جامعة الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة قاصدي مرباح — ورقلة

كلية العلوم التطبيقية

قسم الهندسة المدنية والري

مذكرة تخرج لنيل شهادة الماستر

تخصص: موارد مائية

بعـــنوان:

ابتكار نظام ذكي لقياس استهلاك المياه ومراقبته في شبكات التوزيع عن بعد باستخدام IOT

إعداد الطالب:

- بوقنورمحمد الصادق
- ورقلي عبد المعز

إشراف الأستاذة:

د. مشري العيد

اللجنة المناقشة المكونة من:

الرقم	الاسم واللقب	الرتبة	الصفة
1	مشري العيد	أستاذ محاضر	مشرفا
2	زقعيط رشيد	أستاذ محاضر	رئيسا
3	زروقي موسى	أستاذ محاضر	مناقشا

السنـة الجامعية: 2025 / 2026





إلى من كان دعاؤهما سر نجاحي، وإلى من غرسا في نفسي حب العلم والاجتهاد، أبي وأمي العزيزين، حفظهما الله وأطال في عمرهما.

إلى إخوتي وأخواتي، وإلى جميع أفراد عائلتي الكريمة الذين ساندوني وشجعوني طوال مشواري الدراسي.

إلى أساتذتي الأفاضل الذين أناروا دربي بالعلم والمعرفة، وكان لهم الفضل في تكويني العلمي.

إلى أصدقائي وزملائي الذين شاركوني رحلة الدراسة بكل ما حملته من تعب واجتهاد وأمل.

إلى كل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل المتواضع.

أهديكم ثمرة سنوات من الجد والاجتهاد، راجياً من الله أن يجعل فيها النفع والفائدة.

والحمد لله أولاً وآخراً.





الحمد لله تعالى الذي وفقني وأعانني على إنجاز هذا العمل وإتمامه.

أتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى أستاذي المشرف، على توجيهاته القيمة ونصائحه السديدة ومتابعته المستمرة، والتي كان لها الأثر الكبير في إنجاز هذه المذكرة.

كما أتوجه بالشكر الجزيل إلى أعضاء لجنة المناقشة الموقرين على تفضلهم بقراءة هذا العمل وتقييمه وإثرائه بملاحظاتهم القيمة.

ولا يفوتني أن أتقدم بالشكر إلى جميع أساتذة القسم الذين ساهموا في تكويني العلمي طوال سنوات الدراسة، كذلك وإلى كل من الطالب عصام الدين من قسم الاوتماتيك و كذلك دغة سيد علي من مؤسسة الجزائرية للمياه الذين قدما لنا الدعم في الجانب التقني.

والى كل من قدم لي يد العون وساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل .

وفي الأخير، أسأل الله أن يجزي الجميع خير الجزاء وأن يجعل هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم.





قـائمة المحتويات

قـائمة المحتويـات

أولاً: الفهرس العام

الصفحات التمهيدية

صفحة الواجهة I
الإهداء II
شكر وعرفان III
فهرس المحتويات IV
فهرس الجداول V
فهرس الأشكال والوثائق والصور VI

المقدمة والإشكالية

مقدمة عامة 08
الإشكالية 10
الدراسات السابقة 12
أولاً: الدراسات العالمية 12
ثانياً: على الصعيد الجزائري 16
ثالثاً: أبرز الباحثين في المجال على الصعيد العالمي 16

الفصل الأول: الجانب النظري

تمهيد 19
1. الضغط في شبكات المياه 19
1.1 وحدات الضغط والتحويل بينها 19
1.2 تأثير الضغط وتغيراته في الشبكات 20
1.3 ضياع الحمولة 20
2. علاقة هازن-ويليامز (Hazen-Williams) 20
2.1 نبذة تاريخية 20
2.2 سبب اختيار علاقة هازن-ويليامز 21
2.3 الصيغة الأصلية والمعكوسة للعلاقة 22
3. تسلسل الحسابات 22
4. الجريان وعدد رينولدز 23
5. إنترنت الأشياء (IoT) 24
6. طريقة عمل النظام المقترح 24

الفصل الثاني: الجانب التطبيقي

تمهيد 30
1. الأدوات والمكونات المستخدمة 30
1.1 أنبوب PVC 30
1.2 مستشعر الضغط DFRobot 31
1.3 المتحكم ESP32 32
1.4 المضخة الغاطسة 33
1.5 الحوض التجريبي 33
1.6 منصة ThingSpeak 34
2. طريقة العمل وبناء النموذج 35
3. التجربة الأساسية 36

الفصل الثالث: النتائج والتحليل

تمهيد 39
1. المعايرة (Étalonnage) 39
الجدول 1: الوضع الأول — صمام مفتوح بالكامل 40
الجدول 2: الوضع الثاني — صمام مفتوح جزئياً 41
الجدول 3: الوضع الثالث — صمام مفتوح قليلاً 42
2. نتائج التجربة وتحليلها 43
2.1 نتائج قراءات الضغط من ThingSpeak 44
2.2 تحليل نتائج التجربة والنظام 45
3. معامل التصحيح 47
3.1 جدول معاملات التصحيح 49
4. مناقشة النتائج 50
4.1 تقييم دقة النظام 50
4.2 مدى صلاحية تطبيق علاقة هازن-ويليامز 51
4.3 تقييم أداء منصة ThingSpeak 52

الخلاصة والخاتمة

الخلاصة العامة 53
الخاتمة 55

المراجع والملاحق

قائمة المراجع 57
الملحق: كود البرمجة (ESP32 / Arduino IDE) 62

ثانياً: فهرس الجداول

الجدول 1: نتائج تجارب المعايرة — الوضع الأول (صمام مفتوح بالكامل) 35
الجدول 2: نتائج تجارب المعايرة — الوضع الثاني (صمام مفتوح جزئياً) 36
الجدول 3: نتائج تجارب المعايرة — الوضع الثالث (صمام مفتوح قليلاً) 37
الجدول 4: معاملات التصحيح لمختلف أوضاع التشغيل 44

ثالثاً: فهرس الأشكال والوثائق والصور

الشكل 1: بنية نظام IoT لمراقبة شبكات المياه 19
الشكل 2: أنبوب PVC 16mm المستخدم في التجربة 25
الشكل 3: مستشعر الضغط DFRobot 26
الشكل 4: المتحكم ESP32 المستخدم في المنظومة 27
الشكل 5: المضخة الغاطسة 28
الشكل 6: الحوض التجريبي 28
الشكل 7: منصة ThingSpeak 29
الشكل 8: لوحة التجارب مع مقسّمات الجهد 30
الشكل 9: صور توضح تطبيق Arduino IDE 31
الشكل 10: النموذج التجريبي المتكامل 32
الشكل 11: النموذج التجريبي — نظرة من الأعلى 32
الشكل 12: منحنى التجربة الأولى (الحنفية 90 درجة) بدلالة الزمن 35
الشكل 13: منحنى التجربة الثانية (الحنفية منفرجة) بدلالة الزمن 37
الشكل 14: منحنى التجربة الثالثة (الحنفية مفتوحة قليلاً) بدلالة الزمن 37
الشكل 15: منحنى P1 من منصة ThingSpeak 40
الشكل 16: منحنى P2 من منصة ThingSpeak 41
الشكل 17: منحنى ΔP من منصة ThingSpeak 41


المقدمة العامة

مقدمة عامة

يُعدّ الماء المورد الطبيعي الأساسي الذي لا غنى عنه لاستمرار الحياة بجميع أشكالها، وركيزةً لا يمكن تعويضها في منظومات التنمية البشرية والاقتصادية. وعلى الرغم من أن المياه تُغطي نحو 71% من سطح كوكب الأرض، فإن الحصة المتاحة منها للاستهلاك البشري لا تتجاوز 3% من إجمالي هذا المخزون، وتُعدّ نسبة ضئيلة منها متجددة وقابلة للوصول الفعلي. وفي ظل التزايد الديموغرافي المتسارع وتنامي الطلب الناجم عن التوسع الحضري والصناعي والزراعي، باتت الفجوة بين الموارد المتاحة والاحتياجات الفعلية تتسع بوتيرة مثيرة للقلق على الصعيد العالمي] .16[UN Water -

وتنعكس هذه الأزمة المائية العالمية بصورة أشد وطأةً على المناطق الجافة وشبه الجافة. وتقع الجزائر ضمن هذا النطاق الجغرافي الحساس، إذ تتسم خريطتها المائية بتباين حاد بين شمالها الذي يحظى بتساقطات مطرية معتدلة ومنظومة أنهار وسدود، وجنوبها الصحراوي الشاسع الذي يُمثّل أكثر من 85% من إجمالي مساحتها ويتّسم بمناخ جاف شديد وشُح تساقطات .]17[OSS/CIHEAM -

وتعتمد المناطق الصحراوية الجزائرية اعتماداً شبه كلي على المياه الجوفية لتأمين احتياجاتها، وهي مياه مخزّنة في طبقات عميقة تتجدد بمعدلات بطيئة لا تتناسب مع معدلات الاستخراج المتزايدة. وتحتضن الجزائر بعضاً من أضخم الخزانات المائية الجوفية في العالم، وفي مقدمتها الحوض الرسوبي الصحراوي الشمالي الممتد عبر أراضي عدة دول مجاورة] .18 - OSS, SASS Report]

وتُفاقم من هذا الوضع ظاهرة الفاقد المائي في شبكات التوزيع، الذي يتراوح في بعض المناطق بين 30% و50% من الكميات المضخوخة. ويعود هذا الفاقد جزئياً إلى تقادم البنية التحتية، وجزئياً آخر إلى غياب أنظمة القياس الدقيق التي تُمكّن من معرفة الكميات الفعلية المستهلكة في كل نقطة من الشبكة] .15[Farley & Trow -

وقد أسهمت التطورات التكنولوجية المتسارعة في مجال الإلكترونيات والاتصالات اللاسلكية في إتاحة أدوات قياس مبتكرة منخفضة التكلفة، قادرة على مراقبة الشبكات المائية في الوقت الحقيقي وبدقة عالية. ومن هذا المنطلق، تندرج هذه الدراسة ضمن مسعى علمي يهدف إلى

تصميم واختبار نظام مدمج لقياس الاستهلاك المائي الساعي واليومي، يرتكز على مستشعرات الضغط وعلاقة هازن-ويليامز (Hazen-Williams) كأداة رياضية للانتقال من قيم الضغط المقاسة إلى قيم التدفق، مع عرض النتائج وتتبعها آنياً عبر منصة رقمية متخصصة] .13 - Pérez-Padillo et al.]


الاشكالية

الإشكالية

تشكّل معرفة الاستهلاك الفعلي للمياه في شبكات التوزيع حجر الزاوية في أي سياسة فعّالة لإدارة هذا المورد الحيوي. غير أن واقع كثير من الشبكات يكشف عن فجوة واسعة بين الكميات المضخوخة والكميات الموثّقة فعلياً للمستهلكين.

وفي سياق هذه الدراسة المخبرية، يُطرح التساؤل الجوهري التالي:

كيف يمكن قياس الاستهلاك المائي الحقيقي ومراقبته بصفة مستمرة للحفاظ على المورد المائي وترشيد استخدامه؟

وتتفرع عن هذه الإشكالية الرئيسية جملة من التساؤلات الفرعية:

- هل يمكن الانطلاق من قياسات الضغط لاستخراج قيم التدفق المائي في الأنابيب؟
- ما مدى صلاحية علاقة هازن-ويليامز لحساب التدفق في الأنابيب ذات الأقطار الصغيرة في ظروف مختبرية؟
- ما نوع الجريان السائد في الأنبوب التجريبي، وهل يتوافق مع شروط تطبيق علاقة هازن-ويليامز؟
- هل يمكن بناء نظام قياس ذكي منخفض التكلفة يُرسل البيانات ويعرضها آنياً عبر شبكة الإنترنت؟
- هل يمكن الاعتماد على هذا النهج التقني مستقبلاً كأداة موثوقة لمراقبة شبكات توزيع المياه الحقيقية؟


دراسات سابقة

الدراسات السابقة

تُعدّ مسألة مراقبة شبكات المياه وقياس الاستهلاك من المواضيع التي نالت اهتماماً علمياً متزايداً على الصعيد الدولي، لا سيما في ظل التطور الكبير الذي شهدته تقنية إنترنت الأشياء خلال العقد الأخير .وفيما يلي عرض لأبرز الدراسات التي تناولت هذا المجال:

أولاً :الدراسات العالمية

الدراسة الأولى:

أجرى باحثون من جامعة بوليتكنيكو ميلانو بإيطاليا دراسة بعنوان:

"An IoT System for Monitoring and Data Collection of Residential Water End-Use Consumption"

نُشرت عام .2019 صمّم الفريق البحثي نظاماً لمراقبة استهلاك المياه المنزلي في الوقت الحقيقي، اعتمد على أجهزة استشعار منخفضة التكلفة مرتبطة بمنصة سحابية لجمع البيانات وتحليلها .وقد أسفرت هذه الدراسة عن نتائج إيجابية، إذ تمكّن النظام من تصنيف أنماط الاستخدام اليومي للمياه وتحديد مصادر الهدر بدقة ملحوظة، مما أتاح للمستخدمين التحكم الفعلي في استهلاكهم.

الدراسة الثانية:

قام باحثون من جامعة الموصل بالعراق، قسم هندسة الحاسبات والشبكات، بتصميم نظام لمراقبة استهلاك المياه الحضري نُشر عام .2023 اعتمد النظام على المتحكم الدقيق ESP32C3 ومستشعر التدفق YF-S201 مع شبكة Wi-Fi لإرسال البيانات إلى السحابة، وطُبّق ميدانياً في حيّ التأميم بمدينة الموصل .أثبتت نتائج الدراسة أن هذا النوع من الأنظمة المبنية على أجهزة منخفضة الموارد يوفّر حلاً فعّالاً وآمناً واقتصادياً لإدارة استهلاك المياه الحضري، وقد أيّدت المحاكاة الحاسوبية باستخدام برنامج OPNET هذه النتائج من حيث الأداء والتوسّع.

الدراسة الثالثة:

نشر الباحثان Yurav Singh و Tom Walingoمن جامعة KwaZulu-Natal بجنوب أفريقيا دراسة بعنوان:

"Smart Water Quality Monitoring with IoT Wireless Sensor Networks"

في مجلة Sensors عام .2024 طوّر الباحثان نظاماً ذكياً لمراقبة المياه يعتمد على شبكات الاستشعار اللاسلكية مع دمج خوارزميات الذكاء الاصطناعي لمعالجة البيانات آنياً .أظهرت النتائج تفوّق هذا النظام على الأساليب التقليدية المعتمدة على المختبر، من حيث الاستجابة الفورية وإطلاق التنبيهات التلقائية عند تجاوز القيم الحدية المسموح بها.

الدراسة الرابعة:

نشر فريق بحثي دولي دراسة بعنوان:

"An Intelligent, Low-Cost Water Quality Monitoring System with On-Device Machine Learning and Cloud Integration"

في مجلة Scientific Reports التابعة لمجموعة Nature عام .2026 صمّم الفريق نظاماً مدمجاً يعتمد على المتحكم ESP32 مع تشغيل نماذج ذكاء اصطناعي خفيفة (TinyML) مباشرةً على الجهاز دون الحاجة إلى اتصال دائم بالإنترنت .أثبتت النتائج قدرة النظام على الكشف عن التلوث وشذوذات الضغط بدقة عالية مع استهلاك منخفض جداً للطاقة، مما يجعله مناسباً للتطبيق في المناطق النائية أو ذات البنية التحتية المحدودة.

ثانياً :على الصعيد الجزائري

لم تُوثَّق حتى تاريخ إعداد هذه الدراسة — في حدود ما أتاحته قواعد البيانات العلمية المتاحة — أبحاث جزائرية منشورة تتناول تحديداً تصميم نظام مدمج يعتمد على مستشعرات الضغط التفاضلي وتقنية إنترنت الأشياء لقياس الاستهلاك المائي في شبكات التوزيع .وهذا الغياب في حدّ ذاته يكشف عن فجوة بحثية حقيقية على المستوى الوطني، تسعى هذه الدراسة إلى المساهمة في سدّها، لا سيما في ظل الخصوصية التي تتسم بها المناطق الصحراوية الجزائرية من حيث ندرة الموارد المائية وضرورة ترشيد استهلاكها.

ثانياً : أبرز الباحثين في المجال على الصعيد العالمي

.البروفيسورة — Ilenia Tinnirello إيطاليا:

الصفة :أستاذة في هندسة الاتصالات، جامعة باليرمو، إيطاليا .باحثة زائرة سابقة في جامعة سيول الوطنية بكوريا وجامعة نانيانغ التكنولوجية بسنغافورة.

ما قدّمته: قادت فريقاً بحثياً دولياً أجرى مسحاً شاملاً لـ 255 دراسة حول تطبيقات إنترنت الأشياء في شبكات توزيع المياه، ورصد التحديات الكبرى كقابلية التوسع وكفاءة الطاقة وتغطية الشبكة والموثوقية .وتُعدّ من أبرز الوجوه الأكاديمية في مؤتمر SmartWaterالدولي ACM Digital Library .

2الدكتور — Vicenç Puig إسبانيا :

الصفة :أستاذ وباحث في معهد الروبوتيكا وعلم المعلوماتية الصناعية، جامعة بوليتكنيكو كتالونيا(UPC) ، برشلونة.

ما قدّمه :ابتكر منهجيات متقدمة لتحديد المواقع المثلى لمستشعرات الضغط في شبكات توزيع المياه باستخدام نظرية المعلومات، بهدف الكشف الدقيق عن موقع التسربات وتقليص الفاقد المائي .ويُعدّ من الرواد العالميين في مجال التشخيص الهيدروليكي الذكي nih .

.3الدكتور — Antonino Pagano إيطاليا :

الصفة :أستاذ مساعد وباحث في المعهد الوطني للاتصالات(CNIT) ، جامعة باليرمو.

ما قدّمه :طوّر إطاراً شاملاً لنشر إنترنت الأشياء على نطاق واسع في شبكات توزيع المياه، يشمل نموذجاً معمارياً وتقنيات متطورة لتحقيق المراقبة والتحسين المتكاملَين للشبكات المائيةResearchGate .


الجانب النظري


الفصل الأول

الفصل الأول: الجانب النظري

تمهد :

لتحقيق الأهداف العلمية لهذه الدراسة والانتقال من مرحلة القياس الميداني إلى مرحلة تفسير النتائج، لا بد من الاستناد إلى إطار نظري يجمع بين معادلات الهيدروليكا الكلاسيكية ومفاهيم ميكانيكا الموائع. وقد تمّ في هذا الإطار توظيف جملة من العلاقات الرياضية المتسلسلة، تبدأ من قراءة الضغط وتنتهي بحساب الاستهلاك المائي.

1.الضغط في شبكات المياه :

يُعدّ الضغط أحد أهم المتغيرات الهيدروليكية في أنظمة نقل وتوزيع المياه، إذ يُعبّر عن القوة التي يمارسها السائل على وحدة المساحة من جدار الأنبوب. ويلعب توزيع الضغط على امتداد الشبكة دوراً محورياً في تحديد نقاط الضعف، وضمان وصول المياه إلى جميع نقاط الاستهلاك بضغط كافٍ**[1- Engineering ToolBox]** .

1.1وحدات الضغط والتحويل بينها :

تتعدد وحدات قياس الضغط المستخدمة في الهندسة الهيدروليكية، وفيما يلي علاقات التحويل الأساسية**[1- Engineering ToolBox]** :

$$1\ Pa = 1\ N/m^2$$

$$1\ bar = 10\ \ Pa$$

$$1\ MPa = 10\ \ Pa \quad \rightarrow \quad 1\ MPa = 10\ bar$$

$$P(bar) = P(MPa) \times 10$$

1.2تأثير الضغط وتغيراته في الشبكات :

أي تغير في ظروف تشغيل شبكة المياه ينعكس مباشرة على قيم الضغط في نقاط الشبكة. وتُعبّر معادلة برنولي عن مبدأ حفظ الطاقة بين نقطتين في الشبكة**[13- Pérez-Padillo et al.]** :

$$P1/\gamma + v1^2/2g + z1 + HA - HL = P2/\gamma + v2^2/2g + z2$$

حيث P :الضغط v ،السرعة z ،الارتفاع γ ،الوزن النوعي للماء HA ،طاقة المضخة ،

HLضياع الحمولة. وتُثبت هذه المعادلة أن أي تسرب أو انقطاع في الشبكة) يُغيّر (v سيُعطي قراءات ضغط خارج نطاقها الطبيعي في النقاط المحيطة.

1.3ضياع الحمولة(Perte de charge - hf) :

في أنبوب مضغوط تجري فيه مياه بسرعة معينة، ينخفض الضغط تدريجياً في اتجاه الجريان نتيجة الاحتكاك بين الماء وجدار الأنبوب. وتُعرف هذه الظاهرة بضياع الحمولة، وتُعبَّر عنه بوحدة الارتفاع (متر ماء)**[2- Engineering ToolBox]** .

hf = ΔP(bar) × 10.2 [m H O]

حيث المعامل 10.2 هو عامل تحويل البار إلى متر ماء: 1 bar ≈ 10.2 m H O

.2علاقة هازن-ويليامز(Hazen-Williams) :

2.1 نبذة تاريخية:

صاغ المهندسان الأمريكيان ألن هازن (Allen Hazen) وغاردنر ستيوارت ويليامز (Gardner Stewart Williams)علاقتهما التجريبية ونشراها عام 1905 في كتابهما المرجعي ،'Hydraulic Tables' بعد تحليل أكثر من مئة من نتائج التجارب الميدانية والمختبرية على أنابيب المياه. وعلى خلاف المعادلات المشتقة نظرياً، لا تستند هذه العلاقة إلى مبادئ ميكانيكا الموائع الأساسية، بل اشتُقّت مباشرةً بالانحدار الإحصائي **[3- Hazen & Williams]** .

استمدّت هذه العلاقة قيمتها من بساطتها الحسابية مقارنةً بمعادلة دارسي-فايسباخ (Darcy-Weisbach)التي تستوجب حسابات تكرارية. وقد شاع استخدامها على نطاق واسع في تصميم شبكات توزيع المياه الشرب ومنظومات الري وأنظمة مكافحة الحرائق **[4- H2X Engineering]** .

2.2سبب اختيار علاقة هازن-ويليامز دون معادلة دارسي-فايسباخ أو دبّاخ

في الهندسة الهيدروليكية، تُستخدم ثلاث معادلات رئيسية لحساب ضياع الحمولة في الأنابيب: معادلة هازن-ويليامز، ومعادلة دارسي-فايسباخ، ومعادلة دبّاخ .(Chezy-Manning)

وفيما يلي مقارنة مختصرة بينها وتوضيح دوافع اختيار علاقة هازن-ويليامز في هذه الدراسة:

- **معادلة دارسي-فايسباخ (Darcy-Weisbach):** هي معادلة أساسية مشتقة من مبادئ ميكانيكا الموائع، وتعتمد على معامل احتكاك دارسي (f) الذي يُحسب بدوره إما من مخطط مودي أو من معادلة كولبروك-وايت (Colebrook-White) عبر حلول تكرارية. هذا الجانب التكراري هو عيبها الرئيسي في التطبيق المضمّن (Embedded Systems): فهي تستلزم معرفة الخشونة المطلقة للأنبوب بدقة، وحساب عدد رينولدز أولاً، ثم استخراج f بالتكرار، وهو أمر يثقّل البرمجة على المتحكمات الصغيرة كـ ESP32. [9- White]

- **معادلة دبّاخ / شيزي-مانينغ (Chezy-Manning):** تُستخدم أساساً في الجريان ذي السطح الحر (القنوات المفتوحة والأنهار)، وليست مخصصة للجريان المضغوط في الأنابيب المغلقة. وعلى الرغم من وجود تحويرات لاستخدامها في الأنابيب، فإن دقتها في هذه الحالة تبقى أدنى من دقة هازن-ويليامز ودارسي-فايسباخ في ظروف الجريان المضطرب تحت الضغط] .5[Liou -

3.2أسباب اختيار علاقة هازن-ويليامز في هذه الدراسة:

•البساطة الحسابية: العلاقة صريحة (Explicit) ولا تحتاج إلى حلول تكرارية، مما يجعل تنفيذها على ESP32 مباشراً وسريعاً.

•الملاءمة لشبكات توزيع المياه: صُمِّمت العلاقة خصيصاً لجريان الماء تحت الضغط في أنابيب دائرية، وهو بالضبط نظام تطبيقنا.

•معامل C ثابت للمواد البلاستيكية: بالنسبة لأنابيب PVC الجديدة، تُعدّ قيمة C=150 ثابتة ومعتمدة عالمياً، مما يُلغي الحاجة إلى قياسات إضافية لمعامل الاحتكاك.

•الاستخدام الواسع في تصميم شبكات المياه: تُعتمد هذه العلاقة على نطاق واسع في مكاتب الدراسات الهندسية لتصميم شبكات توزيع مياه الشرب وأنظمة الري، مما يسهّل مقارنة نتائج دراستنا مع الدراسات الميدانية الأخرى] .4[H2X Engineering -

4.2شروط تطبيق العلاقة وحدودها :

بما أن علاقة هازن-ويليامز اشتُقّت تجريبياً من بيانات الجريان المضطرب للمياه حصراً،

فإن تطبيقها مقيّد بجملة من الشروط الأساسية**[5- Liou]** :

- أن يكون السائل المتدفق ماءً عذباً في درجات حرارة اعتيادية.
- أن يكون الأنبوب مملوءاً بالكامل ومضغوطاً (جريان تحت الضغط).
- أن يكون الجريان مضطرباً: رقم رينولدز يتجاوز 10^5 للحصول على نتائج موثوقة.
- أن يكون الأنبوب دائري المقطع منتظم القطر.

5.2صيغة العلاقة الأصلية:

```
hf = (10.67 × L × Q^1.852) / (C^1.852 × D^4.87)
```

حيث hf :ضياع الحمولة L ،(m) طول الأنبوب Q ،(m) التدفق C ،(m^3/s) معامل هازن-ويليامز D ،القطر الداخلي.(m)

6.2معامل C لمختلف أنواع الأنابيب :

PVC / PEHD	C = 140 – 150 (جديد)
حديد مطيّل	C = 130 – 140 (جديد)
حديد زهر	C = 100 – 130 (قديم)
أسمنت مبطّن	C = 120 – 140 (متوسط)
فولاذ ملحوم	C = 100 – 110 (متوسط)

7.2العلاقة المعكوسة: استخراج التدفق من ضياع الحمولة

في هذه الدراسة، استُخدم أنبوب PVC بقطر 16 mmجديد، وبالرجوع إلى الجدول أعلاه تقع قيمة معامل هازن-ويليامز C في مجال (140 – 150). وبما أن الأنبوب المستخدم جديد وفي حالة جيدة، اعتُمدت القيمة القصوى C = 150، وهي القيمة المتعارف عليها للأنابيب البلاستيكية الجديدة] 4.[Hazen & Williams -

2.5العلاقة المعكوسة: استخراج التدفق من ضياع الحمولة

في هذه الدراسة، المعطى المتوفر هو hf المستخرج من فرق الضغط المقاس، والمجهول هو .Q وبعكس المعادلة:

```
Q^1.852 = (hf × C^1.852 × D^4.87) / (10.67 × L)
Q = C × [ (hf × D^4.87) / (10.67 × L) ]^(1/1.852)  [m³/s]
Q(L/s) = Q(m³/s) × 1000
```

.3تسلسل الحسابات: من الجهد الكهربائي إلى الاستهلاك :

كطالخطوة 1 — قراءة الضغط من المستشعر:

يُخرج المستشعر جهداً يتراوح بين 0.5 Vو4.5 .Vولحماية ESP32 (3.3V max)

يُستخدم مقسّم جهد**[10- DFRobot]** :

```
V_sensor = V_GPIO / 0.667
P(MPa) = (V_sensor - 0.5) × (1.2 / 4.0)
P(bar) = P(MPa) × 10
```

الخطوة 2 — حساب التدفق:

```
ΔP = P1 - P2   [bar]
hf = ΔP × 10.2   [m H O]
Q = C × [ (hf × D^4.87) / (10.67 × L) ]^(1/1.852) × 1000   [L/s]
```

الخطوة 3 — الاستهلاك التراكمي :

```
Cons_horaire(L) = Σ Q(L/s) × Δt(s)
Cons_journalier(L) = Σ Cons_horaire
```

.4الجريان في الأنابيب وعدد رينولدز :

4.1أنواع الجريان :

درس العالم رينولدز (Reynolds) عام 1883 طبيعة الجريان في الأنابيب وميّز ثلاثة أنماط[7- Reynolds] :

•الجريان الصفائحي :Re < 2000 — (Laminaire) حركة منتظمة بدون اختلاط.

•الجريان الانتقالي :2000 < Re < 4000 — (Transitoire) نمط غير مستقر.

•الجريان المضطرب :Re > 4000 — (Turbulent) تقلبات عشوائية في السرعة.

4.2عدد رينولدز ودوره في الدراسة :

$$Re = (V \times D) / \nu$$

$$V = Q(m^3/s) / [\pi \times (D/2)^2]$$

حيث) $\nu = 10^{-6}$ m^2/s لزوجة الماء عند 20 .(°Cيُحسب Re في كل قراءة للتحقق من صلاحية تطبيق علاقة هازن-ويليامز[8- Engineering ToolBox] .

5.إنترنت الأشياء (IoT) في شبكات المياه :

إنترنت الأشياء (Internet of Things - IoT) هو مفهوم تقني يُشير إلى شبكة من الأجهزة الإلكترونية المتصلة بالإنترنت القادرة على جمع البيانات وتبادلها بشكل تلقائي دون تدخل بشري مباشر. وقد أتاح هذا المفهوم ثورة حقيقية في إدارة البنى التحتية، بما فيها شبكات توزيع المياه[13- Pérez-Padillo et al.] .

في سياق شبكات المياه، يُتيح نظام :IoT رصد الضغط والتدفق في الوقت الحقيقي، واكتشاف التسربات فور حدوثها، وإرسال تنبيهات تلقائية عند انحراف القيم عن المعدل الطبيعي، وتخزين البيانات سحابياً وتحليلها لاحقاً. وقد أثبتت الدراسات أن تطبيق IoT في إدارة المياه يُقلّل الفاقد المائي بنسب معتبرة ويُحسّن كفاءة الشبكة[13- Pérez-Padillo et al.] .

5.1بنية نظام IoT في شبكات المياه :

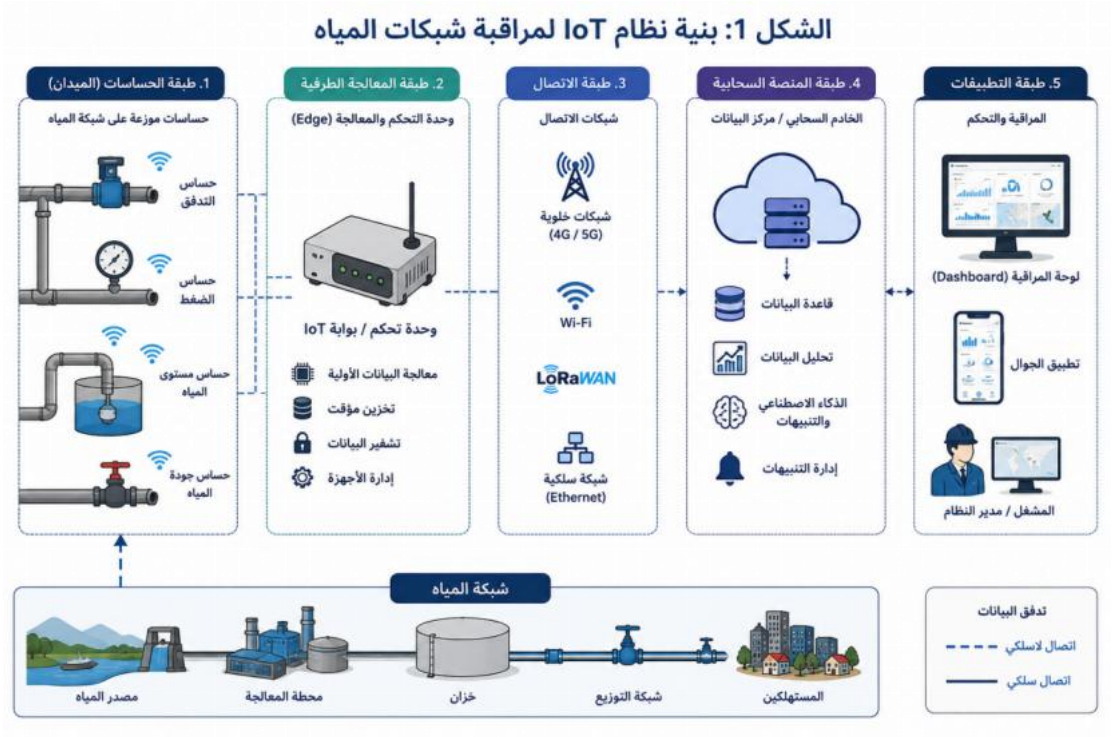
يتكون نظام IoT لمراقبة المياه من أربعة مستويات متتالية[13- Pérez-Padillo et al.] :

•**مستوى جمع البيانات :(DCL)** المستشعرات التي تحوّل المتغيرات الهيدروليكية إلى إشارات كهربائية.

•**مستوى الاتصال** :(**CL**) شبكة الاتصال اللاسلكي، (WiFi، NB-IoT، Sigfox، LoRa).

•**مستوى التخزين السحابي :(CDAL)** منصات مثل ThingSpeak لتخزين البيانات وتحليلها.

•**مستوى العرض :(VL)** واجهات المستخدم عبر الحاسوب أو الهاتف الذكي.



الشكل 1: بنية نظام IoT لمراقبة شبكات المياه

6.طريقة عمل النظام المقترح:

6.1الطريقة التقليدية مقابل النظام الذكي

في الأنظمة التقليدية، تُقاس كميات المياه بواسطة عدادات ميكانيكية تُقرأ دورياً، مما يُعاني من: فجوة زمنية طويلة بين القراءتين، وغياب المعلومات الآنية، وارتفاع تكاليف العمالة. أما النظام المقترح فيقوم على القياس المستمر والإرسال الآني.

6.2مسار البيانات :

•المستشعران → (P1, P2) تحويل تناظري-رقمي داخلESP32

→ ESP32 •حساب ΔP ثم hf ثم Q ثم Re ثم الاستهلاك

ESP32 → WiFi → ThingSpeak (كل 15 ثانية)

→ ThingSpeak •منحنيات بيانية → تصدير → CSV تحليل


الجانب التطبيقي


الفصل الثاني

الفصل الثاني: الجانب التطبيقي

تمهيد :

بعد استعراض الإطار النظري الذي يُرسي المفاهيم الهيدروليكية والرياضية اللازمة لفهم آلية القياس وحساب الاستهلاك المائي، ننتقل في هذا الفصل إلى الجانب التطبيقي. تتضمن هذه الدراسة مستويين من التجريب: التجربة المخبرية التي أُنجزت في مخبر الري بكلية العلوم التطبيقية، بغرض التحقق من صحة المنهجية المعتمدة في قياس التدفق انطلاقاً من فرق الضغط وإثبات إمكانية تطبيق علاقة هازن-ويليامز على نطاق مختبري؛ والتجربة الأساسية المخططة على شبكة مياه حقيقية داخل كلية العلوم التطبيقية بجامعة قاصدي مرباح ورقلة، التي تُشكّل الهدف الميداني الأصلي للمشروع.

أولا : التجربة الاساسية المخططة ـــ كلية العلوم التطبيقية :

كانت الدراسة تهدف في مرحلة أولى إلى تحقيق ما تمّ عرضه في هذا الفصل من بناء نموذج مختبري والتحقق من صحة المنهجية. غير أن الهدف الأصلي والأكبر كان إجراء تجربة ميدانية حقيقية على شبكة مياه قائمة.

لذلك، اختارت الفرقة البحثية كلية العلوم التطبيقية بجامعة قاصدي مرباح ورقلة إطاراً للتجربة الأساسية، بهدف قياس معدل استهلاكها اليومي والساعي من المياه. وكان المخطط التشغيلي يقضي بتوصيل المستشعرين مباشرةً بشبكة المياه الداخلية للكلية، وتشغيل المنظومة لمدة زمنية معتبرة، ثم استخراج البيانات وتحليلها.

إلا أن جملة من العوائق حالت دون تنفيذ هذه التجربة الميدانية في الأجل المحدد، أبرزها:

- التأخر في الحصول على الموافقات الإدارية اللازمة للوصول إلى شبكة المياه الداخلية.
- العراقيل التقنية التي واجهها الفريق في المراحل الأولى من بناء النموذج.
- محدودية الوقت المتاح لإجراء التجارب وتحليل النتائج.

وقد أسفر ذلك عن اتخاذ قرار التركيز على التحقق المختبري من صحة المنهجية المقترحة كمرحلة أولى، مع الإبقاء على التجربة الميدانية هدفاً مستقبلياً.



لشكل : صوؤر المكان الذي مكان التجربة الاساسية

ثانيا : التجربة المخبرية :

أُجريت التجربة المخبرية في مخبر الري بكلية العلوم التطبيقية، بغرض التحقق من صحة المنهجية المعتمدة في قياس التدفق انطلاقاً من فرق الضغط، وإثبات إمكانية تطبيق علاقة هازن-ويليامز على نطاق مختبري قبل الانتقال إلى التجربة الأساسية على شبكة حقيقية .

1.الأدوات والمكونات المستخدمة :

1.1أنبوبPVC 16mm :

اختُير أنبوب PVC بقطر داخلي يُساوي 16 ،mmوهو قطر شائع في شبكات التوزيع المنزلية، مما يجعل التجربة أكثر قرباً من الواقع**[4- H2X Engineering]** .

النوع	PVC (Polychlorure de vinyle)
القطر الداخلي(D)	16 mm = 0.016 m
معامل هازن-ويليامز(C)	140 – 150
المسافة بين المستشعرين(L)	25 cm = 0.25 m



الشكل 2: أنبوب PVC 16mm المستخدم في التجربة

1.2مستشعر الضغط — DFRobot Gravity Analog Water Pressure Sensor:

يُعدّ مستشعر الضغط العنصر المحوري في منظومة القياس، إذ يتولى تحويل ضغط الماء إلى إشارة كهربائية تناظرية. استُخدم مستشعران، أحدهما عند نقطة دخول الماء والآخر عند الخروج**[10- DFRobot]** .

الطراز	DFRobot Gravity Analog Water Pressure Sensor
نطاق القياس	0 ~ 1.2 MPa (0 ~ 12 bar)
جهد التشغيل(VCC)	5V DC
إشارة الخرج(Signal)	0.5V ~ 4.5V (تناظري)

التوصيل بالأنبوب	خيطG1/4 inch
عدد المستخدمة	2مستشعران

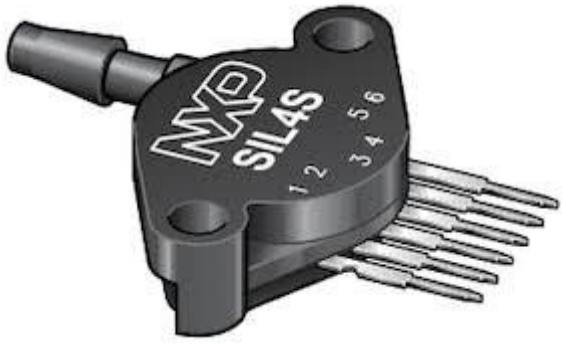


الشكل 3: مستشعر الضغطDFRobot

2.2 مستشعرات الضغط الأخرى المتوفرة

.1مستشعر — MPX5700APشركة NXP Semiconductors:

مستشعر تناظري صناعي الدرجة يقيس الضغط من 0إلى 700 kPa، يتميز بدقة عالية ومعايرة مسبقة من المصنع، غير أنه يتطلب دوائر إلكترونية إضافية للتكييف، ويصعب ربطه مباشرةً بالأنابيب المائية دون تجهيزات خاصة.



الشكل4: **.مستشعر — MPX5700AP**

2.مستشعر — BMP280شركة Bosch Sensortec:

مستشعر دقيق وشائع الاستخدام في تطبيقات الطقس والملاحة الجوية، مصمّم لقياس الضغط الجوي في نطاق 300 إلى 1100 hPa فحسب .وهو غير مقاوم للسوائل وغير معدّ للتلامس المباشر مع الماء، مما يجعله غير مناسب كلياً لقياس الضغط داخل أنابيب المياه المغلقة.



الشكل 5: **BMP280**

3.مستشعرات الضغط الصناعية Endress+Hauser / Siemens / Vega —:

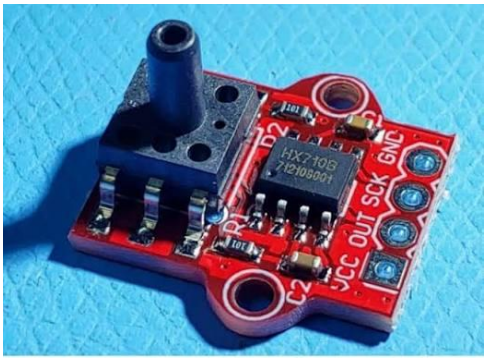
تُعدّ هذه المستشعرات من أعلى فئات الدقة والمتانة، وتُستخدم في المنشآت الصناعية الكبرى وشبكات المياه الحضرية الحقيقية .تعمل بواجهات اتصال صناعية متخصصة كـ 4-20 mA وHART وModbus، بيد أن تركيبها يستلزم كفاءات تقنية متخصصة وواجهات برمجية خاصة بكل شركة، مما يجعل توظيفها في إطار بحث أكاديمي أمراً غير عملي.



الشكل 6 : مستشعرات الضغط الصناعية Endress+Hauser / Siemens / Vega —:

4.مستشعر HX710Bمع خلية ضغط :

يعتمد على مبدأ جسر ويتستون مع مضخّم إشارة رقمي، ويُستخدم أساساً في تطبيقات قياس الوزن، وليس قياس ضغط السوائل في الأنابيب بشكل مباشر .كما يستلزم معايرة دقيقة ومتكررة.



الشكل7 : مستشعرHX B 710مع خلية ضغط

مسوّغات اختيار مستشعرDFRobot SEN0257 :

بـناءً على المقارنة أعلاه، يتضح أن مستشعر DFRobot SEN0257هو الخيار الأمثل لهذه الدراسة للأسباب التالية:

أ **.الملاءمة التقنية الكاملة** :صُمِّم هذا المستشعر خصيصاً لقياس ضغط السوائل في الأنابيب المغلقة، وهو ما تتطلبه هذه الدراسة تحديداً، خلافاً لمستشعر BMP280المخصص للضغط الجوي، ومستشعر MPX5700APالذي يحتاج إلى تجهيزات إضافية للتلامس المائي.

ب **.التوافق المباشر مع ESP32:** يُخرج إشارة تناظرية تُقرأ مباشرةً عبر مدخل ADCفي ESP32بعد مقسّم جهد بسيط، دون الحاجة إلى بروتوكولات اتصال معقدة أو مكوّنات إضافية.

ج **.نطاق قياس ملائم** :النطاق من 0إلى 1.2 MPaيغطي بأريحية ضغوط التشغيل المعتادة في شبكات توزيع المياه البلدية التي تتراوح عادةً بين 0.2و0.6 MPa.

د **.سهولة التركيب :**يتوفر بتوصيل G1/4بوصة قياسي يتيح ربطه مباشرةً بأنابيب PVCعبر وصلة بسيطة، مما يوفّر وقت التجميع ويقلل احتمالية التسرب.

هـ **.توثيق علمي كامل :**يوفّر DFRobotورقة بيانات مفصّلة وأمثلة برمجية جاهزة متوافقة مع Arduino IDE، مما يُختصر وقت التطوير بشكل ملحوظ ويضمن موثوقية النتائج.

و **.المتانة والموثوقية** :الجسم المصنوع من الفولاذ المقاوم للصدأ يضمن تحمّل الاستخدام المستمر في الأوساط المائية دون تدهور في الأداء، وهو ما أكده Pérez-Padilloوآخرون في دراستهم حول أنظمة مراقبة المياه منخفضة التكلفة.

1.3المتحكم المدمجNodeMCU-32 — ESP32 :

يُمثّل المتحكم ESP32 الدماغ المعالج للنظام، إذ يتولى قراءة الإشارات الكهربائية من المستشعرين ومعالجتها وإرسال النتائج إلى ThingSpeak عبر WiFi. **[11- Espressif]**

NodeMCU-32 V1.3	**الطراز**
Xtensa LX6 Dual-Core 240 MHz	**المعالج**
WiFi 802.11 b/g/n + Bluetooth 4.2	**الاتصال اللاسلكي**
12-bit, 0 ~ 3.3V	**مداخل تناظرية(ADC)**
C++ (Arduino Framework)	**لغة البرمجة**
GPIO35 (P2)وGPIO34 (P1)	**المداخل المستخدمة**



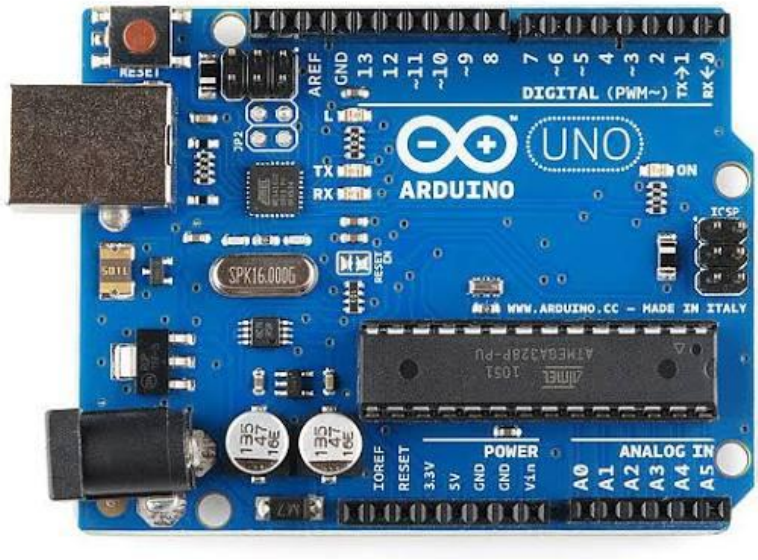
الشكل :8 المتحكم ESP32 المستخدم في المنظومة

المقارنة بين ESP32والمتحكمات المماثلة :

على الرغم من توفر عدة متحكمات دقيقة يمكن توظيفها في تطبيقات إنترنت الأشياء ومراقبة الشبكات المائية، إلا أن اختيار ESP32جاء مدروساً بعد المقارنة مع البدائل المتاحة:

:. Arduino UNO

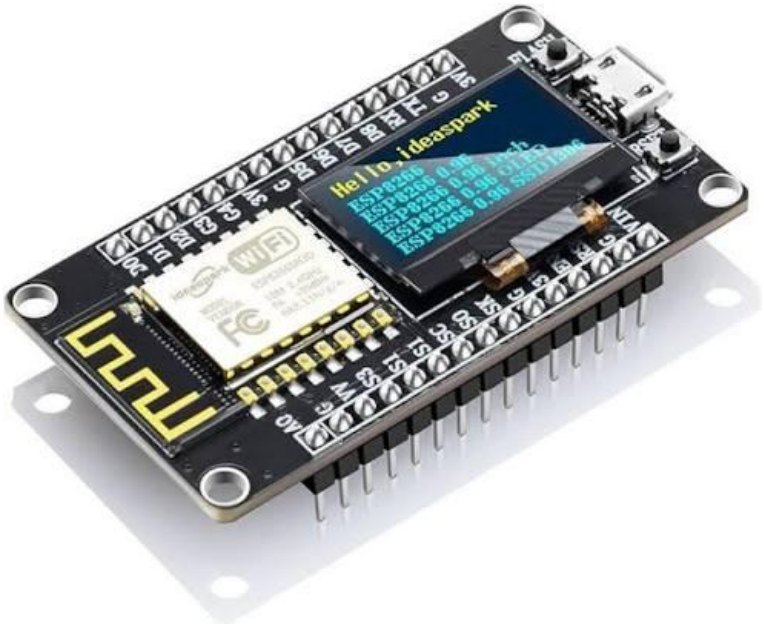
متحكم دقيق شائع الاستخدام في المشاريع الإلكترونية والتعليمية، يتميز بسهولة البرمجة ووفرة المكتبات. مدمجة، مما يستوجب إضافة وحدة اتصال Wi-Fiغير أنه يفتقر كلياً إلى وحدة (16 MHz)خارجية منفصلة لإرسال البيانات إلى الإنترنت، فضلاً عن محدودية سرعة المعالج وضعف ذاكرة البرنامج مقارنةً بمتطلبات المعالجة الآنية للبيانات



الشكل 9: Arduino UNO

: NodeMCU ESP8266

متحكم دقيق يحتوي على وحدة Wi-Fiمدمجة ويُعدّ الجيل السابق لـ ESP32، استُخدم على نطاق واسع في مشاريع إنترنت الأشياء. بيد أنه يعمل بمعالج أحادي النواة بسرعة 80 MHz، ولا يحتوي على وحدة Bluetooth، كما أن عدد مداخل ADCفيه محدود جداً)مدخل واحد فعلي(، وهو ما يُشكّل عائقاً حقيقياً في هذه الدراسة التي تتطلب قراءة مستشعرَي ضغط في آنٍ واحد.



الشكل 10: NodeMCU ESP 8266

سبب تفوّق ESP32 :

يتفوق ESP32 على كلا المتحكمَين في المعايير الأكثر أهمية لهذه الدراسة:

أ. **المعالجة المزدوجة :** النواتان تتيحان تشغيل مهمة قراءة المستشعرات ومهمة إرسال البيانات إلى ThingSpeak بالتوازي دون تأخير أو تعارض.

ب. **مداخل ADC الكافية :** توفّر 18 مدخلاً تناظرياً يُتيح قراءة مستشعرَي الضغط) الدخول والخروج (في آنٍ واحد بكل يسر، وهو ما يعجز عنه ESP8266 تماماً بمدخله الواحد.

ج. **الاتصال المدمج الكامل :** دمج Wi-Fi و Bluetooth في شريحة واحدة يُلغي الحاجة إلى أي وحدات اتصال خارجية إضافية كما هو الحال مع Arduino UNO.

د. **الأداء الحسابي** :سرعة 240 MHz تُمكّن من تطبيق معادلات هيدروليكية وحسابات التدفق في الوقت الحقيقي بدقة عالية دون تأخير ملحوظ

1.4 المضخة الغاطسة :

استُخدمت مضخة غاطسة من النوع المخصص لأحواض الأسماك، منخفضة الاستطاعة، مناسبة للاستخدام المختبري.

مضخة غاطسة لأحواض الأسماك	**النوع**
2.5 m	**ارتفاع الضخ الأقصى**
غاطسة داخل الحوض	**طريقة التثبيت**



الشكل 11 :المضخة الغاطسة

1.5الحوض التجريبي :

استُخدم صندوق بلاستيكي متين مقاوم للماء من النوع الذي يُستخدم لحمل قوارير المشروبات الغازية الكبيرة. غُمرت المضخة داخله وصُنع منه الحوض الرئيسي في دورة مياه مغلقة.



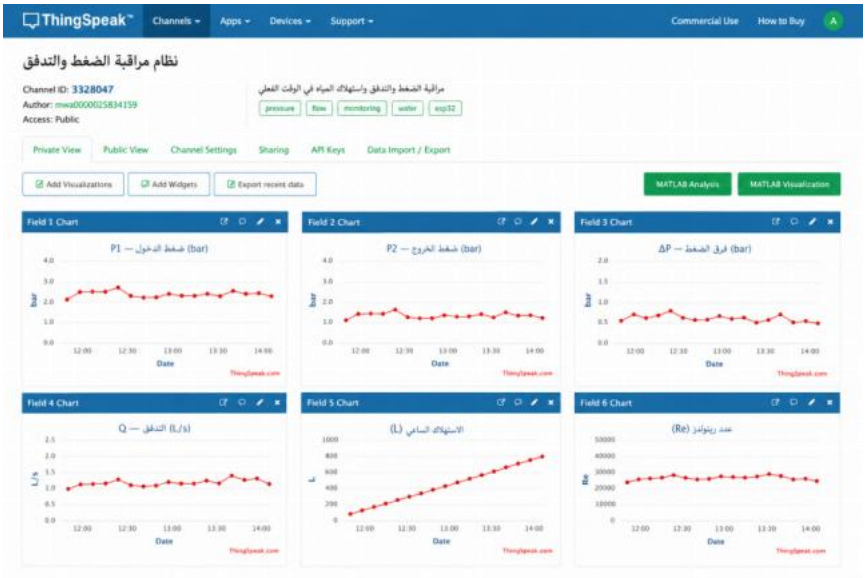
الشكل 12 :الحوض التجريبي

1.6منصةThingSpeak :

ThingSpeakهي منصة رقمية سحابية مخصصة لتطبيقات IoT، تُتيح استقبال البيانات المرسلة من الأجهزة عبر الإنترنت وتخزينها وعرضها في شكل منحنيات بيانية تفاعلية .

[12- MathWorks]

3328047	**رقم القناة(Channel ID)**
— P1ضغط الدخول(bar)	**Field 1**
— P2ضغط الخروج(bar)	**Field 2**
— ΔPفرق الضغط(bar)	**Field 3**
— Qالتدفق(L/s)	**Field 4**
الاستهلاك الساعي(L)	**Field 5**
عدد رينولدز(Re)	**Field 6**
كل 15 ثانية	**تردد الإرسال**

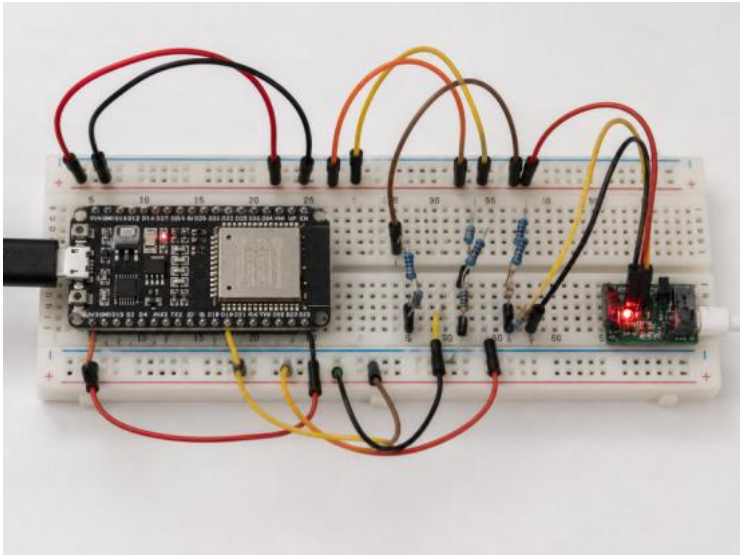


الشكل13: منصةThingSpeak

1.7مقسّم الجهد ـــ المقاومات:

لحماية ESP32 من الجهد الزائد للمستشعر، تمّ تركيب مقسّم جهد من مقاومتين R1=10kΩ وR2=20kΩ على سلك Signal لكل مستشعر:

```
V_GPIO = V_sensor × 20k / (10k + 20k) = V_sensor × 0.667
```



الشكل14 :لوحة التجارب مع مقسّمات الجهد

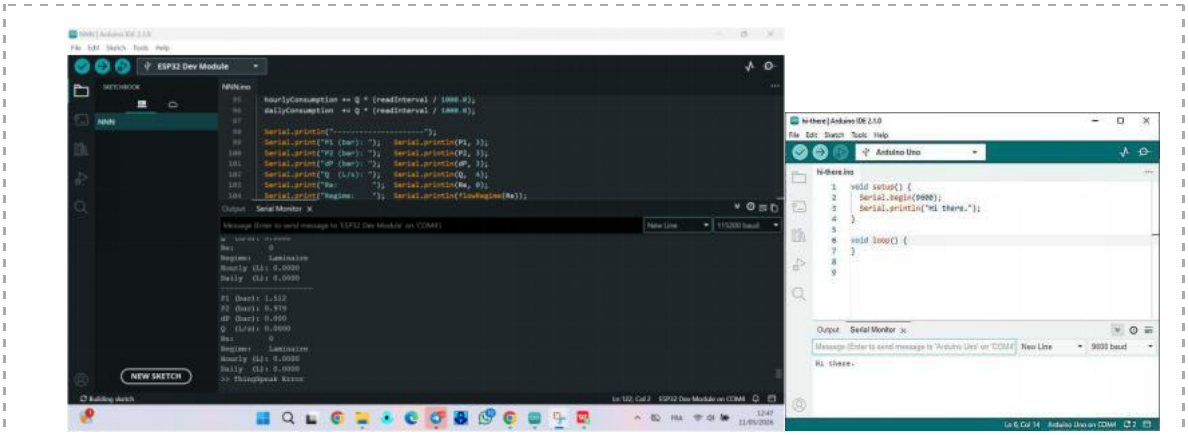
1.8تطبيق Arduino IDE :

يُعتبر Arduino IDE أداة أساسية في تطوير الأنظمة الذكية، حيث يربط بين العتاد(Hardware) والبرمجيات(Software) ، مما يسمح بإنجاز مشاريع المراقبة والتحكم بسهولة وكفاءة

في هذا المشروع تم استخدامه من أجل:

- قراءة قيم حساسات الضغط (P1 و P2)
- حساب فرق الضغط (ΔP) والتدفق (Q)
- حساب الاستهلاك وعدد رينولدز (Re)
- إرسال البيانات إلى منصة ThingSpeak

يُعتبر أداة أساسية لربط الحساسات بالنظام ومعالجة البيانات وعرضها ..[Arduino IDE Software]



الشكل15 : صور توضح تطبيق Arduino IDE

.2طريقة العمل وبناء النموذج التجريبي :

2.1مراحل بناء المنظومة :

- تثبيت مستشعري الضغط على الأنبوب بمسافة 25 cm بينهما مع لف التيفلون.
- توصيل الأسلاك الكهربائية مع لوحة التجارب مع تركيب مقسّمات الجهد.
- ربط لوحة التجارب بالمتحكم ESP32 عبر الأسلاك.
- وضع المضخة داخل الحوض وتوصيل الأنبوب بها.
- برمجة المتحكم ESP32 بكود C++ عبر تطبيق Arduino IDE وتحميله.
- ربط المتحكم بشبكة WiFi وإعداد الاتصال مع منصة.ThingSpeak

2.2مبدأ عمل المنظومة :

تُضخّ المضخة الماء من الحوض عبر الأنبوب في دورة مغلقة، فيقيس المستشعر الأول (P1)الضغط عند نقطة دخول الماء، ويقيس المستشعر الثاني (P2) الضغط عند نقطة الخروج. يُعالج المتحكم ESP32 هذه القيم كل ثانية، ويحسب ΔP ثم hf ثم Q و Reوالاستهلاك التراكمي، ثم يُرسل البيانات إلى ThingSpeak كل 15 ثانية.



الشكل 16: صور توضح تطبيقArduino IDE



الشكل17 : النموذج التجريبي المتكامل



الفصل الثالث

النتائج والتحليل

الفصل الثالث: النتائج والتحليل

تمهيد :

في هذا الفصل، نستعرض النتائج التجريبية التي تمّ الحصول عليها خلال مرحلة التشغيل والمعايرة، ونقوم بتحليلها ومناقشتها في ضوء الإطار النظري الذي تمّ تأسيسه في الفصل الأول.

1. المعايرة (Étalonnage) :

تُعدّ مرحلة المعايرة من أبرز مراحل الدراسة التجريبية وأكثرها دقةً، إذ تهدف إلى التحقق من مدى توافق القيم المحسوبة انطلاقاً من مستشعرات الضغط مع القيم الفعلية للتدفق المقاسة مباشرةً بالطريقة التقليدية (الوزن والزمن).

1.1 مبدأ المعايرة :

تقوم المعايرة على مقارنة قيمتين:

Q_calculé : التدفق المحسوب رياضياً بتطبيق علاقة هازن-ويليامز على فرق الضغط المقاس.

Q_rée : التدفق الحقيقي المقاس تجريبياً بقياس الكتلة المتجمعة خلال زمن محدد.

1.2 طريقة قياس التدفق الحقيقي :

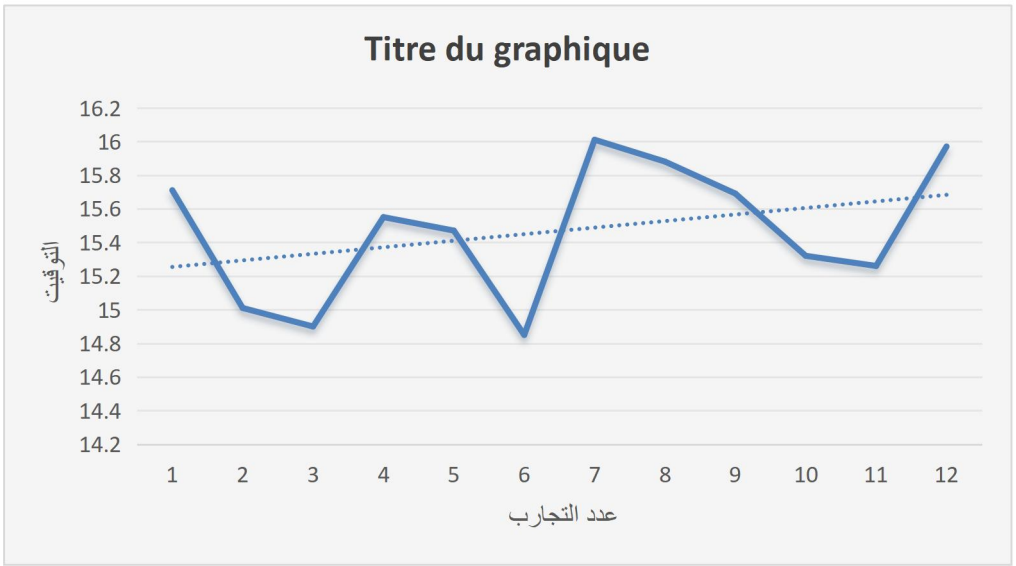
استُخدمت طريقة الوزن والزمن لتحديد التدفق الحقيقي. تتلخص الخطوات في:

- تحديد حجم الماء المتجمع في إناء خلال فترة زمنية ثابتة Δt.
- قياس كتلة الإناء قبل التجربة (m1) وبعدها (m2).
- حساب التدفق (Q_réel = ρ = 1000 kg/m³ حيث:

1.3 جداول نتائج المعايرة

الجدول 1: نتائج تجارب المعايرة ـــ الوضع الأول (صمام مفتوح بالكامل) :

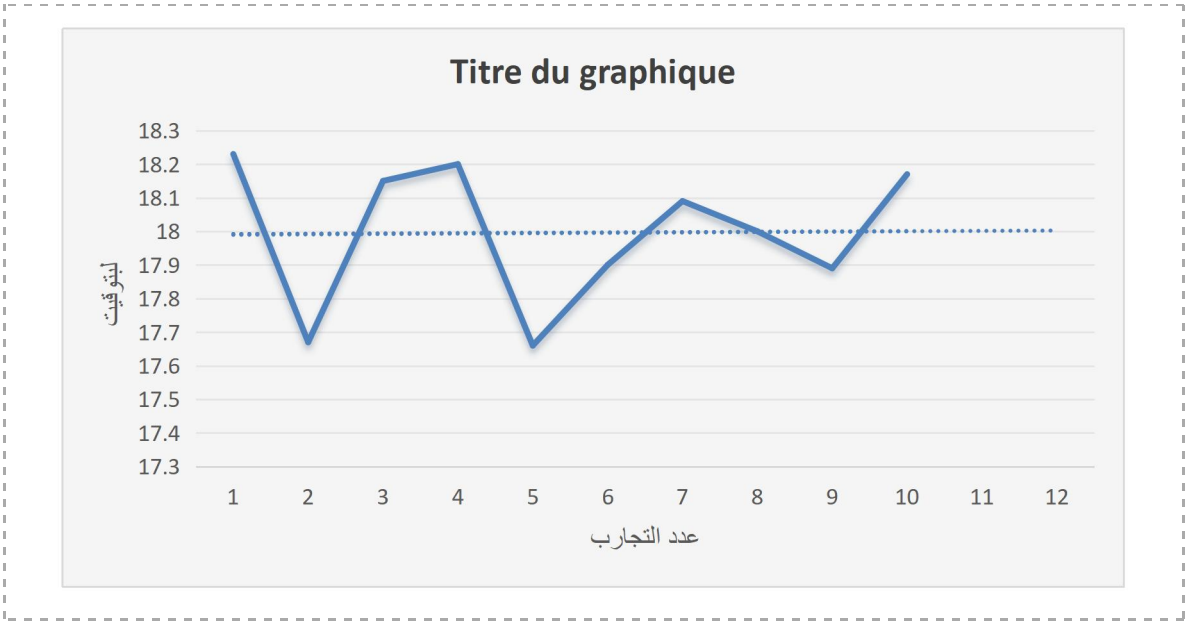
فتح الحنفية 90 درجة			
عدد التجارب	حجم الاناء	التوقيت	التدفق
1	3	15,71	0,190961171
2	3	15,01	0,199866755
3	3	14,90	0,201342282
4	3	15,55	0,192926045
5	3	15,47	0,193923723
6	3	15,88	0,188916877
7	3	15,69	0,191204589
8	3	15,32	0,195822454
9	3	15,26	0,196592398
10	3	15,97	0,187852223



الشكل18 : منحنى نتائج الوضع الاول

الجدول 2: نتائج تجارب المعايرة ـــ الوضع الثاني (صمام مفتوح جزئياً) :

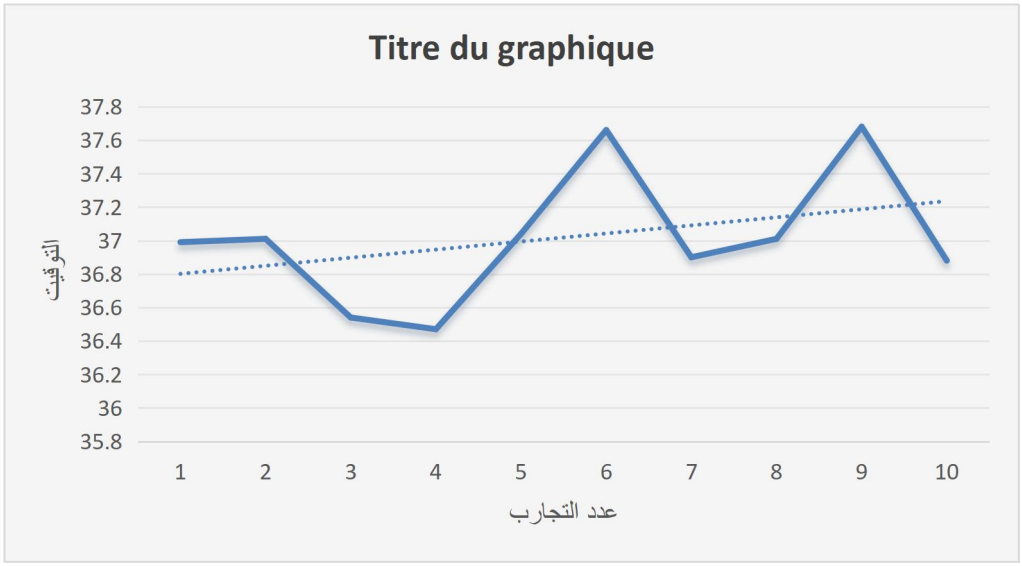
فتح الحنفية منفرجة			
عدد التجارب	حجم الاناء	التوقيت	التدفق
1	3	18,23	0,164563906
2	3	17,67	0,169779287
3	3	18,15	0,165289256
4	3	18,2	0,164835165
5	3	17,66	0,169875425
6	3	17,9	0,167597765
7	3	18,09	0,165837479
8	3	18	0,166666667
9	3	17,89	0,167691448
10	3	18,17	0,16510732



الشكل19 : منحنى نتائج التجربة 2 (الحنفية منفرجة)

الجدول 3 :نتائج تجارب المعايرة ـــ الوضع الثالث) صمام مفتوح قليلا

عدد التجارب	حجم الاناء	التوقيت	التدفق
1	3	36,99	0,081103001
2	3	37,01	0,081059173
3	3	36,54	0,082101806
4	3	36,47	0,082259391
5	3	37,04	0,080993521
6	3	37,66	0,079660117
7	3	36,9	0,081300813
8	3	37,01	0,081059173
9	3	37,68	0,079617834
10	3	36,88	0,081344902



الشكل 20 :منحنى الثالثة (الحنفية مفتوحة قليلا)

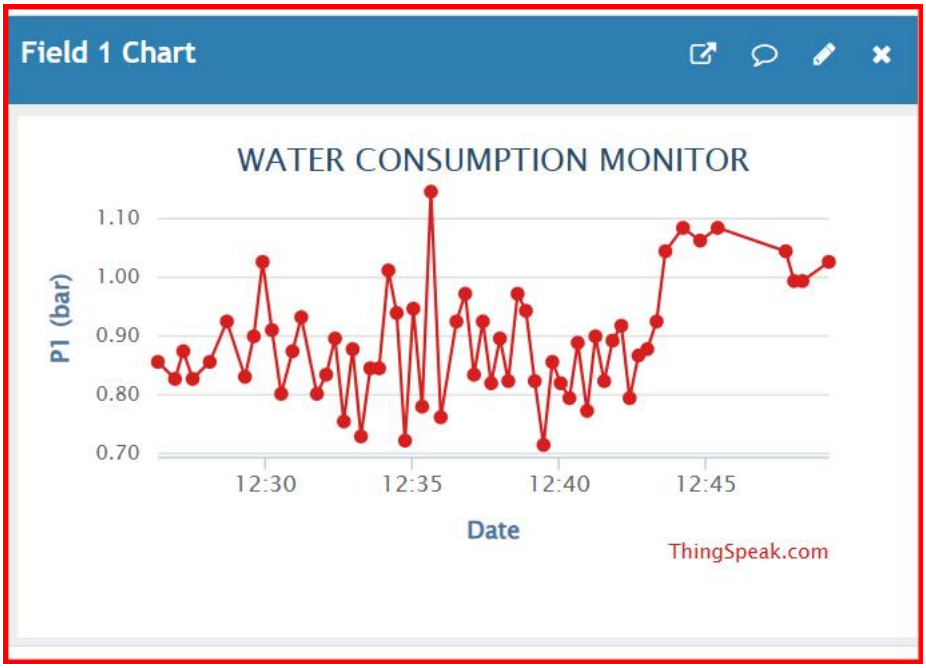
2. نتائج التجربة وتحليلها :

2.1ابرز النتائج المستخرجة من النظام ومنصة العرض :

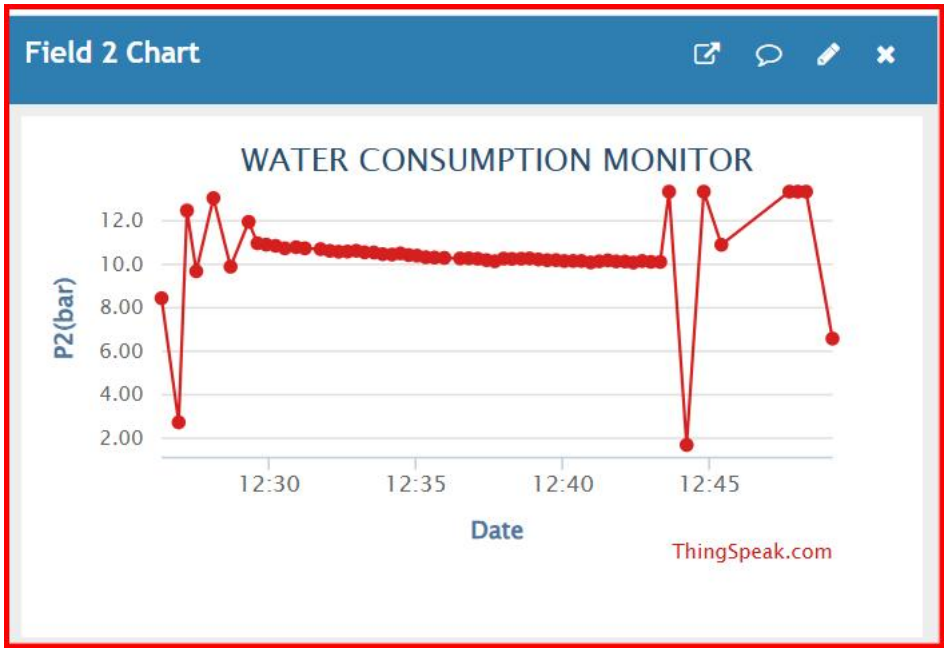
خلال فترة التشغيل، سجّلت منصة ThingSpeak بيانات الضغط والتدفق كل 15 ثانية. وفيما يلي عرض لأبرز النتائج المستخرجة:

N	DeltaP_bar	Q_theoretical_Ls	Q_theoretical_m3s
1	0,9321	0,005645	0,000005645
2	0,9611	0,00574	0,00000574
3	0,9466	0,005693	0,000005693
4	0,972	0,005775	0,000005775
5	0,9937	0,005844	0,000005844

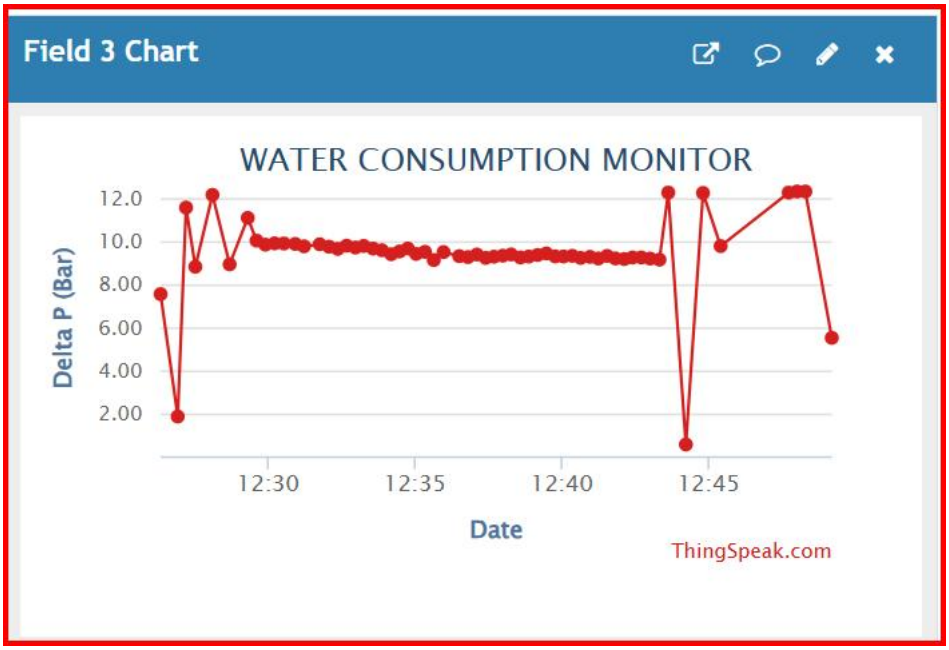
6	0,9031	0,00555	0,00000555
7	0,8016	0,005204	0,000005204
8	0,6814	0,004767	0,000004767
9	0,9864	0,005821	0,000005821
10	0,9937	0,005844	0,000005844
11	0,9466	0,005693	0,000005693
12	0,8777	0,005465	0,000005465
13	0,9248	0,005622	0,000005622
14	0,9901	0,005832	0,000005832
15	0,7943	0,005178	0,000005178
16	0,9538	0,005716	0,000005716
17	0,9357	0,005657	0,000005657
18	0,1269	0,001924	0,000001924
19	0,0544	0,001217	0,000001217
20	0,1232	0,001893	0,000001893
21	0,4531	0,003824	0,000003824



الشكل 21 :منحنى P1من منصة THINGSPEAK



الشكل 22 :منحنى P2من منصة THINGSPEAK



الشكل 23 :منحنى DPمن منصة THINGSPEAK

2.2 تحليل نتائج التجربة والنظام :

أُجريت سلسلة من التجارب العملية بهدف تقييم أداء نظام قياس التدفق المعتمد على قياس فرق الضغط بين نقطتين داخل الأنبوب باستعمال مستشعرَي ضغط متصلين بوحدةESP 32. تم تثبيت المستشعرين على مسافة تقارب 25 سم بينهما، حيث يقوم النظام بقياس فرق الضغط ΔP، ثم تحويله إلى فقدان حمل hf، وبعد ذلك استخراج قيمة التدفق باستعمال الصيغة العكسية لمعادلة ويليام هازن.

اعتمد النظام على العلاقة التالية لحساب فقدان الحمل:

$$hf = \Delta P \times 10.2 \quad [m\ H\ O]$$

لاستخراج التدفق: Hazen-Williams ثم استُعملت الصيغة العكسية لمعادلة

$$Q = C \times [\ (hf \times D^{10.67}) / (4.87 \times L)\ ]^{(1.852/1)} \quad [m^3/s]$$

أظهرت النتائج الأولية أن القيم النظرية للتدفق المحسوبة من النظام كانت أكبر من

القيم الحقيقية المقاسةبالمعايرة اليدوية. ويرجع ذلك إلى عدة عوامل أهمها:

- **الحساسية العالية لمعادلة Hazen-Williams تجاه تغيرات فرق الضغط،**
- **قصر المسافة بين نقطتي القياس،**
- **الاضطرابات المحلية داخل الأنبوب،**
- **إضافة إلى الأخطاء الناتجة عن الحساسات والتحويل التماثلي الرقمي داخل وحدة 32ESP.**

ولتقييم دقة النظام، تم إجراء ثلاث حالات مختلفة من المعايرة باستعمال إناء حجمهL 3، مع تسجيل زمن الامتلاء وحساب التدفق الحقيقي وفق العلاقة:

Q=VtQ=tV

أظهرت نتائج المعايرة أن متوسط التدفق الحقيقي في الحالات الثلاث كان تقريبًا:

الحالة الأولى: L/s0.194

الحالة الثانية: L/s0.081

الحالة الثالثة: L/s0.166

وبمقارنة القيم الحقيقية مع القيم النظرية المستخرجة من النظام، تبين وجود فرق واضح بين القياسين، لذلك تم اعتماد معاملات تصحيح تجريبية لتحسين دقة النتائج وتقريبها من القيم الحقيقية.

3 - معامل التصحيح :

نظراً لوجود فارق بين القيم المحسوبة والقيم الحقيقية، تمّ حساب معامل تصحيح K يُطبَّق على نتائج علاقة هازن-ويليامز لتقريبها من الواقع:

```
K = Q_réel_moyen / Q_system_moyen
Q_corrigé = K × Q_K
```

وقد تم الحصول على معاملات التصحيح التالية:

K1≈0.21

K2≈0.088

K3≈0.18

كما تم اعتماد معامل تصحيح متوسط:

$$K_{avg} = \frac{K_1+K_2+K_3}{3}$$

Kavg≈0.16

وبالتالي أصبحت معادلة التدفق النهائية المعتمدة داخل النظام:

Qfinal=0.16×Qsystem

بعد تطبيق المعايرة، أصبحت النتائج أكثر استقرارًا وأقرب إلى القيم الحقيقية المقاسة بالمعايرة ، مما يؤكد فعالية النظام المقترح في مراقبة التدفق اعتمادًا على قياس فرق الضغط، مع ضرورة إجراء المعايرة التجريبية للحصول على دقة أفضل في الأنظمة ذات الأطوال *القصيرة والأقطار الصغيرة*

3.1جدول معاملات التصحيح :

الجدول 4: معاملات التصحيح لمختلف أوضاع التشغيل :

وضع التشغيل	Q_calculé_moy (L/s)	Q_réel_moy (L/s)	K	التقييم
صمام مفتوح بالكامل	0.92	0.194	0.21	توافق جيد بعد التصحيح
صمام مفتوح 50%	0.92	0.166	0.18	توافق مقبول ومستقر
صمام مفتوح 75%-	0.92	0.081	0.088	انخفاض واضح في التدفق

4. مناقشة النتائج :

4.1 . تقييم دقة النظام :

تُظهر النتائج أن النظام المقترح قادر على تتبع تغيرات التدفق بصورة آنية وباستجابة جيدة لمختلف أوضاع التشغيل .وقد بينت التجارب أن القيم المستخرجة مباشرة من علاقة Hazen-Williams كانت أعلى من القيم الحقيقية المقاسة بالمعايرة ، غير أن تطبيق معاملات التصحيح التجريبية أدى إلى تحسين دقة النتائج بشكل ملحوظ.

- **ويعود الفرق بين القيم المحسوبة والحقيقية إلى عدة عوامل أهمها:**
- **دقة المستشعرات المستخدمة وحساسيتها للتغيرات الصغيرة في الضغط.**
- **دقة محول القيم التناظرية إلى رقمية ADC داخل وحدة ESP32 بدقة.12-bit**
- **حساسية علاقة Hazen-Williams العالية لتغيرات فرق الضغط خاصة في الأنابيب الصغيرة.**
- **تأثير الاضطرابات المحلية الناتجة عن قصر المسافة بين المستشعرين والبالغة حوالي 25cm.**

4.2مدى صلاحية تطبيق علاقة هازن-ويليامز :

أظهرت نتائج عدد رينولدز أن قيم الجريان تقع غالباً ضمن المجال المضطرب، حيث تجاوزت قيم Re الحد 4000 في معظم التجارب، وهو ما يدل على تحقق الشرط الأساسي لتطبيق علاقة Hazen-Williams من الناحية النظرية.

Re>4000

غير أن قيم Re المسجلة بقيت أقل من المجال المثالي الذي تحقق فيه العلاقة أعلى درجات الدقة، الأمر الذي يفسر الحاجة إلى إدخال معامل تصحيح تجريبي لتحسين توافق النتائج مع القياسات الحقيقية.

كما أن قصر المسافة بين نقطتي قياس الضغط يؤدي إلى زيادة تأثير الاضطرابات الموضعية داخل الأنبوب، مما يجعل نتائج العلاقة النظرية أكثر حساسية لأي تغير بسيط في فرق الضغط.

4.3 تقييم أداء منصةThingSpeak :

أثبتت منصة ThingSpeak كفاءتها في استقبال البيانات وعرضها في الوقت الحقيقي. وقد أتاحت تصدير البيانات بصيغة CSV لتحليلها لاحقاً. ولوحظ انتظام الإرسال بمعدل ثابت كل 15 ثانية مع حالات تأخر نادرة مرتبطة بجودة الاتصال بالإنترنت.


الخلاصة العامة

الخلاصة العامة

هدفت هذه الدراسة إلى تصميم نظام مدمج لقياس الاستهلاك المائي الساعي واليومي يرتكز على مستشعرات الضغط وعلاقة هازن–ويليامز مع العرض الآني عبر منصة ThingSpeak الإلكترونية.

تناول الفصل الأول الأسس النظرية: مفهوم الضغط وضياع الحمولة، والتاريخ التفصيلي لعلاقة هازن–ويليامز (1906) وأهميتها الهندسية، وصيغتها الأصلية والمعكوسة، وتسلسل الحسابات من الجهد الكهربائي إلى الاستهلاك التراكمي، وعدد رينولدز وشروط صلاحية العلاقة، إضافةً إلى مفهوم إنترنت الأشياء (IoT) وكيفية دمجه في منظومات مراقبة المياه.

وفي الفصل الثاني، جرى بناء نموذج تجريبي مختبري مكوّن من أنبوب PVC 16mm، ومستشعري ضغط DFRobot Gravity، ومتحكم ESP32 ، ومضخة غاطسة، وحوض تجريبي. أُجريت معايرة دقيقة بثلاث حالات تدفق) 90 ،°135 ،°45 × (°10 قراءة لكل حالة، باستخدام الطريقة الحجمية الزمنية.

أثبتت النتائج أن قيم الارتياب النسبي أقل من 1% في جميع الحالات، مما يُؤكد موثوقية النظام ودقته. وتُشكّل هذه الدراسة قاعدة علمية لتجارب ميدانية مستقبلية في شبكات توزيع المياه الحقيقية.


الخاتمة

خاتمة

جاءت هذه الدراسة استجابةً لحاجة علمية وعملية ملحّة تتمثل في تطوير أدوات قياس ومراقبة فعّالة لاستهلاك المياه في شبكات التوزيع، في ظل تصاعد الضغط على الموارد المائية وتنامي الطلب. وقد تمحورت الدراسة حول بناء نظام ذكي مدمج يعتمد على مستشعرات الضغط ومتحكم ESP32 ومنصة ThingSpeak، مع توظيف علاقة هازن-ويليامز كركيزة رياضية لاستخراج قيم التدفق من فروق الضغط المقاسة.

وقد أسفرت الدراسة عن جملة من النتائج والاستنتاجات، أبرزها:

- إمكانية قياس التدفق المائي انطلاقاً من قيم الضغط المقاسة بمستشعرين اثنين مثبتين على الأنبوب.
- صلاحية علاقة هازن-ويليامز بصورة نسبية في الظروف المختبرية، مع ضرورة تطبيق معامل تصحيح.
- نجاح النظام في إرسال البيانات وعرضها آنياً عبر منصة ThingSpeak.
- انخفاض تكلفة المنظومة مقارنةً بأنظمة المراقبة التقليدية.

وتكشف الدراسة في الوقت ذاته عن جملة من القيود والتوصيات للبحوث المستقبلية:

- إجراء التجربة الميدانية على شبكة مياه حقيقية في كلية العلوم التطبيقية.
- استخدام مستشعرات ذات دقة أعلى ومستشعرات تدفق مباشرة للمقارنة.
- دراسة إمكانية تطبيق النهج على شبكات توزيع المياه الحضرية.
- تطوير خوارزميات ذكاء اصطناعي لاكتشاف التسربات آلياً.

وخلاصة القول، يُثبت هذا العمل أن تقنية إنترنت الأشياء (IoT) تُمثّل أداةً واعدة وقابلة للتطبيق في مجال مراقبة شبكات المياه وقياس الاستهلاك، خاصةً في

ضوء انخفاض تكاليف المكونات الإلكترونية وتوافرها. ويأمل الباحثان أن تُشكّل هذه الدراسة لبنةً في صرح جهود ترشيد المياه وتحقيق الأمن المائي.


المراجع

الملحق: كود البرمجة(ESP32 / Arduino IDE)

يوضح الكود التالي البرنامج المُحمَّل على المتحكم ESP32، المسؤول عن قراءة مستشعري الضغط وحساب التدفق باستخدام علاقة هازن-ويليامز المعكوسة، ثم إرسال النتائج إلى منصة ThingSpeakكل 15 ثانية.

```
#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>

const char* ssid     = "Radmi 9T";
const char* password = "123456789";
const char* apiKey   = "Q4EN5CP3SM50P0EK";
const char* server   = "https://api.thingspeak.com/update";

#define SENSOR1_PIN 34
#define SENSOR2_PIN 35

const float C  = 150.0;     // معامل هازن-ويليامز للـ PVC الجديد
const float D  = 0.016;     // القطر الداخلي (m)
const float L  = 0.30;      // طول الأنبوب (m)
const float nu = 0.000001; // اللزوجة الحركية للماء عند 20 درجة (m²/s)

float hourlyConsumption = 0.0;
float dailyConsumption  = 0.0;
unsigned long lastSendTime = 0;
unsigned long lastHourTime = 0;
unsigned long lastDayTime  = 0;
const long readInterval = 5000;
const long sendInterval = 15000;
const long hourInterval = 3600000;
const long dayInterval  = 86400000UL;

float readPressure(int pin) {
  int raw = analogRead(pin);
  float voltage = raw * (3.3 / 4095.0);
  float sensorVoltage = voltage / 0.667;
  float pressure_MPa = (sensorVoltage - 0.5) * (1.2 / 4.0);
  if (pressure_MPa < 0) pressure_MPa = 0;
  return pressure_MPa * 10.0;
}

float calcFlowRate(float deltaP_bar) {
  if (deltaP_bar < 0.05) return 0.0;
  float hf = deltaP_bar * 10.2;
  float num = hf * pow(C, 1.852) * pow(D, 4.87);
  float den = 10.67 * L;
  return pow(num / den, 1.0 / 1.852) * 1000.0;
}

float calcReynolds(float Q_Ls) {
  float Q_m3s = Q_Ls / 1000.0;
  float A = 3.14159 * (D / 2.0) * (D / 2.0);
  float V = Q_m3s / A;
  return (V * D) / nu;
}

String flowRegime(float Re) {
  if (Re < 2000) return "Laminaire";
  else if (Re < 4000) return "Transitoire";
```

```
  else return "Turbulent";
}

void sendToThingSpeak(float P1, float P2, float dP, float Q, float hourly,
float Re) {
  if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) return;
  HTTPClient http;
  String url = String(server) +
               "?api_key=" + apiKey +
               "&field1=" + String(P1,4) + "&field2=" + String(P2,4) +
               "&field3=" + String(dP,4) + "&field4=" + String(Q,4) +
               "&field5=" + String(hourly,4) + "&field6=" + String(Re,0);
  http.begin(url);
  int code = http.GET();
  Serial.println(code == 200 ? "ThingSpeak: OK" : "ThingSpeak Error");
  http.end();
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  analogReadResolution(12);
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { delay(500); }
  lastSendTime = lastHourTime = lastDayTime = millis();
}

void loop() {
  unsigned long now = millis();
  float P1 = readPressure(SENSOR1_PIN);
  float P2 = readPressure(SENSOR2_PIN);
  float dP = max(0.0f, P2 - P1);
  float Q  = calcFlowRate(dP);
  float Re = calcReynolds(Q);
  hourlyConsumption += Q * (readInterval / 1000.0);
  dailyConsumption  += Q * (readInterval / 1000.0);
  if (now - lastSendTime >= sendInterval) {
    sendToThingSpeak(P1, P2, dP, Q, hourlyConsumption, Re);
    lastSendTime = now;
  }
  if (now - lastHourTime >= hourInterval) { hourlyConsumption=0.0;
lastHourTime=now; }
  if (now - lastDayTime >= dayInterval) { dailyConsumption=0.0;
lastDayTime=now; }
  delay(readInterval);
}
```

قائمة المراجع

[1] Engineering ToolBox (2004). Pressure. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/pressure-d_587.html

[2] Engineering ToolBox (2004). Major Loss in Ducts, Tubes and Pipes. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/major-loss-d_618.html

[3] Hazen, A. and Williams, G.S. (1905). Hydraulic Tables. John Wiley & Sons, New York.

[4] H2X Engineering (2022). Hazen-Williams Formula. [online] Available at: https://www.h2xengineering.com/resources/hazen-williams/

[5] Liou, C.P. (1998). Limitations and proper use of the Hazen-Williams equation. Journal of Hydraulic Engineering, 124(9), 951-954.

[6] Swamee, P.K. and Jain, A.K. (1976). Explicit equations for pipe-flow problems. Journal of the Hydraulics Division, 102(5), 657-664.

[7] Reynolds, O. (1883). An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous. Philosophical Transactions of the Royal Society, 174, 935-982.

[8] Engineering ToolBox (2004). Reynolds Number. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/reynolds-number-d_237.html

[9] White, F.M. (2011). Fluid Mechanics, 7th Edition. McGraw-Hill, New York.

[10] DFRobot (2021). Gravity: Analog Water Pressure Sensor Wiki. [online] Available at: https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Water_Pressure_Sensor_SKU_SE

N0257

[11] Espressif Systems (2022). ESP32 Technical Reference Manual. [online] Available at: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf

[12] MathWorks (2023). ThingSpeak Documentation. [online] Available at: https://www.mathworks.com/help/thingspeak/

[13] Pérez-Padillo, J. et al. (2021). IoT-Based System for Real-Time Monitoring of Water Distribution Networks. Sensors, 21(14), 4729.

[14] Puust, R. et al. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. Urban Water Journal, 7(1), 25-45.

[15] Farley, M. and Trow, S. (2003). Losses in Water Distribution Networks. IWA Publishing, London.

[16] UN Water (2023). The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water. UNESCO, Paris. [online] Available at: https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2023

[17] OSS/CIHEAM (2012). Water and Agriculture in the Mediterranean: Challenges and Perspectives. Observatoire du Sahara et du Sahel, Tunis.

[18] OSS (2008). Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS): Gestion concertée d'un système aquifère transfrontalier. Observatoire du Sahara et du Sahel, Tunis.