الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي

كلية التكنولوجيا

مذكرة تخرج لنيل شهادة ماستر أكاديمي

ميدان: العلوم والتكنولوجيا

شعبة: هندسة الطرائق والبتروكيمياء

تخصص: هندسة كيميائية

اعداد الطلبة:

رحماني محمد بشير

بن عشورة عادل

المـــــوضـــــــوع

تصميم وتطوير نظا م ذكي لرصد ملوثات الهواء الداخلي الناجمة عن عمليات الاحتراق والانبعاثات العطرية العضوية

نوقشت في :14/06/2026

أما م لجنة المناقشة

د. همامي هادية	**رئيسا**	جامعة الوادي
د. محرم عبد الكريم	**مشرفا**	جامعة الوادي
د. التجاني محمد العيد	**مناقشا**	جامعة الوادي

الموسم الجامعي 2025_2026

اهـــــــداء

بسم الله الرحمن الرحيم

إلى من قال فيهما الله تعالى: ﴿وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا﴾،

إلى والديّ الكريمين، اللذين كانا سندي وعوني بعد الله تعالى، واللذين غرسا في نفسي حب العلم والاجتهاد، وأحاطاني بدعمهما ودعائهما في كل مراحل حياتي.

إلى عائلتي الكبيرة، من أعمام وأخوال وعمات وخالات وأبناء العمومة والخولة، الذين أحاطوني بالمحبة والدعم والتشجيع، وكانوا دائماً مصدر فخر واعتزاز، فكان لوقوفهم إلى جانبي أثرٌ كبير في مواصلة مسيرتي العلمية وتحقيق هذا الإنجاز.

إلى أساتذتي الكرام، الذين أناروا لنا طريق العلم والمعرفة، وأسهموا في تكويننا العلمي والأخلاقي.

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

أهدي ثمرة هذا الجهد المتواضع، راجياً من الله تعالى أن يجعله علماً نافعاً وخالصاً لوجهه الكريم..

رحماني محمد بشير- بن عشورة عادل

الشـــــكر والتقدير

الحمد لله رب العالمين الذي وفقنا وأعاننا على إتمام هذا العمل المتواضع، ونسأله سبحانه وتعالى أن يجعله علماً نافعاً وعملاً خالصاً لوجهه الكريم.

نتقدم بخالص الشكر وعظيم الامتنان إلى الأستاذ الدكتور محرم عبد الكريم على هذه المذكرة، لمتابعته المستمرة طوال مراحل إنجاز هذا العمل، فكان دعمه وإرشاده عاملاً أساسياً في الوصول إلى هذه النتيجة.

كما نتوجه بجزيل الشكر إلى أعضاء لجنة المناقشة الموقرة على تفضلهم بقراءة هذه المذكرة وتقييمها وإثرائها بملاحظاتهم العلمية القيمة.

ونعبر عن بالغ تقديرنا واحترامنا لجميع أساتذة قسم الهندسة الكيميائية الذين ساهموا في تكويننا العلمي والأكاديمي طيلة سنوات الدراسة، وغرسوا فينا حب العلم والبحث والمعرفة.

كما نتقدم بالشكر إلى كل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل، سواء بتقديم المساعدة التقنية أو العلمية أو المعنوية.

ولا يفوتنا أن نتوجه بخالص الامتنان إلى عائلاتنا الكريمة لما قدموه من دعم وتشجيع وصبر طوال مسيرتنا الدراسية بمساهمتهم في تذليل الصعوبات التي واجهتنا.

وفي الأخير، نسأل الله تعالى أن يوفق الجميع لما فيه الخير والنجاح، وأن يجعل هذا العمل المتواضع لبنةً تساهم في خدمة العلم والمعرفة.

الملخص

تتناول هذه المذكرة تصميم وتطوير نظام ذكي منخفض التكلفة ومستقل لمراقبة جودة الهواء الداخلي. يهدف النظام إلى قياس تركيز الجسيمات العالقة في الهواء وتقييم تأثير بعض مصادر التلوث الشائعة داخل الأماكن المغلقة، مثل العطور، والبخور، وعمليات الاحتراق، والغبار. يعتمد النظام المقترح على حساس PMS5003 القائم على تقنية تشتت الليزر لقياس تراكيز الجسيمات العالقة ذات الأقطار المختلفة (PM1.0, PM2.5, PM10)، بالإضافة إلى لوحة Arduino لمعالجة البيانات. ولضمان عمل النظام بشكل ذاتي ومستقل، تم تزويده بشاشة عرض لإظهار القياسات والنتائج بشكل فوري ومباشر، بطاقة ذاكرة (SD Card) وذلك لحفظ وتخزين القيم المقاسة تلقائيا، بهدف استخدامها لاحقا في الدراسة، الإحصاء، والتحليل الذكي، آلية تنبيه ضوئية تسمح بإعطاء مؤشر مرئي فوري عن مستوى جودة الهواء وفق قيم محددة مسبقا.

تم اختبار النظام من خلال مجموعة من التجارب العملية التي شملت خمسة مصادر مختلفة للتلوث الداخلي: العطر الكحولي، لهب الولاعة، دخان البخور، غبار الطباشير، ومعطر الجو. وقد أظهرت النتائج قدرة النظام العالية على رصد التغيرات في تراكيز الجسيمات العالقة بدقة وسرعة، مع تسجيل اختلافات واضحة في سلوك كل ملوث من حيث شدة التأثير ومدة بقائه في الهواء.

أثبتت الدراسة أن النظام المصمم يمثل حلاً عمليا، اقتصاديا، وفعالاً لمراقبة جودة الهواء الداخلي وجمع البيانات البيئية، ويمكن تطويره مستقبلا ليدمج مع تقنيات التحكم الذكي وأنظمة التهوية في المباني لتحسين البيئة الداخلية والحد من المخاطر الصحية.

الكلمات المفتاحية: جودة الهواء الداخلي، الجسيمات الدقيقة، نظام رصد ذكي، Arduino، محاكاة Proteus، تخزين البيانات.

Abstract

This thesis addresses the design and development of a low-cost, standalone smart system for indoor air quality (IAQ) monitoring. The system aims to measure particulate matter (PM) concentrations and evaluate the impact of several common indoor pollution sources, such as perfumes, incense, combustion processes, and dust. The proposed system utilizes the PMS5003 sensor, which is based on laser scattering technology, to measure concentrations of various particulate sizes ($PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$, and PM_{10}), integrated with an Arduino board for data processing.

To ensure completely autonomous and standalone operation, the system is equipped with a display screen for real-time, direct visualization of measurements and results, An SD card module for automated data logging and storage, enabling subsequent statistical analysis, research, and smart evaluation and, A visual alert mechanism to provide immediate visual indicators of air quality levels based on predefined thresholds.

The system was validated through a series of practical experiments involving five different indoor pollution sources: alcohol-based perfume, lighter flame, incense smoke, chalk dust, and air freshener. The results demonstrated the system's high capability to accurately and rapidly detect fluctuations in particulate matter concentrations, revealing distinct variations in the behavior of each pollutant regarding both impact intensity and atmospheric residence time.

This study demonstrates that the designed system offers a practical, cost-effective, and efficient solution for indoor air quality monitoring and environmental data collection. Furthermore, it possesses the potential for future integration with smart control systems and building ventilation units to enhance indoor environments and mitigate associated health risks.

Keywords: Indoor Air Quality (IAQ), Particulate Matter (PM), Smart Monitoring System, Arduino, Proteus Simulation, Data Logging.

جدول المحتويات

اهـــــداء . . . . . **I**

الشـــــكر و التقدير . . . . . **II**

الملخص . . . . . **III**

Abstract . . . . . **IV**

جدول المحتويات . . . . . **V**

قائمة الجداول . . . . . **XII**

قائمة الصور . . . . . **XIII**

مقدمة عامة **1**

الفصل الأول **1**

الدراسة النظرية والخلفية العلمية **1**

مقدمة 3

1. مراجعة أدبيات أنظمة مراقبة جودة الهواء باستخدام انترنت الأشياء 3

2. تطور مجال مراقبة جودة الهواء داخل البنايات 4

3.مصادر التلوث الداخلي 5

1.3الاحتراق الداخلي 5

2.3البخور والعطور (encense & Parfumes) 5

3.3المركبات العضوية المتطايرة 5

4. تأثير الجسيمات الدقيقة على صحة الانسان 6

1.4 التأثير على الجهاز التنفسي 6

2.4 الجهاز القلبي الوعائي 6
3.4 التأثير على الجهاز العصبي والدماغ 6
4.4آثار أخرى 7
.5مؤشرات جودة الهواء الداخلي 7
.6أنظمة الرصد الذكية و أنترنت الأشياء في المراقبة البيئية 7
1.6مفهوم إنترنت الأشياء IoT 7
2.6المكونات أنظمة الرصد الذكية 8
.7دراسة حساس PMS5003 8
1.7مبدأ العمل 8
2.7 مكونات حساس PMS5003 9
3.7مخرجات البيانات 10
8. دراسة العناصر الاخرى 11
1.8لوحة أردوينو 11
2.8شاشة العرض LCD 2004 12
3.8وحدة RTC (وحدة حفظ الزمن الحقيقي) 13
4.8حساس الرطوبة والحرارة (TH sensor) 14
5.8وحدة الربط(SD Card Module) 14
الخاتمة 16
التصميم والمحاكاة 16
مقدمة 17
1. تحديد المتطلبات الوظيفية الرئيسية 18
1.1 المتطلب الوظيفي الأول: قياس تركيز الجسيمات الدقيقة (PM) 18

2.1 المتطلب الوظيفي الثاني: قياس الظروف البيئية المحيطة 18
3.1 المتطلب الوظيفي الثالث: عرض البيانات بشكل آني ومفهوم 19
4.1 المتطلب الوظيفي الرابع: تسجيل البيانات مع الطابع الزمني 19
5.1 المتطلب الوظيفي الخامس: إصدار التنبيهات عند تجاوز الحدود 19
6.1 المتطلب الوظيفي السادس: تتبع الوقت والتاريخ 20
2. المتطلبات الغير وظيفية 20
3. البنية العامة للنظام 21
3.1 الطبقة الأولى: طبقة الاستشعار 21
3.2 الطبقة الثانية: طبقة المعالجة 22
3.3 الطبقة الثالثة: طبقة التطبيق 22
4. مخطط الكتل 23
1.4 كتلة التغذية الكهربائية 23
2.4 كتلة المدخلات 23
4.3 كتلة المعالجة المركزية 23
4.4 كتلة المخرجات والتخزين 23
5. اختيار المكونات 24
5.1 الوحدات الرئيسية 24
5.1.1 وحدة التغذية 24
5.2.1 وحدة المعالجة المركزية (Central Processing Unit - Arduino UNO) . . . 24
5.2.1 وحدة استشعار الجسيمات (PM Sensor - PMS5003) 25
5.2.1 وحدة الزمن الحقيقية (RTC - DS3231) 26
5.3.1 وحدة العرض (Display - LCD 2004 مع I^2C) 27

5.4.1 وحدة التخزين (Storage - SD Card Module) 27
5.2 تفصيل تدفق البيانات 28
5.1.2 القسم الأول: مرحلة التشغيل والتهيئة (Setup Phase) 28
5.2.2 القسم الثاني: الحلقة الرئيسية المتكررة (Main Loop) 29
6. التوصيلات الكهربائية 31
6.1 توصيل الحساس PMS5003 مع Arduino UNO 31
6.2 توصيل الـ I2C (DS3231 + LCD/PCF8574) 31
6.3 توصيلات بروتوكول SPI (وحدة SD) 32
6.4 اعتبارات عامة للتوصيل 32
7. تصميم الخوارزمية ومكتبات Arduino 32
7.1 مرحلة التهيئة 32
7.2 الحلقة الرئيسية 33
7.3 خوارزمية التحقق من صحة حزم PMS5003 33
7.4 خوارزمية تسجيل البيانات على SD 33
8. المحاكات على Proteus 33
8.1 إعداد بيئة المحاكاة 34
8.2 سير عملية المحاكاة 34
8.3 تحديات المحاكاة في Proteus 35
9. نتائج المحاكاة 35
9.1 التشغيل الأولي للنظام 35
9.2 الاعدادات 36
9.3 اظهار الزمن في الشاشة 37

9.4 اعدادات تسجيل البيانات على بطاقة الذاكرة 37
9.5 اعدادات التنبيه والقيمة الحدية 38
9.6 اعدادات اللغة و تغييرها 39
9.7 شاشة القياسات 39
9.8 تسجيل البيانات 40
الخاتمة 41
الإنجاز العملي و التجارب 43
مقدمة 44
1. التركيب الحقيقي للنظام 45
2. برمجة النظام 45
3. عرض البيانات على الشاشة 46
4. تخزين البيانات على بطاقة الذاكرة 46
5. طريقة عرض LCD 47
5.1 واجهة عرض البيانات و القياس 47
5.2 واجهة الاعدادات الرئيسية 47
5.3 اعدادات التاريخ والوقت 48
5.4 اعدادات بطاقة الذاكرة SD 49
5.5 إعدادات التنبيهات 49
6. التجارب والنتائج 50
6.1 التجربة الأولى استخدام عطر كحولي 50
6.2 التجربة الثانية استخدام لهب ولاعة 51
6.3 التجربة الثالثة: عود بخور 54

6.4 التجربة الرابعة: غبار طباشير 56
6.5 التجربة الخامسة: معطر جو 58
6.المناقشة والتحسينات المستقبلية 59
الخاتمة 60
الخاتمة العامة 62
قائمة المراجع 64
الملاحـــــق 66

قائمة الجداول

جدول 1 قائمة لبعض مصادر المركبات العضوية المتطايرة في الأماكن المغلقة 6

جدول 2 تعريف منافذ الحساس PMS5003 10

جدول 3 إطار بيانات الوحدة 26

جدول 4 وحدة الساعة الحقيقية 26

جدول 5 مواصفات وحدة العرض 27

جدول 6 مواصفات وحدة التخزين SD Card 28

جدول 7 التوصيلات الكهربائية و برتوكولات التواصل لمختلف وحدات النظام 31

جدول 8 المكتبات البرمجية المستخدمة والمكونات المتوافقة معها 46

قائمة الصور

صورة 1. مخطط مبدأ عمل حساس PMS5003 9
صورة 2. منفذ PMS5003 9
صورة 3. مخطط توصيل حساس PMS5003 مع المتحكم المضيف (Host MCU) 11
صورة 4. لوحة Arduino UNO و توضيح مكوناتها 12
صورة 5. المظهر الخلفي والأمامي للشاشة LCD 2004 13
صورة 6. وحدة الساعة الحقيقية DS3231 13
صورة 7. حساس الرطوبة والحرارة 14
صورة 8. وحدة بطاقة الذاكرة الصغيرة ((Micro SD Card 15
صورة 9. مخطط الكتل للنظام المقترح 24
صورة 10. وحدة المعالجة المركزية Arduino UNO تحت بيئة Proteus 25
صورة 11. وحدة استشعار الجسيمات تحت بيئة Proteus 25
صورة 12. وحدة الساعة الحقيقية DS3231 تحت بيئة Proteus 26
صورة 13. وحدة العرض تحت بيئة Proteus 27
صورة 14. وحدة التخزين تحت بيئة Proteus 27
صورة 15. مخطط تدفق بيانات يوضح الخوارزمية البرمجية للنظام المقترح 28
صورة 16. المحاكاة في بيئة Proteus 34
صورة 17. بداية التشغيل في بيئة Proteus 35
صورة 18. واجهة الإعدادات والقائمة الرئيسية (Main Menu) في بيئة Proteus 36
صورة 19. واجهة إظهار الزمن والتاريخ في الشاشة (Time & Date Interface) 37
صورة 20. واجهة إعدادات تسجيل البيانات على بطاقة الذاكرة (SD Card Settings Interface) . 38
صورة 21. إعدادات التنبيه والقيمة الحدية (Alarm Settings & Threshold) 38

صورة 22. إعدادات اللغة وتغييرها (Language & Localization Settings) 39
صورة 23. واجهة عرض القياسات وحالة النظام (Live Data & Measurements Interface) . . 39
صورة 24. البيانات المسجلة في بطاقة الذاكرة 40
صورة 25. صورة حقيقية للنظام 45
صورة 26. معاينة البيانات المسجلة بواسطة النظام في جهاز الكمبيوتر 46
صورة 27. واجهة العرض للبيانات المقاسة 47
صورة 28. شاشة الاعدادات الرئيسية 48
صورة 29. واجهة اعدادات الوقت والتاريخ 48
صورة 30. واجهة اعدادات بطاقة الذاكرة 49
صورة 31. واجهة اعداد التنبيهات 49
صورة 32. نتائج التجربة الأولى (على بعد 10 سم) 50
صورة 33. نتائج التجربة الأولى (على بعد 20 سم) 51
صورة 34. تجربة لهب الولاعة 52
صورة 35. نتائج التجربة الثانية (على بعد 5 سم) 52
صورة 36. نتائج التجربة الثانية (على بعد 2 سم) 53
صورة 37. تجربة عود البخور 54
صورة 38. نتائج التجربة الثالثة (على بعد 10 سم) 54
صورة 38. نتائج التجربة الثالثة (على بعد 30 سم) 55
صورة 39. التجربة الرابعة 56
صورة 40. نتائج التجربة الرابعة 57
صورة 41. نتائج التجربة الخامسة 58

المقدمة العامة

مقدمة عامة

يعد تلوث الهواء الداخلي من أخطر التحديات البيئية والصحية في العصر الحديث، إذ يقضي الإنسان المعاصر ما يصل إلى 90٪ من وقته داخل المباني المغلقة (1)، مما يجعل جودة الهواء في هذه الأماكن محدداً أساسياً لصحته ورفاهيته. وقد أظهرت الدراسات العالمية أن التعرض المزمن للملوثات الداخلية، وخاصة الجسيمات الدقيقة الناجمة عن عمليات الاحتراق والمركبات العضوية المتطايرة المنبعثة من البخور والعود والعطور، يسهم في ارتفاع معدلات الأمراض التنفسية والقلبية الوعائية والسرطانات، بل ويقدر أن 4.3 مليون حالة وفاة مبكرة سنوياً على المستوى العالمي تُنسب مباشرة إلى تلوث الهواء الداخلي (2). تكتسب هذه المشكلة بعداً خاصاً نظراً لاعتماد غالبية المساكن على الغاز الطبيعي للطهي والتدفئة، وانتشار استخدام المعطرات و ملطفات الجو في المناسبات الاجتماعية وغيرها، فضلاً عن التحولات العمرانية السريعة التي أدت إلى بناء مساكن مغلقة ذات تهوية ضعيفة، كل ذلك في ظل غياب إطار تنظيمي وطني خاص بجودة الهواء الداخلي يُجبر المؤسسات والأفراد على اتخاذ تدابير وقائية فعالة.

تتجلى أهمية هذا الموضوع في كونه يربط بين الهندسة الكيميائية والصحة العامة وتقنيات الأنظمة المدمجة وأتمتة القياس، حيث تتطلب معالجته فهماً عميقاً للعمليات الكيميائية للاحتراق والانبعاثات العطرية، ومعرفة دقيقة بخصائص الملوثات وآثارها الصحية، وقدرة على تصميم وتطوير أنظمة رصد ذكية تعتمد على الحساسات الإلكترونية والمعالجة الرقمية. وقد شهد المجال تطورات ملحوظة في السنوات الأخيرة مع ظهور حساسات دقيقة ومنخفضة التكلفة مثل PMS5003، ومنصات مفتوحة المصدر مثل Arduino، مما أتاح بناء أنظمة مراقبة بأسعار في متناول المستخدمين العاديين.

تأتي هذه المذكرة في إطار تخصص هندسة كيميائية بمستوى سنة ثانية ماستر، بهدف المساهمة في سد الفجوة بين المعرفة النظرية والتطبيق العملي في مجال مراقبة البيئة الداخلية. وقد تم اختيار عنوان "تصميم وتطوير نظام ذكي لرصد ملوثات الهواء الداخلي الناجمة عن عمليات الاحتراق والانبعاثات العطرية العضوية" لما يحمله من تحدٍّ تقني يتجاوز مجرد القياس إلى التشخيص والتوثيق والتنبيه في الوقت الفعلي. ويتضمن العمل ثلاثة فصول رئيسية: الفصل الأول يستعرض الإطار النظري والخلفية العلمية للتلوث الداخلي ومصادره وتأثيراته ومؤشرات جودة الهواء والتقنيات الرقمية المستخدمة في المراقبة؛ والفصل الثاني يتناول التصميم الهندسي التفصيلي للنظام بدءاً من تحليل المتطلبات الوظيفية مروراً بالبنية المعمارية ومخطط الكتل واختيار المكونات والتوصيلات الكهربائية وتصميم الخوارزمية والمحاكاة على Proteus؛ أما الفصل الثالث فيركز على الإنجاز العملي والاختبارات الميدانية وتحليل النتائج واستخلاص الدروس والتحسينات المستقبلية. وقد تم اعتماد منهجية علمية تجمع بين المراجعة الببليوغرافية المعمقة للمراجع، والتصميم الموجه بالمتطلبات، والمحاكاة الافتراضية، والتجريب الميداني، بهدف الوصول إلى نظام موثوق وفعال وقابل للتكرار.

الفصل الأول

الدراسة النظرية

والخلفية العلمية

مقدمة

منذ عدة عقود، بذلت جهودٌ حثيثة لحماية الناس من الآثار الضارة الناتجة عن تلوث الهواء، من ذلك زيادة عدد محطات مراقبة الهواء التي تُوضع في مواقع استراتيجية بهدف توفير معلومات حول تركيزات الملوثات الخارجية التي يتعرض لها الناس (3). ونظرا لكون الإنسان يقضي معظم وقته داخل أماكن مغلقة، صارت جودة الهواء الداخلي من أهم العوامل التي تؤثر على صحة الإنسان، ويمكن تحديد جودة هذا الهواء من خلال معايير مختلفة، مثل الانبعاثات الكيميائية والخصائص الفيزيائية والعوامل البيولوجية (4). ومن الشائع الاعتقاد بأن الهواء الداخلي آمن من العوامل الضارة أو الملوثات. إلا أن الدراسات الحديثة والسابقة والأدلة العلمية أظهرت أن الهواء الداخلي في المنازل قد يكون أكثر خطورةً وضرراً من الهواء الخارجي في المدن الصناعية الكبرى (5).

وفي هذا السياق سنتطرق في هذا الفصل إلى الإطار النظري المرتبط بتلوث الهواء الداخلي، من خلال التعرف على أهم مصادره وآثاره على الصحة، إضافة إلى أهم مؤشرات تقييم جودة الهواء إبراز دور التقنيات الحديثة، في تطوير أنظمة ذكية لمراقبة البيئة الداخلية.

1. مراجعة أدبيات أنظمة مراقبة جودة الهواء باستخدام انترنت الأشياء

تعتمد أنظمة مراقبة جودة الهواء التقليدية على محطات مركزية، تستخدم أجهزة عالية الموثوقية والدقة، إلا أنها تعاني من محدودية التغطية المكانية وارتفاع تكاليف التشغيل والصيانة، لتأتي تكنولوجيا أنترنت الأشياء كنموذج بديل قائم على حساسات منخفضة التكلفة ويمكن توزيعه ليغطي مساحات شاسعة في البيئتين الحضرية أو الصناعية، وقد ساهم هذا التحول في تعزيز القدرة على تتبع التغيرات الدقيقة في تركيز الملوثات، كما أتاح إمكانية ادماج البيانات في الوقت الآني مع منصات تحليلية لدعم اتخاذ القرار (6).

يمكن تصنيف أنظمة مراقبة جودة الهواء المعتمدة على إنترنت الأشياء إلى ثلاثة أنماط رئيسية: الأنظمة الثابتة، المتنقلة، والتشاركية. تعتمد الأولى على تركيب الحساسات في مواقع محددة ثابتة بينما الأنظمة المتنقلة تتميز بمرونة أكبر إذ أنه يتم تركيبها على مستوى المركبات مما يسمح بتغطية مناطق واسعة، وأخيرا الأنظمة التشاركية التي تعتمد على مشاركة الأفراد باستخدام الاجهاز المحمولة أو القابلة للارتداء (6).

رغم الإمكانيات الكبيرة الواعدة لهذه التكنولوجيا، إلا أنها تواجه تحديات عملية، من أبرزها ضمان دقة الحساسات واستقرارها مع الزمن، واختيار مواقع النشر المناسبة، بالإضافة الى قضايا الاتصال واستمرارية نقل البيانات. كما أن هناك تحديات تتعلق بمعالجة البيانات الضخمة الناتجة عن هذه الأنظمة وتطوير خوارزميات قادرة على استخراج معلومات مفيدة منها بشكل فعال، تكشف كذلك مراجعة الأدبيات عن مجموعة من الفجوات العلمية الواضحة التي تبرز الحاجة إلى تطوير نظام ذكي مخصص لرصد ملوثات الهواء الداخلي وتحديدا تلك الناتجة عن

عمليات الاحتراق والانبعاثات العضوية العطرية، إذ أن معظم الدراسات الحالية في هذا المجال -أعني مراقبة جودة الهواء- تركز على مراقبة جودة الهواء الخارجي (6).

هنا يأتي هذا العمل لملء الفجوة العلمية عبر اقتراح نظام مبني على تكنولوجيا انترنت الأشياء لرصد ملوثات الهواء الداخلي خصوصا الناجمة عن عمليات الاحتراقات والانبعاثات العطرية.

2. تطور مجال مراقبة جودة الهواء داخل البنايات

يعد الهواء الداخلي أحد أهم الأوساط التي يتعرض فيها الإنسان للبيئة، إذ يقضي الإنسان معظم حياته داخل المباني، وعليه فإن جودة الهواء داخل المباني ذات تأثير على الصحة العامة. أدرك الاغريق والرومان أن الهواء الملوث في المدن المزدحمة والمناجم يضر بالصحة هو أصل الأمراض، وقد استمر هذا الاعتقاد خلال العصور الوسطى ولكن لم يكن هذا الاعتقاد مبنيا على فهم للظواهر الفيزيائية، إلى أن جاءت مساهمة باحثين مثل رامازيني، وبوت، وغيرهما لتلفت الانتباه إلى الأثر الصحي للأماكن المغلقة شديدة التلوث (4).

في القرن التاسع العشر بدأ الاهتمام بالكيمياء الحيوية وظهر بما يسمى اليوم الثورة الصحية، وكانت جودة الهواء الداخلي أهم ما تم معالجته، وقد لخص غريسوم ومجموعة من الباحثين إلى أن الغرف المزدحمة هي أخطر الأماكن من حيث انتقال الامراض والتعرض للهواء الفاسد، ليأتي بعده بيتنكوفر الذي لم يكتفي فقط بربط جودة الهواء في الحرارة والرطوبة وثاني أكسيد الكربون، بل ذهب إلى ما هو أبعد من ذلك ووصل الى وجود آثار عضوية دقيقة يطرحها الإنسان عبر الجلد والتنفس وما ارتفاع نسبة ثاني أكسيد الكربون إلا مؤشر على تراكم هذه الآثار وغيرها من الملوثات، وكان أول من اقترح حدودا لتركيز ثاني أكسيد الكربون. هذه النتائج التي وصل إليها العلم في القرن التاسع العشر ساهمت في تطوير تصميم المباني بشتى أنواعها لمراعاة شروط التهوية المناسبة (4).

بعد نهاية القرن التاسع العشر وبداية القرن العشرين، سعى بعض الباحثين إلى إثبات وجود سموم بشرية في هواء الزفير، إلا أن الأدلة لم تكون قوية، لاحقا أتت دراسات ونسلو وبالمر وهيرينغتون لتثبت أن هواء الغرف الغير مهواة قد يؤثر حتى في الشهية والوظائف الفسيولوجية دون أن يسبب أعراضا صريحة. كما تشير دراسة ياغلو وزملائه إلى أن الهدف من التهوية في هذه المرحلة انتقل من التركيز على الصحة إلى تحسين جودة الحياة، يعني بذلك تقليل الروائح وتحسين الإحساس بالانتعاش والراحة، وقد توصلوا إلى أن إعادة تدوير الهواء وحده لا تحل مشكلة الروائح ما لم تترافق مع هواء خارجي كاف أو مع تجديد مستمر للهواء النظيف (4).

كان موضوع الهواء الداخلي في صميم الاهتمام البيئي إلى ستينيات القرن العشرين، فتغيرت الأولويات مع صدور كتاب الربيع الصامت لراشيل كارسون حيث أصبح التركيز البيئي العالمي أكثر انصرافا إلى الهواء الخارجي والتلوث الناتج عن الثورات الصناعية المتتابعة، ولم يعد هذا المجال يعود إلى الواجهة إلا مع ظهور مشكلات الرادون، فالفورمالديهاد، عث الغبار ومتلازمة المباني المريضة، وأخيرا الحساسية (4).

هذا التحول يفسر بقاء بعض الأسئلة والمشاكل الأساسية حول جودة الهواء الداخلي والصحة دون إجابة كافية لفترة طويلة، مقارنة بالتطور السريع لأدوات مراقبة جودة الهواء الخارجي على الرغم من أن التعرض البشري اليومي للهواء الداخلي أكبر بكثير.

3.مصادر التلوث الداخلي

يمثل تلوث الهواء خطرا صحيا، خصوصا في المناطق الحضرية، إذ أنها تؤثر سلبا على الأعضاء الداخلية لجسم الإنسان (7)، في هذا العنوان سنتطرق الى أهم مصادر التلوث الداخلي للهواء.

1.3الاحتراق الداخلي

يشير الاحتراق الداخلي في السياق المنزلي إلى حرق الوقود لأغراض التدفئة والطهي والإضاءة.

تعد عمليات الاحتراق غير المكتمل داخل البيئات المغلقة والتي تنتج من خلال أجهزة التدفئة والطهي والمواقد التي تعمل بالغاز أو الفحم حيث أنها تطلق غازات سامة تؤدي الى الموت مثل أول أكسيد الكربون (Co)، وأكاسيد النيتروجين (NO_x) (8).

إضافة دخان السجائر على أكثر من الذي يحتوي على مئات المواد السامة و69 مادة على الأقل مسببة للسرطان، والذي ينتج الجسيمات الدقيقة يخلفها الدخان القادر على النفاذ إلى أعماق الجهاز التنفسي ومجرى الدم (7).

2.3البخور والعطور (encense & Parfumes)

تستخدم العطور في الأماكن الداخلية لأغراض عديدة كالزينة (9)، مثال ذلك البخور حيث أثبتت الدراسات أن حرق البخور يخلق دخاناً يحتوي على عوالق، وهيدروكربونات عطرية متعددة الحلقات (PAHs)، وألديهيدات. يمكن أن يكون دخان البخور أكثر سمية من دخان التبغ بسبب تركيز الجسيمات الدقيقة فيه (9). كذلك العطور ومعطرات الجو، إذ تحتوي معظم العطور الصناعية على مركبات الفثالات (Phthalates) ومواد كيميائية أخرى لتثبيت الرائحة والتي قد تشكل خطورة، حيث أن هذه المواد تعمل كمثيرات للحساسية ومضطربات للغدد الصماء، وتساهم في زيادة تركيز المركبات العضوية في الهواء.

3.3المركبات العضوية المتطايرة

تتسامى المركبات العضوية المتطايرة (VOCs) من بعض المواد الصلبة أو السائلة. تشمل هذه المركبات مجموعة واسعة من المواد الكيميائية التي من الممكن أن تسبب آثارًا صحية ضارة على المدى القريب والبعيد. ويكون تركيز هذه المركبات العضوية المتطايرة أعلى داخل المباني (تصل إلى عشرة أضعاف) مقارنةً بالهواء الطلق. ومن مصادر المركبات العضوية المتطايرة (10) كما هو مبين في الجدول التالي:

جدول 1 قائمة لبعض مصادر المركبات العضوية المتطايرة في الأماكن المغلقة

المصدر	الوصف
الدهانات، ومزيلات الدهانات، والمذيبات الأخرى	تطلق المركبات العضوية المتطايرة أثناء الدهن وخلال تجفيفه
مواد حافظة للخشب	التي تحوي على مواد كيميائية تمنع التعفن والحشرات حيث تطلق هذه الأخيرة غازات خطيرة في الأماكن المغلقة
بخاخات الرذاذ	حيث تطرح المركبات العضوية المتطايرة أثناء الاستخدام
المنظفات والمطهرات	ويتم ذلك من خلال الغازات المتطايرة عند الاستخدام
الوقود المخزن ومنتجات السيارات	تطلق الروائح الصناعية، مثال ذلك البنزين خاصة عند التخزين أو الاستخدام

4. تأثير الجسيمات الدقيقة على صحة الانسان

تُؤثر الجسيمات الدقيقة، وخاصةً PM2.5 (قطرها أقل من 2.5 مايكرومتر)، تأثيرًا سلبيا ومتعدد الأبعاد على صحة الإنسان. نظرًا لصغر حجمها الشديد (حوالي 1/30 من سُمك شعرة الإنسان)، فإنها تخترق الجهاز التنفسي بعمق، بل ويمكنها الوصول مباشرةً إلى مجرى الدم (9).

1.4 التأثير على الجهاز التنفسي

يتمثل تأثير المركبات العضوية المتطايرة على الجهاز التنفسي على المدى القريب تتسبب في الالتهاب والتهيج والذي قد يتفاقم الى امراض المزمنة مثل الربو.

2.4 الجهاز القلبي الوعائي

ترتبط المركبات العضوية المتطايرة بتأثيرات خطيرة على الجهاز القلبي الوعائي، حيث يمكن أن تؤدي في الحالات الحادة إلى زيادة خطر الإصابة بالنوبات القلبية كما تتسبب في حدوث اضطرابات في نظم القلب (11).

3.4 التأثير على الجهاز العصبي والدماغ

أظهرت الأبحاث الحديثة أن الجسيمات الدقيقة يمكن أن تصل إلى الدماغ إما عبر العصب الشمي أو من خلال الدورة الدموية، مما يفتح المجال لتأثيرات عصبية خطيرة. فقد ارتبط التعرض الطويل لهذه الجسيمات بحدوث التدهور المعرفي، مع وجود علاقة قوية بزيادة خطر الإصابة بأمراض تنكسية مثل الزهايمر وباركنسون. كما أن لهذه الجسيمات تأثيرًا خاصًا على الأطفال، إذ تؤثر سلبًا على نموهم العقلي، وقد تؤدي إلى انخفاض القدرة على التركيز وضعف التحصيل الدراسي، وهو ما ينعكس على أدائهم التعليمي وتطورهم المعرفي على المدى الطويل (5).

4.4آثار أخرى

كذلك من المحتمل الإصابة بسرطان الرئة، وإضعاف العمليات الأيضية في الجسم، كما تساهم في رفع احتمال الإصابة بداء السكري ولا تقتصر آثارها على الأفراد البالغين فحسب، بل تمتد إلى الحوامل، حيث يمكن أن تؤثر سلبا على الجنين (11).

5.مؤشرات جودة الهواء الداخلي

يتم قياس جودة الهواء الداخلي(QAI) من خلال مراقبة تركيز ملوثات الهواء. وعلى عكس مؤشر جودة الهواء الخارجي(AQI)، غالباً ما تتضمن مؤشرات جودة الهواء الداخلي قياسات محددة مثل ثاني أكسيد الكربون والمركبات العضوية المتطايرة(VOCs) (12).

ثاني أكسيد الكربون (CO_2) هو مؤشر رئيسي على كفاية التهوية. المستويات الأقل من 1000 جزء في المليون مقبولة بشكل عام، بينما المستويات التي تزيد عن 2000 جزء في المليون يمكن أن تسبب النعاس وضعف التركيز.

أما المركبات العضوية المتطايرة (VOCs) فهي كما سبق غازات تنبعث من المنتجات المنزلية (الدهانات، المنظفات، الأثاث)، مما يسبب الصداع وتهيج الجهاز التنفسي.

كما يتم قياس الفورمالديهايد(Formaldehyde) مركب عضوي متطاير محدد مصنف كمادة مسرطنة، موجود في بعض الأثاث المصنوع من الخشب المضغوط، والمواد اللاصقة، والمنسوجات. أما بالنسبة الرطوبة النسبية (RH) من الأفضل الحفاظ عليها بين 20-30. وأول أكسيد الكربون (CO): غاز خطير، عديم اللون والرائحة، ينبعث من أجهزة الاحتراق غير الفعالة.

6.أنظمة الرصد الذكية و أنترنت الأشياء في المراقبة البيئية

تمثل أنظمة الرصد الذكية القائمة على إنترنت الأشياء (IoT) ركيزة أساسية في المراقبة البيئية الحديثة، حيث تسهل عملية جمع بيانات دقيقة وآنيّة حول مختلف العناصر البيئية باستخدام الانترنت، مما يسهم في اتخاذ قرارات أسرع وأكثر فعالية لحماية البيئة وإدارتها.

1.6مفهوم إنترنت الأشياء IoT :

هو مصطلح يُشير إلى شبكة من الأجهزة والأشياء التي تتصل ببعضها البعض عبر الإنترنت، مما يتيح لها تبادل البيانات والمعلومات والتفاعل مع بيئتها المحيطة. إن مبدأ أنترنت الأشياء (IoT) هو في توصيل الأشياء التقليدية بالإنترنت لتمكينها من جمع البيانات وتحليلها والتحكم فيها عن بُعد، نتيجة لذلك يمكن استخدام البيانات عالية الدقة التي تم الحصول عليها من التكنولوجيا القائمة على إنترنت الأشياء لتحسين النقل والجداول الزمنية، مما يتماشى مع اهداف تنمية المستدامة إذا ما طبقت في مجال البيئة والتنمية المستدامة. (13)

2.6المكونات أنظمة الرصد الذكية

يتكون نظام المراقبة الذكي القائم على تكنولوجيا أنترنت الأشياء عادة من أجهزة الاستشعار التي تقوم بقياس المعطيات الفيزيائية مثل درجة الحرارة، الرطوبة، وتركيز الغازات المختلفة، ومن ثم إلى أنظمة وخوارزميات على مستوى السحابة إذ يتم نقل البيانات عبر شبكة الانترنت ومعالجتها باستخدام الحوسبة الطرفية إلى هذه الأنظمة، ومن ثم تأتي منصات التحليل والذكاء الاصطناعي التي تقوم بمعالجة كميات كبيرة من البيانات وتحويلها الى معلومات ذات قيمة، مثال ذلك أنظمة الإنذار لحرائق الغابات . (13)

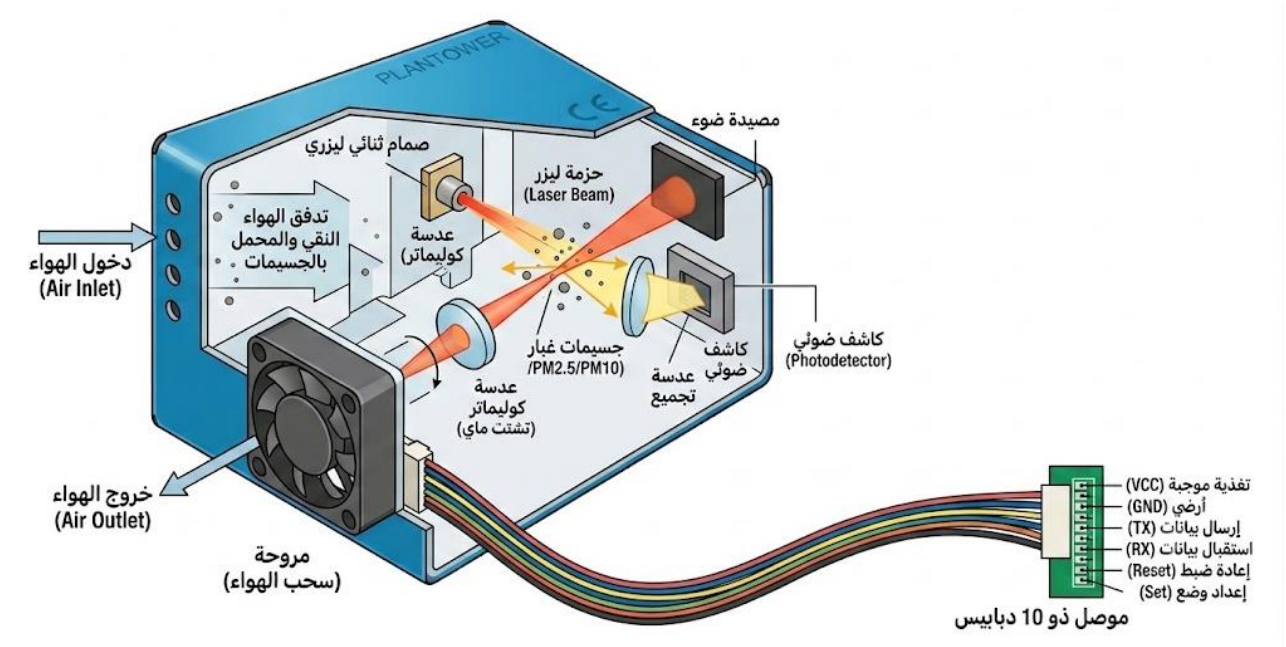
7.دراسة حساس PMS5003

يعد الحساس PMS5003 من الحساسات الإلكترونية المتخصصة في قياس تركيز الجسيمات العالقة في الهواء، ويُستخدم على نطاق واسع في تطبيقات مراقبة جودة الهواء الداخلي والخارجي. يتميز هذا الحساس بقدرته على قياس تراكيز الجسيمات الدقيقة ذات الأقطار المختلفة، بما في ذلك PM1.0 وPM2.5 وPM10، مع توفير بيانات رقمية يمكن معالجتها مباشرة بواسطة أنظمة التحكم المضمنة مثل Arduino. ويتميز كذلك بصغر حجمه وانخفاض استهلاكه للطاقة ودقته المقبولة مقارنة بتكلفته المنخفضة، مما يجعله مناسباً للأنظمة الذكية الخاصة بمراقبة البيئة الداخلية (14).

1.7مبدأ العمل

يعتمد الحساس PMS5003 على تقنية تشتت الضوء بالليزر (Laser Scattering Principle) لقياس تركيز الجسيمات العالقة في الهواء. حيث يقوم مصدر ليزري داخلي بإصدار شعاع ضوئي يمر عبر عينة الهواء المسحوبة إلى داخل الحساس بواسطة مروحة صغيرة مدمجة. وعند اصطدام شعاع الليزر بالجسيمات العالقة، يتشتت الضوء بزوايا وشدات مختلفة تبعاً لحجم وعدد هذه الجسيمات.

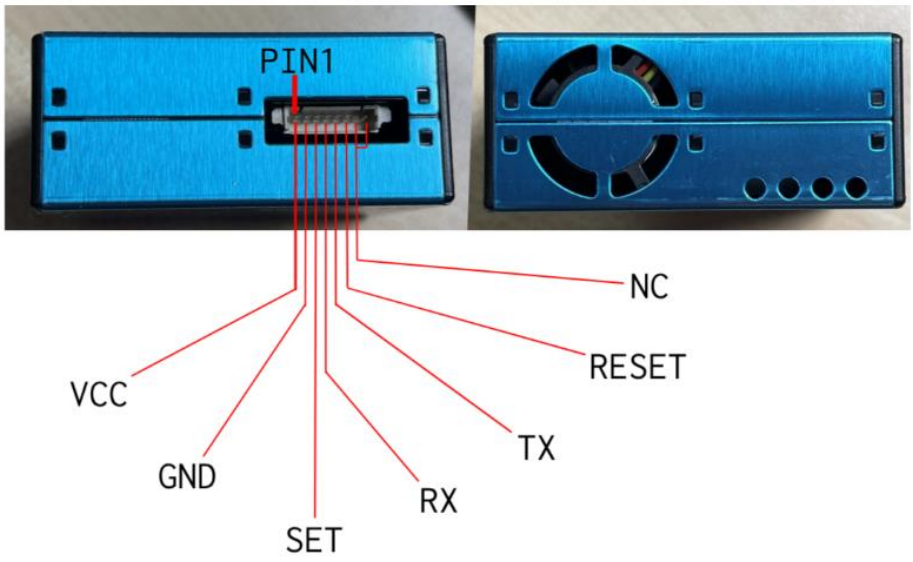
يتم التقاط الضوء المتشتت بواسطة مستقبل ضوئي عالي الحساسية، ثم تُعالج الإشارات الناتجة إلكترونياً لتحويلها إلى بيانات رقمية تمثل عدد الجسيمات وتركيزها الكتلي في الهواء. وبناءً على هذه المعالجة يوفر الحساس قيماً مباشرة لتراكيز الجسيمات الدقيقة PM1.0 وPM2.5 وPM10، مما يسمح بتقييم جودة الهواء ومراقبة تغيراتها بشكل آني (14).



صورة 1. مخطط مبدأ عمل حساس PMS5003

2.7 مكونات حساس PMS5003

منفذ (1) يحتوي دبابيس مرقمة من اليمين إلى اليسار كالتالي: 1، 2، 3، ...، 8. مثلما هو موضح في الصورة 1 والجدول 2.



صورة 2. منفذ PMS5003

جدول 2 تعريف منافذ الحساس PMS5003

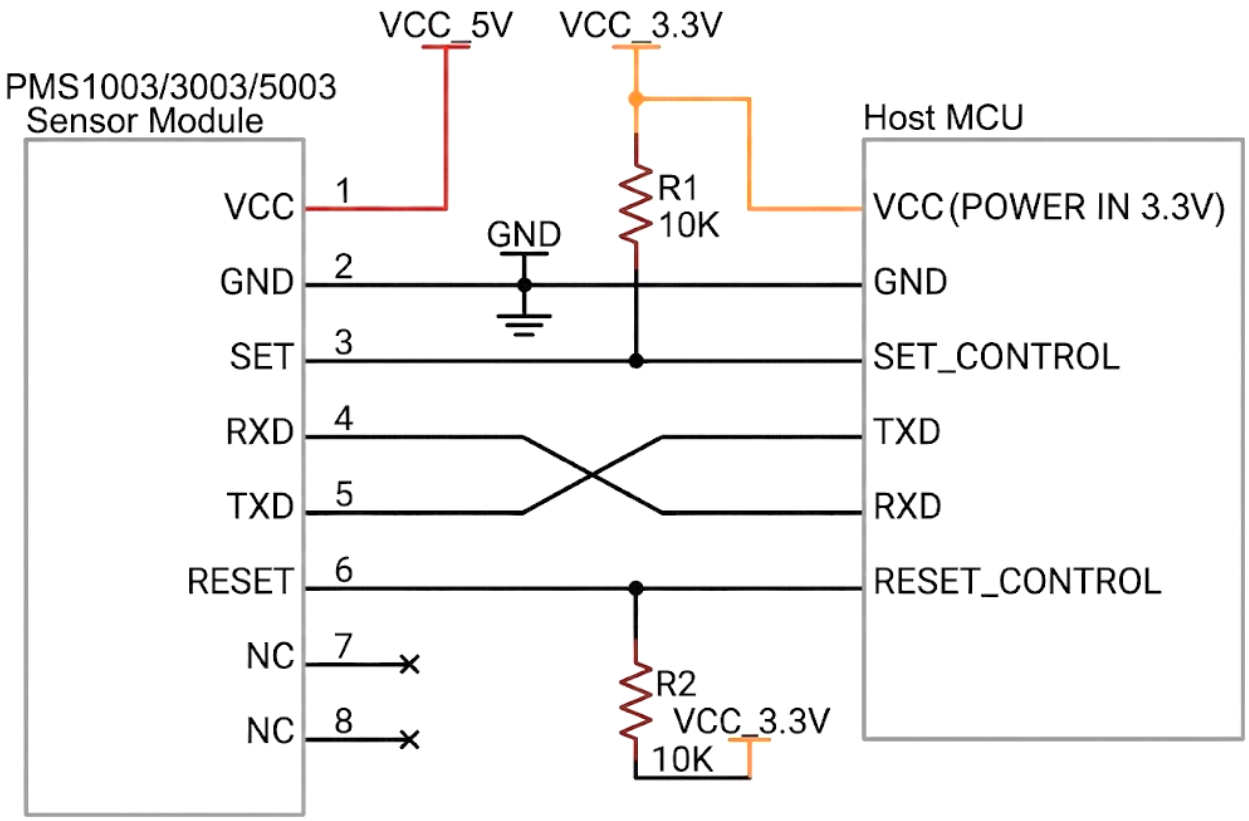
منفذ	الوظيفة	الوصف
1	VCC	جهد التغذية 5 فولت
2	GND	أرضي
3	SET	عالي أو مُعلق – وضع العمل / منخفض – وضع السكون
4	RXD	استلام البيانات عبر UART/TTL
5	TXD	إرسال البيانات عبر UART/TTL
6	Reset	منخفض لإعادة الضبط
7/8	NC	غير متصل

3.7مخرجات البيانات

يتم عرض البيانات بشكل أساسي على هيئة عدد كل جسيم ذي حجم مختلف لكل وحدة حجم، حيث تبلغ وحدة حجم الجسيمات 0.1 لتر، ووحدة تركيز الكتلة ميكروغرام/م^3.

يوجد وضعين رئيسيين لعمل المستشعر: الوضع النشط (الوضع الافتراضي) و وضع الخمول. يرسل المستشعر البيانات إلى الجهاز تلقائيًا بطريقة تسلسلية. كما ينقسم الوضع النشط بدوره إلى وضعين فرعيين: المستقر والسريع. إذا كان تغير التركيز طفيفاً.

يعمل المستشعر في الوضع السلبي بفاصل زمني فعلي قدره 2.3 ثانية. أما إذا كان التغير كبيرًا ، فيتحول المستشعر تلقائيًا إلى الوضع النشط بفاصل زمني يتراوح بين 200 و800 مللي ثانية ، وكلما زاد التركيز، قصر الفاصل الزمني (14).



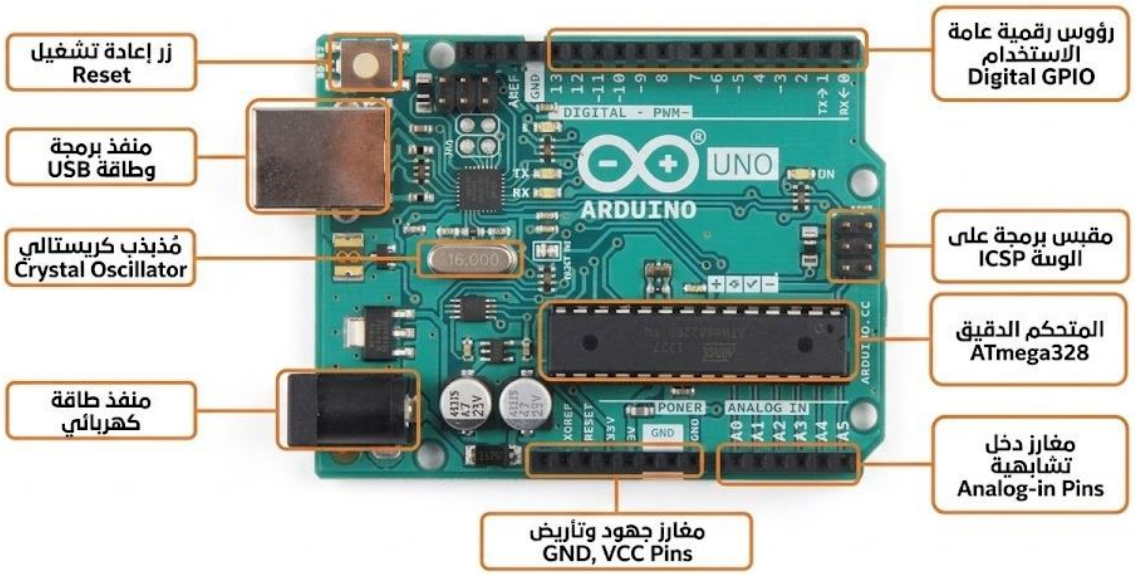
صورة 3. مخطط توصيل حساس PMS5003 مع المتحكم المضيف (Host MCU)

8. دراسة العناصر الاخرى

1.8لوحة أردوينو

لوحة التطوير Arduino Uno هي واحدة من أهم وأشهر اللوحات الإلكترونية مفتوحة المصدر المستخدمة في بناء المشاريع التفاعلية، والأنظمة المدمجة، وتطبيقات الروبوتات والتحكم الآلي، وتتألف من مجموعة متكاملة من المكونات الموضحة في الصورة التوضيحية 13بشكل دقيق لتسهيل التعامل معها. يعتبر "المتحكم الدقيق" (ATmega328) الشريحة الإلكترونية الأكبر والمثبتة في الجزء السفلي الأيمن، وهو العقل المفكر والمسؤول الأول عن معالجة البيانات، واستقبال الأوامر البرمجية، وتوجيه الإشارات الكهربائية إلى الأطراف المحيطية. ولتأمين استقرار عمل هذا المتحكم، زودت اللوحة بـ "مُذبذب كريستالي" (Crystal Oscillator) ذي اللون الفضي في المنتصف الأيسر، وهو يحدد التردد والسرعة الثابتة لتنفيذ العمليات، بينما يوجد في الزاوية العليا اليسرى "زر إعادة تشغيل" (Reset) الذي يسمح للمستخدم بإعادة تشغيل البرنامج من نقطة البداية بشكل فوري. أما بخصوص منافذ الاتصال والتغذية، فتحتوي اللوحة على "منفذ برمجة وطاقة USB" في جانبها الأيسر العلوي، وهو المنفذ المربع المخصص لتوصيل اللوحة بجهاز الكمبيوتر لرفع الأكواد البرمجية والمراقبة التسلسلية، بجانب تزويدها بالتيار الكهربائي اللازم، في حين يتواجد أسفله "منفذ طاقة كهربائي" (DC Jack) مصمم لتوصيل مصادر طاقة خارجية

مستقلة مثل البطاريات أو المحولات الكهربائية عند تشغيل المشاريع بعيداً عن الحاسوب. وبالانتقال إلى واجهات التوصيل الخارجية، تظهر في الحافة العلوية "رؤوس رقمية عامة الاستخدام" (Digital GPIO) التي تستخدم للتعامل مع الإشارات الرقمية الثنائية (تشغيل وإيقاف) مع مختلف الحساسات والمشغلات، ويقابلها في الحافة السفلية "مغارز دخل تشابهية" (Analog-in Pins) المخصصة لقراءة الإشارات التناظرية المتغيرة مثل الجهد الكهربائي، وتجاورها "مغارز جهود وتأريض" (GND, VCC Pins) المسؤولة عن توزيع مستويات الجهد وتوفير خطوط الأرضي لتغذية العناصر والدوائر المتصلة باللوحة. وأخيراً، يوجد على الجانب الأيمن "مقبس برمجة على اللوحة ICSP" المكون من ستة دبابيس تتيح للمطورين المتقدمين برمجة الشريحة الأساسية بشكل مباشر دون المرور عبر واجهة اليو إس بي، مما يجعل من هذه اللوحة منظومة هندسية متكاملة تمنح المبتدئين والمحترفين بيئة مثالية لابتكار وتطوير مختلف التطبيقات التقنية بكفاءة ومرونة فائقة. (15).



صورة 4. لوحة Arduino UNO و توضيح مكوناتها

2.8شاشة العرض LCD 2004

تستخدم شاشة LCD 2004 لعرض البيانات المقاسة بشكل فوري، حيث تتكون من أربعة أسطر يحتوي كل منها على عشرين خانة، مما يسمح بإظهار عدة معلومات في الوقت نفسه. وفي هذا النظام تُستعمل لعرض تراكيز الجسيمات العالقة وقيم درجة الحرارة والرطوبة، إضافة إلى الرسائل التنبيهية المتعلقة بجودة الهواء. وتم اختيار هذه الشاشة لسهولة ربطها مع لوحة Arduino وقدرتها على توفير واجهة استخدام بسيطة وواضحة للمستخدم (16).



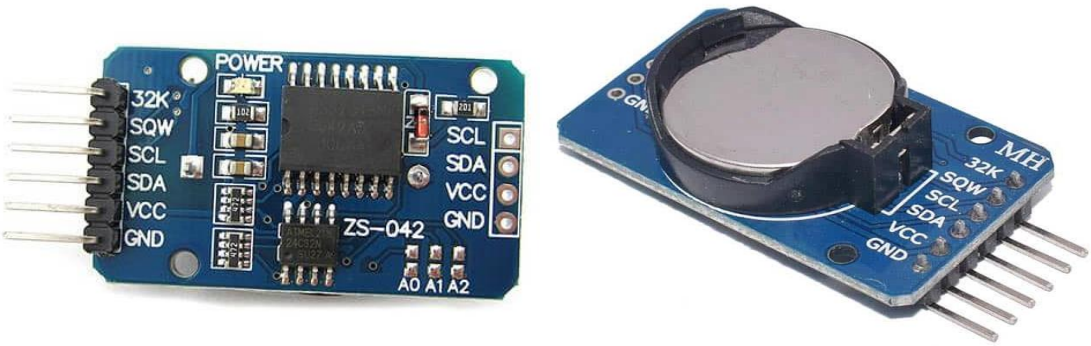
صورة 5. المظهر الخلفي والأمامي للشاشة LCD 2004

3.8وحدة RTC (وحدة حفظ الزمن الحقيقي)

تعد وحدة DS3231 من أشهر وحدات الساعة الحقيقية (Real-Time Clock)، وهي دائرة إلكترونية مخصصة لحفظ الوقت والتاريخ بدقة عالية. تُستخدم هذه الوحدة في المشاريع الإلكترونية التي تتطلب معرفة الوقت بشكل مستمر، مثل أنظمة المراقبة وتسجيل البيانات وأجهزة الإنذار.

تتميز وحدة DS3231 بوجود بطارية احتياطية تسمح لها بمواصلة العمل وحفظ الوقت حتى عند انقطاع التيار الكهربائي عن النظام الرئيسي. كما تعتمد على بروتوكول I2C للتواصل مع المتحكمات الدقيقة مثل Arduino، مما يجعل عملية ربطها وبرمجتها سهلة وفعالة.

وتُعرف هذه الوحدة بدقتها العالية مقارنة بالوحدات الأخرى، حيث تحتوي على مذبذب بلوري معوض حرارياً يقلل من تأثير تغير درجة الحرارة على دقة الوقت. لذلك تُعد خياراً مثالياً للمشاريع التي تتطلب تسجيل البيانات الزمنية بشكل موثوق ودقيق. (17).



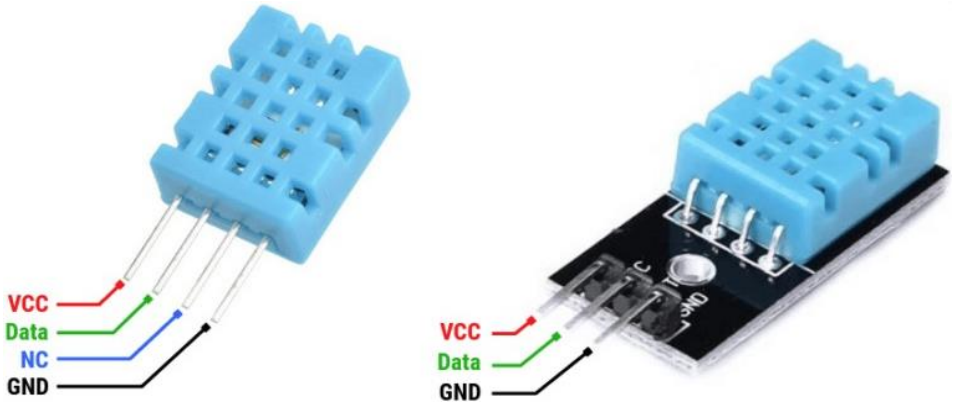
صورة 6. وحدة الساعة الحقيقية DS3231

4.8حساس الرطوبة والحرارة (TH sensor)

هناك أنواع عديدة من الحساسات الإلكترونية مصممة لقياس درجة الحرارة (Température) والرطوبة النسبية (Relative Humidity) في آن واحد ، وتتميز بوجود عنصر حساس للرطوبة ومقاوم حراري (NTC) لقياس الحرارة في وحدة واحدة مدمجة ومن أبرزها سلسلة DHT (DHT11 & DHT22)

تعتمد حساس DHT11 على مبدأ بسيط وموحد لقياس درجة الحرارة والرطوبة المحيطة، حيث تتكون داخلياً من ثلاث وحدات أساسية تعمل معاً لإرسال البيانات رقمياً (18)

الوحدة الأولى وهي حساس الرطوبة (Humidity Sensor) والذي يتكون من قطبين كهربائيين بينهما مادة تمتص الرطوبة. عند تغير نسبة بخار الماء في الهواء، تتغير المقاومة الكهربائية (في DHT11) أو السعة الكهربائية بين القطبين، وهو ما يترجمه الحساس إلى نسبة مئوية للرطوبة. أما الوحدة الثانية فهي حساس الحرارة (Thermistor) والذي يعتمد في عمله على مقاومة حرارية من نوع (NTC:Negative Température Coefficient) حيث تنخفض قيمة مقاومتها الكهربائية كلما ارتفعت درجة الحرارة. أخيرا المتحكم الصغير (IC/Microcontrôleur): يقوم هذا المعالج المدمج (8-bit) بقراءة الإشارات التماثلية (Analog) من حساستَي الحرارة والرطوبة، ثم يحولها إلى إشارة رقمية (Digital Signal) جاهزة للإرسال. (18)



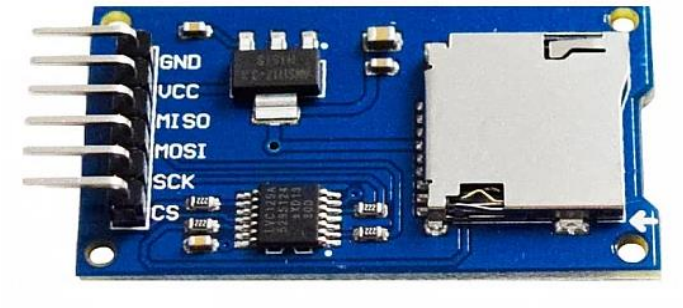
صورة 7. حساس الرطوبة والحرارة

5.8وحدة الربط(SD Card Module)

تعتبر وحدة بطاقة الذاكرة SD مفيدةً للغاية للمشاريع التي تتطلب تسجيل البيانات.حيث يستطيع الأردوينو إنشاء ملف على بطاقة الذاكرة SD لكتابة البيانات وحفظها باستخدام مكتبة SD.

يتوفر نوعان أساسيان من وحدات الربط (SD Card Module) للأردوينو : (Micro SD Card and Standard SD Card)**:** (19)

وحدة (Micro SD Card) هذه الوحدة هي الأكثر استخداماً لأنها صغيرة الحجم وتناسب بطاقات الذاكرة الخاصة بالهواتف، حيث تحتوي عادةً على منظم جهد (Level Shifter) يحول إشارة الأردوينو (5 فولت) إلى (3.3 فولت) التي تناسب البطاقة، مما يحميها من الاحتراق، كما أنها تعمل عبر بروتوكول SPI.



صورة 8. وحدة بطاقة الذاكرة الصغيرة ((Micro SD Card

الخاتمة

في الختام، خلال هذا الفصل تم استعراض الإطار النظري المرتبط بتلوث الهواء الداخلي، من خلال التعرف على أهم مصادره وتأثيراته الصحية، إضافة إلى أهم مؤشرات تقييم جودة الهواء. كما تم التطرق إلى دور تكنولوجيا أنترنت الأشياء، في تطوير أنظمة ذكية لمراقبة البيئة الداخلية بشكل مستمر ودقيق.

كما تم عرض مختلف المكونات الإلكترونية والحساسات التي يعتمد عليها النظام المقترح في هذه المذكرة، مع توضيح مبدأ عملها وخصائصها، الأمر الذي يوفر إطارا نظريا لفهم كيفية بناء نظام متكامل لمراقبة جودة الهواء.

وبناء على هذه المعطيات النظرية، سيتم في الفصل الموالي الانتقال إلى الجانب التطبيقي من خلال تصميم النظام المقترح ومحاكاته، بهدف التحقق من أدائه ودراسة مدى فعاليته قبل مرحلة التنفيذ الفعلي.

الفصل الثاني

التصميم والمحاكاة

مقدمة

يمثل هذا الفصل الجسر الرابط بين المفاهيم النظرية والدراسات البيئية والكيميائية التي تم استعراضها سابقاً، وبين التجسيد المادي والبرمجي للنظام الذكي المقترح لرصد وتوثيق مؤشرات جودة الهواء الداخلي في الأوساط المغلقة. إن الانتقال من دراسة سلوك ملوثات الهواء وانبعاثاتها إلى بناء منظومة قياس متكاملة ومستقلة يتطلب تخطيطاً هندسياً منسقاً يبدأ بتحديد الوظائف الأساسية والقيود التشغيلية للمنظومة. وبناءً على هذا المنطلق، يسلط هذا الفصل الضوء على التصميم الهيكلي الشامل للمشروع، حيث يستعرض مرحلة تحليل المتطلبات الوظيفية وغير الوظيفية التي تضمن كفاءة الأداء الميداني والمخبري للنظام، متبوعة بشرح البنية المعمارية العامة ومخطط الكتل الذي يوضح بدقة مسارات تدفق البيانات وإمدادات الطاقة بين المعالج المركزي وكافة الملحقات الطرفية.

كما يتناول الفصل بالتفصيل المنهجية العلمية المتبعة في اختيار العناصر الإلكترونية والحساسات، بناءً على معايير الدقة والجدوى الاقتصادية وتوافق بروتوكولات الاتصال، مع توضيح خريطة التوصيلات الكهربائية الشاملة التي تضمن استقرار الإشارات الرقمية والتماثلية ومنع التداخل بينها. وفي الشق البرمجي، يستعرض الفصل هندسة وتصميم الخوارزمية المنطقية الحاكمة للمتحكم الدقيق والتي تضمن الإدارة الذكية والآمنة لخيارات النظام كالقوائم التفاعلية، وتعدد اللغات، وضبط عتبات الإنذار، والتخزين الدوري للبيانات. ويختتم الفصل بمرحلة التحقق الافتراضي عبر بيئة المحاكاة البرمجية، ودراسة السيناريوهات التشغيلية والنتائج المتوقعة للنظام عند مجابهته للملوثات الناجمة عن عمليات الاحتراق والانبعاثات العطرية المختلفة، مما يضع ركيزة صلبة للانتقال نحو التجسيد المادي والتجريبي للمنظومة.

تكتسب أنظمة مراقبة جودة الهواء الداخلي أهمية استراتيجية في ظل التحولات العمرانية المتسارعة واعتماد الوقود الأحفوري في التدفئة والطهي. وتُشير الإحصائيات الوطنية إلى أن نسبة 85٪ من المساكن تعتمد على الغاز الطبيعي للطهي، بينما يستخدم 40٪ من الأسر البخور والمعطرات وملطفات الجو بانتظام في المناسبات الاجتماعية وغيرها (21). هذه المعطيات تُبرز الحاجة الملحة لأنظمة رصد محلية تتناسب مع الخصوصيات الثقافية والبيئية للمجتمع.

يتناول هذا الفصل التصميم التفصيلي للنظام المقترح لمراقبة جودة الهواء الداخلي، منطلقاً من تحليل المتطلبات الوظيفية وغير الوظيفية، مروراً بالبنية المعمارية على ثلاث طبقات، واختيار المكونات الإلكترونية بدقة، وانتهاءً بالمحاكاة الافتراضية على Proteus ودراسة السيناريوهات التشغيلية المتوقعة. وقد تم اعتماد منهجية التصميم الموجه بالمتطلبات (Requirements-Driven Design) التي تضمن تطابق النظام النهائي مع الأهداف المحددة مسبقاً (22).

1. تحديد المتطلبات الوظيفية الرئيسية

استناداً إلى الدراسات النظرية في الفصل الأول، والمراجع التقنية المتخصصة في تصميم الأنظمة البيئية، ومتطلبات المعايير الدولية (WHO، ASHRAE، EPA) (23)، تم تحديد المتطلبات الوظيفية للنظام المقترح على النحو التالي:

1.1 المتطلب الوظيفي الأول: قياس تركيز الجسيمات الدقيقة (PM)

يعتبر قياس الجسيمات الدقيقة الوظيفة الأساسية للنظام، نظراً لخطورتها البالغة على الصحة العامة. وتتطلب هذه الوظيفة:

قياس ثلاثة أنواع من الجسيمات: $PM_{1.0}$ (جسيمات أقل من 1 مايكرومتر)، $PM_{2.5}$ (أقل من 2.5 مايكرومتر)، PM_{10} (أقل من 10 ميكرو مترات). وقد حددت منظمة الصحة العالمية في إرشاداتها لعام 2021 أن الجسيمات $PM_{2.5}$هي الأكثر خطورة نظراً لقدرتها على اختراق الحواجز الدموية الهوائية والوصول إلى مجرى الدم (24).

نطاق القياس: من 0 إلى 500 ميكروغرام/م^3، مع دقة ±10٪ وفق مواصفات حساس PMS5003. ويغطي هذا النطاق جميع الحالات العملية، من البيئات النظيفة (أقل من 10 ميكروغرام/م^3) إلى البيئات الملوثة بشكل خطير (أكثر من 150 ميكروغرام/م^3) (23).

زمن الاستجابة: أقل من 10 ثوانٍ للحصول على قراءة مستقرة، مما يضمن الكشف السريع عن التغيرات المفاجئة في جودة الهواء (23).

تردد القياس: قراءة كل 2.3 ثانية في الوضع المستقر، وكل 200-800 مللي ثانية في الوضع السريع عند اكتشاف تغيرات كبيرة (23).

2.1 المتطلب الوظيفي الثاني : قياس الظروف البيئية المحيطة

تُؤثر درجة الحرارة والرطوبة النسبية بشكل مباشر على جودة الهواء الداخلي وعلى دقة قراءات حساس الجسيمات. وتتطلب هذه الوظيفة:

قياس درجة الحرارة: نطاق من -40°C إلى +80°C، بدقة ±0.5°C باستخدام حساس DHT11. وتُعتبر درجات الحرارة بين 20-25°C مثالية للراحة البشرية وفق معايير ASHRAE 55.

قياس الرطوبة النسبية: نطاق من 0٪ إلى 100٪، بدقة ±2٪. وقد حددت ASHRAE أن النطاق المثالي للراحة يتراوح بين 30٪ و60٪. تجاوز هذا النطاق يُسهم في نمو العفن والفطريات (عند الرطوبة العالية) أو جفاف الأغشية المخاطية (عند الرطوبة المنخفضة).

العلاقة التفاعلية: ربط قراءات الرطوبة والحرارة بقراءات الجسيمات، إذ تُظهر الدراسات أن الرطوبة العالية تُسرّع من ترسب الجسيمات الدقيقة على الأسطح، بينما تؤثر درجات الحرارة المرتفعة على تطاير المركبات العضوية المتطايرة.

3.1 المتطلب الوظيفي الثالث: عرض البيانات بشكل آني ومفهوم

تُعدّ واجهة العرض الواجهة الرئيسية بين النظام والمستخدم النهائي، ويجب أن تكون بسيطة وواضحة. وتتطلب هذه الوظيفة:

شاشة LCD 2004: عرض 20 حرفاً في 4 أسطر، مما يتيح عرض جميع المعلومات الأساسية في وقت واحد: تراكيز PM، درجة الحرارة، الرطوبة، والحالة العامة.

تنظيم المعلومات: السطر الأول لقراءات PM_2.م وPM_{10}، السطر الثاني لدرجة الحرارة والرطوبة، السطر الثالث للتاريخ والوقت من RTC، والسطر الرابع لرسائل التنبيه أو الحالة.

التمييز البصري: استخدام رموز أو ألوان (إن أمكن) للإشارة إلى حالة جودة الهواء: أخضر للمقبول، أصفر للمتوسط، أحمر للخطير.

4.1 المتطلب الوظيفي الرابع : تسجيل البيانات مع الطابع الزمني

يُعدّ التسجيل المستمر للبيانات ضرورة علمية وقانونية، حيث يسمح بتحليل الاتجاهات على المدى الطويل وتقييم فعالية التدخلات. وتتطلب هذه الوظيفة:

بطاقة SD: سعة 2-32 جيجابايت، بتنسيق ملفات CSV (Comma Separated Values) يسهل فتحه في Excel أو أي برنامج تحليلي.

الطابع الزمني: تسجيل كل قراءة مع الوقت والتاريخ الدقيق من وحدة RTC DS3231، مما يضمن تتبع التغيرات الزمنية بدقة.

تردد التسجيل: تسجيل كل قراءة على فترات زمنية قابلة للتعديل (افتراضياً كل دقيقة)، مع إمكانية زيادة التردد عند اكتشاف تلوث مرتفع.

الحفاظ على البيانات: استمرار التسجيل حتى في حالة انقطاع الطاقة الرئيسية (باستخدام بطارية احتياطية لـ RTC).

5.1 المتطلب الوظيفي الخامس : إصدار التنبيهات عند تجاوز الحدود

تعتبر وظيفة التنبيه من أهم الوظائف الأمنية في النظام، حيث تُنبّه المستخدمين إلى المخاطر الصحية المحتملة قبل حدوث أضرار جسيمة. وتتطلب هذه الوظيفة:

الحدود المرجعية: وفق المعايير الدولية المعتمدة:

PM_2.م: 15 ميكروغرام/م^3 (24 ساعة) حسب WHO 2021 (22).

45 : PM_{10} ميكروغرام/م^3 (24 ساعة) حسب WHO 2021.

درجة الحرارة: 18-26°C حسب ASHRAE 55.

الرطوبة: 30-60٪ حسب ASHRAE.

6.1 المتطلب الوظيفي السادس : تتبع الوقت والتاريخ

تعتبر الوظيفة الزمنية أساسية لتوثيق البيانات وربطها بالأحداث البيئية والأنشطة البشرية. وتتطلب هذه الوظيفة:

وحدة RTC DS3231: دقة عالية مع استهلاك منخفض للطاقة، مما يضمن استمرار العمل لسنوات ببطارية صغيرة.

الدقة الزمنية: ±1 دقيقة شهرياً في درجات حرارة بين -40°C و+85°C.

التقويم: دعم السنوات الكبيرة والشهور المختلفة حتى عام 2099.

2. المتطلبات الغير وظيفية

تعنى المتطلبات غير الوظيفية بالخصائص الكيفية ومعايير الجودة والأداء الهيكلي التي تضمن استقرار المنظومة الذكية وعملها بأعلى كفاءة وموثوقية تحت مختلف الظروف التشغيلية والمخبرية. ويأتي في طليعة هذه المعايير شرط انخفاض التكلفة المادية، حيث يستند التصميم الهيكلي للمشروع على الاعتماد الكامل على حساسات ولوحات تطوير إلكترونية اقتصادية ومتاحة بشكل واسع في الأسواق التقنية، مما يرفع من الجدوى التطبيقية للنظام ويجعل إنتاجه وتعميمه أمراً ممكناً دون أعباء مالية مرتفعة. ويرتبط بهذا الجانب الاقتصادي معيار الاستقلالية والذاتية في التشغيل، إذ يتميز النظام بقدرته العالية على العمل المستقل والتشغيل الذاتي التام بمجرد تزويده بالطاقة الكهربائية المستمرة، مستغناً عن أي حاجة للربط الدائم بالحواسب الخارجية لإجراء الحسابات أو استرجاع المتغيرات الافتراضية.

وعلاوة على ذلك، يفرض التصميم البيئي معياراً صارماً للموثوقية والسرعة في الأداء، والذي يتجلى في سرعة استجابة النظام اللحظية للتغيرات الفجائية والحرجة في مستويات التلوث المحيطة، مثل رصد التصاعد الفوري لأدخنة البخور أو نواتج الاحتراق ومعالجتها دون أي تأخير زمني قد يؤثر على سلامة الأفراد. وتكتمل محددات الجودة هذه بمعيار المرونة وسهولة التطوير، حيث تم بناء وهندسة البنية المادية والبرمجية للمنظومة بطريقة مرنة وقابلة للتوسع الاستراتيجي، بما يسمح باستيعاب ودمج حساسات بيئية إضافية أو ربط مشغلات ميكانيكية ومادية مستقبلاً، مثل أنظمة التهوية والتصفية الذكية، دون الحاجة لإعادة تصميم الهيكل الأساسي للجهاز.

3. البنية العامة للنظام

تم تصميم النظام وفق بنية معمارية طبقية تضمن كفاءة تدفق البيانات وتنظيم العلاقة بين المكونات المادية والبرمجية، وتتألف من ثلاث طبقات رئيسية:

3.1 الطبقة الأولى : طبقة الاستشعار

تعتبر طبقة الاستشعار الطبقة السفلية في البنية، وهي المسؤولة عن التفاعل المباشر مع البيئة المحيطة وجمع البيانات الفيزيائية والكيميائية. وقد أظهرت الدراسات أن دقة وموثوقية هذه الطبقة تؤثر بشكل مباشر على جودة القرارات التي يتخذها النظام بنسبة 80٪.

أ. وحدة استشعار الجسيمات (PMS5003)

تمثّل هذه الوحدة العمود الفقري للنظام، حيث تقوم بقياس تراكيز الجسيمات العالقة في الهواء باستخدام مبدأ تشتت الليزر (Laser Scattering). وتتكون من:

مولد الليزر: يُطلق شعاعاً ضوئياً على الجسيمات العالقة.

مجمع الضوء: يجمع الضوء المُتشتت بزاوية معينة.

محول ضوئي-كهربائي: يحول الإشارة الضوئية إلى إشارة كهربائية.

معالج دقيق: يحلل الإشارة ويحسب أقطار الجسيمات وتراكيزها وفق نظرية مي (Mie Theory) (24).

وتُرسل الوحدة البيانات عبر واجهة UART بمعدل 9600 baud، ضمن إطار بيانات ثابت الحجم (32 بايت) يتضمن قيم $PM_{1.0}$، $PM_{2.5}$، PM_{1}. بالإضافة إلى عدد الجسيمات ذات الأحجام المختلفة (24).

ب. وحدة استشعار الحرارة والرطوبة (DHT22)

تُكمل هذه الوحدة البيانات البيئية بقياس الظروف المحيطة التي تؤثر على جودة الهواء وعلى دقة حساس الجسيمات. وتتكون من:

عنصر حساس للرطوبة: يعتمد على تغير السعة الكهربائية لطبقة بوليميرية تمتص بخار الماء.

مقاومة حرارية (NTC): تنخفض قيمتها كلما ارتفعت درجة الحرارة.

معالج دقيق مدمج: يحول الإشارات التماثلية إلى بيانات رقمية جاهزة للإرسال.

وتُرسل البيانات عبر إشارة رقمية واحدة (Single-Wire Protocol) بفترات زمنية لا تقل عن 2 ثانية بين القراءات.

جـ. وحدة الساعة الحقيقية (RTC DS3231)

تُوفر هذه الوحدة الطابع الزمني الدقيق لكل قراءة، مما يتيح تحليل الاتجاهات الزمنية وربط الأحداث بأوقات محددة. وتتميز بـ:

استهلاك منخفض للطاقة: 0.25 µA في وضع الاحتياطي.

دقة عالية: ±1 دقيقة شهرياً.

بطارية احتياطية: استمرار العمل عند انقطاع الطاقة الرئيسية.

واجهة I^2C: توصيل بسيط مع Arduino

3.2 الطبقة الثانية : طبقة المعالجة

تعتبر هذه الطبقة العقل المدبر للنظام، حيث تجمع البيانات من طبقة الاستشعار، وتعالجها، وتتخذ القرارات المناسبة. وقد أظهرت الدراسات أن اختيار وحدة المعالجة المناسبة يؤثر على أداء النظام بنسبة 60٪.

أ. لوحة Arduino UNO

تم اختيار Arduino UNO كوحدة معالجة مركزية لأسباب تتعلق بالتوافق والسهولة والتكلفة (25):

المعالج: ATmega328P (8-bit)، 16 MHz، 32 KB Flash، (2 KB SRAM. يحتوي 14 منفذا رقميا (6 منها PWM)، تكفي لتوصيل جميع المكونات. كما يحتوي على 6 منافذ تناظرية لقراءة الإشارات التماثلية إن لزم الأمر. واجهات الاتصال التسلسلي UART (أصلية + برمجية)، I^2C، SPI. سهولة البرمجة: بيئة Arduino IDE المفتوحة المصدر مع مكتبات جاهزة لجميع المكونات. تقوم Arduino بالوظائف التالية:

جمع البيانات: استقبال الإشارات من جميع الحساسات.

المعالجة: تحويل القيم الخام إلى وحدات قياس مفهومة (ميكروغرام/م^3، °C، ٪).

التحقق: مقارنة القيم مع الحدود المرجعية وتحديد حالة التنبيه.

التنسيق: إعداد البيانات للعرض والتخزين.

التحكم: إدارة واجهات العرض والتنبيه.

ب. وحدة تخزين البيانات (SD Card Module)

تُمثّل هذه الوحدة الذاكرة طويلة المدى للنظام، حيث تحفظ جميع القراءات مع الطابع الزمني. وتستخدم بروتوكول SPI: سرعة نقل عالية (حتى 8 MHz مع Arduino) كما أن تنسيق FAT32 متوافق مع جميع أنظمة التشغيل. وتسمح ملفات CSV سهولة الاستيراد إلى برامج التحليل.

3.3 الطبقة الثالثة : طبقة التطبيق

تمثّل هذه الطبقة الواجهة التي يتفاعل معها المستخدم النهائي، وتتضمن وسائل العرض والتنبيه والتفاعل.

أ. وحدة العرض (LCD 2004 مع I^2C)

تُوفر واجهة بصرية مباشرة للمستخدم، وتتميز بسعة عرض: 80 حرفاً (20×4) تكفي لعرض جميع المعلومات، واجهة I^2C لتقليل الأسلاك من 16 إلى 4 فقط، إضاءة خلفية وقابلية التحكم في السطوع، استهلاك منخفض للطاقة حوالي 1mA فقط عند العمل.

ب. واجهة التصدير (Data Export)

تتيح نقل البيانات المخزنة على بطاقة SD إلى الحاسوب للتحليل المتقدم، عبر قارئ بطاقات وتوصيل مباشر بالحاسوب بهدف التحليل إحصائي وذلك باستخدام Excel أو Python أو MATLAB مع إمكانية التصوير البياني من خلال رسم منحنيات القيم المقاسة بدلالة الزمن.

4. مخطط الكتل

يعكس مخطط الكتل الهيكل الترابطي الوظيفي للنظام كما هو موضح في الصورة 10، ويوضح بدقة مسارات انتقال البيانات وإمدادات الطاقة بين الوحدات المختلفة:

1.4 كتلة التغذية الكهربائية

تتولى تزويد كافة عناصر النظام بجهد كهربائي مستقر ومناسب (عادة 5 فولت) لضمان سلامة واستقرار العمل.

2.4 كتلة المدخلات

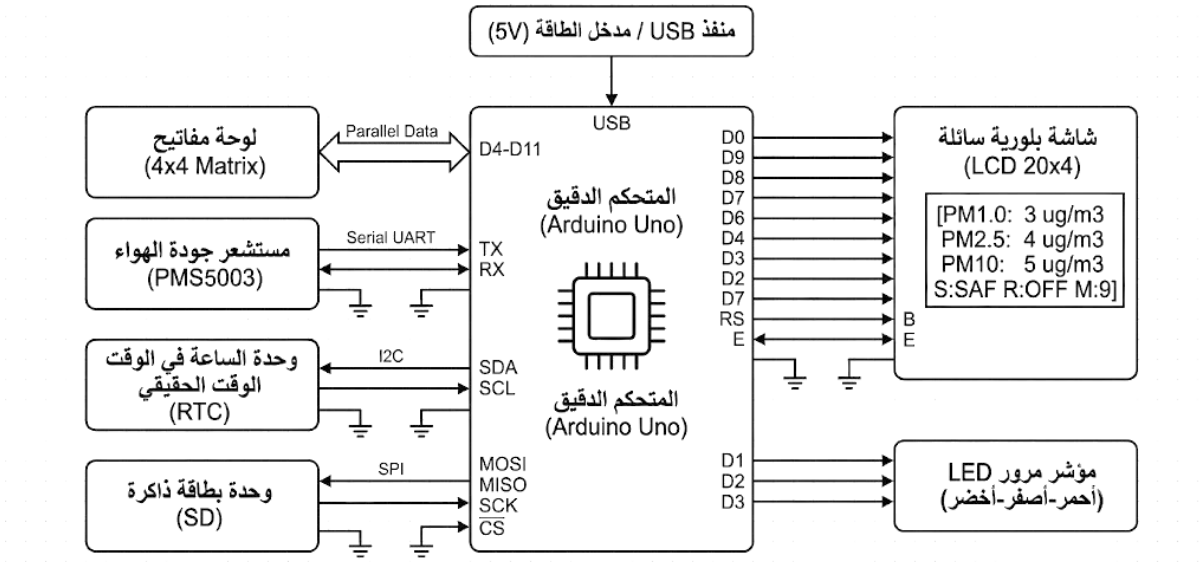
تشتمل على الحساسات (PMS5003 وDHT22) ووحدة الساعة الحقيقية (RTC)، وتعمل على إرسال القياسات الرقمية بصفة مستمرة إلى وحدة المعالجة.

4.3 كتلة المعالجة المركزية

تتمثل في لوحة Arduino UNO (المتحكم ATmega328P)، وتعمل كحلقة وصل وموجه رئيسي لكافة العمليات.

4.4 كتلة المخرجات والتخزين

تشمل شاشة العرض LCD ووحدة الذاكرة SD Card، وتستقبل البيانات المنسقة والمعالجة من الأردوينو لتنفيذ عمليتي الإظهار المرئي والتوثيق الكتابي.



صورة 9. مخطط الكتل للنظام المقترح

5. اختيار المكونات

5.1 الوحدات الرئيسية

يتكون النظام المقترح من سبع وحدات رئيسية كل منها يؤدي وظيفة محددة ويتفاعل مع الوحدات الأخرى عبر واجهات معيارية.

5.1.1 وحدة التغذية

تمثل الأساس الذي يبنى عليه عمل النظام برمته حيث توفر الطاقة الكهربائية المستقرة لجميع المكونات وتتكون من:

منفذ USB: (5V) للبرمجة والتغذية من الحاسوب.

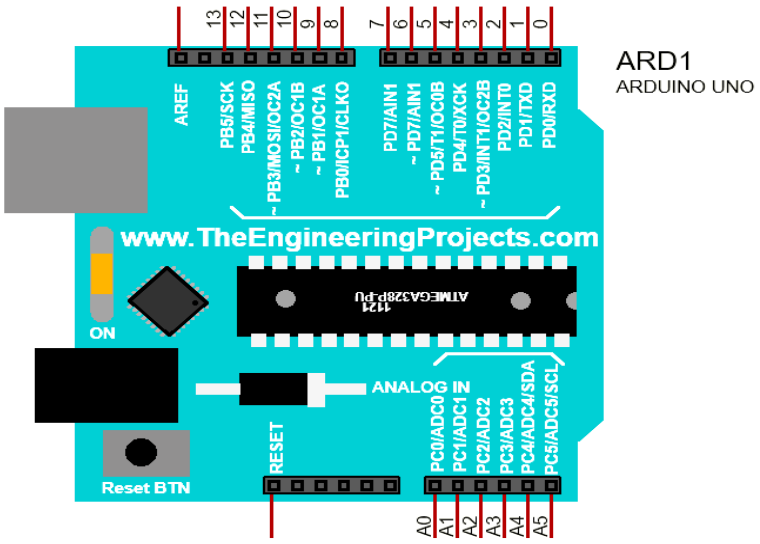
منفذ الطاقة الخارجي: مقبس للمحول الخارجي DC 2.1 mm

منظم الجهد: يحول 7-12V إلى 5V مستقر

مقسم الجهد: يوفر 3.3V للدوارات الحساسة

5.2.1 وحدة المعالجة المركزية (Central Processing Unit - CPU) (Arduino UNO

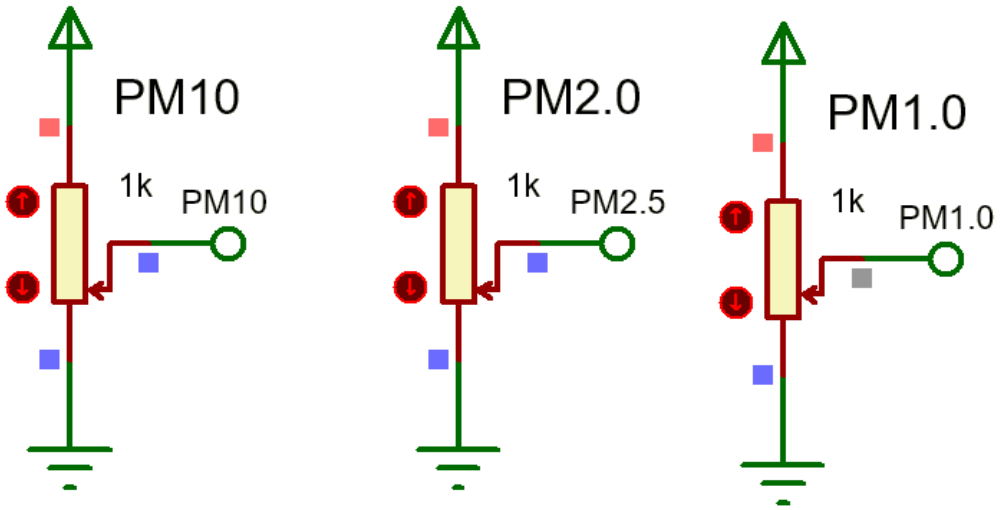
لوحة تطوير تعتمد على المتحكم الدقيق ATmega328P. تم اختيارها نظراً لسهولة برمجتها عبر بيئة Arduino IDE مفتوحة المصدر، ووفرة واجهات الاتصال القياسية بها مثل UART, I2C، و SPI، والتي تسمح بالربط المتزامن لجميع ملحقات النظام.



صورة 10. وحدة المعالجة المركزية Arduino UNO تحت بيئة Proteus

5.2.1 وحدة استشعار الجسيمات (PM Sensor - PMS5003)

حساس رقمي متطور يعتمد على تقنية تشتت الليزر (Laser Scattering). يحتوي على معالج مدمج يطبق نظرية "مي" (Mie Theory) لحساب عدد وحجم الجسيمات العالقة بدقة متناهية ، ويبث البيانات بشكل حزم رقمية ثابتة الحجم عبر منفذ UART. نظرا لعدم توفر نموذج الحساس في برنامج Proteus تم استخدام ثلاث مقسمات جهد كل واحد يعبر عن نوع الجسيمات PM1.0، PM2.5 و PM10 مثلما هو موضح في الصورة التالية:



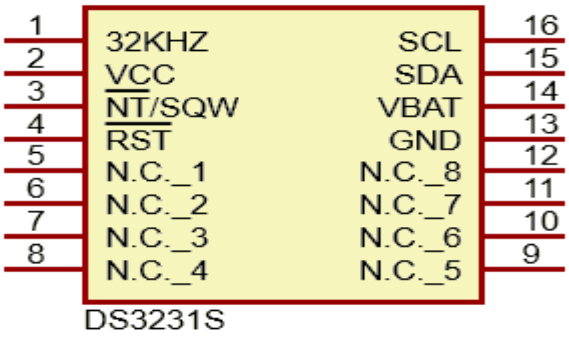
صورة 11. وحدة استشعار الجسيمات تحت بيئة Proteus

جدول 3 إطار بيانات الوحدة

البايت	المحتوى
0-1	بايتا البداية (0x42، 0x4D)
2-3	طول الإطار (0x001C = 28 بايت)
4-5	$PM_{1.0}$ (Standard)
6-7	$PM_{2.5}$ (Standard)
8-9	PM_{10} (Standard)
10-11	$PM_{1.0}$ (Environmental)
12-13	$PM_{2.5}$ (Environmental)
14-15	PM_{10} (Environmental)
16-31	عدد الجسيمات + Checksum

5.2.1 وحدة الزمن الحقيقية (RTC - DS3231)

وحدة مستقلة تتواصل عبر بروتوكول I2C. تم اختيارها لضمان حساب الوقت والتاريخ بدقة عالية دون التأثر بانقطاع الطاقة عن اللوحة الرئيسية بفضل تزويدها ببطارية احتياطية مستقلة (CR2032). تمثل الصورة التالية نموذج هذه الوحدة في برنامج Proteus:



صورة 12. وحدة الساعة الحقيقية DS3231 تحت بيئة Proteus

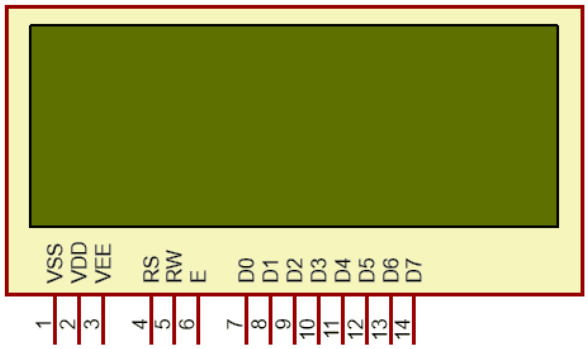
الجدول التالي يبين مواصفات هذه الوحدة و المعلومات الأساسية و طريقة توصيلها مع المتحكم:

جدول 4 وحدة الساعة الحقيقية

المعامل	المواصفة
الدقة	±1 دقيقة/شهر @ 25°C
استهلاك الطاقة (نشط)	1.0 µA @ 3V
استهلاك الطاقة (احتياطي)	0.25 µA @ 3V
واجهة الاتصال	I^2C (400 kHz max)
جهد التشغيل	1.0-5.5V
البطارية الاحتياطية	CR2032 (3V، ~10 سنوات)
التقويم	حتى 2099 مع السنوات الكبيسة

5.3.1 وحدة العرض (LCD 2004 - Display مع I^2C)

شاشة نصية تتسع لـ 4 أسطر و20 حرفاً في السطر الواحد. تم دمجها مع وحدة تحويل I^2C لتقليص عدد أسلاك التوصيل المطلوبة من 12 سلكاً إلى سلكين فقط (SDA وSCL)، مما يحمي منافذ الأردوينو الرقمية من الاستهلاك الكامل.



صورة 13. وحدة العرض تحت بيئة Proteus

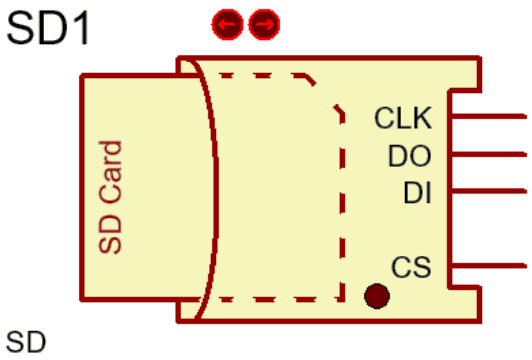
الجدول التالي يبين مواصفات هذه الوحدة و المعلومات الأساسية و طريقة توصيلها مع المتحكم:

جدول 5 مواصفات وحدة العرض

المعامل	المواصفة
الأبعاد	20 حرف × 4 أسطر = 80 حرف
واجهة الاتصال	I²C (عبر وحدة PCF8574)
العنوان I²C	0x27 (افتراضي)
جهد التشغيل	5V
استهلاك التيار	1mA (بدون إضاءة)
الإضاءة الخلفية	LED قابل للتحكم

5.4.1 وحدة التخزين (Storage - SD Card Module)

وحدة ربط تعمل عبر بروتوكول الاتصال السريع SPI. تحتوي على منظم جهد داخلي ومحول مستويات الإشارة لخفض الجهد من 5 فولت إلى 3.3 فولت لحماية بطاقة الذاكرة من التلف أثناء تبادل البيانات.



صورة 14. وحدة التخزين تحت بيئة Proteus

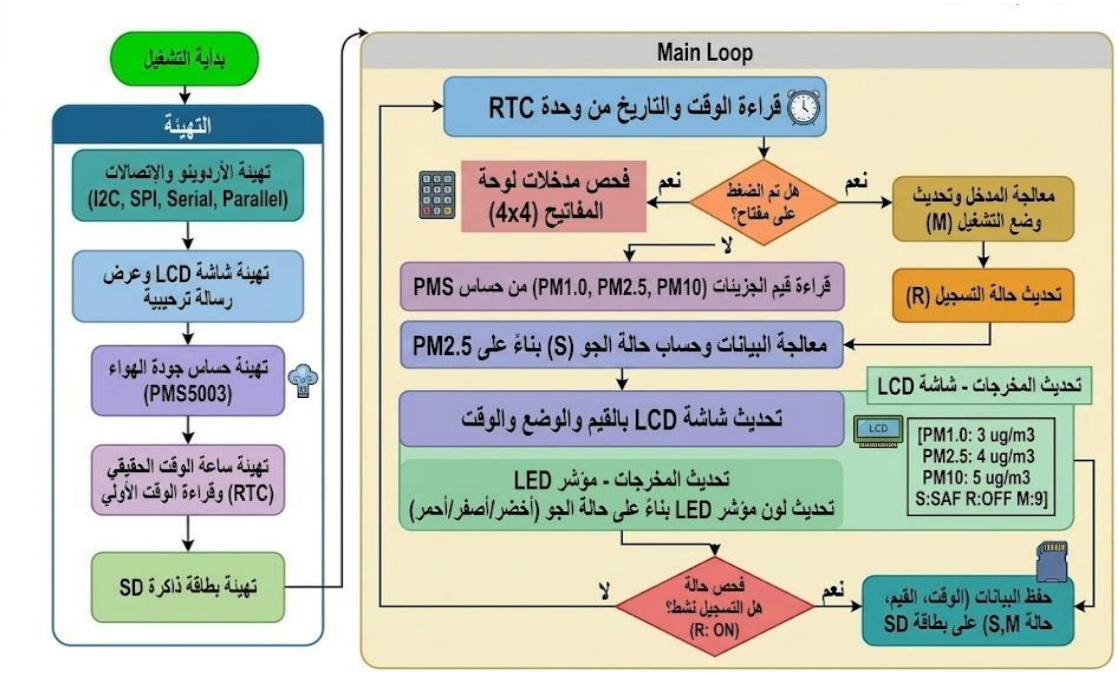
الجدول التالي يبين مواصفات هذه الوحدة و المعلومات الأساسية و طريقة توصيلها مع المتحكم:

جدول 6 مواصفات وحدة التخزين SD Card

المعامل	المواصفة
البروتوكول	SPI (Mode 0)
السرعة القصوى	8 MHz مع Arduino
السعة المدعومة	حتى 32 GB (FAT32)
جهد التشغيل	3.3V (مع منظم 3.3V–5V)
استهلاك التيار	20-100mA (أثناء الكتابة)
تنسيق الملفات	CSV (Comma Separated Values)

5.2 تفصيل تدفق البيانات

يظهر المخطط التدفقي في الصورة التالية آلية عمل الخوارزمية البرمجية للنظام المقترح خطوة بخطوة:



صورة 15. مخطط تدفق بيانات يوضح الخوارزمية البرمجية للنظام المقترح

خوارزمية تدفق بيانات النظام المقترح، مقسمة على مراحل متتالية تتبع حركة البيانات من لحظة الإقلاع وحتى التشغيل المستمر:

5.1.2 القسم الأول : مرحلة التشغيل والتهيئة (Setup Phase)

تنفذ هذه المرحلة مرة واحدة فقط عند تزويد اللوحة بالطاقة أو إرسال إشارة إعادة تعيين (Reset).

مرحلة 1: إقلاع النظام وتهيئة بروتوكولات الاتصال:

عند بدء تشغيل اللوحة (Arduino)، ينطلق نظام التشغيل الأساسي مفعّلا المعالج الذي يبدأ مباشرة بتهيئة الاتصالات من خلال فتح قنوات الاتصال البرمجية والعتادية مع مختلف الملحقات؛ حيث يتم تفعيل بروتوكول I2C للتواصل مع ساعة الوقت الحقيقي (RTC)، وبروتوكول SPI لتبادل البيانات مع وحدة بطاقة الذاكرة (SD)، بالإضافة إلى الاتصال التسلسلي (Serial/UART) المخصص لاستقبال قراءات الحساس PMS5003، والاتصال المتوازي (Parallel Data) للتحكم بالشاشة وعرض البيانات.

مرحلة 2: تجهيز المكونات الطرفية (Peripherals Init)

تهيئة شاشة LCD: يتم تفعيل الشاشة وضبط أبعادها (20×4) ثم عرض رسالة ترحيبية قصيرة للتأكد من سلامتها.

تهيئة حساس جودة الهواء (PMS7003): يتم إرسال إشارات التفعيل للحساس ليبدأ المروحة الداخلية بسحب الهواء وحساب الجزيئات.

تهيئة ساعة RTC: يتأكد المعالج من عمل الساعة ويقوم بقراءة الوقت والتاريخ الأولي المخزن فيها.

تهيئة بطاقة الذاكرة SD: يتم التحقق من وجود البطاقة وفتح ملف التخزين الأساسي (مثال: log.txt). إذا فشلت هذه الخطوة، يتوقف النظام أو يعطي تنبيهاً.

5.2.2 القسم الثاني: الحلقة الرئيسية المتكررة (Main Loop)

بعد انتهاء التهيئة بنجاح، ينتقل البرنامج إلى حلقة لا نهائية تُكرر الخطوات التالية باستمرار لتحديث البيانات لحظياً.

مرحلة 3: جلب الوقت وفحص مدخلات المستخدم

قراءة الوقت والتاريخ: يبدأ كل تكرار بجلب التوقيت الدقيق بالثواني والدقائق والساعات واليوم من وحدة RTC لربط القراءات بالزمن الحقيقي.

فحص لوحة المفاتيح (Keypad): يقوم المعالج بمسح صفوف وأعمدة المصفوفة (4x4) لمعرفة هل ضغط المستخدم على أي زر:

في حالة (نعم): يتم الانتقال إلى مسار فرعي لمعالجة المدخل، حيث يتم تحديث وضع التشغيل (M) أو تغيير حالة التسجيل (R)، ثم المتابعة.

في حالة (لا): يتخطى المعالج هذا المسار الفرعي وينتقل مباشرة إلى الخطوة التالية لتجنب تأخير النظام.

مرحلة 4: قراءة الحساس ومعالجة البيانات

قراءة قيم الجزيئات: يستقبل الأردوينو حزمة البيانات التسلسلية القادمة من حساس PMS ويستخرج منها قيم التراكيز الثلاثة: PM1.0 و PM2.5 و PM10 بوحدة (\mu g/m^3).

معالجة البيانات وحساب حالة الجو (S): يأخذ المعالج قيمة PM2.5 كمؤشر أساسي، ويقارنها بالمعايير البيئية المخزنة برمجياً لتحديد حالة الجو العامة (S): هل الجو آمن (SAF)، متوسط، أو خطير.

مرحلة 5: تحديث واجهات الإخراج (Visual Output)

تحديث شاشة LCD: يتم إرسال البيانات المحدثة إلى الشاشة لطباعتها في أسطر منظمة تعرض (قيم الجسيمات الثلاثة، حالة الجو S، حالة التسجيل R، ورقم الوضع الحالي M).

تحديث مؤشر LED الثلاثي: بناءً على قيمة الحالة (S) المحسوبة في المرحلة السابقة، يضيء الصمام المناسب:

أخضر: الجو ممتاز ونظيف.

أصفر: تلوث متوسط (تحذير).

أحمر: تلوث عالٍ وخطر.

مرحلة 6: التخزين وإغلاق الحلقة (Data Logging)

فحص حالة التسجيل (R): يختبر المعالج المتغير البرمجي (R):

إذا كان (R: ON) [نعم]: يقوم المعالج بفتح بطاقة الذاكرة SD وكتابة سطر يحتوي على: [الوقت والتاريخ، قيم PM، حالة الجو S، الوضع M] لتوثيق القراءة، ثم يغلق الملف بأمان لحماية البيانات من التلف.

إذا كان (R: OFF) [لا]: يتجاهل خطوة الكتابة لتوفير الطاقة وعمر البطاقة الافتراضي.

إعادة الدورة: يعود السهم الانسيابي إلى أعلى الـ (Main Loop) (العودة إلى مرحلة 3) لتبدأ العملية من جديد وبشكل دوري مستمر.

6. التوصيلات الكهربائية

تُشكّل التوصيلات الكهربائية الركيزة المادية التي تربط مكونات النظام وتمكن من تبادل الإشارات والطاقة فيما بينها. يستلزم التصميم الكهربائي الدقيق مراعاة مستويات الجهد والتيار لكل مكون، وتجنب التعارضات بين الأجهزة التي تتشارك خطوط الاتصال ذاتها.

جدول 7 التوصيلات الكهربائية و برتوكولات التواصل لمختلف وحدات النظام

المكون	الطراز	البروتوكول	الجهد	الوظيفة الرئيسية
وحدة التحكم	Arduino Uno	---	5V	المعالجة المركزية
حساس الجسيمات	PMS5003	UART 9600bps	5V	PM1.0/PM2.5/PM10 قياس
شاشة العرض	LCD 2004 + PCF8574	I2C @ 0x27	5V	عرض البيانات
ساعة الزمن	DS3231	I2C @ 0x68	3.3-5V	الطابع الزمني الدقيق
وحدة SD	SD Card Module	SPI	5V/3.3 V	تسجيل وحفظ البيانات

6.1 توصيل الحساس PMS5003 مع Arduino UNO

يتصل حساس PMS5003 بـ Arduino عبر بروتوكول SoftwareSerial بدلاً من المنفذ التسلسلي الأصلي (D0/D1)، وذلك للحفاظ على إمكانية استخدام المنفذ الأصلي لأغراض تصحيح الأخطاء عبر الحاسوب. يُوصّل طرف TX للحساس بالدبوس D10 (RX البرمجي) وطرف RX بالدبوس D11 (TX البرمجي). يُغذّى الحساس بجهد 5 فولت من Arduino مع ضرورة توحيد الأرضي. يستلزم التوصيل استخدام مقسّم جهد لتعديل مستوى إشارة TX من 3.3 فولت إلى المستوى المقبول من Arduino، إذ تعمل بعض دبابيس PMS5003 بمنطق 3.3 فولت.

6.2 توصيل الـ I2C (DS3231 + LCD/PCF8574)

يتشارك كلٌّ من DS3231 وLCD/PCF8574 خطَّ I2C الموحد الذي يربطهما بـ Arduino عبر دبوسَي A4 (SDA) وA5 (SCL). تُوصّل دبابيس VCC وGND لكلا الجهازين بمصادر الطاقة والأرضي المقابلة على Arduino. يتم إضافة مقاومتَي رفع (Pull-up Resistors) بقيمة 4.7 كيلو-أوم بين خط SDA وجهد 3.3 فولت وبين خط SCL وجهد 3.3 فولت لضمان استقرار مستويات الإشارة على الخط، وإن كانت بعض وحدات PCF8574 الجاهزة تتضمنها داخلياً مما يُغني عن إضافتها خارجياً.

6.3 توصيلات بروتوكول SPI (وحدة SD)

تتصل وحدة SD بـ Arduino عبر أربعة خطوط SPI رئيسية مع خط اختيار الشريحة (CS). يُوصّل دبوس MOSI بالدبوس D11، ودبوس MISO بالدبوس D12، ودبوس SCK بالدبوس D13، بينما يُخصّص الدبوس D4 أو D10 لخط CS الذي يتحكم في تفعيل الوحدة وتعطيلها. تجدر ملاحظة أن الدبوس D11 يشترك بين وحدة SD (MOSI) ومكتبة SoftwareSerial (TX)؛ لذا يُلزَم الكود ببرمجة هذا الدبوس بدور واحد فقط في كل وقت، وهو ما يتحقق تلقائياً بحكم أن SoftwareSerial ووحدة SD لا تعملان في آنٍ واحد خلال دورة المعالجة.

6.4 اعتبارات عامة للتوصيل

تستوجب سلامة التوصيلات الالتزام بعدة اعتبارات تقنية: أولها توحيد نقطة الأرضي المشتركة (Common Ground) بين جميع المكونات باعتبارها المرجع الكهربائي الذي تُقاس عليه جميع الجهود، وإغفالها من أكثر أسباب عطل الأنظمة المضمّنة شيوعاً. وثانيها استخدام مكثفات ترشيح (Decoupling Capacitors) بقيمة 100 نانو-فاراد قريبة من دبابيس الطاقة لكل دارة متكاملة للحدّ من الضوضاء الكهربائية. وثالثها التحقق بجهاز القياس المتعدد (Multimeter) من صحة التوصيلات وسلامة الجهود قبل التشغيل الفعلي لتجنب إتلاف المكونات.

7. تصميم الخوارزمية ومكتبات Arduino

تمثل الخوارزمية المصممة المنطق البرمجي الذي يحرك النظام ويُنظّم تتابع العمليات في كل دورة تشغيل. صِيغت هذه الخوارزمية بأسلوب يُعلي من شأن الاستجابة الآنية وانتظام القياس، مع ضمان استمرارية تسجيل البيانات حتى في أثناء تفاعل المستخدم مع لوحة المفاتيح.

7.1 مرحلة التهيئة

عند تشغيل النظام أو إعادة ضبطه، تنطلق مرحلة التهيئة التي تُنفَّذ مرة واحدة فقط قبل الدخول في الحلقة الرئيسية. تبدأ بتشغيل المنفذ التسلسلي الأصلي للأغراض التشخيصية، تليه تهيئة مكتبة SoftwareSerial للتواصل مع حساس PMS5003. ثم تُهيّأ شاشة LCD وتُعرض عليها رسالة انتظار تُعلم المستخدم أن النظام في طور الإقلاع. بعدها يجري فحص اتصال DS3231 عبر I2C وقراءة الوقت الحالي للتحقق من صحة الوحدة. تختتم مرحلة التهيئة بفحص بطاقة SD وإنشاء ملف السجل مع رأس الجدول (Headers) إن لم يكن موجوداً، فإن أخفق أي من هذه الخطوات أُوقفت العملية وعُرضت على الشاشة رسالة خطأ واضحة.

7.2 الحلقة الرئيسية

تتكرر الحلقة الرئيسية بصفة دورية لا تتجاوز الثانية الواحدة، وتنقسم مهامها إلى ثلاثة محاور: الاستشعار والمعالجة، ثم الإخراج، ثم الاستجابة للمستخدم. في محور الاستشعار، تُفحص بيانات UART القادمة من PMS5003 وتُجرى عليها خطوات التحقق من صحة الحزمة؛ فإن اجتازت الفحص استُخرجت منها قيم PM وأُضيف إليها الطابع الزمني المُستمدّ من DS3231 في الحال. وفي محور الإخراج، تُحدّث شاشة LCD بالقيم الجديدة وتُكتب البيانات على بطاقة SD. أما في محور الاستجابة، فتُفحص لوحة المفاتيح بأسلوب غير محجوب (Non-blocking) وتُنفَّذ العملية المرتبطة بأي مفتاح مضغوط دون تعطيل تدفق البيانات الرئيسي.

7.3 خوارزمية التحقق من صحة حزم PMS5003

يرسل الحساس بيانات بصيغة ثنائية في حزم ذات طول ثابت تبلغ 32 بايتاً، تبدأ دائماً بالبايتين التعريفيين 0x42 و0x4D. تنتهج خوارزمية التحقق ثلاثة مستويات من الفحص: الأول يتمثل في التثبت من بايتَي البداية، فإن اختلفا طُرحت الحزمة ولم تُعالَج. والثاني يتضمن التحقق من الطول المُعلَن في الحقلين الثالث والرابع من الحزمة ومقارنته بطول الحزمة المُستلَمة فعلياً. أما المستوى الثالث وهو الأكثر دقة، فيقوم على حساب مجموع بايتات الحزمة من الأول حتى البايت التاسع والعشرين ومقارنته بقيمة Checksum المُدرجة في البايتين الأخيرين؛ فإن تطابقا استُكملت المعالجة واستُخرجت القيم، وإلا انتظر النظام الحزمة التالية دون إجراء أي تحديث.

7.4 خوارزمية تسجيل البيانات على SD

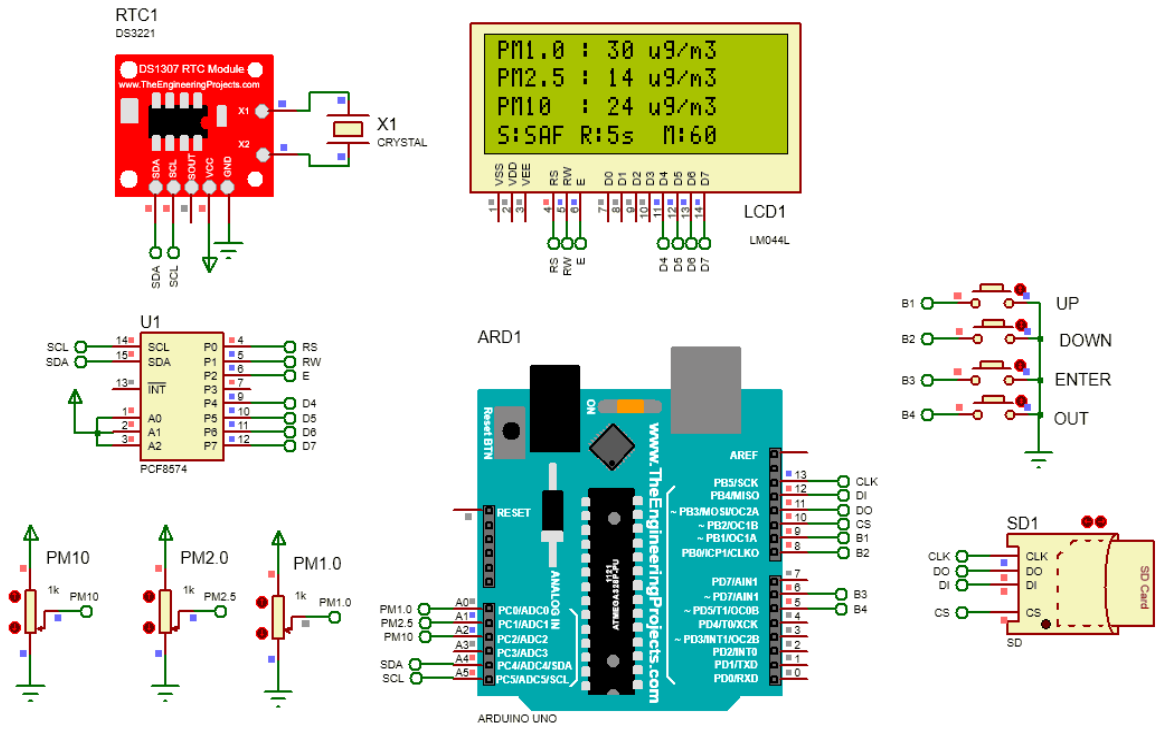
تكتب بيانات كل قراءة على بطاقة SD وفق تنسيق CSV يُيسّر استيراده لاحقاً في برامج تحليل البيانات. يتضمن كل سطر في الملف: التاريخ بصيغة YYYY/MM/DD، والوقت بصيغة HH:MM:SS، وقيم PM1.0 وPM2.5 وPM10 بوحدة $\mu g/m^3$، إضافةً إلى تصنيف جودة الهواء المُشتق من مقارنة PM2.5 بمعايير منظمة الصحة العالمية. يُفتح الملف في كل كتابة بوضع الإضافة (Append Mode) ليُغلَق فور اكتمالها، وهو نهج يُطيل عمر البطاقة ويضمن سلامة البيانات السابقة حتى في حالات الانقطاع المفاجئ للتيار.

8. المحاكات على Proteus

برنامج Proteus ISIS هو بيئة محاكاة إلكترونية متكاملة تتيح تصميم الدوائر الكهربائية وتشغيلها افتراضيا بدرجة عالية من الواقعية، قبل اللجوء إلى التنفيذ المادي الذي قد ينطوي على مخاطر إتلاف المكونات أو الإهدار في الوقت والمال. يتميز البرنامج بمكتبة ثرية تضم نماذج محاكاة للمتحكمات الدقيقة AVR وPIC وARM، إلى جانب نماذج للشاشات والبروتوكولات التسلسلية وكثير من أجهزة الاستشعار.

8.1 إعداد بيئة المحاكاة

تبدأ عملية إعداد المحاكاة بإنشاء مشروع جديد في Proteus ISIS واستدعاء مكونات النظام من المكتبة. يُضاف نموذج Arduino Uno ويُحمّل إليه ملف HEX الناتج عن ترجمة الكود في Arduino IDE. تُضاف شاشة LCD 2004 من مكتبة Optoelectronics وتُوصّل مع نموذج PCF8574 عبر خط I2C افتراضي. يُضاف DS3231 من تبويب Miscellaneous ويُوصّل هو الآخر على الخط I2C ذاته مع التأكد من ضبط عناوين الجهازين بصورة مختلفة. تُضاف وحدة SD بنموذجها المتوفر في المكتبة، أو يُستعاض عنها بوحدة Virtual File System في الإصدارات التي لا تتضمن نموذجاً مباشراً لها. أما حساس PMS5003 فلا يتوفر له نموذج مُدرَج في مكتبة Proteus القياسية، ويُحاكى عوضاً عنه بمصدر UART يُرسل حزم بيانات ثنائية بالصيغة المنصوص عليها في صفحة البيانات الرسمية للحساس.



صورة 16. المحاكاة في بيئة Proteus

8.2 سير عملية المحاكاة

بعد الانتهاء من توصيل جميع المكونات في مخطط Proteus وتحميل الكود المُترجَم، تُشغّل المحاكاة بنقرة واحدة وتبدأ وحدة Arduino في تنفيذ برنامجها. تظهر على نموذج LCD العبارات المبرمجة لتُتيح التحقق البصري من صحة الواجهة. كما تُراقَب قناة UART عبر نافذة Serial Monitor الافتراضية لرصد البيانات الواردة من محاكي PMS5003. يمكن التفاعل مع نموذج لوحة المفاتيح بالنقر على المفاتيح

الافتراضية ومراقبة ردود فعل الشاشة والبرنامج. وتُختبر عمليات الكتابة على SD عبر نوافذ الرسائل أو ملفات الإخراج حسب الإصدار المُستخدَم من Proteus.

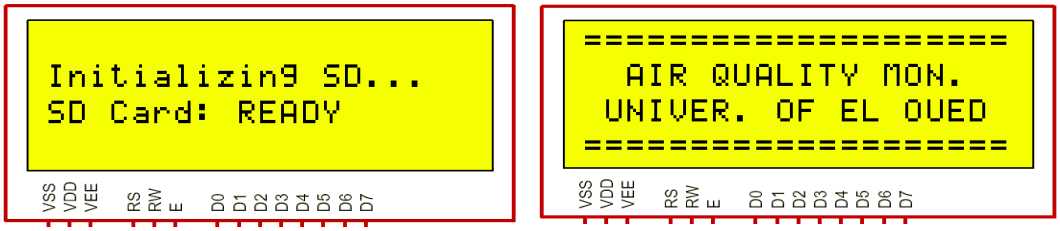
8.3 تحديات المحاكاة في Proteus

تعترض محاكاة هذا النظام في Proteus ISIS جملةٌ من التحديات الجديرة بالتوقع والمعالجة. أبرزها غياب نموذج جاهز لحساس PMS5003 في المكتبة القياسية، مما يُوجب بناء محاكٍ UART مخصص قادر على إرسال حزم بثنائية صالحة بما فيها قيم Checksum صحيحة. يُضاف إلى ذلك أن دعم وحدات SD في بعض إصدارات Proteus جاء محدوداً أو غير مستقر، مما يستلزم اعتماد Virtual File System أو تجاوز هذه الجزئية في المحاكاة والتحقق منها لاحقاً في التجارب الفعلية. كذلك قد تظهر فوارق زمنية في المحاكاة تجعل استجابة I2C وSPI أبطأ من المعدلات الحقيقية، مما يستدعي ضبط التأخيرات الزمنية (Delays) في الكود خلال مرحلة المحاكاة ثم إزالتها أو تعديلها قبل التنفيذ الفعلي.

9. نتائج المحاكاة

9.1 التشغيل الأولي للنظام

توضح هذه الصورة المرفقة النتائج الأولية المباشرة لنجاح إقلاع نظام قياس جودة الهواء ومحاكاته بكفاءة داخل بيئة برنامج Proteus. تنقسم شاشة الـ LCD (بحجم 20×4 أسطر) في مرحلة التشغيل الأولى إلى واجهتين متتاليتين تؤكدان سلامة الربط البرمجي والعتادي للنظام.



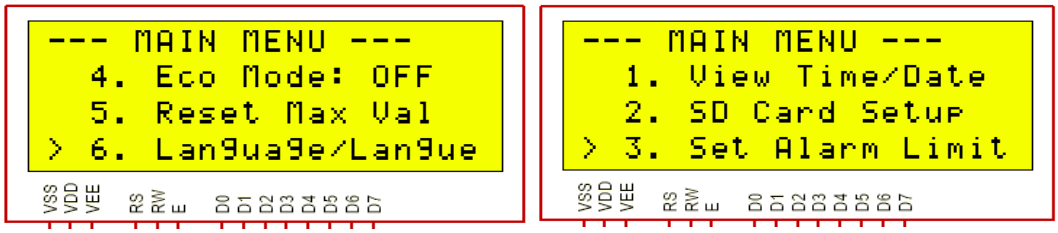
صورة 17. بداية التشغيل في بيئة Proteus

الواجهة الترحيبية (الصورة على اليمين) حيث تظهر مباشرة عند تزويد الأردوينو بالطاقة لتعرض اسم المشروع وعنوانه "AIR QUALITY MON". وهي الواجهة التي تضمن للمصمم عمل الشاشة واستجابتها عبر بروتوكول الاتصال I2C بنجاح.واجهة فحص الذاكرة (الصورة على اليسار) تلي الواجهة الترحيبية مباشرة حيث يقوم المعالج باختبار موديول بطاقة الذاكرة عبر سطر "Initializing SD..."، وتعكس العبارة اللاحقة "❖❖SD Card: READY❖❖" نجاح الأردوينو في فتح قنوات اتصال SPI مع البطاقة وجاهزية

النظام الكاملة لبدء تدوين وحفظ قراءات حساس جودة الهواء الافتراضية المستقاة من المقاومات المتغيرة داخل ملف التخزين `datalog.csv` دون أي مشاكل تقنية.

9.2 الاعدادات

تظهر هذه النتائج نجاح الآلية البرمجية المصممة لإدارة وتصفح القائمة الرئيسية عبر شاشة الـ LCD. يعتمد النظام على معادلة تدوير ذكية (Scrolling Algorithm) تتيح عرض ثلاثة خيارات فقط في نفس الوقت من أصل ستة خيارات متاحة، وذلك لملاءمة أبعاد الشاشة (20×4 أسطر) والحفاظ على سطر العنوان الثابت في الأعلى `--- MAIN MENU ---`.



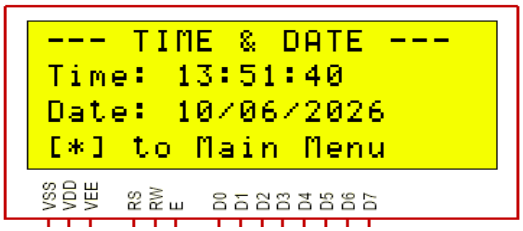
صورة 18. واجهة الإعدادات والقائمة الرئيسية (Main Menu) في بيئة Proteus

الواجهة في الصورة أعلاه على اليمين (العناصر 1-3) تمثل بداية تصفح القائمة، حيث يظهر مؤشر السهم الموجه (`>`) متحركاً أمام الخيار الثالث "3. Set Alarm Limit" لتحديد حد إنذار القياسات. وتشمل هذه الواجهة أيضاً خيار استعراض الوقت والتاريخ (View Time/Date) وإعدادات كرت الذاكرة (SD Card Setup). أما الواجهة في الصورة السابقة على اليسار (العناصر 4-6) فتظهر تلقائياً عند استمرار المستخدم بالضغط على زر النزول (DOWN)، حيث تنزلق الشاشة برمجياً لإظهار بقية الإعدادات. ويستقر السهم في هذه اللقطة عند الخيار السادس والأخير الخاص بضبط لغة النظام (Language/Langue)، مسبوقاً بخيار تصفير أعلى قيمة مسجلة (Reset Max Val) وخيار نمط توفير الطاقة (Eco Mode) الذي يظهر في الحالة المطفأة (OFF).

تثبت هذه النتائج الاستجابة البرمجية الدقيقة للأزرار المتصلة بـArduino وسلاسة الانتقال بين القوائم الفرعية بكفاءة عالية.

9.3 اظهار الزمن في الشاشة

توضح هذه النتائج نجاح النظام في استدعاء وقراءة البيانات الزمنية بدقة عالية من موديول الساعة الزمني (RTC DS3231) وعرضها بشكل منظم على شاشة الـ LCD عند قيام المستخدم باختيار الخيار الأول من القائمة الرئيسية.



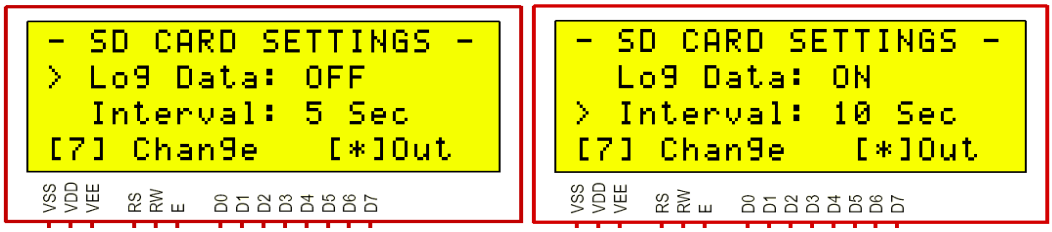
صورة 19. واجهة إظهار الزمن والتاريخ في الشاشة (Time & Date (Interface

تتكون هذه الواجهة الفرعية من سطر عنوان علوي ثابت وهو --- TIME & DATE ---، يليه السطر الثاني الذي يعرض الوقت الفعلي بنظام 24 ساعة مقسماً بدقة إلى الساعات، الدقائق، والثواني Time: 13:51:40. بينما يظهر في السطر الثالث التاريخ اليومي المحدث Date: 10/06/2026، مما يضمن توثيقاً زمنياً دقيقاً ومزامنة متكاملة مع البيانات التي يتم تدوينها وحفظها لاحقاً داخل كرت الذاكرة SD Card. وفي السطر الأخير، يتيح النظام إرشاداً مرئياً ذكياً للمستخدم عبر العبارة [❖] to Main Menu ليتمكن من العودة بسهولة وسلاسة إلى القائمة الرئيسية بمجرد الضغط على زر الرجوع (OUT/BACK). تعكس هذه الواجهة استقرار بروتوكول الاتصال I2C المشغل للساعة والشاشة معاً دون حدوث أي تداخل في الإشارات أو تأخير في الاستجابة البرمجية.

9.4 اعدادات تسجيل البيانات على بطاقة الذاكرة

توضح هذه النتائج نجاح النظام في تفعيل وإدارة الواجهة الفرعية المخصصة للتحكم ببطاقة الذاكرة (SD Card)، والتي يتم الدخول إليها عبر اختيار الخيار الثاني من القائمة الرئيسية. تتيح هذه الواجهة للمستخدم ضبط معلمتين أساسيتين لعملية التدوين والتخزين بشكل مرن:

الواجهة على اليسار (إيقاف التسجيل وتحديد الفترة): تعكس الحالة الابتدائية للتصفح، حيث يشار بمؤشر السهم (>) نحو الخيار الأول Log Data: OFF، مما يعني أن النظام في وضع الاستعداد ولم يبدأ بعد بالكتابة على الكرت. كما يظهر أسفله الفترة الزمنية الحالية المحددة افتراضياً للتسجيل وهي خمس ثوانٍ (Interval: 5 Sec).



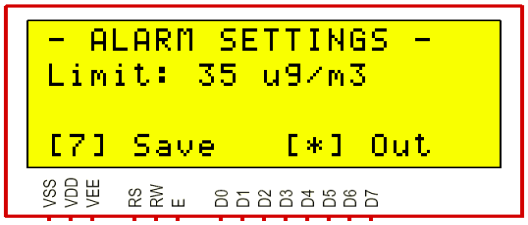
صورة 20. واجهة إعدادات تسجيل البيانات على بطاقة الذاكرة (SD Card (Settings Interface

الواجهة على اليمين (تفعيل التسجيل وتغيير الفترة): توضح استجابة النظام عند قيام المستخدم بالضغط على زر الموافقة (ENTER) لتتحول حالة التسجيل مباشرة إلى Log Data: ON، بالتزامن مع حفظ هذه الحالة الجديدة تلقائياً داخل الذاكرة الدائمة EEPROM لضمان عدم فقدانها عند انقطاع الطاقة. وفي نفس الوقت، نلاحظ تحرك السهم نحو الخيار الثاني وتغيير الفترة الزمنية بنجاح إلى عشر ثوانٍ (Interval: 10 Sec) عبر الانتقال للمؤشر التالي في مصفوفة الفترات المتاحة برمجياً.

توفر هذه الواجهة أيضاً دليلاً إرشادياً للمستخدم في السطر الأخير يعرض وظائف الأزرار المتاحة حالياً، حيث يشير الاختصار [7] Change إلى إمكانية التعديل، بينما يسمح الاختصار [*] Out بالخروج والرجوع إلى القائمة الرئيسية. تعكس هذه النتائج استقرار وظائف الاتصال البرمجي المتزامن عبر بروتوكول SPI المخصص للذاكرة والـ I2C المخصص للشاشة في آنٍ واحد وبدون أخطاء.

9.5 اعدادات التنبيه والقيمة الحدية

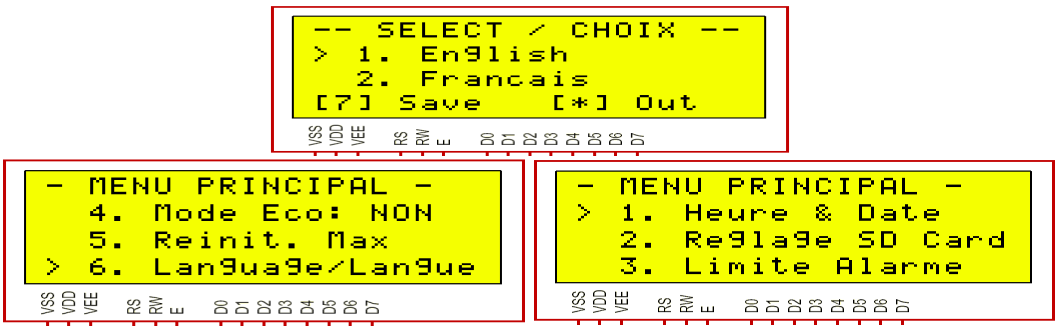
توضح هذه النتائج كفاءة التصميم البرمجي للواجهة الفرعية المخصصة لتخصيص عتبة الإنذار (Alarm Threshold)، والتي يتم الانتقال إليها من خلال تحديد الخيار الثالث في القائمة الرئيسية. تبرز الصورة قدرة النظام على عرض المحتوى النصي والإرشادي لحظيا.



صورة 21. إعدادات التنبيه والقيمة الحدية (Alarm Settings & Threshold)

تؤكد هذه النتائج استقرار النظام الكامل في معالجة الإشارات التماثلية الواردة، وتحديث الشاشة بانتظام وثبات، وتناسق الخوارزميات الأمنية والتدوينية في آنٍ واحد.

9.6 اعدادات اللغة و تغييرها



صورة 22. إعدادات اللغة وتغييرها (Language & Localization Settings)

9.7 شاشة القياسات

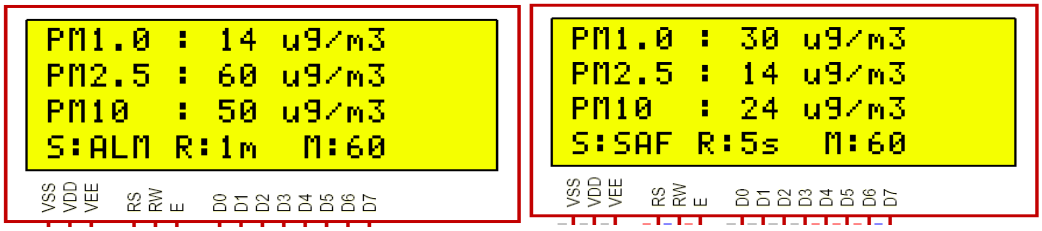
توضح هذه النتائج واجهة العرض الأساسية والافتراضية للنظام (LIVE DATA)، والتي تظهر مباشرة بعد تخطي شاشات الترحيب والتهيئة. تم تصميم هذه الواجهة لتقدم للمستخدم مراقبة شاملة ولحظية لثلاثة مؤشرات رئيسية لجسيمات الغبار العالقة في الهواء، بالإضافة إلى المؤشرات التشغيلية للنظام.

قراءات جودة الهواء (الأسطر الثلاثة الأولى): تعرض الشاشة بدقة نسب تركيز الجسيمات القادمة برمجياً من قنوات المقاومات المتغيرة البديلة للحساس. السطر التشغيلي الرابع (الحالة والذاكرة): يحتوي على ثلاثة رموز تشخيصية ذكية:

مؤشر الحالة (S:ALM): يعكس تفعيل النظام لحالة الإنذار (Alarm) تلقائياً؛ نظراً لأن قيمة PM2.5 قد تجاوزت عتبة الأمان المحفوظة مسبقاً في الإعدادات، مما يثبت نجاح خوارزمية المقارنة الشرطية.

مؤشر الذاكرة (R:5s): و (R:1M): يؤكد أن ميزة تسجيل البيانات على بطاقة الذاكرة (SD Card) مفعلة حالياً وتعمل بنجاح (ON) على معدل زمني دوري ثابت مدته خمس ثوانٍ لتسجيل الأسطر داخل ملف الـ CSV.

مؤشر القيمة القصوى (M:124): يوضح أعلى قيمة (Maximum Value) لـ PM2.5 رصدها النظام منذ بداية تشغيله، مما يفيد في معرفة ذروة التلوث التي وصل إليها المكان.



صورة 23. واجهة عرض القياسات وحالة النظام (Live Data & Measurements Interface)

9.8 تسجيل البيانات

وتُبين الصورة التالية نجاح عملية التسجيل بشكل قاطع؛ حيث تظهر شاشة الـ LCD تفاعلاً صحيحاً مع البطاقة بإعطاء مؤشر الجاهزية والتسجيل الدوري. أثبت استخراج ملف الذاكرة الافتراضية عبر برنامج (WinImage) نجاح النظام الافتراضي في تدوين البيانات؛ وعند فتح الملف الناتج ببرنامج Microsoft Excel، ظهرت البيانات مرتبة بالكامل في أسطر وأعمدة متناسقة ودقيقة، مما يؤكد الكفاءة الهندسية المرجوة من تصميم النظام وقدرته الاعتمادية على أرشفة الملوثات الهوائية في بيئة الدراسة.

Date	Time	PM1.0(ug/m3)	PM2.5(ug/m3)	PM10(ug/m3)
11-06-2026	1:54:09	14	30	50
11-06-2026	1:54:14	14	30	50
11-06-2026	1:54:19	14	30	50
11-06-2026	1:54:24	14	30	50
11-06-2026	1:54:29	14	30	50
11-06-2026	1:54:34	14	30	50
11-06-2026	1:54:39	14	30	50
11-06-2026	2:05:49	14	30	50

صورة 24. البيانات المسجلة في بطاقة الذاكرة

الخاتمة

في ختام هذا الفصل تم الانتقال من الإطار النظري المرتبط بإشكالية تلوث الهواء الداخلي ومخاطره الصحية إلى مرحلة التجسيد الهندسي والتطبيقي لنظام ذكي قادر على رصد أهم الملوثات الناتجة عن عمليات الاحتراق والانبعاثات العضوية العطرية داخل الفضاءات المغلقة. وقد تم ذلك من خلال دراسة دقيقة للمتطلبات الوظيفية للنظام، وتحديد الخصائص التقنية التي يجب أن تتوفر فيه من حيث الدقة، الاستمرارية، سهولة الاستخدام، وإمكانية تخزين البيانات ومعالجتها.

سمح تحليل البنية العامة للنظام بوضع تصور متكامل يربط بين وحدة الاستشعار، وحدة المعالجة، ووحدات العرض والتسجيل الزمني، بما يضمن مراقبة آنية وفعالة لمؤشرات جودة الهواء الداخلي. كما تم اختيار المكونات الإلكترونية بعناية اعتمادًا على توافقها الوظيفي، انخفاض تكلفتها، وسهولة دمجها ضمن منظومة ذكية قابلة للتطوير مستقبلاً، حيث مثّل الحساس PMS5003 العنصر الرئيسي في كشف الجسيمات الدقيقة، مدعومًا بوحدات مساعدة مكملة لقياس الظروف البيئية وعرض النتائج وتوثيقها.

وقد أظهرت مرحلة التوصيل الكهربائي وتصميم مخطط الكتل مدى الترابط بين مختلف العناصر الإلكترونية، مما ساعد على بناء نظام منظم يتميز بوضوح مسار انتقال البيانات من الحساسات نحو وحدة المعالجة المركزية ثم إلى وسائل الإظهار والتخزين. كما ساهم تصميم الخوارزمية البرمجية في تحديد تسلسل منطقي لعمل النظام، بداية من قراءة المعطيات البيئية، مرورًا بمعالجتها ومقارنتها بالمجالات المرجعية، وصولاً إلى عرض القيم وتسجيلها بشكل دوري.

أما من الجانب العملي، فقد أتاحت المحاكاة المنجزة باستعمال برنامج Proteus التحقق المسبق من سلامة التصميم وفعالية الاتصالات بين مختلف الوحدات قبل المرور إلى الإنجاز الفعلي، وهو ما ساعد على تقليل احتمالات الأخطاء التقنية وضمان جاهزية النظام للاختبار. وقد بينت نتائج المحاكاة أن المنظومة المقترحة قادرة على الاستجابة بشكل متناسق لمختلف التغيرات المفترضة في نسب الملوثات، مع قدرة جيدة على إظهار البيانات في الزمن الحقيقي وحفظها لأغراض التحليل اللاحق.

الفصل الثالث

الإنجاز العملي و

التجارب

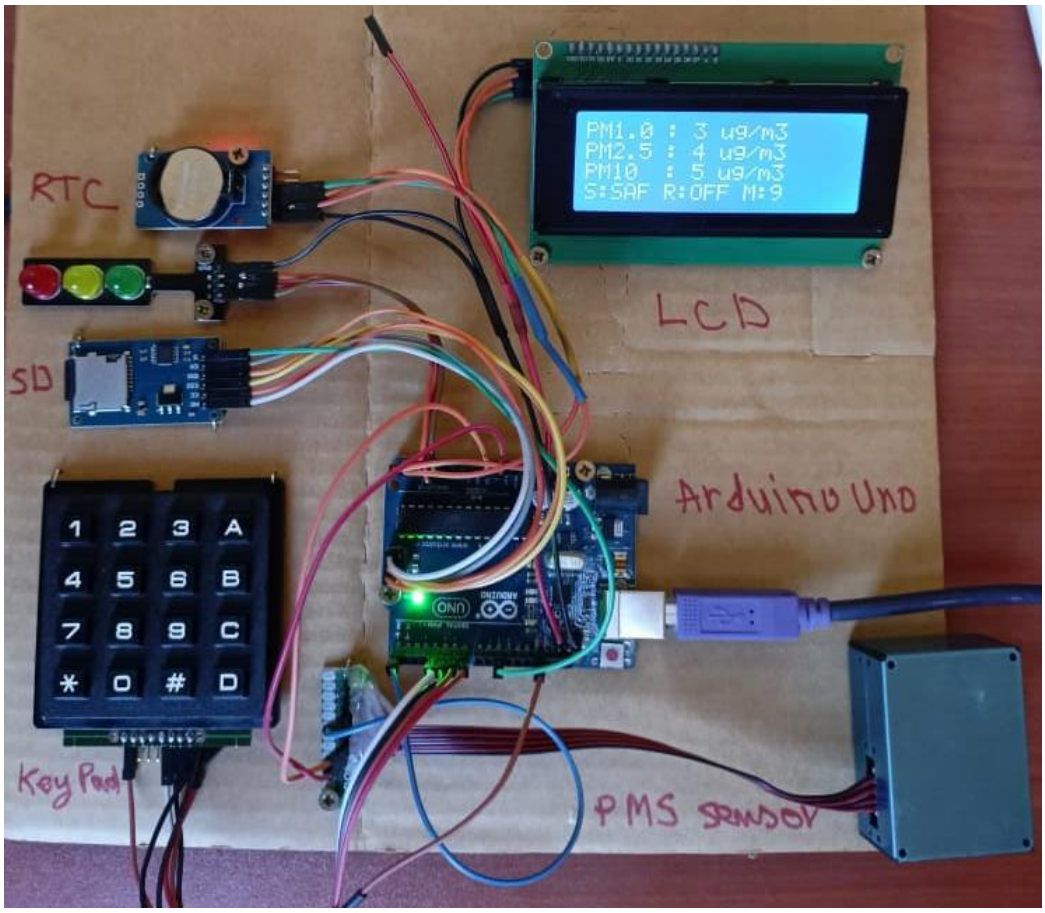
مقدمة

خصص الفصلان السابقان لبناء الأساس النظري وصياغة التصميم الهندسي وإثبات صحته عبر المحاكاة الافتراضية؛ أما هذا الفصل فهو خطوة الحقيقة والميدان، حيث تُختبر الفرضيات النظرية في مواجهة الواقع الإلكتروني والبيئي الفعلي. يستعرض الفصل بالتفصيل كل مراحل الإنجاز العملي للنظام، ابتداءً من تجميع المكونات وتركيبها على لوحة اللحام، مروراً بكتابة البرنامج الكامل وتحميله، وصولاً إلى تشغيل النظام وتسجيل بياناته الأولى في بيئات حقيقية متنوعة.

يغطي الفصل كذلك منهجية الاختبارات المعتمدة وأدواتها، ثم يُقدّم تحليلاً معمّقاً للنتائج المُسجّلة مع مقارنتها بالقيم المرجعية لمنظمة الصحة العالمية وهيئة EPA الأمريكية. يختتم الفصل بمناقشة نقدية صريحة تتناول الصعوبات التقنية المُواجَهة وأسبابها والحلول المُتّبعة، ثم يستشرف التحسينات المستقبلية الممكنة لتطوير النظام نحو منظومة أكثر دقةً وشمولا.

1. التركيب الحقيقي للنظام

يُمثّل التركيب الحقيقي المرحلةَ الانتقالية من النموذج الافتراضي إلى النموذج الأولي المادي (Physical Prototype). تشمل هذه المرحلة تجهيز أدوات العمل، والتحقق من سلامة المكونات قبل التركيب، ثم التجميع المنهجي خطوةً بخطوة، وأخيراً الفحص البصري للتوصيلات قبل التشغيل الأول.



صورة 25. صورة حقيقية للنظام

2. برمجة النظام

البرمجة هي العقل المُدبّر للنظام الذي يُحوِّل المكونات الإلكترونية الصامتة إلى منظومة قياس ذكية. اعتُمدت بيئة Arduino IDE (الإصدار 2.3) للبرمجة، مع مكتبات مخصصة لكل حساس ووحدة، تُجرِّد التعقيدات البروتوكولية وتُقدِّم واجهة برمجية عالية المستوى.

جدول 8 المكتبات البرمجية المستخدمة والمكونات المتوافقة معها

المكتبة	الإصدار	المطوّر	الوحدة المخدومة
SoftwareSerial	مدمجة	Arduino	تواصل UART مع PMS5003
RTClib	2.1.4	Adafruit	وحدة RTC DS3231
LiquidCrystal_I2C	1.1.2	Frank de Brabander	شاشة LCD 2004
SD	1.2.4	Arduino	بطاقة الذاكرة SD
Wire	مدمجة	Arduino	بروتوكول I^2C
SPI	مدمجة	Arduino	بروتوكول SPI

3. عرض البيانات على الشاشة

شاشة LCD 2004 هي واجهة التفاعل المباشر بين النظام والمستخدم في الوقت الفعلي. تم تصميم تنسيق العرض بعناية فائقة لتحقيق أقصى كثافة معلوماتية ممكنة ضمن المساحة المتاحة (20 **حرفاً** × 4 أسطر) مع الحفاظ على وضوح القراءة وسهولة الفهم البصري.

4. تخزين البيانات على بطاقة الذاكرة

التخزين المحلي على بطاقة SD يحوّل النظام من مجرد جهاز عرض لحظي إلى منصة رصد بيئية حقيقية ذات ذاكرة تاريخية. يستعرض هذا القسم هيكل البيانات المُخزّنة وتنسيقها وكيفية التعامل معها لاحقاً.

```
// (أول سطر في الملف)
Date                Time    PM1.0(ug/m3)  PM2.5(ug/m3)  PM10(ug/m3)
11-06-2026 1:54:09    14          13            50
11-06-2026 1:54:14    20          30            50
11-06-2026 1:54:19    17          30            50
11-06-2026 1:54:24    14          30            50
11-06-2026 1:54:29    14          30            50
11-06-2026 1:54:34    14          30            50
11-06-2026 1:54:39    14          30            50
11-06-2026 2:05:49    14          30            50
```

صورة 26. معاينة البيانات المسجلة بواسطة النظام في جهاز الكمبيوتر

5. طريقة عرض LCD

الشاشة الرئيسية تضم اعدادات الوقت والتاريخ، بطاقة SD، التنبيهات، الوضع الايكولوجي، تحديد القيمة العظمى واعدات اللغة

5.1 واجهة عرض البيانات و القياس

تُظهر الشاشة الموضحة في الصورة 27 واجهة القياس الأساسية للنظام المطور، والتي تم تنسيقها بعناية على شاشة LCD (20×4) لتقديم رصد فوري وشامل لجودة الهواء؛ حيث تعرض مستويات تركيز الجسيمات العالقة للأقطار الثلاثة بدقة على الأسطر المتتالية كالتالي: تركيز الجسيمات الدقيقة $PM_{1.0}$بقيمة $6\mu g/m^3$، وتركيز الجسيمات $PM_{2.5}$بقيمة $13\mu g/m^3$، بالإضافة إلى تركيز الجسيمات الكبيرة PM_{10} بقيمة $13\mu g/m^3$.



صورة 27. واجهة العرض للبيانات المقاسة

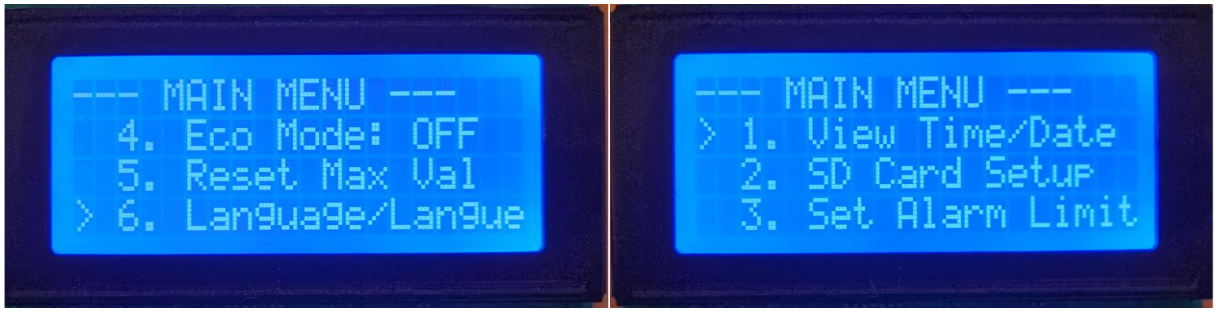
أما السطر الرابع والأخير، فقد خصص لإظهار الحالة التشغيلية الفورية للنظام ومعلومات تدوين البيانات؛ حيث يشير الرمز S:SAF (Status: Safe) إلى أن مستوى تلوث الهواء آمن وتحت عتبة الإنذار المحددة، بينما يؤكد الرمز R:5s تفعيل ميزة التسجيل الدوري التلقائي (Recording) في بطاقة الذاكرة بفاصل زمني قدره 5 ثوان، تليها أعلى قيمة مسجلة لـ $PM_{2.5}$ منذ بدء التشغيل برمز الحفظ الأقصى M:14 (Max)، مما يعكس استقرار الكود البرمجي وتكاملية العرض والتحكم بكفاءة عالية.

5.2 واجهة الاعدادات الرئيسية

تعرض الصورة 28 واجهة القائمة الرئيسية للنظام (--- MAIN MENU ---)، والتي تمثل حلقة الوصل المباشرة والتفاعلية بين المستخدم والعتاد البرمجي لجهاز المراقبة. تم تصميم هذه القائمة بهيكلية برمجية مرنة تعتمد على مؤشر متحرك وعملية تدوير ديناميكية للخيارات (Scrolling Menu) لتلائم حجم شاشة العرض الحالية (20×4)؛ حيث تنقسم الخيارات الستة المتاحة للتحكم الشامل بالنظام إلى واجهتين متتاليتين يوجّههما السهم التعبيري (>) المربوط برمجياً بالأزرار الفيزيائية لبيئة التنقل:

الواجهة الأولى تحتوي على الخيارات الأساسية الحيوية للنظام، حيث يتيح الخيار الأول (1. View Time/Date) استعراض الوقت والتاريخ الحاليين المخزنين في وحدة الذاكرة الزمنية (RTC). بينما يوفر

الخيار الثاني (2. SD Card Setup) الدخول إلى قائمة إعدادات بطاقة التذاكرة للتحكم في آلية وفترات التسجيل الدوري. في حين يسمح الخيار الثالث (3. Set Alarm Limit) للمستخدم بتعديل عتبة الإنذار القصوى لتركيز الغبار العالق بناءً على معايير السلامة المطلوبة.



صورة 28. شاشة الاعدادات الرئيسية

الواجهة الثانية (يسار): تظهر تلقائياً عند نزول المؤشر لتستعرض بقية الخيارات التشغيلية المتقدمة؛ حيث يعرض الخيار الرابع (4. Eco Mode) حالة وضع توفير الطاقة وتخفيض استهلاك الإضاءة الخلفية (مائل حالياً إلى الإيقاف OFF). ويليه الخيار الخامس (5. Reset Max Val) المخصص لتصفير وإعادة تهيئة القيمة القصوى المخزنة. وأخيراً، يأتي الخيار السادس (6. Language/Langue) ليتيح للمستخدم الانتقال بين اللغات البرمجية المتاحة كالإنجليزية والفرنسية، مما يؤكد على شمولية التصميم وهندسته المرنة لضمان تجربة مستخدم متكاملة.

5.3 اعدادات التاريخ والوقت

توضح الصورة 29 واجهة استعراض الوقت والتاريخ للنظام (--- TIME & DATE ---)، والتي يتم الدخول إليها عبر اختيار البند الأول من القائمة الرئيسية. تعكس هذه الواجهة التكامل البرمجي والعتادي الناجح مع وحدة الساعة الزمنية المستمرة، حيث يقوم المعالج بقراءة النبضات الزمنية وتنسيقها ديناميكياً ليتم عرضها على أسطر الشاشة بشكل آني ومنظم كالتالي.



صورة 29. واجهة اعدادات الوقت والتاريخ

5.4 اعدادات بطاقة الذاكرة SD

تظهر صورة 30 واجهة التحكم الفرعية المخصصة لضبط وتكامل بطاقة الذاكرة (- SD CARD SETTINGS -)، والتي يتم الدخول إليها عبر البند الثاني من القائمة الرئيسية والمصممة لمنح المستخدم مرونة كاملة في إدارة عملية أرشفة وتدوين البيانات، حيث تستعرض الشاشة الخيارات التشغيلية المحدثة كالتالي:

السطر الثاني (Log Data): يوضح الحالة الحالية لأمر تفعيل الكتابة والتسجيل الدوري داخل البطاقة؛ حيث تظهر حالياً مؤشر القيمة المفعّلة ON، مما يعني أن المعالج يقوم برمجياً باستدعاء دالة الحفظ فور تحقق الشرط الزمني. السطر الثالث (Interval): يعرض معدل الفاصل الزمني المعتمد بين كل عملية تسجيل متتالية وأخرى؛ حيث تم ضبطه حالياً على القيمة 5 Sec (خمس ثوانٍ)، وهو الفاصل المخصص للرصد السريع والتغيرات اللحظية المباشرة لنسب الغبار. مما يعكس كفاءة التصميم الهندسي في تسهيل إدارة تخزين الملوثات الهوائية.



صورة 30. واجهة اعدادات بطاقة الذاكرة

5.5 إعدادات التنبيهات

توضح صورة 31 واجهة التحكم المخصصة لضبط عتبة التنبيه في النظام (- ALARM SETTINGS -)، والتي يتم الدخول إليها عبر البند الثالث من القائمة الرئيسية لتهيئة النظام الوقائي للجهاز وتحديثه. تم تفعيل هذه الواجهة برمجياً للسماح للمستخدم بتحديد الحد الحرج لتركيز الجسيمات الدقيقة في الهواء بشكل مرن وفوري، وتبرز المعطيات التقنية للشاشة وفق الهيكلية التالية:



صورة 31. واجهة اعداد التنبيهات

6. التجارب والنتائج

تسجيل مع 10:05 صباحا يوم 21 ماي 2026 كل 5 ثواني تتم تسجيل معلومات عامة بداية التسجيل يعني استعمال ضوء أخضر كل تسجيل لمدة 5 ثواني.

استعمال الضوء الأصفر يدل على اتمام عملية التسجيل.

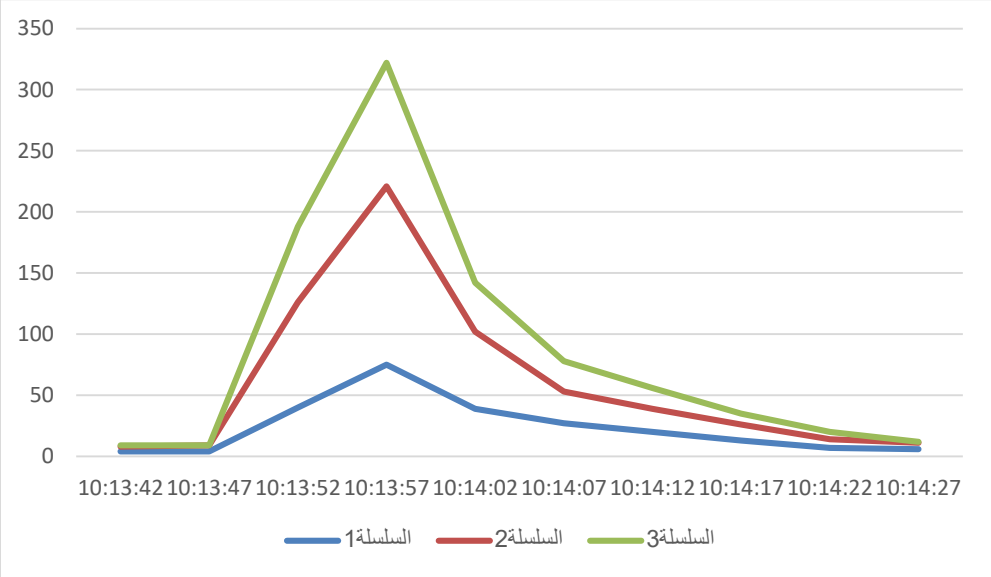
هذا التسجيل الأولي في ظروف تشغيل عادية في مكتب عادي لا وجود لاي اخطار الى غاية 10:15

6.1 التجربة الأولى استخدام عطر كحولي

بختان عطر كحولي مع 10:13 على بعد 10 سم على الحساس

بختان عطر كحولي مع 10:19 على بعد 20 سم على الحساس

نتائج التجربة تظهر في المخطط التالي



صورة 32. نتائج التجربة الأولى (على بعد 10 سم)

يُلاحظ من المخطط أن قيم PM1.0 وPM2.5 وPM10 كانت منخفضة قبل الرش، ثم ارتفعت فجأة مباشرة بعد إطلاق العطر.

بلغت القيم التقريبية:

$PM1.0 \approx 70\ \mu g/m^3$

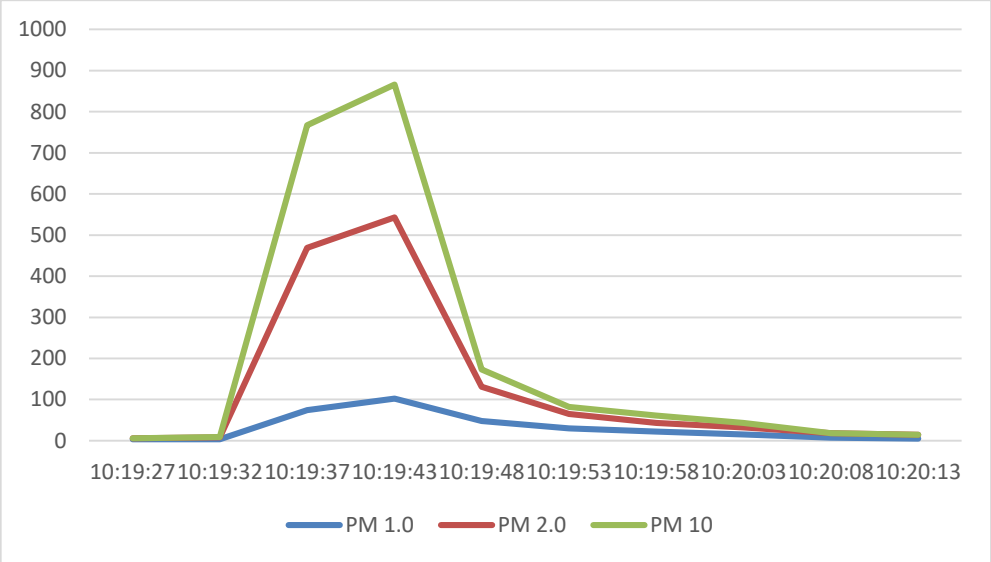
$PM2.5 \approx 220\ \mu g/m^3$

$PM10 \approx 320\ \mu g/m^3$

بعد ذلك بدأت القيم بالانخفاض تدريجياً حتى عادت تقريباً إلى المستوى الطبيعي.

عند رش العطر بالقرب من الحساس، تنتشر قطرات دقيقة جداً في الهواء. يفسر الحساس هذه القطرات على أنها جسيمات عالقة، مما يؤدي إلى ارتفاع مؤقت في قيم PM.

ويُلاحظ أن قيمة PM10 كانت الأعلى بسبب احتواء الرذاذ على قطرات بأحجام مختلفة تشمل الجسيمات الأكبر نسبياً.



صورة 33. نتائج التجربة الأولى (على بعد 20 سم)

في هذه التجربة ارتفعت القيم بشكل أكبر مقارنة بالتجربة الأولى.

بلغت تقريباً:

$PM1.0 \approx 90\ \mu g/m^3$

$PM2.5 \approx 520\ \mu g/m^3$

$PM10 \approx 850\ \mu g/m^3$

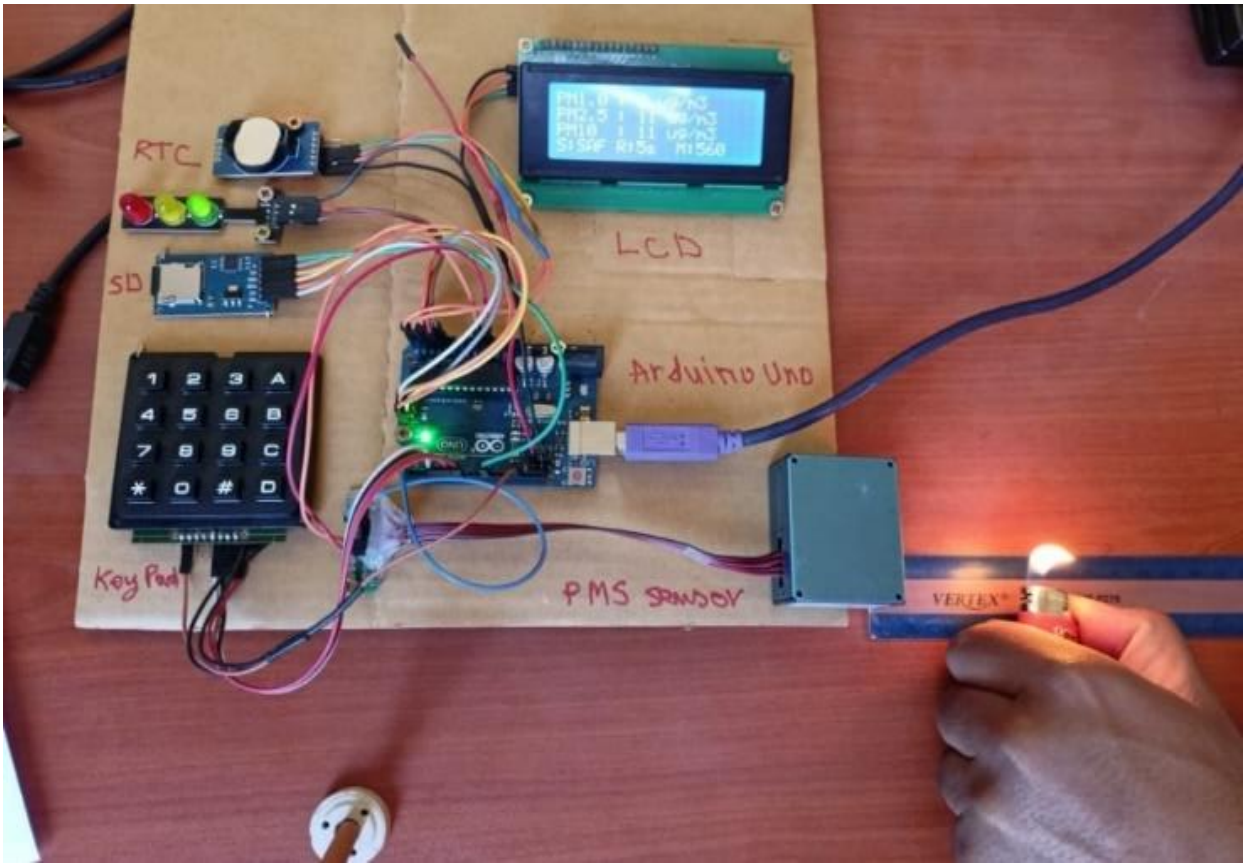
ثم بدأت القيم بالانخفاض تدريجياً مع تشتت الرذاذ وتهوية المكان.

يمكن تفسير هذه النتيجة بأن مخروط الرش للعطر قد انتشر بشكل أفضل عند مسافة 20 سم، مما سمح بمرور كمية أكبر من الجسيمات عبر فتحة سحب الهواء الخاصة بالحساس، وبالتالي سجل الحساس قيماً أعلى.

6.2 التجربة الثانية استخدام لهب ولاعة

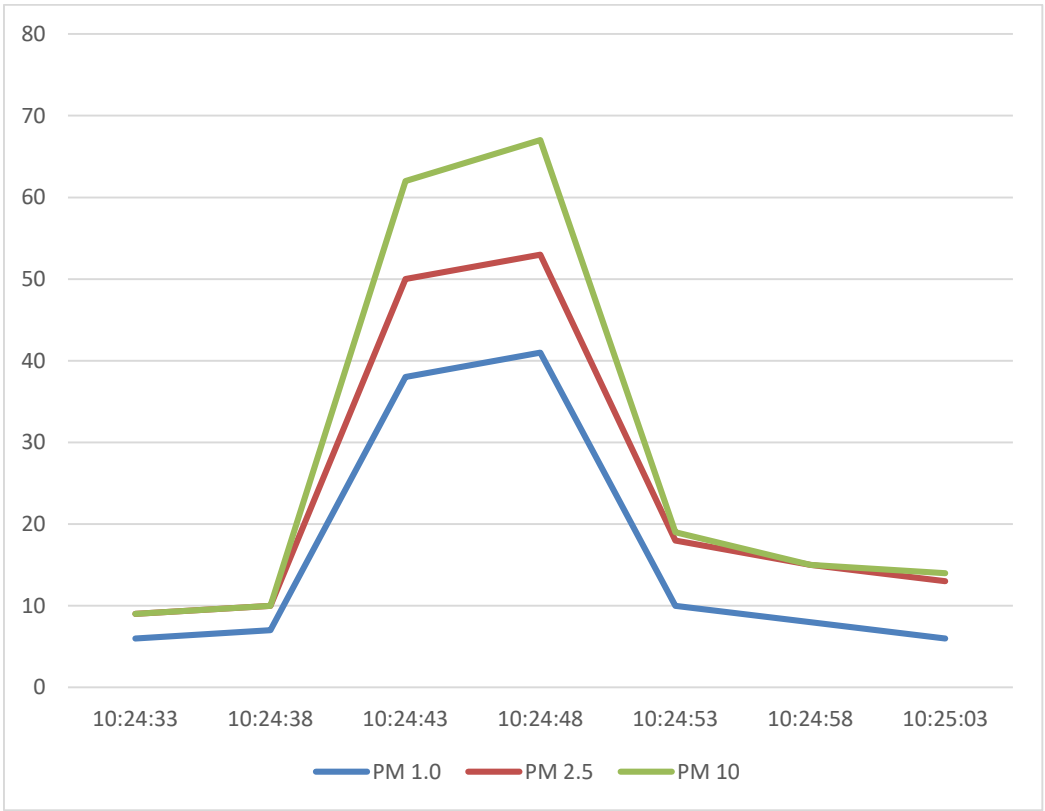
لهب ولاعة على بعد 5 سم على الساعة 10:24

لهب ولاعة على بعد 2سم على الساعة 10:25



صورة 34. تجربة لهب الولاعة

نتائج التجربة تظهر في المخطط التالي



صورة 35. نتائج التجربة الثانية (على بعد 5 سم)

تظهر النتائج أن القيم كانت مستقرة قبل إشعال الولاعة، حيث تراوحت بين 5 و10 µg/m³ تقريباً.

بعد تقريب اللهب من الحساس حدث ارتفاع سريع في تركيز الجسيمات:

PM1.0 بلغت حوالي 40 µg/m³.

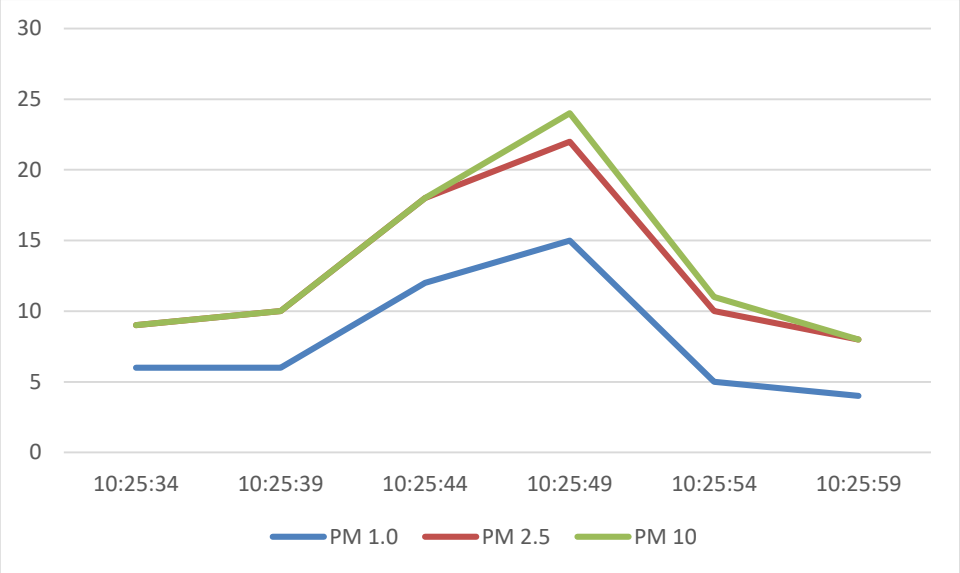
PM2.5 بلغت حوالي 52 µg/m³.

PM10 بلغت حوالي 67 µg/m³.

ثم بدأت القيم بالانخفاض تدريجياً بعد إبعاد مصدر الاحتراق حتى اقتربت من مستوياتها الابتدائية.

ينتج عن احتراق غاز الولاعة جسيمات دقيقة جداً ونواتج احتراق تنتشر في الهواء. وعندما تصل هذه الجسيمات إلى غرفة القياس داخل الحساس يقوم PMS5003 برصدها وتسجيل ارتفاع في قيم PM.

ويلاحظ أن PM10 سجلت أعلى قيمة، مما يدل على وجود خليط من الجسيمات الدقيقة ومتوسطة الحجم الناتجة عن عملية الاحتراق.



صورة 36. نتائج التجربة الثانية (على بعد 2 سم)

يبين المخطط أن تقريب اللهب أكثر إلى الحساس أدى إلى زيادة ملحوظة في القيم المقاسة مقارنة بالحالة السابقة.

بلغت القيم القصوى تقريباً:

PM1.0 ≈ 14 µg/m³.

PM2.5 ≈ 21 µg/m³.

PM10 ≈ 23 µg/m³.

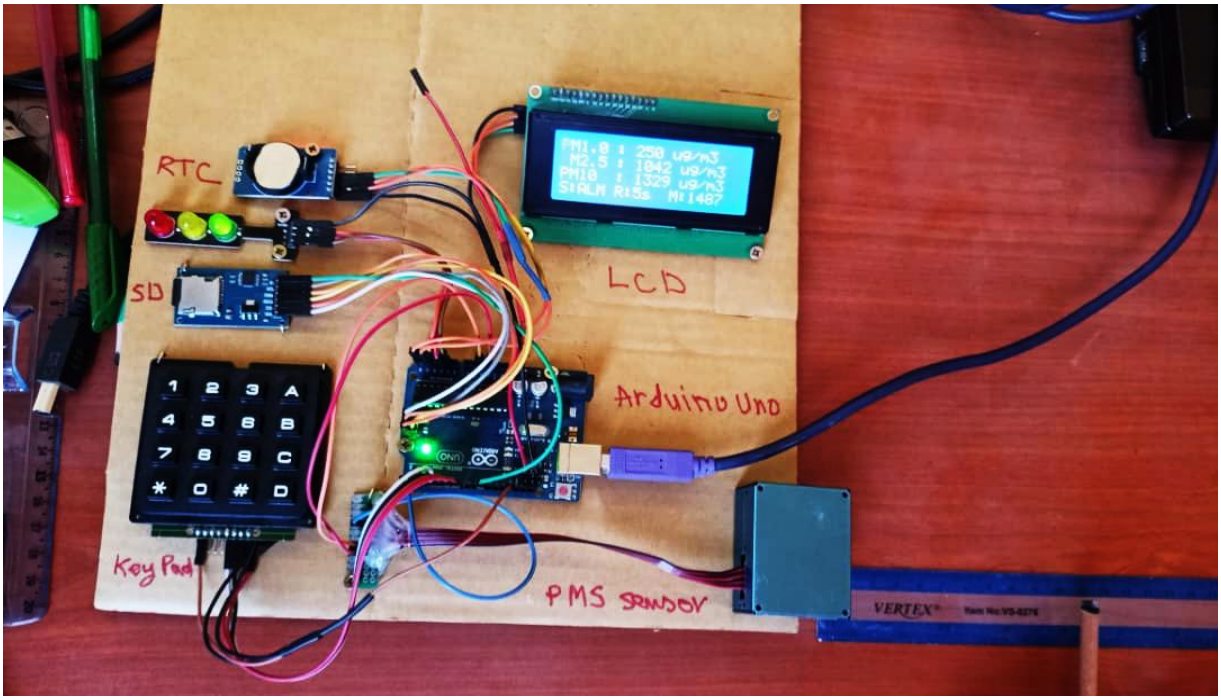
ثم انخفضت القيم تدريجياً بعد انتهاء التعرض المباشر للدخان.

رغم قرب اللهب من الحساس، فإن ارتفاع القيم كان أقل من التجربة الأولى. يمكن تفسير ذلك بأن اللهب النظيف للولاعة ينتج كمية محدودة من الجسيمات، كما أن اتجاه حركة الهواء الساخن الناتج عن اللهب قد أبعد جزءاً من الجسيمات عن فتحة سحب الحساس، مما أدى إلى انخفاض الكمية المقاسة مقارنة بالحالة الأولى.

6.3 التجربة الثالثة: عود بخور

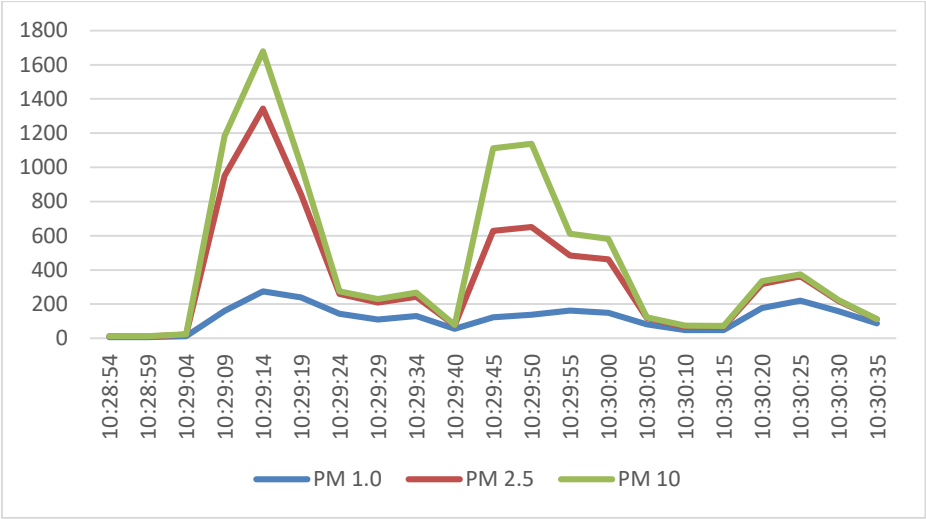
عود بخور على بعد 10 سم مع الساعة 10:30

عود بخور على بعد 30 سم مع الساعة 10:35



صورة 37. تجربة عود البخور

نتائج التجربة تظهر في المخطط التالي



صورة 38. نتائج التجربة الثالثة (على بعد 10 سم)

يبين المخطط حدوث ارتفاعات حادة ومتتالية في تركيز الجسيمات مباشرة بعد تقريب البخور من الحساس.

بلغت القيم القصوى تقريباً:

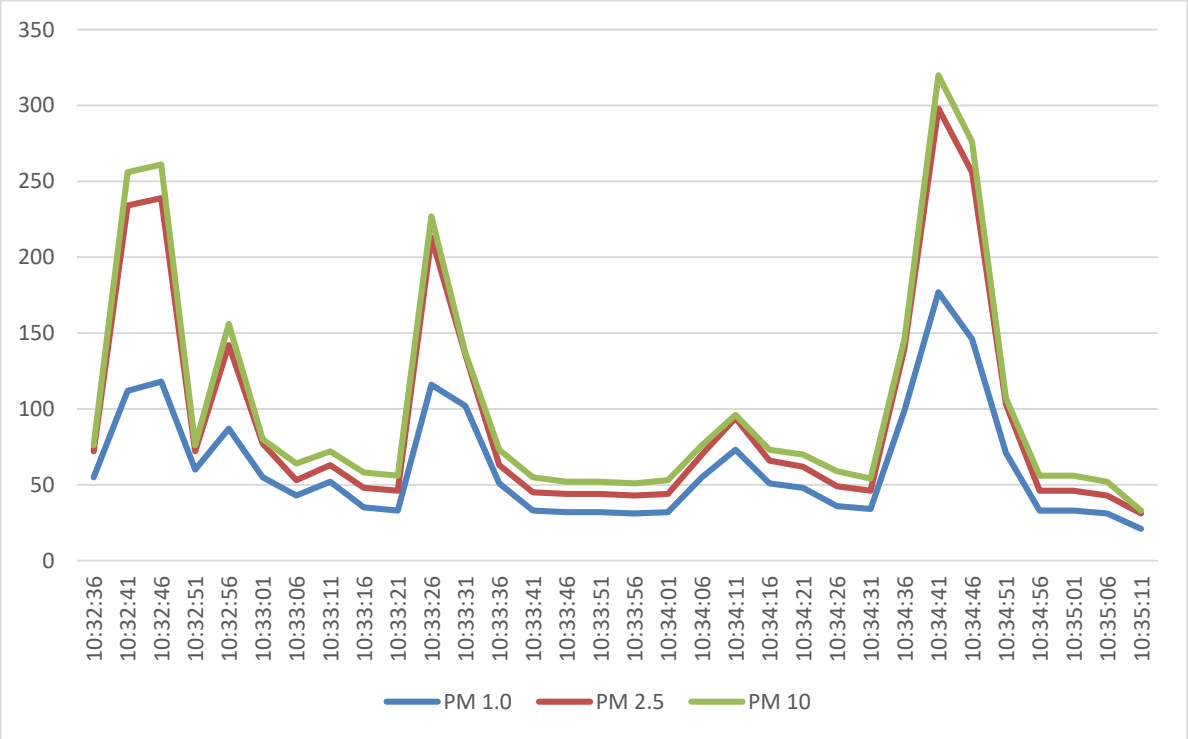
$PM1.0 \approx 280\ \mu g/m^3$

$PM2.5 \approx 1350\ \mu g/m^3$

$PM10 \approx 1700\ \mu g/m^3$

ثم انخفضت القيم تدريجياً قبل أن تظهر قمم أخرى نتيجة استمرار عملية الاحتراق وانبعاث الدخان بشكل متقطع.

ينتج احتراق البخور كمية كبيرة من الدخان المحمل بالجسيمات الدقيقة والمواد العضوية الناتجة عن التحلل الحراري للمواد العطرية والخشبية. وعند وصول هذه الجسيمات إلى الحساس ترتفع القراءات بشكل كبير. كما أن ظهور عدة قمم متتالية يدل على أن انبعاث الدخان من البخور ليس ثابتاً بل يتغير تبعاً لشدة الاحتراق واتجاه حركة الهواء.



صورة 39. نتائج التجربة الثالثة (على بعد 30 سم)

يُظهر المخطط الثاني انخفاضاً واضحاً في القيم مقارنة بالحالة الأولى رغم استمرار تسجيل ارتفاعات ملحوظة.

بلغت القيم القصوى تقريباً:

$PM1.0 \approx 170\ \mu g/m^3$

$PM2.5 \approx 300\ \mu g/m^3$

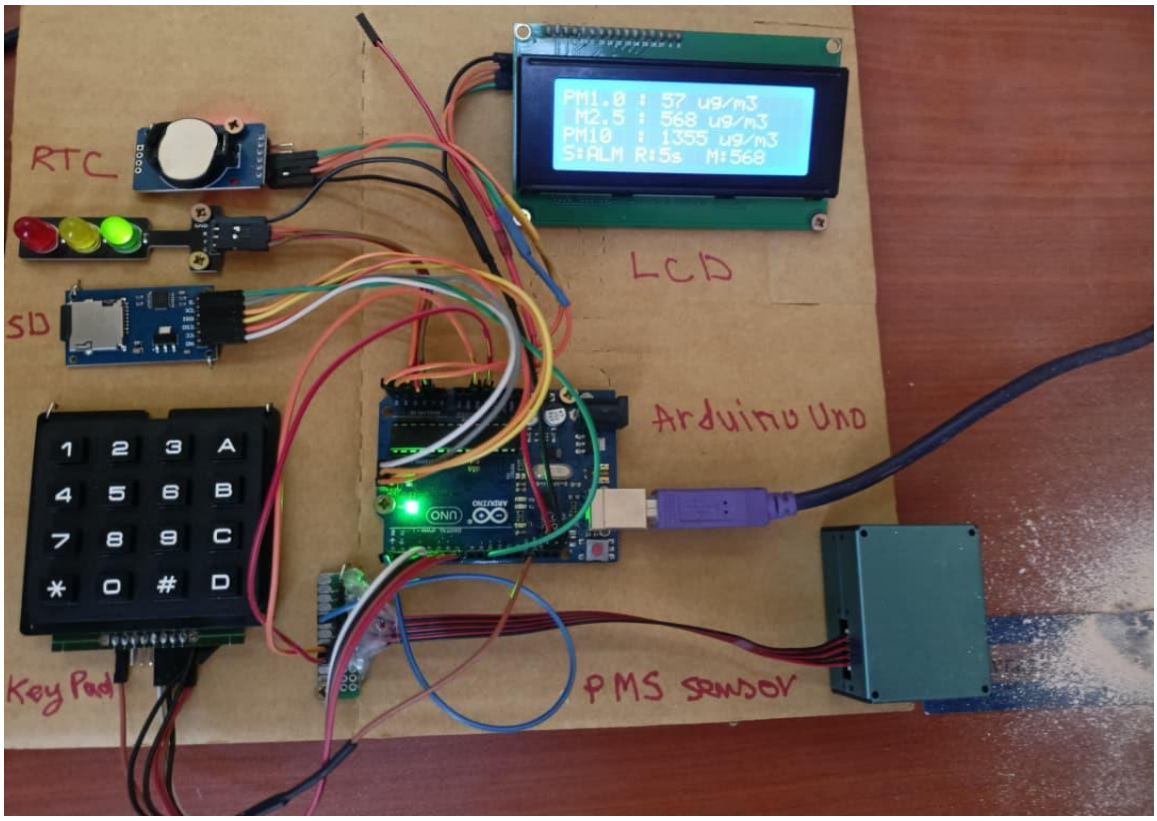
$PM10 \approx 320\ \mu g/m^3$

عند زيادة المسافة بين مصدر التلوث والحساس تتعرض الجسيمات للتشتت والانتشار في الهواء قبل وصولها إلى الحساس، مما يؤدي إلى انخفاض التركيز المقاس.

ورغم ذلك بقيت القيم مرتفعة نسبياً، وهو ما يعكس القدرة الكبيرة للبخور على نشر الجسيمات الدقيقة في الهواء حتى على مسافات أبعد.

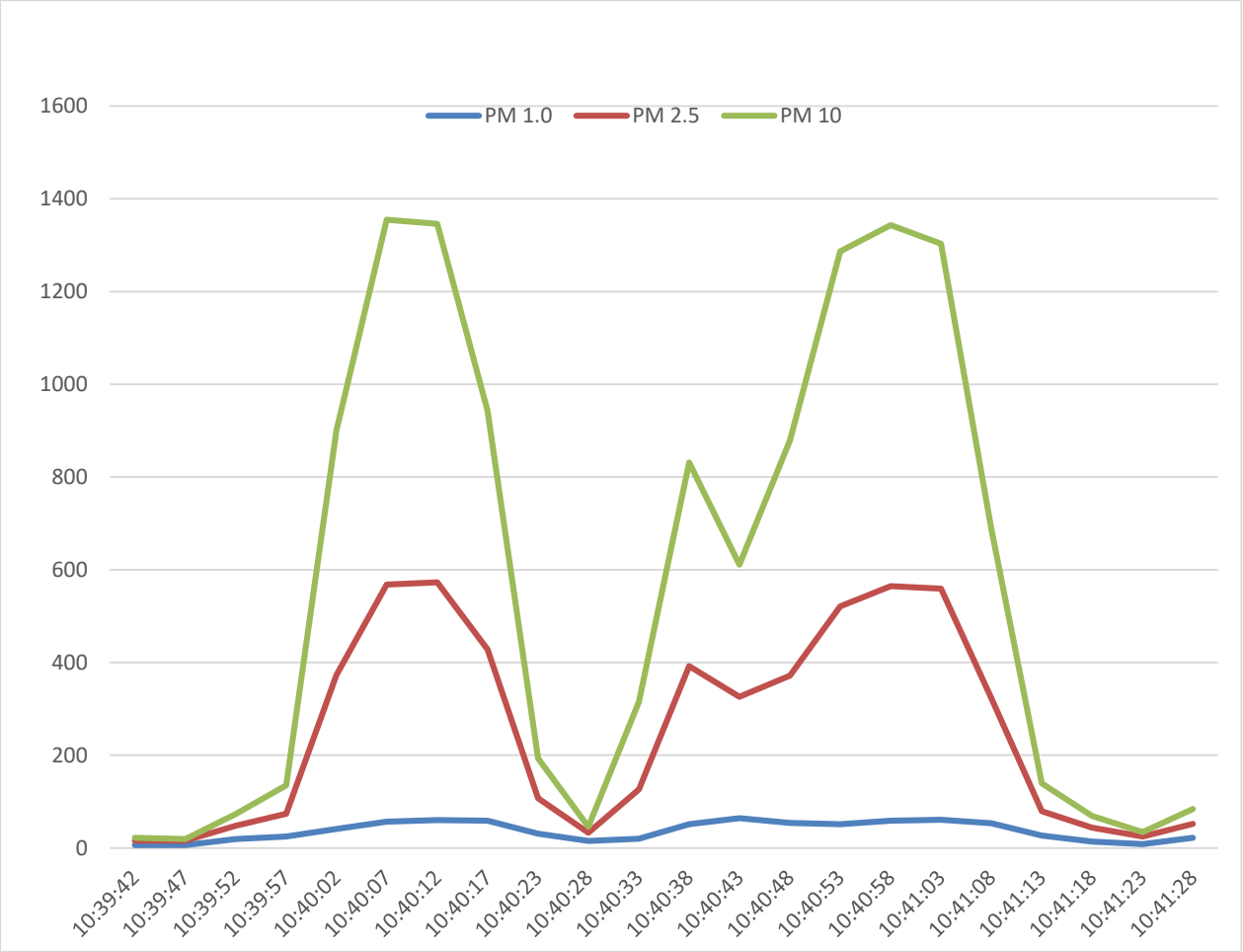
6.4 التجربة الرابعة : غبار طباشير

غبار طباشير على بعد 5 سم على الساعة 10:40



صورة 40. التجربة الرابعة

نتائج التجربة تظهر في المخطط التالي



صورة 41. نتائج التجربة الرابعة

يُظهر المخطط ارتفاعاً واضحاً ومفاجئاً في تراكيز الجسيمات بعد نثر غبار الطباشير بالقرب من الحساس.

بلغت القيم القصوى تقريباً:

$PM1.0 \approx 40\ \mu g/m^3$

$PM2.5 \approx 550\ \mu g/m^3$

$PM10 \approx 1350\ \mu g/m^3$

كما يظهر المخطط عدة قمم متتالية خلال فترة قصيرة، قبل أن تبدأ القيم بالانخفاض التدريجي حتى العودة إلى مستويات قريبة من الحالة الطبيعية.

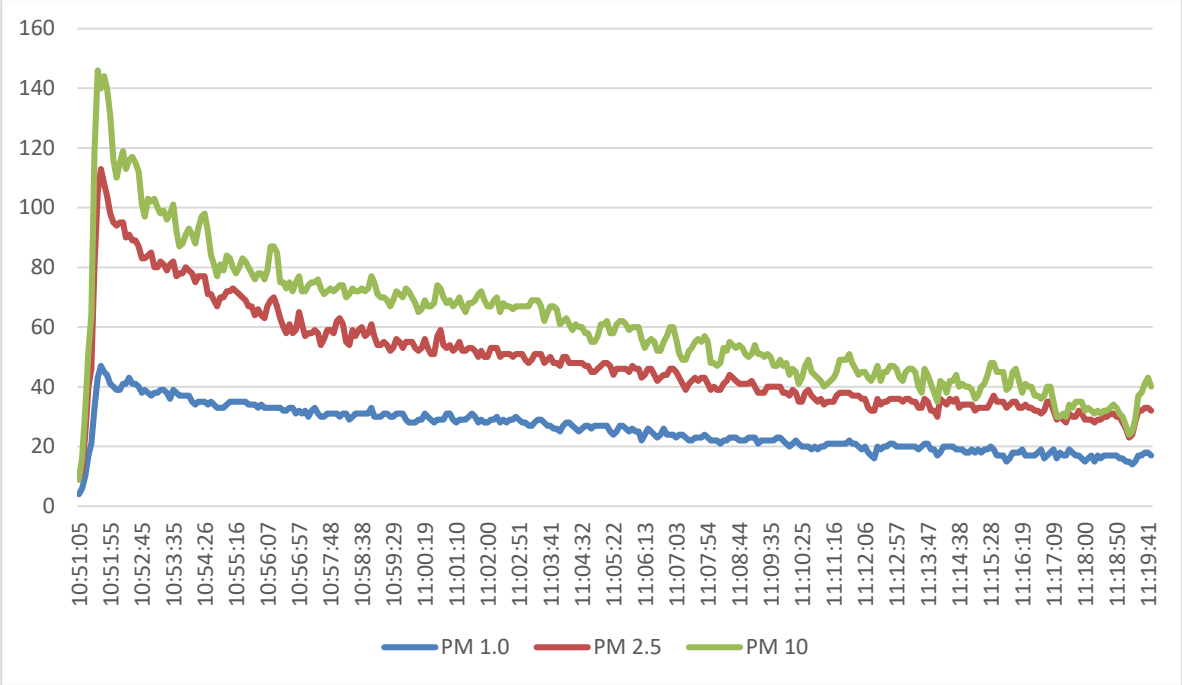
يتكون غبار الطباشير من جسيمات صلبة ذات أحجام مختلفة تنتشر بسهولة في الهواء عند الكتابة أو المسح أو النثر المباشر.

عند وصول هذه الجسيمات إلى الحساس، يتم تسجيل ارتفاع كبير في تركيز الجسيمات العالقة، خاصة الجسيمات الأكبر حجماً التي تندرج ضمن فئة PM10.

6.5 التجربة الخامسة : معطر جو

رش معطر جو في غرفة المكتب من الساعة 10:51 الى 11:19

نتائج التجربة تظهر في المخطط التالي



صورة 42. نتائج التجربة الخامسة

يُظهر المخطط ارتفاعاً حاداً ومباشراً في تراكيز الجسيمات بعد رش معطر الجو، حيث بلغت القيم القصوى تقريباً:

$PM1.0 \approx 45\ \mu g/m^3$
$PM2.5 \approx 110\ \mu g/m^3$
$PM10 \approx 145\ \mu g/m^3$

بعد ذلك بدأت القيم بالانخفاض التدريجي مع مرور الوقت، إلا أنها لم تعد مباشرة إلى مستوياتها الابتدائية، بل استمرت عند مستويات مرتفعة نسبياً لفترة طويلة امتدت إلى نهاية فترة المراقبة.

يتكون معطر الجو من خليط من المواد العطرية والمذيبات التي تنتشر في الهواء على شكل قطرات دقيقة جداً (Aerosols).

عند رش المعطر تتوزع هذه القطرات في الجو وتبقى معلقة لفترة زمنية معتبرة قبل أن تترسب أو تتبخر، وهو ما يفسر الارتفاع المفاجئ في قيم PM1.0 وPM2.5 وPM10.

كما أن الانخفاض التدريجي البطيء يشير إلى استمرار وجود الجسيمات العالقة داخل الغرفة لفترة طويلة بسبب ضعف التهوية الطبيعية وصغر حجم الجسيمات المنتشرة.

6. المناقشة والتحسينات المستقبلية

يُعدّ النظام المُنجز في إطار هذا المشروع خطوة أولى ناجحة نحو بناء حل محلي لمراقبة جودة الهواء الداخلي، حيث أثبتت الاختبارات العملية قدرته على قياس الجسيمات الدقيقة بدقة مقبولة وتسجيل البيانات بشكل موثوق مع توفير طابع زمني دقيق. غير أن التجربة العملية كشفت عن بعض القيود التي تستدعي التحسين، أبرزها عدم قدرة الحساس PMS5003 على تمييز مصدر التلوث بشكل نوعي، إذ يقيس تراكيز الجسيمات دون تحديد ما إذا كانت ناتجة عن احتراق غازي أو دخان بخور أو غبار منزلي، مما يقتصر قيمة التحليل على الجانب الكمي دون النوعي. كما أن الاعتماد الكلي على شاشة LCD كوسيلة وحيدة للتنبيه قد يُفوت المستخدم الإنذار في حال عدم تواجده أمام الشاشة، خاصة في الليل أو خلال النوم، وهو ما يُبرز ضرورة إضافة وحدات تنبيه بديلة في التركيبات المستقبلية. تفتح هذه الملاحظات الباب أمام تحسينات جوهرية تتمثل أولاً في دمج حساسات غازية متخصصة مثل MQ-7 لأول أكسيد الكربون
و MQ-13 للمركبات العضوية المتطايرة، مما يُتيح تشخيصاً نوعياً دقيقاً للملوثات.

ثانياً، يُنصح بإضافة وحدة اتصال لاسلكية مثل ESP8266 أو NRF24L01 لنقل البيانات إلى تطبيق هاتفي، مما يُمكّن المستخدم من المراقبة عن بُعد وتلقي التنبيهات الفورية.

ثالثاً، يمكن تحسين واجهة التنبيه بإضافة Buzzer صوتي و LED ملون يعملان بالتزامن مع الرسائل النصية علىLCD .

رابعاً، يُقترح تطوير خوارزمية ذكية تعتمد على التعلم الآلي لتحديد الأنماط الزمنية للتلوث وإصدار تنبؤات استباقية قبل حدوث الذروات التلوثية.

خامساً، يمكن تعزيز النظام بطاقة شمسية صغيرة مع بطارية ليثيوم لضمان الاستمرارية في حال انقطاع الكهرباء، وهو أمر شائع في بعض المناطق النائية.

سادساً، يُوصى بإجراء معايرة دورية للحساسات باستخدام محطات مرجعية معتمدة لضمان استدامة الدقة على المدى الطويل.

أخيراً، يمكن تصغير حجم النظام باستخدام Arduino Nano أو ESP32 وتصميم غلاف وقائي يحافظ على المكونات من الغبار والرطوبة، مما يُسهّل نشره في مختلف البيئات المنزلية والمؤسساتية.

الخاتمة

في ختام هذا الفصل، تم إنجاز المرحلة العملية للنظام المقترح لمراقبة جودة الهواء الداخلي، حيث تم بنجاح تركيب جميع المكونات المادية (PMS5003، KEYBOARD، RTC، LCD، SD Card، Arduino UNO R3) وفق المخطط الكهربائي المصمم، وتحميل الكود البرمجي المُعدّل، والتحقق من عمل الشاشة في عرض البيانات آنياً، وتفعيل آلية التخزين على بطاقة SD بتنسيق CSV. أثبتت الاختبارات العملية في السيناريوهات الثلاثة (البيئة الطبيعية، استخدام البخور، لهب ولاعة، معطر الجو، عطر كحولي، غبار الطباشير) أن النظام قادر على اكتشاف التغيرات في جودة الهواء وإصدار التنبيهات النصية على LCD بشكل موثوق، مع تسجيل دقيق للبيانات الزمنية.

ورغم النجاح المحقق، فقد كشفت التجربة عن حاجة ملحة لتحسينات مستقبلية تتمثل في دمج حساسات غازية إضافية، وإضافة وحدات اتصال لاسلكي، وتطوير واجهات تنبيه متعددة، مما يفتح آفاقاً واسعة لتحويل هذا النموذج الأولي إلى منتج تجاري قابل للنشر على نطاق واسع في المساكن والمؤسسات، مساهمةً بذلك في الحد من الأمراض التنفسية المرتبطة بتلوث الهواء الداخلي وتعزيز جودة حياة الناس.

الخاتمة

الخاتمة العامة

في إطار الاهتمام المتزايد بجودة الهواء الداخلي وتأثيراتها المباشرة على صحة الإنسان، هدفت هذه الدراسة إلى تصميم وتطوير نظام ذكي ومنخفض التكلفة لرصد ملوثات الهواء الداخلي اعتماداً والحساسات الرقمية الحديثة. وقد جاء هذا العمل استجابة للحاجة المتنامية إلى حلول عملية تسمح بالمراقبة المستمرة للبيئات الداخلية والكشف المبكر عن ارتفاع مستويات التلوث الناتجة عن الأنشطة اليومية المختلفة.

من خلال الدراسة النظرية التي تناولت مصادر تلوث الهواء الداخلي وآثاره الصحية ومؤشرات تقييم جودة الهواء، تم بناء قاعدة علمية مكّنت من فهم طبيعة الملوثات الجسيمية وأهميتها في تقييم المخاطر الصحية داخل المباني المغلقة. كما سمحت هذه المرحلة بتحديد المتطلبات الوظيفية للنظام واختيار التقنيات المناسبة لإنجازه.

أما على المستوى التطبيقي، فقد تم تصميم وإنجاز منظومة متكاملة تعتمد على لوحة Arduino UNO وحساس الجسيمات الدقيقة PMS5003، بالإضافة إلى شاشة عرض ووحدة ساعة حقيقية RTC ووحدة تخزين SD Card ومؤشرات ضوئية للإنذار. وقد مكّن هذا التكوين من قياس تراكيز الجسيمات العالقة $PM_{1.0}$ و$PM_{2.5}$ وPM_{10} وعرضها وتسجيلها آلياً مع توثيق زمن القياس، مما يوفر قاعدة بيانات يمكن الرجوع إليها لاحقاً لتحليل جودة الهواء.

أظهرت نتائج المحاكاة باستخدام برنامج Proteus توافقاً جيداً مع التصميم النظري المقترح، كما أكدت التجارب العملية نجاح النظام في رصد التغيرات الآنية في تراكيز الجسيمات العالقة الناتجة عن مصادر مختلفة للتلوث الداخلي. وقد شملت الاختبارات مجموعة من الحالات الواقعية تمثلت في العطور الكحولية، ولهب الولاعة، ودخان البخور، وغبار الطباشير، ومعطرات الجو، حيث أظهرت النتائج اختلافاً واضحاً في استجابة الحساس تبعاً لطبيعة الملوث ومصدره وحجمه الجسيمي.

كما بينت النتائج أن ملوثات الاحتراق، وخاصة دخان البخور، سجلت أعلى تراكيز للجسيمات العالقة مقارنة بباقي المصادر المختبرة، في حين أظهرت العطور ومعطرات الجو ارتفاعات متفاوتة تميزت بانخفاض تدريجي مع مرور الزمن نتيجة التخفيف الطبيعي والتهوية. وأكدت هذه النتائج قدرة النظام على تتبع السلوك الزمني للملوثات ومراقبة تطور تراكيزها داخل البيئة الداخلية.

وقد أثبت النظام المطور فعاليته كحل عملي ومنخفض التكلفة لمراقبة جودة الهواء الداخلي، مع إمكانية استخدامه في المنازل والمؤسسات التعليمية والمكاتب والأماكن المغلقة الأخرى. كما أظهر المشروع إمكانية دمج تقنيات إنترنت الأشياء مع أنظمة المراقبة البيئية بهدف توفير معلومات آنية تساعد على اتخاذ الإجراءات المناسبة لتحسين جودة الهواء والحد من المخاطر الصحية المرتبطة بالتعرض للملوثات.

وفي ضوء النتائج المتحصل عليها، يمكن اقتراح مجموعة من الآفاق المستقبلية لتطوير هذا العمل، من أهمها إضافة حساسات متخصصة للكشف عن الغازات الملوثة مثل أول أكسيد الكربون (CO) وثاني أكسيد الكربون (CO_2) والفورمالديهايد والمركبات العضوية المتطايرة (VOCs)، وربط النظام بمنصات المراقبة السحابية وتطبيقات الهواتف الذكية لتمكين المتابعة عن بعد. كما يمكن تطوير النظام ليعمل بصورة آلية مع أنظمة التهوية والتكييف الذكية من أجل التحكم المباشر في جودة الهواء الداخلي وتحسين كفاءة استهلاك الطاقة.

وفي الختام، يبرز هذا العمل أهمية توظيف التقنيات الرقمية الحديثة في خدمة المجال البيئي والصحي، ويؤكد أن الأنظمة الذكية منخفضة التكلفة تمثل خياراً واعداً لتعزيز مراقبة جودة الهواء الداخلي والمساهمة في توفير بيئات أكثر أماناً وصحة واستدامة.

قائمة المراجع

1. United States Environmental Protection Agency. Indoor Air Quality. 2025.
2. World Health Organization. Household Air Pollution and Health. Geneva: World Health Organization. 2025.
3. A REVIEW OF GENERAL AND MODERN METHODS OF AIR PURIFICATION. Chetan Mishra, Sarthak Jain, Naveen Solanki Aditya Roy. 9، Istanbul : Journal of Thermal Engineering، 2019، المجلد5.
4. On the history of indoor air quality and health. J. Sundell. 14، lyngby : Indoor Air، 2004، المجلد7.
5. Industrial air pollution and self-reported respiratory and irritant health effects on adjacent residents: a case study of Islamabad Industrial Estate (IEI). Umer Khayyam Rida Bano. Islamabad : Air Quality, Atmosphere, and Health، 2021، المجلد14.
6. Air Quality Monitoring Systems using IoT: A Review. Viral Kapadia Virendra Barot. Shillong : International Conference on Computational Performance Evaluation، 2020.
7. Air Pollution: from sources of emissions. Villejuif, France : Breathe، 2004.
8. Measured Concentrations of VOCs in Several Non-Residential Microenvironments in the United States. E. Andres Houseman, George M. Gray, Jonathan I. Levy, Deborah H. Bennett Mirabda M. LOH. California : Environmental Science and Technology، 2006.
9. Do Synthetic Fragrances in Personal Care and Household Products Impact Indoor Air Quality and Pose Health Risks? Gandhi Rádis-Baptista. Fortaleza : Journal of Xenobiotics، 2023.
10. Volatile Organic Compounds, Indoor Air Quality and Health. Lars Molhave. Copenhagen : Indoor Air، 1991.
11. Evaluation of a meta-analysis of air quality and heart attacks, a case study. Warren B. Kindzierski S. Stanley Young. Alberta : Arxiv، 2019.
12. A heterogeneous key performance indicator metadata model for air quality monitoring in sustainable cities. Qingquan Li, Wei Tu, Chisheng Wang Lianjie Zhou. Shenzhen : Environmental Modeling and Software، 2020.

13. An IoT Based Environment Monitoring System. Mohammed Rezwanul Islam, Fahad Faisal, Farida Habib Semantha, Abdul Hasib Siddique, Mehedi Hasan Mosfiqun Nahid Hassan. Tamilnadu : International Conference on Intelligent Sustainable Systems، 2020.

14. Zhou Yong. Digital universal particle concentration sensor. Beijing : PLANTOWER، 2016.

15. Arduino Documentation: Arduino Docs. Arduino Docs. [متصل] Arduino. [تاريخ الاقتباس: 27 4 ،2026.] https://docs.arduino.cc/.

16. LCM Module (TC2004A-01). Guangzhou : TINSHARP، 2009.

17. BQ32002 Real Time Clock (RTC). Texas : Texas Instruments، 2010.

18. Instruction Manual Temperature Sensor Model TH-T. Saint-Lambert : ROCTEST، 2005.

19. Lady Ada. Micro SD Card Breakout Board Tutorial. New York : Adrafruit Industries، 2025.

20. Serial Peripheral Interface (SPI). Texas : Texas Instruments، 2013.

21. ONS (Office National des Statistiques). Enquête Nationale sur les Conditions de Vie des Ménages. Alger: République Algérienne Démocratique et Populaire. 2023.

22. G., & Sommerville, I Kotonya. Requirements Engineering: Processes and Techniques. John Wiley & Sons. 1998.

23. A. et al. Mota. Implementation of an Internet of Things Architecture to Monitor Indoor Air Quality. مكان غير معروف : Sensors, 25(6), 1683. MDPI.، 2025.

24. CDER . cder.dz. [متصل] https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/ber42_10_11.pdf.

25. Dhwani Valecha. Embedded Software Development Life Cycle. [متصل] 01 july, 2025. https://bacancysystems.com/blog/embedded-software-development-life-cycle.

26. pcbsync.com. PCBSync. [متصل] https://pcbsync.com/pms5003-arduino/.

الملاحـــــــق

الملحق 1: الكود البرمجي الكامل

```
<include <Wire.h#
<include <LiquidCrystal_I2C.h#
<include <RTClib.h#
<include <DHT.h#
<include <SD.h#
<include <SPI.h#
// ============================================

// إعدادات الأجهزة

// ============================================

// DHT22

define DHTPIN    7#
define DHTTYPE    DHT22#
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE)؛

// LCD عبر PCF8574 - A0=A1=A2=GND ← عنوان 0x20

LiquidCrystal_I2C lcd(0x20, 20, 4)؛


// RTC DS1307

RTC_DS1307 rtc؛

// SD Card

define SD_CS 9#
// PM Sensor DFRobot I2C

define PM_I2C_ADDR 0x19#
// ============================================

// قراءة مستشعر PM

// ============================================

struct PMData {
uint16_t pm1_0؛

uint16_t pm2_5؛
```

```
;uint16_t pm10
;bool valid
;{
} ()PMData readPM
;PMData d = {0, 0, 0, false}
;Wire.requestFrom(PM_I2C_ADDR, 6)
} if (Wire.available() >= 6)
;()d.pm1_0 = (Wire.read() << 8) | Wire.read
;()d.pm2_5 = (Wire.read() << 8) | Wire.read
;()d.pm10  = (Wire.read() << 8) | Wire.read
;d.valid = true
{
;return d
{
//////////////////////////////////////////// //
SD حفظ على          //
//////////////////////////////////////////// //
} void saveToSD(DateTime t, float temp, float hum, PMData pm)
;File f = SD.open("log.csv", FILE_WRITE)
;if (!f) return
// رأس الملف مرة واحدة
if (f.size() == 0)
;f.println("Date,Time,Temp_C,Humidity_%,PM1.0,PM2.5,PM10")
;char row[90]
،"sprintf(row, "%02d/%02d/%04d,%02d:%02d:%02d,%.1f,%.1f,%d,%d,%d
،()t.day(), t.month(), t.year
،()t.hour(), t.minute(), t.second
،temp, hum
،pm.valid ? (int)pm.pm1_0 : -1
```

```
،pm.valid ? (int)pm.pm2_5 : -1
؛(pm.valid ? (int)pm.pm10  : -1
؛f.println(row)
؛()f.close
{
========================================== //
LCD عرض على          //
========================================== //
} void updateLCD(DateTime t, float temp, float hum, PMData pm)
؛char buf[21]
// السطر 1: التاريخ
؛lcd.setCursor(0, 0)
؛sprintf(buf, "Date: %02d/%02d/%04d    ", t.day(), t.month(), t.year())
؛lcd.print(buf)
// السطر 2: الوقت
؛lcd.setCursor(0, 1)
؛sprintf(buf, "Time: %02d:%02d:%02d      ", t.hour(), t.minute(), t.second())
؛lcd.print(buf)
// السطر 3: الحرارة والرطوبة
؛lcd.setCursor(0, 2)
if (!isnan(temp) && !isnan(hum))
؛sprintf(buf, "T:%.1fC  RH:%.1f%%    ", temp, hum)
else
؛strcpy(buf, "DHT22 Error!        ")
؛lcd.print(buf)

// السطر 4: جودة الهواء (PM)
؛lcd.setCursor(0, 3)
if (pm.valid)
```

```
;sprintf(buf, "PM2.5:%d PM10:%d    ", pm.pm2_5, pm.pm10)
else
;strcpy(buf, "PM Sensor: N/A      ")
;lcd.print(buf)
{
========================================== //
SETUP         //
========================================== //
} ()void setup
;Serial.begin(9600)
;()Wire.begin
;()dht.begin
--- LCD --- //
;()lcd.init
;()lcd.backlight
;lcd.setCursor(2, 1)
;lcd.print("Air Quality v1.0")
;delay(2000)
;()lcd.clear

--- RTC --- //
} if (!rtc.begin())
;lcd.setCursor(0, 0)
;lcd.print("RTC ERROR! Check wiring")
;while (1) delay(100)
{
} if (!rtc.isrunning())
;rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)))
{
--- SD --- //
```

```
;lcd.setCursor(0, 1)
} if (!SD.begin(SD_CS))
;lcd.print("SD Card FAILED!     ")
;delay(2000)
} else {
;lcd.print("SD Card OK          ")
;delay(1000)
{
;()lcd.clear
{
//////////////////////////////////////////
LOOP          //
//////////////////////////////////////////
} ()void loop
;()DateTime now  = rtc.now
;()float temp    = dht.readTemperature
;()float hum     = dht.readHumidity
;()PMData pm     = readPM
LCD عرض على //
;updateLCD(now, temp, hum, pm)
SD حفظ على //
;saveToSD(now, temp, hum, pm)
للمراقبة Serial Monitor //
;("/")Serial.print(now.day()); Serial.print
;("/")Serial.print(now.month()); Serial.print
;(" ")Serial.print(now.year()); Serial.print
;(":")Serial.print(now.hour()); Serial.print
;(":")Serial.print(now.minute()); Serial.print
;Serial.println(now.second())
```

```
;Serial.print("Temp: "); Serial.print(temp)
;("٪")Serial.print(" C  Hum: "); Serial.print(hum); Serial.println
} if (pm.valid)
;Serial.print("PM1.0: "); Serial.print(pm.pm1_0)
;Serial.print("  PM2.5: "); Serial.print(pm.pm2_5)
;Serial.print("  PM10: "); Serial.println(pm.pm10)
} else {
;Serial.println("PM Sensor: N/A")
{
;("----------------------------")Serial.println
;delay(2000)
{
```

الملحق2 الكود البرمجي المستخدم

```
#include <Wire.h>                    // استدعاء مكتبة الـ I2C للتواصل مع الشاشة
#include <LiquidCrystal_I2C.h>  // استدعاء مكتبة شاشة الـ I2C من نوع LCD
#include <SPI.h>                 // استدعاء مكتبة الـ SPI للتواصل مع موديول الذاكرة SD
#include <SD.h>                  // استدعاء مكتبة تشغيل وإدارة كرت الذاكرة SD
#include <RTClib.h>              // استدعاء مكتبة موديول الساعة الزمني DS3231
#include <EEPROM.h>              // استدعاء مكتبة الذاكرة الدائمة لحفظ الإعدادات عند انقطاع الكهرباء

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); // تعريف الشاشة بحجم 20 عمود و 4 أسطر العنوان 0x27
RTC_DS3231 rtc;                  // تعريف كائن الساعة الزمنية للتعامل مع الوقت

// تحديد العناوين الرقمية داخل الذاكرة الدائمة لحفظ البيانات EEPROM
```

```
const int EEPROM_LOG_ADDR   = 0; // عنوان حفظ حالة التسجيل ( 0 يعني متوقف، 1 يعني يشتغل)
const int EEPROM_ALARM_ADDR = 1; // عنوان حفظ قيمة حد الإنذار لغبار PM2.5

// --- تعريف دبابيس الأزرار الأربعة ---
const int btnUp    = 4;  // الزر الموصل بالدبوس رقم 4 (للصعود وزيادة القيم)
const int btnDown  = 5;  // الزر الموصل بالدبوس رقم 5 (للنزول ونقص القيم)
const int btnEnter = 6;  // الزر الموصل بالدبوس رقم 6 (للموافقة والدخول والحفظ)
const int btnBack  = 7;  // الزر الموصل بالدبوس رقم 7 (للخروج والرجوع للخلف)

const int chipSelect = 10; // الدبوس رقم 10 المخصص للتحكم بكرت الذاكرة SD (CS)

// --- تعريف دبابيس التحكم بالمصابيح (الأخضر والأصفر) ---
const int ledGreen  = A1; // الأخضر على المنفذ A1: يضيء باستمرار طالما التسجيل مشتغل
const int ledYellow = A2; // الأصفر على المنفذ A2: يومض ومضة سريعة جداً عند الكتابة للذاكرة فقط

// تعريف الحالات المختلفة لواجهات الشاشة والنظام
enum State { LIVE_DATA, MAIN_MENU, SHOW_RTC, SD_MENU, SET_ALARM, LANG_MENU };
State currentState = LIVE_DATA; // الحالة الابتدائية عند التشغيل هي واجهة البيانات المباشرة

enum Language { EN, FR }; // تعريف اللغات المتاحة (الإنجليزية والفرنسية)
Language currentLang = EN; // اللغة الافتراضية عند التشغيل هي الإنجليزية

int menuCursor = 0;       // متغير لتحديد موقع مؤشر السهم في القائمة الرئيسية
const int maxMenuItems = 6; // إجمالي عدد عناصر القائمة الرئيسية
int alarmThreshold = 35;  // القيمة الابتدائية لحد إنذار الغبار (تتحدث لاحقاً من الذاكرة)
bool ecoMode = false;     // متغير لتشغيل أو إطفاء وضع توفير الطاقة
```

```
bool sdLogging = false;   // متغير يوضح هل التسجيل نشط حالياً أم متوقف
bool sdReady = false;     // متغير يوضح هل كرت الذاكرة تم التعرف عليه وجاهز للاستخدام

// مصفوفة تحتوي على الفترات الزمنية المتاحة للتسجيل بالثواني
const int logIntervals[] = {5, 10, 30, 60, 120, 300, 600, 1200};
const int numIntervals = 8;    // عدد الخيارات المتاحة للفترات الزمنية
int intervalIndex = 0;         // المؤشر الحالي للفترة الزمنية المختارة (افتراضياً 5 ثوانٍ)
unsigned long lastLogTime = 0; // متغير لتخزين آخر وقت تم فيه الحفظ للذاكرة لحساب الفترات

int subSDCursor = 0;   // مؤشر التصفح داخل قائمة الذاكرة الفرعية
int subLangCursor = 0; // مؤشر التصفح داخل قائمة اللغات الفرعية

// متغيرات لتخزين قيم قراءات الغبار (PM1.0, PM2.5, PM10) وأعلى قيمة مسجلة
uint16_t pm10 = 0, pm25 = 0, pm100 = 0, maxPM25 = 0;
uint8_t buffer[32];   // مصفوفة (بافر) لتجميع الـ 32 بايت القادمة من الحساس
uint8_t bufIndex = 0; // مؤشر لتتبع عدد البايتات المستلمة في البافر

unsigned long lastDisplayTime = 0; // متغير للتحكم بمعدل تحديث الشاشة لتفادي الوميض المزعج

// متغيرات الفلترة البرمجية المتقدمة للأزرار لمنع القراءات الخاطئة الناتجة عن الاهتزاز (Debounce)
unsigned long lastDebounceTime[4] = {0, 0, 0, 0}; // تخزين آخر وقت لتغير حالة كل زر
const unsigned long debounceDelay = 50;           // وقت الانتظار بالملي ثانية للتأكد من الضغطة
bool buttonState[4] = {HIGH, HIGH, HIGH, HIGH};   // الحالة الفعلية المستقرة للأزرار
```

```
bool lastButtonState[4] = {HIGH, HIGH, HIGH, HIGH}; // آخر حالة مسجلة للأزرار في الدورة السابقة

void setup() {
  lcd.init();       // تشغيل وتهيئة شاشة الـ LCD
  lcd.backlight();  // تشغيل الإضاءة الخلفية للشاشة
  Serial.begin(9600); // بدء الاتصال التسلسلي بسرعة 9600 لاستقبال بيانات الحساس

  // ضبط دبابيس الأزرار كمدخلات مع تفعيل المقاومة الداخلية (Pull-up)
  pinMode(btnUp, INPUT_PULLUP);
  pinMode(btnDown, INPUT_PULLUP);
  pinMode(btnEnter, INPUT_PULLUP);
  pinMode(btnBack, INPUT_PULLUP);

  // ضبط دبابيس التحكم بالمصابيح كمخرجات كهربائية
  pinMode(ledGreen, OUTPUT);
  pinMode(ledYellow, OUTPUT);

  // إطفاء المصابيح تماماً عند بداية إقلاع النظام
  digitalWrite(ledGreen, LOW);
  digitalWrite(ledYellow, LOW);

  // --- عند التشغيل EEPROM استعادة الإعدادات المحفوظة من الذاكرة الدائمة ---
  uint8_t savedLogState = EEPROM.read(EEPROM_LOG_ADDR); // قراءة حالة التسجيل السابقة
  if (savedLogState == 1)       sdLogging = true;       // إذا كانت 1، يتم تفعيل التسجيل تلقائياً
  else if (savedLogState == 0)  sdLogging = false;      // إذا كانت 0، يبقى التسجيل متوقفاً
  else {
    sdLogging = false;                                  // إذا كانت الذاكرة فارغة (أول مرة تشغيل)
```

```
    EEPROM.write(EEPROM_LOG_ADDR, 0);                // اكتب فيها صفر كقيمة افتراضية
  }

  uint8_t savedAlarm = EEPROM.read(EEPROM_ALARM_ADDR); // قراءة حد الإنذار المسجل سابقاً
  if (savedAlarm > 0 && savedAlarm < 250) {
    alarmThreshold = savedAlarm;                   // استعادة القيمة المحفوظة
  } else {
    alarmThreshold = 35;                           // إذا كانت فارغة، اجعل الحد الافتراضي 35
    EEPROM.write(EEPROM_ALARM_ADDR, 35);           // واحفظ القيمة الافتراضية في الذاكرة
  }
  // ---------------------------------------------------------------

  // عرض واجهة ترحيبية عند بداية تشغيل الجهاز
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0); lcd.print(F("====================="));
  lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(F("  AIR QUALITY MON.  "));
  lcd.setCursor(0, 2); lcd.print(F(" UNIVER. OF EL OUED "));
  lcd.setCursor(0, 3); lcd.print(F("====================="));
  delay(2000); // الانتظار لمدة ثانيتين

  // فحص وتشغيل موديول الساعة RTC
  if (!rtc.begin()) {
    lcd.clear();
    lcd.print(F("RTC Error!")); // عرض رسالة خطأ إذا لم يتم العثور على الساعة
    delay(2000);
  }

  // سطر ضبط الساعة (مغلق بـ // لحماية الوقت من التصفير عند إعادة التشغيل)
  // rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
```

```
  // فحص وتهيئة كرت الذاكرة SD Card
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(F("Initializing SD...  "));
  if (SD.begin(chipSelect)) {
    sdReady = true; // تفعيل جاهزية الذاكرة
    lcd.setCursor(0, 2); lcd.print(F("SD Card: READY    "));

    // فتح ملف التخزين لإنشاء العناوين العلوية للأعمدة إن كان الملف جديداً وفارغاً
    File dataFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
    if (dataFile) {
      if (dataFile.size() == 0) { // تم استبدال الفواصل العادية بفواصل منقوطة بناءً على طلبك
ليعمل إكسيل مباشرة

dataFile.println(F("Date;Time;PM1.0(ug/m3);PM2.5(ug/m3);PM10(ug/m3)"));
      }
      dataFile.close(); // إغلاق الملف لحماية البيانات
    }
  } else {
    sdReady = false; // فشل التعرف على الذاكرة
    lcd.setCursor(0, 2); lcd.print(F("SD Card: FAILED  "));
  }
  delay(1500); // الانتظار لثانية ونصف
  lcd.clear(); // مسح الشاشة لبدء العرض الرئيسي

  lastLogTime = millis(); // ضبط توقيت البداية لحساب فترات التسجيل
}

void loop() {
  // 1. قراءة واستقبال البيانات التسلسلية القادمة من حساس الغبار
  while (Serial.available() > 0) {
    uint8_t ch = Serial.read(); // قراءة بايت واحد من المنفذ
```

```
      if (bufIndex == 0 && ch != 0x42) continue; // التأكد من أن البايت الأول هو بداية 0x42الإشارة الصحيحة
      if (bufIndex == 1 && ch != 0x4D) { bufIndex = 0; continue; } // التأكد من البايت الثاني0x4D
      buffer[bufIndex++] = ch; // تخزين البايت في المصفوفة وزيادة المؤشر
      if (bufIndex == 32) { // عند اكتمال الـ32 بايت الخاصة بالحزمة كاملة
        bufIndex = 0;       // تصفير المؤشر لاستقبال الحزمة التالية
        processSensorData(); // الانتقال لمعالجة وفك تشفير البيانات المجمعة
      }
    }

    // 2. فحص الأزرار الأربعة وتطبيق نظام الفلترة (Debounce)
    checkButtonsDebounced();

    // 3. آلية التنسيق والتحكم بالمصابيح وعملية الكتابة في الذاكرة
    if (sdLogging && sdReady) {
      digitalWrite(ledGreen, HIGH); // المصباح الأخضر يشتغل باستمرار طالما التسجيل نشط (ON)

      // فحص هل حان وقت الحفظ بناءً على الفترة الزمنية المحددة
      if (millis() - lastLogTime >= (unsigned long)logIntervals[intervalIndex] * 1000) {
        lastLogTime = millis(); // تحديث توقيت آخر عملية تسجيل

        digitalWrite(ledYellow, HIGH); // تشغيل المصباح الأصفر (بداية ومضة الكتابة للخلفية)
        logDataToSD();              // استدعاء دالة الكتابة الفعلية داخل كرت الذاكرة
        digitalWrite(ledYellow, LOW); // إطفاء المصباح الأصفر فور انتهاء الكتابة مباشرة
      }
    } else {
      // إطفاء المصباحين الأخضر والأصفر تماماً عندما يكون التسجيل متوقفاً100 ٪ (OFF)
```

```
    digitalWrite(ledGreen, LOW);
    digitalWrite(ledYellow, LOW);
   }

  // 4. تحديث الشاشة كل 250) لضمان استقرار العرض دون وميض4 ملي ثانية (مرات في الثانية)
  if (millis() - lastDisplayTime > 250) {
    updateDisplay();
    lastDisplayTime = millis();
  }
 }

// دالة فحص ومعالجة بيانات الحساس والتحقق من سلامة الحزمة (Checksum)
void processSensorData() {
  uint16_t sum = 0;
  for (uint8_t i = 0; i < 30; i++) sum += buffer[i]; // جمع أول 30 بايت لحساب المجموع
  uint16_t buffer_checksum = (buffer[30] << 8) | buffer[31]; // دمج آخر بايتين
للحصول على رمز الأمان المرسل

  if (sum == buffer_checksum) { // إذا تطابق المجموع، البيانات سليمة وغير مشوشة
    pm10  = (buffer[10] << 8) | buffer[11];  // فك تشفير قيمة PM1.0
    pm25  = (buffer[12] << 8) | buffer[13];  // فك تشفير قيمة PM2.5
    pm100 = (buffer[14] << 8) | buffer[15]; // فك تشفير قيمة PM10
    if (pm25 > maxPM25) maxPM25 = pm25;      // تحديث أعلى قيمة غبار تم رصدها
بالنظام
  }
 }

// دالة حفظ البيانات المحددة داخل ملف كرت الذاكرة SD Card
void logDataToSD() {
  DateTime now = rtc.now(); // جلب الوقت والتاريخ الحالي من الساعة
  File dataFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE); // فتح الملف بصيغة الكتابة
  if (dataFile) {
```

```
      // كتابة التاريخ
      dataFile.print(now.year(), DEC); dataFile.print('-');
      dataFile.print(now.month(), DEC); dataFile.print('-');
      dataFile.print(now.day(), DEC); dataFile.print(';'); // تم تغيير الفاصلة هنا لـ ;

      // كتابة الوقت وتنسيق الأصفار التوضيحية
      if(now.hour() < 10) dataFile.print('0'); dataFile.print(now.hour(), DEC);
dataFile.print(':');
      if(now.minute() < 10) dataFile.print('0'); dataFile.print(now.minute(),
DEC); dataFile.print(':');
      if(now.second() < 10) dataFile.print('0'); dataFile.print(now.second(),
DEC); dataFile.print(';'); // تم تغيير الفاصلة هنا لـ ;

      // كتابة قراءات الحساس الثلاثة والفصل بينها بفواصل منقوطة بناءً على التحديث الأخير
      dataFile.print(pm10); dataFile.print(';');
      dataFile.print(pm25); dataFile.print(';');
      dataFile.println(pm100); // سطر جديد بعد نهاية الحزمة لتجهيز السطر القادم

      dataFile.close(); // إغلاق الملف فوراً لتأمين حفظ البيانات على الكرت وحمايته من التلف
    }
  }

  // دالة الفلترة البرمجية المتقدمة لقراءة حالة الأزرار الأربعة بدقة
  void checkButtonsDebounced() {
    int pins[4] = {btnUp, btnDown, btnEnter, btnBack}; // مصفوفة دبابيس الأزرار
    char actions[4] = {'U', 'D', 'E', 'B'};          // رموز الإجراءات المرتبطة بكل زر

    for (int i = 0; i < 4; i++) {
      bool reading = digitalRead(pins[i]); // قراءة الحالة الكهربائية الحالية للزر

      if (reading != lastButtonState[i]) {
        lastDebounceTime[i] = millis(); // إعادة ضبط الموقت عند رصد أي تغير في الإشارة
      }
```

```
      if ((millis() - lastDebounceTime[i]) > debounceDelay) { // إذا استقرت الإشارة لأكثر من 50 ملي ثانية
        if (reading != buttonState[i]) {
          buttonState[i] = reading; // اعتماد الحالة الجديدة المستقرة للزر
          if (buttonState[i] == LOW) { // إذا كانت الحالة LOW (أي تم ضغط الزر فعلياً للأسفل)
            handleInput(actions[i]); // الانتقال لتنفيذ الأمر المخصص لهذا الزر
          }
        }
      }
      lastButtonState[i] = reading; // تخزين الحالة للدورة القادمة
    }
  }

  // دالة توجيه الأوامر والتحكم بالتنقل بين القوائم والإعدادات عند ضغط الأزرار
  void handleInput(char action) {
    if (action == 'E') { // --- عند ضغط زر ENTER (الموافقة) ---
      if (currentState == LIVE_DATA) {
        currentState = MAIN_MENU; lcd.clear(); // الدخول للقائمة الرئيسية من الواجهة الأساسية
      }
      else if (currentState == MAIN_MENU) { // تنفيذ الأمر بناءً على موقع السهم في القائمة الرئيسية
        if (menuCursor == 0) { currentState = SHOW_RTC; lcd.clear(); } // فتح واجهة الساعة
        if (menuCursor == 1) { currentState = SD_MENU; subSDCursor = 0; lcd.clear(); } // فتح واجهة الذاكرة
        if (menuCursor == 2) { currentState = SET_ALARM; lcd.clear(); } // فتح واجهة تعديل حد الإنذار
```

```
      if (menuCursor == 3) ecoMode = !ecoMode; // تشغيل/إطفاء وضع توفير الطاقة
مباشرة
      if (menuCursor == 4) maxPM25 = 0; // تصفير أعلى قيمة مسجلة مباشرة
      if (menuCursor == 5) { currentState = LANG_MENU; subLangCursor =
(currentLang == EN) ? 0 : 1; lcd.clear(); } // واجهة اللغات
    }
    else if (currentState == SET_ALARM) {
      EEPROM.update(EEPROM_ALARM_ADDR, alarmThreshold); // حفظ
حد الإنذار الجديد بالذاكرة الدائمة فوراً
      currentState = MAIN_MENU; lcd.clear(); // العودة للقائمة الرئيسية
    }
    else if (currentState == SD_MENU) {
      if (subSDCursor == 0 && sdReady) {
        sdLogging = !sdLogging; // تشغيل أو إيقاف التسجيل
        EEPROM.update(EEPROM_LOG_ADDR, sdLogging ? 1 : 0); // حفظ
حالة التسجيل الجديدة بالذاكرة الدائمة فوراً
        lastLogTime = millis(); // إعادة ضبط توقيت البداية
      }
      else if (subSDCursor == 1) {
        intervalIndex = (intervalIndex + 1) % numIntervals; // الانتقال للفترة الزمنية
التالية للتسجيل
      }
    }
    else if (currentState == LANG_MENU) {
      currentLang = (subLangCursor == 0) ? EN : FR; // اعتماد اللغة المختارة (إنجليزية
أو فرنسية)
      currentState = MAIN_MENU; lcd.clear(); // العودة للقائمة الرئيسية
    }
  }

  else if (action == 'B') { // --- عند ضغط زر BACK (الرجوع للخلف) ---
    if (currentState == MAIN_MENU) {
```

```
        currentState = LIVE_DATA; lcd.clear(); // الخروج للواجهة الرئيسية المباشرة
      } else if (currentState != LIVE_DATA) {
        currentState = MAIN_MENU; lcd.clear(); // الرجوع خطوة واحدة للخلف نحو
القائمة الرئيسية
      }
    }

    else if (action == 'U') { // --- عند ضغط زر UP (الصعود أو الزيادة) ---
      if (currentState == MAIN_MENU) menuCursor = (menuCursor == 0) ?
maxMenuItems - 1 : menuCursor - 1; // تحريك السهم للأعلى
      else if (currentState == SET_ALARM) alarmThreshold++; // زيادة قيمة حد
الإنذار بمقدار1
      else if (currentState == SD_MENU) subSDCursor = (subSDCursor == 0) ?
1 : 0; // التنقل بالأعلى في قائمة الذاكرة
      else if (currentState == LANG_MENU) subLangCursor = (subLangCursor
== 0) ? 1 : 0; // التنقل بالأعلى في قائمة اللغات
    }

    else if (action == 'D') { // --- عند ضغط زر DOWN (النزول أو النقصان) ---
      if (currentState == MAIN_MENU) menuCursor = (menuCursor + 1) %
maxMenuItems; // تحريك السهم للأسفل
      else if (currentState == SET_ALARM && alarmThreshold > 0)
alarmThreshold--; // نقص قيمة حد الإنذار بمقدار1
      else if (currentState == SD_MENU) subSDCursor = (subSDCursor + 1) %
2; // التنقل للأسفل في قائمة الذاكرة
      else if (currentState == LANG_MENU) subLangCursor = (subLangCursor
+ 1) % 2; // التنقل للأسفل في قائمة اللغات
    }
  }

  // دالة مساعدة لطباعة واجهة الفترات الزمنية المحددة للتسجيل على الشاشة بلغة واضحة
  void printIntervalUI() {
```

```
    switch(logIntervals[intervalIndex]) {
      case 5:   lcd.print(F("5 Sec ")); break;
      case 10:  lcd.print(F("10 Sec")); break;
      case 30:  lcd.print(F("30 Sec")); break;
      case 60:  lcd.print(F("1 Min ")); break;
      case 120: lcd.print(F("2 Min ")); break;
      case 300: lcd.print(F("5 Min ")); break;
      case 600: lcd.print(F("10 Min")); break;
    }
  }
```

// بناءً على الحالة الحالية للنظام واللغة LCD الدالة المسؤولة عن بناء وعرض الواجهات على شاشة الـ المختارة

```
  void updateDisplay() {
    DateTime now = rtc.now(); // جلب الوقت من الساعة لكل تحديث شاشة

    switch (currentState) {
      case LIVE_DATA: // --- واجهة عرض قراءات الغبار المباشرة والأساسية ---
        lcd.setCursor(0, 0); lcd.print(F("PM1.0 : ")); lcd.print(pm10);
lcd.print(F(" ug/m3   "));
        lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(F("PM2.5 : ")); lcd.print(pm25);
lcd.print(F(" ug/m3   "));
        lcd.setCursor(0, 2); lcd.print(F("PM10  : ")); lcd.print(pm100);
lcd.print(F(" ug/m3   "));

        lcd.setCursor(0, 3);
        // فحص جودة الهواء بناءً على حد الإنذار المعين برمجياً وعرض النتيجة (Safe أو Alarm)
        lcd.print(pm25 <= alarmThreshold ? F("S:SAF ") : F("S:ALM "));

        if (sdLogging) { // إذا كان التسجيل مشتغلاً، اعرض علامة R: واختصار الفترة الزمنية
الحالية بجانبها
          lcd.print(F("R:"));
          switch(logIntervals[intervalIndex]) {
            case 5:   lcd.print(F("5s  ")); break;
            case 10:  lcd.print(F("10s ")); break;
```

```
        case 30:  lcd.print(F("30s ")); break;
        case 60:  lcd.print(F("1m  ")); break;
        case 120: lcd.print(F("2m  ")); break;
        case 300: lcd.print(F("5m  ")); break;
        case 600: lcd.print(F("10m ")); break;
        case 1200: lcd.print(F("20m ")); break;
       }
      } else {
       lcd.print(F("R:OFF ")); // إذا كان التسجيل متوقفاً اعرض OFF
      }
      lcd.print(F("M:")); lcd.print(maxPM25); lcd.print(F("   ")); // عرض أعلى قيمة مسجلة للغبار بالرمز M:
      break;

    case MAIN_MENU: // --- واجهة عرض القائمة الرئيسية بالترتيب واللغة المطلوبة ---
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print(currentLang == EN ? F("--- MAIN MENU ---   ") : F("- MENU PRINCIPAL -  "));

      // عناصر فقط على الشاشة 3ليظهر  (تدوير السطور تلقائياً) Scroll معادلة برمجية ذكية لعمل بناءً على موقع السهم
      int startItem;
      if (menuCursor >= 3)  startItem = menuCursor - 2;
      else                  startItem = 0;

      for (int i = 0; i < 3; i++) {
       int itemIdx = startItem + i;
       lcd.setCursor(0, i + 1);

       if (itemIdx == menuCursor) lcd.print(F("> ")); // طباعة سهم الاختيار أمام العنصر النشط حالياً
       else                       lcd.print(F("  ")); // مساحة فارغة للعناصر الأخرى غير النشطة

       // طباعة نصوص الخيارات بالترتيب الجديد الذي حددته تماماً باللغتين الإنجليزية والفرنسية //
```

```
        if (itemIdx == 0) {
          if (currentLang == EN) lcd.print(F("1. View Time/Date "));
          else                   lcd.print(F("1. Heure & Date   "));
        }
        else if (itemIdx == 1) {
          if (currentLang == EN) lcd.print(F("2. SD Card Setup  "));
          else                   lcd.print(F("2. Reglage SD Card"));
        }
        else if (itemIdx == 2) {
          if (currentLang == EN) lcd.print(F("3. Set Alarm Limit"));
          else                   lcd.print(F("3. Limite Alarme  "));
        }
        else if (itemIdx == 3) {
          if (currentLang == EN) { lcd.print(F("4. Eco Mode: "));
lcd.print(ecoMode ? F("ON ") : F("OFF  ")); }
          else                   { lcd.print(F("4. Mode Eco: ")); lcd.print(ecoMode ?
F("OUI") : F("NON  ")); }
        }
        else if (itemIdx == 4) {
          if (currentLang == EN) lcd.print(F("5. Reset Max Val  "));
          else                   lcd.print(F("5. Reinit. Max    "));
        }
        else if (itemIdx == 5) {
          lcd.print(F("6. Language/Langue")); // خيار اللغة دائماً في الأخير تماماً كما طلبت
        }
      }
      break;

    case SHOW_RTC: // --- واجهة عرض الوقت والتاريخ الحالي للساعة ---
      lcd.setCursor(0, 0); lcd.print(currentLang == EN ? F("--- TIME & DATE
--- ") : F("--- HEURE & DATE ---"));

      lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(currentLang == EN ? F("Time: ") :
F("Heure: "));
      if(now.hour() < 10) lcd.print('0'); lcd.print(now.hour(), DEC);
lcd.print(':');
```

```
        if(now.minute() < 10) lcd.print('0'); lcd.print(now.minute(), DEC);
lcd.print(':');
        if(now.second() < 10) lcd.print('0'); lcd.print(now.second(), DEC);
lcd.print(F("    "));

        lcd.setCursor(0, 2); lcd.print(currentLang == EN ? F("Date: ") : F("Date:
"));
        if(now.day() < 10) lcd.print('0'); lcd.print(now.day(), DEC); lcd.print('/');
        if(now.month() < 10) lcd.print('0'); lcd.print(now.month(), DEC);
lcd.print('/');
        lcd.print(now.year(), DEC); lcd.print(F("    "));

        lcd.setCursor(0, 3); lcd.print(currentLang == EN ? F("[*] to Main Menu
") : F("[*] Menu Principal  "));
        break;

      case SD_MENU: // --- واجهة إعدادات وتشغيل كرت الذاكرة وفترات التسجيل ---
        lcd.setCursor(0, 0); lcd.print(currentLang == EN ? F("- SD CARD
SETTINGS -") : F("- REGLAGE CARTE SD -"));

        lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(subSDCursor == 0 ? F("> ") : F("  "));
        lcd.print(currentLang == EN ? F("Log Data: ") : F("Registre: "));
        if (!sdReady) {
          lcd.print(F("NO CARD")); // عرض تحذير في حال عدم وجود الكرت بالمستقبل
        } else {
          if (currentLang == EN) lcd.print(sdLogging ? F("ON ") : F("OFF"));
          else                   lcd.print(sdLogging ? F("OUI") : F("NON"));
        }

        lcd.setCursor(0, 2); lcd.print(subSDCursor == 1 ? F("> ") : F("  "));
        lcd.print(currentLang == EN ? F("Interval: ") : F("Interval: "));
        printIntervalUI(); // طباعة الفترة المختارة حالياً

        lcd.setCursor(0, 3); lcd.print(currentLang == EN ? F("[7] Change   [*]Out
") : F("[7] Modif   [*]Ret "));
        break;
```

```
      case SET_ALARM: // --- واجهة تعديل قيمة حد الإنذار لغبار PM2.5 ---
        lcd.setCursor(0, 0); lcd.print(currentLang == EN ? F("- ALARM
SETTINGS -  ") : F("- REGLAGE ALARME -  "));
        lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(currentLang == EN ? F("Limit: ") :
F("Limite:")); lcd.print(alarmThreshold); lcd.print(F(" ug/m3   "));
        lcd.setCursor(0, 2); lcd.print(F("                    "));
        lcd.setCursor(0, 3); lcd.print(currentLang == EN ? F("[7] Save   [*] Out
") : F("[7] Ok     [*] Ret. "));
        break;

      case LANG_MENU: // --- واجهة اختيار لغة النظام ---
        lcd.setCursor(0, 0); lcd.print(F("-- SELECT / CHOIX --"));
        lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(subLangCursor == 0 ? F("> ") : F("  "));
lcd.print(F("1. English       "));
        lcd.setCursor(0, 2); lcd.print(subLangCursor == 1 ? F("> ") : F("  "));
lcd.print(F("2. Francais      "));
        lcd.setCursor(0, 3); lcd.print(currentLang == EN ? F("[7] Save   [*] Out
") : F("[7] Ok     [*] Ret. "));
        break;
    }
  }
```