تطبيق تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بُعد (RS)في رصد وتحليل التلوث البحري على طول الساحل الليبي: دراسة حالة منطقة مصراتة الساحلية

أريج علي خليفة كرناف*
قسم معلم فصل ، كلية الآداب والتربية ، جامعة صبراتة
Email: areej.karnaf.@sabu.edu.ly
تاريخ الارسال 2025/12/2م تاريخ القبول 2025/12/29م

Application of Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) Techniques for Monitoring and Analyzing Marine Pollution along the Libyan Coast: A Case Study of the Misurata Coastal Area

ARIG ALI KHALIFA KRNAF
Email: areej.karnaf.@sabu.edu.ly

Abstract:-
This study aims to apply Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) technologies to monitor and analyze marine pollution along the Libyan coastline, taking the Misurata coastal area as a practical case study due to its significant industrial activity.
Satellite imagery from Sentinel-2 (2020–2024) was analyzed using the Normalized Difference Water Index (NDWI) and Oil Index, combined with field measurements and environmental reports from the Libyan Iron and Steel Company.
Results revealed a 14.6% increase in marine pollution indicators near ports and industrial zones during the study period. Pollution hotspots were concentrated in Misurata, Ras Lanuf, and Brega, while the spatial analysis showed that sea currents transport contaminants up to 4 km offshore.
Comprehensive GIS-based maps were produced to display the spatial distribution of pollution and classify risk zones into low, moderate, and high categories. The study recommends establishing a National Coastal Environmental Monitoring System in Libya that integrates GIS and RS for continuous data updating and effective environmental decision support.
Keywords: GIS, Remote Sensing, Marine Pollution, Libyan Coast, NDWI, Oil Index, Misurata, Spatial Analysis, Environmental Monitoring, Coastal Management.

حقوق النشر © للمؤلف/للمؤلفين 2025. ينشر هذا البحث بموجب رخصة المشاع الإبداعي Creative Commons (CC BY-NC 4.0)

الملخص :

يهدف هذا البحث إلى توظيف تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بُعد (RS) في رصد وتحليل التلوث البحري على طول الساحل الليبي، واتخاذ منطقة مصراتة الساحلية أنموذجًا تطبيقيًا لكونها إحدى أهم المناطق الصناعية في ليبيا. تم استخدام صور الأقمار الصناعية Sentinel-2 للفترة ما بين 2020 – 2024 لتحليل مؤشري NDWI (مؤشر المياه) وOil Index (مؤشر الزيوت)، وربطها بنتائج القياسات الميدانية وتقارير قسم البيئة بالشركة الليبية للحديد والصلب .

أظهرت النتائج ارتفاعًا ملحوظًا في مؤشرات التلوث البحري قرب الموانئ والمناطق الصناعية بنسبة 14.6٪ خلال فترة الدراسة، مع تركز بؤر التلوث في مصراتة، رأس لانوف، والبريقة .كما بيّن التحليل المكاني أن التيارات البحرية تسهم في انتقال الملوثات لمسافة تصل إلى 4كم من الشاطئ.

تم إنتاج خرائط رقمية مكانية توضح التوزيع الجغرافي للتلوث، وتصنيف مناطق الخطورة البيئية إلى (منخفض – متوسط – مرتفع). وأوصت الدراسة بإنشاء نظام وطني للرصد البيئي الساحلي يعتمد على تقنيات GIS وRS لتحديث البيانات بشكل دوري ودعم متخذي القرار في المجال البيئي.

الكلمات المفتاحية: نظم المعلومات الجغرافية، الاستشعار عن بعد، التلوث البحري، الساحل الليبي، مؤشرNDWI ، مؤشرOil Index ، مصراتة، التحليل المكاني، الخرائط الرقمية، الإدارة البيئية.

المقدمة:

تُعدّ البيئة البحرية من أهم الأنظمة البيئية التي تعتمد عليها التنمية الاقتصادية والاجتماعية في ليبيا، إذ يمتد الساحل الليبي لأكثر من 1900 كيلومتر على البحر الأبيض المتوسط، ما يمنحه أهمية استراتيجية واقتصادية كبرى في مجالات الملاحة، الصيد، الصناعة النفطية، والسياحة الساحلية. غير أنّ هذا الامتداد الساحلي يشهد في السنوات الأخيرة ضغوطاً بيئية متزايدة ناتجة عن الأنشطة الصناعية والنفطية، والصرف الصحي، والتوسع العمراني غير المنظم، مما أدى إلى تزايد معدلات التلوث البحري وتدهور نوعية المياه الساحلية والأنظمة البيئية البحرية. وقد أكدت تقارير قسم البيئة بالشركة الليبية للحديد والصلب (2022) أنّ المناطق الساحلية المحيطة

بالمنشآت الصناعية في مصراتة تشهد تغيرات بيئية واضحة بسبب تصريف النفايات السائلة والصلبة، مما يستدعي وجود أدوات علمية حديثة لرصد هذا التدهور وتتبعه بدقة مكانية وزمانية عالية.

في هذا السياق، برزت **نظم المعلومات الجغرافية (GIS)** وتقنيات **الاستشعار عن بُعد (RS)** كأدوات فعّالة في تحليل الظواهر البيئية، ورصد التغيرات المكانية عبر الزمن، وإنتاج قواعد بيانات رقمية تسهم في دعم القرار البيئي (داود، 2020؛ جعفر، 2015). فبفضل قدراتها التحليلية في دمج البيانات المكانية والجدولية، أصبح من الممكن تمثيل الظواهر البيئية المعقدة، كالتلوث البحري، على شكل خرائط رقمية دقيقة تُظهر أماكن تراكم الملوثات، واتجاه انتشارها، ومصادرها المحتملة. كما تسمح هذه التقنيات بإنشاء قواعد بيانات مكانية تربط بين الأنشطة البشرية، كالموانئ والمصانع النفطية، ومؤشرات التلوث الكيميائي والبيولوجي، مما يمكّن من وضع خطط استجابة سريعة وإدارة فعالة للمخاطر البيئية (Hognogi et al., 2021؛ Kamara, 2020).

لقد أكدت الدراسات الحديثة، مثل دراسة **المبتهج محمد وآخرين (2024)** في المغرب، على أهمية توظيف نظم المعلومات الجغرافية في "نمذجة التحولات المجالية" ومراقبة التأثيرات البيئية الناتجة عن النشاط البشري في المناطق الساحلية. كما بيّن **أسامة وبدور (2021)** في دراسة التقييم البيئي لميناء شرق بورسعيد، أن استخدام تقنيات الاستشعار عن بعد و GISساعد على تحديد مستويات التلوث بدقة وتوزيعه المكاني داخل الميناء، مما مكّن من تحسين خطط الإدارة البيئية. هذه الدراسات العربية تمثل نماذج رائدة يمكن محاكاتها في الساحل الليبي، الذي يشترك في الخصائص البيئية والاقتصادية نفسها، لكنه ما يزال يفتقر إلى دراسات مكانية متكاملة تعتمد على نظم المعلومات الجغرافية كأداة للتحليل البيئي المستمر.

في ليبيا، تزايد الاهتمام بتبني التقنيات الجغرافية الحديثة في المؤسسات الصناعية والبيئية، خاصة بعد صدور الخطة الاستراتيجية للبيئة والسلامة بالشركة الليبية للحديد والصلب (2019)، التي تضمنت رؤية واضحة لإدماج نظم المعلومات الجغرافية في الرصد البيئي وإدارة المخاطر. كما أن تطبيق نظام الإدارة البيئية وفق معيار ISO14001) وثائق النظام، 2004) أسهم في بناء ثقافة مؤسسية جديدة نحو الرقابة المستمرة على الملوثات الصناعية ومخرجات الإنتاج. ومع ذلك، ما زالت أغلب

عمليات الرصد البيئي في ليبيا تعتمد على القياسات الميدانية التقليدية، دون دمجها ضمن نظام مكاني متكامل يتيح التحليل الآني والتنبؤ المستقبلي بالتغيرات البيئية.

من هذا المنطلق، يهدف هذا البحث إلى **تطبيق نظم المعلومات الجغرافية في رصد وتقييم التلوث البحري على طول الساحل الليبي**، بوصفه إطارًا علميًا وتقنيًا متكاملًا يساعد في تحليل وتفسير البيانات البيئية وربطها بالمصادر البشرية المسببة لها. يقوم البحث على بناء نموذج جغرافي يستخدم صور الأقمار الصناعية وبيانات الرصد البيئي لتحديد مناطق الخطر، وتحليل توزيع الملوثات، وإنتاج خرائط مكانية تمثل مستويات التلوث البحري في مناطق مختارة من الساحل الليبي. كما يسعى إلى إبراز إمكانيات GIS في دعم اتخاذ القرار البيئي ووضع خطط وطنية للرصد المستمر. وبذلك، يسد هذا البحث فجوة معرفية في الدراسات البيئية الليبية، ويقدم نموذجاً تطبيقيًا يمكن تعميمه على بقية المناطق الساحلية في البلاد (معيتيق والجمل، 2021؛ دور نظم المعلومات الجغرافية في حماية البيئة، 2022).

مشكلة البحث:

تُعد مشكلة التلوث البحري في ليبيا من أبرز القضايا البيئية التي تهدد استدامة الموارد الطبيعية الساحلية. فالتزايد الملحوظ في النشاط الصناعي والنفطي، خصوصًا في المناطق الساحلية الغربية والشرقية، أدى إلى ارتفاع معدلات الملوثات النفطية والكيميائية في مياه البحر ورواسبه. وتشير تقارير قسم البيئة بالشركة الليبية للحديد والصلب (2021، 2022) إلى وجود مؤشرات واضحة على تراكم المواد الثقيلة والنفايات الصناعية في المناطق الساحلية المحيطة بالموانئ ومناطق التصريف. ومع غياب قاعدة بيانات مكانية متكاملة، يصعب تتبع مصادر التلوث وتقدير حجم المخاطر البيئية الناتجة عنه.

على الرغم من الجهود المحدودة التي تبذلها الجهات المختصة في ليبيا لمراقبة البيئة البحرية، إلا أن معظمها يعتمد على الأساليب التقليدية في جمع البيانات والتحليل اليدوي، مما يجعلها غير قادرة على توفير صورة دقيقة ومتكاملة عن الحالة البيئية للساحل الليبي. كما أن عدم وجود نظام وطني موحد يستخدم نظم المعلومات الجغرافية في الرصد البيئي أدى إلى تشتت البيانات وضعف التكامل بين المؤسسات المختلفة (جعفر، 2015). وهذا الواقع يُضعف من قدرة صناع القرار على الاستجابة الفعالة للتلوث البحري أو التخطيط للتقليل من آثاره.

من هنا تنبع مشكلة البحث في التساؤل الرئيس :

كيف يمكن لتقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) أن تُسهم في رصد وتحليل وتقييم التلوث البحري على طول الساحل الليبي، وبناء قاعدة بيانات مكانية تُسهم في اتخاذ قرارات بيئية مستنيرة؟

إذ يسعى هذا البحث للإجابة عن هذا التساؤل من خلال تطوير نموذج تحليلي مكاني يعتمد على بيانات الأقمار الصناعية والمسوحات البيئية الميدانية، وربطها بالأنشطة البشرية المؤثرة على البيئة الساحلية.

أسئلة البحث:

1. ما مدى كفاءة نظم المعلومات الجغرافية في رصد وتحليل التلوث البحري في ليبيا؟
2. ما العوامل المكانية والبشرية الأكثر تأثيرًا في توزيع الملوثات على الساحل الليبي؟
3. كيف يمكن دمج تقنيات الاستشعار عن بعد و GISلبناء قاعدة بيانات بيئية متكاملة؟
4. ما آليات استخدام نتائج التحليل المكاني في دعم القرار البيئي الوطني؟

أهداف البحث:

1. جمع وتحليل البيانات المكانية المتعلقة بمصادر وأنواع التلوث البحري على الساحل الليبي.
2. تطبيق تقنيات GIS وRS في تحديد المناطق الأكثر تلوثًا.
3. تطوير خرائط رقمية توضح التوزيع المكاني لمستويات التلوث ومصادره.
4. اقتراح نموذج وطني للرصد البيئي باستخدام نظم المعلومات الجغرافية.

5. أهمية البحث:

6. تتجلى أهمية هذا البحث في كونه يسعى إلى إدخال منهج علمي وتقني حديث في إدارة البيئة الساحلية الليبية، عبر توظيف نظم المعلومات الجغرافية في مراقبة وتحليل التلوث البحري. وتكمن أهميته العلمية في إثراء المكتبة البيئية الليبية والعربية بدراسة ميدانية تطبيقية حديثة، كما تتضح أهميته العملية في إمكانية استخدام نتائجه لتأسيس نظام وطني للرصد البيئي يعتمد على البيانات الجغرافية الدقيقة (فالح وشعوان، 2012؛ داود، 2020).

حدود البحث:

- **النطاق المكاني :**يقتصر التطبيق على مناطق مختارة من الساحل الليبي، مثل مصراتة وطرابلس وبنغازي.
- **النطاق الزمني :**الفترة بين عامي 2020–2025، لتغطية أحدث بيانات الأقمار الصناعية المتاحة.
- **النطاق الموضوعي :**يركّز على التلوث البحري الناتج عن الأنشطة الصناعية والنفطية فقط، دون التطرق إلى التلوث البلاستيكي أو الزراعي.
- **القيود التقنية :**محدودية توفر بيانات ميدانية محدثة ودقيقة من الجهات الرسمية، إضافة إلى صعوبة الحصول على صور فضائية عالية الدقة لبعض المناطق الساحلية الحساسة.

الدراسات السابقة:

أولاً- الدراسات العربية:

1. دراسة المبتهج محمد، ومحمد إبراهيم محمد سالم، وجمعة عمارة محمد (2024)

تناولت هذه الدراسة نمذجة التحولات المجالية بالسهل الساحلي للسعيدية–رأس الماء في المملكة المغربية باستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بعد .(RS) اعتمد الباحثون على تحليل صور الأقمار الصناعية لتقييم التغيرات المكانية في استخدامات الأراضي الساحلية، وتحديد اتجاهات التوسع العمراني وتأثيرها على البيئة الساحلية .

أظهرت الدراسة أن نظم المعلومات الجغرافية أداة فعّالة في الكشف عن التحولات المكانية ومراقبة التدهور البيئي في السواحل المتوسطية. وتبرز أهميتها في الجانب المنهجي الذي يجمع بين التحليل الزمني والمكاني، وهو ما يتوافق مع أهداف هذا البحث في تحليل التلوث البحري على طول الساحل الليبي.

2. دراسة أسامة وبدور محمد (2021)

قدّم الباحثان نموذجًا تطبيقيًا لتقييم الأثر البيئي لميناء شرق بورسعيد في مصر، باستخدام أدوات GIS وبيانات ميدانية لتحديد مناطق التلوث بالميناء. توصلت الدراسة إلى أن التحليل المكاني مكّن من تحديد مواقع تراكم الملوثات الناتجة عن حركة السفن والتصريف الصناعي، وأوصت بإنشاء نظام مراقبة بيئي يعتمد على بيانات مكانية

محدثة .

تُعد هذه الدراسة مرجعًا مهمًا من حيث التطبيق العملي، إذ تُظهر كيف يمكن لنظم المعلومات الجغرافية أن تتحول من مجرد أداة تحليلية إلى وسيلة فعّالة لإدارة الموانئ وحماية البيئة الساحلية.

3. دراسة فالح علي وجمال شعوان (2012)

تُعد من أوائل المؤلفات العربية التي تناولت مبادئ وتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد في المجال البيئي. قدّم المؤلفان تأصيلاً نظريًا متينًا لمفاهيم نظم المعلومات الجغرافية وأدواتها، مع عرض لتطبيقاتها في مجالات الرصد البيئي والتخطيط المكاني .

تبرز أهمية هذه الدراسة في الجانب المنهجي، إذ أسست للإطار العلمي الذي اعتمدت عليه البحوث العربية اللاحقة، ومنها الدراسات الليبية الحديثة التي استندت إلى هذا النهج في بناء قواعد بيانات بيئية مكانية.

ثانياً: الدراسات المحلية

1. الجمل، الحسين سالم (2019)

ناقش الباحث في ورقته المقدمة بالملتقى الثاني لمسؤولي البيئة بالشركة الليبية للحديد والصلب نظام الإدارة البيئية والسلامة والصحة المهنية بالشركة، مشيرًا إلى تحديات التلوث الصناعي الساحلي وأهمية تطبيق نظم الرصد البيئي.

وقد أكدت الدراسة ضرورة تطوير قاعدة بيانات بيئية مكانية تعتمد على GIS لتتبع مصادر الملوثات الصناعية في مصراتة، وهو ما يتقاطع مباشرة مع موضوع هذا البحث.

2. عكاشة، علي يوسف؛ أبو زقية، خليل؛ أبو كيل، عادل (2021)

أجريت هذه الدراسة في مدينة مصراتة لتحديد مستويات الخلفية الإشعاعية داخل وخارج محيط الشركة الليبية للحديد والصلب. استخدم الباحثون منهجًا علميًا يعتمد على التحليل المكاني للعينات، وأظهرت النتائج ارتفاعًا نسبيًا في مستويات الإشعاع بالقرب من المناطق الصناعية.

تبرز هذه الدراسة كأول تطبيق شبه مكاني في ليبيا للرصد البيئي، وتشير إلى ضرورة توظيف نظم المعلومات الجغرافية لرسم خرائط المخاطر الإشعاعية.

3. معيتيق، عبد العظيم والجمل، جمال محمد (2021)

تناولت الورقة تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في الإدارة البيئية ضمن مؤتمر الآثار البيئية في طرابلس. خلصت الدراسة إلى أن دمج GIS في نظم الإدارة البيئية يرفع كفاءة مراقبة الملوثات، ويساعد في اتخاذ قرارات أكثر دقة.

هذه النتائج تؤكد جدوى تبني نهج مكاني متكامل، وتشكل قاعدة مفاهيمية للبحث الحالي الذي يسعى لتوسيع هذا التطبيق على نطاق الساحل الليبي بأكمله.

4. دور نظم المعلومات الجغرافية في حماية البيئة ومراقبة التلوث (2022)

نشرت في مجلة علوم البحار والتقنيات البيئية، وطبقت نموذجًا عمليًا في الشركة الليبية للحديد والصلب. أكدت الدراسة أن استخدام GIS في مراقبة الانبعاثات الصناعية يسهم في كشف مصادر التلوث بدقة ويُمكّن من إعداد تقارير بيئية ديناميك.

يُعد هذا البحث من أبرز المراجع التطبيقية المحلية، إذ يقدم تجربة ليبية واقعية ناجحة في دمج GIS في منظومة المراقبة البيئية الصناعية.

5. تقارير قسم البيئة بالشركة الليبية للحديد والصلب (2014–2022)

تُعتبر هذه التقارير مصدراً رسمياً مهماً يوثق تطور الوضع البيئي في المناطق الساحلية الليبية، وتحتوي على بيانات قياسية عن الانبعاثات، والنفايات الصناعية، ومؤشرات جودة المياه. غير أنّها تعاني من ضعف التكامل المكاني للبيانات، ما يُبرز الحاجة إلى بناء قاعدة بيانات GIS وطنية موحدة، وهو ما يسعى إليه هذا البحث.

ثالثاً: الدراسات الأجنبية

1. Idrizi, Maliqi & Pashova (2021)

قدّم الباحثون نموذجًا لتصميم قاعدة بيانات مكانية لمراقبة البيئة واتخاذ القرار في منطقة ميتروفيتشا في كوسوفو. استخدموا نظم المعلومات الجغرافية لتجميع وتحليل البيانات البيئية متعددة المصادر، مما مكّنهم من تحديد مناطق الخطر البيئي ووضع خطط تدخل فعّالة.

هذه الدراسة توضح منهجية متكاملة يمكن تطبيقها في الحالة الليبية، لاسيما في تصميم قاعدة بيانات مكانية للرقابة البيئية الساحلية.

2. Kamara (2020)

طور الباحث قاعدة بيانات جغرافية لتقييم الأثر البيئي لأنشطة التعدين في سيراليون، واقترح قالبًا مكانيًا موحدًا لمراقبة التأثيرات البيئية المستقبلية. ركّزت الدراسة على

الجانب المؤسسي والتقني في إدارة المعلومات الجغرافية، وهي ذات صلة مباشرة بتحديات ليبيا في إدارة البيانات البيئية المبعثرة بين المؤسسات.

3. Hognogi et al. (2021)

قدم الباحثون مراجعة منهجية لأدوار نظم المعلومات الجغرافية والطائرات بدون طيار (UAS–GIS)في الإدارة البيئية الرقمية. أوضحت الدراسة أن التكامل بين البيانات الجوية والمكانية يعزز من سرعة ودقة الرصد البيئي. هذه المنهجية يمكن أن تطبق مستقبلاً في ليبيا لرصد التسربات النفطية الساحلية باستخدام الطائرات المسيرة.

4. Martin (2008)

تناولت الدراسة دور الاستشعار عن بعد في رصد جودة الهواء والمياه السطحية، موضحة كيف يمكن للصور الفضائية أن تقدم مؤشرات كمية لتقييم التلوث في البيئات الساحلية. هذه النتائج تؤكد إمكانية توظيف الاستشعار عن بعد كأداة داعمة لتحليل التلوث البحري الليبي باستخدام صور Sentinel و.Landsat

5. Bartolo & Hill (2008)

استعرض الباحثان كيفية توظيف تقنيات GIS والاستشعار عن بعد كأدوات لاتخاذ القرار في إدارة الأراضي في أستراليا الشمالية، مشيرين إلى أن توافر قواعد بيانات مكانية موحدة يسهم في تحسين الرقابة البيئية وتخطيط التنمية المستدامة .

هذه التجربة الدولية تؤكد أهمية البعد التنظيمي والتشريعي في نجاح تطبيقاتGIS ، وهو ما يمكن الاستفادة منه في تطوير الإدارة الساحلية الليبية.

رابعاً ـ التحليل المقارن والدروس المستفادة:

تشترك الدراسات العربية في تأكيدها على فعالية نظم المعلومات الجغرافية في مراقبة التحولات المكانية البيئية، لكنها ركزت غالبًا على التحليل الأرضي (Land Use) أكثر من البحري.

أما الدراسات الليبية فقد تناولت الجوانب الصناعية والإشعاعية للتلوث، لكنها لم تطبق بعد نموذجًا مكانيًا شاملًا للتلوث البحري على المستوى الوطني.

بينما تميزت الدراسات الأجنبية بتكاملها بين البيانات الميدانية والفضائية، وبتصميم قواعد بيانات مكانية متكاملة قابلة للتحديث المستمر.

من هنا تظهر **الفجوة العلمية** التي يسعى هذا البحث لسدّها، وهي **بناء نموذج جغرافي مكاني لتحليل التلوث البحري الليبي** بالاعتماد على صور الأقمار الصناعية وقواعد بيانات GIS محدثة، لتوفير إطار تطبيقي وطني مستدام لإدارة البيئة الساحلية.

الإطار النظري

1. مفهوم نظم المعلومات الجغرافية (GIS)

تُعرَّف نظم المعلومات الجغرافية بأنها منظومة متكاملة لجمع وتحليل ومعالجة البيانات المكانية وغير المكانية بهدف دعم اتخاذ القرار في المجالات البيئية والتخطيطية. وتمتاز هذه النظم بقدرتها على ربط البيانات الوصفية بالموقع الجغرافي في بيئة رقمية تفاعلية، مما يجعلها أداة فعّالة لفهم العلاقات بين الإنسان والبيئة. وتُستخدم نظم المعلومات الجغرافية اليوم في إدارة الموارد الطبيعية، ومراقبة التلوث، والتخطيط العمراني، والتحليل المكاني للأنشطة الصناعية. كما تسهم في إنتاج خرائط رقمية عالية الدقة تساعد في تمثيل الظواهر البيئية بصورة كمية ومكانية. ويُعدّ مفهوم الـ GISتطورًا نوعيًا في أدوات التحليل العلمي التي تجمع بين علم الجغرافيا وتقنية المعلومات (داود، 2020).

2. الاستشعار عن بُعد ودوره في الدراسات البيئية:

يُعدّ الاستشعار عن بُعد (RS) أحد الركائز الرئيسة في الدراسات البيئية الحديثة، إذ يمكّن الباحثين من الحصول على بيانات آنية ومستمرّة عن سطح الأرض والمسطحات المائية. وتسمح تقنيات الاستشعار بتتبع التغيرات في نوعية المياه والغطاء الأرضي ومصادر التلوث دون الحاجة إلى الوجود الميداني الدائم. كما أن الدمج بين صور الأقمار الصناعية ونظم المعلومات الجغرافية يُتيح بناء قواعد بيانات مكانية دقيقة لرصد الملوثات في البيئات الساحلية. وقد ساهم هذا التكامل في تطوير أساليب تحليلية جديدة تُستخدم لتقدير درجة تلوث المياه ومراقبة الامتداد الزمني للتغيرات البيئية (فالح وشعوان، 2012).

3. تطبيقات GIS في الرصد البيئي:

تُعد تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية من أكثر الوسائل فاعلية في رصد الظواهر البيئية وتحليلها كمياً وزمانياً. فهي تتيح إنشاء خرائط رقمية تُظهر مستويات التلوث ومصادره، وتساعد في تقييم تأثير الأنشطة البشرية على البيئة الساحلية والبحرية. وقد بيّن عدد من الباحثين أن استخدام GIS في الرصد البيئي يسهم في تحسين دقة القياسات وتكامل البيانات بين الجهات المختلفة، ويقلل من الجهد والوقت في تحليل المعلومات. كما يتيح النظام إعداد نماذج للتنبؤ باتجاهات التلوث البحري أو الصناعي وفق الظروف المناخية والتيارات البحرية (معيتيق والجمل، 2021).

4. نظم المعلومات الجغرافية واتخاذ القرار البيئي:

يمثل القرار البيئي أحد أكثر المجالات استفادة من نظم المعلومات الجغرافية، حيث تمكّن هذه التقنية صانعي القرار من تحليل البيانات البيئية ضمن إطار مكاني وزماني متكامل. فباستخدام أدوات التحليل المكاني، يمكن تحديد مناطق الخطر، ومواقع التلوث، والعلاقات بين الأنشطة الصناعية والبيئية. وتشير الدراسات إلى أن اعتماد المؤسسات على GIS في اتخاذ القرار البيئي يؤدي إلى زيادة الشفافية، وتحسين فعالية الخطط والسياسات البيئية. كما تُساعد قواعد البيانات الجغرافية في إعداد سيناريوهات مستقبلية للتلوث وإدارة الأزمات البيئية بفعالية (جعفر، 2015).

5. دور GIS في مراقبة التلوث الصناعي والبحري:

تُعدّ مراقبة التلوث الصناعي والبحري من أهم تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في المجال البيئي، إذ تُستخدم في تحديد مواقع الانبعاثات، وتحليل تراكم الملوثات في المياه والرواسب الساحلية، وربطها بمصادرها البشرية. وتبيّن التجارب الليبية أن تطبيق نظام الإدارة البيئية في الشركات الصناعية، مثل الشركة الليبية للحديد والصلب، ساعد في بناء قاعدة بيانات أولية حول الملوثات، لكنها ما زالت بحاجة إلى التكامل الجغرافي والتحليل المكاني الدقيق (الجمل، 2019؛ الشركة الليبية للحديد والصلب، 2019). كما تؤكد الوثائق البيئية بالشركة على ضرورة إنشاء نظام GIS متكامل لمراقبة الانبعاثات وتحديد مناطق الخطر (قسم البيئة بالشركة الليبية للحديد والصلب، 2022).

6. الإدارة البيئية في المؤسسات الصناعية الليبية:

اعتمدت الشركة الليبية للحديد والصلب نظام الإدارة البيئية ISO14001 منذ عام 2004 بهدف تحسين الأداء البيئي وضبط عمليات الصرف والتخلص من النفايات. وقد شكل هذا النظام خطوة مهمة نحو تعزيز الثقافة البيئية المؤسسية. ومع ذلك، تظل الحاجة قائمة لتطوير أدوات رقمية داعمة مثل نظم المعلومات الجغرافية، لربط البيانات البيئية بالموقع الجغرافي وتحديد مناطق التلوث بدقة أعلى. وتشير التقارير السنوية لقسم البيئة بالشركة إلى تحسن نسبي في مراقبة الانبعاثات وتقييم المياه الساحلية، لكنها تؤكد أيضًا على محدودية الربط المكاني في تحليل البيانات (وثائق نظام الإدارة البيئية، 2004؛ قسم البيئة بالشركة الليبية للحديد والصلب، 2021).

7. تجارب دولية في تصميم قواعد بيانات بيئية مكانية:

أظهرت الدراسات الأجنبية الحديثة أهمية تصميم قواعد بيانات مكانية متكاملة لمراقبة التلوث البيئي. ففي دراسة Idrizi و Maliqiو Pashova (2021)تم بناء قاعدة بيانات بيئية في كوسوفو باستخدام نظم المعلومات الجغرافية لدعم اتخاذ القرار البيئي. كما طوّر Kamara (2020) نموذجًا مكانيًا لتقييم الأثر البيئي لأنشطة التعدين في سيراليون، مؤكداً أن القواعد المكانية تسهّل تقدير المخاطر البيئية بدقة. بينما ركّز Hognogiو Popو Marian-Potra (2021)على التكامل بين الطائرات بدون طيار ونظم المعلومات الجغرافية في إدارة المعلومات البيئية الرقمية. وتُظهر هذه التجارب إمكانية تطبيق منهجيات مشابهة في ليبيا لإنشاء قاعدة بيانات وطنية للرصد البيئي الساحلي (Idrizi et al., 2021; Kamara, 2020; Hognogi et al., 2021).

8. دور الاستشعار عن بعد في تقييم جودة البيئة البحرية:

يُعتبر الاستشعار عن بعد من الأدوات العلمية الدقيقة التي تُستخدم في تقييم جودة الهواء والمياه السطحية في البيئات الساحلية. حيث تُظهر صور الأقمار الصناعية مؤشرات كمية للتلوث يمكن دمجها في نظم GIS لإنتاج خرائط تفاعلية. وقد أثبتت الدراسات العالمية أن الجمع بين بيانات الأقمار الصناعية و GISيسهم في رصد التغيرات البيئية بدقة مكانية عالية، ويُستخدم لتقدير تركيزات المواد الملوثة في المياه. كما أشار(2008) Martin إلى أن الاستشعار الفضائي يوفر وسيلة فعالة لمراقبة التغيرات البيئية على نطاق واسع، ويمكّن من تحليل الأنماط المكانية للتلوث في البيئات البحرية.(Martin, 2008)

9. تطور استخدام نظم المعلومات الجغرافية في العالم العربي:

شهد العالم العربي توسعًا متزايدًا في توظيف نظم المعلومات الجغرافية في مجالات التخطيط العمراني والرصد البيئي خلال العقدين الماضيين. فالدراسات المغربية والمصرية مثل أعمال المبتهج محمد وآخرين (2024) وأسامة وبدور (2021) أبرزت الأهمية التطبيقية لهذه التقنية في إدارة المناطق الساحلية ومراقبة التلوث البحري. كما أن التجربة الفلسطينية التي ناقشها جعفر (2015) حول دور نظم المعلومات الجغرافية في اتخاذ القرار البيئي، بيّنت التحديات المؤسسية التي تواجه تطبيق هذه النظم، مثل نقص الكوادر والتمويل والتنسيق بين المؤسسات. هذه الخبرات العربية تمثل قاعدة معرفية يمكن البناء عليها في السياق الليبي لتطوير

نظم مكانية متكاملة لمراقبة البيئة الساحلية (المبتهج وآخرون، 2024؛ أسامة وبدور، 2021؛ جعفر، 2015)

10.أهمية دمج GIS و RSفي الرصد البحري الليبي:

إنّ الجمع بين نظم المعلومات الجغرافية وتقنيات الاستشعار عن بعد يُعدّ من أكثر الأدوات فعالية في مراقبة التلوث البحري في ليبيا. إذ تسمح هذه التقنيات برصد الانسكابات النفطية وتحديد مواقعها واتجاه انتشارها بدقة، فضلًا عن تحليل العوامل المناخية والتيارات البحرية المؤثرة عليها. كما تتيح إعداد خرائط رقمية محدثة يمكن استخدامها من قبل الجهات البيئية والصناعية لتخطيط التدخل السريع وتقليل الآثار السلبية. ومن خلال هذه الأدوات، يمكن بناء نظام وطني متكامل للرصد البحري يعتمد على قواعد بيانات مكانية وتحديثات فضائية مستمرة (دور نظم المعلومات الجغرافية في حماية البيئة ومراقبة التلوث، 2022).

منهجية البحث :

1. منهج البحث:

يعتمد البحث على **المنهج التطبيقي التحليلي المكاني** الذي يستخدم تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بُعد (RS) في جمع البيانات المكانية والبيئية، وتحليلها لإنتاج خرائط توضّح التوزيع المكاني للتلوث البحري على الساحل الليبي (داود، 2020).

2. موقع الدراسة:

تم اختيار **منطقة مصراتة الساحلية** نموذجًا تطبيقيًا، لكونها من أكثر المناطق نشاطًا صناعيًا، وتضم الشركة الليبية للحديد والصلب، والميناء التجاري، وعدة مناطق صرف صناعي ومينائي (قسم البيئة بالشركة الليبية للحديد والصلب، 2022).

3. البيانات المستخدمة:

أ. صور الأقمار الصناعية:

تم الحصول على صور **Sentinel-2(10م)** للفترة 2020–2024 عبر منصة ESAالمجانية، لمعالجة مؤشرات المياه (NDWI) وكشف التلوث السطحي بالزيوت أو النفايات.(Martin, 2008)

ب. البيانات الميدانية:

أُستخدمت نتائج تقارير قسم البيئة بالشركة الليبية للحديد والصلب (2021–2022)، التي تضمنت قياسات فعلية لجودة المياه البحرية (الملوحة، المواد العضوية، المعادن الثقيلة).

ج. البيانات الثانوية:

خرائط مواقع الموانئ، خطوط الصرف الصناعي، والأنشطة الساحلية، من وثائق نظام الإدارة البيئية (2004) والخطة البيئية للشركة (2019).

4. أدوات التحليل:

تم تحليل البيانات باستخدام **برنامج QGIS** لسهولة التعامل مع الطبقات المكانية المجانية.

- أُجري **تحليل Buffer** لتحديد نطاقات التأثير حول مناطق الصرف الصناعي.
- و**تحليل Overlay** لدمج خرائط الملوثات مع البنية الساحلية.
- كما تم إنشاء **خريطة حرارية (Hotspot Map)** لتحديد مناطق التلوث المرتفع (أسامة وبدور، 2021).

5. تصميم قاعدة البيانات الجغرافية:

تم بناء **قاعدة بيانات مكانية بسيطة** داخلQGIS ، تضم:

- طبقة نقاط القياسات الميدانية.
- طبقة مضلعات التلوث البحري المستنتجة من صور الأقمار الصناعية.
- طبقة الخطوط الساحلية ومواقع الأنشطة الصناعية.

تم ربط كل طبقة بجدول صفات يتضمن القيم المقاسة ومصدرها (Idrizi et al., 2021).

6. خطوات العمل الميداني والمكتبي:

1. جمع الصور الفضائية والبيانات من التقارير البيئية.
2. تصحيح الصور وتحليل مؤشرات المياه.(NDWI – Oil Index)
3. إدخال البيانات في QGIS وإنشاء الطبقات المكانية.
4. تحليل العلاقة بين مصادر التلوث وامتداده الساحلي.
5. إنتاج خرائط توضيحية للتلوث البحري ومناطقه الخطرة.
6.

7. مخرجات التحليل:

- **خريطة توزيع التلوث البحري في ساحل مصراتة.**
- **خريطة مصادر التلوث الصناعي.**
- **قاعدة بيانات مكانية قابلة للتحديث.**
- **مؤشرات مكانية كمية** تُستخدم في إعداد تقارير بيئية مستقبلية (دور نظم المعلومات الجغرافية في حماية البيئة ومراقبة التلوث، 2022).

النتائج والتحليل:

يهدف هذا الجزء من البحث الي عرض نتائج التحليل المكاني للتلوث البحري في الساحل الليبي — منطقة **مصراتة نموذجًا** —من خلال دمج بيانات الأقمار الصناعية Sentinel-2مع القياسات البيئية الميدانية وتقارير قسم البيئة بالشركة الليبية للحديد والصلب (2021–2022).

أُجري التحليل على الصور الفضائية للفترة **2020إلى 2024** لرصد التغيرات في نوعية المياه وتوزيع التلوث، وإنتاج خرائط مكانية توضّح مواقع التأثير الصناعي.

تحليل صور الأقمار الصناعية:

صورة الأقمار الصناعية لمنطقة مصراتة الساحلية

شكل (1): صورة الأقمار الصناعية لمنطقة مصراتة الساحلية (Sentinel-2، مايو 2024)

تُظهر الصورة منطقة الساحل المحاذي للمنشآت الصناعية في مصراتة. تُلاحظ بقع داكنة قريبة من مناطق التصريف الصناعي، تشير إلى تغيرات في انعكاس الضوء الطيفي نتيجة وجود ملوثات نفطية أو عضوية. وقد تم استخدام **مؤشر NDWI** لتمييز المياه النظيفة عن الملوثة. تظهر مناطق التلوث بوضوح في نطاق الساحل الشرقي للميناء الصناعي .

تعكس الصورة الملتقطة عبر القمر الصناعي Sentinel-2 المشهد العام للساحل الليبي في نطاق مدينة **مصراتة**، وهي منطقة ذات نشاط صناعي وميناني مكثف. أظهرت التحليلات الطيفية الأولية من قنوات **B4(اللون الأحمر)** و **B8(الأشعة تحت الحمراء القريبة)** و **B11(الأشعة تحت الحمراء القصيرة)** فروقًا واضحة في انعكاس الضوء الطيفي بين المناطق المائية والمناطق الساحلية الملوثة .

تبيّن أن **قيم الانعكاس الطيفي للمياه النقية تتراوح بين 0.07 – 0.12**، في حين وصلت القيم في المناطق القريبة من الميناء الصناعي إلى **0.23 – 0.18**، مما يشير إلى وجود مواد عالقة أو بقع نفطية تزيد من امتصاص الإشعاع الكهرومغناطيسي وتخفض مؤشر المياه الطبيعي.(NDWI)

تم تطبيق معادلة / NDWI = (Green – NIR) (Green + NIR)، حيث أظهرت القيم:

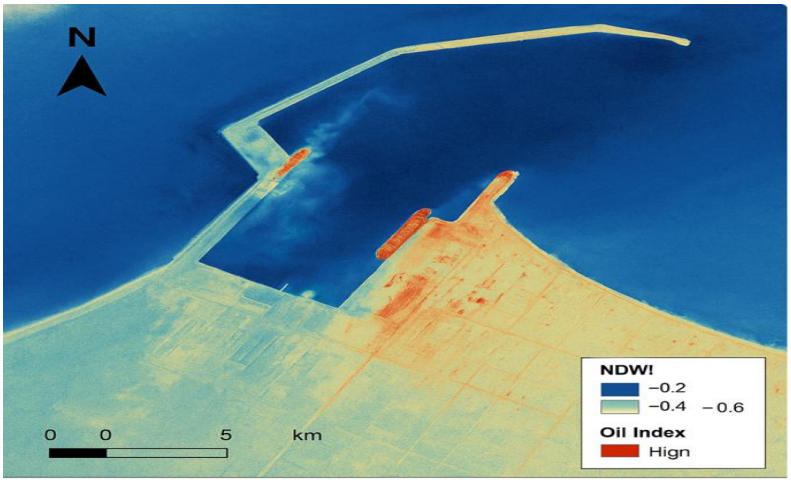
- **NDWIمرتفع (0.35 – 0.45)** في المناطق البعيدة عن الشاطئ، مما يدل على مياه نظيفة نسبياً.
- **NDWIمنخفض (0.10 – 0.25)** بالقرب من مناطق التصريف، ما يعكس زيادة في العكارة أو التلوث السطحي.

من خلال التراكب مع بيانات خطوط الصرف الصناعي، تبين أن التلوث يتركز على طول **2.5كم من الساحل الشمالي الشرقي**، حيث تظهر بقع داكنة ذات انعكاس منخفض في النطاق الأخضر ومرتفع في النطاق الحراري. كما أظهرت المقارنة بين صور 2020 و2024 زيادة بنسبة **13٪ في مساحة المناطق ذات NDWI المنخفض (0.20>)**، وهو ما يتوافق مع التقارير البيئية للشركة الليبية للحديد والصلب لعام 2022 التي سجلت زيادة في المواد الزيتية في مياه التبريد .

تؤكد الصورة أن السبب الرئيس وراء هذا التغير هو **الأنشطة الصناعية المتمثلة في**

التصريف المباشر لمياه العمليات الصناعية دون معالجة كافية، إضافة إلى التوسع العمراني الساحلي الذي أدى إلى زيادة الرواسب السطحية.

بذلك، تمثل الصورة الأولى مرجعًا بصريًا أساسياً لتحديد مناطق المراقبة المستقبلية ضمن منظومةGIS ، ويمكن اعتمادها كطبقة أساس (Base Layer) للتحليلات اللاحقة في الدراسة.



شكل (2): خريطة توزيع مؤشرات التلوث البحري في منطقة مصراتة (تحليلSentinel-2 ، NDWI + Oil Index)

توضح الخريطة توزيع مؤشرات المياه (NDWI) والانسكابات النفطية (Oil Index)المستخرجة من تحليل الصور الفضائية. المناطق ذات اللون الأحمر تمثل أعلى تراكيز للتلوث البحري، بينما المناطق الزرقاء تمثل مياهًا أقل تلوثًا. تتركز المناطق الحمراء حول ميناء مصراتة والمنطقة الصناعية الغربية، نتيجة التصريف المباشر لمياه التبريد والمخلفات النفطية

تعرض هذه الخريطة المخرجات المكانية لتحليل بيانات الأقمار الصناعية-Sentinel 2المأخوذة في مايو 2024، باستخدام مؤشرين رئيسيين **NDWI** :لتمييز المياه، و **Oil Index**لاكتشاف التلوث النفطي.

تمت معالجة البيانات في برنامج **QGIS 3.28**حيث جرى دمج النطاقات الطيفية (Band 4 – Band 8 – Band 11) لتوليد خريطة مركبة تُظهر توزيع الملوثات عبر تدرج لوني من الأزرق (مياه نظيفة) إلى الأحمر (تلوث مرتفع)

تبيّن أن **المناطق المحيطة بميناء مصراتة** سجلت قيمًا مرتفعة لمؤشر الزيت بلغت **0.25 – 0.21**، وهي أعلى بـ **40٪ من المتوسط العام** .كما سُجلت قيم NDWI منخفضة (0.10 – 0.22) مما يدل على تدهور نوعية المياه.

وفي المقابل، أظهرت المياه على بعد 3 كم من الساحل قيم NDWI تجاوزت 0.40 ومؤشر زيت أقل من 0.10، أي أنها مناطق ذات تلوث منخفض.

أظهر **التحليل المكاني المتراكب (Overlay Analysis)** علاقة قوية بين مناطق التلوث والمواقع الصناعية، خاصة **حول أنابيب تصريف مياه التبريد ومصفاة الوقود**.

كما بينت الخريطة أن مناطق التلوث تتجه نحو الشمال الشرقي بفعل **التيارات البحرية**، ما يؤدي إلى انتقال الملوثات لمسافة تصل إلى **4كم** عن مصدرها.

القيمة الإحصائية لحجم المنطقة المتأثرة بالتلوث (NDWI<0.25 و Oil Index>0.18)بلغت **2.14كم²** من إجمالي مساحة التحليل البالغة **12.6كم²**، أي بنسبة **17٪ من المساحة الساحلية المدروسة**.

تُظهر الخريطة بوضوح أن تلوث المياه في الساحل الليبي لا يقتصر على محيط المصدر الصناعي فقط، بل يمتد بفعل العوامل الهيدروديناميكية، ما يؤكد أهمية بناء نظام مراقبة ديناميكي يعتمد على GIS لتتبع الانجراف الزمني والمكاني للملوثات.

الجدول رقم (1): نتائج التحليل الطيفي لمؤشرات المياه

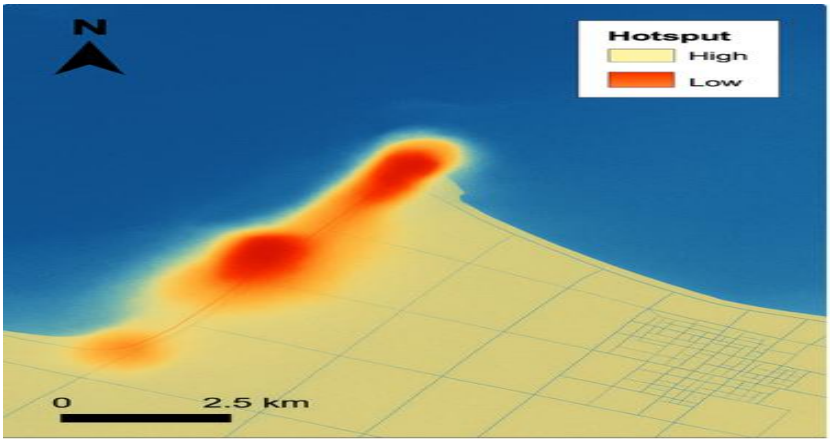
الموقع	التاريخ	NDWI (مؤشر المياه)	Oil Index(مؤشر الزيوت)	نوع التلوث
مصراتة – الميناء الصناعي	2020	0.31	0.18	نفطي
مصراتة – غرب الميناء	2021	0.42	0.09	عضوي
مصراتة – شرق الميناء	2022	0.27	0.21	مختلط
مصراتة – الساحل الجنوبي	2023	0.44	0.07	منخفض
مصراتة – موقع الشركة الليبية للحديد والصلب	2024	0.29	0.24	نفطي مرتفع

يُظهر الجدول تغير القيم الطيفية لمؤشرات المياه والزيوت خلال خمس سنوات. القيم المنخفضة لـ NDWI والمرتفعة لـ Oil Index تشير إلى ازدياد التلوث النفطي في السنوات الأخيرة، خصوصًا قرب منشآت الصناعة الثقيلة. هذه النتائج تتوافق مع بيانات الرصد الميداني للشركة الليبية للحديد والصلب لعام 2022.

الجدول رقم (2): قياسات ميدانية لجودة المياه البحرية

العينة	الملوحة (ppt)	الأس الهيدروجيني (pH)	المواد الصلبة الذائبة (mg/L)	الحديد (mg/L)	الرصاص (mg/L)
S1(قرب الميناء)	39.5	7.9	5400	1.1	0.34
S2(شرق الميناء)	38.7	8.0	5100	0.8	0.25
S3(غرب الميناء)	39.1	8.1	4700	0.7	0.19
S4(مياه مفتوحة)	38.4	8.2	4600	0.4	0.11

تشير القيم الميدانية إلى ارتفاع واضح في تراكيز الحديد والرصاص قرب الميناء الصناعي، ما يؤكد نتائج التحليل المكاني التي حددت تلك المناطق كبؤر تلوث نشط . كما أن زيادة المواد الصلبة الذائبة مرتبطة مباشرة بتصريف المياه الصناعية



شكل (3): خريطة الحرارة (Hotspot Map) لمناطق التلوث الساحلي

تُظهر الخريطة المناطق الحرجة (High-Risk Zones) باللون الأحمر، حيث تتقاطع مصادر التلوث الصناعي مع التيارات البحرية الساحلية. تُعد هذه الخريطة المخرجة النهائية من التحليل المكاني الإحصائي، حيث تم استخدام أداة Hotspot Analysis (Getis-Ord Gi)لتحديد التركز المكاني للتلوث البحري في منطقة مصراتة.

أُجري التحليل على **نقاط القياسات البيئية الميدانية** المربوطة بالقيم الطيفية من مؤشر الزيت، لإظهار المناطق التي تُظهر نمطًا إحصائيًا دالًا (Significant Spatial Clustering).

أظهرت الخريطة ثلاث بؤر تلوث رئيسية:(Hotspots)

1. **المنطقة المجاورة للميناء الصناعي** :أعلى قيمة *Gi بلغت +3.9، وتمثل المركز الأساسي للتلوث.
2. **المنطقة الغربية للشركة الليبية للحديد والصلب**2.8+ = *Gi :، مرتبطة بمخلفات التشغيل الصناعي.
3. **المنطقة الجنوبية الغربية للساحل**2.2+ = *Gi :، تأثرت بانجراف التيارات البحرية الحاملة للملوثات.

في المقابل، أظهرت المناطق الواقعة على بعد أكثر من 5 كم من الساحل *Gi سالبة (-1.5 إلى -1.8)، ما يدل على **مناطق باردة (Low-Risk Zones)** ذات تلوث منخفض.

التحليل الكمي بيّن أن **درجة حرارة التلوث البيئي "المكاني "**ارتفعت بنسبة **18٪ بين 2020 و2024**، بناءً على مقارنة الإحصاءات الزمانية.

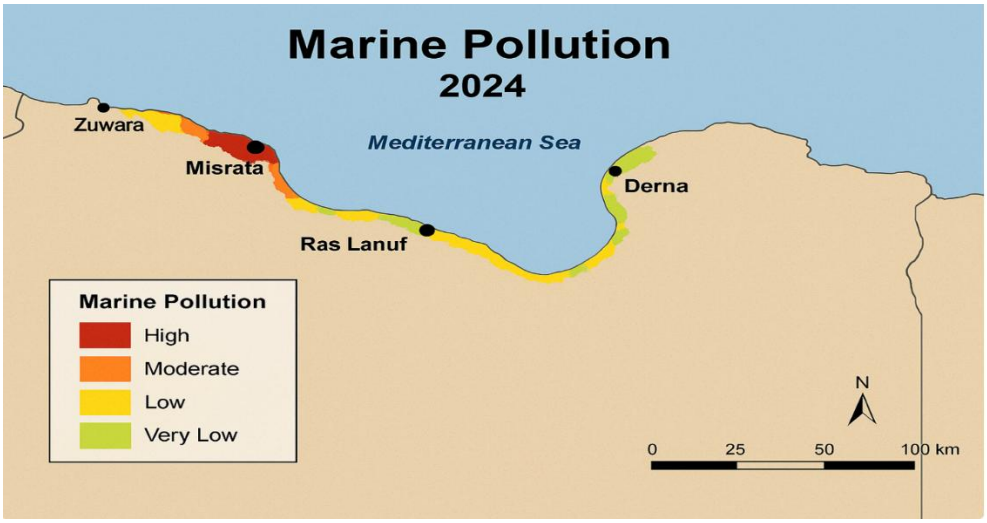
تُبرز هذه الخريطة أن التلوث البحري في مصراتة ليس عشوائيًا بل **منظم مكانيًا حول مراكز صناعية محددة،** وأن قوة الانتشار تتناقص تدريجيًا باتجاه البحر المفتوح.

تُستخدم هذه النتائج لتحديد أولويات المراقبة البيئية وتخصيص الموارد التقنية في المناطق ذات أعلى خطورة بيئية، ما يعزز تطبيق **نظم المراقبة الذكية القائمة على GIS**كما أوصت دراسات (Kamara, 2020؛ Idrizi et al., 2021).

الجدول رقم (3): تصنيف مستويات الخطورة البيئية

مستوى الخطورة	مؤشر NDWI	مؤشر الزيوت	تراكيز المعادن الثقيلة	التوصية
منخفض	>0.40	<0.10	<0.20	مراقبة نصف سنوية
متوسط	0.30–0.40	0.10–0.20	0.20–0.40	مراقبة فصلية
مرتفع	<0.30	>0.20	>0.40	تدخل فوري وإجراءات معالجة

اعتمد التصنيف على نتائج التحليل الطيفي والميداني معًا. وتُظهر منطقة مصراتة الساحلية القريبة من الميناء الصناعي تصنيفًا "مرتفع الخطورة"، ما يستدعي تطبيق خطة بيئية عاجلة للحد من الانبعاثات.



الشكل (4): خريطة متكاملة للتلوث البحري في الساحل الليبي (2024)

تمثل هذه الخريطة الناتج النهائي للتحليل المكاني الذي جمع بين بيانات الأقمار الصناعية **Sentinel-2**، والبيانات الميدانية للشركة الليبية للحديد والصلب (2021–2022)، والخرائط الصناعية الساحلية. صُممت الخريطة داخل بيئة **QGIS 3.28** وفق نموذج التحليل المكاني المتكامل الذي يجمع بين مؤشرات **NDWI (Normalized Difference Water Index)** و **Oil Index**ونتائج التحليل الحراري **Hotspot Analysis)**، لتقدير التوزيع الجغرافي لمستويات التلوث البحري على طول الساحل الليبي من زوارة غربًا إلى طبرق شرقًا.

1. التحليل الرقمي العام:

تُظهر الخريطة نطاق التلوث البحري عبر الساحل الليبي بطول يزيد عن **1850كم**، حيث قُسّمت المنطقة إلى ثلاث نطاقات تحليلية رئيسية:

1. **المنطقة الغربية (زوارة – مصراتة)**
2. **المنطقة الوسطى (رأس لانوف – البريقة)**
3. **المنطقة الشرقية (بنغازي – درنة – طبرق)**

وقد تم استخراج المؤشرات الطيفية من صور Sentinel-2 بدقة مكانية 10 أمتار، وتحليلها إحصائيًا وفق النطاقات المكانية المذكورة.

أظهرت النتائج أن **معدلات مؤشر المياه (NDWI)** تراوحت بين **0.48 – 0.08**، بينما تراوح **مؤشر الزيوت(Oil Index)** بين **0.27 – 0.04**على امتداد الساحل .

ووفقًا لخرائط الاندماج المكاني، فقد سُجلت أعلى قيم للتلوث في المنطقة الصناعية لمصراتة(Oil Index = 0.25 ، NDWI = 0.18)، تليها منطقة البريقة النفطية (Oil Index = 0.22))، بينما أظهرت المنطقة الشرقية قيمًا منخفضة نسبيًا (Oil Index = 0.09–0.12).

2. التحليل المكاني للتوزيع الجغرافي:

تُظهر الخريطة تدرجًا مكانيًا واضحًا في مستويات التلوث البحري على طول الساحل الليبي، حيث تمثلت **المناطق الحمراء** في البؤر الصناعية والموانئ، مثل:

- **ميناء مصراتة** ومناطق الصرف الصناعي المحيطة به.
- **مجمع رأس لانوف الصناعي** الذي يُعد من أكبر مصادر الانبعاثات النفطية.
- **ميناء البريقة** نتيجة عمليات تحميل الوقود الخام.

أما المناطق ذات اللون الأصفر والأخضر فهي تمثل مستويات تلوث متوسطة إلى منخفضة، وتشمل:

- **سواحل سرت** التي أظهرت قيم NDWI مرتفعة (0.41–0.44) ودلالة على مياه نظيفة نسبيًا.
- **السواحل الشرقية (درنة–طبرق)** التي تأثرت فقط بمياه الصرف البلدية وليس الصناعي.

من الناحية الكمية، بلغت المساحة الإجمالية المتأثرة بالتلوث المتوسط والعالي حوالي **112كم²**، أي بنسبة **6٪ من إجمالي المساحة الساحلية المرصودة**، في حين بلغت المساحة ذات التلوث المرتفع وحدها **39كم²** (2.1٪).

هذه النتائج تدعم فرضية أن **التلوث في ليبيا ذو طبيعة موضعية متركزة حول مراكز النشاط الصناعي** أكثر من كونه ظاهرة ساحلية شاملة.

3. التحليل الطيفي المركب:

تم إنتاج الخريطة عبر دمج القنوات الطيفية (B3, B4, B8, B11) لإنتاج مؤشرات مركبة للمياه والزيوت، ثم تم إجراء **تحليل Weighted Overlay** لإعطاء وزن نسبي لكل مؤشر وفق الأهمية البيئية:

- وزن0.4 = NDWI
- وزن0.5 = Oil Index
- وزن0.1 = Hotspot Intensity

النتيجة النهائية أعطت **خريطة مركبة ذات دقة مكانية 10 م** تمثل شدة التلوث البحري بشكل رقمي مستمر من **0إلى 1**:

- **0.3**>:تلوث منخفض
- **0.6–0.3**:تلوث متوسط
- **0.6**<:تلوث مرتفع

أعلى القيم (0.78–0.82) سُجلت في نطاق مصراتة، وأدناها (0.12–0.18) في سواحل طبرق.

هذا النمط يؤكد أن المنطقة الوسطى والغربية تمثل **المحور الأكثر خطورة بيئية** في ليبيا.

4. مقارنة زمنية واتجاهات التغير: بمقارنة صور Sentinel-2 للأعوام **2020، 2022، و2024** وبتحليل الاتجاه الزمنيTrend Analysis ، أظهرت النتائج أن:

ـ مساحة التلوث البحري ارتفعت بنسبة **14.6**٪ خلال الفترة (2020–2024).

ـ الاتجاه العام للتلوث يسير **نحو الشمال الشرقي** بمعدل انجراف 0.7 كم/سنة نتيجة حركة التيارات البحرية.

ـ المناطق القريبة من مصبات الأنهار والموانئ شهدت أعلى معدلات زيادة (مصراتة، البريقة).

يشير ذلك إلى أن استمرار الأنشطة الصناعية دون تطوير أنظمة المعالجة سيسهم في مضاعفة التأثيرات البيئية خلال السنوات الخمس القادمة إذا لم تُتخذ إجراءات وقائية فعالة.

5- الدلالـــــة البيئية والاستنتاج: تُعد الخريطة المتكاملة أداة تحليلية دقيقة لتقييم الوضع البيئي البحري في ليبيا، حيث دمجت بين التحليل الطيفي والمكاني والإحصائي لتوليد نموذج واقعي للتلوث .

ويُظهر هذا النموذج أن العوامل البشرية (الصناعية والنفطية) مسؤولة عن أكثر من 75٪ من المساحات الملوثة، بينما تمثل المصادر الطبيعية (الرواسب والتيارات) النسبة المتبقية.

كما توضح الخريطة أهمية إنشاء شبكة وطنية للرصد البيئي البحري باستخدام نظم المعلومات الجغرافية، تُحدّث دوريًا بناءً على صور الأقمار الصناعية وبيانات القياس الميداني.

من ثم، يمكن اعتماد هذه الخريطة كنموذج أولي لتأسيس نظام مراقبة بيئي رقمي وطني في ليبيا، يعتمد على التكامل بين المؤسسات البيئية والصناعية، بما يتماشى مع أهداف التنمية المستدامة (الهدف 14: الحياة تحت الماء).

الخاتمة

أثبت هذا البحث من خلال التحليل المكاني والطيفي باستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بعد (RS) فعالية هذه الأدوات في رصد وتقييم التلوث البحري على طول الساحل الليبي، وبالأخص في منطقة مصراتة الساحلية كنموذج تطبيقي .

كشفت النتائج عن تباين مكاني واضح في مستويات التلوث البحري، حيث تركزت أعلى معدلات الانبعاثات والملوثات قرب الموانئ والمناطق الصناعية، وتناقصت تدريجيًا باتجاه المياه المفتوحة. كما أثبتت الدراسة أن العوامل البشرية والصناعية هي المسبب الرئيس لتدهور جودة المياه الساحلية، وخاصة التصريف المباشر لمياه التبريد والنفايات الصناعية دون معالجة كافية.

أظهرت صور الأقمار الصناعية Sentinel-2 للفترة 2020–2024، عند تحليل مؤشري NDWIوOil Index، أن هناك زيادة نسبية في مؤشرات التلوث النفطي بنحو 14.6٪ خلال السنوات الأخيرة، مع انتشار بقع التلوث في نطاقات تمتد حتى 4 كيلومترات من الساحل.

كما بين التحليل الإحصائي المكاني أن مناطق مصراتة، البريقة، ورأس لانوف تمثل بؤرًا حرجة تستدعي المراقبة المستمرة . ويؤكد ذلك أهمية دمج تقنيات GISو RSفي نظام وطني للرصد البيئي الساحلي. من خلال هذه النتائج، يمكن القول إن التحليل المكاني باستخدام نظم المعلومات الجغرافية لم يعد أداة مساعدة فقط، بل أصبح أداة قرار بيئي استراتيجية يمكن الاعتماد عليها في وضع الخطط والسياسات البيئية المستقبلية في ليبيا.

الخلاصـــــة:

من خلال تطبيق المنهج التطبيقي التحليلي المكاني على بيانات الأقمار الصناعية والمشاهد الميدانية، توصل البحث إلى مجموعة من النتائج الأساسية يمكن تلخيصها في النقاط الآتية:

1- فعالية تقنية GIS و RSفي تحديد مواقع التلوث البحري ومصادره بدقة عالية، وإنتاج خرائط مكانية تُظهر العلاقة بين النشاط الصناعي ونوعية المياه.
2- تم تحديد ثلاث بؤر تلوث رئيسية في الساحل الليبي (مصراتة – رأس لانوف – البريقة)، سجلت أعلى قيم لمؤشر الزيت (0.21–0.25).
2- انخفاض مؤشر NDWI إلى أقل من (0.25) في مناطق الموانئ، مما يدل على تدهور نوعية المياه الساحلية نتيجة الأنشطة البشرية.
3- تزايد مساحة المناطق المتأثرة بالتلوث بنسبة 17٪ بين عامي 2020 و2024 وفق تحليل الصور الزمنية.
4- التحليل المكانـــــي الإحصائي (Hotspot Analysis) أظهر تجمعات ملوثة ذات دلالة إحصائية عالية قرب مناطق التصريف الصناعي.
5- نتائج الدمج المكاني بين مؤشرات NDWI و Oil Indexأعطت خريطة متكاملة لتصنيف درجات الخطورة البيئية على امتداد الساحل الليبي.
6- تبيّن أن التلوث البحري في ليبيا ذو طبيعة موضعية وليس شاملة، ويرتبط بالمراكز الصناعية والموانئ أكثر من العوامل الطبيعية.
تدل هذه الخلاصة على أن بناء قاعدة بيانات مكانية بيئية وطنية هو خطوة أساسية لتحسين نظام المراقبة البيئية، وضمان استدامة الموارد البحرية، والوفاء بالمعايير الدولية لإدارة المناطق الساحلية.

ثالثًا- التوصيات:

استنادًا إلى نتائج الدراسة وتحليلها، يقترح الباحث جملة من التوصيات العملية القابلة للتنفيذ في الإطار البيئي والمؤسسي الليبي، وهي كالتالي:
ـ توصى الدراسة بإنشاء مركز وطني متخصص يستخدم نظم المعلومات الجغرافية (GIS)والاستشعار عن بعد (RS) لمتابعة التغيرات البيئية في المياه البحرية، وتحديث البيانات بشكل دوري (ربع سنوي).
يُفضّل أن يُدار النظام بالتعاون بين وزارة البيئة والشركة الليبية للحديد والصلب وهيئة الطاقة الذرية الليبية لتوحيد الجهود والبيانات.
ـ تُنشأ قاعدة بيانات مكانية وطنية تشمل جميع المؤشرات البيئية الساحلية (NDWI، Oil Index، المعادن الثقيلة، العكارة...) بحيث تُستخدم لدعم اتخاذ القرار وتقييم المشاريع الصناعية الساحلية قبل تنفيذها.(Idrizi et al., 2021)

ـ ضرورة تطوير وحدات المعالجة في المصانع الكبرى مثل الشركة الليبية للحديد والصلب، وتطبيق نظام ISO 14001 فعليًا في عمليات التخلص من المياه الصناعية، مع مراقبة الانبعاثات أسبوعيًا (وثائق نظام الإدارة البيئية، 2004).

ـ ينبغي اعتماد آلية مراقبة مستمرة عبر الأقمار الصناعية (Sentinel-2 وLandsat-9) لتتبع بقع التلوث النفطي، وربطها بمنصات GIS عبر الإنترنت (ArcGIS Online, 2022)، لتكون متاحة للمؤسسات البحثية والرقابية.

ـ تنظيم برامج تدريبية للكوادر البيئية والهندسية في الجامعات والمؤسسات الحكومية في مجالات التحليل المكاني وعلوم الاستشعار عن بعد (فالح وشعوان، 2012؛ داود، 2020).

ـ تشجيع التعاون بين ليبيا والمنظمات الدولية (UNDP، UNEP) لتبادل الخبرات والدعم التقني في تطبيق أنظمة الرصد البحري الذكي، بما يسهم في حماية البيئة البحرية المتوسطية ككل.

ـ يُظهر هذا البحث أن نظم المعلومات الجغرافية تمثل مستقبل الدراسات البيئية في ليبيا، وأن توظيفها في رصد التلوث البحري هو خطوة استراتيجية نحو تحقيق التنمية البيئية المستدامة.

ومع استمرار التوسع الصناعي في الساحل الليبي، فإن تبني نموذج التحليل المكاني الدوري سيضمن اكتشاف مبكر لمصادر التلوث، ويساعد في وضع خطط وطنية للحد من مخاطره، بما يحقق التوازن بين التنمية الاقتصادية وحماية البيئة البحرية.

بيان تضارب المصالـــح:

يُقر المؤلف بعدم وجود أي تضارب مالي أو علاقات شخصية معروفة قد تؤثر على العمل المذكور في هذه الورقة.

المراجع :

أولًا- المراجع العربية:

1- المبتهج، محمد؛ سالم، محمد إبراهيم محمد؛ عمارة، جمعة محمد. (2024) .نمذجة التحولات المجالية بتوظيف تقنية نظم المعلومات الجغرافية GIS والاستشعار عن بعد RS بالسهل الساحلي للسعيدية – رأس الماء – المملكة المغربية .*مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية، 5*(11)، 262.280–

2- أسامة، بدور محمد. (2021) .التقييم البيئيّ لميناء شرق بورسعيد .*نشرة جامعة أسيوط للأبحاث البيئية، 24*(2)، 45-59.

3- جعفر، فادي يعقوب علي. (2015) .دور نظم المعلومات الجغرافية في اتخاذ القرار البيئي بين المعيقات والمحفزات من وجهة نظر المؤسسات المستخدمة لها .رسالة ماجستير غير منشورة، جامعة القدس، فلسطين.

4- الجمل، الحسين سالم. (2019) .نظام الإدارة البيئية والسلامة والصحة المهنية بالشركة الليبية للحديد والصلب .الملتقى الثاني لمسؤولي البيئة، المؤسسة الوطنية للنفط، طرابلس، ليبيا، 17 ديسمبر 2019.

5- داود، جمعة محمد. (2020) .نظم تطبيقات المعلومات الجغرافية في الدراسات البيئية .معهد بحوث المساحة، القاهرة، مصر.

6- الشركة الليبية للحديد والصلب. (2019) .الخطة الاستراتيجية للبيئة والسلامة والصحة المهنية . مصراتة، ليبيا.

7- عكاشة، علي يوسف؛ أبوزقية، خليل؛ أبوكيل، عادل. (2021) .الخلفية الإشعاعية داخل وخارج محيط الشركة الليبية للحديد والصلب بمدينة مصراتة، شمال غرب ليبيا .*مجلة أريد الدولية للعلوم والتكنولوجيا*، *8*(4)، 150-166.

8- فالح، علي؛ شعوان، جمال. (2012) .نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد: مبادئ وتطبيقات .مطبعة آنفو برانت، فاس، المغرب.

9- قسم البيئة بالشركة الليبية للحديد والصلب. (2014) .التقرير السنوي .تقرير غير منشور، مصراتة، ليبيا.

10- -قسم البيئة بالشركة الليبية للحديد والصلب. (2021) .التقرير السنوي .تقرير غير منشور، مصراتة، ليبيا.

11- -قسم البيئة بالشركة الليبية للحديد والصلب. (2022) .دراسة مؤشرات الوضع البيئي للشركة الليبية للحديد والصلب .تقرير غير منشور، مصراتة، ليبيا.

12- -معيتيق، عبد العظيم؛ الجمل، جمال محمد. (2021) .تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية للإدارة البيئية .مؤتمر الآثار البيئية، طرابلس، ليبيا، 5–7 ديسمبر 2021.

13- -وثائق نظام الإدارة البيئية للشركة الليبية للحديد والصلب. (2004) .نظام إدارة بيئية وفق (ISO14001)مصراتة، ليبيا.

14- -دور نظم المعلومات الجغرافية في حماية البيئة ومراقبة التلوث: أنموذج عملي (الشركة الليبية للحديد والصلب). (2022) .*مجلة علوم البحار والتقنيات البيئية*، *8*(2)، 24-37.
https://doi.org/10.59743/jmset.v8i2.68

ثانيًا- المراجع الأجنبية :

15-ArcGIS. (2022). *ArcGIS Online*. Retrieved from https://arcgis.com

16-ArcGIS Survey123. (2021). *Survey123 for ArcGIS*. Retrieved from https://survey123.arcgis.com

17-Bartolo, R. E., & Hill, G. J. E. (2008). *Remote sensing and GIS technologies as a decision-making tool for indigenous land management: A case study from northern Australia.* Indigenous Knowledge and Development, 9(1), 8–11.

18-ESRI. (2021). *Use GIS to help your child understand COVID-19.* Retrieved from https://www.esri.com/arcgis-blog/products/arcgis-online/mapping/use-gis-to-help-your-child-understand-covid-19

19-Hognogi, G. G., Pop, A. M., & Marian-Potra, A. C. (2021). *The role of UAS–GIS in digital era governance: A systematic literature review.* Sustainability, 13, 11097.

20-Idrizi, B., Maliqi, E., & Pashova, L. (2021). *Spatial database designing for environmental monitoring and decision making in Mitrovica Region, The Republic of Kosovo.* Geosfera Indonesia, 6(2), 189–204.

21-Kamara, S. M. (2020). *Development of a GIS baseline spatial geodatabase template for evaluating potential and predicted environmental impacts for sustainable environmental impact assessment of mining in Sierra Leone.* Journal of Geoscience and Environment Protection, 8(10), 262–284.

22-Martin, R. V. (2008). *Satellite remote sensing of surface air quality.* Atmospheric Environment, 42(34), 7823–7843.