

Document Type

Technical paper

فنی و ترویجی

نوع مقاله

The Future of Smart Irrigation: Global Market Analysis, Trends, and Opportunities

I. Hajirad¹, Kh. Ahmadaali^{2*}, A.M. Liaghat³

1, 2, 3- Ph.D. Candidate, Associate Professor, and Professor,
Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of
Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

* Corresponding Author Email: khahmadauli@ut.ac

آینده آبیاری هوشمند: تحلیل بازار جهانی، روندها و فرصت‌ها

ایمان حاجی‌راد^۱، خالد احمدآلی^{۲*}، عبدالمجید لیاقت^۳

۱ و ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استاد گروه مهندسی آبیاری و
آبادانی، دانشکده‌های کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

*رایانامه نویسنده مسئول: khahmadauli@ut.ac

Received ► 21-06-2025
Revised ► 29-07-2025
Accepted ► 25-08-2025
Available online ► 16-03-2026

تاریخ دریافت ► ۱۴۰۴/۰۳/۳۱
تاریخ بازنگری ► ۱۴۰۴/۰۵/۰۷
تاریخ پذیرش ► ۱۴۰۴/۰۶/۰۳
تاریخ انتشار ► ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

Abstract

The smart irrigation market, as one of the emerging and rapidly growing sectors in agriculture and water resources management, has attracted considerable attention in recent years. This technology enables optimized and automated irrigation through the use of intelligent devices and systems such as sensors, weather- and soil-moisture-based controllers. The primary objective of these systems is to reduce water losses and improve water use efficiency. The growing demand for smart irrigation technologies is driven by water scarcity, climate change, population growth, and the increasing need for higher food production. Moreover, technological advancements such as the Internet of Things (IoT), machine learning (ML), and big data analytics play a crucial role in optimizing irrigation processes and reducing operational costs. The smart irrigation market is projected to reach USD 3.94 billion by 2029, with a compound annual growth rate (CAGR) of 16.2%. Market growth is influenced by government policies, financial incentives, and investments in research and development. However, challenges such as high initial investment costs and connectivity issues in rural areas remain major barriers to the widespread adoption of this technology. International studies indicate that smart irrigation systems can reduce water consumption by 20-50% and increase water use efficiency by up to approximately 44%, highlighting their effectiveness as a viable solution for addressing water scarcity and enhancing irrigation system performance.

Keywords: Smart Irrigation, Irrigation Market, Smart Technology, Automation.

چکیده

بازار آبیاری هوشمند به عنوان یکی از بخش‌های نوظهور و در حال رشد در صنعت کشاورزی و مدیریت منابع آب، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این فناوری با استفاده از دستگاه‌ها و سیستم‌های هوشمند مانند حسگرها، کنترل کننده‌های مبتنی بر داده‌های آب و هوا و رطوبت خاک، امکان آبیاری بهینه و خودکار را فراهم می‌آورد. هدف اصلی این سیستم‌ها کاهش هدررفت آب و بهبود بهره‌وری آب است. افزایش تقاضا برای این فناوری به دلیل کمبود منابع آبی، تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و نیاز به افزایش تولید مواد غذایی است. همچنین، پیشرفت‌های فناوری همچون اینترنت اشیا (IoT)، یادگیری ماشین (ML) و داده‌های کلان (Big Data) نقش مهمی در بهینه‌سازی فرآیند آبیاری و کاهش هزینه‌ها ایفا می‌کنند. پیش‌بینی می‌شود بازار آبیاری هوشمند تا سال ۲۰۲۹ به ۳/۹۴ میلیارد دلار با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) معادل ۱۶/۲ درصد برسد. رشد این بازار تحت تأثیر سیاست‌های دولتی، حمایت‌های مالی و تحقیق و توسعه قرار دارد. با این حال چالش‌هایی مانند هزینه‌های اولیه بالا و مشکلات اتصال در مناطق روستایی، از موانع اصلی پیش روی گسترش همه‌جانبه این بازار محسوب می‌شوند. نتایج مطالعات بین‌المللی حاکی از آن است که سامانه‌های آبیاری هوشمند با کاهش ۲۰ تا ۵۰ درصدی مصرف آب و افزایش بهره‌وری آب تا حدود ۴۴ درصد، می‌توانند به عنوان راهکاری مؤثر برای مقابله با کمبود آب و ارتقای بهره‌وری در سیستم‌های آبیاری مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری هوشمند، بازار آبیاری، هوشمندسازی، خودکارسازی.

How to cite this article:

Hajirad, I., Ahmadaali, Kh., & Liaghat, A.M. (2026). The Future of Smart Irrigation: Global Market Analysis, Trends, and Opportunities. Journal of Water and Sustainable Development, 12(4), 9-23. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i4.2506-1435>

(IoT) و با تحلیل توسط الگوریتم‌های پیشرفته هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی^۲ برای تشخیص الگوهای پیچیده و الگوریتم‌های تصمیم‌گیری تطبیقی برای بهینه‌سازی مداوم آبیاری در شرایط متغیر محیطی، امکان‌پذیر می‌شود. در جهانی که با چالش‌های جدی منابع آبی و نیاز فزاینده به امنیت غذایی روبه‌روست، هوشمندسازی در کشاورزی به عنوان یک راهکار ضروری برای دستیابی به پایداری و بهره‌وری حداکثری از منابع آب مطرح می‌شود (Obaideen و همکاران، ۲۰۲۲). مطالعات مختلف نشان داده است استفاده از سامانه‌های آبیاری هوشمند، به‌ویژه در مناطقی که از حسگرهای رطوبت خاک و داده‌های هواشناسی بهره می‌برند، می‌تواند بین ۲۰ تا ۵۰ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی ایجاد کند. همچنین در برخی گزارش‌ها آمده است بهره‌وری آبیاری در مقایسه با روش‌های سنتی تا ۴۴ درصد افزایش یافته است. این داده‌ها نشان‌دهنده اثربخشی بالای فناوری‌های نوین در مدیریت منابع آبی هستند (Gamal و همکاران، ۲۰۲۳؛ Nsoh و همکاران، ۲۰۲۴؛ University of California Agriculture و Natural Resources، ۲۰۲۰؛ PS Market Research، ۲۰۲۴). شایان ذکر است پیش از ورود به جزئیات فنی و بررسی سطوح مختلف آبیاری هوشمند، ضروری است ابتدا تفاوت میان دو مفهوم کلیدی اتوماسیون و هوشمندسازی به‌روشنی بیان شود؛ چراکه این دو، اگرچه در نگاه اول مشابه به‌نظر می‌رسند، اما در اصل، سطوح متفاوتی از فناوری، تصمیم‌گیری و پاسخ‌گویی به شرایط محیطی را نمایندگی می‌کنند. در ادامه، با تعریف دقیق هر یک و مقایسه آن‌ها از منظر کاربردی، به‌ویژه در حوزه آبیاری، درک عمیق‌تری از ضرورت و مزایای هوشمندسازی حاصل می‌شود.

۲- اتوماسیون^۳

اتوماسیون به فرآیندی گفته می‌شود که در آن فعالیت‌ها به صورت خودکار و بدون نیاز به مداخله مستقیم انسان انجام می‌شوند. در این سیستم‌ها، وظایف از پیش برنامه‌ریزی شده و طبق یک زمان‌بندی مشخص یا مجموعه‌ای از دستورات تعریف شده اجرا می‌شوند (Weyrich، ۲۰۲۴). این ویژگی، اتوماسیون را به گزینه‌ای مناسب برای عملیات تکراری از جمله آبیاری در مقیاس وسیع تبدیل کرده است (Rajakumar و همکاران، ۲۰۰۸). به‌عنوان مثال، در یک سیستم آبیاری قطره‌ای اتوماتیک، ممکن است از تایمرهایی استفاده شود که پمپ آب را هر روز رأس ساعت مشخصی روشن کرده و پس از مدت معینی خاموش کنند. در این حالت، سیستم بدون توجه به شرایط محیطی مانند رطوبت خاک، دمای هوا یا پیش‌بینی بارش عمل می‌کند و صرفاً بر اساس برنامه‌ریزی اولیه وظایف خود را انجام می‌دهد. بنابراین، هرچند سیستم‌های اتوماتیک می‌توانند موجب کاهش نیاز به نیروی انسانی و بهبود مدیریت زمان شوند، اما به دلیل عدم واکنش‌پذیری به داده‌های زنده محیطی در مقایسه با

در دنیای امروز، کشاورزی دیگر فقط یک فعالیت سنتی برای تأمین غذا نیست، بلکه به صنعتی پویا و فناورانه تبدیل شده که مستقیماً با امنیت غذایی، توسعه پایدار، و مدیریت منابع طبیعی در ارتباط است. یکی از حیاتی‌ترین منابع در این حوزه، آب است؛ منبعی که به واسطه تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و بهره‌برداری ناپایدار، با چالش‌های جدی مواجه شده است. در این میان، استفاده بهینه از آب در کشاورزی که بزرگترین مصرف‌کننده این منبع در جهان است بیش از هر زمان دیگری اهمیت یافته است (Petrenko و Bondarenko، ۲۰۲۵). روش‌های آبیاری متداول مانند آبیاری غرقابی که با پخش آب در سطح زمین صورت می‌گیرد، یا روش‌های آبیاری نواری و حتی قطره‌ای بدون کنترل‌کننده‌های پیشرفته باوجود سادگی و رایج بودن با اتلاف قابل توجه آب، احتمال کاهش بهره‌وری محصول و عدم سازگاری بهینه با شرایط اقلیمی متغیر همراه هستند. این اتلاف شامل مواردی مانند تبخیر از سطح خاک، رواناب سطحی و نفوذ عمقی آب به خارج از محدوده توسعه ریشه است که منجر به عدم بهره‌وری بهینه از منابع آبی و کاهش کارایی سیستم آبیاری می‌شود. این شیوه‌ها معمولاً بر پایه قضاوت یا تجربه کشاورز انجام می‌شوند و توانایی پاسخ‌گویی به نیازهای لحظه‌ای گیاهان یا تغییرات اقلیمی مانند بارش، دمای هوا یا میزان رطوبت خاک را ندارند. چنین سیستم‌هایی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نه تنها منجر به کاهش تولید می‌شوند، بلکه موجب آسیب به منابع خاک و آب نیز خواهند شد (Selvakumar و همکاران، ۲۰۲۵). در پاسخ به این چالش‌ها، هوشمندسازی در کشاورزی و به‌ویژه در آبیاری، به‌عنوان رویکردی نوین و آینده‌نگرانه مطرح شده است. در این سیستم‌ها، با بهره‌گیری از سنسورها، اینترنت اشیا (IoT)، هوش مصنوعی و تحلیل داده‌ها، تصمیم‌گیری به‌جای انسان به سامانه‌های خودکار و تطبیق‌پذیر سپرده می‌شود. این سامانه‌ها قادر هستند اطلاعات محیطی مانند رطوبت خاک، دمای هوا، پیش‌بینی بارندگی و نوع گیاه را به‌صورت لحظه‌ای تحلیل کرده و بر اساس آن، برنامه‌ای دقیق، هدفمند و بهینه برای آبیاری ارائه دهند. نتیجه این رویکرد، کاهش مصرف آب، افزایش بهره‌وری، بهبود سلامت گیاه و در نهایت، حفظ منابع طبیعی است (Luu و همکاران، ۲۰۲۵). هوشمندسازی نه تنها موجب صرفه‌جویی در منابع می‌شود، بلکه انعطاف‌پذیری، دقت و پاسخ‌گویی سریع به شرایط محیطی را نیز ممکن می‌سازد. در مقایسه با سیستم‌های آبیاری متداول یا حتی اتوماتیک، سیستم‌های هوشمند قادر هستند با یادگیری و سازگاری، بهترین تصمیم را در هر لحظه اتخاذ کنند؛ تصمیمی که نه تنها به نفع مزرعه است، بلکه آینده‌ای پایدار برای کشاورزی ترسیم می‌کند. این قابلیت با بهره‌گیری از داده‌های جمع‌آوری شده توسط حسگرها و سامانه‌های اینترنت اشیا

سیستم‌های هوشمند، دقت و کارایی کمتری دارند (Dhamal و Mehrotra، ۲۰۲۱؛ Vera و همکاران، ۲۰۲۱). در ادامه انواع اتوماسیون که شامل نیمه اتوماتیک و تمام اتوماتیک هستند بررسی خواهند شد تا تفاوت‌ها و کاربردهای هر یک در سیستم‌های آبیاری روشن‌تر شود.

۱-۲- سیستم نیمه اتوماتیک^۴

سیستم‌ها و کنترل‌های نیمه‌اتوماتیک به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در هر نوبت آبیاری نیازمند توجه و مداخله دستی انسان هستند. این نوع سیستم‌ها معمولاً نسبت به سیستم‌های کاملاً اتوماتیک ساده‌تر، ارزان‌تر و کم‌هزینه‌تر هستند، به همین دلیل در بسیاری از مزارع کوچک یا نیمه صنعتی استفاده می‌شوند. در اغلب سیستم‌های نیمه‌اتوماتیک، از تایمرهای مکانیکی یا الکترونیکی استفاده می‌شود که وظیفه دارند در زمان‌های از پیش تعیین شده، اجزای کنترلی مانند شیرهای برقی یا پمپ‌ها را فعال کنند. در این نوع سیستم‌ها، کشاورز یا اپراتور معمولاً زمان شروع آبیاری و مدت زمان آن را به صورت دستی تعیین می‌کند و پس از پایان آبیاری وظیفه دارد دستگاه‌ها را به حالت اولیه برگرداند یا آن‌ها را به موقعیت‌های جدید منتقل کند تا برای نوبت بعدی آبیاری آماده باشند. در برخی از این سیستم‌ها ممکن است بخشی از فرایندها به صورت کاملاً خودکار انجام شود، درحالی‌که سایر بخش‌ها همچنان به مداخله انسانی یا عملکرد نیمه‌اتوماتیک نیاز دارند. این ترکیب از خودکارسازی و کنترل دستی، با امکان تنظیم هم‌زمان زمان‌بندی و مقدار آبیاری توسط سامانه و کاربر، انعطاف‌پذیری بیشتری در مدیریت فرآیند آبیاری ایجاد می‌کند، اما درعین حال، نیازمند هماهنگی مؤثر بین کنترل‌کننده مرکزی (کنترلر) و اجزای پراکنده در سطح مزرعه است. این ارتباط مؤثر میان اجزا و کنترلر می‌تواند از طریق سیم‌کشی، امواج رادیویی یا شبکه‌های ساده محلی برقرار شود (Rathika و همکاران، ۲۰۲۰؛ Rajakumar و همکاران، ۲۰۰۸). در مجموع، سیستم‌های نیمه‌اتوماتیک گزینه‌ای مناسب برای مزارعی هستند که در آن‌ها هزینه، سهولت نصب و نیاز به کنترل نسبی نسبت به خودکارسازی کامل اهمیت بیشتری دارد.

۲-۲- سیستم تمام اتوماتیک^۵

سیستم‌های تمام اتوماتیک به جز در مواردی مانند بازرسی‌های دوره‌ای یا نگهداری‌های معمول، معمولاً بدون نیاز به دخالت مستقیم اپراتور کار می‌کنند. در این نوع سیستم‌ها، کشاورز می‌تواند زمان یا شرایط شروع آبیاری (مانند رسیدن رطوبت خاک به یک حد مشخص) و مدت آن را تعیین کند و سپس با روشن کردن منبع آب یا فعال‌سازی کنترلرهای برنامه‌ریزی شده، کل فرآیند آبیاری به صورت خودکار انجام می‌گیرد. در این سامانه‌ها، ممکن است از سنسورهای رطوبت خاک مانند تانسیومترها یا بلوک‌های مقاوم‌تری الکتریکی استفاده شود تا

به محض رسیدن رطوبت خاک به سطحی مشخص (از پیش تعیین شده)، کنترل‌های الکتریکی را برای شروع آبیاری فعال کنند. در این زمینه، سنسورها به عنوان عناصر تشخیص‌دهنده، تنها آستانه‌های از پیش تعریف شده را پایش کرده و محرک اجرای دستورات برنامه‌ریزی شده هستند. آن‌ها فاقد قابلیت تحلیل پیچیده داده‌ها، یادگیری الگوها، و اتخاذ تصمیمات تطبیقی بر اساس متغیرهای متعدد محیطی می‌باشند. این ماهیت واکنشی و غیرتحلیلی، تمایز اصلی سیستم‌های تمام‌اتوماتیک از سیستم‌های هوشمند را آشکار می‌سازد. همچنین مدت زمان آبیاری ممکن است با استفاده از تایمرهای برنامه‌ریزی شده، سنسورهای رطوبت خاک یا سنسورهای سطحی آب تنظیم و کنترل شود. نکته مهم در سیستم‌های تمام اتوماتیک این است که نیاز به منبع آب قابل دسترس در هر لحظه دارند؛ مانند چاه‌های کشاورزی یا مخازن ذخیره آب در مزرعه که بتوانند در هر زمان که سیستم به آن‌ها فرمان می‌دهد، آب‌رسانی را انجام دهند. با وجود پیشرفت فناوری، بیشتر مزارع کشاورزی هنوز زیرساخت یا انعطاف‌پذیری لازم برای بهره‌برداری کامل از سیستم‌های کاملاً اتوماتیک را ندارند (Rathika و همکاران، ۲۰۲۰). محدودیت‌هایی مانند منابع آبی محدود، هزینه‌های بالا یا نبود شبکه‌های ارتباطی پیشرفته، استفاده گسترده از این نوع سیستم‌ها را در برخی مناطق دشوار می‌کند.

با وجود مزایای سیستم‌های تمام‌اتوماتیک، محدودیت‌هایی مانند عدم قابلیت تحلیل پیچیده داده‌ها و تصمیم‌گیری تطبیقی وجود دارد؛ این محدودیت‌ها، زمینه را برای معرفی آبیاری خودکار فراهم می‌کنند.

۳- آبیاری خودکار^۶

آبیاری خودکار به سیستمی گفته می‌شود که بدون نیاز به مداخله مستقیم کشاورز، فرآیند آبیاری را بر اساس یک برنامه از پیش تعیین شده انجام می‌دهد. این سیستم معمولاً شامل تایمرها، شیرهای برقی، پمپ‌ها و لوله‌های انتقال آب است که در زمان‌های مشخص، آبیاری را فعال می‌کنند. این روش باعث کاهش نیروی کار و صرفه‌جویی در زمان می‌شود، اما تفاوت عمده آن با سیستم‌های هوشمند در این است که معمولاً فاقد قابلیت یادگیری و تطبیق پویا با تمامی متغیرهای لحظه‌ای و پیچیده محیطی مانند پیش‌بینی بارش، تغییرات دمایی و نوع گیاه است و ممکن است در برخی مواقع باعث مصرف بیش‌ازحد آب یا کم‌آبی برای گیاهان شود (Munusamy و همکاران، ۲۰۲۱؛ Saxena، ۲۰۲۱؛ Zhang و Li، ۲۰۲۵).

۴- هوشمندسازی^۷

هوشمندسازی مرحله‌ای پیشرفته‌تر از اتوماسیون است که در آن سیستم از سنسورها، داده‌ها و الگوریتم‌های هوش مصنوعی استفاده می‌کند تا تصمیم‌گیری بهینه و تطبیقی انجام دهد. سیستم هوشمند توانایی یادگیری و پاسخ به

شرایط محیطی متغیر را دارد (Qian و همکاران، ۲۰۲۴). به عنوان مثال یک سیستم آبیاری هوشمند می تواند شامل ورودی های مختلف معادله بیلان آب در محدوده توسعه ریشه نظیر سنسورهای رطوبت خاک، دمای خاک و یا وردی های اقلیمی و گیاهی باشد. این سیستم تنها در صورتی مؤلفه ذخیره رطوبتی در معادله بیلان آب (آبیاری یا زهکشی) را فعال می کند که رطوبت خاک در حد مطلوب در منطقه توسعه ریشه نباشد. به عنوان مثال سیستم آبیاری هوشمند باید قادر باشد در صورت پیش بینی بارش در گام یا گام های زمانی آینده مقدار آب آبیاری در گام زمانی فعلی را با آن تطبیق دهد. همچنین سیستم آبیاری هوشمند باید قادر به شبیه سازی رفتار و نیازهای گیاهان مختلف باشد. همچنین، اتوماسیون و هوشمندسازی از نظر انعطاف پذیری و تصمیم گیری، کارایی و سطح فناوری هم با هم متفاوت هستند (Nsah و همکاران، ۲۰۲۴). لازم به ذکر است در سیستم های آبیاری، گرچه هوشمندسازی می تواند به طور مستقل به تحلیل و ارائه توصیه های بهینه بپردازد، اما دستیابی به حداکثر کارایی و اثربخشی نیازمند هم افزایی با اتوماسیون است. هوشمندسازی وظیفه تصمیم گیری بهینه را بر عهده دارد، در حالی که اتوماسیون اجرای خودکار این تصمیمات را در مزرعه تضمین می کند، که در نهایت به کاهش مداخله انسانی و بهینه سازی فرآیند آبیاری منجر می شود.

بررسی سطوح مختلف هوشمندسازی در آبیاری به معنای تحلیل و طبقه بندی فناوری ها و روش هایی است که به درجات مختلف برای بهینه سازی مصرف آب و بهبود بهره وری کشاورزی استفاده می شوند. در ادامه، به تشریح این سطوح پرداخته می شود تا تفاوت ها و قابلیت های هر یک به روشنی تبیین شود.

۴-۱- آبیاری نیمه هوشمند^۱

آبیاری نیمه هوشمند ترکیبی از سیستم های اتوماتیک و هوشمند است که از سنسورها، کنترلرهای هوشمند و داده های هواشناسی برای بهینه سازی آبیاری استفاده می کند. این سیستم ها می توانند از تصاویر ماهواره ای برای بررسی وضعیت رطوبت خاک اطلاعات جمع آوری کنند، اما معمولاً از داده های پیشین استفاده می کنند و نمی توانند به طور لحظه ای با تغییرات محیطی تنظیم شوند. تصمیم گیری های این سیستم ها معمولاً به صورت محلی انجام می شود و سطح هوشمندی آن ها نسبت به سیستم های کاملاً هوشمند پایین تر است (Peng و Ferrarezi، ۲۰۲۱).

۴-۲- آبیاری تمام هوشمند^۲

آبیاری هوشمند پیشرفته ترین نوع آبیاری است که از اینترنت اشیا (IoT)، هوش مصنوعی (AI) و الگوریتم های یادگیری ماشین (ML) برای بهینه سازی مصرف آب استفاده می کند. این سیستم قادر است داده های لحظه ای سنسورها، تصاویر ماهواره ای، پیش بینی های هواشناسی و شرایط محیطی را تجزیه و تحلیل کند و با استفاده از مدل های پیشرفته،

بهینه ترین برنامه آبیاری را ارائه دهد. همچنین این سیستم ها معمولاً از طریق اپلیکیشن های موبایل یا پل های کنترلی ابری مدیریت می شوند و به کشاورزان اجازه می دهند از هر جای دنیا بر فرآیند آبیاری نظارت داشته باشند. آبیاری هوشمند نه تنها باعث کاهش مصرف آب می شود، بلکه عملکرد محصول و کیفیت خاک را نیز بهبود می بخشد (Gamal و همکاران، ۲۰۲۳؛ Vallejo-Gomez و همکاران، ۲۰۲۳). سطوح مختلف هوشمندسازی نشان دهنده پیشرفت از کنترل دستی به سیستم های کاملاً خودکار و هوشمند است. هرچه سطح هوشمندسازی بالاتر باشد، دقت در مصرف منابع و بهره وری کشاورزی افزایش می یابد، اما هزینه ها و پیچیدگی های فنی نیز بیشتر خواهد بود. انتخاب سطح مناسب به نیازهای کشاورزان، نوع محصول و منابع مالی و فنی موجود بستگی دارد (Qian و همکاران، ۲۰۲۴).

پس از بررسی مفاهیم پایه ای اتوماسیون و هوشمندسازی در سطوح مختلف و تبیین کاربردهای آن در حوزه های مختلف، اکنون ضروری است که نگاهی جامع تر به وضعیت بازار جهانی هوشمندسازی، به ویژه در بخش آبیاری، صورت گیرد. درک صحیح از روندهای حاکم بر این بازار، نرخ رشد سالانه، محرک های کلیدی توسعه، فناوری های نوظهور، بازیگران اصلی بازار و همچنین چالش های پیش رو، به تصمیم گیران و فعالان این حوزه کمک می کند تا مسیر آینده را با دقت و آگاهی بیشتری ترسیم کنند. بازار جهانی آبیاری هوشمند طی سال های اخیر با رشد قابل توجهی همراه بوده و انتظار می رود در سال های آینده نیز این روند صعودی با شتاب بیشتری ادامه یابد. عواملی مانند تغییرات اقلیمی، کمبود منابع آبی، افزایش تقاضا برای غذا به واسطه رشد جمعیت، پیشرفت های فناورانه در زمینه اینترنت اشیا (IoT) و داده کاوی، و همچنین سیاست های حمایتی دولت ها، از جمله محرک های اصلی رشد این بازار به شمار می روند. برای آشنایی و درک عمیق تر از نقش و اهمیت اینترنت اشیا (IoT) در تحقق این سیستم های پیشرفته، در بخش بعدی به طور مفصل به این مفهوم پرداخته می شود.

۵- اینترنت اشیا (IoT)

مفهوم IoT به طور کلی به بسیاری از اشیاء و وسایل محیط اطراف ما که به شبکه اینترنت متصل شده و توسط نرم افزارهای موجود در تلفن های هوشمند و تبلت که قابل کنترل و مدیریت هستند، اشاره دارد. IoT به زبان ساده، ارتباط حسگرها و دستگاه ها با شبکه ای است که از طریق آن می توانند با یکدیگر و با کاربرانشان تعامل کنند (Choudhary و همکاران، ۲۰۲۵). بررسی سطوح مختلف هوشمندسازی در آبیاری به معنای تحلیل و طبقه بندی فناوری ها و روش هایی است که به درجات مختلف برای بهینه سازی مصرف آب و بهبود بهره وری کشاورزی استفاده می شوند. با درک عمیق تر از نقش فناوری های کلیدی نظیر اینترنت اشیا در تحقق سیستم های آبیاری هوشمند، اکنون ضروری است که نگاهی جامع تر به وضعیت و چشم انداز بازار جهانی

آبیاری هوشمند انداخته شود. در این راستا، تحلیل دقیق بازار، بررسی نرخ رشد مرکب سالانه (CAGR)، پیش‌بینی ارزش بازار در افق‌های مختلف زمانی و شناسایی فرصت‌های سرمایه‌گذاری و توسعه فناوری، اهمیت بالایی دارد. همچنین، آشنایی با شرکت‌های پیشرو، رویکردهای نوآورانه آن‌ها و پروژه‌های موفق جهانی می‌تواند دید روشن‌تری از آینده این صنعت ترسیم نماید. در بخش‌های بعدی، به این موارد به‌طور مفصل پرداخته می‌شود.

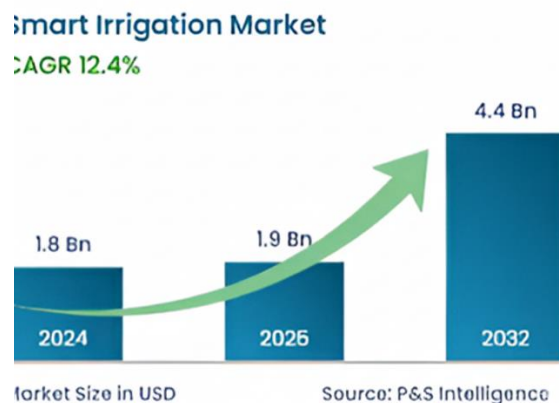
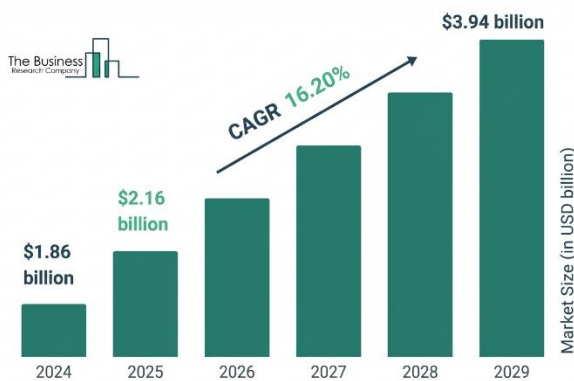
۶- تعریف بازار آبیاری هوشمند^{۱۰}

بازار آبیاری هوشمند به مجموعه‌ای از فناوری‌ها و سیستم‌ها گفته می‌شود که به منظور مدیریت بهینه منابع آبی در زمین‌های کشاورزی، فضای سبز، محوطه‌سازی‌های شهری و دیگر بخش‌ها به کار می‌روند. این سیستم‌ها با استفاده از داده‌های هواشناسی یا اطلاعات به‌دست‌آمده از حسگرهای رطوبت خاک، نیاز آبی محیط را به دقت محاسبه و فرایند آبیاری را به‌طور خودکار و بهینه تنظیم می‌کنند. هدف اصلی این فناوری‌ها کاهش اتلاف آب، حفظ سلامت و کیفیت گیاهان و افزایش بهره‌وری در مصرف منابع آبی است. آبیاری هوشمند معمولاً به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود: سیستم‌های مبتنی بر شرایط اقلیمی و سیستم‌های مبتنی بر حسگر. سیستم‌های اقلیم محور شامل کنترل‌کننده‌هایی هستند که با استفاده از داده‌های محلی هواشناسی، زمان و میزان آبیاری را به‌طور خودکار تنظیم می‌کنند تا آبیاری

متناسب با نیاز واقعی گیاه انجام گیرد. در کنار این، سیستم‌های مبتنی بر حسگر با اندازه‌گیری رطوبت خاک به‌طور دقیق میزان آبیاری را مدیریت می‌کنند. این فناوری‌ها از اجزای مختلفی مانند حسگرها، کنترل‌کننده‌ها، دبی‌سنج‌های آب، نرم‌افزارهای مدیریت آبیاری و سایر تجهیزات پشتیبانی تشکیل شده‌اند ([The Business Research Company](#), ۲۰۲۴).

۷- چشم‌انداز آینده بازار آبیاری هوشمند

بازار جهانی آبیاری هوشمند در سال‌های اخیر با رشد قابل توجهی مواجه شده و روند صعودی آن همچنان ادامه دارد. بر اساس برآوردها، ارزش این بازار در سال ۲۰۲۴ حدود ۱/۸۶ میلیارد دلار تخمین زده می‌شود ([The Business Research Company](#), ۲۰۲۴). انتظار می‌رود این رقم با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) بین ۱۲/۴ تا ۱۶/۲ درصد در بازه زمانی ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۲ افزایش یافته و تا پایان این دوره به حدود ۴/۴ میلیارد دلار برسد. همچنین، پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که ارزش این بازار تا سال ۲۰۲۹ به حدود ۳/۹۴ میلیارد دلار خواهد رسید (شکل ۱). رشد سریع بازار آبیاری هوشمند را می‌توان نتیجه ترکیبی از عوامل فناوریانه، محیط‌زیستی، اقتصادی و سیاست‌گذاری دانست که تقاضا برای راهکارهای نوآورانه و بهره‌ور در حوزه مدیریت منابع آب را در بخش‌های کشاورزی و غیرکشاورزی افزایش داده‌اند ([The Business Research Company](#), ۲۰۲۴؛ [SkyQuest Technology](#), ۲۰۲۴).



شکل ۱- نرخ رشد جهانی بازار آبیاری هوشمند ([SkyQuest Technology](#), ۲۰۲۴)

ارائه یارانه‌ها و مشوق‌ها، آگاهی‌رسانی به کشاورزان درباره مزایای استفاده از سامانه‌های هوشمند و افزایش بهره‌وری محصولات با کمترین اتلاف منابع، نقش به‌سزایی در رشد بازار ایفا کرده‌اند. بر این اساس، نرخ رشد بازار در بازه زمانی ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۱ نیز حدود ۱۴/۷۴ درصد برآورد شده است (شکل ۲). این روند رو به رشد نشان‌دهنده اهمیت راهبردی

از مهمترین عوامل مؤثر بر این رشد می‌توان به افزایش محبوبیت روش‌های کشاورزی دقیق^{۱۱}، ضرورت روزافزون صرفه‌جویی در مصرف آب، توسعه فناوری‌های حسگر و ارتباط بی‌سیم، گسترش استفاده از سامانه‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء (IoT) و ادغام داده‌های اقلیمی در تصمیم‌گیری‌های آبیاری اشاره کرد. افزون بر این، حمایت‌های دولتی از طریق

هوشمندسازی در آبیاری به عنوان راهکاری پایدار، کارآمد و سازگار با شرایط اقلیمی متغیر است که می‌تواند نقش مهمی

در آینده کشاورزی و امنیت غذایی ایفا کند (Verified Market Research, ۲۰۲۵).



شکل ۲- نرخ رشد بازار آبیاری هوشمند در بازه زمانی ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۱ (Verified Market Research, ۲۰۲۵)

۸- رشد شهرهای هوشمند و تأثیر آن بر توسعه بازار آبیاری هوشمند

رشد شهرهای هوشمند به طور قابل توجهی به رشد بازار آبیاری هوشمند در آینده کمک می‌کند. افزایش اهمیت راهکارهای آبیاری کارآمد برای استفاده‌های غیرکشاورزی عامل اصلی رشد این بازار به شمار می‌رود. با توجه به اینکه شهرهای هوشمند به یک روند روبه‌رشد در بخش‌های مختلف جهان تبدیل شده‌اند، این شهرها بر مدیریت بهینه منابع آبی برای فضاهای تجاری و مسکونی تأکید دارند. به عنوان مثال، در آوریل ۲۰۲۳، براساس گزارش شاخص شهر هوشمند که توسط مدرسه کسب و کار IMD، یک مدرسه کسب و کار مستقر در سوئیس، منتشر شد، تعداد شهرهای هوشمند با ۱۶/۳٪ افزایش از ۱۱۸ شهر در سال ۲۰۲۱ به ۱۴۱ شهر در سال ۲۰۲۳ رسید. بنابراین، افزایش تعداد شهرهای هوشمند به رشد بازار آبیاری هوشمند کمک می‌کند. این رشد، به ویژه در زمینه‌های مسکونی و تجاری، نیاز به راهکارهای پیشرفته برای مدیریت منابع آب و آبیاری بهینه را بیش از پیش نمایان می‌کند که در نتیجه، تقاضا برای سامانه‌های آبیاری هوشمند افزایش خواهد یافت (The Business Research Company, ۲۰۲۴).

۹- روندها و عوامل محرک رشد بازار آبیاری هوشمند

قابلیت‌های پیشرفته در سامانه‌های آبیاری هوشمند سامانه‌های آبیاری هوشمند به طور گسترده‌ای در اراضی کشاورزی، زمین‌های گلف، مجموعه‌های ورزشی و نواحی مسکونی استفاده می‌شوند. این سامانه‌ها با بهره‌گیری از فناوری اینترنت اشیا (IoT)، به صورت خودکار سطح رطوبت

ادغام فناوری‌هایی مانند یادگیری ماشین (ML)، هوش مصنوعی (AI) و سنجش از دور در این سامانه‌ها، به کشاورزان این امکان را می‌دهد که ناهنجاری‌های آبی، الگوهای مصرف و شرایط غیرعادی را به موقع شناسایی کرده و تصمیم‌گیری بهینه‌تری در مدیریت منابع آب داشته باشند. علاوه بر مزارع کشاورزی، کاربرد این سیستم‌ها به طور گسترده در فضای سبز شهری، زمین‌های ورزشی، باغات مسکونی و پروژه‌های شهر هوشمند نیز گسترش یافته است.

یکی دیگر از عوامل محرک این بازار، کاهش چشمگیر هزینه تجهیزات از جمله حسگرها، کنترلرها و سیستم‌های پایش هوشمند است که امکان استفاده گسترده‌تر را برای کاربران خرد و کلان فراهم کرده است. همچنین، افزایش پدیده‌های اقلیمی افراطی مانند خشکسالی‌های مکرر، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ضرورت استفاده از سامانه‌های آبیاری بسیار کارآمد و هوشمند را دوچندان کرده است (SkyQuest Technology, ۲۰۲۴).

در سطح منطقه‌ای، کشورهای آسیا-اقیانوسیه (APAC) مانند هند، چین، کره جنوبی و استرالیا با سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های ارتباطی، توسعه کشاورزی دقیق و اجرای طرح‌های دولتی حمایتی، به عنوان بازارهای کلیدی در حال ظهور شناخته می‌شوند. برای نمونه، کشور استرالیا با پیاده‌سازی سامانه پیشرفته Manna Irrigation Intelligence به عنوان نخستین راهکار بدون نیاز به نصب حسگر فیزیکی، توانسته با تکیه بر داده‌های ماهواره‌ای و الگوریتم‌های هوشمند، آبیاری را به شکل دقیق و اقتصادی مدیریت نماید. در مجموع، همگرایی پیشرفت‌های فناوریانه، سیاست‌های حمایتی، فشارهای محیط‌زیستی و تقاضای بازار، نویدبخش آینده‌ای پربازده برای بازار جهانی آبیاری هوشمند در سال‌های پیش‌رو است (Verified Market Research, ۲۰۲۵).

خاک را تشخیص داده و گیاهان را آبیاری می‌کنند. علاوه بر این، استفاده از فناوری‌های پیشرفته‌ای همچون هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین (ML) می‌تواند به تحلیل دقیق داده‌های محیطی مانند تبخیر و تعرق، پیش‌بینی وضعیت رطوبت خاک، و همچنین پیش‌بینی شرایط اقلیمی در آینده کمک کند. به کارگیری چنین فناوری‌هایی موجب بهینه‌سازی مصرف آب و جلوگیری از هدررفت منابع می‌شود. به عنوان مثال آزمایشگاه GEAR وابسته به مؤسسه فناوری ماساچوست (MIT)، در حال توسعه راهکارهایی است که به کشاورزان معیشتی این امکان را دهد تا به راحتی به فناوری‌های کشاورزی دقیق دسترسی پیدا کنند. سامانه آبیاری قطره‌ای مبتنی بر انرژی خورشیدی این مرکز می‌تواند مصرف آب و انرژی را کاهش دهد و در عین حال بهره‌وری محصول را افزایش دهد. علاوه بر این با ترکیب داده‌های هواشناسی و ورودی‌های هوش مصنوعی، زمان‌بندی دقیق آبیاری امکان‌پذیر می‌شود که منجر به کاهش ۴۴ درصدی مصرف آب می‌شود (SkyQuest Technology، ۲۰۲۴؛ PS Market Research، ۲۰۲۴).

راه دور و از طریق اینترنت به سامانه‌های آبیاری خود دسترسی داشته باشند و فرآیند آبیاری را به طور مؤثرتر و اثربخش‌تری انجام دهند. فناوری‌های فرکانس رادیویی (RF) و اتصال بی‌سیم پیشرفته امکان بهبود تعامل‌پذیری میان مرکز کنترل و تجهیزات را فراهم کرده‌اند که منجر به افزایش کارایی سامانه‌های آبیاری می‌شود. با استفاده از 5G، کشاورزان می‌توانند به راحتی از حسگرهای زیر سطحی خاک برای جمع‌آوری داده‌هایی مانند میزان رطوبت، شوری و الگوهای خاک استفاده کنند و این داده‌ها را به صورت آنی به سیستم‌های کنترل ارسال کنند. چنین پیشرفت‌هایی نه تنها فرآیند آبیاری را بهبود می‌بخشد بلکه به کشاورزان کمک می‌کند تا وضعیت سلامت محصولات زراعی خود را نیز به طور دقیق نظارت کنند. این امر فرصت‌های زیادی را برای توسعه و نوآوری در بازار آبیاری هوشمند فراهم می‌آورد (PS Market Research، ۲۰۲۴).

۱۱- تحلیل دینامیک‌های بازار آبیاری هوشمند

۱۱-۱- عوامل محرک

۱۱-۱-۱- کاهش هزینه سنسورها

کاهش مستمر هزینه سنسورها، به ویژه حسگرهای رطوبت خاک و جریان، موجب گسترش چشمگیر دسترسی به فناوری آبیاری هوشمند برای کشاورزان خرد و متوسط شده است. این روند، با فراهم آوردن راه‌حل‌های مقرون به صرفه، نه تنها به افزایش پذیرش این سیستم‌ها کمک می‌کند، بلکه زمینه را برای فراگیر شدن کشاورزی دقیق در اکوسیستم‌های کشاورزی متنوع فراهم می‌سازد (PS Market Research، ۲۰۲۴).

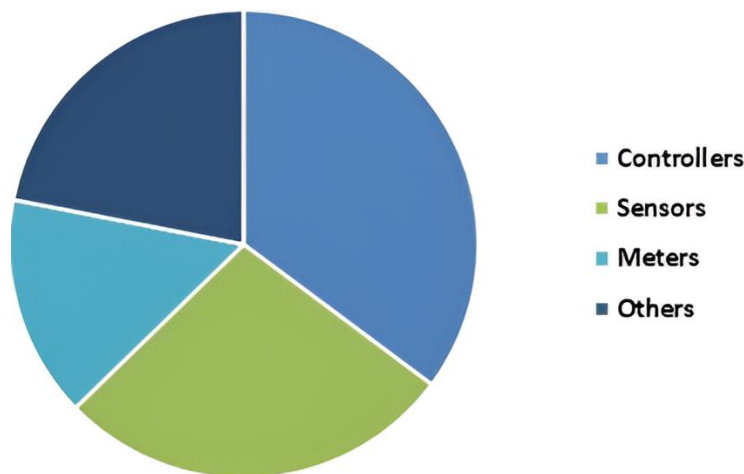
۱۱-۱-۲- هزینه بالای اجرای سیستم‌های آبیاری هوشمند

یکی از موانع اصلی در مسیر رشد بازار آبیاری هوشمند، هزینه بالای اجرای این سامانه‌ها است؛ چالشی که پذیرش این فناوری را، به ویژه برای کشاورزان خرد و مناطق کمتر توسعه یافته، محدود کرده و به عمیق‌تر شدن شکاف فناورانه میان کشاورزی سنتی و مدرن می‌انجامد. در حال حاضر، مزایای بی‌شمار فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT) که در سامانه‌های آبیاری هوشمند به کار گرفته می‌شوند، اغلب محدود به کشورهای پیشرفته هستند و بیشتر در تولید محصولات استراتژیکی چون ذرت، گندم و برنج استفاده می‌شود. این موضوع نیز به نوبه خود، مانعی بر سر راه گسترش فراگیر این فناوری در سطح جهانی به ویژه در مزارع کوچک مقیاس محسوب می‌شود (KBV Research، ۲۰۲۱). شکل (۳) سهم هریک از اجزای تشکیل دهنده آبیاری هوشمند را نشان می‌دهد.

۱۰- ابتکارات دولت‌ها در حمایت از کشاورزی پایدار به عنوان محرک رشد بازار

دولت‌ها در سراسر جهان با اجرای سیاست‌های مختلف در جهت ترویج کشاورزی پایدار و حفاظت از منابع آبی، نقشی اساسی در رشد بازار آبیاری هوشمند ایفا کرده‌اند. در بسیاری از مناطق با تنش آبی مانند آفریقا، خاورمیانه و آسیا، مشوق‌های مالی، یارانه‌ها و تسهیلات بلاعوض برای نصب فناوری‌های بهینه مصرف آب، تأثیرات مثبتی بر توسعه این بازار داشته‌اند.

در کشور هند، برنامه‌هایی مانند "Pradhan Mantri Krishi Sinchayee Yojana" (PMKSY) با اختصاص مبلغ ۹۳,۰۶۸,۵۶ کروڑ روپیه، به منظور بهبود دسترسی کشاورزان به منابع آبی و ارتقای کارایی آبیاری طراحی شده است. این طرح‌ها در کنار برنامه‌های دیگر مانند "Har Khet Ko Pani" و "Per Drop More Crop" با هدف ارتقای کارایی آبیاری و ترویج بهره‌برداری پایدار از منابع آبی، نقش مؤثری در تسریع پذیرش فناوری‌های آبیاری هوشمند داشته است. این ابتکارات، در ترکیب با همکاری‌های دولت‌ها، بخش خصوصی و مراکز پژوهشی، باعث دسترسی بیشتر کشاورزان، به ویژه کشاورزان خرد و کم‌برخوردار به فناوری‌های آبیاری هوشمند شده است. پیشرفت‌های فناوری 5G در صنعت کشاورزی نیز فرصت‌های بسیاری را برای فعالان بازار آبیاری هوشمند ایجاد کرده است. این فناوری به کشاورزان این امکان را می‌دهد تا به راحتی از



شکل ۳- سهم هریک از اجزای آبیاری هوشمند (KBV Research, ۲۰۲۱)

۱۱-۲- موانع موجود در بازار آبیاری هوشمند

۱- مشکلات بالای اتصال در مناطق روستایی

یکی از چالش‌های مهم در پذیرش گسترده سیستم‌های آبیاری هوشمند، مشکلات مربوط به اتصال اینترنتی در مناطق روستایی است. بسیاری از مناطق کشاورزی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، با مشکلات جدی در دسترسی به اینترنت و شبکه‌های ارتباطی پایدار مواجه هستند. این مسئله به‌ویژه در مناطقی که به‌طور گسترده‌ای از سیستم‌های آبیاری هوشمند استفاده می‌شود، می‌تواند مانع از بهره‌برداری مؤثر از این سیستم‌ها شود (PS Market Research, ۲۰۲۴).

۲- کمبود آموزش و دانش فنی

علاوه بر مشکلات اتصال اینترنتی، عدم آموزش و آگاهی کافی از نحوه استفاده و نگهداری صحیح از سیستم‌های آبیاری هوشمند نیز می‌تواند موجب کاهش بهره‌وری و عملکرد نامناسب این سیستم‌ها شود. بنابراین، آموزش‌های فنی و برنامه‌های اطلاع‌رسانی باید به‌طور ویژه برای کاربران هدف در نظر گرفته شود (PS Market Research, ۲۰۲۴).

۱۱-۳- تحلیل بازار جهانی آبیاری هوشمند

در تحلیل بخش‌بندی بازار جهانی آبیاری هوشمند، این بازار بر اساس اجزاء، نوع سیستم، کاربرد و منطقه جغرافیایی طبقه‌بندی می‌شود. در ادامه، به بررسی دقیق هر یک از این بخش‌ها پرداخته شده است:

۱۱-۴- تحلیل براساس نوع سیستم

بازار آبیاری هوشمند بر اساس نوع سیستم به دو دسته اصلی سیستم‌های مبتنی بر آب‌وهوا^{۱۲} و سیستم‌های مبتنی بر حسگر^{۱۳} تقسیم می‌شود (شکل ۴):

- سیستم‌های مبتنی بر آب‌وهوا یا همان کنترلرهای ET^{۱۴}: این سیستم‌ها در حال حاضر بخش غالب بازار را تشکیل می‌دهند و با استفاده از اطلاعات اقلیمی مانند دما، باد، تابش خورشید و رطوبت، زمان و میزان آبیاری را تنظیم می‌کنند. این داده‌ها از ایستگاه‌های محلی یا سرویس‌های آنلاین دریافت

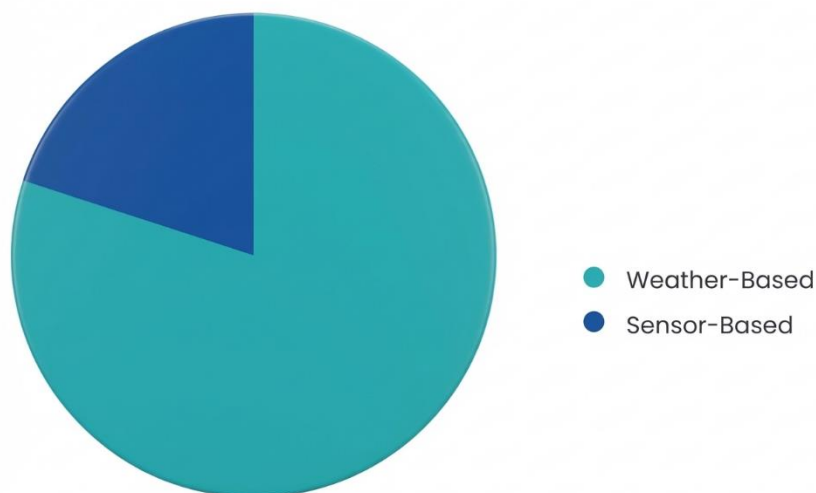
شده و همراه با پارامترهای اختصاصی محل در زمان‌بندی آبیاری به کار می‌روند.

- سیستم‌های مبتنی بر حسگر: این سیستم‌ها سریع‌ترین رشد را دارند و با بهره‌گیری از حسگرهای رطوبت خاک در ناحیه ریشه، میزان واقعی رطوبت را اندازه‌گیری کرده و بر اساس آن تصمیم به آبیاری می‌گیرند. این روش دقت بالایی دارد و مستقیماً نیاز آبی گیاه را هدف قرار می‌دهد.

در سال ۲۰۲۴، سامانه‌های کنترل مبتنی بر شرایط جوی با درآمدی معادل ۱/۴ میلیارد دلار آمریکا، بالاترین سهم بازار را به خود اختصاص داده‌اند (PS Market Research, ۲۰۲۴).

این سامانه‌ها به‌طور گسترده در عملیات کشاورزی در مقیاس بزرگ، طراحی فضای سبز مسکونی، زمین‌های ورزشی و گلف، پارک‌های عمومی، گلخانه‌ها و طرح‌های برنامه‌ریزی شهری استفاده می‌شوند. ویژگی بارز این سامانه‌ها، توانایی در تنظیم خودکار آبیاری بر اساس شرایط جوی است که به‌طور چشمگیری در افزایش بهره‌وری منابع آب مؤثر می‌باشد. این فناوری در مناطقی با بارندگی نامنظم و شرایط آب‌وهوایی ناپایدار، به‌عنوان راهکاری مطلوب برای مدیریت بهینه منابع آبی شناخته می‌شود (PS Market Research, ۲۰۲۴).

در مقابل، پیش‌بینی می‌شود بازار سامانه‌های کنترل مبتنی بر حسگر رشد سریع‌تری را در دوره پیش‌بینی شده تجربه کند. این سامانه‌ها به‌طور روزافزون با هدف صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش عملکرد محصولات زراعی در بخش کشاورزی استفاده می‌شوند. عملکرد این سیستم‌ها مبتنی بر تحلیل و کنترل دقیق داده‌هایی است که از طریق حسگرهای مختلفی مانند حسگرهای دما، رطوبت خاک، باران و رطوبت نسبی جمع‌آوری می‌شود. توانمندی در پردازش این داده‌ها موجب می‌شود سامانه‌های حسگرمحور، تصمیم‌گیری هوشمندانه‌تری در خصوص زمان و میزان آبیاری ارائه دهند (PS Market Research, ۲۰۲۴). این روندهای فناورانه، در کنار افزایش نیاز جهانی به بهره‌وری منابع و پایداری محیطی، موجب شده‌اند هر دو نوع سامانه جایگاه ویژه‌ای در بازار آینده آبیاری هوشمند داشته باشند (شکل ۴).



شکل ۴- سهم هریک از سیستم‌ها در بازار آبیاری هوشمند (PS Market Research, ۲۰۲۴)

۵-۱۱- تحلیل اجزا^{۱۵}

در تحلیل اجزای بازار جهانی آبیاری هوشمند، بخش‌های مختلفی بررسی شدند که هر یک نقش حیاتی در عملکرد و بهره‌وری این سیستم‌ها ایفا می‌کنند. این اجزا شامل کنترلرها^{۱۶} و حسگرها^{۱۷}، دبی‌سنج‌های آب^{۱۸} و سایر اجزای مکمل هستند که در ادامه به صورت پیوسته و با توضیحات تخصصی ارائه می‌شود.

در حال حاضر، بخش کنترلرها بزرگترین سهم را از بازار آبیاری هوشمند به خود اختصاص داده است. این کنترلرها به عنوان مغز متفکر سیستم آبیاری هوشمند عمل کرده و برنامه‌ریزی و زمان‌بندی آبیاری را به صورت خودکار انجام می‌دهند. کنترلرهای هوشمند قادر هستند اطلاعات مربوط به شرایط اقلیمی، رطوبت خاک، تبخیر و تعرق گیاه و الگوهای مصرف آب را دریافت کرده و بر اساس آن، برنامه آبیاری را بهینه‌سازی کنند. برخلاف سیستم‌های سنتی که بر پایه زمان‌بندی ثابت عمل می‌کنند، کنترلرهای هوشمند می‌توانند سیستم آبیاری را در زمان بارندگی به صورت خودکار متوقف نمایند و بدون نیاز به تنظیمات فصلی، زمان‌بندی را متناسب با نیاز واقعی گیاه تنظیم کنند. این ویژگی، بهره‌وری مصرف آب را به طور چشمگیری افزایش داده است و هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهد (SkyQuest Technology, ۲۰۲۴). از جمله کنترلرهای هوشمند شناخته شده در بازار می‌توان به محصولات شرکت‌هایی مانند Rain Bird Corporation و Hunter Industries Inc. اشاره کرد که با قابلیت‌های پیشرفته خود در مدیریت خودکار و بهینه آبیاری، نقش مهمی در کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری ایفا می‌کنند.

در کنار کنترلرها، بخش حسگرها سریع‌ترین نرخ رشد را در میان اجزای بازار دارد. این رشد بیشتر به دلیل تقاضای فزاینده برای آبیاری دقیق و داده محور در کشاورزی مدرن و کاربردهای شهری است. حسگرها در این بازار شامل حسگر رطوبت خاک^{۱۹}، حسگر جریان و فشار آب و حسگرهای اقلیمی^{۲۰} هستند. این حسگرها اطلاعات حیاتی مانند میزان

رطوبت خاک، دمای محیط، شدت تابش خورشید، میزان بارش و وضعیت جریان آب را جمع‌آوری می‌کنند و آن را در اختیار کنترلر قرار می‌دهند تا فرآیند تصمیم‌گیری به صورت دقیق و هوشمندانه انجام شود. سیستم‌های مبتنی بر حسگر می‌توانند آبیاری را تنها در زمانی آغاز کنند که میزان رطوبت خاک به زیر سطح تعریف شده برسد و به این ترتیب از آبیاری غیرضروری جلوگیری شود (SkyQuest Technology, ۲۰۲۴). با این حال لازم به ذکر است دقت و صحت اندازه‌گیری حسگرهای رطوبت خاک می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند نوع خاک (به ویژه در خاک‌های سنگین و سبک به دلیل تفاوت در ظرفیت نگهداری آب و خواص الکتریکی)، شوری خاک، دما، و نیاز به کالیبراسیون صحیح قرار گیرد. بنابراین، برای اطمینان از عملکرد بهینه و کاهش خطا در تصمیم‌گیری آبیاری، انتخاب حسگر مناسب بر اساس ویژگی‌های خاک و کالیبراسیون دوره‌ای آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد (Sharma و همکاران, ۲۰۲۱). از دیگر اجزای مهم آن‌ها، دبی‌سنج‌های آب هستند که در سال‌های اخیر به دلیل افزایش کاربرد در مدیریت دقیق مصرف آب و بهبود بهره‌وری آبیاری، استفاده گسترده‌ای یافته‌اند. این ابزارها وظیفه دارند جریان واقعی آب عبوری از سیستم را اندازه‌گیری کرده و اطلاعات مربوط به نرخ جریان، حجم مصرفی و ناهنجاری‌های احتمالی مانند نشت یا انسداد به کنترلر را ارسال کنند. دبی‌سنج‌ها در شناسایی مشکلات عملکردی سیستم نقش کلیدی داشته و به بهینه‌سازی مصرف آب و کاهش تلفات کمک می‌کنند. به عنوان مثال در صورت بروز افزایش ناگهانی جریان آب، دبی‌سنج می‌تواند به صورت فوری هشدار داده و سیستم را به صورت خودکار متوقف نماید.

در نهایت، بخش سایر اجزاء شامل تجهیزات مکملی مانند شیرهای برقی، واحدهای ارتباطی، ماژول‌های کنترل از راه دور، واحدهای تغذیه و نرم‌افزارهای مدیریتی به یکپارچگی، کنترل‌پذیری و بهره‌وری بیشتر سیستم آبیاری هوشمند کمک می‌کنند. در مجموع، اجزای مختلف سیستم‌های آبیاری

هوشمند با همکاری و تعامل یکپارچه، امکان مدیریت دقیق، خودکار و مبتنی بر داده مصرف آب را فراهم کرده‌اند. این ترکیب فناورانه موجب افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها، صرفه‌جویی در منابع و ارتقاء عملکرد کشاورزی و فضای سبز در سطوح مختلف شده است. از این‌رو، شناخت دقیق این اجزاء برای طراحی، توسعه و پیاده‌سازی سامانه‌های پیشرفته آبیاری، ضروری و حیاتی است (PS Market Research, ۲۰۲۴).

در سال ۲۰۲۴، دسته کنترلر بالاترین سهم درآمدی را در بازار آبیاری هوشمند به خود اختصاص داده است. کنترلرهای آبیاری هوشمند به دلیل کارایی بالا در مدیریت عملیات آبیاری و قابلیت اتصال آسان به راهکارهای ابری، با استقبال قابل توجهی مواجه شده‌اند. عواملی همچون رشد سریع جمعیت جهانی، کمبود منابع غذایی و آبی، افزایش آگاهی کشاورزان نسبت به مزایای آبیاری هوشمند، حمایت‌های دولتی، هزینه پایین آبیاری و بهره‌وری بالا، از جمله عوامل مؤثر در افزایش تقاضا برای کنترلرهای هوشمند محسوب می‌شوند. در سوی دیگر، دسته حسگرها با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) معادل ۱۳ درصد، سریع‌ترین رشد را در میان اجزای مختلف این بازار تجربه می‌کند. حسگرها تمامی جنبه‌های مرتبط با آبیاری را به‌صورت لحظه‌ای پایش کرده و اطلاعات به‌روزی درباره رطوبت خاک، دما، رطوبت نسبی، وضعیت محیطی و سلامت گیاهان ارائه می‌دهند. افزایش نیاز به دقت در کشاورزی (کشاورزی دقیق) موجب رشد تقاضا برای به‌کارگیری این حسگرها شده است. همچنین، ادغام این حسگرها با خدمات مبتنی بر فضای ابری، انتقال بی‌وقفه و سریع داده‌ها را ممکن ساخته و محبوبیت آن‌ها را در کاربردهایی مانند زمین‌های گلف، مجتمع‌های ورزشی و طراحی فضای سبز افزایش داده است (PS Market Research, ۲۰۲۴). با اینحال عملکرد بهینه این حسگرها و انتقال مؤثر داده‌ها به خدمات ابری، به وجود زیرساخت‌های ارتباطی پایدار و پوشش اینترنتی کافی بستگی دارد. این مسئله به‌ویژه در بسیاری از مناطق روستایی با پوشش اینترنت ضعیف‌تر، می‌تواند چالشی جدی برای پیاده‌سازی و بهره‌برداری کامل از سیستم‌های آبیاری هوشمند مبتنی بر ابر ایجاد کند و بر گسترش آن‌ها تأثیر بگذارد. بنابراین، در کنار کنترلرها که ستون فقرات سامانه‌های آبیاری هوشمند به‌شمار می‌روند، حسگرها نقش کلیدی در ارائه داده‌های دقیق و ارتقای تصمیم‌گیری در زمینه مدیریت منابع آبی ایفا می‌کنند.

۱۱-۶- تحلیل کاربردها

در بخش غیرکشاورزی، بازار آبیاری هوشمند در سال ۲۰۲۴ با سهم ۷۵ درصد، بزرگترین سهم بازار را به خود اختصاص داده است و پیش‌بینی می‌شود این موقعیت را در سال‌های آینده حفظ کند. افزایش اهمیت روش‌های آبیاری مؤثر و سیستم‌های آبیاری در کاربردهای غیرکشاورزی مانند مسکونی، چمن‌کاری و منظرسازی، و زمین‌های ورزشی، عامل

اصلی رشد بازار است. توسعه شهرهای هوشمند به عنوان یک روند روبه‌رشد در بسیاری از مناطق جهان، موجب افزایش استفاده از سیستم‌های مدیریت آب در محیط‌های تجاری و مسکونی شده است. به دلیل رشد سریع شهرنشینی، مناطق پوشش سبز برای ساخت زیرساخت‌های بتنی کاهش یافته است، لذا حفظ تعادل سبز و استفاده از آبیاری هوشمند بسیار اهمیت دارد. بخش کشاورزی سریع‌ترین رشد را در بازار آبیاری هوشمند دارد زیرا کشاورزی تقریباً ۷۰ درصد از آب‌های شیرین را مصرف می‌کند، بنابراین نیاز به استفاده از راهکارهای پایدار، به‌ویژه آبیاری هوشمند، ضروری است. مدیریت مؤثر آب برای بهبود نتایج کشاورزی، صرفه‌جویی در مصرف آب و کاهش قابل توجه هزینه‌های عملیاتی اهمیت فراوانی دارد. راهکارهای پیشرفته آبیاری، شامل کنترل‌کننده‌های مبتنی بر آب و حسگرها، در عملیات کشاورزی بزرگ مقیاس و مزارع کوچک در حال استفاده هستند. افزایش آگاهی کشاورزان در مورد استفاده فناوری‌های پیشرفته مدیریت بارش، اقلیم، رطوبت خاک، دما و آبیاری کود می‌تواند به اتوماسیون بسیاری از عملیات منجر شود. کاربردهای ارزیابی شده در اینجا شامل کشاورزی (بخش سریع‌الرشد) با اراضی باز و کارخانه گیاه، و غیرکشاورزی (بخش بزرگتر) با مسکونی، زمین گلف و ورزشگاه، و چمن و منظرسازی هستند (PS Market Research, ۲۰۲۴).

۱۱-۷- تحلیل منطقه‌ای بازار آبیاری هوشمند

بازار آبیاری هوشمند در سال ۲۰۲۴ به‌ویژه در آمریکای شمالی (شکل ۳) با سهم بازار ۴۰ درصد، بیشترین میزان را به خود اختصاص داد، شاهد رشد چشمگیری بود. این موفقیت به عوامل متعددی از جمله افزایش درآمد قابل تصرف، رشد شهرنشینی، افزایش پذیرش روش‌های آبیاری مبتنی بر زمین در کشورهای ایالات متحده و کانادا نسبت داده می‌شود. همچنین، گسترش استفاده از گوشی‌های هوشمند و سایر دستگاه‌های متصل برای دسترسی از راه دور به داده‌های میدانی و افزایش سرمایه‌گذاری در صنعت فناوری کشاورزی، نقش به‌سزایی در تقویت بازار این منطقه ایفا می‌کند. دولت‌های مختلف در این منطقه نیز با اتخاذ سیاست‌های حمایتی و ارائه یارانه‌ها، از جمله تخفیف‌های مالی برای نصب سیستم‌های آبیاری هوشمند، به تشویق کشاورزان و مالکان زمین‌های سبز برای استفاده از این فناوری‌ها پرداخته‌اند. به‌طور خاص، دولت کالیفرنیا با ارائه یارانه‌هایی برای کنترلرهای هوشمند به کشاورزان کمک کرده است تا مصرف آب خود را بهینه کنند. این اقدامات حمایتی، در کنار مزایای اثبات شده آبیاری هوشمند، به‌طور قابل توجهی به افزایش آگاهی و پذیرش این فناوری‌ها در میان کشاورزان و مالکان اراضی سبز منطقه کمک کرده و در نتیجه، به رشد بازار آبیاری هوشمند در آمریکای شمالی شتاب بخشیده است. علاوه‌براین با توجه به ظهور فناوری‌های جدید کشاورزی، دولت‌ها اقدامات آموزشی و آگاهی بخشی را در خصوص نحوه

استفاده صحیح از سیستم‌های آبیاری هوشمند آغاز کرده است. به‌عنوان نمونه، در آمریکای شمالی، اپراتورهای زمین‌های گلف از این فناوری‌ها برای کاهش مصرف آب استفاده می‌کنند، که نشان‌دهنده گسترش کاربرد این سیستم‌ها در بخش‌های غیرکشاورزی است. در نتیجه، انتظار می‌رود که بازار آبیاری هوشمند در این منطقه همچنان از رهبری خود در سطح جهانی محافظت کند (PS Market Research، ۲۰۲۴؛ SkyQuest Technology، ۲۰۲۴).

از سوی دیگر، پیش‌بینی می‌شود آسیا-اقیانوسیه (APAC) سریع‌ترین رشد را در بازار آبیاری هوشمند تجربه کند (شکل ۵)، با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) معادل ۱۳ درصد. این منطقه به دلیل تراکم جمعیتی بالا و مشکلات مکرر کمبود آب ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آبی، اهمیت ویژه‌ای دارد. در این زمینه، کشاورزی به‌ویژه در هند به‌عنوان منبع اصلی معیشت شناخته می‌شود، بنابراین استفاده از فناوری‌های آبیاری هوشمند و کارآمد برای بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی ضروری است. همچنین، در چین، که کشاورزی به‌ویژه کشت برنج نقش حیاتی در اقتصاد دارد، تقاضا برای سیستم‌های آبیاری هوشمند به سرعت در حال افزایش است. در کشت برنج، که معمولاً به غرقابی نیاز دارد، سیستم‌های آبیاری هوشمند نقش مهمی در کنترل دقیق سطح آب و کاهش مصرف بیش از حد ایفا می‌کنند. به‌عنوان مثال سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI) در مناطقی که امکان کشت برنج به روش غیرغرقابی فراهم است، همچنین فناوری‌های مدیریت دقیق آب در کرت‌های برنج با استفاده از حسگرهای سطح آب و شیرهای کنترل هوشمند، از جمله رویکردهای رایج برای بهینه‌سازی مصرف آب در این محصول است. این نیازها ناشی از شرایط خاص اقلیمی و افزایش جمعیت است که به دنبال دستیابی به بهره‌وری بیشتر از منابع آبی می‌باشد (Kumar و همکاران، ۲۰۲۴). این نیازها ناشی از شرایط خاص اقلیمی و افزایش

جمعیت است که به دنبال دستیابی به بهره‌وری بیشتر از منابع آبی می‌باشد (SkyQuest Technology، ۲۰۲۴).

طبق گزارش سازمان غذا و کشاورزی (FAO)، چین در حال حرکت به سمت اتخاذ فناوری‌های کشاورزی سبز و استراتژی‌های کشاورزی هوشمند اقلیمی است. این کشور همچنین به‌طور فعال به توسعه مکانیزاسیون پیشرفته کشاورزی پرداخته تا ضمن افزایش بهره‌وری، از سلامت خاک نیز محافظت کند. در چارچوب این تلاش‌ها، دولت چین طبق طرح ملی توسعه کشاورزی پایدار، قصد دارد سهم اراضی آبیاری شده که از روش‌های آبیاری بهینه و صرفه‌جو در مصرف آب استفاده می‌کنند را به تقریباً ۷۵ درصد از کل اراضی آبیاری‌شده افزایش دهد و کارایی مصرف آب در این بخش را تا سال ۲۰۳۰ به حداقل ۶۰٪ ارتقا دهد (PS Market Research، ۲۰۲۴).

در نهایت، به‌طور کلی می‌توان گفت بازار آبیاری هوشمند به‌ویژه در دو منطقه آمریکای شمالی و آسیا-اقیانوسیه در حال تجربه رشد و تحول است. از یک‌سو، کشورهای پیشرفته مانند ایالات متحده و کانادا با بهره‌برداری از فناوری‌های آبیاری هوشمند، در مسیر مدیریت پایدار منابع آب گام برمی‌دارند و از سوی دیگر، کشورهای در حال توسعه در آسیا، به‌ویژه چین و هند، با توجه به چالش‌های منابع آبی و نیازهای کشاورزی، از این فناوری‌ها به‌منظور بهبود بهره‌وری و مقابله با بحران کم‌آبی استفاده می‌کنند. این روندها حاکی از آن است که آبیاری هوشمند نه تنها یک نیاز ضروری در کشاورزی است، بلکه به ابزاری حیاتی برای تضمین امنیت آبی در سطح جهانی تبدیل شده است.

تقسیم‌بندی جغرافیایی بازار آبیاری هوشمند نشان‌دهنده سهم و نرخ رشد متفاوت مناطق و کشورها در این بازار روبه‌رشد است. در این میان، آمریکای شمالی به‌عنوان بزرگترین بازار منطقه‌ای شناخته می‌شود که در آن ایالات متحده بزرگترین بازار کشوری و کانادا دارای بالاترین نرخ رشد در میان بازارهای کشوری محسوب می‌شوند.

تحلیل منطقه‌ای بازار بنادر هوشمند



Source: P&S Intelligence

شکل ۵- نرخ رشد بازار آبیاری هوشمند در کشورهای مختلف جهان (PS Market Research، ۲۰۲۴)

نشان‌دهنده چشم‌اندازهای متنوع بازار بر اساس عوامل اقتصادی، اقلیمی و فناورانه در هر منطقه است.

۱۲- سهم بازار آبیاری هوشمند^{۲۳}

بازار آبیاری هوشمند در حال رشد سریع است و این رشد ناشی از افزایش تقاضا برای فناوری‌های بهینه‌سازی مصرف آب در بخش‌های کشاورزی و غیرکشاورزی است. این بازار به دلیل تنوع بالای کاربردها و فناوری‌های مختلف، به‌طور طبیعی در بخش‌های مختلف پراکنده و به صورت چند لایه ساختاردهی شده است. کاربردهای متنوعی که از آبیاری هوشمند در زمین‌های کشاورزی، فضای سبز، زمین‌های گلف، مجموعه‌های ورزشی و حتی نواحی مسکونی استفاده می‌شود، باعث شده است این بازار بسیار گسترده و متنوع باشد. همچنین فناوری‌هایی مانند کنترل‌کننده‌های مبتنی بر آب‌وهوا، حسگرهای هوشمند و سیستم‌های مجهز به هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین (ML) باعث پیچیدگی و تنوع بیشتر محصولات این صنعت شده است. به همین دلیل، فرصت‌های زیادی برای شرکت‌ها فراهم است تا با ارائه محصولات خاص و شخصی‌سازی شده وارد بازار شوند (SkyQuest Technology, ۲۰۲۴).

در کنار این تنوع کاربرد و فناوری، عوامل جغرافیایی و روندهای فناورانه نیز به‌طور فزاینده‌ای ساختار بازار را شکل می‌دهند. تفاوت در منابع آبی، شرایط اقلیمی، و نوع خاک در مناطق مختلف باعث شده شرکت‌های بومی به این بازار وارد شوند و محصولات خود را بر اساس نیازهای خاص محلی توسعه دهند. علاوه بر این پیشرفت‌های فناورانه و معرفی مداوم محصولات نوآورانه توسط شرکت‌ها باعث شده بازار آبیاری هوشمند روز به روز پیچیده‌تر و رقابتی‌تر شود. شرکت‌های زیادی در تلاش هستند با استفاده از فناوری‌های نوین، مزیت‌های رقابتی خود را حفظ کنند و به تقاضای روزافزون بازار پاسخ دهند. به‌طور کلی این شرایط بستری را برای رشد سریع بازار و ورود شرکت‌های جدید فراهم کرده است (SkyQuest Technology, ۲۰۲۴).

۱۳- بازیکنان اصلی بازار آبیاری هوشمند

در سطح جهانی، برخی از برترین تولیدکنندگان سیستم‌های آبیاری هوشمند بر اساس معیارهایی مانند سهم بازار، حجم فروش (گردش مالی)، نوآوری در محصولات و راه‌حل‌ها، و گستردگی نفوذ جهانی در صنعت آبیاری هوشمند، به عنوان بازیگران کلیدی شناسایی شده‌اند به شرح زیر هستند:

(SkyQuest Technology, ۲۰۲۴)

- The Toro Company (United States)
- Rain Bird Corporation (United States)
- Netafim (Israel)

این امر به دلیل پیشرفت‌های فناورانه، سرمایه‌گذاری‌های کلان در کشاورزی هوشمند و زیرساخت‌های پیشرفته در این کشورها است. در اروپا، کشور آلمان به عنوان بزرگترین بازار کشاورزی و اسپانیا به عنوان کشوری با بالاترین نرخ رشد در این حوزه شناخته می‌شوند. فرانسه نیز به همراه سایر کشورهای ناحیه غرب اروپا نقش مؤثری در توسعه بازار دارد. رشد بازار در اروپا بیشتر تحت تأثیر سیاست‌های محیط‌زیستی، حمایت از کشاورزی پایدار و نوآوری‌های تکنولوژیکی در حوزه مدیریت منابع آبی است (PS Market Research, ۲۰۲۴). منطقه آسیا و اقیانوسیه (APAC) نیز به عنوان بازاری با بالاترین نرخ رشد منطقه‌ای مطرح است. در این منطقه، چین بزرگترین بازار کشاورزی به شمار می‌رود، در حالی که هند با سرعت بالایی در حال رشد است. کشورهایی مانند کره جنوبی و ژاپن نیز نقش مهمی در پذیرش فناوری‌های نوین آبیاری دارند. در این منطقه، افزایش جمعیت، کمبود منابع آبی، و نیاز به بهره‌وری بالاتر در کشاورزی از عوامل اصلی تقاضای بالای سیستم‌های آبیاری هوشمند هستند. در منطقه آمریکای لاتین (LATAM)، برزیل بزرگترین بازار کشاورزی است و مکزیک به عنوان کشوری با بالاترین نرخ رشد در حال گسترش استفاده از فناوری‌های آبیاری هوشمند می‌باشد (شکل ۳). این رشد بیشتر ناشی از فشار بر منابع طبیعی، نیاز به بهره‌وری بهتر در کشاورزی و افزایش سرمایه‌گذاری‌ها در تکنولوژی‌های نوین است. در نهایت، منطقه خاورمیانه و آفریقا (MEA) نیز با توجه به شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، بازاری روبه‌رشد برای سیستم‌های آبیاری هوشمند به شمار می‌رود (شکل ۳). در این منطقه، عربستان سعودی بزرگترین بازار کشاورزی است و امارات متحده عربی کشوری با بالاترین نرخ رشد در حوزه توسعه این فناوری محسوب می‌شود. آفریقای جنوبی نیز همراه با سایر کشورهای این منطقه در حال توسعه زیرساخت‌های آبیاری هوشمند برای مقابله با بحران‌های آبی و افزایش بهره‌وری در کشاورزی است. در مجموع، هر منطقه بر اساس شرایط اقتصادی، اقلیمی، و میزان توسعه فناوری، سهم و نقش متفاوتی در بازار جهانی آبیاری هوشمند دارد (PS Market Research, ۲۰۲۴).

برای تبیین روشن‌تر این تفاوت‌ها، می‌توان به آمار و ارقام موجود به شرح زیر اشاره کرد. در تحلیل سهم و پویایی بازار جهانی آبیاری هوشمند، تفاوت‌های چشمگیری میان مناطق مختلف مشاهده می‌شود. در سال ۲۰۲۴، آمریکای شمالی با سهم بازار ۴۰ درصد، بزرگترین بازار منطقه‌ای محسوب می‌شود. در حالی که منطقه آسیا-اقیانوسیه (APAC) با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) معادل ۱۳ درصد، سریع‌ترین رشد را در بازار آبیاری هوشمند تجربه می‌کند. در خصوص آمریکای لاتین (LATAM) و خاورمیانه و آفریقا (MEA)، اگرچه ارقام دقیق سهم بازار یا CAGR در متن به طور مجزا ذکر نشده است، اما این مناطق نیز به دلیل چالش‌های آبی و نیاز به بهره‌وری، بازارهای روبه‌رشدی به شمار می‌روند. این تفاوت‌ها

این حوزه، پیشنهاد می‌شود سرمایه‌گذاری‌های دولتی بر کاهش هزینه تولید سنسورها و ارتقای دانش فنی کشاورزان متمرکز شود. تقویت همکاری‌های بین‌المللی و توسعه زیرساخت‌های ارتباطی نسل جدید مانند 5G می‌تواند سرعت نفوذ این فناوری را در کشورهای درحال توسعه دوچندان کند. در نهایت، آینده آبیاری هوشمند در گرو هم‌افزایی میان دقت داده محور و سهولت عملیاتی است تا توازن میان تولید محصول و حفظ منابع طبیعی برقرار شود.

منابع

- Bondarenko, V., & Petrenko, O. (2025). TRADITIONAL AND MODERN AGRICULTURE. *American Journal of Innovation in Science Research and Development*, 2(1), 5-8.
- Choudhary, V., Guha, P., Pau, G., & Mishra, S. (2025). An overview of smart agriculture using internet of things (IoT) and web services. *Environmental and Sustainability Indicators*, 100607. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100607>
- Dhamal, P., & Mehrotra, S. (2021). Automation Soil Irrigation System Based on Soil Moisture Detection Using Internet of Things. In *Machine Intelligence and Smart Systems: Proceedings of MISS 2020* (pp. 665-673). Springer Nature, Singapore. Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4893-6_55.
- Ferrarezi, R. S., & Peng, T. W. (2021). Smart system for automated irrigation using internet of things devices. *HortTechnology*, 31(6), 642-649. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04860-21>
- Gamal, Y., Soltan, A., Said, L. A., Madian, A. H., & Radwan, A. G. (2023). Smart irrigation systems: Overview. *IEEE Access*, 13, 66109 - 66121. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3251655>
- KBV Research. (2021). Global Smart Irrigation Market by Type (Climate based and Sensor based), by Component (Controllers, Sensors, Meters, and Others), by End Use (Agricultural, Golf Course, Residential, and Others), by Regional Outlook, Industry Analysis Report and Forecast, 2021-2027. Website: <https://www.kbvresearch.com/smart-irrigation-market/>. Accessed: December 18, 2025.
- Kumar, M., Sahni, R. K., Waghaye, A. M., Kumar, M., & Randhe, R. D. (2024). Electronic Sensor-Based Automated Irrigation System for Rice Cultivated Under Alternate Wetting and Drying Technique. *AgriEngineering*, 6(4), 4720-4738. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6040270>
- Luu, T. M. N., Yadav, M., Srivastava, A. P., & Gopal, K. (2025). Innovation and Technology to Address the Challenges of Climate Change. In *Effects of Climate*

- Hunter Industries Inc. (United States)
- HydroPoint Data Systems (United States)
- Manna Irrigation Ltd. (Israel)
- Stevens Water Monitoring Systems Inc. (United States)
- Galcon (Israel)
- Rachio Inc. (United States)
- Weathermatic (United States)
- Irrigreen (United States)
- Banyan Water Inc. (United States)
- Delta-T Devices Ltd. (United Kingdom)
- CALSENSE (United States)
- AquaSpy (United States)
- Soil Scout Oy (Finland)
- Acclima Inc. (United States)
- RainMachine - Green Electronics LLC (United States)
- WiseConn Engineering (United States)
- Orbit Irrigation Products (United States)

این شرکت‌ها به طور مداوم در حال سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه نوآوری در حوزه فناوری‌های آبیاری هوشمند هستند. این امر باعث می‌شود آن‌ها بتوانند محصولات پیشرفته‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تری را به بازار عرضه کنند و سهم خود را در این بازار رقابتی افزایش دهند (SkyQuest Technology, ۲۰۲۴).

۱۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

پژوهش حاضر نشان داد بازار آبیاری هوشمند به عنوان یکی از محورهای اصلی تحول در کشاورزی مدرن، نه تنها راهکاری برای مقابله با بحران کم‌آبی، بلکه ابزاری استراتژیک برای ارتقای امنیت غذایی در سطح جهانی است. یافته‌ها حاکی از آن است که گذار از سیستم‌های اتوماسیون سنتی به سامانه‌های هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا (IoT) و هوش مصنوعی، می‌تواند منجر به صرفه‌جویی ۲۰ تا ۵۰ درصدی در مصرف منابع آب و افزایش بهره‌وری تا ۴۴ درصد شود. تحلیل‌های آماری انجام شده در این پژوهش نشان داد ارزش این بازار با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) ۱۶/۲ درصد تا سال ۲۰۲۹ به ۳/۹۴ میلیارد دلار خواهد رسید که این امر بیانگر اعتماد جهانی به کارایی این فناوری است. نقش کلیدی فناوری‌های نوپهور مانند یادگیری ماشین (ML) در تحلیل دقیق نیاز آبی گیاه بر اساس داده‌های لحظه‌ای خاک و هواشناسی، تمایز اصلی این سامانه‌ها با روش‌های اتوماتیک زمان‌بندی شده است. با این حال پذیرش همه جانبه این فناوری با چالش‌های جدی از جمله هزینه‌های اولیه بالا برای کشاورزان خرد و زیرساخت‌های ضعیف ارتباطی در مناطق روستایی روبه‌رو است که نیازمند توجه ویژه سیاست‌گذاران است. همچنین، گسترش مفهوم شهرهای هوشمند و استفاده از این سامانه‌ها در فضاهای سبز شهری، افق‌های تجاری جدیدی را فراتر از بخش کشاورزی گشوده است. برای دستیابی به رشد پایدار در

- sensitivity, and site-And sensor-specific calibration functions. Transactions of the ASABE, 64(4), 1123-1139. <https://doi.org/10.13031/trans.14112>
- SkyQuest Technology. (2024). Smart irrigation market size & share. Industry growth. Website: <https://www.skyquestt.com/report/smart-irrigation-market>. Accessed: December 18, 2025.
- The Business Research Company. (2024). Smart irrigation global market report 2025. Website: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/smart-irrigation-global-market>. Accessed: April 18, 2025.
- Vallejo-Gomez, D., Osorio, M., & Hincapie, C. A. (2023). Smart irrigation systems in agriculture: A systematic review. Agronomy, 13(2), 342. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020342>
- Vera, J., Conejero, W., Mira-Garcia, A. B., Conesa, M. R., & Ruiz-Sánchez, M. C. (2021). Towards irrigation automation based on dielectric soil sensors. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 96(6), 696-707. <https://doi.org/10.1080/14620316.2021.1906761>
- Verified Market Research. (2025). Smart Irrigation Market Size By Component (Controllers, Sensors, Water Flow Meters), Application (Agricultural, Non-Agricultural), System (Weather-based Controller, Sensor-based Controller), & Region for 2024-2031. Website: <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/global-smart-irrigation-market-size-and-forecast/>. Accessed: December 18, 2025.
- Weyrich, M. (2024). What Is Automation Technology? Basic Terms and Concepts of Automation Technology. In: Industrial Automation and Information Technology. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-69243-1_2
- Zhang, H., & Li, M. (2025). Towards an intelligent and automatic irrigation system based on internet of things with authentication feature in VANET. Journal of Information Security and Applications, 88, 103927. <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2024.103927>
- Change on Social and Economic Factors (pp. 423-464). IGI Global. Website: <https://www.igi-global.com>. Accessed: December 18, 2025.
- Munusamy, S., Al-Humairi, S. N. S., & Abdullah, M. I. (2021, April). Automatic irrigation system: design and implementation. 2021 IEEE 11th IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE), 256-260. IEEE. Location: Kuala Lumpur, Malaysia.
- Nsoh, B., Katimbo, A., Guo, H., Heeren, D. M., Nakabuye, H. N., Qiao, X., & Kiraga, S. (2024). Internet of Things-Based Automated Solutions Utilizing Machine Learning for Smart and Real-Time Irrigation Management: A Review. Sensors (Basel, Switzerland), 24(23), 7480. <https://doi.org/10.3390/s24237480>
- Obaideen, K., Yousef, B. A., AlMallahi, M. N., Tan, Y. C., Mahmoud, M., Jaber, H., & Ramadan, M. (2022). An overview of smart irrigation systems using IoT. Energy Nexus, 7, 100124. <https://doi.org/10.3390/s20041042>
- PS Market Research. (2024). Smart irrigation market analysis, size, share, and trends. Website: <https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/smart-irrigation-market>. Accessed: December 18, 2025.
- Qian, M., Qian, C., Xu, G., Tian, P., & Yu, W. (2024). Smart Irrigation Systems from Cyber-Physical Perspective: State of Art and Future Directions. Future Internet, 16(7), 234.
- Rajakumar, D., Ramah, K., Rathika, S., & Thiagarajan, G. (2008). Automation in micro-irrigation. Science Tech Entrepreneur, 1-8.
- Rathika, S., Ramesh, T., Priyadharshini, V., Prasanth, A. S., & Shanmugapriya, P. (2020). Automation in Irrigation-A Review. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 9(12), 2974-2990. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.912.352>
- Saxena, S. (2021). An overview on automatic irrigation system. Asian Journal of Research in Business Economics and Management, 11(10), 153-159. <https://doi.org/10.5958/2249-7307.2021.00043.8>
- Selvakumar, P., Usha, M. S., Dhokpande, S. R., Raghunathreddy, B., & Das, A. (2025). Water Conservation: AI Applications in Sustainable Water Use. In Cases on AI-Driven Solutions to Environmental Challenges (pp. 269-296). IGI Global Scientific Publishing. 1st edition. Hershey, PA, USA. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-7483-2.ch010>
- Sharma, K., Irmak, S., Kukal, M. S., Vuran, M. C., Jhala, A. J., & Qiao, X. (2021). Evaluation of soil moisture sensing technologies in silt loam and loamy sand soils: Assessment of performance, temperature

پی‌نوشت‌ها

1. Internet of Things
2. Neural Networks
3. Automation
4. Semi-automatic
5. Fully automatic
6. Automatic Irrigation
7. Smartization
8. Semi-Smart Irrigation

- 16. Controllers
- 17. Sensors
- 18. Water Flow Meters
- 19. Soil Moisture Sensor
- 20. Climate Sensors
- 21. Subsurface Drip Irrigation
- 22. Smart Irrigation Market Share

- 9. Fully Smart Irrigation
- 10. Smart Irrigation Market
- 11. Precision Farming
- 12. Weather-based
- 13. Sensor-based
- 14. Evapotranspiration
- 15. Component Analysis