

التأثير الهيدروجيولوجي لأنشطة المحاجر الساحلية على تداخل مياه البحر وتلوث الخزانات الجوفية في سهل الجفارة الغربي

- ليبيا (الزاوية - صبراتة)

أمير أحمد محمد المحنوش قسم هندسة الجيولوجيا-كلية هندسة الموارد الطبيعية -جامعة الزاوية

a.almhnosh@zu.edu.ly

<https://orcid.org/0009-0009-1980-7967>

أروى أحمد محمد المحنوش قسم الجغرافيا - كلية الآداب والتربية صبراتة - جامعة صبراتة

ahamed.arwa@sabu.edu.ly

Hydrogeological Impact of Coastal Quarrying Activities on Seawater Intrusion and Groundwater Aquifer

Contamination in the Western Jifara Plain, Libya (Zawiya – Sabratha)

Amir Ahmed Mohamed Al-Mahnoush

Department of Geological Engineering – Faculty of Natural Resources Engineering – University of Zawiya

Arwa Ahmed Mohamed Al-Mahnoush

Department of Geography – Faculty of Arts and Education (Sabratha) – University of Sabratha

تاريخ الاستلام: 2026/6/29 تاريخ المراجعة: 2026/7/20 تاريخ القبول: 2026/7/28- تاريخ النشر: 2026/8/5

الملخص

تتناول البحث التحليل المكاني للأثر الجيويئي لأنشطة المحاجر في القطاع الساحلي الممتد من مدينة الزاوية إلى مدينة صبراتة بشمال غرب ليبيا، وهي منطقة تعد جزءا من سهل الجفارة وتتسم بحساسية بيئية عالية نتيجة الكثافة المتزايدة لأنشطة التحجير وقربها من الخزانات الجوفية الساحلية. وقد هدف إلى تحليل التوزيع المكاني لأنشطة المحاجر، وتقييم الأثر الجيويئي على عناصر البيئة وتحديد نمط توزيعه المكاني، وقياس إدراك السكان لهذا الأثر واقتراح تصور مكاني لإدارته، وذلك عبر تحليل عينات من المياه والتربة والصخور ونمذجة ظاهرة تداخل مياه البحر مع المياه الجوفية.

اعتمد البحث منهجية تكاملية متعددة المستويات جمعت بين الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية (GIS)، والتحليل المخبرية المتقدمة (ICP-MS و XRF)، والنمذجة الهيدروجيولوجية باستخدام برنامج MODFLOW 6.0، إضافة إلى دراسة ميدانية شملت استبانته وزعت على عينة قوامها (100) مفردة من السكان المحليين والعاملين والمختصين. وقد كشفت النتائج المخبرية عن تلوث حاد للتربة بالعناصر الثقيلة، إذ بلغ متوسط الرصاص (Pb) نحو 95.4 مغ/كغ يتجاوز بـ 3.18 ضعفا للحد المسموح، فيما ارتفعت الناقلية الكهربائية للتربة القريبة من المحاجر إلى 12.4 دسي سيمنز/م. أما مياه الآبار المجاورة فقد سجلت متوسط أملاح ذائبة كلية (TDS) بلغ 4800 مغ/ل مقابل 1100 مغ/ل في المناطق المرجعية، وتجاوزت نسبة الكلوريد إلى البيكربونات القيمة 15 في نحو 70% من العينات، وهو مؤشر قوي على تغلغل مياه البحر. وقد قدرت محاكاة MODFLOW معدل زحف الودد الملحي نحو الداخل بنحو 500 متر سنويا في المناطق الأكثر كثافة للمحاجر.

وخلص البحث إلى وجود علاقة معنوية بين كثافة أنشطة المحاجر ومؤشرات التدهور الجيويئي، وأكد نحو 72% من أفراد العينة بوجود آثار جيويئية واضحة، بينما رأى 65% أن الإجراءات البيئية القائمة غير كافية. وأوصى البحث بوضع إطار تشريعي متكامل للإدارة البيئية للمحاجر، وإنشاء نظام رصد بيئي مكاني، وتبني مبادئ الاقتصاد الدائري في إعادة استخدام مخلفات التحجير.

الكلمات المفتاحية: التحليل المكاني، المحاجر، المنطقة الساحلية، العناصر الثقيلة.

Abstract

This study investigates the spatial analysis of the geo-environmental impacts of quarrying activities in the coastal sector extending from the city of Zawiya to the city of Sabratha in northwestern Libya. The study area forms part of the Jifara Plain and is characterized by high environmental sensitivity due to the increasing concentration of quarrying activities and their proximity to coastal groundwater aquifers. The study aimed to analyze the spatial distribution of quarrying activities, assess their geo-environmental impacts on environmental components, identify their spatial patterns, measure local residents' perceptions of these impacts, and propose a spatial framework for their management. This was achieved through the analysis of water, soil, and rock samples, in addition to modeling seawater intrusion into groundwater.

The study adopted an integrated, multi-level methodology combining remote sensing and Geographic Information Systems (GIS), advanced laboratory analyses using Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) and X-Ray Fluorescence (XRF), and hydrogeological modeling using MODFLOW 6.0. A field survey was also conducted using a questionnaire distributed to a sample of 100 local residents, workers, and specialists. The laboratory results revealed severe soil contamination with heavy metals, with the mean concentration of lead (Pb) reaching approximately 95.4 mg/kg, exceeding the permissible limit by about 3.18 times. The electrical conductivity of soils near the quarries reached 12.4 dS/m. Meanwhile, groundwater from wells adjacent to the quarries recorded a mean Total Dissolved Solids (TDS) concentration of 4,800 mg/L, compared with 1,100 mg/L in reference areas. The chloride-to-bicarbonate ratio exceeded 15 in approximately 70% of the samples, representing a strong indicator of seawater intrusion. MODFLOW simulations estimated the inland movement of the saline wedge at approximately 500 meters per year in areas with the highest concentration of quarrying activities.

The study concluded that there is a statistically significant relationship between the intensity of quarrying activities and indicators of geo-environmental degradation. Approximately 72% of the respondents confirmed the presence of clear geo-environmental impacts, while 65% considered the existing environmental measures inadequate. The study recommends establishing an integrated legislative framework for the environmental management of quarries, developing a spatial environmental monitoring system, and adopting circular economy principles for the reuse of quarrying waste.

Keywords: Spatial Analysis, Quarries, Coastal Area, Heavy Metals.

1. المقدمة

يعد قطاع التحجير في ليبيا في مراحله التأسيسية، حيث تقتصر أنشطته حاليا على العمليات السطحية لاستغلال المواد الحجرية والطين ورمال البناء والجبس، والتي تدخل بشكل رئيس في صناعة الطوب والخرسانة، وعلى الرغم من الجهود المبذولة من قبل مركز البحوث الصناعية لدراسة المواد الصخرية الشائعة وتحسين عمليات المحاجر، فإن هذا القطاع ما يزال يفتقر إلى التنظيم الكافي الذي يضمن كفاءة الإنتاج مع الحفاظ على البيئة.

وتشهد منطقة غرب ليبيا، وبخاصة مدينتي صبراتة والزاوية، توسعا كبيرا في أنشطة المحاجر، مما يهدد التوازن البيئي الهش فيها، وقد رصدت الدراسات المحلية آثارا ضارة لهذه الأنشطة، بما في ذلك تدهور التربة، وتآكل السواحل، وتداخل مياه البحر مع المياه الجوفية، مما أدى إلى زيادة ملوحتها وانخفاض جودتها، إضافة إلى مساهمة هذه الأنشطة في التلوث الهوائي بسبب الغبار المتطاير، وما يترتب على ذلك من ضغط على النظام الجيويبيئي بأكمله، كما تعد ظاهرة تداخل المياه المالحة مع المياه العذبة في الخزانات الجوفية من أخطر التحديات التي تواجه المنطقة، خاصة في المناطق الساحلية مثل صبراتة. ويحدث هذا التداخل نتيجة فقدان التوازن الهيدروليكي بين المياه العذبة والمالحة، أو بسبب تدمير الحواجز الطبيعية التي تفصل بينهما. وقد أدى ذلك إلى تغيرات كيميائية خطيرة في مياه الآبار، أثرت سلبا على التربة والغطاء النباتي، وهددت صحة السكان المحليين. وتتبع الحاجة إلى مثل هذا البحث من الطبيعة المزدوجة لقطاع المحاجر؛ فهو من جهة رافد اقتصادي لا غنى عنه للبناء، ومن جهة أخرى مصدر ضغط بيئي على المنظومة الساحلية الشديدة الحساسية. وتزداد المسألة تعقيدا بسبب ضعف الأطر التنظيمية وغياب المتابعة البيئية المنتظمة، بما يجعل الأثر التراكمي لأنشطة التحجير يتفاقم دون رصد كافٍ أو تدخل مبكر. ومن هنا فإن قياس هذا الأثر وربطه بمصادره الجيولوجية والهيدرولوجية، يمثل خطوة أساسية نحو إدارة رشيدة للموارد.

يهدف هذا البحث إلى تقييم الآثار الجيويبيئية لأنشطة المحاجر في منطقة غرب ليبيا من خلال تحليل عينات من المياه والتربة والصخور باستخدام تقنيات ميدانية ومخبرية متقدمة، بالإضافة إلى الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية (GIS). كما يسعى إلى تقديم حلول مستدامة للتخفيف من هذه الآثار، مع التركيز على التكامل بين الجيولوجيا والجغرافيا البيئية، ودعم صناع القرار في وضع السياسات الفعالة لحماية الموارد الطبيعية والبيئة في المنطقة.

2. مشكلة البحث

تتبع مشكلة البحث من التوسع العشوائي لأنشطة المحاجر في القطاع الساحلي الممتد من الزاوية إلى صبراتة دون ضوابط بيئية كافية، وما يترتب على ذلك من تداعيات جيويبيئية متراكمة يصعب عكسها. فالمنطقة تشهد طلبا متزايدا على مواد البناء وهذا يدفع إلى توسع أنشطة التحجير، وفي المقابل هناك غياب لمنظومة الرصد والمتابعة لهذا التوسع، بحيث تتراكم الآثار التي ان تبلغ حدا يصعب معه التدخل. ويمكن صياغة أبعاد المشكلة في المحاور الآتية:

1. هل حصل توسع عشوائي لأنشطة المحاجر دون ضوابط بيئية واضحة.
 2. هل حصل تدهور الخصائص الفيزيوكيميائية للتربة الساحلية وفقدانها لخصوبتها.
 3. هل حصل تداخل لمياه البحر مع الخزانات الجوفية وارتفاع في ملوحة مياه الآبار.
 4. هل حصل تراجع الغطاء النباتي والتنوع الحيوي في المناطق المجاورة للمحاجر.
 5. غياب التشريعات الفعالة لمراقبة الأنشطة التعدينية والحد من آثارها.
 6. نقص الدراسات المتكاملة التي تربط بين الآثار الجيولوجية والهيدرولوجية والبيئية في المنطقة.
- وبناء على ما تقدم، يمكن بلورة السؤال الرئيس للبحث على النحو الآتي: ما حجم الأثر الجيويبيئي لأنشطة المحاجر على التربة والمياه الجوفية والصخور والغطاء النباتي في المنطقة الممتدة من الزاوية إلى صبراتة، وما السبل الكفيلة بالتخفيف منه؟

3.1 تساؤلات البحث

1. ما التوزيع المكاني لأنشطة المحاجر في المنطقة الممتدة من الزاوية إلى صبراتة، وما علاقته بالخصائص الجغرافية والجيولوجية لمنطقة الدراسة؟
2. ما الأثر الجيوبئي لأنشطة المحاجر على عناصر البيئة (التربة والمياه الجوفية والصخور والهواء والغطاء النباتي)، وكيف يتوزع هذا الأثر مكانياً؟
3. ما مستوى إدراك السكان والعاملين للأثر الجيوبئي لأنشطة المحاجر، وما التصور المكاني المقترح لإدارته والحد منه؟

3.2 فرضيات البحث

1. يتوزع نشاط المحاجر مكانياً بارتباط وثيق مع الخصائص الجيولوجية والقرب من الساحل ومناطق التوسع العمراني، ويتركز في نطاقات محددة ولا ينتشر بانتظام.
2. تحدث أنشطة المحاجر أثراً جيوبئياً معنوياً يتجاوز المعايير الدولية في التربة والمياه والصخور، ويشهد هذا الأثر كلما اقتربنا مكانياً من مواقع المحاجر.
3. يوجد إدراك مجتمعي مرتفع للأثر الجيوبئي يتقاطع مع القياسات المخبرية، مع توافق واسع على عدم كفاية الإجراءات القائمة وضرورة تبني إدارة مكانية استباقية.

4. أهداف البحث

يسعي البحث إلى تحقيق أهداف الآتية: -

1. تحليل التوزيع المكاني لأنشطة المحاجر وربطه بالخصائص الجغرافية والجيولوجية للمنطقة
2. تقييم الأثر الجيوبئي لأنشطة المحاجر على عناصر البيئة، وتحديد نمط توزيعه المكاني عبر التحليل المخبري والنمذجة الهيدروجيولوجية.
3. قياس مستوى إدراك السكان والعاملين للأثر الجيوبئي لأنشطة المحاجر، واقتراح تصور مكاني لإدارتها والحد من آثارها.

5. أهمية البحث

يكتسب هذا البحث أهميته من الحاجة الملحة لمعالجة الآثار البيئية الخطيرة لأنشطة المحاجر في المنطقة الساحلية بغرب ليبيا، والتي باتت تهدد الأمن المائي والغذائي للسكان. وقد اختيرت منطقة صبراتة - الزاوية إنموذجاً لاحتوائها على أعلى تركيز للمحاجر مع وجود مؤشرات تدهور بيئي حادة. وتتجلى أهمية البحث في الجوانب الآتية:

1. تقديم منهجية متكاملة تجمع بين التقنيات الحديثة (الاستشعار عن بعد، GIS، النمذجة الهيدروجيولوجية) والتحليل الكمي.
2. طرح حلول عملية قائمة على مبادئ الاقتصاد الدائري في التعامل مع مخلفات المحاجر.
3. دعم أهداف التنمية المستدامة ذات الصلة (SDGs 6, 11, 13, 15) المتعلقة بالمياه والمدن المستدامة والعمل المناخي والحياة البرية.
4. الإسهام في تطوير نظم رصد بيئي مكانية تعتمد على البيانات الحديثة.
5. المساهمة في التقليل من التكاليف الصحية عبر الوقاية من مصادر التلوث البيئي.
6. إثراء المكتبة العلمية العربية بدراسة تطبيقية متقدمة في مجال التقييم الجيوبئي.

6. حدود البحث

يتحدد البحث بالحدود الآتية:

أولاً- الحدود المكانية: القطاع الساحلي الغربي الليبي الممتد من مدينة الزاوية إلى مدينة صبراتة، وهو جزء من سهل الجفارة، ويقع بين خطي طول $12^{\circ}23'00''$ و $12^{\circ}31'23''$ شرقاً، ودائرتي عرض $32^{\circ}41'00''$ و $32^{\circ}49'12''$ شمالاً، ويحده شمالاً البحر المتوسط، وجنوباً سهل الجفارة، وغرباً مدينتا زوارة والعجيلات، وشرقاً منطقة ورشفانة.

ثانياً- الحدود الزمانية: الفترة الممتدة بين عامي 2025 و 2026 م، مع الاستعانة ببيانات فضائية تاريخية تعود إلى الأعوام 2013-2025 لرصد التغيرات.

ثالثاً- الحدود الموضوعية: تقييم الأثر الجيوبيئي لأنشطة المحاجر على التربة والمياه الجوفية والصخور والهواء والغطاء النباتي.

مصطلحات ومفاهيم البحث

1- الأثر الجيوبيئي (Geo-environmental Impact): هو مجموع التغيرات التي تطرأ على المكونات الجيولوجية والبيئية (الصخور، التربة، المياه، الهواء، الغطاء النباتي) نتيجة تدخل بشري.

2- تداخل مياه البحر (Seawater Intrusion): وهي ظاهرة هيدروجيولوجية تحدث عند تغلغل المياه المالحة إلى الخزانات الجوفية العذبة في المناطق الساحلية، نتيجة اختلال التوازن الهيدروليكي بين المياه العذبة والمالحة، أو بسبب الضخ الجائر وإزالة الحواجز الصخرية الطبيعية.

3- مؤشر التراكم الجغرافي (Igeo): هو مؤشر كمي يستخدم لتقييم مستوى تلوث التربة بالعناصر الثقيلة بمقارنة تركيزها الفعلي بالتركيز الخلفي الطبيعي.

4- التقييم الجيوبيئي المتكامل (Integrated Geo-environmental Assessment): وينظر إلى البيئة الساحلية بوصفها منظومة مترابطة لا مجموعة عناصر منفصلة، ويربط بين القياس المخبري والتحليل المكاني والنمذجة التنبؤية والتقييم المجتمعي في إطار واحد، بما يتيح فهم الأثر التراكمي بدل الاكتفاء بالأثر المفرد.

ينطلق البحث من إطار نظري يربط بين العمليات الجيومورفولوجية السطحية (تفتيت الصخور، التعرية، تراكم الغبار) والعمليات الهيدروجيولوجية العميقة (تغير الضغط الهيدروليكي، الزحف الملحي)، بوصفهما منظومة واحدة تتأثر بأنشطة التحجير. وتظهر الأدبيات العلمية أن المحاجر تؤدي إلى تدهور التربة والغطاء النباتي، وتلوث الهواء بالغبار والجسيمات الدقيقة، وتدهور جودة المياه الجوفية عبر التملح أو التلوث الكيميائي.

ويستند هذا الإطار إلى أن التدخل البشري في مكان واحد من المنظومة الساحلية يحدث سلسلة من الآثار المتتالية عبر عناصرها المختلفة؛ فما يبدأ تغييراً في التركيب الصخري ينتهي أثراً في صحة الإنسان مروراً بالتربة والمياه والنبات. ومن ثم فإن أي تقييم يقتصر على عنصر واحد يغفل الطبيعة المنظومية للأثر، وهو ما تتفاداه الدراسة بمنهجها التكاملي.

7.2 الدراسات السابقة

استعرضت الدراسة مجموعة من الأبحاث المحلية والإقليمية والعالمية التي تناولت الأثر البيئي للمحاجر وتداخل مياه البحر، ومن أبرزها:

1 دراسة فلوجل (Floegel, 1979): من أهم الدراسات التي عالجت تداخل مياه البحر في سهل الجفارة، واعتمدت على 139 عينة ماء من 55 بئراً موزعة على 13 مقطعاً، وبينت زيادة تركيز الأملاح الذائبة في الخزان الأول شمال المنطقة نتيجة وجود عدسات جبية وتداخل مياه البحر.

- 2 دراسة (Ferguson & Gleeson, 2012): قدمت نموذجاً هيدروجيولوجياً لتقييم تأثير الأنشطة البشرية، ومنها التعدين، على توازن المياه المالحة والعذبة في المناطق الساحلية.
- 3 دراسة (عبد الرحمن، 2015): تناولت تملح المياه الجوفية في المنطقة الساحلية لمدينة طرابلس، وربطت بين الاستخراج الجائر للمياه وزحف مياه البحر.
- 4 دراسة (Rajendran et al., 2017): بحثت في تأثير نفابات المحاجر على تلوث التربة بولاية بيراك الماليزية، وأكدت وجود تركيزات عالية من الكاديوم والرصاص قرب المواقع التعدينية.
- 5 دراسة (الخولي وآخرون، 2018): ركزت على تأثير المحاجر على التربة والغطاء النباتي في شبه جزيرة سيناء، وأظهرت أن إزالة الطبقات الصخرية زادت التعرية وفقدان التنوع الحيوي بنسبة بلغت 40%.
- 6 دراسة (الغرياني، 2019): حللت التفاعلات الجيوكيميائية بين الصخور الرملية ومياه البحر في محاجر ساحلية تونسية، ووجدت أن ارتفاع نسبة الكلوريد سرع تجوية الصخور بنسبة نحو 25%.
- 7 دراسة (Owen et al., 2019): ربطت بين غياب الوعي البيئي لدى العاملين وانتشار الممارسات غير المستدامة في قطاع المحاجر الكيني.
- 8 دراسة (Smith et al., 2020): حللت تلوث الهواء بغبار المحاجر في ولاية تاميل نادو الهندية، ووجدت أن المناطق القريبة سجلت تركيزات $PM_{2.5}$ أعلى بثلاثة أضعاف من المعايير الدولية.
- 9 دراسة (المرباط، 2020): ناقشت العلاقة بين النمو العمراني وزيادة عدد المحاجر في المغرب، مشيرة إلى أن نسبة كبيرة من المحاجر نشأت خلال العقد الأخير بسبب الطلب على الإسمنت.
- 10 دراسة (أبو لبدة والمبروك، 2021): تناولت دور التعدين والتحجير النشط في المناطق الساحلية في تسهيل غزو مياه البحر وتلويث المكامن الجوفية بشوائب الفلور، وما يترتب عليه من إصابات بأمراض الانسمام الفلوري.
- ويمكن تصنيف الدراسات في ثلاثة اتجاهات رئيسية: اتجاه ركز على تلوث التربة والصخور بالعناصر الثقيلة (Rajendran وآخرون، الخولي وآخرون، الغرياني)، واتجاه عالج تداخل مياه البحر والتدهور الهيدروجيولوجي (Floegel، Ferguson & Gleeson، عبد الرحمن، أبو لبدة والمبروك)، واتجاه تناول الأبعاد المجتمعية والعمرانية لتلوث الهواء وانتشار المحاجر (Smith وآخرون، Owen وآخرون، المرباط). وتتفق هذه الاتجاهات مجتمعة على خطورة الأثر البيئي للمحاجر الساحلية، لكنها تتناولها من زوايا منفصلة.
- يتبين من استعراض الدراسات السابقة أن معظمها تناول جانبا واحدا من الأثر (التربة أو المياه أو الهواء) بمعزل عن الجوانب الأخرى، كما ندرت الدراسات المتكاملة التي تجمع بين التحليل المخبري الجيوكيميائي والنمذجة الهيدروجيولوجية والتقييم المجتمعي في منطقة البحث تحديداً. ومن هنا يأتي هذه البحث ليسد فجوة عبر منهجية تكاملية تربط بين الأبعاد في إطار واحد، وتضيف إلى الأدبيات المحلية دراسة تطبيقية على قطاع الزاوية - صبراتة الذي لم يحظ بدراسة جيوبئية متكاملة سابقة رغم شدة الضغط الواقع عليه.

8. منهج البحث وأدواته

اعتمد البحث على المنهج الوصفي والمنهج التحليلي الكمي والمنهج التطبيقي التنبئي، ونفذت عبر مراحل متسلسلة ومتربطة بدأت بجميع البيانات الأولية وإنتاج خرائط المخاطر والتوصيات التطبيقية. والجدول (4) يبين مراحل التصميم البحثي وأدواته ومخرجاته.

الجدول (4): مراحل التصميم البحثي

المرحلة	نوع البيانات	الأدوات	المخرجات
الأولى	بيانات فضائية	Sentinel-2, Landsat-9	خرائط استخدامات الأرض
الثانية	بيانات ميدانية	GPS ومسوحات حقلية	قاعدة بيانات مكانية
الثالثة	عينات بيئية	ICP-MS, XRF	نتائج جيوكيميائية
الرابعة	بيانات رقمية	GIS, MODFLOW	خرائط ونماذج
الخامسة	بيانات اجتماعية	استبيانات ومقابلات	مؤشرات بيئية مجتمعية

وتقوم هذه المنهجية التكاملية متعددة المستويات على الربط بين مصادر البيانات المختلفة وتحليلها ضمن إطار واحد، بما يتيح تفسير الأثر الجيولوجي لأنشطة المحاجر، بدءاً من جمع البيانات، مروراً بالتحليل المخبري والرقمي، وانتهاءً بالتقييم التكاملية للأثر.

ويرجع اختيار هذا التصميم إلى طبيعة الظاهرة المدروسة نفسها؛ فالأثر الجيولوجي ظاهرة متعددة الأبعاد لا يمكن الإحاطة بها بأداة واحدة أو منهج مفرد. فالتحليل المخبري وحده يقدم قياساً دقيقاً لكنه نقطي محدود مكانياً، ونظم المعلومات الجغرافية توفر البعد المكاني لكنها تحتاج إلى بيانات ميدانية تسندها، والنمذجة تتنبأ بالمستقبل لكنها تظل فرضية ما لم تعابر ببيانات واقعية، والتقييم المجتمعي يوثق الأثر المعيش لكنه يفقر إلى الدقة الكمية. ومن ثم فإن دمج هذه الأدوات يعوض كل منها نقص الآخر، ويحقق ما يعرف بالتثليث المنهجي الذي يرفع من موثوقية النتائج ومصداقيتها.

وقد روعي في تسلسل المراحل أن تغذي كل مرحلة ما يليها؛ فبيانات الاستشعار عن بعد وجهت اختيار مواقع أخذ العينات الميدانية، ونتائج التحاليل المخبرية عايرت نموذج النمذجة الهيدروجيولوجية، ثم جاء التقييم المجتمعي ليتحقق من مدى انعكاس هذه النتائج على واقع السكان. وبهذا التسلسل المنطقي تتكامل البيانات لا تتراكم، وتبنى النتيجة النهائية على أساس متعدد المصادر يصعب الطعن فيه.

8.1 أدوات جمع البيانات

الاستشعار عن بعد

استخدمت مرئيات فضائية متعددة المصادر لرصد التغيرات البيئية والزمانية، ويوضح الجدول (5) خصائصها وأغراض استخدامها. وقد اختيرت هذه المصادر تحديداً لتكاملها؛ إذ توفر مرئيات Sentinel-2 دقة مكانية عالية (10 أمتار) وترداداً زمنياً مناسباً لرصد تغيرات الغطاء النباتي، بينما تتيح سلسلة Landsat الطويلة (منذ 2013) رصد تغير خط الساحل عبر فترة زمنية ممتدة تكشف الاتجاهات بعيدة المدى.

الجدول (5): المرئيات الفضائية المستخدمة

القمر الصناعي	الدقة المكانية	الفترة الزمنية	الغرض
Sentinel-2	10م	2015 - 2025	رصد الغطاء النباتي
Landsat-9	30م	2013 - 2025	رصد تغير خط الساحل

المسوحات الميدانية

شملت الأعمال الميدانية تحديد مواقع المحاجر، وتوثيق الخصائص الجيولوجية، وتسجيل التغيرات الجيومورفولوجية على امتداد القطاعات العرضية الممتدة من الساحل نحو الجنوب.

التأثير الهيد وجيولوجي لأنشطة المحاجر الساحلية على تداخل مياه البحر وتلوث الخزانات الجوفية في سهل الجفارة الغربي - ليبيا (الزاوية - صبراتة)

جمع العينات البيئية

جمعت عينات المياه والتربة والصخور وفق تصميم مكاني مدروس، ووثقت بإحداثيات دقيقة، ويوضح الجدول (6) أنواعها وأعدادها وأغراضها.

الجدول (6): أنواع العينات وأعدادها

نوع العينة	العدد	الغرض
مياه جوفية	80	تقييم الملوحة
مياه سطحية	40	رصد التلوث
تربة	60	قياس العناصر الثقيلة
صخور	20	التحليل المعدني

الأدوات الميدانية والمخبرية والرقمية

اعتمد البحث على مجموعة من الأدوات، تشمل في: جهاز تحديد المواقع (GPS)، وأجهزة قياس جودة الهواء المحمولة، ومقياس الملوحة (TDS Meter)، والكاميرا الرقمية. وتشمل: مطيافية الامتصاص الذري (AAS)، والمجهر الجيولوجي، وجهاز قياس الأس الهيدروجيني (pH Meter). أما رقمياً فتعتمد على برمجيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وبرنامج النمذجة MODFLOW.

8.2 التحاليل المخبرية

شمل التحليل المخبري الجوانب الفيزيائية والكيميائية للعينات باستخدام تقنيات متقدمة، بهدف قياس مستويات التلوث وطبيعة الصخور والمركبات الكيميائية، كما في الجدول (7).

الجدول (7): التحاليل المخبرية المستخدمة في الدراسة

التحليل	الجهاز	الغرض
العناصر الثقيلة	ICP-MS	قياس مستوى التلوث المعدني
التركيب المعدني	XRF	تحديد طبيعة الصخور
المركبات العضوية	GC-MS	الكشف عن التلوث الكيميائي

وتم تقسيم منطقة البحث إلى قطاعات عرضية تمتد من الساحل باتجاه سهل الجفارة جنوباً، وجمعت عينات المياه من آبار المزارع المتاخمة للمحاجر وآبار الشرب، فيما ركزت عينات التربة على الطبقة السطحية من (0-30 سم) الأكثر عرضة لترسيب الغبار المنجمي، وأخذت عينات الصخور من واجهات الحفر في محاجر صبراتة والزواوية.

8.3 نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد

يمثل التحليل الرقمي باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS) ركيزة أساسية في المنهجية المتكاملة للدراسة، إذ يوفر وسيلة قوية لربط البيانات المكانية بالمعلومات الميدانية والمخبرية، بما يتيح فهم التوزيع المكاني للأثر الجيولوجي لأنشطة المحاجر. وقد شملت الخطوات المتبعة ما يأتي:

- أ. تجميع جميع البيانات المكانية (مواقع المحاجر، نقاط أخذ العينات، خطوط الساحل، المساحات المتضررة) في قاعدة بيانات GIS موحدة.
- ب. استخدام أدوات التحليل المكاني لتقييم العلاقة بين الأنشطة البشرية (المحاجر، البناء، الزراعة) والمتغيرات البيئية (ملوحة المياه، خصائص التربة، فقد الغطاء النباتي)، بما في ذلك تحليل التقارب بين المحاجر والمصادر المائية، وتحليل كثافة المحاجر ضمن الشبكة الساحلية.
- ج. تحديد المناطق الأكثر عرضة للأثر التراكمي باستخدام تحليل التراكب المكاني (Spatial Overlay Analysis).
- د. إعداد خرائط الأساس (Base Maps) وخرائط رقمية شاملة تبرز حدود المحاجر وتوزيع الغطاء النباتي والمواقع السكنية وشبكات المياه.

وقد أتاح دمج بيانات الاستشعار عن بعد مع تحليلات GIS رصد التغيرات الزمانية في الغطاء النباتي وخط الساحل، وربطها بالنتائج المخبرية والميدانية في إطار تحليلي واحد. وتكمن القيمة المضافة لنظم المعلومات الجغرافية في هذا البحث في تحويل البيانات النقطية المتفرقة (قياس ملوحة في بئر، تركيز معدن في عينة تربة) إلى صورة مكانية متصلة تكشف أنماط الانتشار واتجاهاته. فبدلاً من التعامل مع كل قياس بمعزل، يتيح التحليل المكاني رسم خرائط للتدرج (Gradient Maps) تظهر كيف ترتفع الملوحة أو يشتد التلوث كلما اقتربنا من مواقع المحاجر، وكيف يخف الأثر باتجاه المناطق المرجعية، بما يقدم دليلاً مكانياً قوياً على العلاقة السببية بين النشاط والأثر.

كما تسمح خرائط المخاطر الناتجة عن التراكب المكاني بترتيب المواقع بحسب أولوية التدخل، وهو ما يحول نتائج البحث من توصيف علمي إلى أداة قرار عملية بيد الجهات المعنية، تمكنها من توجيه موارد الرصد والمعالجة المحدودة نحو النطاقات الأشد تضرراً بدل توزيعها بالتساوي دون أولويات.

8.4 النمذجة الهيدروجيولوجية (MODFLOW)

استخدم برنامج MODFLOW 6.0 لمحاكاة تداخل مياه البحر مع الخزانات الجوفية الساحلية، بهدف تقدير انتشار المياه المالحة في طبقات المياه الجوفية وتقييم تأثير الأنشطة البشرية، خاصة المحاجر، على جودة المياه. وقد اتبعت في بناء النموذج الخطوات الآتية:

- 1 جمع البيانات الميدانية: مستويات المياه، ومعدلات الضخ، وخصائص التربة والصخور.
- 2 إدخال البيانات إلى النموذج: بما في ذلك الحدود الهيدروجيولوجية للمنطقة والخواص الهيدروليكية للطبقات.
- 3 إجراء سيناريوهات متعددة: لمحاكاة تأثير زيادة كثافة المحاجر أو تغير استخدامات الأرض على تداخل المياه المالحة.
- 4 تقدير التغيرات المستقبلية: في مستويات الملوحة وتحديد المناطق الأكثر عرضة للتدهور، بما يوفر قاعدة علمية لتطوير استراتيجيات الإدارة المستدامة للموارد المائية.

وقد أظهرت مخرجات المحاكاة أن معدل زحف الوند الملحي نحو الداخل يقارب 500 متر سنوياً في المناطق الأكثر كثافة للمحاجر، وهو ما يتسق مع النتائج المخبرية لملوحة المياه ونسبة الكلوريد إلى البيكربونات.

وتتبع أهمية النمذجة من قدرتها على تجاوز التوصيف اللحظي للأثر إلى استشراف مساره المستقبلي؛ فبينما ترصد التحاليل المخبرية حالة المياه اليوم، تقدم المحاكاة إجابة عن سؤال أخطر: إلى أين يتجه الوضع إن استمرت الأنشطة على وتيرتها

الحالية؟ وتكشف السيناريوهات المختلفة التي حاكها النموذج أن اتجاه الأثر تصاعدي، وأن كل زيادة في كثافة المحاجر أو في معدلات الضخ تترجم إلى تسارع في زحف الملوحة، وهو ما يمنح صناع القرار قاعدة كمية لتقدير عواقب استمرار الوضع الراهن مقابل التدخل المبكر.

وتبرز مقارنة سيناريو الاستمرار بسيناريو الضبط أن كلفة التأخر في التدخل مرتفعة وغير خطية؛ إذ إن استعادة خزان جوفي بعد تملحه أصعب بكثير وأكثر كلفة من الحفاظ على توازنه ابتداءً، لأن طرد المياه المالحة المتغلغلة يتطلب سنوات من إعادة التغذية والترشيد، بل قد يتعذر في بعض الحالات. وهذا ما يجعل مخرجات النمذجة حجة علمية قوية لصالح الإدارة الاستباقية.

المبحث الأول: التحليل المكاني للتوزيع الجغرافي لأنشطة المحاجر وخصائص منطقة الدراسة

ويتناول الخصائص الجغرافية والجيولوجية لمنطقة الدراسة، والنمط المكاني لانتشار المحاجر وعلاقته بالمصادر المائية والأراضي الزراعية والنمو العمراني.

أ- الموقع الجغرافي

تقع منطقة البحث في الساحل الغربي الليبي وتمتد من مدينة الزاوية إلى مدينة صبراتة، وهي جزء من سهل الجفارة، وتتميز بحساسية بيئية عالية نتيجة تضافر عوامل عديدة، أبرزها كثافة أنشطة المحاجر، والقرب من الخزانات الجوفية الساحلية، والتعرض المباشر لتداخل مياه البحر، إضافة إلى الضغط العمراني المتزايد. ويحد المنطقة شمالاً البحر المتوسط، وجنوباً سهل الجفارة، وغرباً مدينتا زوارة والعجيلات، وشرقاً منطقة ورشفانة، وقد قسمت منطقة الدراسة إلى ثلاثة أنماط مكانية: مناطق المحاجر النشطة وتمثل مصدر التأثير المباشر، ومناطق متأثرة بيئياً تقع ضمن نطاق انتشار الأثر، ومناطق مرجعية البعيدة نسبياً عن المحاجر وتستخدم أساساً للمقارنة وتقدير حجم التغير.

ويعد هذا التقسيم ركيزة منهجية أساسية، إذ يتيح قياس الأثر قياساً نسبياً لا مطلقاً؛ فالفرق بين قيم المناطق النشطة والمناطق المرجعية هو المقياس الحقيقي لحجم التغير الذي أحدثته المحاجر، بعد استبعاد التباين الطبيعي في خصائص التربة والمياه. وقد أظهرت المقارنة فروقاً حادة بين النمطين — كارتفاع الأملاح الذائبة من 1100 مغ/لتر في المناطق المرجعية إلى 4800 مغ/لتر قرب المحاجر — بما يعزل أثر المحاجر عن العوامل الطبيعية ويسنده بالدليل الكمي.

وتقع منطقة البحث بين خطي طول $12^{\circ}23'00''$ و $12^{\circ}31'23''$ شرقاً، ودائرتي عرض $32^{\circ}41'00''$ و $32^{\circ}49'12''$ شمالاً، ضمن الشريط الساحلي الذي يجمع بين ثلاث ضغوط متزامنة: الضغط التعديني الناتج عن المحاجر، والضغط العمراني الناتج عن التوسع السكاني، والضغط الطبيعي الناتج عن قرب البحر وهشاشة الخزان الساحلي. وتقاطع هذه الضغوط الثلاثة في نطاق جغرافي واحد هو ما يجعل المنطقة إنموذجاً دراسياً بالغ الدلالة على التفاعل بين الإنسان والبيئة الساحلية.

ب- الخصائص الجغرافية والجيولوجية

تتنتمي منطقة البحث جغرافياً إلى سهل الجفارة الساحلي، وهو سهل رسوبي منبسط ينحدر تدريجياً من الجنوب باتجاه ساحل البحر المتوسط شمالاً. ويتسم مناخه بأنه شبه جاف متوسطي، حار جاف صيفاً معتدل ممطر شتاءً، مع تذبذب في معدلات الهطول وارتفاع في معدلات التبخر، وهي ظروف تزيد من هشاشة النظام البيئي وحساسيته لأي تدخل بشري.

ومن الناحية الجيولوجية، يتغلب على المنطقة التكوينات الرسوبية السطحية والصخور الجيرية والكربوناتية التي تؤدي دوراً محورياً بوصفها غطاء طبيعياً يحمي الخزانات الجوفية من تداخل مياه البحر. وقد أظهرت التحاليل أن هذه الصخور تتكون أساساً من كربونات الكالسيوم (CaCO_3) والمغنيسيوم (MgCO_3) إلى جانب السيليكا (SiO_2)، وهذا التركيب يمنحها صلابة

التأثير الهيد وجيولوجي لأنشطة المحاجر الساحلية على تداخل مياه البحر وتلوث الخزانات الجوفية في سهل الجفارة الغربي - ليبيا (الزاوية - صبراتة)

نسبية لكنه في الوقت ذاته يجعلها عرضة للتجوية الكيميائية عند تعرضها لمياه غنية بالكلوريد. ويؤدي إزالة هذه الطبقات أو تفكيكها في أثناء عمليات التحجير إلى إضعاف الحاجز الطبيعي وتسريع الزحف الملحي نحو الداخل. وتنظم المياه الجوفية في المنطقة ضمن نظام خزانات متعددة، يمثل الخزان السطحي أكثرها عرضة للتأثر بالأنشطة السطحية بسبب قربه من مستوى الأرض وارتباطه المباشر بمياه الأمطار ومياه البحر عبر خط الساحل. وقد أشارت الدراسات الهيدروجيولوجية، ومنها دراسة فلوجل (1979)، إلى وجود عدسات جبسية ضمن طبقات الخزان تسهم في رفع تركيز الأملاح الذائبة، وهو عامل طبيعي يتفاقم أثره حين يقترن بالضخ الجائر وإزالة الحواجز الصخرية نتيجة التحجير. ومن الناحية الجيومورفولوجية، يتسم الشريط الساحلي بانبساطه وانخفاض منسوبه، مما يجعل الفاصل بين المياه العذبة والمالحة قريباً من السطح وحساساً لأي اضطراب في التوازن الهيدروليكي. وهذه الخصائص مجتمعة (المناخ شبه الجاف، والتكوين الكربوناتي القابل للتجوية، والخزان السطحي الضحل، والفاصل الملحي القريب) تجعل في المنطقة بيئة هشة يتضاعف فيها أثر أي تدخل بشري.

ج- التحليل المكاني للتوزيع الجغرافي للمحاجر

اعتمد تحليل التوزيع المكاني للمحاجر على المراثيات الفضائية متعددة المصادر وبيانات جوجل إيرث، إذ أتاح ذلك رصد مواقع المحاجر وامتدادها الزمني وعلاقتها المكانية بالمصادر المائية والمناطق الزراعية والعمرانية. وقد بين التحليل تمركز المحاجر بمحاذاة الشريط الساحلي وقربها الشديد من آبار المياه الجوفية والأراضي الزراعية توزيع المحاجر (16 محجراً) والمساحات والإنتاج والمساحة الإجمالية للمحاجر: 171.73 هكتاراً ومتوسط عمق الاستخراج: 40 متراً والحجم الجيولوجي الكلي: 68.7 مليون م³ والعمر الافتراضي المتبقي: 20-25 سنة (واقعياً)، وهو ما يفسر شدة الأثر التراكمي في هذه المواقع.

توزيع المحاجر في منطقة الدراسة



وباستخدام أدوات التحليل المكاني في نظم المعلومات الجغرافية، جرى تقدير كثافة المحاجر ضمن الشبكة الساحلية وتحليل المسافات بينها وبين مصادر المياه، ثم تحديد المناطق الأكثر تعرضا للتأثيرات المتركمة عبر تحليل التراكم المكاني، وقد كشفت العملية عن ارتباط واضح بين تزايد كثافة المحاجر وارتفاع مؤشرات التدهور البيئي في التربة والمياه. ومن أبرز ما أظهره التحليل المكاني أن الأثر لا يتوزع بانتظام، بل يتركز في نطاقات محددة تجتمع فيها ثلاثة عناصر: الكثافة العالية للمحاجر، والقرب من آبار المياه الجوفية، والتقاطع مع الأرض الزراعية أو التجمعات السكنية. هذه النطاقات هي التي سجلت أعلى قيم الملوحة وتركيز العناصر الثقيلة، مما يجعلها أولوية قصوى في أي خطة للرصد والتدخل. كما بين التنوع الزمني للمرئيات الفضائية أن رقعة المحاجر آخذة في الاتساع باتجاه الأراضي الزراعية، وهو ما ينذر بتوسع نطاق الأثر ما لم تضبط عمليات الترخيص والتوسع.

د- الأهمية الاقتصادية والنمو العمراني

تمثل المحاجر رافدا اقتصاديا مهما في المنطقة، إذ توفر المواد الخام الأساسية للبناء والتشييد. وقد تصاعد الطلب على الاحجار بفعل النمو العمراني المتسارع وإعادة الإعمار، مما دفع إلى توسع أنشطة التحجير وارتفاع عددها خلال العقد الأخير. غير أن هذه الأهمية الاقتصادية ترافقها كلفة بيئية وصحية باهظة إذا ما استمرت الأنشطة دون ضوابط، إذ إن تدهور الأراضي الزراعية وتملح المياه الجوفية يهددان مصادر دخل بديلة كالزراعة والرعي، فضلا عن التكاليف الصحية غير المباشرة الناتجة عن تلوث الهواء والمياه. ومن ثم فإن تحقيق التوازن بين العائد الاقتصادي للمحاجر وحماية الموارد الطبيعية يمثل التحدي المحوري الذي يسعى البحث إلى معالجته.

ويمكن مقارنة هذه المعادلة من منظور اقتصاديات البيئة عبر مفهوم التكلفة الخارجية فالسعر الذي تباع به مواد المحاجر لا يعكس الكلفة الحقيقية للنشاط ما دام لا يتضمن قيمة الضرر الواقع على التربة والمياه والصحة العامة. وحين تحتسب الكلفة الخارجية (كتدهور الأراضي الزراعية، وتراجع إنتاجية الآبار، وارتفاع النفقات الصحية) قد يتبين أن العائد الصافي للنشاط أقل بكثير مما يبدو ظاهريا، بل قد يتحول إلى خسارة صافية على مستوى المجتمع المحلي في المدى البعيد.

وعليه لابد من عمل نموذج مستدام يستوعب هذه التكاليف ويخفضها؛ فتبني مبادئ الاقتصاد الدائري في إعادة استخدام مخلفات التحجير، وإلزام المحاجر بخطط إعادة التأهيل، وربط الترخيص بالأداء البيئي، كلها أدوات تسمح باستمرار العائد الاقتصادي مع تقليص الكلفة البيئية. وبهذا يتحول التوتر الظاهر بين الاقتصاد والبيئة إلى تكامل ممكن متى توافرت الإرادة التنظيمية.

ويرتبط توسع المحاجر ارتباطا وثيقا بديناميكية النمو العمراني في المنطقة؛ إذ يولد التوسع السكاني والعمراني طلبا متصاعدا على الإسمنت والخرسانة، فينشط استخراج المواد الحجرية ورمال البناء، وهو ما يفسر انتشار المحاجر بمحاذاة مناطق التوسع. وتشير الدراسات الإقليمية، ومنها دراسة المرباط (2020) في المغرب، إلى أن نسبة كبيرة من المحاجر نشأت خلال العقد الأخير استجابة لهذا الطلب. وتكمن خطورة هذه العلاقة في طابعها التغذوي الذاتي: فالنمو العمراني يغذي التحجير، والتحجير بدوره يوفر مواد النمو العمراني، في حلقة تتسارع ما لم تضبط بتخطيط عمراني وبيئي متكامل يوازن بين احتياجات التنمية وحماية الموارد.

المبحث الثاني: التحليل المكاني للأثر الجيبيئي على عناصر البيئة

تحدث أنشطة المحاجر منظومة متشابكة من الآثار الجيبيئية التي تطال مكونات البيئة كافة. فعمليات الحفر والتفتيت الميكانيكي للصخور لا تقتصر على تغيير معالم السطح، بل تطلق كميات من الغبار والجسيمات والمعادن الثقيلة تنتقل بفعل الرياح والأمطار إلى التربة والمياه والغطاء النباتي، فضلا عن أن إزالة الطبقات الصخرية الحاجزة تخل بالتوازن الهيدروليكي للخزانات الجوفية. وتتناول الأقسام الآتية هذه الآثار تفصيلا على التربة والمياه الجوفية والصخور والهواء والغطاء النباتي.

ملخص إحصائي لعينات المياه الجوفية

المنطقة	عدد العينات	أعلى قيمة	متوسط TDS	مدى TDS (مغ/لتر)	ملاحظة
صبراتة (1.x)	10	40,408	~10,985	40,408 - 1,329	تملح حاد جداً في العينات الساحلية
صرمان (2.x)	11	6,180	~2,155	1,003 - 6,180	ملوحة متوسطة (خزان عميق)
الحرشة (3.x)	9	58,510	~9,460*	1,098 - 58,510	وجود شاذة قياسية (تلوث موضعي)
المطر (4.x)	9	13,995	~5,095	1,124 - 13,995	تملح مبكر واضح

ويمكن تصور هذه الآثار على هيئة ثلاثة مسارات تنتقل عبرها الملوثات من المصدر (المحجر) إلى المستقبل النهائي (الإنسان والنظام البيئي). الأول جوي، ينقل الغبار والجسيمات المحملة بالمعادن الثقيلة عبر الهواء لتترسب على التربة والنبات ومصادر المياه. والثاني مائي، يتمثل في تسرب الملوثات والأملاح إلى الخزانات الجوفية وانتقالها عبر مياه الري والشرب. والثالث تربيوي، تتراكم فيه الملوثات في التربة ثم تنتقل إلى النبات فالحيوان فالإنسان عبر السلسلة الغذائية. وتتقاطع هذه المسارات وتتغرز فيما بينها، بما يجعل الأثر الكلي أكبر من مجموع آثاره المفردة.

وتتبع خطورة هذا النمط من التأثير من كونه تراكمياً ومتأخر الظهور في آنٍ معاً؛ فالملوثات تتراكم ببطء دون أعراض واضحة في البداية، ثم تتجاوز عتبات الأمان لتظهر آثارها دفعة واحدة في صورة تدهور زراعي أو مشكلات صحية يصعب حينها ردها إلى مصدرها بدقة. ولهذا السبب تحديداً تكتسب أدوات القياس المبكر — المخبرية والمكانية والنمذجة — أهميتها، إذ تكشف الأثر قبل بلوغه مرحلة الظهور الحاد.

الأثر المكاني على التربة

أظهرت النتائج تغيراً جذرياً في خصائص التربة الساحلية القريبة من المحاجر (على بعد أقل من 500 متر)، تمثل في تدهور القوام والخصائص الفيزيوكيميائية وتراكم العناصر الثقيلة.

القوام (Texture): لوحظت زيادة في نسبة الحبيبات الخشنة نتيجة تفتيت الصخور، مما رفع مسامية التربة وأفقدتها قدرتها على الاحتفاظ بالرطوبة والمغذيات. إذ يؤدي التججير والحفر الميكانيكي إلى تحطيم الصخور الكبيرة إلى جزيئات دقيقة تنتقل بفعل الرياح والأمطار إلى الطبقة السطحية، فتزداد الفراغات البينية وتراجع خصوبة التربة وقدرتها على دعم نمو النبات.

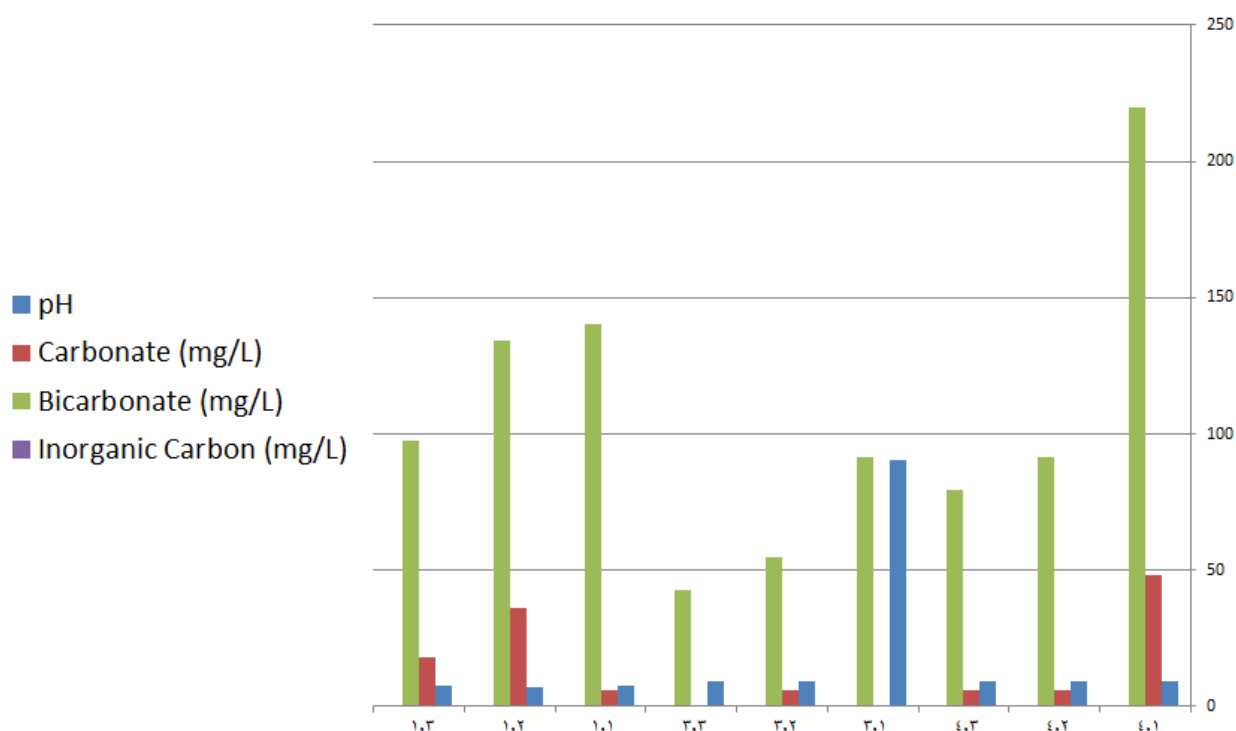
الناقلية الكهربائية (EC): سجلت عينات التربة القريبة من محاجر صبراتة قيماً مرتفعة بلغت 12.4 دسي سيمنز/م، أي بتجاوز يقارب أربعة أضعاف الحد الطبيعي للتربة الزراعية. ويعزى هذا الارتفاع إلى تراكم الغبار الصخري المحمل بأملاح

التأثير الهيدروجيولوجي لأنشطة المحاجر الساحلية على تداخل مياه البحر وتلوث الخزانات الجوفية في سهل الجفارة الغربي - ليبيا (الزاوية - صبراتة)

ذائبة، وإلى تسرب مياه البحر المالحة نتيجة إزالة الصخور الواقية. ويترتب على ارتفاع الناقلية الكهربائية تملح التربة وتراجع قدرة النباتات على امتصاص الماء، ومن ثم انخفاض الإنتاجية الزراعية.

الرقم الهيدروجيني (pH): تراوح بين 7.8 و 8.5 في المناطق القريبة من المحاجر، مقارنة بنطاق 7.0-7.3 في المناطق المرجعية، ويرجع ذلك إلى ذوبان المعادن الكربونية (CaCO_3 و MgCO_3) الناتج عن التجوية الصناعية والميكانيكية للصخور. ويؤثر ارتفاع القلوية على توافر العناصر الغذائية للنبات كالحديد والمنغنيز، ويغير من المجتمعات الميكروبية للتربة بما يزيد من تدهور البيئة الزراعية.

عينات التربة



تلوث التربة بالعناصر الثقيلة (ICP-MS): جرى تحليل تراكم المعادن الثقيلة باستخدام تقنية ICP-MS وحساب مؤشر التراكم الجغرافي (Igeo) لكل عنصر. وقد تبين أن تقنيات الصخور في أثناء الحفر والتفجير يطلق المعادن الثقيلة إلى التربة، ويساعد الغبار المعدني والرياح على انتقالها إلى المناطق المجاورة، ومن ثم إلى السلسلة الغذائية، وهو ما يهدد صحة السكان المحليين. ويوضح الجدول (1) نتائج التحليل.

الجدول (1): نتائج تحليل ICP-MS لتلوث التربة بالعناصر الثقيلة

العنصر	المتوسط (mg/kg)	الحد المسموح (Libyan/WHO)	نسبة التجاوز	التقييم البيئي
الرصاص (Pb)	95.4	30.0	3.18 ضعف	تلوث حاد
النيكل (Ni)	62.1	20.0	3.10 ضعف	تلوث مرتفع
الكروم (Cr)	110.5	50.0	2.21 ضعف	تلوث متوسط-عالي
الكاديوم (Cd)	2.8	1.0	2.80 ضعف	تلوث مرتفع

التأثير الهيد وجيولوجي لأنشطة المحاجر الساحلية على تداخل مياه البحر وتلوث الخزانات الجوفية في سهل الجفارة الغربي - ليبيا (الزاوية - صبراتة)

وتؤدي التفاعلات المتبادلة بين تدهور الخصائص الفيزيائية والكيميائية والتلوث المعدني إلى تدهور بيئي شامل يتمثل في فقدان خصوبة التربة نتيجة ارتفاع الملوحة والقلوية، وتراجع الغطاء النباتي والتنوع البيولوجي، وتراكم المعادن الثقيلة الذي يشكل تهديدا مباشرا للصحة العامة.

وتكتسب نتائج تلوث التربة بالعناصر الثقيلة بعدا صحيا بالغ الأهمية؛ فالرصاص والكاديوم على وجه الخصوص من الملوثات ذات السمية التراكمية التي تنتقل من التربة إلى النبات ثم إلى الإنسان والحيوان عبر السلسلة الغذائية، وقد ترتبط بمخاطر عصبية وكلوية وعظمية عند التعرض المزمن. وارتفاع تركيز الرصاص إلى أكثر من ثلاثة أضعاف الحد المسموح في تربة تستخدم للزراعة يجعل هذا الأثر تهديدا مباشرا لا يقتصر على البيئة بل يمتد إلى صحة السكان، بما يستدعي إدراج الرصد الصحي ضمن أي خطة لمتابعة أثر المحاجر.

كما أن اجتماع التلوث المعدني مع تملح التربة يضاعف الأثر السلبي على الزراعة؛ فالتربة المالحة الملوثة تفقد صلاحيتها للزراعة تدريجيا، ويصعب استصلاحها لاحقا بسبب رسوخ العناصر الثقيلة في مصفوفة التربة، وهو ما يجعل الوقاية أجدى وأقل كلفة من المعالجة.

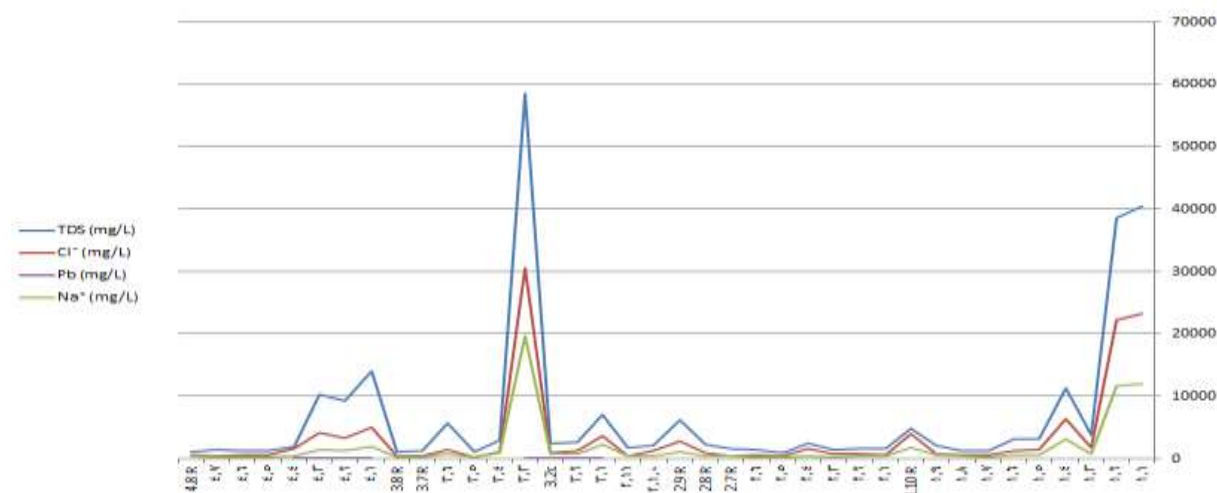
الأثر على المياه الجوفية

تمثل نتائج تحليل المياه لاختبار فرضية تداخل مياه البحر. فقد أثبتت النتائج أن إزالة الطبقات الصخرية التي كانت تعمل غطاء واقيا للآبار الجوفية أدت إلى ارتفاع كبير في الملوحة وتغير في النوعية الكيميائية للمياه.

وقد بلغ متوسط الأملاح الذائبة الكلية (TDS) في آبار الزاوية وصبراتة المحيطة بالمحاجر نحو 4800 مغ/ل، مقابل 1100 مغ/لتر في المناطق البعيدة، أي بزيادة تجاوزت أربعة أضعاف الملوحة الطبيعية.

واستخدمت نسبة الكلوريد إلى البيكربونات ($\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$) مؤشرا للتداخل، حيث أظهرت النتائج قيما تزيد على 15.0 في نحو 70% من العينات، وهو ما يؤكد تغلغل مياه البحر بقوة نتيجة انخفاض الضغط الهيدروليكي للخزان بفعل الأنشطة التعدينية.

عينات المياه الجوفية – منطقة الزاوية



أظهر إسقاط النتائج على مخطط باير (Piper Diagram) تحولا واضحا في نوعية المياه من طراز عذب (Ca-Mg) إلى طراز مالح (Na-Cl)، وهو تحول يعبر عن تأثير مباشر لتداخل مياه البحر والتغيرات الهيدرولوجية الناتجة عن المحاجر.

ويمكن تفسير التدهور المرصود بسلسلة سببية مترابطة تبدأ بإزالة الطبقات الصخرية الكربوناتية الواقية في أثناء التحجير، مما يقلل من مقاومة الخزان لتغلغل المياه المالحة، ويخفض الضغط الهيدروليكي للمياه العذبة، فيختل التوازن مع العمود المائي المالح القادم من البحر، ويتقدم الودد الملحي نحو الداخل. ويترتب على ذلك ارتفاع الملوحة في آبار كانت عذبة، ثم تدهور نوعيتها الكيميائية وتحولها إلى الطراز المالح، وهو ما تعكسه القياسات الميدانية بوضوح.

وباستخدام نموذج MODFLOW 6.0 جرت محاكاة انتشار المياه المالحة في الخزانات الجوفية، وتبين أن معدل زحف الودد الملحي نحو الداخل يقارب 500 متر سنوياً في المناطق الأكثر كثافة للمحاجر. وتتوافق هذه النتيجة مع فرضيتي الدراسة الثالثة والرابعة حول تجاوز التركيزات الكيميائية للمعايير الدولية وتأثير الأنشطة غير المستدامة على جودة الخزانات الساحلية. وتبرز هذه النتيجة خطورة الأثر على المدى المتوسط والبعيد؛ فمعدل زحف بهذا القدر يعني أن آباراً تقع اليوم على بعد بضعة مئات من الأمتار من جبهة التداخل قد تفقد صلاحيتها للشرب والري خلال سنوات قليلة إن استمرت الأنشطة على وتيرتها الحالية. كما أن ارتفاع الملوحة لا يقتصر أثره على المياه، بل ينتقل إلى التربة عبر الري بمياه مالحة، فيغلق حلقة التدهور بين المياه والتربة والغطاء النباتي، ويحول الأثر من مشكلة محلية إلى تهديد للأمن المائي والغذائي في المنطقة بأكملها.

الأثر على الصخور

جرى توثيق كل عينة صخرية إحداثياً باستخدام أجهزة تحديد المواقع (GPS) وربطها بالخرائط الرقمية لتحليل التوزيع المكاني للتجوية والتدهور، مع التركيز على الصخور الرسوبية السطحية والصخور الجيرية والكربوناتية التي تؤدي دور الغطاء الطبيعي للخزانات الجوفية.

وأظهر تحليل XRF أن الصخور تتكون من المكونات المعدنية الموضحة في الجدول (2)، ويغلب عليها كربونات الكالسيوم بوصفها المكون الأساسي المسؤول عن حماية المياه الجوفية طبيعياً.

جدول (2): نتائج تحليل XRF للتركيب المعدني للصخور

المعدن	النسبة المئوية (%)	التعليق
CaCO ₃	65 – 70	مكون أساسي لتكوين الكربونات والحماية الطبيعية للمياه الجوفية
MgCO ₃	5 – 8	يدعم القلوية ويؤثر على pH المياه
SiO ₂	20 – 25	يزيد من صلابة الصخور ومقاومتها الميكانيكية
Fe ₂ O ₃	2 – 4	مؤشر على تلوث محتمل بالمعادن الثقيلة بعد التفجير

ويستنتج أن تفتت الصخور في المحاجر يزيد من نسبة الغبار الكربوني في التربة والمياه، وأن انخفاض المعادن الكربونية في الطبقات السطحية يضعف حماية الخزانات الجوفية من تداخل مياه البحر.

ولوحظ وجود فراغات وتشققات كبيرة في الصخور نتيجة والتعرض للعوامل الجوية (الرياح، الأمطار، تذبذب الحرارة). وتمثلت المؤشرات الميدانية في زيادة الغبار الصخري في المناطق المحيطة، وتشقق الصخور الكربوناتية الذي يزيد من تغلغل المياه المالحة إلى الطبقات الداخلية.

وتتصافر في هذه العملية آليتان من التجوية: تجوية ميكانيكية يحدثها الحفر فتفتت الصخر وتزيد مساحته المعرضة، وتجوية كيميائية يسرعها التعرض للمياه الغنية بالكلوريد فتذيب الروابط الكربوناتية. وتسرع الآلية الأولى الثانية؛ إذ كلما ازدادت التشققات والفراغات ازدادت المساحة المتاحة للتفاعل الكيميائي، فتحول الصخرة الصلبة تدريجياً إلى بنية مسامية هشة تفقد

التأثير الهيد وجيولوجي لأنشطة المحاجر الساحلية على تداخل مياه البحر وتلوث الخزانات الجوفية في سهل الجفارة الغربي - ليبيا (الزاوية - صبراتة)

وظيفةها بوصفها حاجزا واقيا للخزان الجوفي. وهذا التحول هو الحلقة الجيولوجية التي تربط النشاط السطحي للمحاجر بالتدهور العميق للمياه الجوفية.

بين تحليل ICP-MS أن تركيزات العناصر الثقيلة (Pb, Ni, Cr, Cd) أعلى في الصخور المجاورة لواجهات الحفر المفتوحة مقارنة بالمناطق المرجعية، وهو ما يوضح أن التفجير والتفتيت يرفعان احتمال انتقال المعادن الثقيلة إلى التربة والمياه، جدول (3).

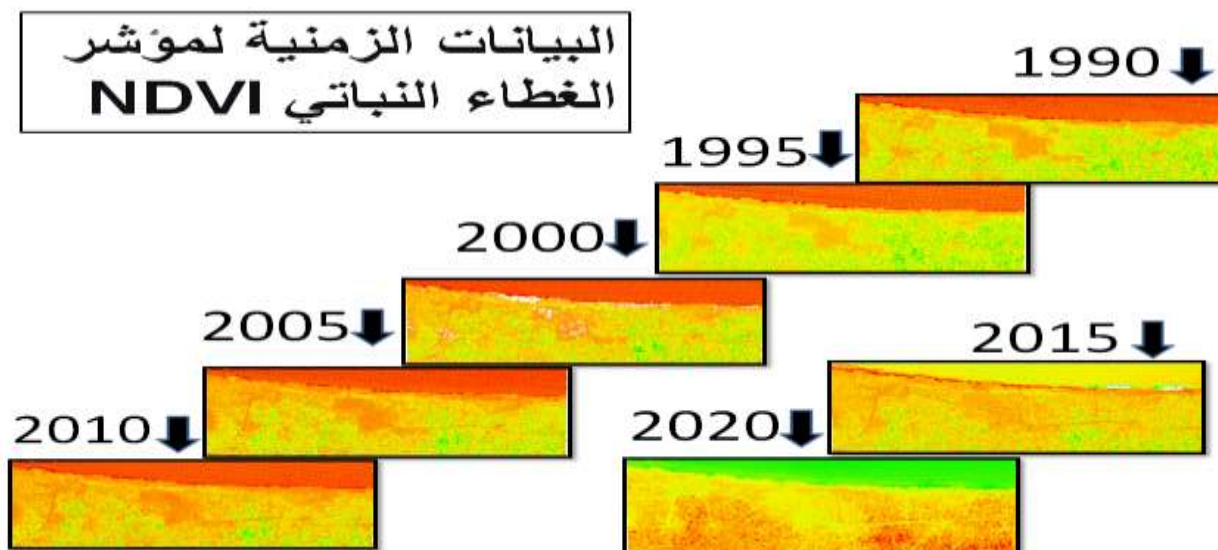
جدول (3): تحليل تراكم المعادن الثقيلة في الصخور

العنصر	المتوسط (mg/kg)	الحد المسموح	نسبة التجاوز	التقييم البيئي
Pb	2.66	30	80	تلوث حاد
Ni	2.75	20	55	تلوث مرتفع
Cr	2.00	50	100	تلوث متوسط-عالي
Cd	2.50	1	2.5	تلوث مرتفع

الأثر على الهواء والغطاء النباتي

تسهم أنشطة المحاجر في تدهور جودة الهواء عبر انبعاث الغبار المتطاير والجسيمات الدقيقة الناتجة عن التفجير والحفر ونقل المواد. وتؤدي هذه الجسيمات إلى ارتفاع تركيزات الغبار المعلق في المناطق السكنية والزراعية المجاورة، بما يترتب عليه من مخاطر على الجهاز التنفسي للسكان وعلى العمليات الحيوية للنباتات. وتتسق هذه الملاحظات مع نتائج الدراسات الإقليمية التي رصدت تركيزات مرتفعة من الجسيمات (PM2.5) قرب المحاجر، ومنها دراسة Smith وآخرين (2020) التي سجلت في المناطق القريبة من المحاجر تركيزات تفوق المعايير الدولية بثلاثة أضعاف.

ويتميز الغبار المنبعث من المحاجر الكربوناتيّة بأنه لا يقتصر أثره على الإزعاج البصري أو التنفسي، بل يحمل معه جسيمات محملة بالمعادن الثقيلة تنتقل عبر الهواء لتترسب على التربة والنبات ومصادر المياه السطحية، فيتحوّل تلوث الهواء إلى ناقل لتلوث التربة والمياه. وهذا الترابط بين الوسائط البيئية يؤكد مجددا الطبيعة المنظومية للأثر، ويجعل مراقبة جودة الهواء عنصرا لا غنى عنه في أي منظومة رصد بيئي للقطاع.



أما الغطاء النباتي، فيتأثر بصورة مركبة: مباشرة عبر ترسب الغبار على الأوراق وإعاقة عملية التمثيل الضوئي، وغير مباشرة عبر تدهور التربة وتملحها وتراكم المعادن الثقيلة بها. وقد رصد تراجع في كثافة الغطاء النباتي وتدهور في الأراضي الزراعية القريبة من المحاجر.

ويتجلى الأثر على الغطاء النباتي في ثلاث حلقات متتابعة: أولاها فيزيائية تتمثل في تغطية الأوراق بطبقة من الغبار تقلل النفاذية الضوئية وتسد الثغور، وثانيها كيميائية تتمثل في امتصاص النبات لمعادن ثقيلة سامة من تربة ملوثة، وثالثها هيدرولوجية تتمثل في تعرض الجذور لمياه مرتفعة الملوحة تحد من قدرتها على امتصاص الماء والمغذيات. وتتضافر هذه الحلقات لتؤدي إلى انخفاض الإنتاجية الزراعية وتراجع التنوع النباتي، بما ينسجم مع ما رصدته الدراسات الإقليمية من فقدان للتنوع الحيوي قرب المحاجر.

ومن منظور جيوبئي متكامل، يمثل تدهور الغطاء النباتي المؤشر الحيوي الأوضح على تراكم الأثر، إذ يجمع في تدهوره آثار الهواء والتربة والمياه معا، ويوفر بذلك أداة رصد مبكرة يمكن تتبعها عبر المرئيات الفضائية لمتابعة تطور الأثر مكانيا وزمانيا دون الحاجة إلى تحاليل مخبرية مكلفة في كل مرة.

ثالثا: التقييم المجتمعي والتصور المكاني لإدارة أثر المحاجر

يتناول هذا الجانب بمستوى إدراك السكان والعاملين للأثر الجيوبئي لأنشطة المحاجر والتصور المكاني المقترح لإدارته، والحد من الآثار. ويعرض نتائج الاستبانة الموزع على عينة من السكان والعاملين والمختصين، ثم يستخلص منها ملامح تصور مكاني لإدارة أثر المحاجر يمهّد لتوصيات البحث.

مجتمع البحث وعينته

تمثل مجتمع البحث في جميع الجهات والأفراد المعنيين بأنشطة المحاجر في المنطقة الممتدة من الزاوية إلى صبراتة، ويشمل السكان المحليين القاطنين بالقرب من المحاجر، والعاملين داخلها، والمختصين البيئيين والمسؤولين عن إدارة الموارد الطبيعية. وقد اختيرت عينة عشوائية طبقية بلغ حجمها (100) مفردة موزعة بين هذه الفئات بما يضمن تمثيلا واقعيًا لأرائها ونتائج قابلة للتحليل والتعميم بدرجة مقبولة إحصائيا.

أداة البحث وثباتها

اعتمدت البحث المنهج الوصفي التحليلي، واستخدم استمارة الاستبانة أداة رئيسية لجمع البيانات لقدرته على جمع معلومات كمية ونوعية من عدد كبير من الأفراد بطريقة منسقة قابلة للتحليل. وتتكون الاستبانة من ثلاثة أقسام: الأول للبيانات

التأثير الهيد وجيولوجي لأنشطة المحاجر الساحلية على تداخل مياه البحر وتلوث الخزانات الجوفية في سهل الجفارة الغربي - ليبيا (الزاوية - صبراتة)

الديموغرافية (النوع، العمر، المستوى التعليمي، سنوات الخبرة، الدور الوظيفي)، والثاني تقيم آراء السكان المحليين حول التأثيرات البيئية والاجتماعية، والثالث تقيم آراء العاملين والمختصين حول فعالية الممارسات وإجراءات السلامة. وقد صممت الاستبانة بحيث يوازن بين الأسئلة المغلقة القابلة للقياس الكمي والأسئلة التي تتيح استجلاء اتجاهات الرأي، وروعي في صياغته وضوح العبارات وتجنب الإيحاء بإجابة بعينها، بما يقلل من تحيز الاستجابة. كما استكمل بمقابلات مع عينة من العاملين والمختصين أتاحت تعميق فهم النتائج الكمية وتفسير بعض الاتجاهات التي أظهرها الاستبيان. وللتحقق من ثبات الأداة، استخدم أسلوب إعادة الاختبار (Test-Retest) واحتسب معامل ارتباط سبيرمان (Spearman) بين الاستجابتين، وقد جاءت قيم المعامل مرتفعة (تراوحت بين 0.55 و 0.66 بدلالات إحصائية أقل من 0.05) في مختلف البنود، مما يعكس ثبات الاستبانة وقدرتها على قياس المتغيرات المستهدفة بدقة، ويوضح الجدول (8) نماذج منها. ويقرأ معامل الارتباط مؤشرا على استقرار استجابات المبحوثين عبر الزمن؛ فكلما اقتربت القيمة من الواحد الصحيح دل ذلك على أن الأداة تقيس المتغير نفسه باتساق، وهو ما تحقق في جميع البنود بدلالات إحصائية معنوية.

الجدول (8): نماذج من معاملات ثبات الاستبيان (ارتباط سبيرمان)

م	السؤال	حجم العينة	معامل الارتباط	الدالة (p)
1	تأثر جودة الهواء سلبا بسبب المحاجر	100	0.65	0.004
2	ملاحظة تلوث المياه المرتبط بأنشطة المحاجر	100	0.62	0.006
3	تأثير الضوضاء على الحياة اليومية	100	0.60	0.008
4	مساهمة المحاجر في تدهور الأراضي الزراعية	100	0.58	0.010
5	التأثير السلبي على الصحة العامة	100	0.61	0.007
10	ضرورة اتباع إجراءات أكثر صرامة	100	0.66	0.003

عرض نتائج التقييم المجتمعي

الخصائص الديموغرافية للعينة

بلغ عدد أفراد العينة (100) مفردة، توزعوا بحسب الجنس إلى 80% من الذكور و 20% من الإناث، وهو توزيع يعكس طبيعة العمل في قطاع المحاجر التي يغلب عليها العنصر الذكوري، يتبين من الجدول أن الفئة العمرية 25-40 سنة تمثل نحو 65% من العينة، وهي الفئة الأكثر نشاطا وتعرضا مباشرا لتأثيرات المحاجر، سواء بوصفها ساكنة قريبة أو عاملة في القطاع، بما يمنح النتائج ثقلا في تمثيل الفئة الأكثر تأثرا.

الجدول (10): توزيع أفراد العينة بحسب الفئة العمرية والجنس

الفئة العمرية	عدد الذكور	عدد الإناث	الإجمالي	النسبة (%)
أقل من 25 سنة	12	3	15	15%
25 - 30 سنة	28	7	35	35%
31 - 40 سنة	24	6	30	30%
أكثر من 40 سنة	16	4	20	20%
الإجمالي	80	20	100	100%

أما من حيث المستوى التعليمي فيوضح الجدول (11).

الجدول (11): توزيع أفراد العينة حسب المستوى التعليمي

المؤهل العلمي	العدد	النسبة (%)
أقل من ثانوي	15	15%
ثانوي	20	20%
دبلوم / شهادة فنية	25	25%
بكالوريوس فأعلى	40	40%
الإجمالي	100	100%

ويعكس هذا التوزيع تنوعا في الخلفيات التعليمية بين السكان المحليين والعاملين والمختصين، إذ جاء الحاصلون على البكالوريوس بنسبة 40%، وهو ما يمنح جانبا من الإجابات خاصة المتعلقة بالإجراءات البيئية والفنية قدرا من الدراية المتخصصة، فيما يضمن حضور المستويات التعليمية الأدنى تمثيل وجهة نظر السكان المتأثرين مباشرة بصرف النظر عن خلفيتهم الفنية.

ثانيا نتائج تقييم آراء السكان والعاملين

أظهرت نتائج الاستبانة إدراكا مرتقعا لدى غالبية أفراد العينة للأثار الجيوبئية لأنشطة المحاجر، حيث يوضح الجدول (9)

الجدول (9): آراء افراد العينة للأثار الجيوبئية لأنشطة المحاجر

المحور	نسبة الإقرار (نعم)	نسبة النفي (لا)
تأثر جودة الهواء سلبا بسبب المحاجر	28%	72%
ملاحظة تلوث المياه المرتبط بالمحاجر	31%	69%
تأثير الضوضاء على الحياة اليومية	33%	67%
مساهمة المحاجر في تدهور الأراضي الزراعية	28%	72%
عدم كفاية الإجراءات البيئية الحالية	35%	65%
وجود مخاطر بيئية وصحية حقيقية	19%	81%
ضرورة تطبيق إجراءات أكثر صرامة	25%	75%
ضعف/توسط الوعي البيئي لدى العاملين	38%	62%

ويلاحظ من الجدول أن أعلى نسب الإقرار تركزت حول وجود مخاطر بيئية وصحية حقيقية (81%) وضرورة تشديد الإجراءات (75%)، وهو ما يعكس توافقا واسعا بين أفراد العينة على خطورة الوضع القائم والحاجة إلى التدخل. عند تفكيك النتائج بحسب محاورها، يتبين أن محور جودة الهواء حظي بأعلى درجات الإدراك؛ إذ أقر 72% من أفراد العينة بتأثر الهواء سلبا بسبب الغبار المتطاير، وتوزع هذا الإقرار بين الجنسين (58% من الذكور و14% من الإناث)، بما يعكس أن أثر الغبار محسوس على نطاق واسع لقربه المباشر من المساكن. أما محور المياه، فقد لاحظ 69% من المشاركين تلوثا في الآبار أو المجاري المائية مرتبطا بأنشطة المحاجر، وهو ما يتقاطع مع القياسات المخبرية لارتفاع الملوحة.

وفي محور الأراضي الزراعية، أكد 72% من أفراد العينة مساهمة المحاجر في تدهورها، بينما أفاد 67% بتأثر حياتهم اليومية بالضوضاء الناتجة عن التفجير ونقل المواد. أما فيما يتعلق بالبعد المؤسسي، فقد كشفت الإجابات عن فجوة لافتة: إذ رأى 65% أن الإجراءات القائمة غير كافية، ورأى 64% أن التدابير البيئية الحالية ضعيفة، وأفاد 62% بأن الالتزام البيئي في المحاجر دون المستوى المطلوب، وقدر 62% أن الوعي البيئي لدى العاملين متوسط أو ضعيف. وتجمع هذه المؤشرات على تشخيص واضح لضعف الحوكمة البيئية للقطاع. وتكمن الدلالة المنهجية لهذه النتائج في تقاطعها مع القياسات المخبرية؛ فحين يتطابق الإدراك المجتمعي مع المعطى المخبري (كما في حالتي الهواء والمياه)، تتعزز مصداقية التقييم، ويصبح البعد المجتمعي أداة تحقق (Validation) للنتائج الكمية لا مجرد مكمل وصفي لها.

التصور المكاني المقترح لإدارة الأثر

تأسيساً على تقاطع القياسات المخبرية مع الإدراك المجتمعي، يتبلور تصور مكاني لإدارة أثر المحاجر يقوم على ثلاث ركائز متكاملة. الركيزة الأولى تحديد نطاقات الأولوية (Hotspots) التي تجتمع فيها كثافة المحاجر والقرب من الآبار والأراضي الزراعية، وتوجيه جهود الرصد والتدخل إليها أولاً بدل توزيع الموارد المحدودة بالتساوي. والركيزة الثانية إنشاء مناطق عازلة (Buffer Zones) تفرض مسافات أمان بين المحاجر ومصادر المياه والتجمعات السكنية والأراضي الزراعية. والركيزة الثالثة بناء منظومة رصد مكاني دائمة تعتمد على نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد لمتابعة تطور الأثر زمنياً ومكانياً. ويمثل هذا التصور حلقة الوصل بين نتائج الدراسة وتوصياتها التطبيقية، إذ يترجم القراءة المكانية للأثر إلى أداة قرار عملية بيد الجهات المعنية.

مناقشة النتائج

أولاً: مناقشة التوزيع المكاني لأنشطة المحاجر

أظهر التحليل المكاني أن انتشار المحاجر لا يتوزع بانتظام، بل يتركز في نطاقات محددة تجتمع فيها كثافة المحاجر والقرب من الساحل والآبار ومناطق التوسع العمراني. وهذا التركز يفسر تباين شدة الأثر مكانياً، ويتسق مع ما رصدته دراسة المرباط (2020) من ارتباط بين النمو العمراني وتكاثر المحاجر. ومن ثم فإن التوزيع المكاني نفسه يحمل مفتاح تفسير النتائج البيئية اللاحقة، إذ إن النطاقات الأكثر كثافة هي التي سجلت أعلى قيم التلوث والملوحة.

ثانياً: مناقشة الأثر الجيوبيئي على عناصر البيئة

تتقاطع النتائج المخبرية والرقمية في تأكيد وجود أثر جيوبيئي معنوي يتزايد كلما اقتربنا مكانياً من مواقع المحاجر. فمن جهة التربة، يعزز ارتفاع الناقلية الكهربائية إلى 12.4 دسي سيمنز/م وتجاوز الرصاص للحد المسموح بمقدار 3.18 ضعف فرضية تجاوز التركيزات للمعايير الدولية. ومن جهة المياه، يدعم ارتفاع الـ TDS إلى 4800 مغ/ل وتجاوز نسبة $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ القيمة 15 في 70% من العينات فرضية تسارع تداخل المياه المالحة، وهو ما تؤكد محاكاة MODFLOW بمعدل زحف يقارب 500 متر سنوياً.

وتتسجم هذه النتائج مع ما توصلت إليه الدراسات السابقة؛ فالتجوية المتسارعة للصخور الكربوناتية توافق ما رصدته دراسة الغرياني (2019) في المحاجر التونسية، كما أن تراكم الرصاص والكاديوم قرب واجهات الحفر يتسق مع نتائج Rajendran وآخرين (2017)، فيما ينسجم انخفاض الضغط الهيدروليكي وزحف مياه البحر مع النموذج الذي قدمه Ferguson و Gleeson (2012) وما رصدته دراسة عبد الرحمن (2015) في الساحل الليبي. وتجميع هذه المؤشرات

يتضح أن أنشطة المحاجر تعمل منظومة متكاملة من الضغوط: فتفتت الصخور يضعف الحاجز الكربوناتي، وإضعافه يسرع الزحف الملحي، والزحف يرفع ملوحة التربة والمياه، وارتفاعها يتلف الغطاء النباتي ويهدد الصحة العامة.

ثالثاً: مناقشة التقييم المجتمعي

تضفي نتائج الاستبيان بعداً تأكيدياً على النتائج المخبرية؛ إذ إن إدراك 72% من السكان لتأثر جودة الهواء و69% لتلوث المياه يتقاطع مع القياسات الفعلية للغبار والملوحة، بما يعزز مصداقية النتائج ويؤكد أن الأثر محسوس ميدانياً لا مجرد قراءة مخبرية. كما أن اتفاق 65% على عدم كفاية الإجراءات القائمة و75% على ضرورة تشديدها يكشف فجوة واضحة بين التشريعات المفترضة والتطبيق الفعلي، وهو ما يعزز الحاجة إلى التصور المكاني للإدارة الذي طرحه المبحث الثالث، ويمثل محور التوصيات.

اختبار فرضيات البحث في ضوء النتائج

في ضوء ما تقدم، يمكن الحكم على فرضيات البحث: -

- الفرضية الأولى (تمركز المحاجر مكانياً في نطاقات محددة بارتباط مع الجيولوجيا والقرب من الساحل والتوسع العمراني): تحققت، إذ كشف التحليل المكاني عن نطاقات تركز (Hotspots) لا انتشار منتظم، وارتبط تركزها بالمناطق الساحلية ومناطق التوسع العمراني.
- الفرضية الثانية (إحداث أثر جيوبئي معنوي يتجاوز المعايير الدولية ويشد بالاقتراب من المحاجر): تحققت بوضوح، إذ تجاوز الرصاص الحد المسموح 3.18 ضعف والنيكل 3.10 ضعف، وارتفعت الأملاح الذائبة إلى أربعة أضعاف القيم المرجعية، مع تدرج مكاني واضح للأثر نحو مواقع المحاجر.
- الفرضية الثالثة (وجود إدراك مجتمعي مرتفع يتقاطع مع القياسات مع توافق على ضعف الإجراءات): تحققت، إذ أقرت الغالبية بالمخاطر البيئية والصحية (81%)، وتقاطع إدراكها للهواء والمياه مع القياسات المخبرية، مع توافق واسع (75%) على ضرورة تشديد الإجراءات.

الاستنتاجات

1. لا يتوزع نشاط المحاجر مكانياً بانتظام، بل يتركز في نطاقات محددة بمحاذاة الساحل وقرب آبار المياه والأراضي الزراعية ومناطق التوسع العمراني.
2. ترتبط النطاقات الأكثر كثافة للمحاجر بأعلى مؤشرات التدهور البيئي، بما يجعل التوزيع المكاني مفتاحاً لتفسير تباين شدة الأثر وأداة لترتيب أولويات التدخل.
3. تعاني التربة القريبة من المحاجر من تلوث حاد بالعناصر الثقيلة (خاصة الرصاص والكاديوم) وارتفاع ملحوظ في الناقلية الكهربائية والقلوية.
4. تشهد المياه الجوفية تداخلاً قوياً مع مياه البحر، بدليل ارتفاع الـ TDS إلى نحو أربعة أضعاف القيم المرجعية وتحول نوعية المياه من طراز عذب إلى مالح، وتتنبأ نمذجة MODFLOW بزحف الوتد الملحي نحو الداخل بمعدل يقارب 500 متر سنوياً.
5. يضعف تفتت الصخور الكربوناتية الحاجز الطبيعي الذي يحمي الخزانات الجوفية فيتسارع التدهور الهيدروجيولوجي، ويشد الأثر مكانياً كلما اقتربنا من مواقع المحاجر.

6. هناك إدراكا مجتمعيا مرتفعا للأثر البيئي والصحي يتقاطع مع القياسات المخبرية، مع توافق واسع على عدم كفاية الإجراءات القائمة وضرورة تشديدها.
7. وجود تصور مكاني للإدارة يقوم على تحديد نطاقات الأولوية وإنشاء مناطق عازلة وبناء منظومة رصد مكاني دائمة.

التوصيات

1. تحديد النطاقات الأولوية التي تجتمع فيها كثافة المحاجر والقرب من الآبار والأراضي الزراعية، وتوجيه جهود الرصد والتدخل إليها.
2. إنشاء مناطق عازلة تفرض مسافات أمان بين المحاجر وآبار المياه والأراضي الزراعية والمناطق السكنية.
3. ربط تراخيص المحاجر الجديدة بتخطيط عمراني وبيئي متكامل يمنع التوسع العشوائي باتجاه المصادر المائية والزراعية.
4. إلزام المحاجر بإجراء تقييم الأثر البيئي قبل الترخيص، وبخطط إغلاق وإعادة تأهيل للمواقع بعد انتهاء العمل.
5. الحد من تداخل مياه البحر عبر ترشيد الضخ من الخزانات الساحلية والحفاظ على الطبقات الصخرية الحاجزة قدر الإمكان.
6. تبني مبادئ الاقتصاد الدائري في إعادة استخدام مخلفات التحجير في صناعات البناء الأخضر بدلا من تراكمها.
7. إنشاء نظام رصد بيئي مكاني دائم يعتمد على نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد لمتابعة ملوحة المياه وجودة الهواء والتربة.
8. تنفيذ برامج توعية وتدريب دورية للعاملين حول الإجراءات البيئية ومعايير السلامة، وتوفير معدات الحماية الشخصية.
9. إشراك المجتمع المحلي في المتابعة والإبلاغ عن المخالفات البيئية، وتعزيز الشفافية في نشر بيانات الرصد.

المقترحات

1. توسيع البحث زمانيا عبر سلاسل رصد طويلة الأمد لقياس معدلات التغير الفعلية في الملوحة والغطاء النباتي.
2. دمج التحليل النظائري لتحديد مصدر التلوث والتمييز بين تداخل مياه البحر والتملح الطبيعي بدقة أعلى.
3. تطوير نماذج تنبؤية متقدمة باستخدام تقنيات التعلم الآلي لتقدير أثر السيناريوهات المستقبلية على جودة المياه والتربة.
4. إعداد خريطة مخاطر تفاعلية عبر الويب تتيح لصناع القرار متابعة المواقع المتضررة آنيا.
5. دراسة الجدوى الاقتصادية والبيئية لإعادة تأهيل المحاجر المهجورة وتحويلها إلى استخدامات بديلة.
6. توسيع نطاق الدراسة ليشمل مناطق ساحلية ليبية أخرى بغرض المقارنة وتعميم النتائج.

المراجع

1. أنور عثمان نجي، والهادي رجب اشميلة، وعلي مصباح بن عيسى. (2022م). التركيب الكيميائي لصخور تكوين الخمس (المايوسين الأوسط) بمحجر مصنع العربية للإسمنت - زليتن، ليبيا، 35(1)
2. البناء، أميرة محمد. (2024م). النمذجة المكانية للتعرية المائية للتربة بحوض وادي سدر باستخدام تقنيات الجيوإنفورماتيكس، العدد 29، الجزء الثاني
3. الفيتوري، علي محمد. (2015م). الخصائص المورفومترية والهيدرولوجية لحوض وادي القطارة - دراسة مقارنة بين الطرق التقليدية وبرمجيات نظم المعلومات الجغرافية، العدد الثالث.
4. نوير، ب. (2005م). تطبيق تقنية تقييم الأراضي في شمال شرق ليبيا، أطروحة دكتوراه، كلية البيئة، جامعة كرانفيلد، سيلسو.

5. مقبلي، محمد عياد. (1999م). المناخ في ليبيا: دراسة في الجغرافية، تحرير الهادي بولقمة وسعد القزيري، الدار الجماهيرية للنشر والتوزيع والإعلان، سرت.
6. الغرابي، أبو القاسم محمد. (1995م). النقل والمواصلات في الجماهيرية: دراسة في الجغرافية، الدار الجماهيرية للنشر والتوزيع والإعلام، سرت.
7. النير، مصطفى. (1996م). نمط التحضر في ليبيا، مجلة الفكر العربي، العدد 43.
8. أبو سنيّة، محمد عبد الجليل. (1993م). الموارد الزراعية والرعية في ليبيا: محاولة في استشراف المستقبل، الهيئة القومية للبحث العلمي، طرابلس، ط1.
9. السعدي، عباس. (2000م). محافظة بغداد: دراسة في جغرافية السكان، مطبعة الأزهر، بغداد.
10. أبو حمرة، علي، والمبروك، مصطفى. (2018م). تغير استخدامات الأرض في منطقة زليتن باستخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد، مجلة الأبحاث العلمية للمؤتمر الجغرافي الرابع لتقنية المعلومات المكانية، طرابلس، ليبيا.
11. Al Hashmi et al. (2022). Environmental Impact of Quarrying Activities in Coastal Regions: A Case Study from Oman. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154321
12. El Ameer et al. (2021). Dust Pollution from Quarries and Its Impact on Air Quality in Nile Delta, Egypt. DOI: 10.1007/s11356-021-13534-0
13. Bouchon et al. (2020). Saltwater Intrusion in Coastal Aquifers: A Case Study from Morocco. DOI: 10.3390/w12082120
14. Abd Elhaida et al. (2023). Mitigation of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: A Global Review. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129456
15. Ferrari et al. (2022). Circular Economy in Quarrying: Recycling of Stone Waste for Green Construction. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106123
16. Kumar & Singh (2023). Sustainable Quarry Management Using GIS and Remote Sensing: A Case Study from India. DOI: 10.1080/19475705.2023.1987654
17. Gomez et al. (2021). Geochemical Interactions Between Coastal Rocks and Seawater: Implications for Groundwater Quality. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2021.105012
18. Al Merab et al. (2020). Environmental Challenges of Quarrying in Libya: A Case Study of Benghazi. DOI: 10.1080/24749508.2020.1753554
19. Al Awadhi et al. (2023). Impact of Urban Expansion on Groundwater Resources in Arid Regions: A Libyan Perspective. DOI: 10.1007/s12665-023-10759-9
20. Hamad, S. (2020). Updating topographic maps at a scale of 1:250,000 for Libyan lands using QGIS and open geospatial data. Journal of Geographical Studies, 4(1),
21. Dakhil, A. (2013). The contribution of the construction industry to economic development in Libya. Liverpool John Moores University, UK.

22. Shushan, I. F., Akhmera, S. B., & Minas, H. A. (2019). Discrete physical weathering patterns affecting stone building materials at Sabratha, northwest Libya. *Journal of Mathematical Sciences and Microtechnology*, 5(1),
23. Abugdera, A. F., Faris, B. M., & Abugderha, M. M. (2018). Analytical Study of Environmental Impact Assessment for a Wastewater Treatment Plant in Sabratha, Libya. *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 9(5),
24. Elawama, A. S. A. B. (2016). The influence of natural and human factors on the sustainability of agriculture in Azzawia, Libya. *Universiti Sains Malaysia, Penang*.
25. Elaalem, M. M., Ezlit, Y. D., Elfghi, A., & Abushnaf, F. (2013). Performance of supervised classification for mapping land cover and land use in the Jeffara Plain of Libya. *Int. Proc. of Chemical, Biological & Environmental Engineering*,