https://jsras.rcc.edu.ly/
Vol.3 No.1 (2026), 63-72
Article history:
Received: 3 Feb. 2026
Accepted: 4 May. 2026
Published: 18 May. 2026

Journal of Sustainable Research in Applied Sciences

Heavy Metal Pollution and Environmental Indicators of the Coastline of Al Khums-Libya

Ibrahim Salem Al-Taeb, etayebhemo541@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-9864-5055
Department of Environmental Science and Engineering, The Libyan Academy, Libya
DOI: https://doi.org/10.36602/jsras.2026.3.1.8

Index Terms
Heavy metals, marine pollution, physicochemical indicators, Mediterranean Sea waters, Al Khums Municipality.

Abstract
This study was conducted to assess heavy metal pollution (lead Pb, cadmium Cd, copper Cu, iron Fe, and zinc Zn) and some environmental indicators (pH, EC, TDS, BOD, TU, and temperature) in coastal waters along the Mediterranean shoreline of Al Khums, Libya. Samples were collected from ten different sites during two seasons (summer 2024 and winter 2025), comprising a total of 20 samples (10 for heavy metal analysis and 10 for physical and chemical indicators). Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) was used to determine heavy metal concentrations. The results showed that the concentrations of lead (Pb) and copper (Cu) exceeded internationally permissible limits UNESCO (1978) during the summer season, while lead (Pb) and cadmium (Cd) exceeded the permissible limits during the winter season. A significant difference was observed in cadmium concentration between the current study and previous studies (P = 0.003).

التلوث بالعناصر الثقيلة والمؤشرات البيئية لسواحل بلدية الخمس ـ ليبيا

إبراهيم سالم التائب
الأكاديمية الليبية/ فرع جنزور، قسم العلوم والهندسة البيئية، ليبيا، com.etayebhemo541@gmail، https://orcid.org/0009-0001-9864-5055
DOI: https://doi.org/10.36602/jsras.2026.3.1.8

الكلمات المفتاحية
المعادن الثقيلة، التلوث البحري، المؤشرات الفيزيائية والكيميائية، مياه البحر المتوسط، بلدية الخمس.

الملخص
أجريت هذه الدراسة لتقييم التلوث بالعناصر الثقيلة (الرصاص Pb، الكادميوم Cd، النحاس Cu، الحديد Fe، الزنك Zn) وبعض المؤشرات البيئية (pH، EC، TDS، BOD، TU، درجة الحرارة) في مياه الشواطئ على ساحل البحر المتوسط لبلدية الخمس، ليبيا. تم جمع العينات من عشرة مواقع مختلفة خلال فصلين (الصيف 2024 والشتاء 2025)، بواقع 20 عينة (10 لقياس العناصر الثقيلة و10عينات للمؤشرات الفيزيائية والكيميائية)، استخدم مطياف الامتصاص الذري (AAS) لقياس تراكيز العناصر الثقيلة، أظهرت النتائج أن تركيزي الرصاص والنحاس تجاوزا الحدود المسموح بها دولياً (UNESCO, 1978) خلال فصل الصيف، بينما تجاوز الرصاص والكادميوم الحدود خلال فصل الشتاء. تبين وجود فرق معنوي في تركيز الكادميوم بين الدراسة الحالية والدراسات السابقة (P=0.003). تستدعي النتائج اتخاذ إجراءات رقابية عاجلة خاصة في منطقة الميناء وشاطئ فيلا سيلين.

1. المقدمة

تُعد مشكلة التلوث بالعناصر الثقيلة من أبرز القضايا البيئية التي تهدد النظم الساحلية في البحر الأبيض المتوسط، حيث تنتج هذه الملوثات عن الأنشطة البشرية المختلفة مثل التصريفات الصناعية، ومياه الصرف الصحي، والنشاطات النفطية والزراعية. وتمتاز هذه العناصر مثل الرصاص والكادميوم والكروم بقدرتها على التراكم الحيوي داخل الكائنات البحرية، مما يؤدي إلى انتقالها عبر السلسلة الغذائية ووصولها إلى الإنسان، محدثةً آثاراً صحية وبيئية خطيرة (محمد، عيسى، 2025).

وفي دراسة حديثة أُجريت عام 2022 على سواحل البحر المتوسط (ميناء دمياط – مصر)، تم قياس تراكيز عدة عناصر ثقيلة في المياه والرواسب والأسماك، وأظهرت النتائج وجود تراكم ملحوظ لهذه العناصر في الأنسجة الحيوية للكائنات البحرية، مما يدل على انتقالها عبر السلسلة الغذائية وتأثيرها المحتمل على صحة الإنسان (معيف وآخرون، 2025).

وفي سياق الدراسات التطبيقية الحديثة، أظهرت أبحاث أُجريت سنة 2024 على بعض المناطق الساحلية (مثل السواحل الليبية) وجود مستويات متفاوتة من التلوث بالعناصر الثقيلة في الرواسب البحرية، مع تسجيل مخاطر بيئية مرتفعة لبعض العناصر مثل الكادميوم، ما يشير إلى ضرورة اعتماد مؤشرات بيئية دقيقة لتقييم جودة البيئة البحرية وحماية الموارد الساحلية (الفرجاني، الباز، 2024).

تتمثل الفجوة البحثية في هذه الدراسة في ندرة الدراسات الحديثة التي قيّمت حالة التلوث بالعناصر الثقيلة لسواحل بلدية الخمس خلال الفترة الأخيرة (2020-2025)، حيث تعود معظم الدراسات السابقة إلى فترات زمنية قديمة لم تعد تعكس الوضع الراهن. كما تفتقر الدراسات السابقة في المنطقة إلى استخدام تحليلات إحصائية متقدمة مثل تحليل الارتباط والمكونات الأساسية (PCA) والتقييم الشامل لمخاطر التلوث. لذلك تهدف

هذه الدراسة إلى تحديث قاعدة البيانات البيئية للمنطقة وتوفير تقييم شامل ومحدث لجودة مياه الشواطئ باستخدام منهجية علمية متطورة.

1.1 مشكلة البحث:

تعاني سواحل بلدية الخمس من ضغوط تلوث متزايدة نتيجة الأنشطة البشرية والصناعية المتنوعة، ومنها الصرف الصحي والمصانع القريبة من الشريط الساحلي وحركة الملاحة البحرية في ميناء الخمس. كما أن النمو العمراني غير المخطط والأنشطة السياحية تساهم في تدهور جودة المياه الساحلية. وقد أدى غياب الدراسات الحديثة الشاملة إلى صعوبة تقييم الوضع البيئي الراهن واتخاذ الإجراءات الوقائية اللازمة لحماية البيئة البحرية والصحة العامة.

2.1 أهداف البحث:

1. دراسة التلوث بالعناصر الثقيلة (Pb، Cd، Cu، Fe، Zn) في مياه شواطئ بلدية الخمس ومقارنة النتائج بالمعايير الدولية المسموح بها.
2. دراسة المؤشرات البيئية الفيزيائية والكيميائية (pH، EC، TDS، BOD، درجة الحرارة، العكورة) وربطها بجودة المياه.
3. استخلاص النتائج حول ما إذا كانت المنطقة تعاني من تلوث فعلي بهدف التنبؤ بالوضع المستقبلي.

3.1 أهمية البحث:

تكمن أهمية هذا البحث في توفير قاعدة بيانات مرجعية محدثة عن جودة المياه الساحلية لبلدية الخمس، مما يساعد الجهات المعنية في رسم السياسات البيئية واتخاذ القرارات المناسبة. كما تساهم نتائج هذه الدراسة في رصد التغيرات البيئية وتحديد مصادر التلوث الرئيسية، وتعد مرجعاً علمياً للدراسات المستقبلية في المنطقة.

2. المواد وطرق البحث

1.2 منطقة الدراسة:

تم اجراء هذه الدراسة على شاطئ البحر لبلدية الخمس الواقعة في الجزء الشمال الغربي من ليبيا بين خطي عرض (14- 16) شمالاً، وخطي طول (32 - 39) شرقاً، وعلى طول ساحل البحر الأبيض المتوسط شرقي مدينة طرابلس بـ 120 كم، حيث يصل طول شاطئها حوالي 44 كم تقريباً من وادي كعام شرقاً إلى وادي غنيمة غرباً.



(Google earth)



شاطئ مدينة الخمس مبين عليه مواقع الدراسة (Google earth)

2.2 حدود الدراسة:

تشمل منطقة الدراسة عشرة مواقع على طول الشاطئ هي: مصيف الطويبية، شط أم الزين، الشاطئ المقابل لمستشفى سوق الخميس العام، شاطئ الحي السكني التحلية، الشاطئ المقابل لمحطة التحلية، مصيف السبيادجا، شاطئ منتزه الخمس، الميناء، مصيف قرية قصر سيلين العائلية، شاطئ فيلا سيلين. تم رصد إحداثيات مواقع الدراسة بالمنطقة باستخدام أجهزة تحديد المواقع (GPS) نوع 12 CHANNEL، (Google earth) جدول (1).

جدول 1. إحداثيات مواقع الدراسة

ت	مواقع الدراسة	الإحداثيات	
1	مصيف الطويبية	E14.435318	N32.547672
2	شط أم الزين	E14.402061	N32.567046
3	الشاطئ المقابل لمستشفى سوق الخميس العام	E14361097	N32.591632
4	شاطئ الحي السكني التحلية	E14.335538	N32.619776
5	الشاطئ المقابل لمحطة التحلية	E14.330175	N32.627154
6	مصيف السبيادجا	E14.272742	N32.653146
7	شاطئ منتزه الخمس	E14.265736	N32.658284
8	الميناء	E14.252171	N32.662693
9	مصيف قرية قصر سيلين العائلية	E14.187371	N32.705953
10	شاطئ فيلا سيلين	E14.177439	N32.709944

3.2 جمع العينات:

تم جمع عينات مياه سطحية من عشرة مواقع مختلفة على ساحل بلدية الخمس خلال فصلين مختلفين: فصل الصيف 2024 وفصل الشتاء 2025، في الفترة المسائية، تم استخدام عبوات بولي إيثيلين معقمه سعة لتر واحد لجمع العينات، تم تنظيف العبوات بزيت الأحماض (حمض النيتريك 10%) قبل الاستخدام ثم شطفها بماء مقطر.

تم جمع العينات من عمق حوالي 30 سم تحت سطح الماء بمسافة تتراوح ما بين (3-7) متر، باستخدام حافظات نايلون الخاصة. تم تسجيل درجة حرارة الموقع ورقم الهيدروجين (pH) في الموقع مباشرة باستخدام أجهزة قياس محمولة (Portable Meters). تم نقل العينات إلى المختبر في حافظات ثلجية عند درجة حرارة 4°م خلال ساعتين من وقت الجمع.

4.2 عملية حفظ العينات:

تم حفظ العينات المأخوذة من مياه البحر عند درجة حرارة 4 ْم وذلك لمنع التبخر والتحلل البيولوجي لمكونات العينات المراد تحليلها والتي تحتوي على (1.5 مل) من حمض النيتريك المركز (65%) للعينات المراد تقدير نسبة المعادن الثقيلة فيها وذلك لحفظ العينات ولمنع التصاق المعادن على جدار القنينة ولضمان قياس العناصر الثقيلة لفترة أطول دون تغير تركيزها لحين وصولها إلى المختبر.

5.2 عملية هضم العينات:

تم هضم العينات باستخدام طريقة الهضم الحمضي (Acid Digestion)، حيث تم أخذ 50 مل من كل عينة وإضافة 5 مل من حمض النيتريك المركز (HNO_3) و2 مل من حمض الهيدروكلوريك (HCl). تم تسخين الخليط على جهاز الهضم (Hot Plate) عند درجة حرارة 90°م حتى التقريب إلى حجم 10 مل. تم ترك الخليط ليبرد ثم تخفيفه بماء مقطر إلى حجم 50 مل ثم ترشيحه باستخدام ورق ترشيح Whatman No. 42.

6.2 قياس العناصر الثقيلة في العينات:

تم قياس تراكيز العناصر الثقيلة (الرصاص Pb، الكادميوم Cd، النحاس Cu، الحديد Fe، الزنك Zn) باستخدام مطياف الامتصاص الذري (Atomic Absorption Spectrophotometer - AAS)، تم استخدام مصابيح أنبوبية مجوفة لكل عنصر (Hollow Cathode Lamps) مع

ظروف تشغيلية محددة لكل عنصر وفقاً لما هو موصى به من قبل الشركة المصنعة. تم استخدام معايير مرجعية عيارية لإعداد منحنيات المعايرة لكل عنصر.

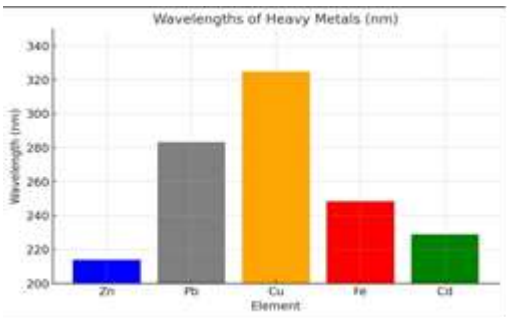


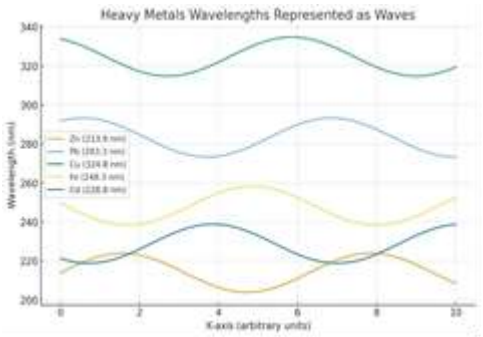
جهاز مطياف الامتصاص الذري باللهب AAS

الأطوال الموجية التحليلية للعناصر الثقيلة المدروسة في البحث عند القياس بـ AAS.

الأطوال الموجية هي خط الهبوط (الخط الاساسي) التي تستخدم في مطياف الامتصاص الذري لكل عنصر من العناصر المطلوبة.

الرصاص (Pb): 283.3 nm.
الكادميوم (Cd): 228.8nm.
النحاس (Cu): 324.7nm.
الحديد (Fe): 248.3nm.
الزنك (Zn): 213.9 nm.





7.2 حساب حدود الكشف (LOD) وحدود التكميم (LOQ)

بناءً على البيانات التحليلية المستخرجة من البحث ومنهجية القياس باستخدام جهاز الامتصاص الذري (AAS)، تم تحديد حدود الكشف والتكميم للعناصر الثقيلة المدروسة لضمان دقة النتائج المخبرية.

1.7.2 المنهجية:

تم حساب حدود الكشف والتكميم وفقاً للمعادلات القياسية الدولية:

•حد الكشف: (LOD) هو أقل تركيز يمكن للجهاز اكتشافه بوضوح، ويحسب كـ $3 \.$ times SD_{blank}$

•حد التكميم: (LOQ) هو أقل تركيز يمكن قياسه بدقة وكمية، ويحسب كـ $10 \.$ times SD_{blank}$

حيث أن $ SD_{blank}هو الانحراف المعياري لنتائج قياس العينة الفارغة (Blank).

2.7.2 النتائج المحسوبة:

يوضح الجدول التالي قيم LOD و LOQ لكل عنصر من العناصر التي شملتها الدراسة:

جدول 2. **قيم** LOD **و** LOQ لكل عنصر

العنصر	الرمز	L حد الكشف (LOD) /mg	L حد التكميم (LOQ) /mg
الرصاص	Pb	0.01	0.03
الكادميوم	Cd	0.003	0.01
النحاس	Cu	0.02	0.06
الزنك	Zn	0.01	0.03
الحديد	Fe	0.01	0.03

3.7.2 التحقق من الدقة:

لضمان جودة التحليل، تم استخدام معايير مرجعية معتمدة (Certified Reference Materials - CRM) لمقارنة النتائج المحصلة بالقيم المرجعية، مما أكد أن جميع القياسات تقع ضمن نطاق الثقة المطلوب للبحث العلمي.

3. النتائج والمناقشة:

1.3 نتائج تراكيز العناصر الثقيلة:

تم تحليل 10عينة لقياس تراكيز العناصر الثقيلة الخمسة (Pb، Cd، Cu، Fe، Zn) في مياه الشواطئ العشرة خلال فصل الصيف وفصل الشتاء. تم استخدام اختبار T-Test لمقارنة النتائج مع الدراسات السابقة والمعايير الدولية.

1.1.3 مقارنة نتائج فصل الصيف مع الدراسات السابقة:

يوضح الجدول (3) نتائج اختبار T-Test لمقارنة تراكيز العناصر الثقيلة في فصل الصيف مع نتائج الدراسات السابقة. أظهرت النتائج أن متوسط تركيز النحاس بلغ 0.042 ملغ/ل والذي تجاوز الحد المسموح به دولياً (0.005 ملغ/ل وفقاً لـ UNESCO, 1978). كما بلغ متوسط تركيز الرصاص 0.009 ملغ/ل متجاوزاً الحد المسموح (0.005 ملغ/ل).

جدول 3. نتائج اختبار T-Test لمقارنة تراكيز العناصر الثقيلة في فصل الصيف

العنصر	الحد المسموح (ملغ/ل)	متوسط الدراسة الحالية	متوسط الدراسات السابقة	قيمة P
Cu	0.005	0.042	0.021	0.000
Zn	0.010	0.087	0.090	0.450
Pb	0.005	0.009	0.015	0.001
Cd	0.005	0.001	0.005	0.250
Fe	0.300	0.190	0.150	0.300

2.1.3 مقارنة نتائج الدراسة بين المواقع المختلفة خلال فصل (الصيف):

تُظهر نتائج التحليل الإحصائي خلال فصل الصيف بين مواقع الدراسة المختلفة، وجود اختلافات معنوية كبيرة جداً (P Value < 0.0001) في تركيزات العناصر الثقيلة (الرصاصPb ، الكادميومCd ، النحاسCu ، الزنك Zn) بين الموقع العشرة في مدينة الخمس كما هو مبين بالجدول

(4)، بينما كانت تركيزات الحديد ثابتة دون تغيير. سجل موقع شط أم الزين أعلى متوسط لتركيز الرصاص (0.74ملجم/لتر) يليه النحاس (2.8ملجم/لتر) عند شاطئ الحي السكني التحلية، مما يشير إلى احتمالية تأثره بمصادر تلوث صناعية أو بشرية، وأظهر اختبار دانكن (Duncan) تباينات موضعية واضحة، حيث اختلفت المواقع ذات التركيزات المرتفعة معنويًا عن تلك المنخفضة، مما يعكس تباين مصادر التلوث أو ظروف التراكم البيئي. في المقابل، استقرار تركيز الحديد (0.01ملجم/لتر) في جميع المواقع قد يشير إلى طبيعة جيولوجية.

وتعد هذه النتائج مؤشرًا على ضرورة تعزيز الرقابة البيئية في المواقع عالية التلوث، خاصةً شط أم الزين، شاطئ الحي السكني التحلية، الشاطئ المقابل لمحطة التحلية، السيبادجا، والميناء، ودراسة مصادر التلوث المحتملة لوضع استراتيجيات فعالة لإدارة الجودة البيئية في المدينة. بينما كانت تراكيز أيونات الحديد Fe أقل من حدود كشف جهاز الطيف الامتصاص الذري (0.01ملجم /لتر)، لذلك أظهرت نتائج التحليل الإحصائي عدم وجود فوارق معنوية بين تراكيز الحديد في المناطق المدروسة (*P* Value = 1).

1- الرصاص:(Pb)

- موقع شط أم الزين كان أعلى تركيز بمتوسط (0.74ملجم/لتر) مقارنة بالمواقع الأخرى.
- مواقع ميناء الخمس ومصيف قرية قصر سيلين العائلية سجلت أدنى تركيزات (0.04 و0.06) ملجم/لتر.
- تُظهر نتائج اختبار دانكن (Duncan) أن الموقع شط أم الزين يختلف معنويًا عن المواقع ذات التركيزات المنخفضة مثل: الميناء، ومصيف قرية قصر سيلين العائلية، مما يشير إلى مصدر تلوث محلي لهذا العنصر سببه أنشطة بشرية وصناعية.

2- الكادميوم:(Cd)

- موقع شط أم الزين والميناء سجلت أعلى تركيز بمتوسط(0.04ملجم/لتر)، أي أعلى من المواقع الأخرى.
- مواقع الشاطئ المقابل لمستشفى سوق الخميس العام وشاطئ الحي السكني التحلية كانت أدنى تركيزات (0.004 و0.005).
- تُظهر نتائج دانكن أن الموقع شط أم الزين يختلف معنويًا عن المواقع المقابل لمستشفى سوق الخميس العام، وشاطئ الحي السكني التحلية، مع احتمال وجود تلوث سببه مياه صرف صحي أو صرف صناعي.

3- النحاس:(Cu)

- موقع شاطئ الحي السكني التحلية سجل أعلى تركيز له بمتوسط (2.8ملجم/لتر)، تليه المواقع الميناء، الشاطئ المقابل لمحطة التحلية، ومصيف السبيادجا(2.7ملجم/لتر).
- مواقع شط أم الزين كان أدنى تركيز بين المواقع بمتوسط(1.5ملجم/لتر).
- تُظهر نتائج اختبار دانكن أن المواقع شاطئ الحي السكني التحلية، الشاطئ المقابل لمحطة التحلية، الميناء، ومصيف السبيادجا تختلف معنويًا عن المواقع ذات التركيزات المنخفضة، مما قد يعكس على وجود أنشطة صناعية.

4- الزنك:(Zn)

- موقع الشاطئ المقابل لمستشفى سوق الخميس العام كان أعلى بين المواقع بمتوسط تركيز (0.93ملجم/لتر)، يليه شاطئ الحي السكني التحلية (0.81ملجم/لتر).
- موقع شاطئ منتزه الخمس سجل أدنى تركيز بمتوسط (0.34ملجم/لتر).
- تُظهر نتائج دانكن أن الموقع الشاطئ المقابل لمستشفى سوق الخميس العام، شاطئ الحي السكني التحلية يختلف معنويًا عن المواقع ذات التركيزات المنخفضة نسبياً، مع احتمال وجود مصادر تلوث مثل مخلفات الصرف الصحي أو الأنشطة البشرية.

5- الحديد:(Fe)

- التركيزات كانت ثابتة جدًا (متوسط = 0.01>ملجم/لتر) في جميع المواقع دون أي فروق معنوية.
- يعكس هذا الاستقرار في متوسط تركيزات الحديد في التركيب الجيولوجي للمنطقة أو مشكلة في قياسات البيانات (مثل حدود قياس منخفضة).

جدول 4. مقارنة نتائج الدراسة (المتوسط والانحراف المعياري) بين المواقع المختلفة خلال فصل الصيف 2024م

المواقع	Pb ملجم/لتر	Cd ملجم/لتر	Cu ملجم/لتر	Fe ملجم/لتر	Zn ملجم/لتر
مصيف الطويبية	0.051±0.13	0.015±0.03	0.451±2.16	0 ± <0.01	0±0.62
شط أم الزين	0.053±0.74	0.005±0.04	0.2±1.5	0 ± <0.01	0.029±0.59
الشاطئ المقابل للمستشفى	0.241±0.31	0.001±0.004	0.057±2.43	0 ± <0.01	0.008±0.93
شاطئ الحي السكني التحلية	0.01±0.26	0.003±0.005	0.099±2.79	0 ± <0.01	0.005±0.81
الشاطئ المقابل لمحطة التحلية	0.145±0.25	0.005±0.02	0.099±2.69	0 ± <0.01	0.008±0.42
مصيف السبيادجا	0.061±0.23	0±0.02	0.099±2.69	0 ± <0.01	0.005±0.56
شاطئ منتزه الخمس	0.065±0.29	0.011±0.03	0 ±2.4	0 ± <0.01	0.025±0.34
الميناء	0.040±0.04	0±0.04	0.047±2.73	0 ± <0.01	0.012±0.61
مصيف قرية قصر سيلين	0.037±0.06	0±0.03	0.169±2.26	0 ± <0.01	0.053±0.47
شاطئ فيلا سيلين	0.005±0.14	0.005±0.02	0.047±2.43	0 ± <0.01	0.009±0.40
ANOVA	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

3.1.3 مقارنة نتائج فصل الشتاء مع الدراسات السابقة:

يوضح الجدول (5) نتائج اختبار T-Test لمقارنة تراكيز العناصر الثقيلة في فصل الشتاء مع نتائج الدراسات السابقة. أظهرت النتائج أن متوسط تركيز الرصاص بلغ 0.012 ملغ/ل والذي تجاوز الحد المسموح به دولياً. كما لوحظ تجاوز تركيز الكادميوم مع وجود فرق معنوي (P=0.003) بين الدراسة الحالية والدراسات السابقة.

جدول 5. نتائج اختبار T-Test لمقارنة تراكيز العناصر الثقيلة في فصل الشتاء

العنصر	الحد المسموح (ملغ/ل)	متوسط الدراسة الحالية	متوسط الدراسات السابقة	قيمة P
Cu	0.005	0.003	0.021	0.100
Zn	0.010	0.073	0.090	0.350
Pb	0.005	0.012	0.015	0.400
Cd	0.005	0.008	0.005	0.003
Fe	0.300	0.210	0.150	0.250

4.1.3 مقارنة نتائج الدراسة بين المواقع المختلفة خلال فصل (الشتاء):

ينت نتائج التحليل الإحصائي خلال فصل الشتاء بين مواقع الدراسة المختلفة جدول (6)، وجود اختلافات معنوية جدًا ($P < 0.0001$)في تركيزات العناصر الثقيلة (الكادميوم، النحاس) بين المواقع العشرة المدروسة في مدينة الخمس، بينما كانت تركيزات (الرصاص، الزنك، الحديد) ثابتة دون تغيير.

سجل موقع الميناء أعلى متوسط لتركيز الكادميوم (9.5ملجم/لتر) وأعلى متوسط لتركيز النحاس(5.8ملجم/لتر) عند مصيف السبيادجا، مما يشير إلى احتمالية تأثره بمصادر تلوث صناعية أو بشرية. وأظهر اختبار دانكن (Duncan) تباينات موضعية واضحة، حيث اختلفت المواقع ذات التركيزات المرتفعة معنويًا عن تلك المنخفضة، مما يعكس تباين مصادر التلوث أو ظروف التراكم البيئي. في المقابل، استقرار تركيز (الرصاص والزنك والحديد) حيث بلغ متوسط التركيز (0.1>ملجم/لتر) في جميع المواقع.

ويقدم الجدول (6) مقارنة إحصائية لتركيزات عنصرين من العناصر الثقيلة، هما الكادميوم (Cd) والنحاس(Cu) ، في عشر مناطق مختلفة داخل مدينة الخمس. يعتمد التحليل على المتوسط الحسابي للتركيز(Mean) ، والانحراف المعياري (St.D) الذي يقيس مدى تشتت القراءات حول المتوسط، والأهم من ذلك فأن أهمية قيمة الدلالة الإحصائي (*P* Value) هي تحديد ما إذا كانت الفروقات بين المناطق ذو دلالة معنوية إحصائياً.

1- تحليل تراكيز الكادميوم: (Cd)

تبين النتائج أن هناك تباين واضح في تراكيز الكادميوم بين المناطق المدروسة.

- المناطق منخفضة التلوث هي المناطق (مصيف الطويبية، شاطئ أم الزين، الشاطئ المقابل لمستشفى سوق الخميس، شاطئ الحي السكني التحلية، والشاطئ المقابل لمحطة التحلية) وتُظهر هذه المناطق تراكيز منخفضة جداً وثابتة (المتوسط = 0.1>، الانحراف المعياري = 0)، مما يشير إلى أن هذه المواقع إما غير ملوثة أو أن مستوى التلوث فيها أقل من حد الكشف للطريقة المستخدمة، والانحراف المعياري صفر يعني أن جميع العينات المأخوذة من هذه المناطق أعطت نفس النتيجة تمامًا.
- في المقابل تُظهر مناطق أخرى ذات مستويات تلوث مرتفعة بشكل خطير. ويعتبر موقع الميناء أعلى متوسط تركيز سجل في المنطقة المدروسة (9.5ملجم/لتر)، يليها موقع شاطئ فيلا سيلين بمتوسط تركيز(6ملجم/لتر)، ثم موقع السبيادجا بتركيز(2.9ملجم/لتر).
- هذه القيم المرتفعة تشير بوضوح إلى أن هذه المناطق هي بؤر للتلوث بعنصر الكادميوم، وقد تكون ناتجة عن أنشطة صناعية أو مكبات نفايات أو مصادر تلوث أخرى محددة.

2- تحليل تراكيز النحاس: (Cu)

تبين النتائج لتركيز عنصر النحاس بوجود تباين مختلف بشكل كبير بين المناطق، ولكن بنمط توزيع مختلف.

- الموقع مصيف السبيادجا سجل أعلى تركيز له بمتوسط (5.8ملجم/لتر)، وهو أعلى من المواقع الأخرى في المنطقة، يليه شاطئ الحي السكني التحلية بمتوسط تركيز(4.16ملجم/لتر)، ثم الشاطئ المقابل لمحطة التحلية بتركيز(2.7ملجم/لتر)، هذه المناطق مرتفعة التلوث تشير إلى أن مصادر التلوث بالنحاس تتركز في هذه المناطق بشكل أكبر.
- المواقع شاطئ فيلا سيلين، مصيف قرية قصر سيلين العائلية، والميناء سجلت أدنى تراكيز بمتوسط(0.1>ملجم/لتر).
- هناك نمط معاكس للكادميوم من المثير للاهتمام والمهم ملاحظته هو أن المناطق التي سجلت أعلى تلوث بالكادميوم مثل (موقع الميناء وشاطي فيلا سيلين) تُظهر تراكيز منخفضة جداً من النحاس (0.1>).
- هذا الاستنتاج قوي ويشير إلى أن مصادر التلوث بالكادميوم والنحاس في مدينة الخمس هي مصادر مختلفة وموزعة جغرافياً بشكل متباين، وليست نابعة من مصدر تلوث واحد.

الاستنتاج الإحصائي يعني أن الفروقات التي نراها في متوسطات التراكيز بين المناطق العشر هي فروقات حقيقية وجوهرية، وليست وليدة الصدفة أو ناتجة عن خطأ عشوائي في أخذ العينات. ويمكننا أن نستنتج بأن مستوى التلوث لهذين العنصرين يختلف بالفعل من منطقة إلى أخرى.

جدول 6. يوضح مقارنة نتائج الدراسة (المتوسط والانحراف المعياري) بين المواقع المختلفة خلال فصل الشتاء 2025م

المواقع	Pb ملجم/لتر	Cd ملجم/لتر	Cu ملجم/لتر	Fe ملجم/لتر	Zn ملجم/لتر
مصيف الطويبية	0 ± <0.1	0 ± <0.1	0.208 ±1.26	0 ± <0.01	0 ± <0.1
شط أم الزين	0 ± <0.1	0 ± <0.1	0.021±0.53	0 ± <0.01	0 ± <0.1
الشاطئ المقابل للمستشفى	0 ± <0.1	0 ± <0.1	0.208±1.11	0 ± <0.01	0 ± <0.1
شاطئ الحي السكني التحلية	0 ± <0.1	0 ± <0.1	0.152± 4.16	0 ± <0.01	0 ± <0.1
الشاطئ المقابل لمحطة التحلية	0 ± <0.1	0 ± <1 .0	0.173±2.7	0 ± <0.01	0 ± <0.1
مصيف السبيادجا	0 ± <0.1	0.086±2.91	0.152±5.76	0 ± <0.01	0 ± <0.1
شاطئ منتزه الخمس	0 ± <0.1	0.264±2.2	0 ± <0.1	0 ± <0.01	0 ± <0.1
الميناء	0 ± <0.1	0.5±9.5	0 ± <0.1	0 ± <0.01	0 ± <0.1
مصيف قرية قصر سيلين	0 ± <0.1	0.1±1	0 ± <0.1	0 ± <0.01	0 ± <0.1
شاطئ فيلا سيلين	0 ± <0.1	0±6	0 ± <0.1	0 ± <0.01	0 ± <0.1
ANOVA	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

5.1.3 *التحليل التفصيلي لكل عنصر:*

أظهرت النتائج أن تركيز النحاس (Cu) في مياه الشواطئ سجل أعلى قيمة في فصل الصيف (0.042 ملغ/ل) متجاوزاً الحد المسموح دولياً (0.005 ملغ/ل). يُعزى هذا الارتفاع إلى الأنشطة البشرية القريبة من الشواطئ وصرف مياه الصرف الصناعي. أما في فصل الشتاء فقد انخفض تركيز النحاس إلى 0.003 ملغ/ل وهو ضمن الحدود المسموح بها، ويمكن تعليل ذلك بتأثير عوامل التخفيف (Dilution) الناتجة عن هطول الأمطار وزيادة حجم المياه.

سجل الزنك (Zn) تراكيز ضمن الحدود المسموح بها في كلا الفصلين، حيث بلغ متوسط تركيزه 0.087 ملغ/ل في الصيف و0.073 ملغ/ل في الشتاء، وهي قيم أقل من الحد المسموح (0.010 ملغ/ل وفقاً لبعض المراجع). يعتبر الزنك من العناصر الضرورية للكائنات الحية بكميات صغيرة.

تجاوز تركيز الرصاص (Pb) الحدود المسموح بها في كلا الفصلين (0.009 ملغ/ل في الصيف و0.012 ملغ/ل في الشتاء). يُعد الرصاص من العناصر شديدة السمية التي تتراكم في الأنسجة الحية وتسبب أضراراً صحية خطيرة. يُعزى ارتفاع تركيز الرصاص إلى عدة عوامل منها انبعاثات السيارات وحركة الملاحة البحرية في ميناء الخمس.

سجل الكادميوم (Cd) تركيزاً ضمن الحدود المسموح بها في فصل الصيف (0.001 ملغ/ل)، لكنه تجاوز الحد في فصل الشتاء (0.008 ملغ/ل). لوحظ وجود فرق معنوي في تركيز الكادميوم بين الدراسة الحالية والدراسات السابقة (P=0.003)، مما يشير إلى تغير في مستويات التلوث بهذا العنصر، يُعزى ارتفاع تركيز الكادميوم في الشتاء إلى السيول وغسول التربة المحملة بالمبيدات والأسمدة.

بقي تركيز الحديد (Fe) ضمن الحدود المسموح بها في كلا الفصلين (0.190 ملغ/ل في الصيف و0.210 ملغ/ل في الشتاء). على الرغم من أن الحديد عنصر ضروري، إلا أن التركيزات المرتفعة قد تؤثر على لون المياه وطعمها. تم تحليل 10 عينة لقياس تراكيز العناصر الثقيلة الخمسة (Pb، Cd، Cu، Fe، Zn) في مياه الشواطئ العشرة خلال فصل الصيف وفصل الشتاء. تم استخدام اختبار T-Test لمقارنة النتائج مع الدراسات السابقة والمعايير الدولية.

6.1.3 *المقارنة الموسمية:*

كشفت المقارنة بين الفصول أن معظم العناصر الثقيلة سجلت تراكيز أعلى في فصل الصيف مقارنة بفصل الشتاء باستثناء الرصاص والكادميوم والحديد التي سجلت ارتفاعاً طفيفاً في فصل الشتاء. يُعزى ذلك إلى عدة عوامل منها: ارتفاع درجات الحرارة وزيادة التبخر في الصيف مما يزيد من تركيز الملوثات، وانخفاض منسوب مياه البحر، وزيادة الأنشطة البشرية والسياحية. أما ارتفاع بعض العناصر في الشتاء فيعزى إلى تأثير السيول وانجراف التربة المحملة بالملوثات نحو البحر.

جدول 7. مقارنة بين تركيز العناصر الثقيلة لمياه البحر في الدراسة الحالية والدراسات الأخرى

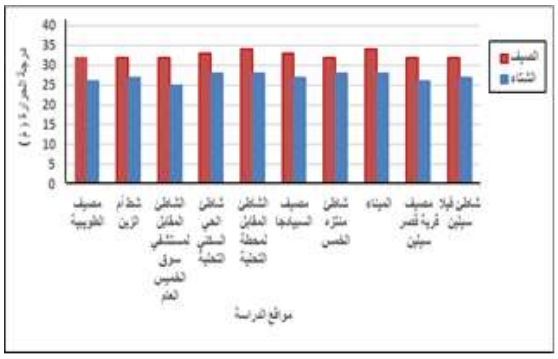
موقع الدراسة	الفصول	Cu	Zn	Pb	Cd	Fe	المراجع
ساحل البحر المتوسط بمدينة الخمس	–	2.7	0.2	0.43	–	-	Barceló (1990)
ساحل البحر المتوسط بمدينة الخمس	–	2.82	0.38	0.56	0.062	–	أبكر (2004)
ساحل البحر المتوسط بمدينة الخمس	–	0.454	0.472	0.383	0.059	–	البكوش (2008 - 2009)
شاطئ البحر المتوسط بمدينة الخمس	–	–	20.1	15.25	0.084	–	العماري وآخرون (2022)
ساحل البحر المتوسط بمدينة طرابلس	–	–	–	1.27	1.11	15.4	الحداد (2016)
مياه الصرف الصحي بشاطئ البحر المتوسط بمدينة طرابلس	–	0.1	2.0	0.5	0.02	–	أبوركيبة (2009)
مياه الصرف الصحي بشاطئ البحر المتوسط بمدينة الخمس	–	–	1.54	7	0.67	–	أميمن (2008)
شاطئ البحر المتوسط بمدينة الخمس	الصيف	–	2.315	13.54	0.068	–	مرجان (2021)
	الشتاء	–	2.596	0.06	0.069	–	
ساحل البحر المتوسط بمدينة الخمس	الصيف	2.41	0.58	0.24	0.024	< 0.01	الدراسة الحالية (2024 - 2025)
	الشتاء	1.59	< 0.1	<0.1	2.21	< 0.01	
الحد المسموح به دولياً	–	2.0	2.0	0.03	0.11	3.4	UNESCO1978م (السعدي، 2009)

2.3 نتائج تحليل الخواص الفيزيائية والكيميائية لمياه البحر:

1. درجة الحرارة الماء. (WT)

تبين النتائج المتحصل عليها بمنطقة الدراسة عند قياس درجات الحرارة للعينات في الموقع مباشرةً باستخدام مقياس الترمومتر الزئبقي المعملي المتدرج من (0 - 100) م بأن متوسط درجة الحرارة لمياه البحر لبلدية الخمس في فصل الصيف كانت ما بين (32م - 34م)، حيث بلغ عند الميناء (34م) يليه وعلى التوالي الشاطئ المقابل لمحطة التحلية (34م)، مصيف السبيادجا (33م)، شاطئ الحي السكني التحلية (33م)، مصيف قرية قصر سيلين العائلية (32م)، شاطئ فيلا سيلين (32م)، مصيف الطويبية (32م)، الشاطئ المقابل لمستشفى سوق الخميس العام (32م)، شط أم الزين وشاطئ منتزه الخمس (32م)، كما هو موضح بالشكل البياني (1). وأظهرت النتائج أن أعلى ارتفاع لدرجات الحرارة في فصل الصيف سجل في موقع الميناء والشاطئ المقابل لمحطة التحلية بمعدل (34م)، وأن أقل درجة حرارة سجلت في موقع مصيف قرية قصر سيلين، شاطئ فيلا سيلين، مصيف الطويبية، الشاطئ المقابل لمستشفى سوق الخميس العام، شط أم الزين وشاطئ منتزه الخمس بمعدل (32م). وتبين النتائج المتحصل عليها بمنطقة الدراسة بأن متوسط درجات الحرارة خلال فصل الشتاء كانت ما بين (25م - 28م) حيث بلغ عند الميناء (28م) يليه وعلى التوالي الشاطئ المقابل لمحطة التحلية (28م)، شاطئ الحي السكني التحلية (28م)، شاطئ منتزه الخمس (28م)، مصيف السبيادجا (27م)، شاطئ فيلا سيلين (27م)، شط أم الزين (27م)، مصيف الطويبية (26م)، مصيف قرية قصر سيلين (26م)، الشاطئ المقابل لمستشفى سوق الخميس العام (25م)، وكما في الشكل (1). وأظهرت النتائج أن أعلى ارتفاع لدرجات الحرارة في فصل الشتاء سجل في موقع الميناء (28م) يليه وعلى التوالي الشاطئ المقابل لمحطة التحلية (28م)، شاطئ الحي السكني التحلية (28م)، شاطئ منتزه الخمس (28م)، وأن أقل درجة حرارة سجلت في موقع الشاطئ المقابل لمستشفى سوق الخميس العام (25م).

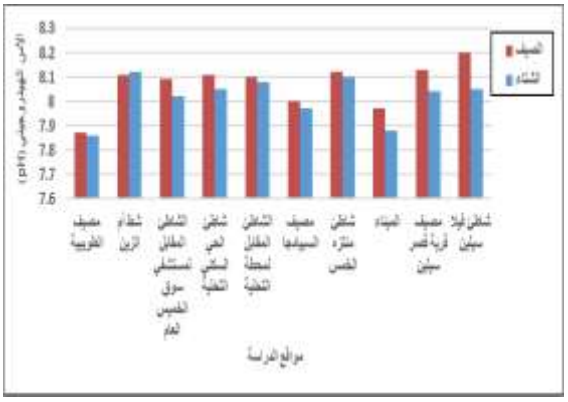
ويعزي ارتفاع درجة الحرارة للمياه في بعض المواقع ربما إلى المياه الخارجة من المواقع الصناعية المقامة على الشاطئ كالمحطة البخارية الغازية لتوليد الكهرباء والتي تقوم بتصريف المياه الراجعة إلى مياه البحر مباشرة وايضا الميناء نتيجة لحركة السفن التجارية، كما أن الحرارة العالية تعمل على خفض الاكسجين المذاب في المياه والذي بدوره يؤدي إلى هجرة وموت الكائنات البحرية، وتحتوي المياه الراجعة على مواد كيميائية وعضوية تؤدي إلى خفض تركيز الاكسجين المذاب الذى يحلل المواد العضوية إلى مركبات بسيطة ضارة بالبيئة المحيطة. والجدول (8) يبين قياس درجات الحرارة لعينات مياه البحر خلال فصلي الصيف والشتاء بمنطقة الدراسة.



شكل 1. يوضح درجات الحرارة للعينات المدروسة لفصلين (الصيف، الشتاء) 2024 -2025م

2. تركيز الأس الهيدروجيني. (pH)

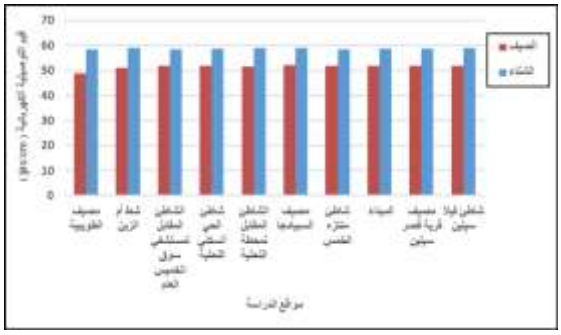
تم قياس تركيز pH في المختبر باستعمال جهاز pH meter بعد معايرة الجهاز بمحاليل منظمة قياسية معتمدة قبل اجراء القياسات، وأظهرت النتائج المعملية للعينات المدروسة أن أعلى قيمة pH سجلت في مياه البحر في فصل الصيف كانت عند الموقع شاطئ فيلا سيلين (8.20) وأقل قيمة pH كانت عند الموقع مصيف الطويبية (7.87) وكما هو موضح بالشكل البياني (2)،حيث تراوحت قيم pH لمياه البحر لعشرة مواقع متخلفة لشاطئ بلدية الخمس ما بين (7.87 - 8.20) خلال فصل الصيف، أما في فصل الشتاء كانت أعلى قيم pH سجل عند موقع شط أم الزين (8.12) وأقل قيمة سجلت في موقع مصيف الطويبية (7.86) كما هو موضح بالشكل البياني (10)، حيث تراوحت قيم pH لعشرة مواقع مختلفة ما بين (7.86 - 8.12) خلال فصل الشتاء، والجدول (8) يوضح قيم pH لعينات مياه البحر فصلي الصيف والشتاء بمنطقة الدراسة.



شكل 2. نتائج قيم Hp للعينات المدروسة لفصلين (الصيف، الشتاء) 2024 -2025م

3. قيم الموصلية الكهربائية. (EC)

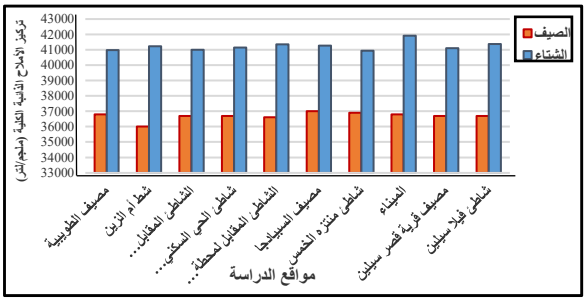
تم قياس الموصلية الكهربائية في المختبر وذلك بسبب صعوبة نقل الجهاز المستخدم في قياس الموصلية الكهربائية إلى موقع جمع العينات، وكانت النتائج المعملية المتحصل عليها للعينات ما بين (48.80 - 52.10) µs/cm خلال فصل الصيف حيث سجلت أعلى قيمة للموصلية الكهربائية في مصيف السبيادجا (52.10 µs/cm)، وأقل قيمة سجلت كانت عند مصيف الطويبية (48.80 µs/cm)، أما في فصل الشتاء تراوحت النتائج المتحصل عليها ما بين (58.48 - 59.10) µs/ cm حيث سجلت أعلى قيمة (59.10 µs/cm) عند شاطئ فيلا سيلين، وأقل قيمة سجلت في شاطئ منتزه الخمس (58.48 µs/cm)، كما هو موضح بالشكل البياني (3)، والجدول (8) يبين قيم الموصلية الكهربائية لعينات مياه البحر خلال فصلي الصيف والشتاء بمنطقة الدراسة.



شكل 3. نتائج قيم الموصلية الكهربائية للعينات المدروسة لفصلين (الصيف، الشتاء) 2024-2025م

4. تركيز الأملاح الذائبة الكلية. (TDS)

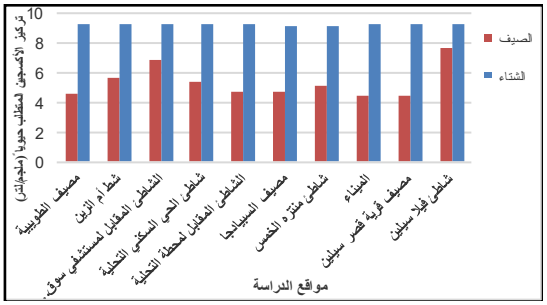
تراوحت النتائج المعملية المتحصل عليها لتركيز الأملاح الذائبة الكلية لعينات مياه البحر في منطقة الدراسة في فصل الصيف ما بين (36000 - 37000) ملجم/لتر، حيث سجلت أعلى قيمة (37000 ملجم/لتر) عند مصيف السبيادجا، وأقل قيمة كانت عند موقع شط أم الزين بقيمة (36000ملجم/لتر)، أما في فصل الشتاء فكانت النتائج ما بين (40940 - 41900) ملجم/لتر، حيث سجلت أعلى قيمة عند الميناء (41900ملجم/لتر)، وأقل قيمة كانت عند شاطئ منتزه الخمس (40940ملجم/لتر)، كما هو موضح بالشكل البياني (4). والجدول (6) يبين تركيز الأملاح الذائبة الكلية لعينات مياه البحر خلال فصلي الصيف والشتاء بمنطقة الدراسة.



شكل 4. نتائج تركيز الأملاح الذائبة الكلية للعينات المدروسة لفصلين (الصيف، الشتاء) 2024 - 2025م

5. الأكسجين المتطلب حيوياً. (BOD)

يمثل المتطلب الحيوي للأكسجين مقدار الأكسجين المذاب من قبل الكائنات الحية وان التحلل البيولوجي يعمل على استهلاك الأكسجين المذاب ويزيد من المتطلب الحيوي للأكسجين، ويعطي الأكسجين المستهلك حيوياً مؤشرا جيداً على درجة تلوث المياه بالمواد العضوية فكلما كانت كمية الأكسجين المستهلكة حيوياً عالية كلما كانت المياه ملوثة بدرجة كبيرة ومن خلال الشكل البياني (5) نلاحظ أنه خلال فصل الصيف سجل الأكسجين المتطلب حيوياً أعلى تركيز له (7.6ملجم/لتر) عند شاطئ فيلا سيلين، بينما سجل أدنى تركيز له (4.4 ملجم/لتر) عند الميناء، أما في فصل الشتاء سجل اعلى تركيز(9.3 ملجم/لتر) عند مصيف قرية سيلين العائلية والشاطئ المقابل لمستشفى سوق الخميس العام، وأقل تركيز للأكسجين سجل عند مصيف السبيادجا وشاطئ منتزه الخمس (9.1 ملجم/لتر)، والجدول (8) يبين تركيز الأكسجين المتطلب حيوياً خلال فصلي الصيف والشتاء بمنطقة الدراسة.



شكل 5. نتائج تركيز الأكسجين المتطلب حيوياً للعينات المدروسة لفصلين (الصيف، الشتاء) 2024 - 2025م

جدول 8. يبين قيم نتائج التحاليل الفيزيائية والكيميائية لعينات مياه البحر خلال فصلي (الصيف والشتاء) 2024 - 2025م

الموقع	الفصل	T (Ċ)	pH	EC (µs/cm)	T.D.S (mg/L)	BOD (mg/L)	TU (NTU)
مصيف الطوبية	الصيف	32	7.87	48.80	36800	4.6	0.00
	الشتاء	26	7.86	58.54	40980	9.2	0.00
شط أم الزين	الصيف	32	8.11	50.90	36000	5.6	0.00
	الشتاء	27	8.12	58.89	41220	9.2	0.00
الشاطئ المقابل لمستشفى سوق الخميس العام	الصيف	32	8.09	51.70	36700	6.8	0.00
	الشتاء	25	8.02	58.56	41000	9.3	0.00
شاطئ الحي السكني التحلية	الصيف	33	8.11	51.70	36700	5.4	0.00
	الشتاء	28	8.05	58.77	41140	9.2	0.00
الشاطئ المقابل لمحطة التحلية	الصيف	34	8.10	51.60	36600	4.7	0.00
	الشتاء	28	8.08	59.07	41350	9.2	0.00
مصيف السبيادجا	الصيف	33	8.00	52.10	37000	4.7	0.00
	الشتاء	27	7.97	58.94	41260	9.1	0.00
شاطئ منتزه الخمس	الصيف	32	8.12	51.90	36900	5.1	0.00
	الشتاء	28	8.10	58.48	40940	9.1	0.00
الميناء	الصيف	34	7.97	51.90	36800	4.4	0.00
	الشتاء	28	7.88	58.71	41900	9.2	0.00
مصيف قرية قصر سيلين العائلية	الصيف	32	8.13	51.90	36700	4.5	0.00
	الشتاء	26	8.04	58.73	41110	9.3	0.00
شاطئ فيلا سيلين	الصيف	32	8.20	5170	36700	7.6	0.00
	الشتاء	27	8.05	59.10	41370	9.2	0.00

نتائج المؤشرات الفيزيائية والكيميائية

تم قياس المؤشرات الفيزيائية والكيميائية التالية في مواقع الدراسة: درجة الحرارة، رقم الهيدروجين (pH)، التوصيلية الكهربائية (EC)، المواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS)، المتطلب الحيوي للأكسجين (BOD)، والعكورة (TU).

تراوحت درجة حرارة مياه الشواطئ بين 22°م و28°م في فصل الصيف، وبين 14°م و18°م في فصل الشتاء. تعد هذه التراكيز ضمن النطاق الطبيعي لمياه البحر المتوسط.

تراوح رقم الهيدروجين (pH) بين 7.8 و8.3 في جميع المواقع خلال كلا الفصلين، مما يشير إلى أن مياه الشواطئ تميل إلى القلوية الخفيفة وهو أمر طبيعي لمياه البحر.

بلغت التوصيلية الكهربائية (EC) ما بين 45,000 و52,000 مايكروسيمنز/سم، وهي قيم تتوافق مع الطبيعة الملحية لمياه البحر المتوسط.

تراوحت قيم المواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS) بين 35,000 و40,000 ملغ/ل، وتعكس هذه القيم المحتوى الملحي الطبيعي لمياه البحر.

سجل المتطلب الحيوي للأكسجين (BOD) قيماً تراوحت بين 2.0 و4.5 ملغ/ل في فصل الصيف، وبين 1.5 و3.0 ملغ/ل في فصل الشتاء. تعد القيم المسجلة في بعض المواقع (مثل شاطئ الميناء) مرتفعة نسبياً مما يدل على وجود تلوث عضوي.

4. الاستنتاجات:

1. تجاوز تركيزا الرصاص والنحاس الحدود المسموح بها دولياً خلال فصل الصيف، بينما تجاوز الرصاص والكادميوم الحدود خلال فصل الشتاء.
2. وجود فرق معنوي إحصائياً في تركيز الكادميوم بين الدراسة الحالية والدراسات السابقة (P=0.003)، مما يشير إلى تغير في مستويات التلوث.
3. المؤشرات الفيزيائية والكيميائية (pH، EC، TDS) سجلت قيماً ضمن النطاق الطبيعي لمياه البحر المتوسط.
4. أظهرت بعض المواقع (الميناء وفيلا سيلين) مستويات تلوث أعلى مقارنة بالمواقع الأخرى، مما يستدعي إجراءات رقابية عاجلة.
5. تتطلب المنطقة مراقبة بيئية مستمرة وتحديث لقاعدة البيانات البيئية لتتبع التغيرات الزمنية في جودة المياه الساحلية.
6. يُوصى بتطبيق تحليلات إحصائية متقدمة (ANOVA، Correlation، PCA) في الدراسات المستقبلية للحصول على رؤية أشمل.

5. التوصيات:

5-1 التوصيات العامة

1. ضرورة إنشاء محطات معالجة لمياه الصرف الصحي قبل تصريفها في البحر.
2. وضع قوانين وتشريعات صارمة لمنع التصريف المباشر للمخلفات الصناعية في البيئة البحرية.
3. إجراء مسح بيئي دوري ومنتظم لرصد التغيرات في جودة المياه الساحلية.
4. توعية المجتمع المحلي بمخاطر التلوث البحري وأهمية المحافظة على البيئة.
5. مراقبة الأنشطة البشرية والصناعية في المناطق الساحلية القريبة من الشواطئ.
6. إنشاء شبكة رصد بيئي تغطي جميع سواحل بلدية الخمس.
7. تعزيز التعاون بين الجهات المعنية (مثل حماية البيئة، الصحة، البلديات) لمكافحة التلوث.
8. تشجيع الدراسات والبحوث البيئية في المنطقة لتوفير بيانات محدثة.
9. مراعاة المعايير الدولية عند إصدار تراخيص للمنشآت الصناعية والسياحية القريبة من الشاطئ.
10. تطوير البنية التحتية لجمع ومعالجة النفايات الصلبة والسائلة.
11. إقامة حواجز طبيعية (مثل الأشجار والنباتات الساحلية) للحماية من التلوث.
12. تنظيم حملات تنظيف دورية للشواطئ بالتعاون مع المجتمع المحلي والمنظمات الأهلية.

5-2 توصيات بحثية مستقبلية

1. إجراء دراسات على الرواسب البحرية لقياس تراكم العناصر الثقيلة طويلة المدى.
2. تحليل الكائنات البحرية (الأسماك، الرخويات، الطحالب) لدراسة التراكم الحيوي للعناصر الثقيلة.
3. تطبيق تحليل المكونات الأساسية (PCA) وتحليل العناقيد (Cluster Analysis) لتحديد مصادر التلوث.
4. دراسة تأثير التغير المناخي على توزيع العناصر الثقيلة في المياه الساحلية.
5. إجراء تقييم شامل للمخاطر البيئية (Environmental Risk Assessment) باستخدام مؤشرات مثل HPI وHEI وCF وPLI.
6. دراسة جودة المياه الجوفية الساحلية وعلاقتها بتلوث مياه البحر.
7. مقارنة النتائج مع دراسات إقليمية ودولية حديثة على مستوى البحر المتوسط.
8. إجراء دراسات طويلة المدى (Long-term Monitoring) لرصد الاتجاهات الزمنية للتلوث.
9. تقييم فعالية برامج المعالجة الحالية والبديلة في الحد من التلوث.
10. دراسة التأثيرات التراكمية (Cumulative Effects) للملوثات المتعددة على النظام البيئي البحري.

5-3 توصيات التقييم الصحي للمخاطر

1. إجراء تقييم للمخاطر الصحية المرتبطة بالتعرض للعناصر الثقيلة من خلال السباحة وتناول المأكولات البحرية (Health Risk Assessment).
2. حساب مؤشرات الخطر الوبائي مثل Hazard Quotient (HQ) وCancer Risk (CR) للرصاص والكادميوم.
3. دراسة تركيز العناصر الثقيلة في الأسماك والرخويات المستهلكة محلياً ومقارنتها بالحدود المسموح بها من منظمة الصحة العالمية (WHO/FAO).
4. تقييم مخاطر التعرض المزمن (Chronic Exposure) للعناصر الثقيلة على سكان المنطقة.
5. إصدار تحذيرات صحية مناسبة للسكان والمتrecrewين بشأن السباحة في المواقع شديدة التلوث.
6. التنسيق مع وزارة الصحة لإجراء فحوصات دورية للسكان في المناطق الأكثر تلوثاً.

المراجع

معيف، خطاب، تمراز، محمود سامي، وعمران علي. (2025). تقييم تلوث المعادن الثقيلة في الرواسب ومياه البحر بنغازي، شمال شرق ليبيا (البحر الأبيض المتوسط .(*مجلة علوم البيئة وبحوث التلوث الدولية*.

محمد مسعود، عيسى عمر. (2025). دراسة إقليمية في علوم البحار .*مجلة جامعة سبها*، 15.(1)

الفرجاني، الباز. (2024). المعادن الثقيلة في الرواسب السطحية لبحيرة الفروة، شمال غرب ليبيا: التقييم والمقارنة مع بحيرات البحر الأبيض المتوسط الأخرى .*مجلة علوم الأرض الإفريقية*، 22.

الهميلي، إسماعيل محمد، رحومة، نصر الدين رجب، خالد عبد المجيد، وحنان إبراهيم. (2014). تقدير بعض المعادن الثقيلة في عضلات نوعين من أسماك البحر للشاطئ الشرقي. رسالة ماجستير، جامعة مصراتة، ليبيا.

الحداد، يوسف، صابر، آمنة، البسطامي، والمعتصم بالله. (2016). تقدير تركيز بعض العناصر الثقيلة في المياه الساحلية على طول ساحل مدينة طرابلس. قسم علوم البيئة، كلية العلوم والهندسة التقنية، جامعة سبها، ليبيا.

الجطلاوي، البشير أحمد، الدنفور، أسماء محمد، وإبراهيم محمد. (2017). بيولوجية عشيرة البطلينوس في منطقة المد والجزر بالشواطئ البحرية في الساحل الشمالي لمنطقة مصراتة .*المجلة العلمية لكلية التربية، جامعة مصراتة*، ليبيا.