

تصميم وتنفيذ نظام قارب ذكي يعمل بالطاقة الشمسية لرصد جودة المياه الساحلية باستخدام تقنيات الاتصال اللاسلكي

د. عبدالمنعم صالح أبو راوي¹ أ. أبو القاسم حسين أبو القاسم قنيج² أ. كمال مفتاح عبدالجليل³
أعضاء هيئة تدريس بقسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية المعهد العالي لتقنيات علوم البحار صبراتة^{1,2,3}
rdsalh335@gmail.com gonaejsabrata@gmail.com

الملخص :

تقدم هذه الورقة تصميمًا وتنفيذًا لنظام قارب ذكي مستقل يعمل بالطاقة الشمسية لرصد جودة المياه الساحلية في الوقت الفعلي، وذلك للتصدي للتحديات التي تواجهها الطرق التقليدية المكلفة وغير الآتية. يتكون النظام من قارب مجهز بمستشعرات متعددة لقياس (الأس الهيدروجيني، العكارة، درجة الحرارة، الرطوبة، العمق) ومتحكم دقيق (Arduino Nano)، وناقل لاسلكي (HC-12) لنقل البيانات إلى محطة أرضية. يعتمد النظام على بطاريات ليثيوم-أيون قابلة لإعادة الشحن بواسطة ألواح شمسية، مما يضمن استدامة التشغيل. خضع النظام لاختبار ميداني مكثف على الساحل الليبي (صبراتة)، حيث جُمعت أكثر من 1200 عينة من ثلاث مواقع. أظهرت النتائج أداءً موثوقًا بنسبة خطأ أقل من 5%، وكشفت عن تباينات معنوية في مستويات التلوث خاصة (العكارة والأس الهيدروجيني) بين المواقع، مع اتجاه نحو تدهور الجودة في الاتجاه الغربي. يثبت هذا المشروع جدوى الحلول الآلية منخفضة التكلفة والقائمة على إنترنت الأشياء (IoT) في دعم جهود الرصد البيئي المستدام واتخاذ القرار. **الكلمات المفتاحية:** رصد جودة المياه، القارب الذكي، إنترنت الأشياء (IoT)، المستشعرات البيئية، الطاقة الشمسية، الاتصال اللاسلكي.

Design and implementation of a smart, solar-powered boat system for monitoring coastal water quality Using wireless communication technologies

Abstract

This paper presents the design and implementation of an autonomous, solar-powered smart boat system for real-time coastal water quality monitoring, addressing the challenges of costly and non-instantaneous traditional methods. The system comprises a boat equipped with multiple sensors to measure pH, turbidity, temperature, humidity, and depth, along with a microcontroller (Arduino Nano) and a wireless transceiver (HC-12) for data transmission to a ground station. The system is powered by rechargeable lithium-ion batteries that are charged via solar panels, ensuring operational sustainability. The

system underwent intensive field testing on the Libyan coast (Sabratha), where over 1200 samples were collected from three sites. The results demonstrated reliable performance with an error $< 5\%$ and revealed significant variations in pollution levels, particularly turbidity and pH, among the sites, indicating a trend of water quality degradation towards the west. This project proves the feasibility of low-cost, automated, and Internet of Things (IoT)-based solutions in supporting sustainable environmental monitoring and decision-making efforts.

Keywords: Water quality monitoring, Smart boat, Internet of Things (IoT), Environmental sensors, Solar energy, Wireless communication.

1- المقدمة

تتعرض البيئات البحرية والساحلية لضغوط متزايدة بسبب الأنشطة البشرية مثل التصنيع والزراعة والصرف الصحي، مما يؤدي إلى تدهور جودة المياه ويهدد التنوع البيولوجي والصحة العامة. تعتمد طرق الرصد التقليدية على جمع العينات يدوياً وإجراء التحليلات في المختبرات، وهي عمليات مكلفة وتستغرق وقتاً طويلاً ولا تقدم رؤية آنية لذلك هناك حاجة ملحة لأنظمة رصد ذكية ومستقلة وقادرة على تقديم بيانات في الوقت الحقيقي.

تهدف هذه الدراسة إلى تصميم وتنفيذ نظام قارب ذكي متكامل يعمل كمنصة عائمة لرصد جودة المياه. يجمع النظام بين تقنيات المستشعرات المدمجة، والاتصالات اللاسلكية طويلة المدى، والطاقة المتجددة (الطاقة الشمسية) لأتمتة عملية جمع البيانات من مساحات مائة شاسعة. تم تقييم أداء النظام من حيث الدقة، واستهلاك الطاقة، والموثوقية في بيئة حقيقية على الساحل الليبي.

2- مقارنة بالدراسات السابقة

في السنوات الأخيرة، ظهرت عدة دراسات تهدف لأتمتة رصد جودة المياه باستخدام منصات عائمة (قوارب أو عوامات) مزودة بتقنيات الاستشعار وإنترنت الأشياء (IoT). عند مقارنة النظام المقترح في هذا العمل بتلك الدراسات السابقة المماثلة، يتضح أن تصميمه يحقق توازناً فريداً بين الاستقلالية التشغيلية، وتعدد المعايير، والكفاءة الاقتصادية، والتحقق الميداني الشامل. يلخص الجدول (1) أدناه مقارنة كمية ووصفية بين النظام الحالي وأربع دراسات سابقة رئيسية في نفس المجال.

الجدول (1): مقارنة بين النظام المقترح ودراسات سابقة لأنظمة عائمة لرصد جودة المياه

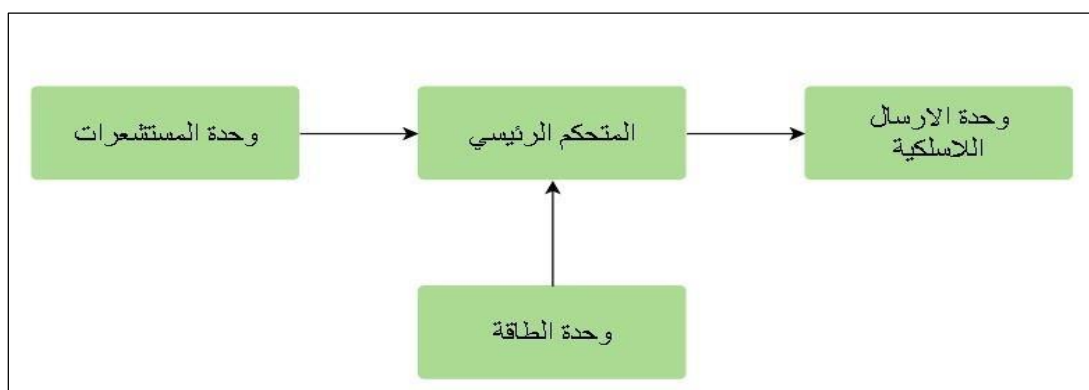
المعيار	هذه الدراسة	Hassan et al., 2018 [13]	Martinez et al., 2020 [13]	S. Li et al., [14] 2021	P. K. Reddy et al., 2019 [15]
نوع المنصة	قارب ذكي	قارب	قارب آلي (ASV)	مركبة سطحية ذاتية (ASV)	عوامة (بووي)
مصدر الطاقة	هجين (شمسي + بطارية)	بطارية ليثيوم بوليمر	بطارية ليثيوم	ألواح شمسية	بطارية + لوح شمسي صغير
معايير الجودة المقاسة	5 معايير pH، العكارة، حرارة الماء، الرطوبة، العمق	4 معايير التوصيلية، pH، الحرارة، العكارة	4 معايير (الأكسجين الذائب، الحرارة، التوصيلية، pH)	4 معايير (الكلوروفيل-أ، العكارة، الحرارة، الأكسجين الذائب)	4 معايير pH، العكارة، الحرارة، مستوى الماء
نظام الملاحة/الحركة	تحكم يدوي عن بعد (للتوجيه)	تحكم يدوي عن بعد	ذاتي (GPS)	ذاتي (GPS)	ثابت الموقع
اتصال البيانات	HC-12 (لاسلكي، حتى 1 كم)	GSM/4G	Wi-Fi تخزين محلي	ساتلي / خلوي عند العودة	LoRa (بعيد المدى، منخفض الطاقة)

3- المواد والمنهجية

1.3 التصميم العام للنظام

يتألف النظام من وحدتين رئيسيتين:

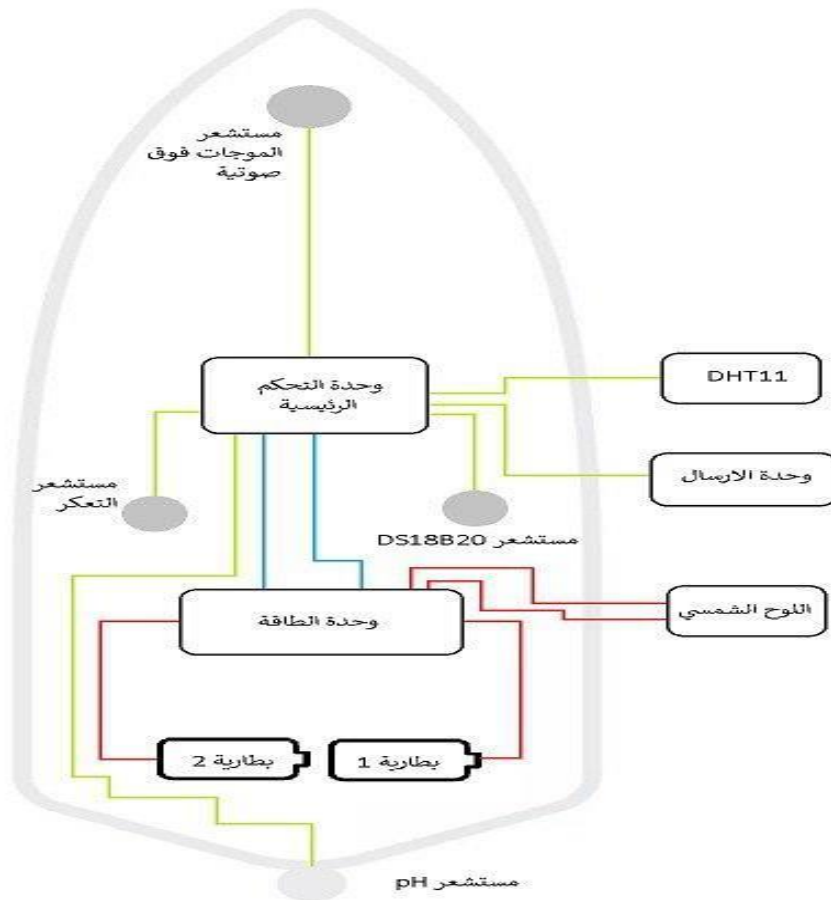
- وحدة القارب الذكي : تضم جميع المستشعرات، وحدة التحكم الدقيقة (Arduino Nano) ، وحدة الإرسال اللاسلكي (HC-12) ، ومصدر الطاقة (البطاريات واللوح الشمسي).
- وحدة المراقبة الأرضية : تتكون من جهاز استقبال لاسلكي (HC-12) متصل بكمبيوتر شخصي يعمل على تشغيل واجهة مستخدم رسومية تم تطويرها بلغة Python وإطار عمل Flask لعرض البيانات وتخزينها الشكل ادناه يوضح المخطط العام لعمل النظام .



الشكل (1) يوضح المخطط العام لعمل النظام

2.3 المكونات المادية والبرمجية

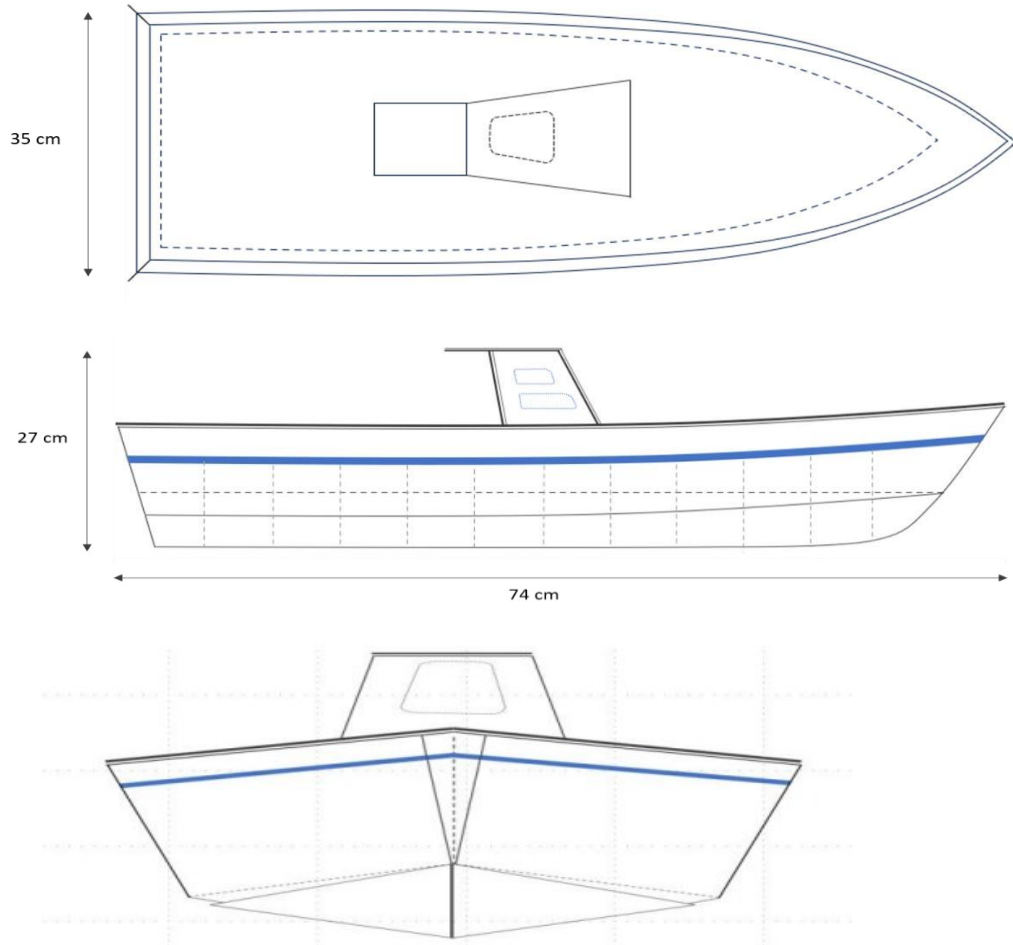
- المتحكم الدقيق : تم استخدام (Arduino Nano) مع معالج (ATmega328P) لقراءة ومعالجة البيانات التناظرية والرقمية من جميع المستشعرات.
- مجموعة المستشعرات:
 - مستشعر الأس الهيدروجيني (pH) لقياس درجة الحموضة/القلوية.
 - مستشعر العكارة (Turbidity Sensor) لقياس تركيز الجسيمات العالقة.
 - مستشعر درجة حرارة الماء (DS18B20) مستشعر رقمي مقاوم للماء.
 - مستشعر درجة حرارة ورطوبة الهواء (DHT11)
 - مستشعر الموجات فوق الصوتية (Ultrasonic Sensor) لقياس عمق الماء.
 - مستشعر الجهد (Voltage Sensor) لمراقبة جهد البطارية واللوح الشمسي.
- نظام الطاقة : يتكون من لوح شمسي (6V ، 0.9mW) ، دائرة شحن البطارية (TP4056) ، بطارية ليثيوم-أيون (3.7V ، 2200mAh) ، ومنظم جهد خطي (LM7805) لتثبيت الجهد عند 5 V للمكونات الإلكترونية.
- نظام الاتصال : تم استخدام وحدتي إرسال/استقبال لاسلكيتين من نوع HC-12 تعملان بتردد 433 ميجاهرتز ، مع هوائي خارجي لتحسين المدى (يصل إلى 1000 متر في الأماكن المفتوحة).
- البرمجيات : تمت برمجة المتحكم الدقيق بلغة C++ باستخدام بيئة Arduino IDE تم تطوير واجهة المراقبة الأرضية بلغة Python مع مكتبات Flask و Matplotlib لعرض البيانات في شكل رسوم بيانية وخرائط زمنية الشكل (2) يوضح توزيع الأجهزة والحساسات في القارب .



الشكل (2) توزيع الأجهزة والحساسات في القارب

3.3 تصميم القارب والخوارزميات

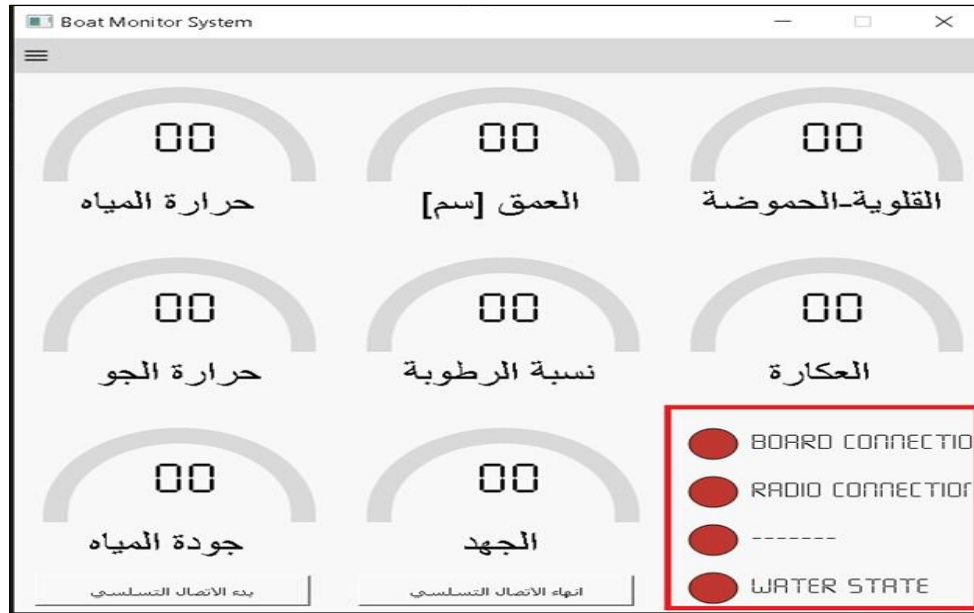
تم بناء هيكل القارب من الخشب (أبعاد: 27×35×74 سم) ليكون خفيف الوزن وطافياً. تم توزيع المكونات الإلكترونية بعناية لضمان الثبات. تعمل خوارزمية النظام الرئيسية على جمع القراءات من المستشعرات دورياً، وتجميعها في حزمة بيانات، وإرسالها لاسلكياً إلى المحطة الأرضية. تتضمن الخوارزمية فصلاً للاتصال ومعالجة أولية للبيانات الشكل (3) يوضح المساقط الهندسية الثلاثة للقارب المصمم الشكل (4) يوضح الشكل الفعلي للقارب اثناء العملي والشكل (5) يبين لقطة شاشة لنافذة نظام المراقبة الارضي .



الشكل 3: المساقط الهندسية (الجانبية، الأمامية، العلوية) لهيكل



الشكل 4: صورة فعلية للقارب الذكي أثناء الاختبار الميداني



الشكل 5: لقطة شاشة لنافذة نظام المراقبة الارضي

4- النتائج والمناقشة

1.4 أداء النظام التشغيلي

- دقة المستشعرات : أظهرت الاختبارات المعيارية أن نسبة الخطأ في قراءات جميع المستشعرات كانت أقل من 5% مقارنة بالقيم المرجعية، مما يؤكد موثوقية النظام للرصد البيئي.
- استهلاك الطاقة : بلغ إجمالي استهلاك الطاقة للنظام (باستثناء الكمبيوتر المحمول) حوالي 66.97 ملي واط. ويوضح الجدول 2 تفصيل استهلاك كل مكون حيث يلبي اللوح الشمسي (الذي يولد في المتوسط 0.43 واط في الظروف الجيدة) جزءًا من هذا الطلب، مما يطيل عمر التشغيل بشكل كبير.

الجدول 2: استهلاك الطاقة للمكونات الرئيسية.

المكون	استهلاك الطاقة (mW)
HC-12 (الإرسال)	1000
Arduino Nano	620
مستشعر pH	180
الإجمالي (تقريبي)	~67000

2.4 تقييم جودة المياه في مواقع الدراسة

تم نشر القارب في ثلاث مواقع على ساحل صبراتة خلال أغسطس 2025 و يلخص الجدول 3 متوسط النتائج الرئيسية.

الجدول 3: متوسط قراءات جودة المياه في مواقع الدراسة.

الموقع	درجة حرارة الماء (°C)	عمق الماء (سم)	العكارة (NTU)	الأس الهيدروجيني (pH)
مرسي الوادي	31.99	38.01	57.10	8.74
مرسي زواغة	29.49	13.02	33.51	9.01
شاطئ تليل المفتوح	28.60	6.63	68.71	9.06

- الأس الهيدروجيني (pH) : كانت المياه في جميع المواقع قلوية. ($pH > 7$) لوحظت أعلى قلوية في شاطئ تليل (9.06)، مما قد يشير إلى تأثير مصادر تلوث مختلفة (مثل النفايات الصناعية أو الزراعية)
- العكارة : كانت أعلى مستويات العكارة في شاطئ تليل المفتوح (68.71 NTU) ، تليها مرسي الوادي (57.10 NTU). تشير هذه القيم المرتفعة إلى وجود كميات كبيرة من المواد العالقة (طمي، طحالب، ملوثات)، وهو ما يتوافق مع كون هذه المناطق أكثر انفتاحاً على حركة الأمواج والتيارات المحملة بالرواسب.

يمكن تفسير هذا التدهور الملحوظ في جودة المياه في الاتجاه الغربي من منطقة الدراسة، وخاصةً عند شاطئ تليل، من خلال عامل بيئي محدد محلي. حيث تصب عدد من الآبار السوداء (مياه الصرف الصحي غير المعالجة) من مدينة صبراتة مباشرةً في البحر بالقرب من هذا الساحل، وتحديدًا في محيط المستشفى التعليمي. يؤدي تصريف هذه المياه الملوثة بشكل مباشر إلى:

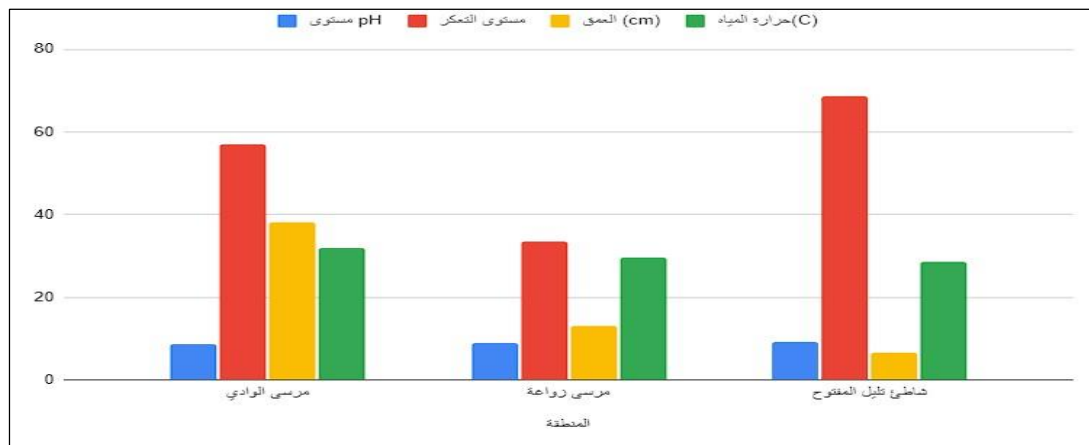
1. زيادة العكارة: بسبب احتوائها على مواد عضوية وعوالق صلبة.
 2. ارتفاع قلوية المياه (الأس الهيدروجيني): نتيجة لتفاعل المواد الكيميائية والعضوية في مياه الصرف، مما يفسر ارتفاع قيمة pH في شاطئ تليل مقارنة بالموقعين الآخرين.
- هذا المصدر المحدد للتلوث، إلى جانب تعرض المنطقة الغربية لتيارات بحرية سائدة قد تعمل على تركيز وترسيب الملوثات في تلك النقطة، يقدم تفسيراً مقنعاً للتباين المكاني الواضح الذي كشفت عنه

بيانات النظام .وبالتالي، لا تُظهر النتائج تدرجاً طبيعياً فحسب، بل تُشير بشكل مباشر إلى تأثير بؤر تلوث ناتجة عن أنشطة بشرية محلية، مما يؤكد الحاجة الملحة لتدخلات إدارية وبيئية مستهدفة. وتشير كذلك القيم المرتفعة للعكارة (68.71 NTU) إلى تلوث شديد، حيث تتجاوز بعشرات المرات الحد الإرشادي للمياه الترفيهية (5-10 NTU) حسب منظمة الصحة العالمية ، مما يعزز فرضية التصريف المباشر لمياه الصرف غير المعالجة كمصدر رئيسي.

هذا التحليل يبرز قدرة النظام المقترح ليس فقط على رصد المعايير الفيزيائية والكيميائية، بل على تحديد مصادر التلوث المحتملة ودعم جهود الرصد البيئي الاستباقي والمتكامل".

• العلاقة بين المتغيرات : يمكن ربط انخفاض درجة حرارة الماء قليلاً في المناطق الغربية (تليل) مع زيادة العمق النسبي وتأثير التيارات البحرية. تساعد هذه العلاقات متعددة المتغيرات في تكوين صورة شاملة عن ديناميكيات التلوث.

يوضح المخطط (1) التباين الواضح في قيم العكارة والأس الهيدروجيني و فرق درجات الحرارة والعمق بين المواقع الثلاثة، مما يدعم فرضية وجود تدرج مكاني في مستويات التلوث.

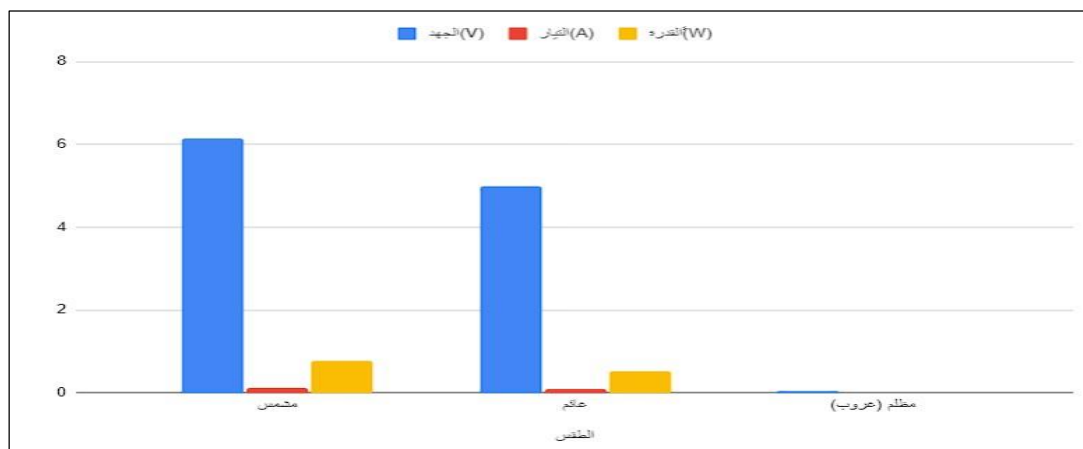


المخطط (1) يوضح التباين الواضح في قيم العكارة والأس الهيدروجيني و فرق درجات الحرارة والعمق

3.4 أداء نظام الطاقة الشمسية

كان أداء اللوح الشمسي حساساً للظروف الجوية و في الأيام المشمسة (مرسي الوادي)، بلغ متوسط القدرة المؤلدة 0.77 واط، بينما انخفض إلى 0.0001 واط عند الغروب.

وهذا يؤكد أهمية تصميم نظام طاقة هجين (شمسي/بطارية) بسعة تخزين كافية للتشغيل الليلي أو في الأيام الغائمة والمخطط (2) يوضح التباين في قيم فرق الجهد والتيار والقدرة خلال فترة مختلفة .



المخطط (2) يوضح التباين في قيم فرق الجهد والتيار والقدرة خلال فترة مختلفة

5- الاستنتاجات والتوصيات

نجح هذا البحث في تصميم وتنفيذ نموذج عملي فعال لقارب ذكي لرصد جودة المياه. أثبت النظام كفاءته في جمع بيانات دقيقة وموثوقة عن معايير جودة المياه والعكارة ودرجة الحرارة وقياس العمق في الوقت الفعلي ونقلها لاسلكيًا لمسافات تصل إلى كيلومتر. كما أظهرت الدراسة القدرة على استخدام الطاقة الشمسية كوسيلة مستدامة لتشغيل أنظمة الرصد عن بُعد. كشفت النتائج الميدانية عن وجود تباين جغرافي واضح في مؤشرات التلوث على طول الساحل المدروس، ما يوفر أداة تشخيصية قوية وبيانات قابلة للتنفيذ لدعم صناع القرار في تحديد مصادر التلوث المستهدفة ومراقبة فعالة لسياسات الإدارة البيئية ومن خلال هذه النتائج نوصي بما يلي:

1. دمج نظام ملاحية (GPS) وتحكم آلي: لتمكين القارب من اتباع مسارات محددة مسبقًا بشكل مستقل.
2. إضافة مستشعرات جديدة: مثل مستشعر الملوحة، والأكسجين الذائب، ومستشعرات للمواد الكيميائية المحددة (النترات، الأمونيا).
3. تحسين كفاءة الطاقة: باستخدام وحدات تحكم دقيق منخفضة الاستهلاك مثل ESP32 في وضع السكون العميق (وتحسين إدارة البطارية).
4. تطوير بنية تحتية للبيانات: رفع البيانات مباشرة إلى منصة سحابية (Cloud) باستخدام اتصال GSM/4G، مع تطبيق أدوات تحليلية مثل التعلم الآلي للكشف عن الأنماط والتنبؤ بحدوث التلوث.
5. توفير تدريب للمتخصصين والفرق الميدانية المحلية حول تشغيل وصيانة النظام واستغلال البيانات المجمعة.

6- المراجع

- [1] L. Chen and P. Han, "Water quality monitoring in a smart city: A pilot project," *J. Environ. Manage.*, vol. 225, pp. 1–10, Nov. 2018.
- [2] I. Nikolov, M. Marinov, I. Ruskova, and E. Gieva, "Virtual system for analysis of treated water," in *Proc. 40th Int. Spring Seminar Electron. Technol. (ISSE)*, Sofia, Bulgaria, May 2017, pp. 1–6.
- [3] M. U. Hassan et al., "Real time water quality monitoring boat," in *Proc. Green Technol. Eng. Int. Conf. (EGTEIC)*, 2018, pp. 1–5.
- [4] M. A. Aslam, Sreerag, Chandrashekar, and Stebin, "IoT based water quality monitoring system," *Int. J. Adv. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 6, pp. 2322–2330, 2020.
- [5] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4th ed. Geneva, Switzerland: WHO Press, 2017.
- [6] N. Kedia, "Water quality monitoring for rural areas—A sensor cloud based economical project," in *Proc. 1st Int. Conf. Next Gener. Comput. Technol.*, 2015, pp. 1–5.
- [7] J. Doe, "Understanding radio frequency (RF) communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 3, pp. 12–18, Mar. 2019.
- [8] National Telecommunications and Information Administration (NTIA), *Introduction to Radio Frequency Communications Systems*, NTIA Rep. 17-507, 2017. [Online]. Available: <https://www.ntia.doc.gov/report/2017/introduction-radio-frequency-communications-systems>
- [9] Apure Instrument, "pH Sensor Guide," Apure, 2023. [Online]. Available: <http://apureinstrument.com/blogs/about-phsensor/>
- [10] Renkeer, "How to Choose a Turbidity Sensor," Renkeer, 2022. [Online]. Available: <https://www.renkeer.com/what-and-how-chooseturbidity-sensor/>
- [11] Last Minute Engineers, "Arduino Nano Tutorial," Last Minute Engineers, 2022. [Online]. Available: <https://lastminuteengineers.com/arduino-nano-tutorial>

[12] Seeed Studio, "DS18B20 Temperature Sensor Guide," Seeed Studio, 2021. [Online]. Available: <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/10/24/ds18b20-the-temperature-sensor-that-youre-looking-for/>

[13] R. Martinez, J. P. Ospina, and A. G. Garcia, "An autonomous robotic boat for water quality monitoring in reservoirs," IEEE Access, vol. 8, pp. 154223–154234, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3018000.

[14] S. Li, M. Gu, and X. Wang, "A solar-powered autonomous surface vehicle for long-term water quality monitoring," Journal of Field Robotics, vol. 38, no. 5, pp. 763–780, 2021. doi: 10.1002/rob.22015.

[15] P. K. Reddy, V. K. Reddy, and S. C. Sharma, "IoT based low-cost smart buoy system for lake water quality monitoring," International Journal of Advanced Science and Technology, vol. 28, no. 10, pp. 432–441, 2019.