

Low-cost smart irrigation system based on soil moisture sensing

Fathalla. I. Solman ^{1*}, Amier A Frag ², Massoud A. Omar Imaezeg ³, Omran.A.H Mohamed ⁴

^{1,3} Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering
Technologies, Al-Qubbah, Libya

² Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering Technologies, Al-Qubbah,
Libya

⁴ Higher Institute of Science and Technology Al-Beyda, Libya

*Corresponding author: Fathall.i.adam1986@gmail.com

نظام ري ذكي منخفض التكلفة قائم على استشعار رطوبة التربة

فتح الله إبراهيم سليمان^{1*}, أمير علي فرج², مسعود عبد الرحيم عمر امعزيق³, عمران امبارك حماد محمد⁴

^{1,3} قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية، كلية التقنيات الهندسية، القبة، ليبيا

² قسم هندسة الحاسوب، كلية التقنيات الهندسية، القبة، ليبيا

⁴ المعهد العالي للعلوم والتقنية / البيضاء، ليبيا

Received: 27-08-2026; Accepted: 30-09-2026; Published: 06-10-2026

Abstract:

This study presents a comprehensive scientific framework for the design and implementation of a low-cost embedded irrigation control system based on soil moisture sensing, proposed as a practical and analytically grounded solution to address water resource limitations and enhance operational efficiency. The proposed system relies on a soil moisture sensor to measure water content and convert it into digital data, which is processed within a microcontroller—specifically the Arduino Uno—within an embedded systems environment. A threshold-based control algorithm, supported by a hysteresis band, is implemented to minimize oscillations in switching decisions. Based on this approach, control signals are generated to operate a 12V DC water pump via a relay module, ensuring a stable real-time response while reducing both energy consumption and computational resource usage. The study is grounded in the quantitative modeling of soil moisture data, including the transformation of sensor readings into percentage values through experimental calibration equations. A calibration table is also developed to establish a relationship between digital sensor outputs and the physical states of the soil. A series of experiments were conducted under varying operating conditions to evaluate system performance in terms of accuracy, response time, stability, and water use efficiency. The results demonstrate a significant improvement compared to conventional time-based irrigation methods, with reduced switching frequency achieved through the implementation of well-defined decision thresholds. The system is characterized by its structural simplicity, scalability, and low cost, offering a practical scientific solution that integrates modeling and control within an embedded systems framework. Furthermore, this work paves the way for future developments, including the integration of communication technologies and the Internet of Things (IoT), as well as the adoption of advanced control algorithms to enhance system accuracy and operational efficiency.

Keywords: Embedded Systems, Arduino Uno, Soil Moisture Sensing, Control Algorithms, Quantitative Modeling.

الملخص

تقدم هذه الدراسة إطاراً علمياً متكاملاً لتصميم وتنفيذ نظام مضمن منخفض التكلفة للتحكم في الري اعتماداً على استشعار رطوبة التربة، بوصفه حلاً علمياً قائماً على أسس تحليلية لمعالجة محدودية الموارد المائية وتحسين كفاءة التشغيل. يعتمد النظام المقترح على حساس رطوبة لقياس المحتوى المائي وتحويله إلى بيانات رقمية تُعالج داخل متحكم دقيق من نوع *Arduino Uno* ضمن بيئة أنظمة مدمجة، حيث تُطبق خوارزمية تحكم قائمة على العتبة (*Threshold-Based Control*) مدعومة بنطاق هистерة (*Hysteresis*) للحد من التذبذب في قرارات التشغيل. ويتم من خلال ذلك إصدار أوامر تشغيل وإيقاف لمضخة تيار مستمر بجهد 12 فولت عبر وحدة ريلاي، بما يضمن استجابة آنية مستقرة مع تقليل استهلاك الطاقة والموارد الحاسوبية. يركز العمل على نمذجة كمية لبيانات رطوبة التربة، تتضمن تحويل قراءات الحساس إلى نسب مئوية عبر معادلات معايرة تجريبية، مع إنشاء جدول معايرة يربط القيم الرقمية بالحالات الفيزيائية للتربة. وقد أجريت سلسلة من الاختبارات تحت ظروف تشغيل مختلفة لتقييم الأداء من حيث الدقة، وزمن الاستجابة، واستقرار النظام، وكفاءة استخدام المياه. أظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً مقارنة بأساليب التحكم التقليدية المعتمدة على الجداول الزمنية، مع تقليل عمليات التشغيل المتكرر بفضل اعتماد نطاقات قرار مدروسة. يتميز النظام ببساطة البنية وقابلية التوسع، ويوفر حلاً علمياً منخفض التكلفة يجمع بين النمذجة والتحكم العملي في إطار الأنظمة المضمنة. كما يمهد هذا العمل لتطويرات مستقبلية تشمل دمج تقنيات الاتصال وإنترنت الأشياء، وتبني خوارزميات تحكم متقدمة لرفع مستوى الدقة والكفاءة التشغيلية.

الكلمات المفتاحية: النظم المضمنة، *Arduino Uno*، استشعار رطوبة التربة، خوارزميات التحكم، النمذجة الكمية.

1- المقدمة

تُعد الموارد المائية من أهم التحديات التي تواجه القطاع الزراعي في الوقت الحاضر، خاصة في المناطق ذات المناخ الجاف وشبه الجاف، حيث يزداد الطلب على المياه بالتوازي مع التوسع الزراعي والنمو السكاني. وتعتمد طرق الري التقليدية في كثير من الحالات على التقدير البشري أو الجداول الزمنية الثابتة، مما يؤدي إلى الإفراط في استخدام المياه أو نقصها، وهو ما ينعكس سلباً على إنتاجية المحاصيل وكفاءة استهلاك الموارد. من هنا برزت الحاجة إلى تطوير أنظمة ري ذكية [1] قادرة على التكيف مع احتياجات التربة الفعلية للنباتات، بما يضمن الاستخدام الأمثل للمياه وتحقيق استدامة زراعية. في هذا السياق، شهدت السنوات الأخيرة اهتماماً متزايداً بتطوير أنظمة ري تعتمد على استشعار رطوبة التربة، حيث يتم استخدام حساسات لقياس المحتوى المائي وإرسال البيانات إلى وحدات تحكم تقوم باتخاذ قرارات التشغيل والإيقاف بشكل آلي [2].

وقد أثبتت هذه الأنظمة قدرتها على تحسين كفاءة الري وتقليل الهدر مقارنة بالطرق التقليدية. إلا أن العديد من الدراسات السابقة ركزت على حلول معقدة أو مرتفعة التكلفة، أو اعتمدت على بنى تحتية متقدمة مثل إنترنت الأشياء والاتصالات اللاسلكية، مما يحد من إمكانية تطبيقها في البيئات محدودة الموارد أو لدى المزارعين ذوي الإمكانيات البسيطة.

وعلى الرغم من توفر نماذج منخفضة التكلفة، إلا أنها غالباً ما تفتقر إلى التحسين في آلية اتخاذ القرار، أو لا تقدم تقييماً تجريبياً كافياً لأدائها في ظروف تشغيل مختلفة [3]، مما يترك فجوة واضحة بين بساطة التصميم وفعالية الأداء الفعلي. تتمثل الفجوة البحثية في الحاجة إلى نظام ري ذكي يجمع بين انخفاض التكلفة، وسهولة التنفيذ، وتحسين كفاءة التشغيل من خلال آلية تحكم محسنة وقابلة للتطبيق عملياً.

بناءً على ذلك، يهدف هذا البحث إلى تصميم وتطوير نظام ري ذكي منخفض التكلفة قائم على استشعار رطوبة التربة، مع التركيز على تحسين آلية التحكم باستخدام منطق يعتمد على عتبات مدروسة [4]، وتقييم أداء النظام تجريبياً من حيث كفاءة استهلاك المياه، سرعة الاستجابة، واستقرار التشغيل. ويسعى هذا العمل إلى تقديم حل عملي قابل للتطبيق يسد الفجوة بين البساطة التقنية والكفاءة التشغيلية، بما يخدم احتياجات الزراعة الحديثة في البيئات محدودة الموارد.

2- المشكلة البحثية

تعاني أنظمة الري التقليدية من ضعف الكفاءة بسبب الاعتماد على التقدير اليدوي أو الجداول الزمنية الثابتة، مما يؤدي إلى هدر المياه أو نقصها. ورغم توفر أنظمة ري ذكية، إلا أن معظمها يتسم بارتفاع التكلفة أو التعقيد، مما يحد من استخدامها في البيئات محدودة الموارد. لذلك تتمثل المشكلة البحثية في الحاجة إلى نظام ري ذكي منخفض التكلفة يجمع بين البساطة والكفاءة، مع تحسين آلية التحكم لضمان الاستخدام الأمثل للمياه.

3- أهداف البحث

- 1- تصميم نظام ري ذكي منخفض التكلفة يعتمد على استشعار رطوبة التربة .
- 2- تطوير دائرة تحكم بسيطة وفعالة باستخدام حساس رطوبة وريلاي ومضخة 12 فولت .
- 3- تحسين كفاءة استخدام المياه وتقليل الهدر مقارنة بالري التقليدي .
- 4- تحديد عتبة مناسبة للرطوبة (Threshold) لضمان تلبية احتياجات النبات بدقة .
- 5- تقييم أداء النظام عملياً تحت ظروف تشغيل مختلفة .
- 6- تحليل استجابة النظام من حيث السرعة والاستقرار والموثوقية .
- 7- تقييم حل قابل للتطبيق في البيئات الزراعية محدودة الموارد .
- 8- وضع أساس لتطويرات مستقبلية مثل دمج تقنيات IoT أو التحكم الذكي.

4- الأهمية النظرية للتطبيقات الذكية في نظم الري

يمثل تبني أنظمة الري الذكية تحولاً نوعياً في إدارة الموارد المائية والطاقة، خاصة في ظل التحديات المتزايدة المرتبطة بندرة المياه وارتفاع تكاليف التشغيل. إذ تسهم هذه الأنظمة، القائمة على تقنيات التحكم المحوسب، في تحسين كفاءة استخدام المياه وتقليل الفاقد بصورة ملحوظة، فضلاً عن تعزيز كفاءة الأداء التشغيلي وزيادة الإنتاجية الزراعية. كما يبرز دور الأدوات الذكية مثل المتحكمات الدقيقة، في تمكين عمليات ري دقيقة ومبرمجة وفق احتياجات النبات الفعلية، الأمر الذي يحد من التشغيل غير الضروري للمضخات ويؤدي إلى خفض استهلاك الطاقة. علاوة على ذلك تتيح تقنيات التحكم الذكية إمكانية تحسين إدارة عمليات الري بشكل عام، بما يسهم في تقليل الهدر المائي ورفع كفاءة الاستهلاك، خصوصاً عند اعتماد أنظمة تحكم إلكترونية متقدمة. وفي سياق الممارسات الزراعية الحديثة، تشير الأدبيات إلى أن تطبيق أنظمة الري الذكي يمكن أن يحقق وفورات كبيرة في استهلاك المياه مقارنة بالأساليب التقليدية، إلى جانب تقليل الجهد البشري وتعزيز الاستدامة البيئية والإنتاجية. انطلاقاً من ذلك تأتي هذه الدراسة لسد فجوة معرفية من خلال تقديم نموذج تطبيقي يعتمد على منصة Arduino Uno ويتميز بكونه نظاماً منخفض التكلفة، يهدف إلى تحسين كفاءة نظم الري وتقليل استهلاك الطاقة، والحد من الهدر، مع توفير قابلية للتطبيق والتوسع في البيئات الزراعية

5- الأسس البرمجية وخوارزميات التحكم في أنظمة الري الذكية المعتمدة على استشعار رطوبة التربة

يعتمد الأداء الفعال لأنظمة الري الذكية على التكامل بين مكونات العتاد (Hardware) والبرمجيات المدمجة (Embedded Software)، حيث تُشكل الخوارزميات البرمجية حجر الأساس في عملية تحليل بيانات الاستشعار واتخاذ قرارات التحكم المناسبة. وفي هذا الإطار، تلعب أنظمة الاستشعار المعتمدة على قياس رطوبة التربة دوراً محورياً في توفير بيانات آنية تعكس الحالة الفعلية للتربة، والتي يتم تحويلها عبر وحدات التحويل التماثلي-الرقمي (ADC) إلى إشارات رقمية قابلة للمعالجة داخل المتحكمات الدقيقة [5]. تعتمد معظم الأنظمة منخفضة التكلفة على خوارزميات تحكم بسيطة قائمة على منطق العتبة (Threshold-Based Control)، حيث يتم تحديد قيمة مرجعية للرطوبة تُستخدم كمعيار لتفعيل أو إيقاف نظام الري. وعلى الرغم من بساطة هذا الأسلوب وسهولة تطبيقه [6]، إلا أن دقته تتأثر بعوامل متعددة مثل نوع التربة، ودرجة الحرارة، ومستوى ملوحة المياه، مما قد يؤدي إلى قرارات غير مثالية في بعض الحالات. لذلك، برزت الحاجة إلى تطوير خوارزميات أكثر تطوراً، مثل التحكم التكيفي (Adaptive Control) أو المنطق

الضبابي (Fuzzy Logic) ، والتي تتيح مرونة أكبر في التعامل مع التغيرات الديناميكية في البيئة الزراعية.

من ناحية أخرى، تُعد عملية معايرة الحساسات (Sensor Calibration) عنصراً حاسماً في تحسين دقة النظام، حيث يتم ربط القيم الرقمية المقروءة بمستويات رطوبة فعلية من خلال نماذج رياضية [7] أو تجريبية. كما يمكن تعزيز موثوقية النظام عبر استخدام تقنيات الترشيح الرقمي (Digital Filtering) لتقليل الضوضاء وتحسين استقرار القراءات. تلعب بيئة البرمجة المستخدمة في المتحكمات الدقيقة، مثل بيئة Arduino أو غيرها من منصات الأنظمة المدمجة، دوراً مهماً في تنفيذ هذه الخوارزميات بكفاءة، مع مراعاة محدودية الموارد الحاسوبية واستهلاك الطاقة [8]. ويتم عادةً تنظيم البرنامج وفق بنية تعتمد على القراءة الدورية للبيانات (Polling) أو باستخدام المقاطعات (Interrupts) لضمان استجابة سريعة للأحداث.

إضافة إلى ذلك، يمكن توسيع القدرات البرمجية للنظام من خلال دمج وحدات اتصال تسمح بالمراقبة والتحكم عن بُعد، مما يفتح المجال لتطبيقات إنترنت الأشياء (IoT) في الزراعة الذكية. كما يمكن استخدام تقنيات تحليل البيانات لتخزين القراءات التاريخية واستخلاص أنماط تساعد في تحسين استراتيجيات الري مستقبلاً.

بناءً على ما سبق، فإن تطوير الأسس البرمجية وخوارزميات التحكم لا يقتصر على تنفيذ وظيفة التشغيل والإيقاف فحسب، بل يمتد ليشمل تحسين دقة القياس، ومرونة اتخاذ القرار، وكفاءة استهلاك الموارد، وهو ما يُعد عاملاً حاسماً في تحقيق أنظمة ري ذكية فعالة وقابلة للتطبيق في البيئات منخفضة التكلفة.



الشكل (1) يبين الأسس البرمجية وخوارزميات النظام.

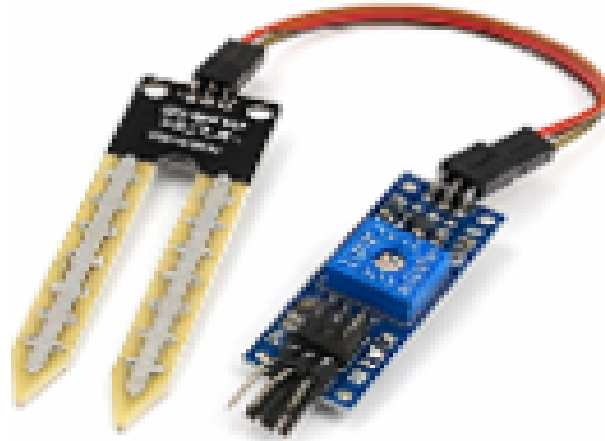
6- المكونات المادية للنظام

يمثل الجانب المادي (Hardware) الركيزة الأساسية لبناء نظام الري الذكي، حيث يتم من خلاله تنفيذ عملية الاستشعار والتحكم والتشغيل الفعلي. ويعتمد أداء النظام بشكل مباشر على دقة وكفاءة هذه المكونات ومدى تكاملها مع البرمجيات المدمجة، مما يضمن تحقيق استجابة موثوقة وفعالة.

1-6 مكونات النظام

1-حساس رطوبة التربة (Soil Moisture Sensor)

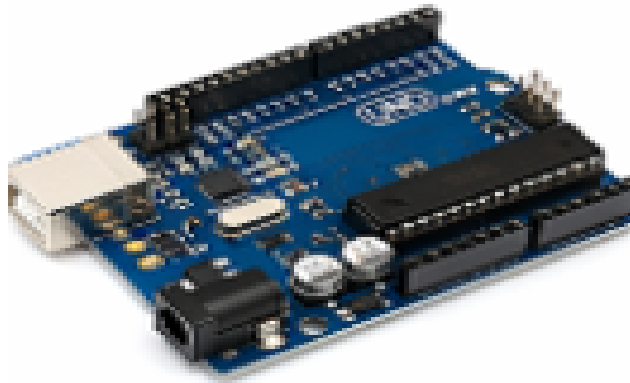
يُستخدم لقياس المحتوى المائي في التربة بشكل مستمر، حيث يحول التغير في الرطوبة إلى إشارة كهربائية (تمثيلية أو رقمية) يتم إرسالها إلى وحدة التحكم. وتُعد دقته عاملاً حاسماً في كفاءة النظام كما هو موضح بالشكل (2).



الشكل (2) يبين حساس الرطوبة المستخدم في النظام

2-المتحكم الدقيق Arduino Uno

يمثل وحدة المعالجة الرئيسية في النظام، حيث يستقبل بيانات الحساس ويقوم بتحليلها وتنفيذ خوارزمية التحكم لاتخاذ قرار تشغيل أو إيقاف المضخة. يتميز بسهولة البرمجة وانخفاض التكلفة كما هو موضح بالشكل (3).



الشكل (3) يبين المتحكم Arduino Uno المستخدم في النظام.

3-وحدة الريلاي (Relay Module)

تعمل كوسيط كهربائي بين المتحكم والمضخة، حيث تسمح بتشغيل أو إيقاف الأحمال ذات الجهد العالي (12 فولت) باستخدام إشارة تحكم منخفضة من المتحكم كما هو موضح بالشكل (4)



الشكل (4) يبين وحدة الريلاي المستخدم في النظام

4- مضخة مياه 12 فولت DC

تُستخدم لضخ المياه إلى التربة عند الحاجة، ويتم التحكم في تشغيلها وإيقافها عبر وحدة الريلاي وفقاً لقرارات المتحكم كما هو موضح بالشكل (5)



الشكل (5) يبين مضخة مياه 12V المستخدمة في النظام

5- مصدر الطاقة (Power Supply)

يوفر الطاقة اللازمة لتشغيل مكونات النظام، حيث يتم تزويد المضخة بجهد 12 فولت، بينما يتم تغذية المتحكم وباقي الدوائر بجهد مناسب (5 فولت عادةً) كما هو موضح بالشكل (6)

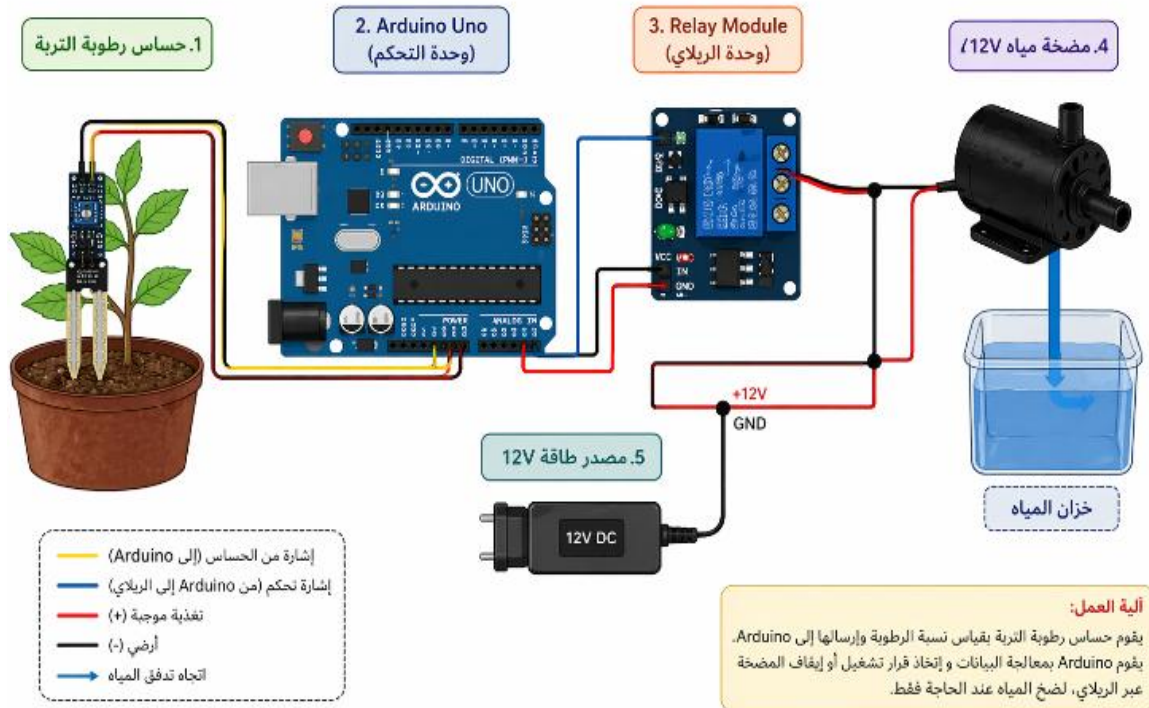


الشكل (6) يبين مصدر جهد 12V

7- المخطط العام للنظام

يوضح المخطط العام الموضح بالشكل (7) البنية التكاملية لنظام الري الذكي القائم على استشعار رطوبة التربة، حيث يعتمد النظام على ترابط منظم بين وحدات الاستشعار، المعالجة، والتنفيذ. تبدأ العملية بقياس حساس رطوبة التربة بقياس المحتوى المائي بشكل مستمر، وتحويله إلى إشارة كهربائية يتم إرسالها إلى وحدة التحكم الدقيقة من نوع Arduino Uno. تقوم وحدة التحكم بمعالجة هذه البيانات وفق خوارزمية تحكم محددة مسبقاً تعتمد على مقارنة قيمة الرطوبة مع حدود العتبة المعرفة داخل النظام. بناءً على نتيجة المقارنة، يقوم المتحكم بإصدار إشارة تحكم إلى وحدة الريلاي التي تعمل كوسيط كهربائي يسمح بالتحكم في تشغيل أو إيقاف مضخة المياه ذات الجهد 12 فولت. في حالة انخفاض الرطوبة عن الحد الأدنى، يتم تشغيل المضخة لضخ المياه إلى التربة، بينما يتم إيقافها عند الوصول إلى مستوى الرطوبة المطلوب. يتم تزويد جميع مكونات النظام بالطاقة من خلال مصدر تغذية مناسب يضمن استقرار التشغيل واستمرارية الأداء.

كما يُظهر المخطط مسار تدفق الإشارات الكهربائية بين المكونات، بالإضافة إلى مسار تدفق المياه من المضخة إلى التربة، مما يوضح بشكل شامل آلية عمل النظام وتكامل أجزائه. ويتميز هذا التصميم بالبساطة والوضوح، مما يسهل عملية التنفيذ والتطوير، ويجعله مناسباً للتطبيقات منخفضة التكلفة.

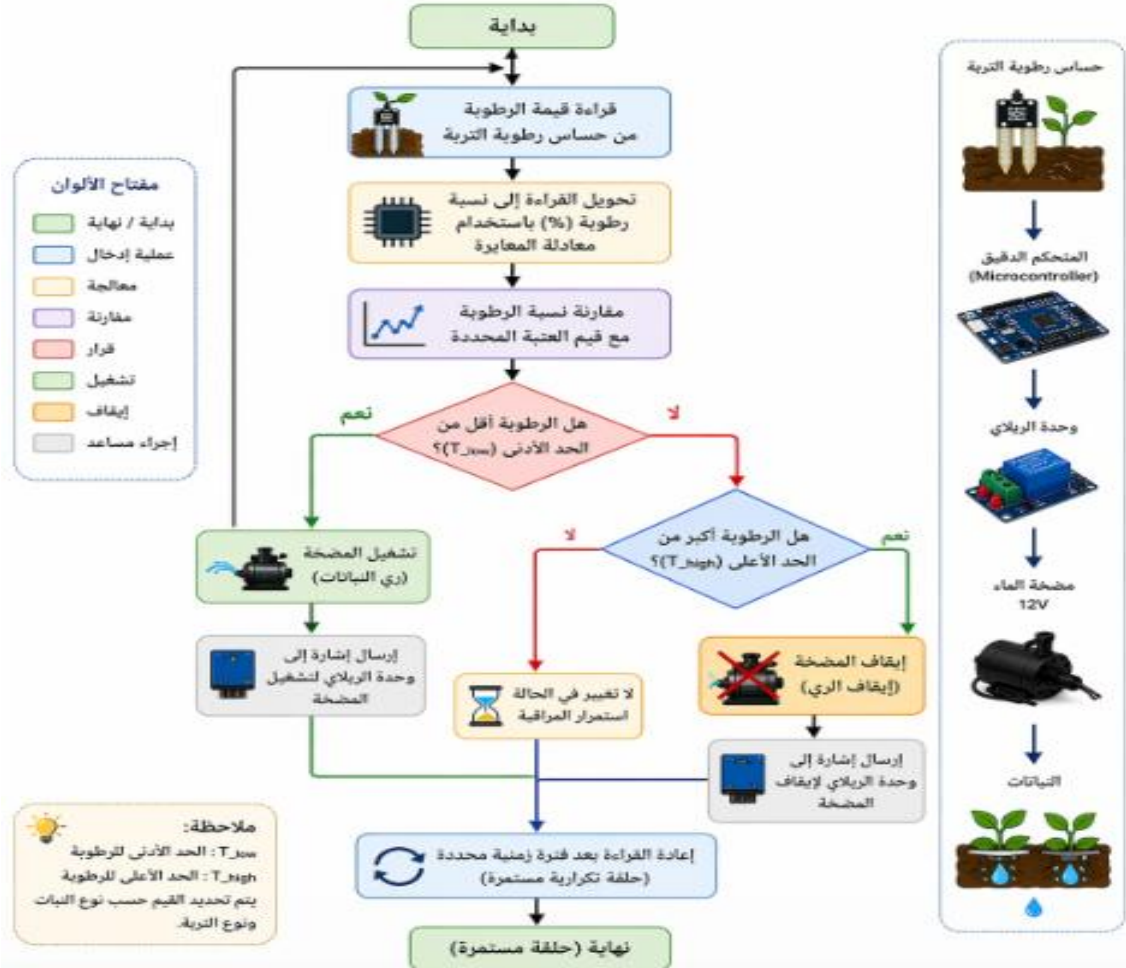


الشكل (7) يبين المخطط العام للنظام

8- المخطط التدفقي للنظام (الخوارزمية Flowchart)

يمثل مخطط الخوارزمية الموضح بالشكل (8) البنية المنطقية التي يعتمد عليها نظام الري الذكي في اتخاذ قرارات التشغيل والإيقاف بناءً على قراءات رطوبة التربة. حيث تبدأ العملية بقراءة القيم القادمة من حساس رطوبة التربة بشكل دوري، ثم يتم تحويل هذه القيم إلى نسبة مئوية باستخدام معادلات المعايرة المحددة مسبقاً. بعد ذلك، تُقارن قيمة الرطوبة المقاسة مع حدود العتبة المعرفة ضمن النظام، والتي تم اختيارها وفقاً لاحتياجات النبات وظروف التربة. في حال انخفاض مستوى الرطوبة عن الحد الأدنى، تقوم وحدة التحكم بإرسال إشارة لتشغيل المضخة عبر وحدة الريلاي، مما يسمح ببدء عملية الري. أما إذا تجاوزت نسبة الرطوبة الحد الأعلى المحدد، يتم إصدار أمر بإيقاف المضخة لتجنب الإفراط في الري. وفي الحالات التي

تقع فيها الرطوبة ضمن النطاق المقبول، يستمر النظام في المراقبة دون تغيير حالة التشغيل، مما يحقق استقراراً في الأداء ويقلل من عمليات التشغيل المتكررة. كما يتم تنفيذ هذه العملية ضمن حلقة تكرارية مستمرة (Loop)، لضمان التحديث اللحظي للبيانات والاستجابة السريعة لأي تغيرات في رطوبة التربة. ويسهم هذا النهج في تحسين كفاءة استهلاك المياه وتعزيز موثوقية النظام في البيئات الزراعية المختلفة.



الشكل (8) يبين مخطط تدفقي لمنظومة تحكم ذكية في الري المعتمد على استشعار رطوبة التربة

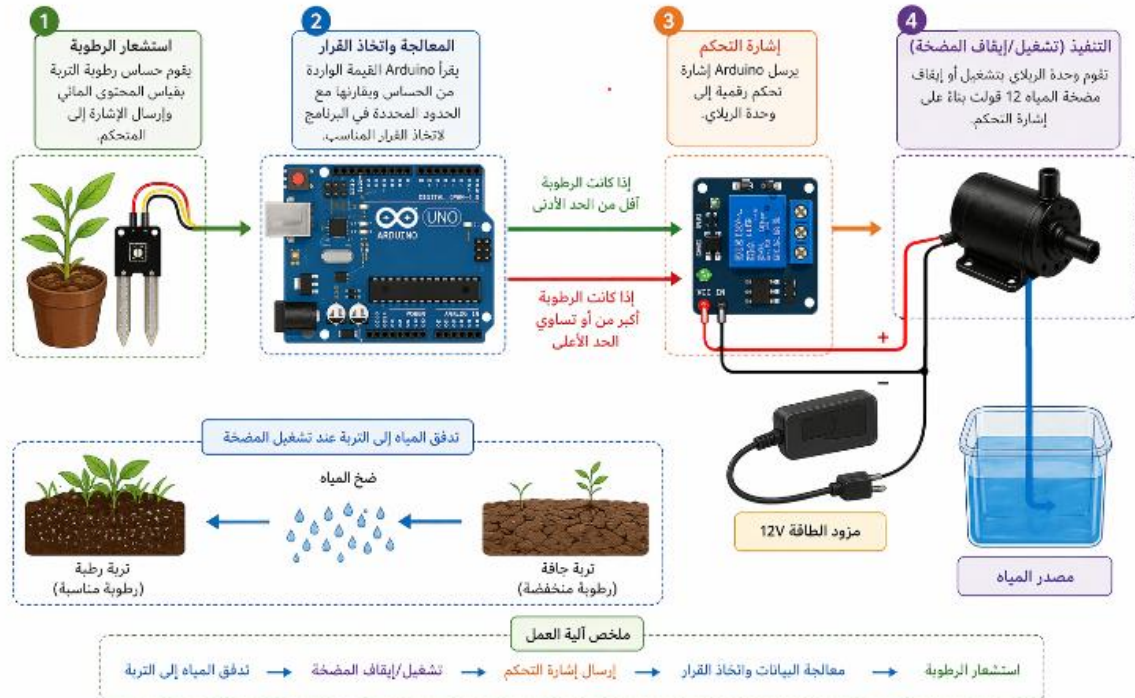
9- الوصف التشغيلي للنظام (الآلية عمله)

تعتمد آلية عمل النظام على مبدأ الاستشعار ثم المعالجة ثم اتخاذ القرار ثم التنفيذ. ويعمل النظام بصورة دورية ومستمرة لمراقبة حالة رطوبة التربة والتحكم في تشغيل مضخة المياه تلقائياً وفقاً لقيم محددة مسبقاً داخل البرنامج. ويهدف هذا التسلسل إلى ضمان تزويد التربة بالماء عند الحاجة فقط، مع تجنب التشغيل العشوائي أو المستمر للمضخة. في المرحلة الأولى، يقوم حساس رطوبة التربة بقياس مستوى الرطوبة داخل التربة من خلال ملامسة مجساته للوسط الترابي. تعتمد قيمة الخرج من الحساس على مقدار الماء الموجود في التربة؛ فعندما تكون التربة جافة تكون القراءة مختلفة عنها عندما تكون التربة رطبة أو مشبعة. هذه الإشارة قد تكون تماثلية أو رقمية، إلا أن النظام في العادة يعتمد على القراءة التماثلية لأنها تعطي تمثيلاً أدق لتغيرات الرطوبة [9].

بعد ذلك، تُرسل قيمة الرطوبة المقاسة إلى المتحكم الدقيق Arduino Uno، والذي يمثل وحدة المعالجة الرئيسية في النظام. يقوم المتحكم بقراءة البيانات القادمة من الحساس عبر المنافذ المخصصة، ثم يعالج هذه القيم داخل البرنامج باستخدام خوارزمية تحكم مبنية على مقارنة القراءة الحالية مع قيمة عتبة أو مجال محدد مسبقاً. في هذه المرحلة لا يكفي النظام بقراءة القيمة فقط، بل يحولها إلى معلومة قابلة لاتخاذ

القرار [10]، مثل تحديد ما إذا كانت التربة جافة وتحتاج إلى ري، أو أن مستوى الرطوبة ما زال ضمن النطاق المناسب. عند انخفاض قيمة الرطوبة عن الحد الأدنى المحدد داخل البرنامج، يفسر المتحكم هذه الحالة على أن التربة بحاجة إلى ماء، فيقوم بإرسال إشارة خرج رقمية إلى وحدة الريلاي. تعمل وحدة الريلاي هنا كعنصر فصل وتحكم كهربائي، لأنها تسمح للمتحكم الذي يعمل بجهد منخفض بالتحكم في حمل أعلى قدرة، وهو مضخة المياه 12 فولت. بمجرد تفعيل الريلاي، تُغلق دائرة التغذية الخاصة بالمضخة، فتبدأ المضخة في العمل وسحب المياه من الخزان أو المصدر المائي ودفعها نحو التربة. تستمر المضخة في العمل ما دام النظام يقرأ أن الرطوبة أقل من القيمة المطلوبة. وخلال هذه الفترة يستمر المتحكم في قراءة الحساس بشكل دوري، أي أن النظام لا يعمل مرة واحدة فقط، بل يعيد القياس باستمرار أثناء التشغيل. وعندما ترتفع نسبة الرطوبة وتصل إلى الحد الأعلى أو المستوى المطلوب، يتخذ المتحكم قراراً جديداً بإيقاف عملية الري، فيرسل إشارة إلى الريلاي لفصل دائرة المضخة، فتتوقف المضخة عن العمل مباشرة. وبهذا يضمن النظام أن عملية الري لا تستمر أكثر من اللازم. ومن الجوانب المهمة في آلية العمل أن النظام قد يستخدم فاصلاً بين حد التشغيل وحد الإيقاف لتقليل التذبذب في عمل المضخة [11]. والمقصود بذلك أن المضخة لا تعمل وتُطفأ عند نفس القيمة تماماً، بل عند قيمتين مختلفتين نسبياً، مثل تشغيلها عندما تقل الرطوبة عن 40% وإيقافها عندما تتجاوز 60%. هذه الآلية تمنع التشغيل المتكرر السريع للمضخة عندما تكون القراءة قريبة من الحد الفاصل، وهو ما يحسن من استقرار النظام ويطيل عمر المكونات. أما مصدر الطاقة فيوفر الجهد اللازم لتشغيل أجزاء النظام المختلفة. فالمتحكم والحساس والريلاي يحتاجون إلى تغذية منخفضة ومنظمة، بينما تحتاج المضخة إلى مصدر 12 فولت مناسب لقدرتها. ويعد تنظيم التغذية وربط الأرضي المشترك بين المكونات من الأمور الأساسية لضمان عمل النظام بصورة مستقرة وموثوقة.

تكمن أهمية هذه الآلية في أنها تحول عملية الري من أسلوب يدوي أو زمني ثابت إلى نظام تحكم تلقائي قائم على الحالة الفعلية للتربة. وهذا يعني أن الماء لا يُضخ إلا عند الحاجة الحقيقية، مما يؤدي إلى رفع كفاءة التشغيل، وتقليل الهدر، وتحسين موثوقية النظام. كما أن بساطة هذا الأسلوب تجعله مناسباً للتنفيذ ضمن الأنظمة المضمنة منخفضة التكلفة، مع إمكانية تطويره لاحقاً بإضافة خصائص أكثر تقدماً مثل المراقبة عن بُعد أو التحكم الذكي.



الشكل (9) يبين نموذج تشغيلي لمنظومة ري ذكية تعتمد على حساس رطوبة التربة وخوارزمية تحكم بالعتبة.

10- النمذجة والتحليل الكمي لبيانات رطوبة التربة وتصميم خوارزمية التحكم

يشكل هذا المحور الأساس المنهجي لتطوير نظام ري ذكي قائم على مقاربات علمية دقيقة، إذ يركّز على تحويل قراءات الحساس الأولية إلى متغيرات كمية قابلة للتحليل والمعالجة ضمن بيئة الأنظمة المضمنة. وتبدأ هذه العملية بنمذجة العلاقة بين القيم الرقمية الصادرة عن حساس رطوبة التربة ومستوى الرطوبة الفعلي، وذلك بالاعتماد على معادلات معايرة تجريبية تربط قراءة الحساس (ADC) بنسبة الرطوبة المئوية. وتُعد هذه المرحلة ضرورية [12] للحد من عدم اليقين المرتبط بعمليات القياس، وتحويل البيانات الخام إلى معلومات ذات دلالة فيزيائية يمكن الاستناد إليها في اتخاذ القرار. يركز التحليل الكمي على توصيف نطاقات الرطوبة المختلفة ضمن جداول معايرة معيارية، بما يتيح تصنيف حالة التربة إلى مستويات تشغيلية محددة (جافة، شبه جافة، متوسطة، رطبة، مشبعة)، وهو ما يدعم بناء منطق تحكم واضح ومنظم. كما يتم توظيف تقنيات الترشيح الرقمي للحد من تأثير الضوضاء وتحسين استقرار الإشارة، الأمر الذي يعزز موثوقية النظام ويقلل من احتمالية اتخاذ قرارات غير دقيقة نتيجة التغيرات اللحظية في القراءات. وبالاستناد إلى هذه البيانات المعالجة، يتم تصميم خوارزمية تحكم قائمة على المقارنة مع قيم عتبة محددة مسبقاً، مع تضمين نطاق هистерيس (Hysteresis) للحد من ظاهرة التذبذب في حالات التشغيل والإيقاف. وتسهم هذه الآلية في تحقيق استجابة ديناميكية متوازنة للتغيرات في رطوبة التربة، مع ضمان دقة القرار واستقرار الأداء التشغيلي. إن تكامل النمذجة الرياضية مع التحليل الكمي وخوارزميات التحكم ضمن متحكم دقيق يوفر إطاراً تطبيقياً متماسكاً يعزز من كفاءة النظام وقابليته للتقييم العلمي والمقارنة، ويُرسّخ موثوقيته كحل منخفض التكلفة وقابل للتطوير ضمن تطبيقات الأنظمة الذكية

10-1 معادلة حساب رطوبة التربة

تعتمد عملية حساب رطوبة التربة على تحويل الإشارة التماثلية الصادرة من الحساس إلى قيمة رقمية باستخدام وحدة التحويل التناظري- الرقمي (ADC) داخل المتحكم، ثم إعادة تمثيل هذه القيمة ضمن نموذج رياضي يربطها بنسبة الرطوبة الفعلية. ويتم ذلك من خلال معادلات معايرة تأخذ في الاعتبار قيمتي الحد الأدنى (التربة المشبعة) والحد الأقصى (التربة الجافة)، بما يسمح بتحويل القراءة الخام إلى نسبة مئوية دقيقة وقابلة للاستخدام في خوارزمية التحكم.

$$Moisture(\%) = \frac{V_{max} - V_{read}}{V_{max} - V_{min}} \times 100$$

حيث:

V_{read} : القيمة المقروءة من الحساس

V_{max} : قيمة التربة الجافة

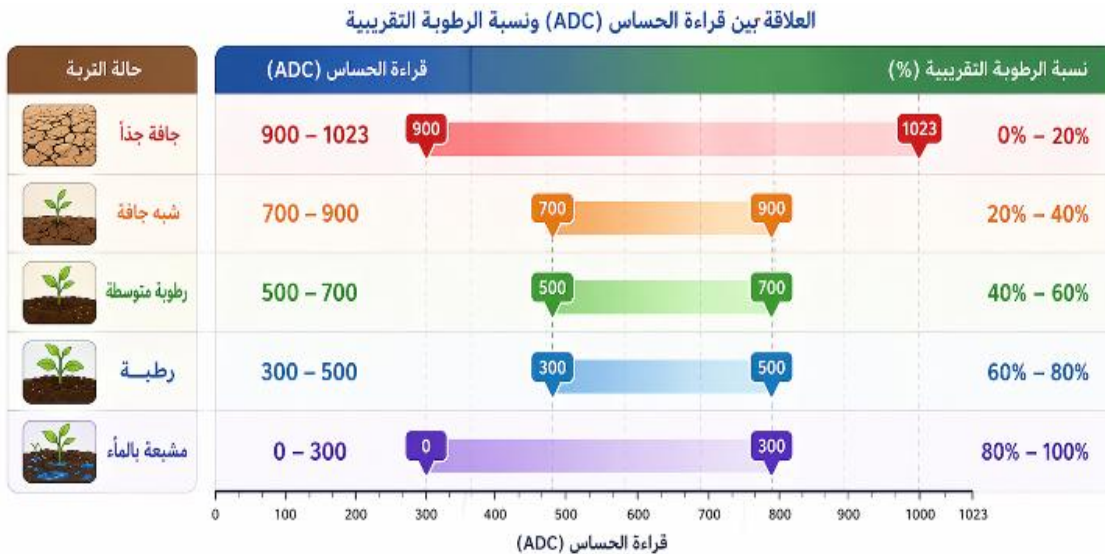
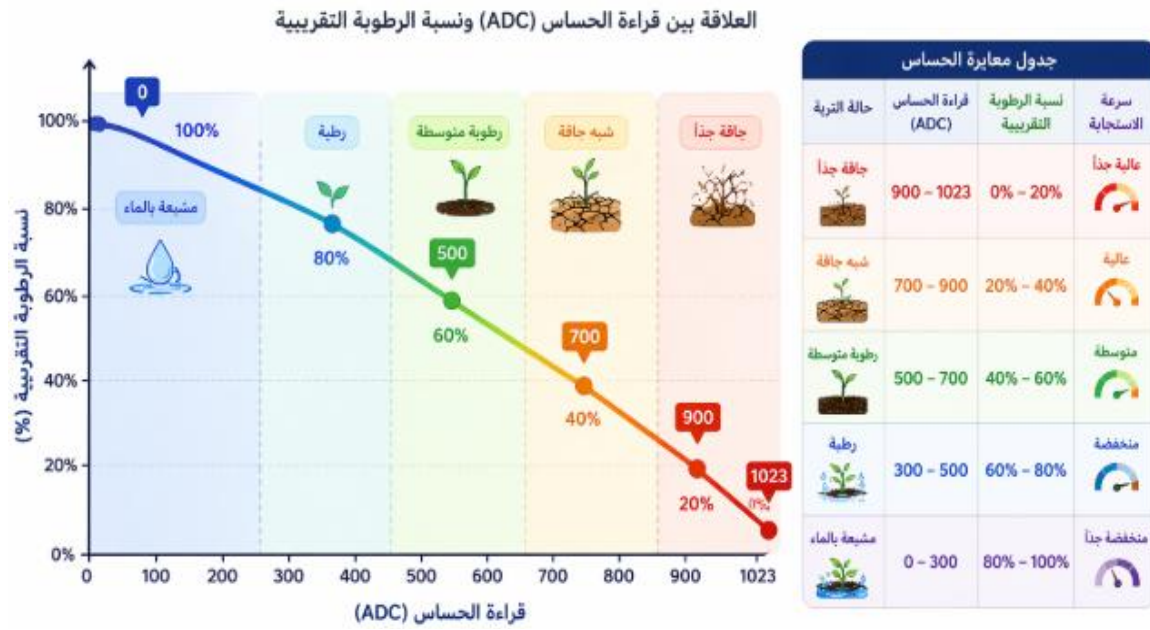
V_{min} : قيمة التربة المشبعة بالماء

10-2 جدول معايرة الحساس (Calibration Table)

تُعد معايرة حساس رطوبة التربة الموضحة بالجدول رقم (1) خطوة أساسية في تحويل القراءات الرقمية الخام إلى مؤشرات كمية دقيقة تعبر عن الحالة الفعلية للتربة. حيث يتم تحديد العلاقة بين قيمة القراءة (ADC) ونسبة الرطوبة من خلال تجارب عملية على حالات تربة مختلفة، مما يتيح بناء جدول مرجعي يُستخدم في خوارزمية التحكم لاتخاذ قرارات دقيقة وموثوقة. كما تسهم هذه العملية في تحسين دقة النظام وتقليل تأثير العوامل البيئية مثل نوع التربة ودرجة الحرارة.

جدول رقم (1) يبين معايرة حساس رطوبة التربة وربط قراءات (ADC) بنسبة الرطوبة وسرعة الاستجابة.

حالة التربة	قراءة الحساس (ADC)	نسبة الرطوبة التقريبية	سرعة الاستجابة
جافه جدا	1023-900	0% - 20%	عالية جدا
شبه جافه	900-700	20% - 40%	عالية
رطوبة متوسطة	700-500	40% - 60%	متوسطة
رطوبة	500-300	60% - 80%	منخفضه
مشبعة بالماء	300-0	80% - 100%	منخفضه جدا



ملاحظة علمية: تختلف قراءات الحساس حسب نوع التربة، درجة حرارتها، ووقت القياس. يوصى بإجراء معايرة عملية للنظام في بيئة العمل الفعلية للحصول على دقة أعلى.

كلما كانت القراءة أقرب إلى 0 كلما كانت التربة أكثر رطوبة

الشكل (10) العلاقة بين قراءة الحساس ونسبة الرطوبة

النتائج:

1. أظهر النظام كفاءة عالية في تحويل الإشارات التناظرية الصادرة عن حساس رطوبة التربة إلى بيانات رقمية كمية دقيقة، مما أتاح استخدامها بشكل مباشر وموثوق ضمن خوارزمية التحكم دون الحاجة إلى معالجة إضافية معقدة .
2. بينت خوارزمية التحكم المعتمدة على مبدأ العتبة (Threshold-Based Control) قدرة فعالة على الاستجابة الفورية للتغيرات في مستوى رطوبة التربة، حيث وفّرت استجابة زمنية قصيرة واستقرارًا في اتخاذ قرار التشغيل والإيقاف .
3. ساهم نطاق الهسترة (Hysteresis Band) في تقليل ظاهرة التذبذب (Oscillation) الناتجة عن التغيرات الطفيفة في قراءات الحساس، كما حدّ بشكل ملحوظ من التشغيل والإيقاف المتكرر للمضخة، مما انعكس إيجابًا على عمرها التشغيلي .
4. أظهرت النتائج تحسّنًا واضحًا في كفاءة استخدام المياه مقارنة بطرق الري التقليدية، حيث تم تزويد التربة بالمياه فقط عند الحاجة الفعلية، مما قلل من الفاقد المائي ورفع كفاءة الاستهلاك .
5. أثبت النظام استقرارًا تشغيليًا ملحوظًا تحت ظروف تشغيل مختلفة، بما في ذلك اختلاف درجات الحرارة والرطوبة المحيطة، مما يدل على موثوقية تصميمه وقدرته على العمل في بيئات متنوعة .
6. أكدت نتائج المعايرة أن دقة حساس رطوبة التربة تتأثر بشكل كبير بنوع التربة (رملية، طينية، طميية) وخصائصها الفيزيائية، مثل الكثافة ونسبة الملوحة، مما يستلزم إجراء معايرة مخصصة لكل حالة .
7. تميز النظام بسهولة التنفيذ من الناحية العملية، بالإضافة إلى انخفاض تكلفته الإجمالية، حيث يعتمد على مكونات إلكترونية بسيطة ومتوفرة، مع الحفاظ على مستوى أداء مقبول يلبي متطلبات التطبيقات الزراعية الأساسية .
8. أظهر المتحكم Arduino Uno كفاءة جيدة في تنفيذ خوارزمية التحكم وإدارة عمليات الإدخال والإخراج، رغم محدودية موارده من حيث الذاكرة وسرعة المعالجة، مما يؤكد ملاءمته لهذا النوع من الأنظمة المدمجة .
9. بينت بنية النظام مرونة عالية من حيث التوسعة والتطوير، حيث يمكن إضافة مكونات جديدة مثل حساسات إضافية أو وحدات اتصال دون الحاجة إلى إعادة تصميم شامل للبنية الأساسية .

التوصيات:

1. يُوصى بإجراء عملية معايرة دقيقة لحساس رطوبة التربة لكل نوع تربة قبل بدء التشغيل الفعلي، وذلك لضمان دقة القراءات وتقليل نسبة الخطأ الناتج عن اختلاف الخصائص الفيزيائية للتربة .
2. يُفضل استخدام تقنيات الترشيح الرقمي (Digital Filtering)، مثل مرشح المتوسط المتحرك (Moving Average) أو مرشح كالمان (Kalman Filter)، لتحسين استقرار القراءات وتقليل تأثير الضوضاء الكهربائية والتغيرات المفاجئة .
3. يُنصح بتطوير خوارزمية التحكم لتشمل أساليب أكثر تقدمًا مثل التحكم الضبابي (Fuzzy Logic Control) أو التحكم التكيفي (Adaptive Control)، مما يسمح للنظام بالتكيف مع التغيرات الديناميكية في البيئة الزراعية .
4. يُستحسن دمج وحدات اتصال حديثة ضمن مفهوم إنترنت الأشياء (IoT)، مثل Wi-Fi أو LoRa، لتمكين المراقبة والتحكم عن بُعد، وتسجيل البيانات لتحليلها لاحقًا .
5. يُوصى بالاعتماد على مصادر طاقة متجددة، وعلى رأسها الطاقة الشمسية، لتوفير نظام تشغيل مستدام وتقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية، خاصة في المناطق الزراعية النائية .
6. ينبغي تحسين تصميم الدوائر الإلكترونية بهدف تقليل استهلاك الطاقة الكلي للنظام، من خلال استخدام مكونات ذات كفاءة عالية وتقنيات إدارة الطاقة (Power Management) .
7. يُنصح بإجراء اختبارات تشغيل طويلة المدى (Long-Term Testing) لتقييم موثوقية النظام واستقراره تحت ظروف بيئية مختلفة، مثل التغيرات الموسمية والرطوبة العالية .

8. يُفضل استخدام أكثر من حساس رطوبة موزع في مناطق مختلفة من التربة، وربطها بخوارزمية دمج بيانات (Data Fusion) للحصول على قياسات أكثر دقة وتمثيل أفضل للحالة الفعلية للتربة.
9. يُوصى بتطوير واجهة استخدام (User Interface) تفاعلية لعرض البيانات بشكل رسومي (Graphs & Charts)، مما يساعد المستخدم في تحليل الأداء واتخاذ قرارات ري أكثر دقة وفعالية.

References:

- [1] Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2427–2436.
- [2] Muñoz-Carpena, R., & Dukes, M. D. (2005). Automatic irrigation based on soil moisture for vegetable crops. *Agricultural Water Management*, 74(2), 135–150.
- [3] Kim, Y., Evans, R. G., & Iversen, W. M. (2008). Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(7), 1379–1387.
- [4] Bogen, H. R., Huisman, J. A., Oberdörster, C., & Vereecken, H. (2007). Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *Journal of Hydrology*, 344(1–2), 32–42.
- [5] Sharma, N., Singha, S., & Dutta, T. (2015). Smart irrigation system using Arduino. *International Journal of Engineering Research and Applications* 5(10) 78–82.
- [6] Vellidis, G., Tucker, M., Perry, C., Kvien, C., & Bednarz, C. (2008). A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(1), 44–50.
- [7] Ojha, T., Misra, S., & Raghuwanshi, N. S. (2015). Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 66–84.
- [8] Gutiérrez, J., Villa-Medina, J. F., Nieto-Garibay, A., & Porta-Gándara, M. Á. (2014). Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(1), 166–176.
- [9] Zotarelli, L., Dukes, M. D., & Morgan, K. T. (2011). Interpretation of soil moisture content to determine soil field capacity and avoid over-irrigation. *University of Florida IFAS Extension*.
- [10] Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S., Domun, Y., & Norton, T. (2017). Dynamic neural network modelling of soil moisture content for predictive irrigation scheduling. *Sensors*, 17(3), 575.
- [11] Kumar, R., Tripathi, S., & Tiwari, S. (2014). Design and development of automatic irrigation system using fuzzy logic controller. *International Journal of Computer Applications*, 97(18), 1–6.
- [12] Evans, R. G., & Sadler, E. J. (2008). Methods and technologies to improve irrigation efficiency. *Water Resources Research*, 44(7), W00E04.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of AJHAS and/or the editor(s). AJHAS and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.