مجلة علوم البحار والتقنيات البيئية
المجلد (10)، العدد (2) (ديسمبر-2024)

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

DOI: https://doi.org/10.59743/jmset.v10i2.215

إطار عمل للأنظمة الجيومكانية الذكية: دمج شبكات المستشعرات اللاسلكية ونظم المعلومات الجغرافية عبر الويب –للمراقبة الآنية– دراسة حالة الشركة الليبية للحديد والصلب

عبد العظيم سالم معيتيق[1، *] و عبد الله ابورويص[2]

[1] قسم الجغرافيا ونظم المعلومات الجغرافية، كلية الآداب، جامعة مصراتة، مصراتة، ليبيا.

[2] قسم الشبكات، شركة المدار الجديد، الشركة القابضة للاتصالات، مصراتة، ليبيا.

*البريد الإلكتروني: abduladim.maitieg@art.misuratau.edu.ly

A Framework for Smart Geospatial Systems: Integrating Wireless Sensor Networks and Web GIS for Real -Time Monitoring – LISCO (Libyan Iron & Steel Company) Case Study

Abduladim Salem Maitieg[1, *] and Abdallah Aburuwis[2]

[1] Department of Geography and Geographic Information Systems, Faculty of Arts, Misurata University, Misurata, Libya.

[2] Networks Department, Al-Madar Al-Jaded Company, Libyan Post Telecommunications & Information Technology Company (LPTIC), Misurata, Libya.

Received: 15 August 2024; Revised: 07 October 2024; Accepted: 22 October 2024.

الملخص

تمثل نظم المعلومات الجغرافية عبر الويب أحد أهم الأدوات الحديثة في إدارة البيانات البيئية وتحليلها مكانيًا وزمانيًا، خاصة عند تكاملها مع شبكات المستشعرات اللاسلكية ضمن بيئات صناعية معقدة. تهدف هذه الدراسة إلى تطوير وتنفيذ إطار عمل للأنظمة الجيومكانية الذكية يرتكز على نظم المعلومات الجغرافية عبر الويب بوصفها منصة مركزية لدمج البيانات البيئية الحية وتحليلها، مع توظيف شبكات المستشعرات اللاسلكية كمصدر ميداني للرصد المستمر، وذلك بالتطبيق على الشركة الليبية للحديد والصلب بمدينة مصراتة. اعتمدت الدراسة على تصميم منهجية تكاملية شملت تحليل البيئة التشغيلية لمنطقة الدراسة، وتحديد متطلبات الرصد، وتصميم معمارية متعددة الطبقات تضم طبقة الاستشعار، وطبقة الاتصال، وطبقة البيانات الجغرافية والزمنية، وطبقة المعالجة والتحليل، وطبقة العرض والتفاعل. كما جرى توظيف بنية سحابية لربط البيانات المرسلة من عقد الاستشعار بمنصة Web GIS، بما يتيح التمثيل الخرائطي التفاعلي، وتتبع السلاسل الزمنية، وإظهار المؤشرات البيئية، ودعم التنبيه المبكر. أظهرت نتائج الدراسة أن النظام المنفذ أتاح تمثيلًا أكثر دقة واستمرارية للواقع البيئي داخل المنشأة مقارنة بأساليب الرصد التقليدية، وكشف عن وجود تباين مكاني وزماني واضح في توزيع الملوثات بين مواقع الرصد المختلفة، بما يرتبط بطبيعة الوحدات التشغيلية ومصادر الانبعاث والظروف البيئية المحلية. كما بينت الدراسة أن دمج Web GIS مع شبكات المستشعرات اللاسلكية يسهم في تعزيز الوعي الظرفي، وتحسين تفسير الأنماط البيئية، ودعم القرار البيئي والتشغيلي داخل الصناعات الثقيلة. وتكمن أهمية الدراسة في كونها تقدم نموذجًا تطبيقيًا محليًا قابلًا للتطوير والتكرار في البيئات الصناعية الليبية، وتسهم في دعم التحول نحو الرصد البيئي الذكي والاستدامة الصناعية.

الكلمات الدالة: الأنظمة الجيومكانية الذكية، شبكات المستشعرات اللاسلكية، نظم المعلومات الجغرافية عبر الويب، المراقبة البيئية الآنية، جودة الهواء، الشركة الليبية للحديد والصلب.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

Abstract

The integration of Wireless Sensor Networks (WSNs) and Web-based Geographic Information Systems (Web GIS) offers a powerful foundation for smart geospatial systems capable of real-time monitoring and decision-making in industrial environments. This paper presents a comprehensive framework that combines WSNs with Web GIS to enable continuous environmental and infrastructure monitoring, with a focus on the Libyan Iron & Steel Company (LISCO) as a case study. The system collects real-time data from sensors deployed across critical locations within the plant premises, including air quality, temperature, humidity, and structural vibrations. This data is integrated into a web-based GIS platform, enabling visual analytics, alerting mechanisms, and predictive maintenance capabilities. The proposed framework demonstrates how sensor-GIS integration enhances situational awareness, improves safety, and supports sustainable operations in heavy industries.

Keywords: *Smart Geospatial Systems, Wireless Sensor Networks, Web GIS, Real-Time Monitoring, Industrial IoT, Predictive Maintenance, Libyan Iron & Steel Company.*

1. المقدمة

تواجه المنشآت الصناعية الثقيلة تحديات متزايدة في الرصد البيئي بسبب تعدد مصادر الانبعاثات، وتنوع الوحدات التشغيلية، وارتفاع متطلبات الامتثال البيئي والصحة المهنية. ويظهر هذا التحدي بوضوح في صناعة الحديد والصلب، حيث تتداخل العمليات الحرارية، ومناولة المواد، والتشغيل الميكانيكي، مع تأثيرات التهوية والعوامل المناخية، مما يؤدي إلى تباينات مكانية وزمانية معقدة في الأحمال البيئية. وفي مثل هذه البيئات، لم تعد القياسات اليدوية أو الدورية كافية لتقديم صورة متكاملة وآنية عن الواقع البيئي داخل المنشأة (معيتيق وآخرون، 2022؛ عكاشة وآخرون، 2015).

في المقابل، وفرت شبكات المستشعرات اللاسلكية بنية مناسبة للرصد المستمر في البيئات الديناميكية، بفضل مرونتها المكانية، وقابليتها للتوسع، وقدرتها على جمع بيانات متعددة المعلمات في الزمن الحقيقي (Hart & Martinez, 2006; Akyildiz *et al.*, 2002). كما تطورت نظم المعلومات الجغرافية عبر الويب من أدوات عرض إلى منصات تشغيلية قادرة على دمج البيانات المكانية والزمانية وتحليلها ونشرها عبر واجهات تفاعلية. وعند دمج Web GIS مع WSNs يصبح بالإمكان تحويل القياسات البيئية الحقلية إلى معلومات مكانية حية تدعم المتابعة والتحليل والقرار (Sari, 2020; Voutos *et al.*, 2017; Botts *et al.*, 2006).

وبالتوازي مع ذلك، تطورت نظم المعلومات الجغرافية عبر الويب من كونها أدوات لعرض الخرائط والبيانات المكانية إلى منصات تشغيلية قادرة على دمج البيانات متعددة المصادر، وتحليلها زمانيًا ومكانيًا، وإتاحتها للمستخدمين عبر واجهات تفاعلية تدعم الاستعلام والتحديث والمتابعة المستمرة. وقد ساعدت المعايير المفتوحة، ولا سيما تلك التي طورتها مبادرة Sensor Web Enablement التابعة للاتحاد الجغرافي المفتوح، على تعزيز قابلية التشغيل البيني بين المستشعرات وقواعد البيانات الجغرافية وخدمات الويب، مما أتاح بناء بيئات متكاملة للرصد البيئي تعتمد على الربط بين الحدث البيئي وموقعه الجغرافي وزمن حدوثه ضمن بنية موحدة (Voutos *et al.*, 2017; Brovelli *et al.*, 2011; Botts *et al.*, 2006; Delin *et al.*, 2005).

ومن هذا المنطلق، أصبح التكامل بين Web GIS وWireless Sensor Networks أحد الاتجاهات الحديثة في تطوير الأنظمة الجيومكانية الذكية، حيث تسمح هذه المقاربة بتحويل القياسات البيئية الحقلية من مجرد سجلات رقمية متناثرة إلى معلومات مكانية حية قابلة للتفسير والتحليل والاستجابة (Zhao *et al.*, 2020). وقد أظهرت عدد من الدراسات التطبيقية أن هذا التكامل يتيح تطوير منصات قادرة على تمثيل بيانات جودة الهواء والمياه والملوثات المختلفة في الزمن الحقيقي، باستخدام

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

خرائط تفاعلية، ورسوم بيانية زمنية، وآليات تنبيه ودعم القرار (Sari, 2020; Voutos *et al*., 2017; Triantafyllou *et al*., 2006). وعلى الرغم من هذا التقدم الدولي، فإن تطبيقات هذا النوع من الأنظمة ما تزال محدودة في السياق الليبي، ولا سيما في البيئات الصناعية الثقيلة. فالدراسات المحلية المتاحة تناولت دور نظم المعلومات الجغرافية في مراقبة التلوث داخل الشركة الليبية للحديد والصلب. كما تناولت بعض الدراسات الأخرى الانبعاثات الغازية والجسيمية (Gkatzoflias *et al*. (2013 وتأثيرها في مدينة مصراتة، إلا أن الأدبيات المحلية لم تطور حتى الآن إطارًا تشغيليًا متكاملًا يربط بين الرصد البيئي الآني و Web GIS وWSNs ضمن نموذج تطبيقي موجه لدعم القرار داخل منشأة صناعية كبرى (معيتيق وآخرون، 2022؛ Sari, 2020؛ عكاشة وآخرون، 2015).

تكمن أهمية هذه الدراسة في أنها تسعى إلى معالجة هذه الفجوة من خلال تطوير إطار عمل للأنظمة الجيومكانية الذكية يجعل من نظم المعلومات الجغرافية عبر الويب المنصة المركزية لإدارة وتحليل البيانات البيئية الحية، مع توظيف شبكات المستشعرات اللاسلكية بوصفها البنية الميدانية للرصد المستمر. وتطبق الدراسة هذا الإطار على الشركة الليبية للحديد والصلب بمدينة مصراتة، بهدف دعم المراقبة البيئية الآنية، وتحليل الأنماط المكانية والزمانية للملوثات، وتعزيز القرار البيئي والتشغيلي داخل بيئة صناعية ثقيلة. وبناءً على ذلك، تهدف الدراسة إلى:

- تطوير إطار عمل متكامل للرصد البيئي الآني يعتمد على Web GIS و WSNsضمن سياق صناعي ثقيل.
- تصميم معمارية نظام جيومكاني ذكي تدعم جمع البيانات البيئية ونقلها وتخزينها وتحليلها وعرضها.
- اختبار قدرة هذا الإطار على تمثيل التباين المكاني والزماني للملوثات داخل الشركة الليبية للحديد والصلب.
- تقييم دور النظام المقترح في دعم التنبيه المبكر وتحسين الوعي البيئي والتشغيلي داخل المنشأة.
- تقديم نموذج تطبيقي يمكن الاستفادة منه وتطويره في البيئات الصناعية الليبية المماثلة.

وتعد الشركة الليبية للحديد والصلب من أهم المنشآت الصناعية الثقيلة في ليبيا، وتتميز باتساع نطاقها المكاني وتعدد وحداتها التشغيلية، مثل الاختزال والصهر والدرفلة ومناولة المواد ومحطات التوليد. وينعكس هذا التنوع على شكل انبعاثات متعددة تشمل الجسيمات العالقة والملوثات الغازية والحرارة والآثار الفيزيائية المرتبطة بالعمليات الصناعية. وقد أظهرت الدراسات المحلية أن الشركة تمثل بيئة ملائمة لتطبيق أدوات الرصد والتحليل الجيومكاني(معيتيق وآخرون، 2022؛ Imhamed *et al*., 2024). لكن الرصد البيئي داخل الشركة ظل لفترة طويلة يعتمد على أدوات تقليدية مثل التفتيش اليدوي، وأجهزة الرصد المحمولة، وأخذ العينات الدورية، والتقارير المنفصلة بين الإدارات. ونتج عن ذلك ضعف في استمرارية البيانات، وصعوبة في الربط بين القياس والموقع والزمن، وحدود واضحة في دعم القرار الفوري. كما أن الدراسات المحلية بينت أن انتشار الملوثات يتأثر ليس فقط بمصادر الانبعاث، بل أيضًا باتجاهات الرياح وظروف التهوية، وهو ما يعني أن فهم الظاهرة البيئية يتطلب بيئة رصد تربط القياس بالسياق المكاني والزمني (عكاشة وآخرون، 2015).

لذلك تتمثل المشكلة البحثية في غياب نظام متكامل يجعل من Web GIS منصة مركزية لإدارة البيانات البيئية، ويربطها مباشرة بشبكة مستشعرات موزعة داخل المنشأة، بما يتيح الرصد المستمر، والتحليل الزماني–المكاني، والتنبيه المبكر، ودعم القرار. وتنبع أهمية معالجة هذه المشكلة من أن الانتقال إلى الرصد الجيومكاني الذكي يمكن أن يحسن تحديد المواقع الحرجة، وتتبع تغير الملوثات، وتعزيز الاستجابة السريعة، ودعم التخطيط البيئي طويل الأمد.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

1.1. الدراسات السابقة

شهدت الأدبيات المحلية المتعلقة بالبيئة الصناعية في ليبيا اهتمامًا متزايدًا بقضايا التلوث والرصد البيئي، إلا أن هذا الاهتمام ظل في معظمه موزعًا بين دراسات تركز على توصيف واقع التلوث ودراسات تطبيقية محدودة في توظيف نظم المعلومات الجغرافية، دون أن تصل إلى بناء نظام تشغيلي متكامل للرصد البيئي الآني داخل المنشآت الصناعية الثقيلة.

على المستوى المحلي، أوضحت دراسة معيتيق وآخرون (2022) دور نظم المعلومات الجغرافية في حماية البيئة ومراقبة التلوث داخل الشركة الليبية للحديد والصلب، وأكدت قيمة GIS في تتبع مصادر التلوث وتحسين التحليل البيئي. كما تناولت دراسة عكاشة وآخرون (2015) الانبعاثات الغازية والجسيمية لمجمع الحديد والصلب بمصراتة وعلاقتها بالظروف المناخية. أما دراسة Imhamed *et al.* (2024) فقد ركزت على تلوث الهواء الداخلي بالغازات داخل الشركة، وقدمت معطيات تطبيقية مهمة حول البيئة الداخلية وجهود تطوير مركز للرصد البيئي. كذلك ناقشت دراسة العيساوي وحبريشة (2015) أثر نوع الوقود في بعض الانبعاثات البيئية المرتبطة بمحطة التوليد. مجتمعةً، تؤكد هذه الدراسات أهمية الرصد البيئي داخل الشركة، لكنها لا تقدم نموذجًا تشغيليًا آنيًا قائمًا على التكامل بين Web GIS وWSNs.

دوليًا، تعد دراسة Akyildiz *et al.* (2002) من الأعمال التأسيسية في مجال شبكات المستشعرات اللاسلكية، بينما أوضحت دراسات Delin *et al.* (2005) و Hart and Martinez (2006) قيمة شبكات الاستشعار البيئي في الرصد المستمر للظواهر البيئية. وفي مجال التكامل مع الويب، وفرت مبادرة OGC Sensor Web Enablement إطارًا معياريًا لربط المستشعرات بالبيانات المكانية وخدمات الويب (Walter, 2010; Botts *et al.*, 2006). كما أظهرت دراسات مثل Voutos *et al.* (2017) و Brovelli *et al.* (2011) أن دمج شبكات الاستشعار داخل منصات Web GIS يتيح بيئة أكثر فاعلية للرصد والتحليل. أما دراسات Elbir (2004) وElbir *et al.* (2010) وSari (2020) فقد أكدت أن GIS وWeb GIS يمكن أن يتجاوزا دور العرض إلى التحليل والإدارة ودعم القرار في مجال جودة الهواء.

ومن هنا، تتمثل الفجوة البحثية التي تعالجها هذه الدراسة في غياب نموذج تطبيقي محلي يضع Web GIS في مركز منظومة الرصد، ويقوم بدمجه مع شبكات مستشعرات لاسلكية موزعة مكانيًا من أجل تحقيق المراقبة البيئية الآنية، والتحليل الزماني–المكاني، والتنبيه المبكر، ودعم القرار داخل منشأة صناعية ثقيلة مثل الشركة الليبية للحديد والصلب. وعليه، تسعى الدراسة الحالية إلى سد هذه الفجوة من خلال تقديم إطار عمل عملي وقابل للتطوير، يستجيب لمتطلبات البيئة الصناعية الليبية ويستفيد في الوقت نفسه من الاتجاهات الحديثة في الأنظمة الجيومكانية الذكية.

2.1. منطقة الدراسة

تقع منطقة الدراسة في الشركة الليبية للحديد والصلب (LISCO) بمدينة مصراتة شمال غرب ليبيا، وتُعد من أكبر المنشآت الصناعية الثقيلة في البلاد وأحد أهم مراكز صناعة الحديد والصلب فيها. وتنبع أهمية هذه المنطقة من اتساع نطاقها المكاني، وتعدد وحداتها التشغيلية، وتنوع مصادر الانبعاثات والملوثات البيئية، مما يجعلها بيئة مناسبة لتطبيق أنظمة الرصد البيئي الذكي القائمة على التكامل بين نظم المعلومات الجغرافية عبر الويب وشبكات المستشعرات اللاسلكية (معيتيق وآخرون، 2022؛ Imhamed *et al.*, 2024).

وتقع الشركة ضمن النطاق الصناعي لمدينة مصراتة في موقع ساحلي منبسط نسبيًا، وتتأثر بالعوامل المناخية المحلية، ولا سيما اتجاهات الرياح وسرعتها، وهو ما ينعكس على أنماط انتشار الملوثات داخل المنشأة وفي محيطها الخارجي (الشكل 1). وقد

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

بينت الدراسات المحلية أن هذا البعد المناخي يمثل عاملًا مهمًا في تفسير سلوك الملوثات الغازية والجسيمية، ويعزز الحاجة إلى نظام رصد يربط القياسات البيئية بسياقها المكاني والزمني (عكاشة وآخرون، 2015).

وتضم الشركة عددًا من الوحدات الصناعية الرئيسة المرتبطة بمراحل إنتاج الحديد والصلب، من بينها وحدات الاختزال المباشر، والصهر، والدرفلة، ومحطات التوليد، ومناطق مناولة المواد الخام، ووحدات التخزين، والمرافق المساندة. ويؤدي هذا التنوع إلى تعدد مصادر الانبعاثات واختلاف خصائصها بين المواقع، سواء في صورة جسيمات دقيقة وخشنة، أو ملوثات غازية، أو تأثيرات حرارية، أو تغيرات مرتبطة بظروف التهوية والتشغيل. لذلك لا يظهر التلوث داخل المنشأة بصورة متجانسة، بل يتباين تبعًا لطبيعة النشاط الصناعي وموقعه وشدته (Imhamed *et al*., 2024).

ومن الناحية البيئية، تواجه منطقة الدراسة عدة تحديات، من أبرزها ارتفاع الجسيمات العالقة في بعض البيئات الإنتاجية ومناطق مناولة المواد، وتفاوت تراكيز بعض الغازات بين الوحدات الصناعية، وتأثر إعادة توزيع الملوثات بحركة الهواء والرياح المحلية، فضلًا عن الحاجة إلى رصد مستمر يميز بين المواقع الحرجة والمواقع الأقل تعرضًا. كما أن الدراسات التطبيقية داخل الشركة أظهرت تفاوتًا واضحًا في مستويات بعض الملوثات داخل البيئات الداخلية، وهو ما يؤكد أهمية الرصد الموزع مكانيًا بدل الاعتماد على قياسات عامة أو متقطعة (معيتيق وآخرون، 2022؛ Imhamed *et al*., 2024).

شكل 1. منطقة الدراسة (مصنع الحديد والصلب– مصراتة)

وتزداد أهمية اختيار هذه المنطقة للدراسة في ضوء ما تواجهه من تحديات تشغيلية ومؤسسية، مثل تقادم بعض أنظمة الرصد التقليدية، وتشتت البيانات البيئية بين أكثر من جهة، ومحدودية التكامل بين القياسات والبيانات المكانية، وغياب منصة موحدة للمتابعة الآنية. وعليه، تمثل الشركة الليبية للحديد والصلب حالة تطبيقية مناسبة لاختبار كفاءة الأنظمة الجيومكانية الذكية في البيئات الصناعية الثقيلة، وبيئة واقعية لتقييم قدرة التكامل بين Web GIS و WSNsعلى تطوير الرصد البيئي ودعم القرار داخل المنشآت الصناعية الليبية.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

3.1. الوضع البيئي والرصد البيئي في الشركة الليبية للحديد والصلب

تشير السجلات المناخية والقياسات الميدانية المنفذة داخل الشركة الليبية للحديد والصلب إلى أن الواقع البيئي داخل المنشأة يتأثر بتفاعل مباشر بين العوامل المناخية الخارجية والظروف التشغيلية الداخلية. ففي البيئة الخارجية، تسهم اتجاهات الرياح السائدة، ولا سيما الغربية والشمالية الغربية، في تشتيت الملوثات وإعادة توزيعها، كما تؤثر التغيرات الموسمية في تراكيز بعض الملوثات، خاصة الجسيمات العالقة وأكاسيد النيتروجين، وهو ما يؤكد أن تفسير جودة الهواء في محيط الشركة يرتبط ارتباطًا وثيقًا بالخصائص المناخية المحلية (عكاشة وآخرون، 2015).

أما داخل المنشأة، فتبدو التحديات البيئية أكثر تعقيدًا بسبب كثافة التشغيل، وتعدد الوحدات الصناعية، ومحدودية التهوية في بعض المواقع. وقد أظهرت القياسات أن مستويات الغبار والجسيمات العالقة ترتفع نسبيًا في بعض خطوط الإنتاج ومناطق مناولة المواد، كما تتفاوت بعض الملوثات الغازية بين الوحدات المختلفة تبعًا لطبيعة العمليات الحرارية والاحتراقية وخصائص الهواء الداخلي. ويعني ذلك أن التلوث داخل الشركة لا يظهر بصورة متجانسة، بل يتسم بتباين مكاني وزماني واضح يستلزم رصدًا موزعًا ومتكاملًا (Imhamed *et al.*, 2024).

أما على المستوى المؤسسي، فقد واجهت الإدارة البيئية والرصد البيئي في الشركة تحديات مستمرة ارتبطت بتقادم البنية التحتية، وضعف الأتمتة، وعدم تكامل البيانات داخل منصة موحدة. وقد اعتمد الرصد البيئي لفترات طويلة على التفتيش اليدوي، وأخذ العينات الدورية، والأجهزة المحمولة، والتقارير المنفصلة بين الإدارات، مما حد من استمرارية البيانات وأضعف القدرة على بناء صورة مكانية وزمنية دقيقة عن الواقع البيئي داخل المنشأة. ورغم أن الاعتبارات البيئية حظيت باهتمام منذ مراحل تصميم الشركة، من خلال بعض الاختيارات الفنية والتخطيطية، فإن استمرار مشكلات المعايرة، وضعف التكامل، وتشتت البيانات، يشير إلى أن البنية التقليدية للرصد لم تعد كافية لتلبية متطلبات المتابعة البيئية الحديثة (معيتيق وآخرون، 2022).

كما أظهرت المراجعة الميدانية أن جزءًا مهمًا من أنظمة الرصد القائمة ما يزال يعتمد على القياس الدوري أو أخذ العينات، دون بث متكامل في الزمن الحقيقي أو تنبيه مستمر، في حين أن بعض المعدات الثابتة تعرض للتقادم أو خرج من الخدمة، مما زاد الاعتماد على أجهزة محمولة محدودة التغطية والاستمرارية. وتتمثل أبرز قيود هذا الوضع في محدودية المتابعة الزمنية، وتأثر القراءة بموقع القياس اللحظي، وضعف التغطية المكانية، وغياب التكامل بين السجلات، والاستمرار في الاعتماد على تقارير ورقية أو شبه منفصلة.

وفي ضوء ذلك، تبرز الحاجة إلى تحديث منظومة الرصد البيئي داخل الشركة والانتقال من نموذج يعتمد على القياسات المتقطعة والأجهزة المنفصلة إلى نظام ذكي متكامل قائم على شبكات مستشعرات موزعة ومنصة جغرافية عبر الويب. ولا يمثل هذا التحول مجرد تطوير تقني، بل انتقالًا من الرصد التقليدي إلى الإدارة البيئية المعتمدة على البيانات المكانية الحية، بما يدعم المتابعة المستمرة، وربط التلوث بالموقع والزمن، وتحسين الاستجابة، وبناء أرشيف بيئي رقمي طويل الأمد. وفي هذا السياق، تمثل جهود الشركة في تطوير مركز للرصد البيئي وبناء قاعدة بيانات جغرافية أساسًا مناسبًا لتطبيق الإطار المقترح.

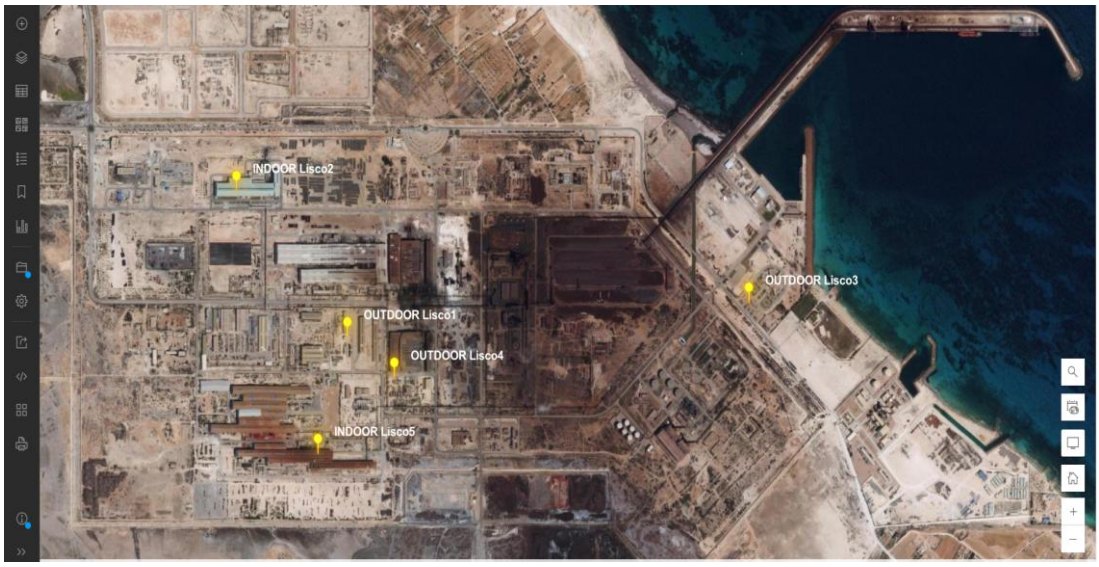
2. المنهجية ومعمارية النظام

اعتمدت هذه الدراسة منهجية تطبيقية متعددة المراحل لتصميم وتنفيذ وتقييم إطار متكامل للرصد البيئي الآني داخل بيئة صناعية ثقيلة، من خلال دمج شبكات المستشعرات اللاسلكية مع نظم المعلومات الجغرافية عبر الويب ضمن بنية تشغيلية موحدة. وشملت هذه المنهجية تصميم معمارية النظام، ونشر المستشعرات، واكتساب البيانات ومعالجتها، والتكامل السحابي، والعرض البصري،

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

والتحقق الميداني. وقد جرى تنفيذ الإطار واختباره في مصنع الشركة الليبية للحديد والصلب بمدينة مصراتة، بوصفه بيئة صناعية واقعية للتطبيق والتقييم.

استندت الدراسة إلى معمارية مكوّنة من خمس طبقات تضمن تدفقًا متكاملًا للبيانات من مرحلة الاستشعار حتى دعم اتخاذ القرار. تمثلت الطبقة الأولى في طبقة الاستشعار، وتضم مستشعرات بيئية منخفضة التكلفة ومتعددة المعلمات من نوع ZPHS01B، جرى توزيعها عبر خمسة مواقع استراتيجية داخل منشأة الشركة. وتقيس كل عقدة استشعار عددًا من المتغيرات البيئية الأساسية، من بينها $PM_{1.0}$ و$PM_{2.5}$ و PM_{10} و CO_2 و NO_2 و O_3 و TVOC و HCHO ودرجة الحرارة والرطوبة النسبية. كما يمكن دعم هذه العقد بوحدات GPS لتحديد الموقع الجغرافي، وبمستشعرات اهتزاز في المواقع القريبة من المعدات الثقيلة لمراقبة بعض الجوانب المرتبطة بالصحة الإنشائية (الشكل 2).



شكل 2. أماكن تركيب محطات الرصد البيئي

أما طبقة الاتصال فتعتمد على ربط عقد الاستشعار بوحدات تحكم دقيقة من نوع NodeMCU v1 (ESP8266)، تتولى إرسال البيانات باستخدام نمطي اتصال بحسب طبيعة الموقع. فقد استُخدم Wi-Fi للمحطات الواقعة ضمن تغطية الشبكة، في حين استُخدم LoRaWAN للإرسال بعيد المدى ومنخفض استهلاك الطاقة في المناطق النائية أو المتأثرة بالضوضاء الكهرومغناطيسية. كما تم الاعتماد على بروتوكول MQTT للمراسلة غير المتزامنة، وواجهات HTTP REST API للتكامل المباشر مع البيئة السحابية.

وفي طبقة البيانات، تُخزَّن بيانات المستشعرات الواردة في قاعدة بيانات PostgreSQL مستضافة سحابيًا مع امتداد PostGIS على Amazon Web Services (AWS)، بما يسمح بتخزين السلاسل الزمنية، وفهرسة القراءات، والاستعلام عن البيانات الجغرافية المرجعية. كما تُنسق البيانات بصيغة GeoJSON وتُزامن مع منصة ArcGIS Online عبر نقاط نهاية REST، الأمر الذي يضمن ربط القياسات البيئية بالموقع والزمن داخل بنية مكانية موحدة.

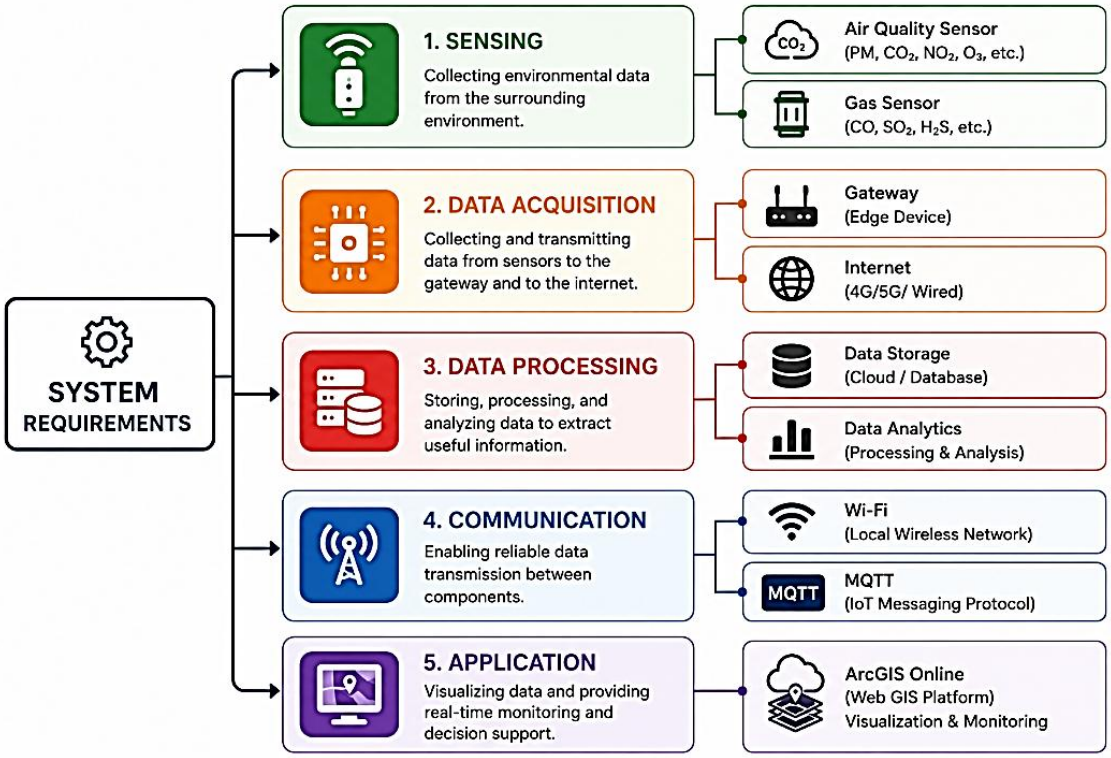
وتتولى طبقة الأعمال والتحليلات معالجة البيانات وتحويلها إلى مخرجات داعمة للفهم والقرار، وتشمل إمكانات مثل كشف الشذوذ باستخدام Random Forest والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، والتنبؤ الزمني باستخدام نماذج

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

ARIMA وLSTM، فضلًا عن التحليل المكاني، مثل Kernel Density وHot Spot Analysis، بالاعتماد على أدوات ArcGIS. وتُفعَّل هذه التحليلات عند تجاوز الحدود المرجعية أو وفق فترات زمنية محددة.

أما طبقة التطبيقات فتمثل واجهة النظام النهائية، وقد جرى بناؤها باستخدام ArcGIS Dashboards، حيث توفر عرضًا آنيًا للبيانات من خلال الخرائط التفاعلية، والمقاييس، والمخططات الزمنية، وأنظمة التنبيه. كما يدعم النظام التحكم في الوصول القائم على الأدوار (RBAC)، بما يضمن وصولًا آمنًا ومنظمًا للمشغلين والمهندسين ومديري البيئة.

هذه البنية متعددة الطبقات مكّنت من بناء مسار تشغيلي متكامل يبدأ من جمع البيانات البيئية في الميدان، ويمر بمعالجتها ونقلها وتخزينها وتحليلها، ثم ينتهي بعرضها داخل بيئة Web GIS تفاعلية تدعم الرصد المستمر وصناعة القرار داخل المنشأة الصناعية (الشكل 3).



شكل 3. معمارية النظام

1.2. البنية السحابية وأمن النظام

يستند إطار الرصد الجيومكاني الذكي المقترح إلى معمارية سحابية صُممت لضمان القابلية للتوسع، والموثوقية، وإمكانية الوصول الآني عبر بيئة صناعية موزعة. ومن خلال مركزية تخزين البيانات، ومعالجتها، وعرضها داخل السحابة، يتيح النظام تكاملًا سلسًا بين شبكات المستشعرات اللاسلكية ومنصات الذكاء الجيومكاني، بما يدعم الرصد البيئي المستمر واتخاذ القرار السريع المعتمد على البيانات داخل الشركة الليبية للحديد والصلب.

ويمثل هذا النهج بديلاً أكثر كفاءة من الاعتماد على الخوادم المحلية، لأنه يحد من أعباء الصيانة، ويزيد من قابلية التوسع، ويقلل من مخاطر نقاط الفشل الأحادية، كما يتيح الوصول عن بُعد للمشغلين، ومديري البيئة، والجهات التنظيمية ذات العلاقة.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

وتدعم هذه البنية استقبال البيانات عالية التواتر من عقد استشعار متعددة، وإجراء التحليلات الآنية، وتفعيل التنبيهات ضمن بيئة آمنة وقابلة للتشغيل البيني.

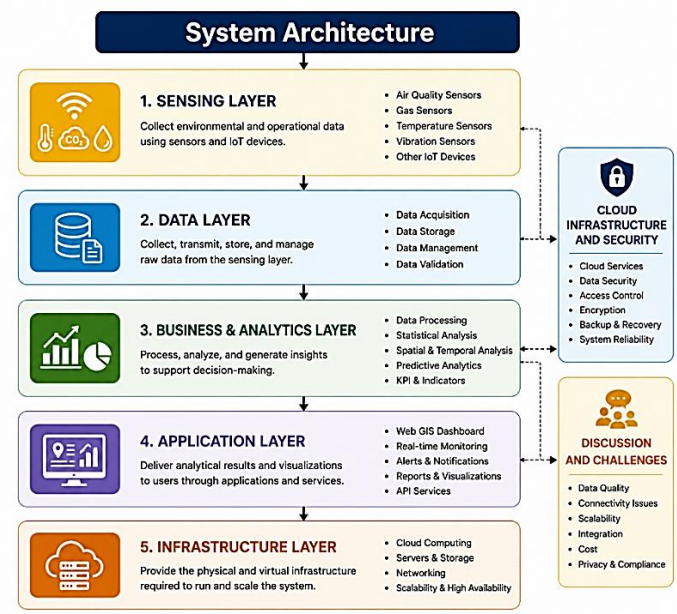
وفي صميم هذه البنية توجد منصة ArcGIS Online، وهي منصة سحابية من نوع البرمجيات كخدمة (SaaS) طورتها شركة Esri، وتؤدي دور البيئة المركزية لـ Web GIS لإدارة البيانات الجغرافية المكانية وتحليلها ومشاركتها. وتُبث بيانات المستشعرات من العقد الميدانية في شبه الزمن الحقيقي، ثم تُدمج داخل طبقة معالم مستضافة (Hosted Feature Layer) تعمل بوصفها قاعدة بيانات مكانية ديناميكية تُحدَّث تلقائيًا مع كل قراءة جديدة.

ويتيح هذا الترتيب السحابي التمثيل الخرائطي الآني للمعلمات البيئية، مثل $PM_{2.5}$ و NO_2 ودرجة الحرارة، كما يدعم الاستعلام المكاني وتحليل التراكب مع الطبقات الثابتة، مثل البنية التحتية للمصنع، ومناطق السلامة، وأنماط الرياح، فضلًا عن التمثيل الزمني من خلال الخرائط ولوحات المعلومات المفعلة زمنيًا. وقد جرى إعداد لوحات معلومات تفاعلية لعرض الخرائط الحرارية الحية، والمخططات الزمنية، ومؤشرات الحالة، بحيث يمكن الوصول إليها عبر متصفحات الويب القياسية والأجهزة المحمولة، وهو ما يضمن قدرة متخذي القرار على متابعة ظروف المصنع عن بُعد، والاستجابة السريعة للحالات غير الطبيعية، وتحليل الاتجاهات التاريخية دون الحاجة إلى برمجيات GIS مكتبية متخصصة.

ومن الناحية الأمنية، يدعم النظام منطق الوصول المنظم إلى البيانات من خلال صلاحيات استخدام مناسبة، بما ينسجم مع طبيعة المستخدمين داخل البيئة الصناعية، ويضمن أن تكون البيانات متاحة بصورة آمنة ومنظمة لدعم الاستخدام التشغيلي والمؤسسي للنظام.

2.2. متطلبات النظام

في نموذج الرصد الذكي لجودة الهواء (الشكل 4)، تُجمع عينة من الهواء المحيط باستخدام وحدة الاستشعار المتكاملة ZPHS01B، التي تضم مجموعة من الحساسات المتخصصة القادرة على قياس عدد من ملوثات الهواء مثل $PM_{2.5}$ و PM_{10} و CO_2 و NO_2 و O_3 و TVOC، إلى جانب درجة الحرارة والرطوبة النسبية.



شكل 4. البنية السحابية للنظام

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

بعد سحب العينة، تبدأ الوحدة بإرسال إطارات البيانات عبر بروتوكول TTL في صورة بايتات ثنائية مشفرة تتضمن القيم الخام للمعلمات المقاسة. وتستقبل وحدة NodeMCU v1 هذه الإطارات عبر منفذ TTL، ثم تتحقق أوليًا من صحتها باستخدام خوارزمية Checksum وفق العلاقة (1):

$$Checksum_expected = (\Sigma\ Bytes)\ mod\ 256 \quad \ldots\ldots\ (1)$$

وعند تطابق القيمة المحسوبة مع القيمة المرسلة، تُعتبر البيانات صالحة، وتبدأ مرحلة فك الترميز واستخراج القيم الفيزيائية. وتُحسب تراكيز الجسيمات العالقة وفق العلاقة (2):

$$PMx\ (\mu g/m^3) = (Byte_high \times 256 + Byte_low)/10 \quad \ldots\ldots\ (2)$$

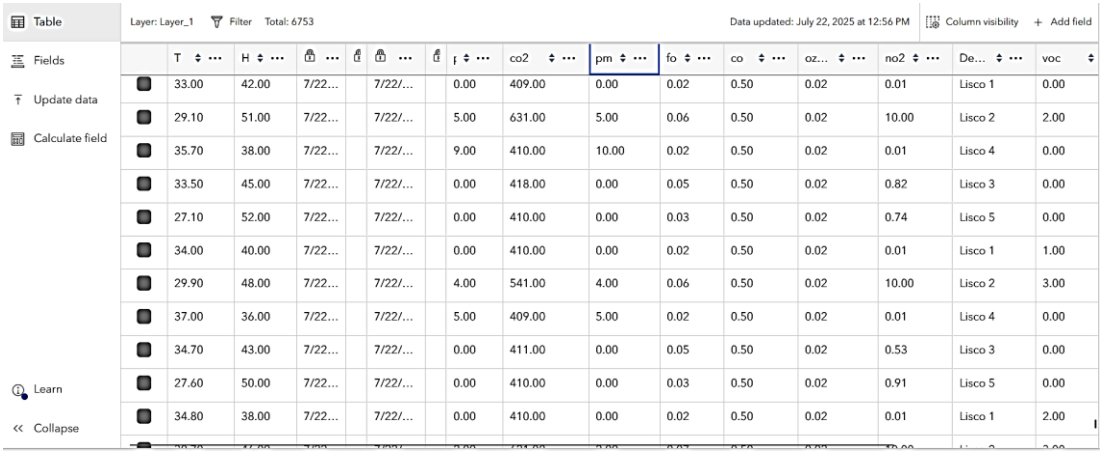
حيث تمثل x القيم 1.0 أو 2.5 أو 10 بحسب نوع الجسيمات. كما يحسب ثاني أكسيد الكربون وفق العلاقة (3):

$$CO_2\ (ppm) = Byte_high \times 256 + Byte_low \quad \ldots\ldots\ (3)$$

أما بعض الغازات، مثل الأوزون وثاني أكسيد النيتروجين وأول أكسيد الكربون، فتُشتق تراكيزها من استجابة المستشعر بالاعتماد على فرق الجهد والحساسية، في حين تُفسر قيم TVOC داخليًا وفق جداول تحويل مبرمجة مسبقًا داخل وحدة التحكم. كما تُحسب درجة الحرارة والرطوبة النسبية من القيم الخام باستخدام علاقات تحويل رقمية مشابهة.

بعد ذلك، تُنسق البيانات في صورة GeoJSON تتضمن الإحداثيات المكانية، سواء كانت ثابتة أو مأخوذة من وحدة GPS، إلى جانب الخصائص البيئية المقاسة. ثم تُرسل البيانات عبر بروتوكول HTTP باستخدام REST API إلى منصة ArcGIS Online، حيث تُخزن داخل Feature Layer وتُعرض تلقائيًا على لوحة معلومات تفاعلية .ويتيح هذا التمثيل الزماني–المكاني متابعة اتجاهات جودة الهواء في الزمن الحقيقي وتفعيل التنبيهات عند تجاوز الحدود البيئية المعتمدة (الشكل 5).

كما أظهرت مراجعة جدول البيانات الخلفي وجود قياسات موسومة زمنيًا لكل محطة، شملت متغيرات مثل درجة الحرارة، والرطوبة، و$PM_{2.5}$ وPM_{10} وCO وNO_2 وO_3 و$HCHO$ وVOC. ويشير انتظام الفواصل الزمنية وتوافق القياسات بين المحطات إلى موثوقية جيدة في اكتساب البيانات، في حين يؤكد حقل تسمية المحطة وجود تمايز مكاني واضح بين مواقع الرصد. أما بعض القراءات الصفرية المحدودة، فترجح ارتباطها بظروف تلوث منخفضة أو بإعادة ضبط مؤقتة أثناء المعايرة. وبوجه عام، تدعم بنية البيانات الناتجة إمكانات الاستعلام المتقدم، وتوليد الطبقات الجغرافية، وتحليل الأنماط البيئية زمانيًا ومكانيًا.



T	H	co2	pm	fo	co	oz...	no2	De...	voc
33.00	42.00	7/22...	7/22/...	0.00	409.00	0.00	0.02	0.50	0.02	0.01	Lisco 1	0.00
29.10	51.00	7/22...	7/22/...	5.00	631.00	5.00	0.06	0.50	0.02	10.00	Lisco 2	2.00
35.70	38.00	7/22...	7/22/...	9.00	410.00	10.00	0.02	0.50	0.02	0.01	Lisco 4	0.00
33.50	45.00	7/22...	7/22/...	0.00	418.00	0.00	0.05	0.50	0.02	0.82	Lisco 3	0.00
27.10	52.00	7/22...	7/22/...	0.00	410.00	0.00	0.03	0.50	0.02	0.74	Lisco 5	0.00
34.00	40.00	7/22...	7/22/...	0.00	410.00	0.00	0.02	0.50	0.02	0.01	Lisco 1	1.00
29.90	48.00	7/22...	7/22/...	4.00	541.00	4.00	0.06	0.50	0.02	10.00	Lisco 2	3.00
37.00	36.00	7/22...	7/22/...	5.00	409.00	5.00	0.02	0.50	0.02	0.01	Lisco 4	0.00
34.70	43.00	7/22...	7/22/...	0.00	411.00	0.00	0.05	0.50	0.02	0.53	Lisco 3	0.00
27.60	50.00	7/22...	7/22/...	0.00	410.00	0.00	0.03	0.50	0.02	0.91	Lisco 5	0.00
34.80	38.00	7/22...	7/22/...	0.00	410.00	0.00	0.02	0.50	0.02	0.01	Lisco 1	2.00

شكل 4. جداول القراءات التي يستقبلها النظام

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

3.2. تصميم لوحة المعلومات الجغرافية وآليات العرض

لدعم الرصد البيئي الآني في الشركة الليبية للحديد والصلب، جرى تطوير لوحة معلومات ArcGIS مخصصة لدمج البيانات الواردة من شبكة المستشعرات اللاسلكية وعرضها بصريًا (الشكل 6). وتؤدي هذه اللوحة دور منصة مركزية وتفاعلية تُمكّن مشغلي المصنع، ومديري البيئة، وفرق السلامة من متابعة حالة جودة الهواء عبر محطات الرصد المختلفة في البعدين المكاني والزماني. وقد صُممت اللوحة بواجهة تجمع بين خريطة تفاعلية، ومخططات ديناميكية، ومقاييس آنية، وأدوات ترشيح، بما يوفر وعيًا ظرفيًا شاملًا.

شكل 6. تصميم لوحة المعلومات الجغرافية وآلية العرض

في قلب اللوحة توجد خريطة تفاعلية تعرض التوزيع المكاني لمحطات الرصد داخل المصنع، حيث تمثل كل محطة بمعلم نقطي مرتبط بقراءات آنية للمعلمات البيئية. كما أُضيفت خرائط حرارية حية لإظهار الامتداد المكاني وشدة بعض الملوثات، مثل $PM_{2.5}$و CO. وتتيح الخريطة إمكانات التكبير والتحريك، كما يؤدي النقر على أي محطة إلى إظهار نافذة منبثقة تتضمن القراءات اللحظية للمعلمات المقاسة، مثل درجة الحرارة، والرطوبة، وCO_2، وCO، وNO_2، وHCHO، و TVOC. ويساعد هذا السياق الجيومكاني على تحديد بؤر التلوث بسرعة وتقييم اتجاه انتشار الانبعاثات في ضوء أنماط الرياح والمناطق الحساسة.

وتتضمن اللوحة أيضًا مقاييس ومؤشرات آنية لعرض مستويات بعض الملوثات الحرجة باستخدام حدود لونية واضحة. فعلى سبيل المثال، يعرض أحد المقاييس أعلى تركيز مسجل لثاني أكسيد الكربون خلال فترة زمنية محددة، مع نطاقات لونية تشير إلى الحالات الآمنة والتحذيرية والحرجة. كما يتتبع مقياس آخر تركيزات أول أكسيد الكربون، بما يوفر تغذية بصرية فورية حول احتمالات المخاطر الصحية أو التشغيلية. وتُحدَّث هذه المؤشرات بصورة ديناميكية، بما يساعد المستخدمين على تقييم ما إذا كانت الحدود البيئية المعتمدة قد جرى تجاوزها.

ومن أجل تتبع التغيرات الزمنية، تحتوي اللوحة على مخططات سلاسل زمنية توضح تطور بعض الملوثات خلال فترات يحددها المستخدم. وقد استُخدمت مخططات خطية لعرض تغيرات تراكيز CO و HCHO وغيرها من المعلمات في أكثر من

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

محطة، بما يسمح بإجراء مقارنات زمنية ومكانية، ورصد الارتفاعات المؤقتة أو الأنماط المتكررة المرتبطة بدورات الإنتاج أو أنشطة الصيانة. كما أُضيفت مخططات أعمدة مقارنة لتمكين المقارنة بين متوسطات بعض الملوثات في المحطات المختلفة خلال تواريخ محددة، وهو ما يساعد على تحديد التباين المكاني في الانبعاثات وتوجيه التدخل نحو المناطق الأعلى خطورة.

ولتعزيز المرونة التحليلية، زُودت اللوحة بعناصر ترشيح وتفاعل تتيح اختيار محطات محددة، أو تحديد نطاقات زمنية مخصصة، أو التبديل بين الملوثات المختلفة. وتعمل هذه المرشحات على تحديث جميع مكونات اللوحة ديناميكيًا، بما يسمح بإجراء تحليل مركز لأحداث أو ظروف محددة. كما دُمجت في الواجهة مؤشرات تنبيه مرئية؛ فعند تجاوز أحد الملوثات للحدود المحددة مسبقًا، يتغير لون المؤشر المعني، ويمكن تهيئة النظام لإرسال تنبيهات فورية عبر البريد الإلكتروني أو الرسائل النصية القصيرة.

وتعتمد جميع هذه المرئيات على طبقة معالم مستضافة في ArcGIS Online تستقبل البيانات من شبكة المستشعرات عبر REST API آمن، في حين تستفيد البنية الخلفية من خدمات AWS في المعالجة المسبقة والتخزين، بما يضمن تحديثات منخفضة الكمون وموثوقية تشغيلية مرتفعة. وبذلك، تحوّل لوحة المعلومات بيانات المستشعرات الخام إلى ذكاء جيومكاني قابل للتنفيذ، من خلال الجمع بين الرصد الآني، والتحليل التاريخي، والتصور المكاني، بما يعزز اتخاذ القرار، ويحسن الامتثال البيئي، ويدعم سلامة العاملين داخل الشركة.

3. تحليل البيانات والنتائج

يكشف تحليل البيانات البيئية الآنية المجمعة من محطات الرصد في الشركة الليبية للحديد والصلب، كما جرى تمثيلها عبر لوحة معلومات ArcGIS، عن أنماط مكانية وزمانية واضحة في معلمات جودة الهواء داخل المنشأة. فقد أظهرت بيانات درجة الحرارة تقلبات معتدلة تراوحت تقريبًا ما بين 27 و37 درجة مئوية، مع اتجاه يومي منتظم اتسم بارتفاع تدريجي خلال ساعات الظهيرة، ويرجح أن ذلك يرتبط بالتأثير المشترك للإشعاع الشمسي والانبعاثات الحرارية الناتجة عن التشغيل. أما الرطوبة النسبية فقد تراوحت ما بين 35% و80%، مع انخفاض ملحوظ خلال أواخر يونيو، وهو ما قد يعكس تغير الظروف المناخية الخارجية أو زيادة معدلات التهوية في بعض الفترات التشغيلية.

وأظهرت المواد الجسيمية العالقة، ولا سيما $PM_{2.5}$ و PM_{10}، سلوكًا أكثر ارتباطًا بالأنشطة التشغيلية داخل المصنع. فعلى الرغم من أن تراكيز $PM_{2.5}$ بقيت في معظم الأوقات دون 10 ميكروجم/م^3، فقد سُجلت ارتفاعات عابرة خلال فترات تبديل الورديات ومناولة المواد، بما يشير إلى ارتباط مباشر بالنشاط البشري وحركة المعدات. أما PM_{10} فقد أظهر تباينًا أعلى، ووصلت بعض قراءاته إلى نحو 20 ميكروجم/م^3، خصوصًا في مواقع التحميل والتفريغ والعمليات المولدة للغبار، وهو ما يشير إلى وجود مصادر موضعية للجسيمات الخشنة تستدعي إجراءات أكثر استهدافًا للحد من الغبار.

وفيما يتعلق بالملوثات الغازية، فقد اتسمت عمومًا بدرجة أعلى من الاستقرار. إذ بقي أول أكسيد الكربون (CO) دون 0.5 ppm في معظم المواقع، بما يعكس كفاءة نسبية في الاحتراق والتهوية. كما ظل ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) غالبًا دون 0.1 ppm، مع تسجيل بعض الارتفاعات المحدودة المرتبطة على الأرجح بالعمليات الحرارية مرتفعة الحرارة، مثل الصهر والدرفلة. أما الأوزون (O_3) فقد أظهر نمطًا متكررًا خلال فترات الظهيرة المشمسة، بما يشير إلى تفاعلات ضوئية كيميائية مرتبطة بالملوثات السلفية والظروف الإشعاعية.

كما أظهرت نتائج الرصد أن الفورمالدهيد (HCHO) سجل مستويات مرتفعة نسبيًا في المراحل الأولى من جمع البيانات، بلغت نحو 0.6 ppm، قبل أن يظهر اتجاهًا تنازليًا تدريجيًا بمرور الوقت. وقد يرجع ذلك إلى تحسينات تشغيلية أو

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

تغييرات في المواد أو تحسن في التحكم بالانبعاثات. في المقابل، أظهرت المركبات العضوية المتطايرة الكلية (TVOCs) سلوكًا غير منتظم، مع اندفاعات متقطعة خاصة في مناطق التخزين والتغليف، مما يوحي بإطلاقات موضعية من المذيبات أو المواد المنبعثة غازيًا، ويشير إلى الحاجة إلى تشديد ضوابط التعامل مع المواد الكيميائية وتحسين إدارة جودة الهواء الداخلي.

من الناحية المكانية، أظهر التحليل أن المحطة 2، الواقعة قرب الأفران العالية ومناطق الانبعاث المرتفع، سجلت باستمرار قراءات أعلى لعدة ملوثات مقارنة بالمحطات الأخرى. ويعكس هذا النمط وجود بؤرة تلوث موضعية مرتبطة بقربها من العمليات الصناعية الأساسية. كما أظهر التوافق الزمني بين ذروات الانبعاثات وجداول الإنتاج وجود علاقة واضحة بين شدة التشغيل والحمل البيئي، وهو ما يؤكد أهمية ربط الرصد البيئي بالسياق التشغيلي. إضافة إلى ذلك، بين تحليل اتجاهات الرياح وجود انجراف متكرر للملوثات نحو الحد الجنوبي للمصنع، بما قد يثير مخاوف مرتبطة بالانتشار خارج حدود المنشأة والتعرض المجتمعي.

وفي الجانب البنيوي، أظهرت البيانات الخلفية درجة جيدة من الموثوقية، من خلال انتظام الفواصل الزمنية للقياسات وتزامنها بين المحطات، وهو ما يؤكد كفاءة اكتساب البيانات ونقلها. كما ظهرت بعض القراءات الصفرية المحدودة على نحو متقطع، ويرجح أنها ترتبط بظروف تلوث منخفضة أو بإعادة ضبط مؤقتة أثناء المعايرة. وبوجه عام، تُظهر مجموعة البيانات اتساقًا زمانيًا ومكانيًا جيدًا، بما يدعم إمكانات الاستعلام المتقدم، وتحليل الاتجاهات التاريخية، ودمج النتائج لاحقًا في نماذج تنبؤية. وتشير هذه النتائج مجتمعة إلى قدرة النظام على تقديم استبصارات دقيقة وقابلة للتنفيذ لدعم الإدارة البيئية واتخاذ القرار التشغيلي داخل الشركة الليبية للحديد والصلب.

4. المناقشة

تكشف نتائج الدراسة أن وضع تلوث الهواء في الشركة الليبية للحديد والصلب يتسم بطابع مختلط لكنه قابل للإدارة، إذ ظهرت بعض المعلمات ضمن الحدود المقبولة، في حين أشارت معلمات أخرى إلى مجالات تتطلب تدخلًا مباشرًا. فقد بينت البيانات أن المواد الجسيمية العالقة، ولا سيما $PM_{2.5}$ و PM_{10}، تسجل ارتفاعات متكررة خلال فترات ذروة الإنتاج، وهو ما يعكس أثر الأنشطة الصناعية مثل مناولة المواد، وتشغيل الأفران، وعمليات التحميل والتفريغ في زيادة انبعاثات الغبار. وفي المقابل، بقيت بعض الملوثات الغازية، مثل أول أكسيد الكربون (CO) وثاني أكسيد النيتروجين (NO_2)، في الغالب ضمن الحدود الآمنة الموصى بها، بما يشير إلى كفاءة نسبية في أنظمة الاحتراق والتهوية. كما أظهر الأوزون (O_3) تباينًا يوميًا واضحًا مع ارتفاعات خلال الفترات المشمسة، بينما ظهرت المركبات العضوية المتطايرة (VOCs) والفورمالدهيد (HCHO) عند مستويات منخفضة إلى متوسطة، خاصة في مناطق التخزين والتغليف، ويرجح ارتباطها بالمذيبات ومواد التنظيف والمواد المنبعثة غازيًا. كذلك أظهر التحليل المكاني ميل التلوث إلى الانجراف نحو الحد الجنوبي للمصنع تحت تأثير الرياح السائدة، بما يثير احتمال انتقال جزء من العبء البيئي إلى خارج حدود المنشأة.

وتؤكد هذه النتائج أن البيئة الصناعية داخل الشركة لا يمكن التعامل معها بوصفها مجالًا متجانسًا، بل بوصفها نسيجًا مكانيًا متعدد الأحمال البيئية يتفاوت فيه التلوث بحسب مواقع الوحدات الصناعية، وطبيعة الأنشطة، وظروف التهوية، والعوامل المناخية المصاحبة. وهذا يتفق مع ما أشارت إليه الدراسات المحلية، ولا سيما دراسة معيتيق وآخرون (2022) حول أهمية نظم المعلومات الجغرافية في حماية البيئة ومراقبة التلوث داخل الشركة، ودراسة عكاشة وآخرون (2015) التي أوضحت تأثير الظروف المناخية واتجاهات الرياح في انتشار الملوثات الصادرة عن مجمع الحديد والصلب. غير أن الدراسة الحالية تتجاوز الأعمال السابقة

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

من خلال تقديم إطار تشغيلي متكامل يجعل من Web GIS بيئة فعلية للرصد والتحليل، ويربطها مباشرة ببيانات مستمدة من شبكة استشعار موزعة مكانيًا، بما يتيح الانتقال من الوصف العام إلى الرصد المستمر والتحليل الزماني–المكاني الديناميكي.

وعلى المستوى الدولي، تتوافق نتائج الدراسة مع الأدبيات التي تؤكد أن شبكات المستشعرات اللاسلكية توفر بنية مناسبة للرصد المستمر في البيئات المعقدة والمتغيرة، وأن القيمة الحقيقية لهذا الرصد تتعزز عند دمجه داخل منصات Web GIS تتيح العرض والتحليل وربط القراءات بسياقها المكاني والتشغيلي (Voutos *et al*., 2017; Brovelli *et al*., 2011; Akyildiz *et al*., 2002). كما تنسجم النتائج مع الدراسات التي طورت نظم دعم قرار قائمة على GIS لإدارة جودة الهواء، والتي أبرزت أن المنصات الجغرافية التفاعلية يمكن أن تؤدي دورًا تحليليًا وتشغيليًا يتجاوز مجرد العرض البصري للبيانات (Sari, 2020; Elbir *et al*., 2010; Elbir, 2004).

وتتمثل القيمة التطبيقية للدراسة في أنها توضح كيف يمكن للتحول من الرصد التقليدي إلى الرصد الجيومكاني الذكي أن يعيد تشكيل المتابعة البيئية داخل المنشآت الصناعية الثقيلة. فعندما تصبح البيانات البيئية مستمرة، ومرتبطة بالموقع والزمن، ومتاحة عبر لوحة تفاعلية موحدة، يصبح القرار البيئي أكثر دقة وأسرع استجابة. كما أن قدرة النظام على إظهار البؤر الساخنة، وتحديد المحطات الأعلى تعرضًا، ومتابعة الاتجاهات الزمنية، تفتح المجال أمام تطبيقات مباشرة، مثل تحسين خطط التهوية، وتعزيز التحكم في الغبار، ومراجعة مواقع الانبعاث الحرجة، وتوجيه التدخلات البيئية إلى المناطق الأعلى أولوية.

رغم النتائج الإيجابية، فإن الدراسة لا تخلو من حدود، من أبرزها تأثير معايرة المستشعرات منخفضة التكلفة في دقة القراءات على المدى الطويل، وأثر كثافة التغطية المكانية في قدرة النظام على تمثيل التباين البيئي بدقة أعلى، إلى جانب الحاجة إلى مزيد من التكامل المؤسسي حتى تتحول البيانات إلى إجراءات تشغيلية منتظمة. ومع ذلك، فإن النظام أظهر موثوقية جيدة في اكتساب البيانات ونقلها، وأثبت قدرة واضحة على دعم الرصد المستمر واتخاذ القرار داخل البيئة الصناعية.

بوجه عام، تؤكد المناقشة أن تكامل نظم المعلومات الجغرافية عبر الويب وشبكات المستشعرات اللاسلكية لا يمثل فقط تطويرًا تقنيًا في أدوات الرصد، بل يشكل تحولًا نوعيًا في إدارة البيئة الصناعية، من خلال الانتقال من القياسات المتقطعة والتقارير المنفصلة إلى منصة تحليلية موحدة قائمة على البيانات المكانية الحية.

5. الخاتمة

تقدم هذه الدراسة إطارًا قابلًا للتوسع لدمج شبكات المستشعرات اللاسلكية ونظم المعلومات الجغرافية عبر الويب من أجل تمكين الرصد البيئي والإنشائي الآني في البيئات الصناعية الثقيلة. وقد أظهر التطبيق العملي لهذا الإطار في الشركة الليبية للحديد والصلب أن النظام الجيومكاني الذكي المقترح نجح في ردم الفجوة بين الاستشعار الفيزيائي والذكاء المكاني، من خلال تحويل بيانات المستشعرات الخام إلى معلومات مكانية قابلة للتنفيذ. ومن خلال نشر شبكة من المستشعرات منخفضة التكلفة ومتعددة المعلمات في المناطق التشغيلية الحرجة، وربطها بمنصة ArcGIS Online السحابية، أتاح النظام مراقبة مستمرة لجودة الهواء، والظروف المناخية، وبعض المؤشرات المرتبطة بالبيئة التشغيلية بدقة زمنية ومكانية مرتفعة. كما أسهم تكامل بث البيانات الآني، والمعالجة الأولية، والتخزين السحابي، ولوحات المعلومات التفاعلية في تعزيز الوعي الظرفي داخل الشركة بدرجة واضحة. فقد أصبح بإمكان المشغلين ومديري البيئة تحديد بؤر التلوث، وتتبع اتجاهات الانبعاثات، واستقبال تنبيهات آلية عند تجاوز الحدود البيئية، وهي إمكانات لم تكن متاحة في ظل ممارسات الرصد اليدوي أو المتقطع. وقد كشف التحليل عن أنماط مكانية وزمانية واضحة، من بينها ارتفاع مستويات

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

الجسيمات العالقة أثناء تبديل الورديات، وارتباط بعض الانبعاثات الغازية بالعمليات الحرارية، وانجراف التلوث تبعًا لاتجاه الرياح، وهي نتائج يمكن الاستفادة منها مباشرة في تعديل الإجراءات التشغيلية وتوجيه استراتيجيات الحد من الانبعاثات.

وعلاوة على ذلك، يدعم هذا الإطار أهدافًا أوسع ترتبط بالاستدامة الصناعية، وسلامة العاملين، والامتثال البيئي. كما يوفر أساسًا مناسبًا لتطبيقات مستقبلية مثل الصيانة التنبؤية، وكشف الشذوذ، واتخاذ القرار المعتمد على البيانات، بما يفتح المجال أمام التحول الرقمي داخل البيئات الصناعية محدودة الموارد. ورغم استمرار بعض التحديات، مثل معايرة المستشعرات، والتحقق من جودة البيانات، وبناء القدرات المؤسسية، فإن النظام أظهر درجة جيدة من الموثوقية والمرونة، مما يجعله نموذجًا قابلًا للتكرار في منشآت صناعية مشابهة داخل البيئات النامية. بشكل عام، يبرهن تكامل WSNsو Web GIS في الشركة الليبية للحديد والصلب على الإمكانات التحويلية للأنظمة الجيومكانية الذكية في الرصد الصناعي، إذ لا يقتصر أثره على تحسين أداء الإدارة البيئية، بل يمتد إلى دعم المرونة الرقمية والتعافي الصناعي المستدام.

6. التوصيات

في ضوء نتائج الدراسة، توصي الورقة بتطوير منظومة رصد بيئي مستمر تعتمد على شبكات المستشعرات اللاسلكية ومنصة Web GIS مع توسيع التغطية المكانية لمحطات الرصد داخل الوحدات الإنتاجية والمناطق الحساسة، وتحسين معايرة المستشعرات والتحقق من جودة البيانات. كما توصي باعتماد Web GIS منصة مركزية لإدارة البيانات البيئية، وتطوير نظام إنذار مبكر يعتمد على حدود مرجعية واضحة للملوثات، وربط بيانات الرصد بالمتغيرات المناخية والتشغيلية وسجلات الصيانة، بما يعزز دقة التفسير وفاعلية القرار. كذلك تؤكد الدراسة أهمية إنشاء قاعدة بيانات تاريخية طويلة الأمد، وتوسيع استخدام النظام لدعم الصيانة الوقائية والتحول الرقمي، وتطبيق النموذج في منشآت صناعية ليبية أخرى للتحقق من قابليته للتعميم. وأخيرًا، تشدد الدراسة على ضرورة تعزيز التكامل المؤسسي من خلال تدريب الكوادر، وتوحيد تدفق البيانات بين الإدارات، وتطوير إجراءات الاستجابة البيئية، وتضمين النظام ضمن سياسة الإدارة البيئية للشركة.

المراجع

أولاً: مراجع باللغة العربية

العيساوي، ستار جابر؛ و حبريشة، سليم محمد (2015). تأثير نوع الوقود على انبعاث الملوثات البيئية الناتجة من محطة التوليد للشركة الليبية للحديد والصلب مصراتة. *المؤتمر العلمي الثاني لعلوم البيئة، 2015*، 797.

عكاشة، علي يوسف؛ الأطرش، مختار سالم؛ والصل، محمد محمد (2015). الانبعاثات الغازية والجسيمية لمجمع الحديد والصلب بمصراتة ومعدلات انتشارها في هواء المدينة .*المؤتمر العلمي الثاني لعلوم البيئة، 2015*، 432-444.

معيتيق، عبد العظيم سالم؛ الترجمان، وسام محمد؛ والجمل، جمال محمد (2022). دور نظم المعلومات الجغرافية في حماية البيئة ومراقبة التلوث: أنموذج عملي (الشركة الليبية للحديد والصلب). *مجلة علوم البحار والتقنيات البيئية*، 8(2)، 24-37.

ثانياً: مراجع باللغة الإنجليزية

Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38(4), 393-422.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

Botts, M., Percivall, G., Reed, C., & Davidson, J. (2006). OGC® sensor web enablement: Overview and high-level architecture. **In**: *International conference on GeoSensor Networks*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 175-190.

Brovelli, M. A., Giori, G., Mussin, M., & Negretti, M. (2011). Improving the Monitoring of the Status of the Environment Through Web Geo-services: The Example of Large Structures Supervision. *Transactions in GIS*, 15(2), 173-188.

Delin, K. A., Jackson, S. P., Johnson, D. W., Burleigh, S. C., Woodrow, R. R., McAuley, J. M., Dohm, J. M., Ip, F., Ferré, T. P. A., Rucker, D. F., & Baker, V. R. (2005). Environmental studies with the sensor web: Principles and practice. *Sensors*, 5(1), 103-117.

Elbir, T. (2004). A GIS based decision support system for estimation, visualization and analysis of air pollution for large Turkish cities. *Atmospheric Environment*, *38*(27), 4509-4517.

Elbir, T., Mangir, N., Kara, M., Simsir, S., Eren, T., & Ozdemir, S. (2010). Development of a GIS-based decision support system for urban air quality management in the city of Istanbul. *Atmospheric Environment*, *44*(4), 441-454.

Gkatzoflias, D., Mellios, G., & Samaras, Z. (2013). Development of a web GIS application for emissions inventory spatial allocation based on open-source software tools. *Computers & Geosciences*, *52*, 21-33.

Hart, J. K., & Martinez, K. (2006). Environmental sensor networks: A revolution in the earth system science?. *Earth-Science Reviews*, *78*(3-4), 177-191.

Imhamed, R., A Razek, T. M., & Al-Haddad, A. H. S. (2024). ASSESSMENT OF INDOOR AIR POLLUTION LEVELS WITH GASES IN THE LIBYAN IRON AND STEEL COMPANY. *Journal of Environmental Science*, *53*(4), 1111-1125.

Sari, F. (2020). Development of a WebGIS based air quality geoportal for monitoring and managing air quality in Istanbul. *Konya Journal of Engineering Sciences*, *8*(2), 354-368.

Triantafyllou, A. G., Evagelopoulos, V., & Zoras, S. (2006). Design of a web-based information system for ambient environmental data. *Journal of Environmental Management*, *80*(3), 230-236.

Voutos, Y., Mylonas, P., Spyrou, E., & Charou, E. (2017). A social environmental sensor network integrated within a Web GIS platform. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, *6*(4), 27.

Walter, K. (2010). Geocoding Sensor Data–Applying OGC's Sensor Web Enablement Specifications. **In**: *GEOTECHNOLOGIEN Science Report*, Münch, U. & Buchmann, A. (Eds.),15(1), 143–149.

Zhao, Y. L., Tang, J., Huang, H. P., Wang, Z., Chen, T. L., Chiang, C. W., & Chiang, P. C. (2020). Development of IoT technologies for air pollution prevention and improvement. *Aerosol and Air Quality Research*, *20*(12), 2874-2888.