی کشاورزی کشور از یکسو و شرایط اقتصادی کشاورزان از سوی دیگر، امکان استفاده از روش‌های آبیاری هوشمند مبتنی بر حسگرهای رطوبتی خاک که عموماً از هزینه قابل‌توجهی برخوردارند به‌آسانی میسر نیست. در این پژوهش سه سامانه IrriSAT، Manna و IrriWatch که سه نمونه موفق از سامانه‌های کمک به تصمیم‌گیری در بخش آبیاری معرفی و پشتوانه‌های تئوریک و قابلیت‌های آن‌ها ارائه شده است. این سامانه‌ها از فناوری‌های سنجش‌ازدور استفاده می‌کنند و برای ارائه خدمات خود نیازی به حسگرهای کارگذاری شده در سطح مزرعه ندارند. اطلاعاتی که می‌بایست توسط کاربر مشخص شود، منطق برآورد تبخیر-تعرق و توصیه آبیاری، هزینه ارائه خدمات و نحوه تعامل با کاربر در این سامانه‌ها متفاوت است. در این پژوهش تلاش شده است تا ویژگی‌های مورد اشاره سامانه‌های مذکور به کارشناسان حوزه آبیاری هوشمند معرفی شود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری هوشمند، برنامه‌ریزی آبیاری، فناوری‌های نوین در آبیاری، کشاورزی دقیق

مقدمه

دسته‌ای از فناوری‌های نوین که هدف از آن‌ها، ایجاد تغییرات بنیادی در تمام جنبه‌های کشاورزی سنتی می‌باشد، به‌عنوان کشاورزی دقیق و هوشمند یاد می‌شود. این دسته از فناوری‌ها در حوزه‌های مختلف کشاورزی از قبیل آبیاری، زراعت، باغبانی، گلخانه، دام و طیور و آبزیان استفاده می‌شود. ارتقا بهره‌وری کشاورزی در کشاورزی هوشمند و دقیق از طریق تولید بیشینه غذا با بهینه‌سازی استفاده از نهاده‌ها، کمینه کردن اثرات محیطی، کاهش هزینه‌ها و افزایش درآمد دنبال می‌شود (جمشیدی و دهقانی سانیج، ۱۳۹۹). به‌طورکلی می‌توان گفت که کشاورزی دقیق، یک راهبرد مدیریتی است که فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات را با صنعت کشاورزی ادغام می‌کند به‌طوری‌که اطلاعات هر جزء از نواحی کوچک در یک مزرعه را در جهت تطبیق نوع و مقدار دروندادها و نهاده‌ها در آن نواحی، به کار می‌گیرد تا ارزیابی و مدیریت تغییرپذیری زمانی و مکانی دقیق‌تر صورت گیرد (شیرخانی و همکاران، ۱۳۹۵). کشاورزی دقیق با هدف مدیریت دقیق نهاده‌ها، روش‌های تولیدی متمایزی را برای تولیدکنندگان

[1] دکتری تخصصی مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (* نویسنده مسئول: h.tabatabaii@modares.ac.ir)
[2] دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۴

بخش کشاورزی فراهم می‌آورد و شبیه به هر فناوری دیگری به کشاورز اجازه می‌دهد تا اطلاعات را با هدف شناسایی متغیرهای مؤثر بر عملکرد بالقوه‌ی مزرعه جمع‌آوری کرده و سپس در خصوص میزان متغیر نهاده‌ها در مزرعه تصمیم‌گیری کند (حسینی و همکاران ۱۳۸۹). به‌عبارت‌دیگر کشاورزی دقیق، تغییر سامانه مدیریت مزارع از روش‌های سنتی به مدیریت مزارع بر پایه تحلیل اطلاعات به‌روز، با هدف افزایش سودآوری و ارتقا پایداری است (Breazeale, 2007).

اساس برنامه‌ریزی فعالیت‌های کشاورزی در کشاورزی دقیق، تطابق مدیریت زراعی با پیش‌بینی شرایط آتی است که برمبنای تحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط حسگرهایی استخراج می‌شود (Davis et al., 1998). به همین علت است که در طی دهه‌های گذشته استفاده از حسگرهای اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده قابل‌توجهی داشته‌اند. این حسگرها رطوبت خاک را اندازه‌گیری نموده و در مواردی که مدیریت سامانه آبیاری به‌صورت خودکار است پس از رسیدن رطوبت خاک به حد آستانه، آبیاری اعمال می‌شود (Domínguez-Nino et al., 2020). رطوبت خاک در زمان، سطح و عمق به‌شدت تغییرات قابل‌توجهی دارد و حسگرها با دقت قابل قبولی توانایی قرائت آن را دارا می‌باشند (Shan et al., 2019). این حسگرها عموماً شاخص مقاومت الکتریکی خاک را اندازه‌گیری می‌کنند و سپس رطوبت خاک بر اساس معادلات کالیبراسیون، محاسبه می‌شود (Domínguez-Nino et al., 2020). اساس کار مدیریت آبیاری با استفاده از حسگرهای مورد اشاره بر این پایه است که حسگرها تغییرات رطوبت خاک را ارزیابی کرده و هنگامی‌که رطوبت خاک به حد آستانه‌ای که از پیش مشخص شده است رسید دستور آبیاری را صادر می‌کنند (Montesano et al., 2018).

واضح است که ارتقای مدیریت آبیاری با تعیین دقیق حجم و زمان آبیاری بهبود کارایی مصرف آب را به‌دنبال خواهد داشت (Soulis and Elmaloglou, 2018). به همین سبب است که استفاده از حسگرها در آبیاری می‌تواند به‌طور مؤثر آب مصرفی را کاهش، کمیت و کیفیت محصول را ارتقا و به طبع آن کارایی مصرف آب را افزایش دهد (Montesano et al., 2018؛ Zhou et al., 2019). برای مثال بر مبنای تحقیقات انجام گرفته در ایالات‌متحده بر روی گیاهان زینتی استفاده از حسگرها ۵۰ درصد متوسط آب برداشت شده را کاهش و به طبع آن ۲۵ تا ۷۰ درصد کارایی مصرف آب را افزایش داده است (Majsztrik et al., 2013). بااین‌وجود استفاده از حسگرها در عمل با مشکلات فراوانی روبرو می‌باشند که از آن جمله می‌توان به‌دشواری تعمیم دادن رطوبت اندازه‌گیری شده به‌وسیله حسگر به سطوح وسیع کشاورزی اشاره کرد. در این شرایط نیاز به افزایش تعداد حسگر است که سبب تحمیل هزینه‌ی بسیار زیادی به مجموعه می‌شود (Domínguez-Nino et al., 2020).

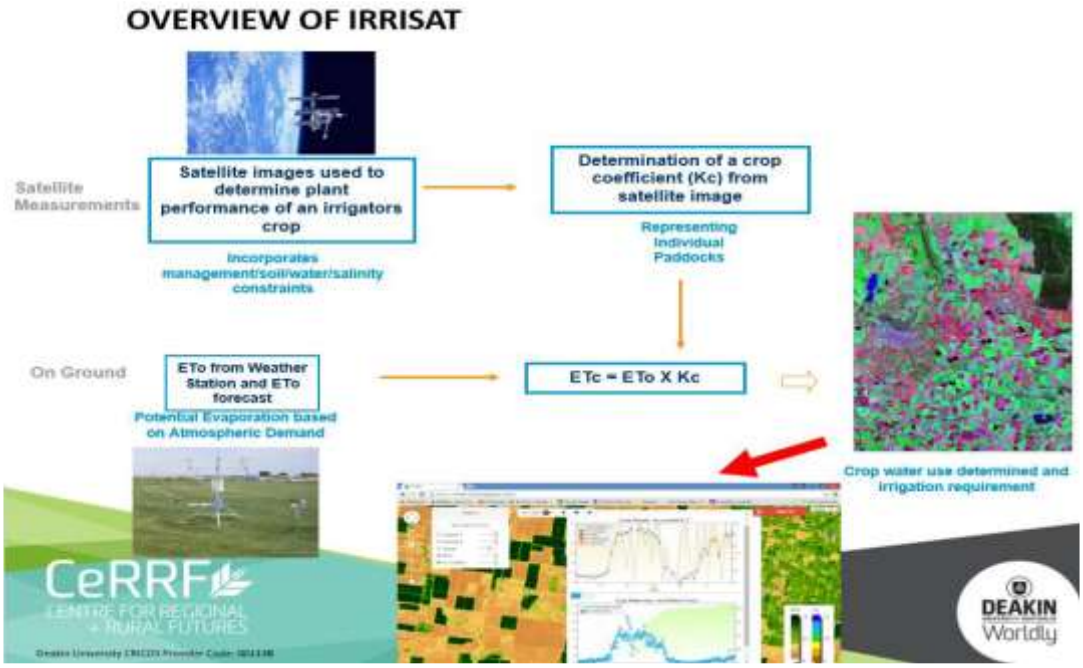
در سالیان اخیر به سبب توسعه فناوری‌های سنجش‌ازدور، هوش مصنوعی و... استفاده از کشاورزی هوشمند توسعه چشمگیری داشته است. این فناوری‌ها توانسته‌اند در سطح ملی و منطقه تولید محصولات کشاورزی را افزایش داده و اثرات زیست‌محیطی ناشی از کشاورزی را کاهش دهد (Fountas et al., 2020). مهم‌ترین مزایای این روش‌ها امکان پایش اراضی وسیع کشاورزی به‌صورت مجتمع، عدم نیاز به تجهیزات سخت‌افزاری مجزا، امکان ترکیب اطلاعات حاصل از این ماهواره‌ها با پیش‌بینی‌های هواشناسی و ارزان بودن این دست از فناوری‌ها اشاره کرد. در بسیاری از نقاط جهان، از این فناوری‌ها در جهت ارتقای کشاورزی استفاده شده است. برای مثال بهره‌وری سبز در کشور چین در بازه زمانی ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۹، سالانه به‌طور متوسط ۱/۳۳ درصد افزایش یافته است که مهم‌ترین عامل آن استفاده از این فناوری‌ها در کشاورزی است (Deng et al., 2022a).

عواملی نظیر ضعف دانش تخصصی، نبود زیرساخت‌های لازم و یا سرمایه اولیه مورد نیاز سبب شده است تا امکان توسعه سامانه‌های کشاورزی دقیق برای همه کشاورزان میسر نباشد. بااین‌حال، شرکت‌های متعددی در سطح دنیا خدمات تخصصی در توسعه سیستم‌های آبیاری هوشمند را به‌صورت تجاری ارائه می‌دهند. با استفاده از خدمات این سامانه‌ها، کشاورزان می‌توانند بدون نیاز به دانش فنی بالا از مزایای آبیاری هوشمند بهره‌مند شوند. شاخص‌های گوناگونی بر کارایی سامانه‌های ارائه‌دهنده

خدمات آبیاری هوشمند اثرگذار است که ازجمله آن‌ها می‌توان به‌دقت در پیش‌بینی وضعیت رطوبت در مزارع، هزینه ارائه خدمات، کاربرپسندی سامانه و... اشاره نمود. در این مقاله سه سامانه معتبر ارائه خدمات آبیاری هوشمند معرفی و خصوصیات آن‌ها تحلیل شده‌اند. همچنین مبانی تئوریک الگوریتم‌های ارائه توصیه‌های آبیاری آن‌ها و قابلیت‌های هریک از آنان بررسی‌شده است. سامانه‌های مورداشاره عبارت‌اند از IrriSAT، Manna و IrriWatch.

سامانه IrriSAT

سامانه IrriSAT یک برنامه مبتنی بر فضای ابری است که از سامانه Google earth engine استفاده می‌کند. این سامانه با پردازش تصاویر ماهواره‌ای و ارائه نتایج نیاز آبی سطوح کشاورزی به کاربران، امکان مدیریت بهتر آبیاری و زراعی و به‌تبع آن ارتقا بهره‌وری محصول را به کاربر می‌دهد. این اطلاعات امکان مقایسه نیاز آبی در بخش‌های مختلف یک قطعه زراعی و همچنین مقایسه نیاز آبی چند قطعه زراعی را میسر می‌سازد. مرکز سرویس‌دهی سامانه مورداشاره در کشور استرالیا بوده و توسط متخصصین دانشگاه دآکین (DEAKIN University) و موسسه تحقیقات پژوهش پنبه استرالیا توسعه‌یافته است (Kyaw et al., 2020). سازوکار سامانه IrriSAT در شکل ۱ ارائه شده است (Hornbuckle et al. 2016b).



شکل ۱- شمای کلی سامانه IrriSAT (Hornbuckle et al. 2016b)

پشتوانه تئوریک IrriSAT

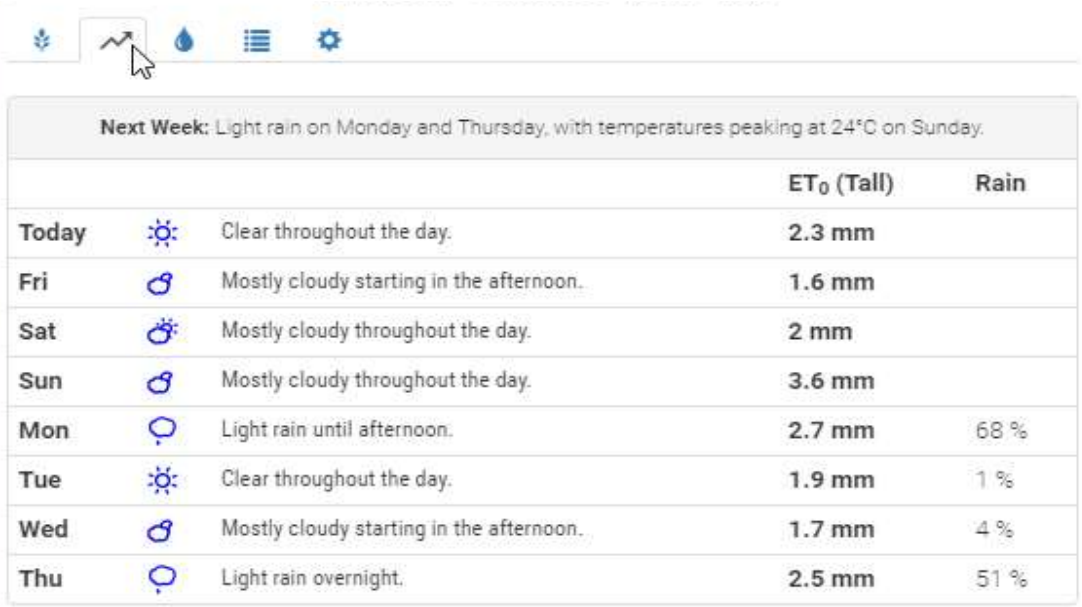
پژوهش‌های بسیاری در سراسر دنیا انجام شده است که مبین همبستگی بسیار بالای شاخص NDVI و تراکم پوشش گیاهی است (Trout and Johnson, 2007). از آن‌جایی که تعرق متناسب با تراکم پوشش گیاهی است، این فرض که همبستگی مناسبی بین ضریب گیاهی و NDVI وجود دارد، منطقی است. این رویکرد اجازه می‌دهد تا با استفاده از NDVI نقشه ضریب گیاهی مزارع استخراج شود. یکی از نقاط قوت سامانه IrriSAT استفاده توأم از داده‌های ماهواره‌های لندست و سنتنیل ۲ است. قدرت تفکیک مکانی این دو ماهواره به‌ترتیب ۳۰ در ۳۰ و ۱۰ در ۱۰ مترمربع و فاصله زمانی برداشت تصاویر نیز ۸ الی ۱۶ و ۵ الی ۱۰ روز است. روش IrriSAT برای به‌دست آوردن ضریب گیاهی از

شاخص NDVI محاسبه شده با تصاویر ماهواره‌های سنتیل ۲ و لندست استفاده می‌کند.

بدین منظور با استفاده از روابط رگرسیونی از NDVI، پوشش گیاهی و با ا ستفاده از پو شش گیاهی ضریب گیاهی تخمین زده می‌شود. در ادامه با استفاده تبخیر–تعرق گیاه مرجع محاسبه شده بر ا ساس اطلاعات ای ستگاه‌های هوا شنا سی کوچکی که مجاور اراضی کار گذاشته شده است، نیاز آبی محصولات کشاورزی برای یک دوره هفت روزه پیش‌بینی می‌شـــود (Hornbuckle et al. 2016a). به‌عبارت‌دیگر IrriSAT دو منبع اطلا عاتی تصـــاویر ماهواره‌ای و پیش‌بینی‌های هواشـــناســـی را ادغام و نیاز آبی را محاسبه می‌نماید.

قابلیت‌های IrriSAT

تمرکز سامانه IrriSAT بر ایجاد یک ابزار پشتیبانی تصمیم برای کمک به آبیاری و استفاده آسان آن برای کاربر است. بدین منظور در طراحی سامانه دقت شده است تا اطلاعات ورودی که از کشاورز اخذ می‌شود محدود و درعین‌حال برای برآورد نیاز آبیاری با دقت مناسب، کافی باشد. در این سامانه تبخیر–تعرق گیاه مرجع با استفاده از ایستگاه‌های کوچک هواشناسی خودکار در سطح مزارع و بر اساس روش فائو پنمن مانتیث محاسبه می‌شود که در شکل ۲ پنل ارائه پیش‌بینی‌های هواشناسی در سامانه IrriSAT ارائه شده است (Hornbuckle et al. 2016b).

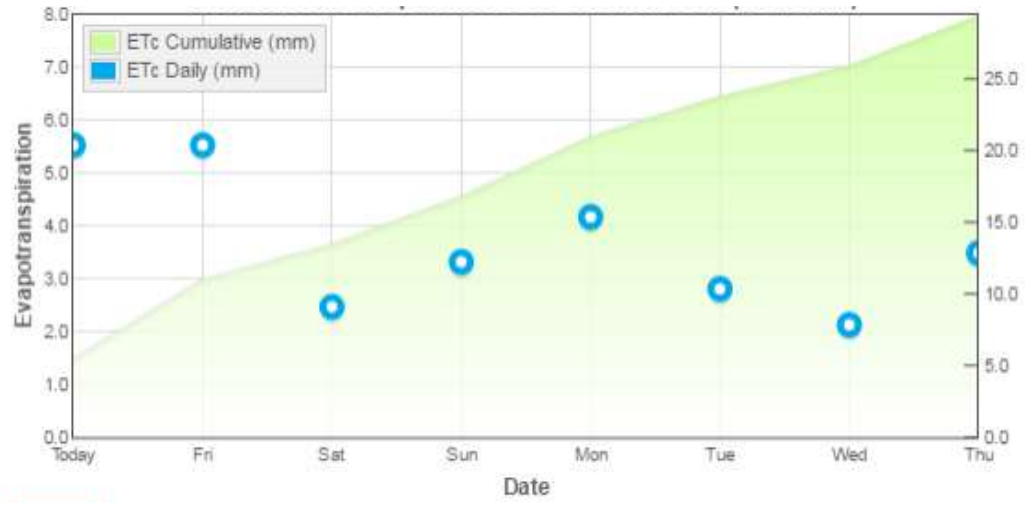


شکل ۲- پنل پیش‌بینی هواشناسی در سامانه IrriSAT(Hornbuckle et al. 2016b)

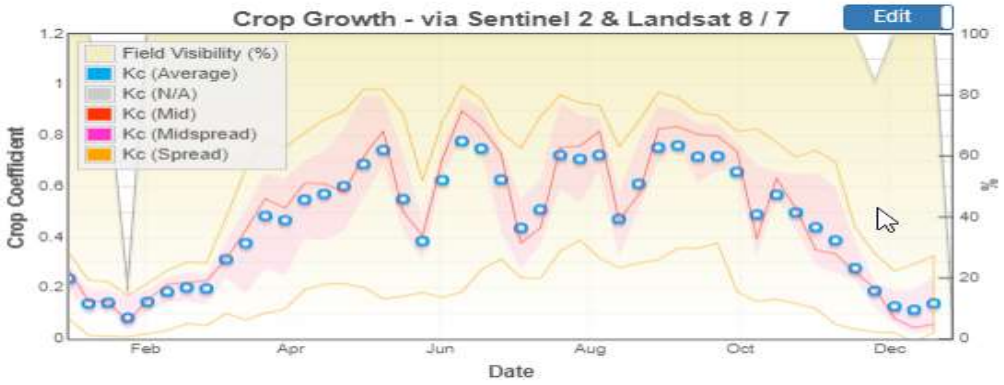
در حال حاضر ارائه اطلاعات به مشتریان از طریق پلتفرم اینترنتی انجام می‌شود. لذا می‌توان با هر وسیله‌ای که امکان اتصال به اینترنت در آن وجود دارد، از خدمات سامانه استفاده کرد. نقشه اطلاعات ضریب گیاهی، NDVI و ... مزارع در درگاه اینترنتی اصلی سامانه (https://www.irrisat.com) نمایش داده می‌شود و آرشیو اطلاعات گذشته آن‌ها نیز در سامانه موجود است (شکل ۳). لازم به ذکر است که در درگاه اینترنتی مورد اشاره تصاویر سری ماهواره‌های لندست از ماه می ۱۹۹۹ و تصاویر سری ماهواره‌های سنتینل از ژانویه ۲۰۱۶ به بعد در دسترس هستند. ازجمله مزایای سامانه IrriSAT ارائه واسط برنامه‌نویسی کاربردی API (Application Programming Interface) به کاربر است.

شکل ۳ – نقشه ضریب گیاهی قطعات زراعی در سامانه IrriSAT **(**IrriSAT, 2023**)**

علاوه بر نقشه ضریب گیاهی و NDVI، سایر خروجی‌های نیز سامانه به‌صورت سری زمانی به کاربر ارائه می‌شود تا امکان تجزیه تحلیل بیشتری را به کاربر بدهد. ازجمله اطلاعات مورد اشاره می‌توان به نمودارهای تبخیر–تعرق پیش‌بینی شده برای گیاه در شرایط استاندارد رشد و سری زمانی ضریب گیاهی قطعه اشاره کرد که به ترتیب در شکل ۴ و شکل ۵ ارائه شده است. امکان اخذ این نتایج هم به‌صورت فایل جدولی هم وجود دارد که نمونه آن در شکل ارائه شده است (Hornbuckle et al. 2016b).



شکل ۴– نیاز آبی پیش‌بینی شده برای بازه‌ی هفت روزه در سامانه IrriSAT **(**Hornbuckle et al. 2016b**)**



شکل ۵- سری زمانی ضریب گیاهی قطعه کشاورزی در سامانه IrriSAT **(**Hornbuckle et al. 2016b**)**

Download CSV | Select all

	Field Visibility (%)	Kc (Average)	Kc (StdDev)	Kc (Min)	Kc (Q1)	Kc (Median)	Kc (Q3)	Kc (Max
17/05/2015	89.53975	0.1109	0.0263	0.01275	0.09635	0.10988	0.12568	0.213
25/05/2015	100	0.17362	0.02074	0.11808	0.16252	0.1714	0.18209	0.307
02/06/2015	20.50209	0.12866	0.03168	-0.01961	0.11659	0.12705	0.14072	0.197
10/06/2015	99.79079	0.15221	0.02113	0.1092	0.13995	0.14892	0.15984	0.261
18/06/2015	81.79916	0.10909	0.05091	-0.01276	0.08114	0.10503	0.12285	0.421
26/06/2015	99.58159	0.1675	0.03663	0.0305	0.15537	0.16703	0.18557	0.368
04/07/2015	25.94142	0.1563	0.04402	0.058	0.12966	0.14938	0.18014	0.332
12/07/2015	26.35983	0.21508	0.06822	0.07993	0.17149	0.18843	0.26863	0.447

Graph | Data

شکل ۶- امکان اخذ خروجی الگوریتم به‌صورت جدولی در سامانه IrriSAT **(**Hornbuckle et al. 2016b**)**

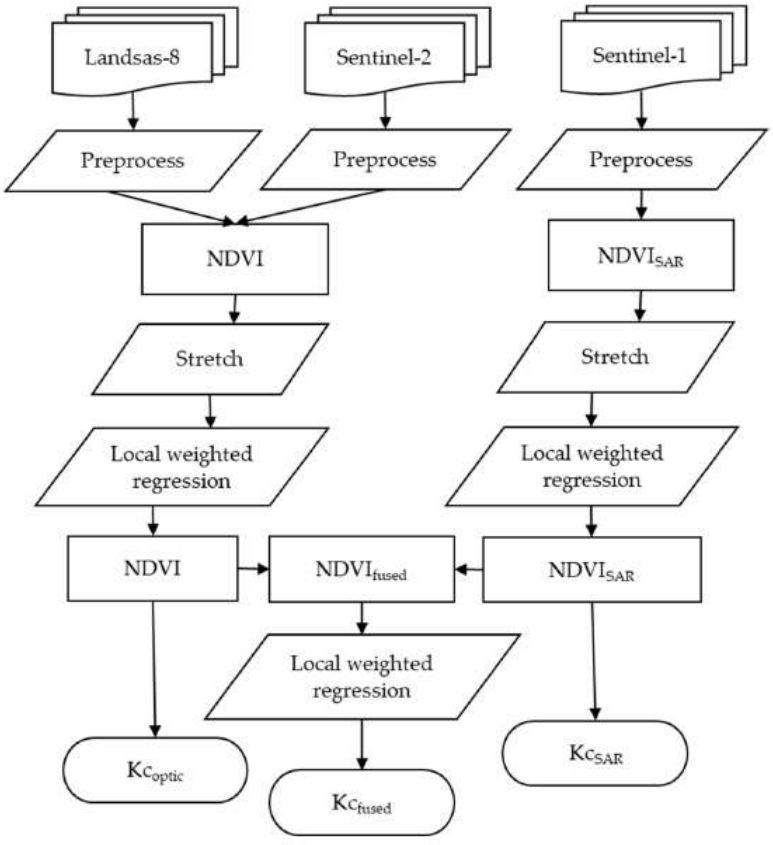
سامانه Manna

سامانه Manna که دفتر مرکزی آن در اراضی اشغالی فلسطین قرار دارد، در سال ۲۰۱۶ توسط شرکت Rivulis Irrigation تأسیس شد. شرکت مورد اشاره بیش از ۵۰ سال در ارائه خدمات آبیاری میکرو مشغول بوده است. هدف از ایجاد سامانه Manna ارائه خدمات ارزان آبیاری هوشمند و پایش مزارع با استفاده از ادغام اطلاعات سنجش‌ازدور، علوم داده و دانش کشاورزی است. حداقل سطحی که Manna برای ارائه خدمات قبول می‌کند قطعات ۰/۵ هکتاری است. ارائه خدمات آزمایشی برای مشتریان در یک دوره ۳۰ روزه به‌صورت رایگان ارائه می‌شود (Manna, 2023).

رویکرد Manna در برنامه‌ریزی آبیاری، تعیین نیاز آبیاری گیاه بر مبنای سطح و تراکم پوشش گیاهی محاسبه شده بر اساس تصاویر ماهواره‌های اپتیکی و راداری و محاسبه ضریب گیاهی بر اساس آن‌ها است. محاسبه ضریب گیاهی بر اساس تصاویر ماهواره‌ای به کمک روش‌های هوش مصنوعی انجام می‌شود. تبخیر-تعرق گیاه مرجع نیز بر اساس پیش‌بینی‌های هواشناسی محاسبه می‌شود. سپس نیاز آبی گیاه در روزهای بعد با حاصل‌ضرب تبخیر-تعرق مرجع و ضریب گیاهی پیش‌بینی و توصیه‌های آبیاری ارائه می‌شود. رابط کاربری Manna با مشتریان عبارت است از: ۱. اپلیکیشن موبایلی ۲. درگاه اینترنتی (https://manna-irrigation.com). مشابه سامانه Irrisat، سامانه Manna نیز امکان ارائه API را برای کاربران فراهم نموده است (Manna, 2023).

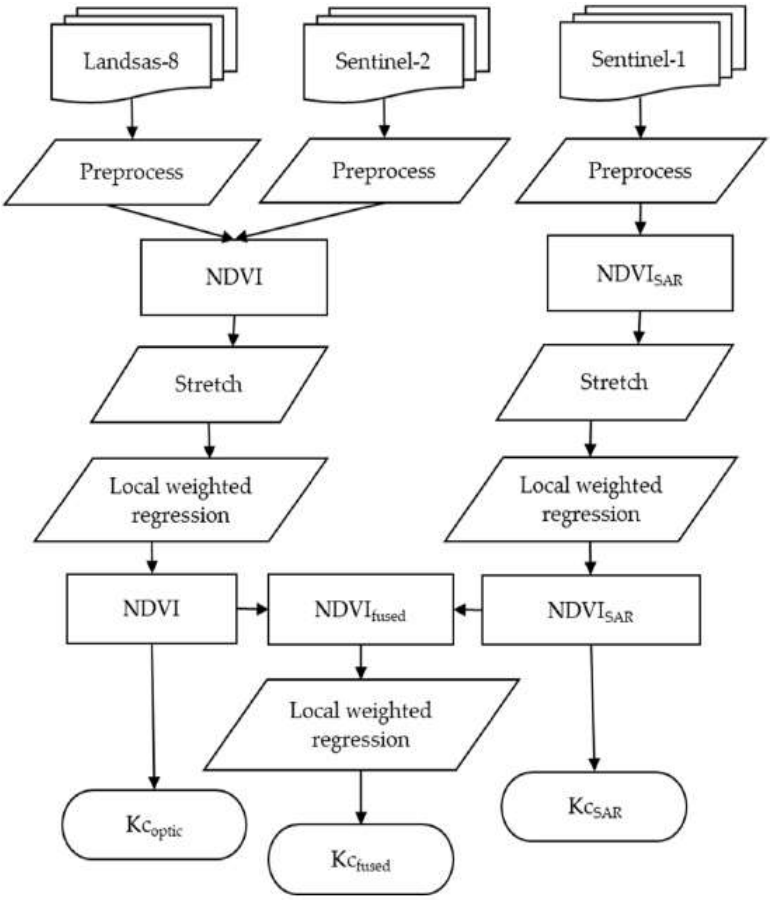
پشتوانه تئوریک Manna

سامانه Manna در ابتدای فصل رشد، مدل رفتار محصول را برحسب ضرایب گیاهی ارائه شده در مراجع معتبر برای کل فصل پیش‌بینی می‌کند. در طول دوره رشد و با پدیدار شدن سطوح کشاورزی در مزرعه، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های رگرسیونی، اطلاعات مدل از ضریب گیاهی به‌روز می‌شود. روابط رگرسیونی متعددی برای استخراج ضرایب گیاهی با استفاده شاخص‌های ماهواره‌ای در مراجع علمی موجود است؛ بااین‌وجود مدل هوش مصنوعی استفاده شده در سامانه Manna در انحصار شرکت مذکور قرار دارد. منطق روش محاسبه شاخص گیاهی در سامانه Manna بدین گونه است که ابتدا شاخص NDVI از تصاویر ماهواره‌های اپتیکی سنتینل ۲ و لندست ۸ و شاخص $NDVI_{SAR}$ از ماهواره راداری سنتینل ۱ محاسبه می‌شود. سپس بر اساس روابط رگرسیونی شاخص NDVI به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌های سنتینل ۲ و لندست ۸ ترکیب شده و بر آن اساس ضریب گیاهی به‌دست‌آمده از ماهواره‌های اپتیکی محاسبه می‌شود (Kc_{Optic}). همچنین بر اساس $NDVI_{SAR}$ نیز ضریب گیاهی به‌دست‌آمده تصاویر ماهواره‌های راداری محاسبه می‌گردد (Kc_{SAR}). در انتها بر اساس الگوریتم‌های هوش مصنوعی دو شاخص NDVI و $NDVI_{SAR}$ ترکیب شده و ضریب گیاهی ترکیبی (Kc_{fused}) محاسبه می‌شود. اساس برنامه‌ریزی آبیاری در سامانه Manna بر اساس Kc_{fused} است. روند محاسبه Kc_{fused} در شکل ارائه شده است (Beeri et al., 2020).



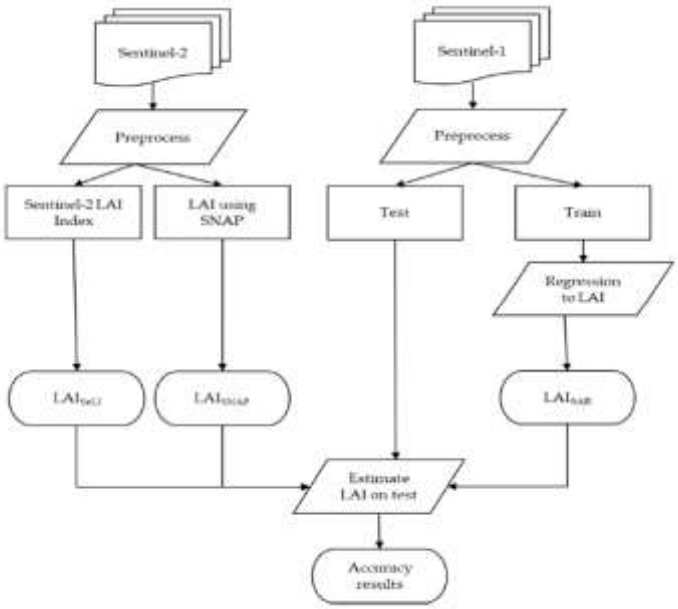
شکل ۷- شمای کلی الگوریتم محاسبه ضریب گیاهی در سامانه Manna (Beeri et al., 2020)

سامانه Manna علاوه بر توصیه آبیاری، اطلاعات رشد و یکنواختی پوشش گیاهی را نیز به کاربر ارائه می‌دهد. سازوکار محاسبه و ارائه اطلاعات گیاهی در سامانه، تقریباً مشابه روش سیستم در محاسبه ضریب گیاهی است. بدین منظور در ابتدا شاخص سطح برگ ابتدا به دو روش مختلف از تصاویر ماهواره سنتنیل ۲ و به دو روش از تصاویر ماهواره سنتنیل ۱ محاسبه می‌شود. سپس نتایج به‌دست‌آمده برای شاخص سطح برگ بر اساس مدل‌های هوش مصنوعی ترکیب شده و نتیجه به‌صورت نقشه‌های یکنواختی پوشش مزارع به کاربر ارائه می‌شود. روند محاسبه شاخص سطح برگ در سامانه Manna در شکل ۸ ارائه شده است (Beeri et al., 2020).



شکل ۸- شمای کلی الگوریتم محاسبه ضریب گیاهی در سامانه Manna **(**Beeri et al., 2020**)**

سامانه Manna علاوه بر توصیه آبیاری، اطلاعات رشد و یکنواختی پوشش گیاهی را نیز به کاربر ارائه می‌دهد. سازوکار محاسبه و ارائه اطلاعات گیاهی در سامانه، تقریباً مشابه روش سیستم در محاسبه ضریب گیاهی است. بدین منظور در ابتدا شاخص سطح برگ ابتدا به دو روش مختلف از تصاویر ماهواره سنتنیل ۲ و به دو روش از تصاویر ماهواره سنتنیل ۱ محاسبه
می‌شود. سپس نتایج به‌دست‌آمده برای شاخص سطح برگ بر اساس مدل‌های هوش مصنوعی ترکیب‌شده و نتیجه به‌صورت نقشه‌های یکنواختی پوشش مزارع به کاربر ارائه می‌شود. روند محاسبه شاخص سطح برگ در سامانه Manna در شکل ۹ ارائه شده است (Beeri et al., 2020).



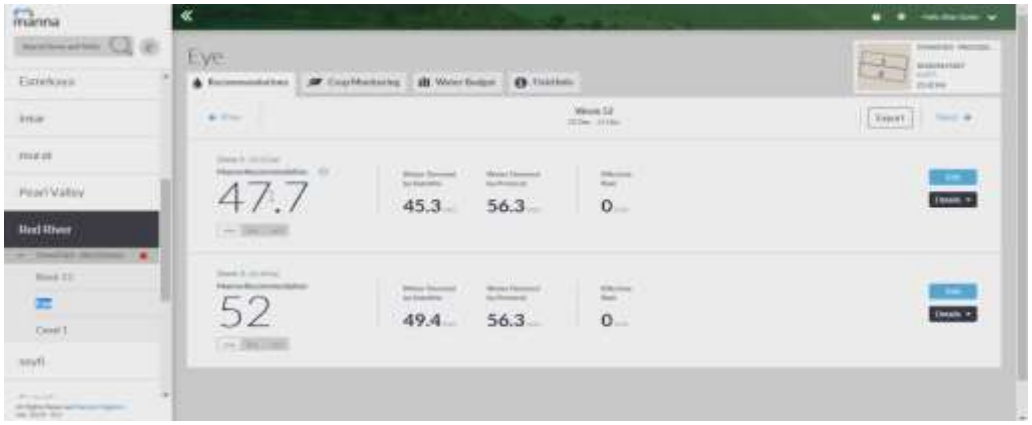
شکل ۹- شمای کلی الگوریتم استخراج پوشش گیاهی در سامانه Manna **(**Beeri et al., 2020**)**

قابلیت‌های Manna

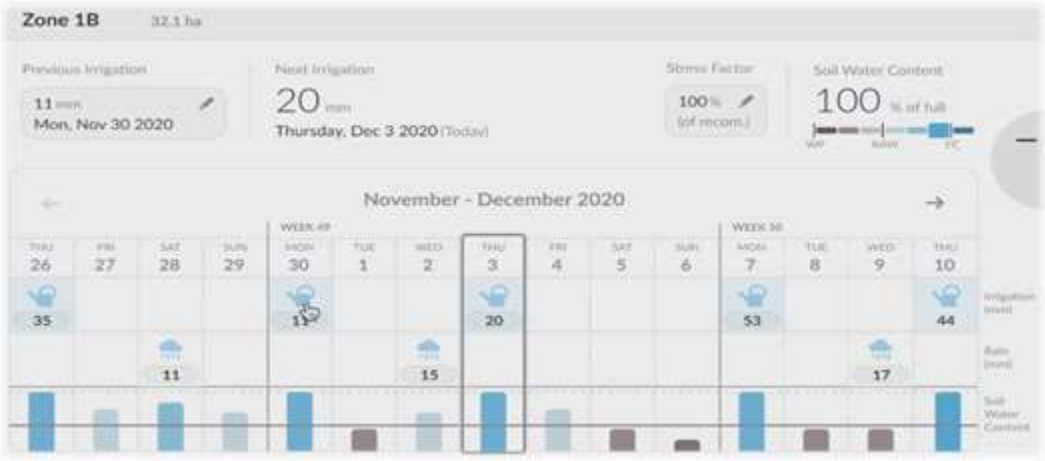
مهم‌ترین اطلاعاتی که Manna به کاربران ارائه می‌دهد عبارت است از عمق و زمان آبیاری (شکل ۱۰). ازجمله مهم‌ترین خصوصیات قابل‌توجه سامانه Manna می‌توان به نکات زیر اشاره نمود:

- بی‌نیازی به استفاده از حسگرها و سایر سخت‌افزارهای مورد استفاده در سطح مزرعه
- ارائه توصیه‌های آبیاری به‌صورت روزانه
- امکان تعدیل ارقام آبیاری توسط کاربر (شکل ۱۱)
- نظارت مداوم بر محصول با تصاویر ماهواره‌های در فواصل زمانی کوچک (شکل ۱۲)
- ارائه‌ی رابط API
- استفاده از تصاویر ماهواره‌های مختلف ازجمله Landsat، Sentinel 2 و Sentinel 1

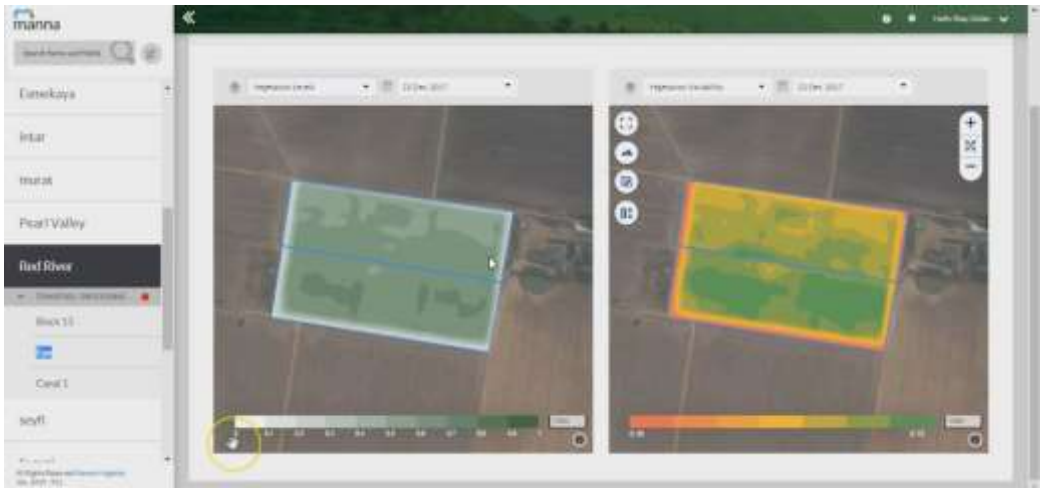
در حال حاضر بیش از ۱۵۰ هزار هکتار از اراضی کشاورزی با بیش از ۵۰ نوع محصول در ۱۱ کشور از خدمات Manna بهره‌مند می‌شوند.



شکل ۱۰-توصیه‌های آبیاری در درگاه اینترنتی سامانه Manna **(**Manna, 2023**)**



شکل ۱۱- امکان تعدیل برنامه‌ریزی آبیاری توسط کاربر در سامانه Manna (Manna, 2023)



شکل ۱۲- نقشه پوشش گیاهی قطعات کشاورزی در سامانه Manna (Manna, 2023)

سامانه IrriWatch

سامانه IrriWatch یک سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری مدیریت کشاورزی است که نقشه‌های ۱۰ متر در ۱۰ متر رطوبت خاک و تبخیر–تعرق از سطوح کشاورزی را به‌صورت روزانه، به مشتریان خود ارائه می‌کند. مرکز راهبری سامانه مذکور در کشور هلند قرار دارد. رویکرد IrriWatch در برنامه‌ریزی آبیاری، تعیین وضعیت رطوبت خاک بر اساس تبخیر–تعرق واقعی است (Kisekka, 2022). این سامانه به‌صورت روزانه به کشاورز اعلام می‌کند که آیا مزرعه برای روز بعد نیاز به آبیاری دارد و یا خیر؟ علاوه بر آن سیستم به کشاورز نشان می‌دهد که کدام قسمت مزرعه کم آبیاری شده و کدام قسمت بیش‌ازحد نیاز آبیاری شده است. توصیه آبیاری توسط سامانه در زمانی انجام می‌شود که رطوبت پروفیل خاک ۲۰ تا ۴۰ درصد پیکسل‌ها کمتر از حد آستانه آبیاری است. حداقل سطحی که IrriWatch برای ارائه خدمات قبول می‌کند، مجموع ۲۵ هکتار در قطعات حداقل ۰/۵ هکتاری است. ارائه خدمات آزمایشی برای مشتریان در یک دوره ۱۴ روزه به‌صورت رایگان ارائه می‌شود. سامانه IrriWatch در ماه‌هایی که ابرناکی کمتر از ۵۰ درصد است با استفاده از نسل چهارم الگوریتم

SEBAL تبخیر-تعرق واقعی گیاه را محاسبه می‌نماید. در روزهایی که ابرناکی آسمان زیاد بوده و تصویر مناسب ماهواره‌ای در دسترس نباشد، توصیه آبیاری با استفاده از مدل تخمین رطوبت خاک که در طی زمانی که آسمان ابرناکی بالایی ندارد، واسنجی شده، ارائه می‌شود (IrriWatch, 2023).

پشتوانه تئوریک IrriWatch

پشتوانه علمی و فنی سامانه IrriWatch استفاده از الگوریتم نسل چهارم SEBAL برای محاسبه‌ی تبخیر-تعرق واقعی و الگوریتم‌های محاسبه‌ی رطوبت خاک و شار کربن است. هرچند اطلاعات خام ماهواره‌ای به‌صورت رایگان توسط آژانس‌های فضایی در دسترس است اما الگوریتم‌های فوق در انحصار IrriWatch است و این سامانه تنها استفاده کننده از نسل چهارم الگوریتم SEBAL است. اساس اصلی این الگوریتم ترکیب اطلاعات مربوط به زبری آیرودینامیک و اختلاف دمای سطح گیاه و با محیط اطراف است. با خشک شدن خاک، به‌مرور روزنه‌های برگ بسته شده و مقاومت برگ در برابر تعرق افزایش می‌یابد. این مسئله به‌مرور سبب افزایش دمای برگ و گیاه می‌شود. به‌عبارت‌دیگر افزایش دمای برگ محصولات زراعی بیانگر، کمبود آب و یا به‌عبارت‌دیگر میزان جذب آب توسط ریشه است (IrriWatch, 2023).

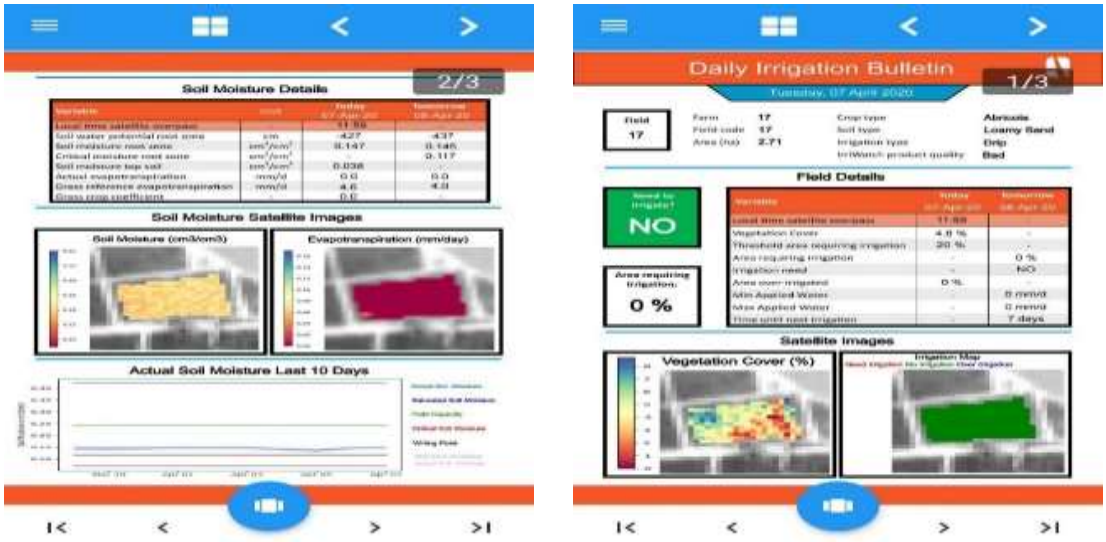
قابلیت‌های IrriWatch

خدمات اطلاعاتی سیستم IrriWatch در سه سطح پایه‌ای، پیشرفته و عالی ارائه می‌شوند (شکل۱۳). این اطلاعات و توصیه‌های آبیاری روزانه، بر اساس اندازه‌گیری روزانه پارامترهای خاک، محصول و آب و هوا و همچنین پیش‌بینی آب‌وهوا در هر مزرعه در قالب نقشه، جداول و نمودارها ارائه می‌شوند. توانایی این سامانه در ارائه اطلاعات به‌صورت روزانه امکان بررسی و تحلیل اجرای تصمیمات مختلف را در سطوح زراعی و همچنین سطوح بالای تشکیلاتی مانند شبکه‌های آبیاری و زهکشی و مدیریت کلان آب در سطح منطقه‌ای را ایجاد می‌کند. سامانه IrriWatch در حال حاضر در ۲۹ کشور در دنیا، هزاران هکتار از مزارع و باغات را پوشش می‌دهد.

شکل ۱۳- خدمات ارائه شده در سه سطح پایه‌ای، پیشرفته و عالی سامانه IrriWatch (IrriWatch, 2023)

رابط کاربری IrriWatch با مشتریان عبارت است از: ۱- اپلیکیشن موبایلی که اطلاعات آبیاری و وضعیت رطوبتی مزارع را به کشاورزان و آبیاران ارائه می‌نماید (شکل ۱۴)، ۲- درگاه اینترنتی (https://www.irriwatch.com/). همچنین مشابه دو سامانه Manna و IrriSAT، امکان ارائه API به کاربر در IrriWatch نیز فراهم است. اطلاعات ارائه شده در اپلیکیشن موبایلی

IrriWatch شامل مواردی از قبیل نیاز و یا عدم نیاز به آبیاری و مدت زمان باقی‌مانده تا زمان آبیاری بعدی است. کشاورز به‌راحتی می‌تواند با بررسی روزانه اطلاعاتی که روزانه در موبایل خود مشاهده می‌کند و تصمیمات مربوط به برنامه‌ریزی آبیاری را انجام دهد و یا اولویت مزارعی که باید آبیاری شوند هر روز رتبه‌بندی می‌شوند را تنظیم و اجرا نمایند. در درگاه اینترنتی سامانه IrriWatch، نیز اطلاعات تکمیلی از قبیل نمودارها و جداول رطوبت خاک، تبخیر–تعرق گیاه، تولید روزانه محصول، پتانسیل ماتریک گیاه، یکنواختی رطوبت مزارع و... ارائه می‌شود که نمونه‌های آن در شکل ۱۵ ارائه شده است. درگاه اینترنتی مذکور مخصوص کامپیوتر طراحی شده است و امکان تجزیه‌وتحلیل بیشتر و پیشرفته اطلاعات روزانه را در دوره‌های مختلف رشد فراهم می‌کند.

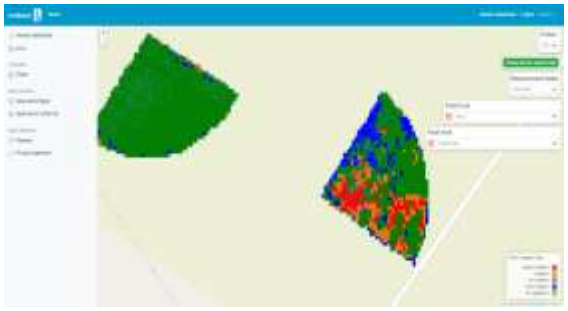


پایه‌ای

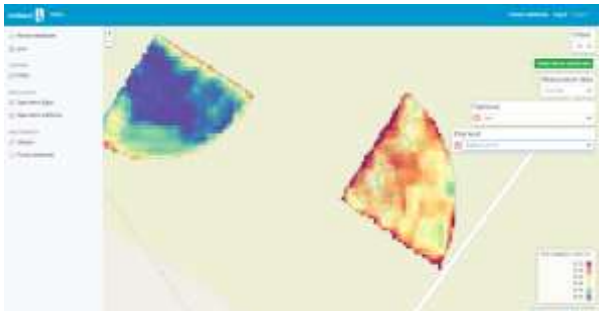
پیشرفته

عالی

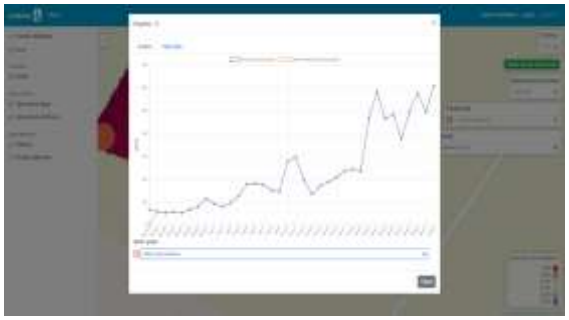
شکل ۱۴- اپلیکیشن موبایل سامانه IrriWatch در سه سطح پایه‌ای، پیشرفته و عالی (IrriWatch, 2023)



الف- نقشه آبیاری



ب- نقشه پوشش گیاهی



ث- نمودار تولید محصول روزانه

ج- نمودار تغییرات رطوبت خاک در پروفیل ریشه

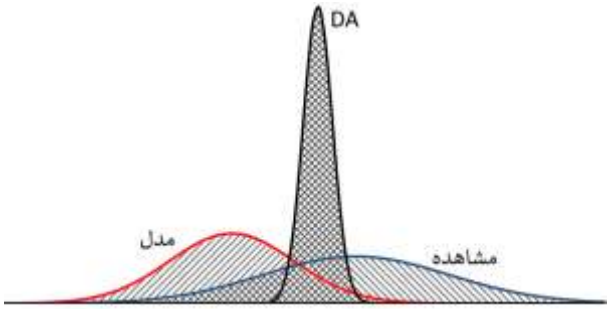
چ- جدول اطلاعات روزانه مزرعه

شکل ۱۵- نمونه‌ای از اطلاعات ارائه شده در درگاه اینترنتی سامانه IrriWatch (IrriWatch, 2023)

روش‌های نوین در آبیاری هوشمند

همان‌طور که در بخش‌های پیشین این مقاله نشان داده شد، مؤسسات متعددی در سراسر دنیا با ارائه خدمات آبیاری به‌عنوان سامانه‌های پشتیبانی تصمیم خدمات ارزشمندی به کشاورزان ارائه می‌دهند. از جمله مهم‌ترین ویژگی‌هایی که سامانه‌های مذکور می‌بایست از آن برخوردار باشند، انطباق با شرایط متنوع اقلیمی و اجتماعی است (دهقانی سانیج و همکاران، ۱۴۰۳). لذا ممکن است کارایی این سامانه‌ها در مکان‌های مختلف، متفاوت باشد. بنابراین توسعه سامانه‌های پشتیبانی تصمیم در زمینه آبیاری هوشمند در سطح کشور می‌تواند به انطباق‌پذیری بیشتر این سامانه‌ها با شرایط بهره‌برداران بومی کمک شایانی نماید. روشن است که توسعه سامانه‌های آبیاری هوشمند از پیچیدگی‌های فراوانی برخوردار است. بزرگ‌ترین چالش در توسعه این سامانه‌ها، محاسبه دقیق رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه است (دهقانی سانیج و همکاران، ۱۴۰۲). به‌طورکلی محاسبات مربوط به آبیاری هوشمند به سه دسته الف) استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز، ب) استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و ج) حسگرهایی که رطوبت خاک را اندازه می‌گیرند، تقسیم می‌شوند. روشن است که هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خود را دارند؛ برای مثال استفاده از حسگرهایی که

رطوبت خاک را اندازه می‌گیرند هزینه بالایی دارد و نتایج مدل‌ها نیز با عدم قطعیت همراه هستند. دانش داده‌گواری یک روش پیشرفته مبتنی بر احتمالات است که امکان استفاده توأم و هم‌افزایی نتایج مدل‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های حسگرها را فراهم می‌کند. تکنیک‌های داده‌گواری بر منطق بیزی (Bayesian) استوار هستند. به‌عبارت‌دیگر در هر مرتبه استفاده از تکنیک‌های داده‌گواری، نتایج مدل به‌وسیله اندازه‌گیری حسگرها، که به آن‌ها مشاهده اطلاق می‌گردد، تدقیق می‌شود (شکل ۱۶).



شکل ۱۶ – فرایند داده‌گواری (Kutz, 2013)

یکی از ویژگی‌های برجسته تکنیک‌های داده‌گواری به‌روزرسانی مداوم نتایج مدل است که سبب می‌شود تا نتایج مدل همواره از سطحی از دقت برخوردار باشند. علاوه بر آن رویکرد مدل‌سازی احتمالاتی این روش‌ها امکان استفاده از پیش‌بینی‌های هواشناسی که همواره با سطح قابل‌توجهی از عدم قطعیت روبرو هستند را امکان‌پذیر می‌کند. طباطبایی و همکاران (۱۴۰۲a) در پژوهشی تأثیر تعداد حسگرهای رطوبت‌سنج بر دقت نتایج شبیه‌سازی رطوبت خاک به‌وسیله داده‌گواری را بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده مؤید آن بود که با استفاده از داده‌گواری، تعداد حسگرهای مورد نیاز برای دستیابی به دقت مورد نظر کاهش یافت. همچنین در پژوهشی دیگر طباطبایی و همکاران (۱۴۰۲b) به بررسی اثر داده‌گواری با استفاده از مشاهدات ماهواره‌ای، برای افزایش دقت رطوبت خاک و تبخیر–تعرق واقعی پرداختند. نتایج پژوهش دلالت بر آن داشت که دستیابی به پیش‌بینی شرایط رطوبتی در عمق توسعه ریشه با دقت بالا، که مهم‌ترین متغیر برای برنامه‌ریزی آبیاری و روش‌های آبیاری هوشمند است، میسر است. به‌عبارت‌دیگر داده‌گواری می‌تواند به توسعه دهندگان سامانه‌های آبیاری هوشمند کمک کند تا با استفاده از حجم محدودی از مشاهدات به‌دست‌آمده از حسگر نتایج مدل‌های شبیه‌سازی رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه را بهبود بخشیده و به طبع آن سامانه تصمیم‌یار آبیاری هوشمند خود را ارتقا دهند.

نتیجه‌گیری

نظر به نحوه مدیریت عمده‌ی اراضی کشاورزی کشور از یکسو و شرایط اقتصادی کشاورزان از سوی دیگر، امکان استفاده از روش‌های آبیاری هوشمند مبتنی بر حسگرهای رطوبتی خاک که عموماً از هزینه قابل‌توجهی برخوردارند به‌آسانی میسر نیست. در این مقاله سه نمونه از سامانه‌های کمک به تصمیم‌گیری در بخش آبیاری با استفاده از فناوری‌های سنجش‌ازدوری که برای ارائه خدمات خود نیازی به حسگرهای در سطح مزرعه ندارند معرفی و ارائه شد. روند رو به رشد توسعه فناوری‌های مرتبط با سنجش‌ازدور و علوم داده، پیش‌بینی می‌شود که در آینده‌ای نه‌چندان دور سطح اراضی کشاورزی که خدمات این سامانه‌ها استفاده می‌کنند افزایش چشم‌گیری خواهد یافت (Saggi and Jain., 2022). بااین‌وجود عواملی از قبیل قدرت تفکیک زمانی و مکانی و طیفی محدود تصاویر ماهواره‌ای مهم‌ترین مانع در افزایش دقت این سامانه‌ها است. دور از ذهن نیست که با پیشرفت فنّاوری و ورود علومی مانند یادگیری ماشین و یادگیری عمیق به این بخش، دقت این سامانه‌ها نیز افزایش قابل‌توجهی یابد (Gamal and Soltan, 2023). روشن است که اثرپذیری بخش کشاورزی از توسعه فناوری‌های مورد اشاره در همه مناطق یکسان نیستند و مسائلی از قبیل عدم ارائه آموزش‌های مورد نیاز برای استفاده کشاورزان و یا عدم توسعه زیرساخت‌های مورد نیاز این روش‌ها، بر بهبود وضع کشاورزی اثرگذار است (Deng et al., 2022b). بااین‌وجود روند رو به رشد استفاده از فناوری‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء و توسعه زیرساخت‌های مرتبط با کلان داده‌ها و فضای ابری، تسهیل‌کننده پیاده‌سازی این دست از سامانه‌ها می‌شود و استفاده از این روش‌ها در بخش کشاورزی توسعه خواهد یافت (Du et al., 2023). بر این اساس توصیه می‌شود نقشه راه استفاده از این فناوری‌ها و یا بومی‌سازی آن‌ها با توجه به پتانسیل‌ها و امکانات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری موجود در کشور و نیازمندی‌های حوزه کشاورزی در اولویت مدیران و تصمیم‌گیران این بخش قرار گیرد.

پیشنهاد می‌شود به‌منظور تدوین هرچه بهتر نقشه راه استفاده از این فناوری‌ها در سطح کشور، پژوهش‌هایی در زمینه اولویت‌دهی بین شاخص‌های مختلف سامانه‌های آبیاری هوشمند از قبیل دقت برآورد تبخیر-تعرق یا رطوبت خاک، هزینه ارائه خدمات به کشاورزان، نحوه تعامل کشاورزان با سامانه و... انجام گردد.

منابع

جمشیدی، ب. و دهقانی سانیج، ح. ۱۳۹۹. کلان داده‌های مبتنی بر اینترنت اشیا از چشم‌انداز کشاورزی هوشمند. فصلنامه رشد فناوری. ۱۶(۶۳): ۱۲-۲۲.

حسینی، س م.، چیذری، م. و بردبار، م. ۱۳۸۹. بررسی زیربناهای امکان کاربرد ک شاورزی دقیق از دیدگاه کار شنا سان جهاد ک شاورزی ا ستان فارس، علوم ترویج و آموزش ک شاورزی ایران. ۶(۲): ۳۵-۴۶

شیرخانی، م.، پزشکی‌راد، غ. و صدیقی، ح. ۱۳۹۵. ارزیابی میزان آگاهی کارشناسان کشاورزی استان تهران نسبت به کشاورزی دقیق. مجله تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران. ۲-۴۷(۳): ۶۵۷-۶۷۲.

دهقانی سانیج، ح.، امامی، س.، امینی، ع.، وردی‌نژاد، و. ر.، نورجو، ا.، محمدی، س.، طباطبایی، س. ح.، ح.، جمشیدی، ب. ۱۴۰۲. توسعه یک سیستم تصمیم‌یار آبیاری و بررسی انطباق‌پذیری آن با شرایط شبکه‌ی آبیاری و زهکشی مهاباد. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک. ۴(۲)، ۵۵-۷۴.

دهقانی سانیج، ح.، محمدی، س.، امینی، ع.، وردی‌نژاد، و. ر.، نورجو، ا.، امامی، س.، طباطبایی، س. ح.، جمشیدی، ب.، دهقانی سانیج، غ. ۱۴۰۳. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵(۱)، ۳۳-۴۹.

طباطبایی، س. ح.، میرلطیفی، س. م.، دهقانی سانیج، ح.، ناقدی‌فر، س. م. ۱۴۰۲a. ارزیابی حساسیت داده‌گواری رطوبت خاک به تعداد عمق‌های نمونه‌برداری و فاصله‌های زمانی بین اندازه‌گیری‌ها با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۹۲(۲۴)، ۴۷-۶۸.

طباطبایی، س. ح.، میرلطیفی، س. م.، دهقانی سانیج، ح. ۱۴۰۲b. ارزیابی بهبود دقت تخمین تبخیر-تعرق واقعی اراضی کشاورزی به کمک داده‌گواری با استفاده از مشاهدات مبتنی بر سنجش از دور و مدل فائو ۵۶. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۹۲(۲۴)، ۴۷-۶۸.

Breazeale, D. 2007. A precision agriculture fertilization program for alfalfa hay production: Will it pay for itself?. University of Nevada Cooperative Extension.

Beeri, O., Netzer, Y., Munitz, S., Mintz, D. F., Pelta, R., Shilo, T., Horesh, A., Mey-tal, S. 2020. Kc and LAI estimations using optical and SAR remote sensing imagery for vineyards plots. Remote Sensing. 12(21): 3478.

Davis, G., Casady, W.W. and Massey, R.E. 1998. Precision agriculture: An introduction. Extension publications (MU).

Deng, H., Jing, X. and Shen, Z. 2022a. Internet technology and green productivity in agriculture. Environmental Science and Pollution Research. 29(54): 81441-81451.

Deng, F., Jia, S., Ye, M. and Li, Z. 2022b. Coordinated development of high-quality agricultural transformation and technological innovation: a case study of main grain-producing areas, China. Environmental Science and Pollution Research, 29(23): 35150-35164.

Domínguez-Nino, J.M., Oliver-Manera, J., Girona, J. and Casadesús, J. 2020. Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors. Agricultural Water Management. 228, p.105880.

Du, X., Wang, X. and Hatzenbuehler, P. 2023. Digital technology in agriculture: a review of issues, applications and methodologies. China Agricultural Economic Review. 15(1): 95-108.

Fountas, S., Espejo-Garcia, B., Kasimati, A., Mylonas, N. and Darra, N. 2020. The future of digital agriculture: technologies and opportunities. IT professional. 22(1): 24-28.

Gamal, Y., Soltan, A., Said, L. A., Madian, A. H. and Radwan, A. G. 2023. Smart Irrigation Systems: Overview. IEEE Access.

Hornbuckle, J., Montgomery, J., Vleeshouwer, J., Hoogers, R. and Ballester, C. 2016a. Using the Irrisat App to improve on-farm water management. In Irrigation Australia International Conference, Melbourne Convention & Exhibition Centre.

Hornbuckle, J., Montgomery, J. and Vleeshouwer. 2016b. A quick guide to the use of the cloud based IrriSAT app Supporting materials for IrriSAT workshops.

IrriSAT. 2023. https://www.irrisat.com/en/irrisat-water-user-association

IrriWatch. 2023. https://irriwatch.com/

Soulis, K. X., Elmaloglou, S. 2018. Optimum soil water content sensors placement for surface drip irrigation scheduling in layered soils. Computers and electronics in agriculture. 152:1-8.

Saggi, M. K. and Jain, S. 2022. A survey towards decision support system on smart irrigation scheduling using machine learning approaches. Archives of computational methods in engineering, 29(6), 4455-4478.

Shan, G., Sun, Y., Zhou, H., Lammers, P. S., Grantz, D. A., Xue, X., Wang, Z. 2019. A horizontal mobile dielectric sensor to assess dynamic soil water content and flows: Direct measurements under drip irrigation compared with HYDRUS-2D model simulation. Biosystems Engineering, 179, 13-21.

Trout, TJ. and Johnson, LF. 2007. Estimating crop water use from remotely sensed NDVI, Crop Models and Reference ET, USCID Fourth International Conference on Irrigation and Drainage, The Role of Irrigation and Drainage in a sustainable Future, Eds. Clemmens, A.J., Anderson, S.S., Sacramento, California, October 3-6.

Zhou, W., Xu, Z., Ross, D., Dignan, J., Fan, Y., Huang, Y., Wang, G., Bagtzoglou, A.C., Lei, Y. and Li, B. 2019. Towards water-saving irrigation methodology: Field test of soil moisture profiling using flat thin mm-sized soil moisture sensors (MSMSs). Sensors and Actuators B: Chemical, 298, p.126857.

Kisekka, I., Peddinti, S. R., Kustas, W. P., McElrone, A. J., Bambach-Ortiz, N., McKee, L., Bastiaanssen, W. 2022. Spatial–temporal modeling of root zone soil moisture dynamics in a vineyard using machine learning and remote sensing. Irrigation science, 40(4-5):761-777.

Kyaw, K. M., Rittima, A., Phankamolsil, Y., Tabucanon, A. S., Sawangphol, W., Kraisangka, J., Talaluxmana, Y., Vudhivanich, V. 2020. Tracing Crop Water Demand in the Lower Ping River Basin, Thailand using Cloud–Based IrriSAT Application. In Proceedings of the 22nd IAHR–APD Congress (pp. 14-17).

Kutz, J.N., 2013. Data-driven modeling & scientific computation: methods for complex systems & big data. Oxford University Press.

Manna. 2023. https://manna-irrigation.com/

Majsztrik, J. C., Price, E. W., King, D. M. 2013. Environmental Benefits of Wireless Sensor-based Irrigation Networks: Case-study Projections and Potential Adoption Rates. HortTechnology, 23(6): 783-793.

Montesano, F.F., Van Iersel, M.W. and Parente, A. 2016. Timer versus moisture sensor-based irrigation control of soilless lettuce: Effects on yield, quality and water use efficiency. Horticultural Science. 43(2): pp:67-75.

Montesano, F.F., Van Iersel, M.W., Boari, F., Cantore, V., D'Amato, G. and Parente, A. 2018. Sensor-based irrigation management of soilless basil using a new smart irrigation system: Effects of set-point on plant physiological responses and crop performance. Agricultural water management. 203:20-29.

Water Management in Agriculture
Vol. 11, No. 1, Spring and Summer 2024, 167-182

نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۳، ص. ۱۸۲-۱۶۷

Evaluation of Decision Support Systems in Irrigation Management at the International Level (Case Study: IrriSAT, IrriWatch and Manna)

S. H. Tabatabaei[1*] and G. Dehghanisanij[2]

Abstract

The reductionin water resources availability has faced serious risks to the future of the agricultural sector. Improving irrigation planning by enhanced water productivity and efficiency—other words, achieving the same product with less water consumption can effectively compensate for the effects of water scarcity in irrigated agriculture. One of the most appropriate methods for improving irrigation management and planning is the use of moisture sensors. However, when large areas of land are involved,, the use of sensors requires a considerable investment. Considering the management of the country's agricultural lands on the one hand and the economic conditions of farmers on the other, it is not easy to use smart irrigation methods based on soil moisture sensors, which generally have a significant cost. In this research, three systems— IrriSAT, Manna, and IrriWatch systems- are introduced as successful examples of decision- support systems in the irrigation sector, with a presentation of their theoretical foundations and capabilities. These systems useremote sensing technologies and do not require in-field sensors for their services The information that should be specified by the user,the logic ofevapotranspiration estimation, irrigation recommendations,service cost , and userinteraction methods differ across these systems. This research attempts to introduce the aforementioned features of smart irrigation systems to experts in the field.

Keywords: Innovative Irrigation Technologies, Irrigation Scheduling, Precision Agriculture, Smart Irrigation

[1] PhD in water engineering, Department of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (*Corresponding Author Email: h.tabatabaii@modares.ac.ir)
[2] Master's student in water resources management, Department of Agriculture, Bu Ali-Sina University, Hamedan, Iran
Received: 8 Dec 2023
Accepted: 25 Dec 2023