المجلة العراقية للبحوث الإنسانية والإجتماعية والعلمية
Iraqi Journal of Humanitarian, Social and Scientific Research
العـــدد 20A1 آذار 2026
No.20A1 Mar. 2026
Print ISSN 2710-0952 Electronic ISSN 2790-1254

أثر النفايات البلاستيكية وتحمض المحيطات على الحياة البحرية

م.م بثينه محمد جاسم حمادي
المديرية العامة لتربية محافظة الانبار
Sa.19670003967@gmail.com

المستخلص:

يُعد هذا البحث دراسةً علميةً شاملةً تستكشف الآثار البيئية المُركَّبة والمتسارعة الناتجة عن التفاعل التآزري بين ظاهرتَي تحمُّض المحيطات وتراكم المُلوِّثات البلاستيكية الدقيقة والنانونية في البيئة البحرية. حيث تتجلى مشكلة البحث في العجز العلمي والحوكمي عن مواكبة التفاعلات غير الخطية والمعقدة بين هذين الضغطين البيئيين، مما يؤدي إلى تسارع غير مسبوق في تدهور التنوع الحيوي واختلال الوظائف الإيكولوجية للنظم البحرية، ويُثير تساؤلاتٍ حرجةً حول قدرة الكائنات الحية على التكيُّف وعلى استمرارية الخدمات البيئية والموارد السمكية. وتبنى الدراسة على فرضياتٍ منهجيةٍ تُؤكد وجود تأثير تآزري مُضاعف، يفوق مجموع التأثيرات الفردية، يؤدي إلى تعطيل آليات التكلُّس واختلال التوازن الأسموزي وزيادة نفاذية الأغشية الخلوية للسموم، فضلاً عن تسريع وتيرة الانتقال التروفي للمُلوِّثات عبر السلسلة الغذائية، مما يُهدِّد المخرجات الإيكولوجية والأمن الغذائي على حد سواء. وتأتي أهمية البحث من كونه يُقدِّم إسهامات نظرية وتطبيقية رفيعة؛ فهو يسد فجوة معرفية عميقة في فهم الآليات الجزيئية والكيميائية الحيوية للتفاعل بين البلاستيك النانوني وكيمياء الكربونات في الوسط الحمضي، كما يُطوِّر نماذج رياضية وإحصائية متقدمة قادرة على محاكاة السيناريوهات المستقبلية وتقدير المخاطر البيئية الكمية، مما يُمهِّد الطريق لوضع سياسات إدارة ساحلية وبحرية متكاملة وفعَّالة. واستندت المنهجية البحثية إلى تآلفٍ منهجي دقيق، جمع بين المنهج الوصفي التحليلي لرصد الظاهرة، والمنهج الاستنباطي لتفسير الآليات الكيميائية الحيوية، والمنهج المقارن لتقييم استجابة الأنواع المختلفة، والمنهج التجريبي غير المباشر عبر تحليل نقدي للبيانات المخبرية والميدانية المتاحة، مع توظيف حزمةٍ متطورةٍ من الأدوات الإحصائية كالمراجعة المنهجية والتحليل التلوي وتحليل التباين ثنائي الاتجاه ونمذجة المعادلات الهيكلية لضمان الدقة والموثوقية. وقد خلص البحث إلى جملةٍ من النتائج المُقلقة والبالغة الأهمية، كان أبرزها: الكشف عن زيادة هائلة في تراكم الجسيمات البلاستيكية في الأنسجة الحية بلغت 118% تحت تأثير التحمُّض، وانخفاض كارثي في معدلات التكلُّس وصل إلى 60.5%، وتسجيل معامل تضخُّم غذائي (TMF)للملوثات البلاستيكية بلغ 4.40 مما يؤكد انتقالها وتراكمها في المفترسات العليا والإنسان، بالإضافة إلى تفاقم حاد في مؤشرات الإجهاد التأكسدي مثل ارتفاع مستوى مادة المالونديألدهيد بنسبة 178.2%، وانهيار جزئي في الأنظمة الدفاعية الانزيمية كالكاتالاز. تُجسِّد هذه النتائج مجتمعةً تحذيراً علمياً صارخاً يدعو إلى تغيير جذري في النهج العالمي، بحيث تتم معالجة أزمة المناخ والتلوث البلاستيكي كحزمةٍ واحدةٍ غير قابلة للتجزئة، ضمن إطار حوكمة بيئية دولية متكاملة وعاجلة.

الكلمات المفتاحية: تحمُّض المحيطات، النفايات البلاستيكية الدقيقة، التأثير التآزري، التضخُّم الغذائي، الإجهاد التأكسدي.

The impact of plastic waste and ocean acidification on marine life

A.L. Buthaina Mohammed Jassim Hammadi
General Directorate of Education, Anbar Governorate

Abstract

This research is a comprehensive scientific study exploring the complex and accelerating environmental impacts resulting from the synergistic interaction between ocean acidification and the accumulation of microplastics and nanoplastics

in the marine environment. The research problem lies in the scientific and governance failure to keep pace with the nonlinear and complex interactions between these two environmental pressures, leading to an unprecedented acceleration in biodiversity loss and disruption of marine ecosystem functions. It raises critical questions about the ability of living organisms to adapt and the sustainability of environmental services and fishery resources. The study is based on methodological hypotheses that confirm the existence of a synergistic effect, that exceeds the sum of the individual effects, leading to disruption of calcification mechanisms, osmotic imbalance, and increased permeability of cell membranes to toxins, as well as accelerating the trophic transfer of pollutants through the food chain, threatening both ecological outputs and food security. The importance of this research lies in its significant theoretical and practical contributions; it fills a deep knowledge gap in understanding the molecular and biochemical mechanisms of interaction between nanoplastics and carbonate chemistry in acidic environments. It also develops advanced mathematical and statistical models capable of simulating future scenarios and quantifying environmental risks, paving the way for the development of integrated and effective coastal and marine management policies. The research methodology was based on a rigorous methodological synthesis, combining a descriptive-analytical approach to monitor the phenomenon, an inductive approach to interpret the biochemical mechanisms, a comparative approach to assess the response of different species, and an indirect experimental approach through critical analysis of available laboratory and field data, using an advanced set of statistical tools such as systematic review, meta-analysis, two-way analysis of variance, and structural equation modeling to ensure accuracy and reliability. The research concluded with a series of alarming and extremely important findings, most notably: the detection of a massive increase in the accumulation of plastic particles in living tissue, reaching 118% under the influence of acidification; a catastrophic decline in calcification rates, reaching 60.5%; and a food magnification factor (TMF) of plastic pollutants of 4.40, confirming their transfer and accumulation in top predators and humans, as well as a sharp exacerbation of oxidative stress indicators such as a 178.2% increase in malondialdehyde levels and a partial collapse of enzymatic defense systems such as catalase. Taken together, these results represent a stark scientific warning calling for a radical change in the global approach, so that the climate crisis and plastic pollution are addressed as a single, indivisible package, within the framework of integrated and urgent international environmental governance.

Keywords: ocean acidification, microplastics, synergistic effect, bloating, oxidative stress.

المقدمة :

تُمثِّل المحيطات الرئة الحيوية لكوكب الأرض والمنظم الرئيسي لمناخه. ومع ذلك، فهي تواجه في العصر البشري الحالي تهديداً مزدوجاً وخطيراً، يتمثل في التفاعل المُشترك بين تحمض المياه والانتشار المتزايد للنفايات البلاستيكية. هذا المزيج من التغير الكيميائي والملوثات المادية يعيد تشكيل النظم البيئية البحرية بطريقة تنذر بحدوث كارثة بيئية عالمية. ناتجاً عن امتصاص المحيطات لحوالي ثلث انبعاثات ثاني أكسيد الكربون البشرية، أدى التحمض إلى انخفاض درجة الحموضة (pH) بمقدار 0.1 وحدة منذ الثورة الصناعية. ومن المتوقع انخفاض إضافي يتراوح بين 0.3 و0.4 وحدة بحلول عام 2100، مما يعني زيادة في الحموضة بنسبة 100% إلى 150%. يتزامن هذا التغيير الجذري في كيمياء الماء مع تراكم أكثر من 250 ألف طن من الحطام البلاستيكي، الذي يتفكك إلى جسيمات دقيقة ونانوية تخترق الأنسجة الحية وتعمل كناقلات للملوثات العضوية الثابتة. ولا تكمن الخطورة فقط في تأثير كل ملوث على حدة، بل في قدرة التحمض على تغيير خصائص سطح البلاستيك وزيادة نفاذية الأغشية الخلوية،[1] مما يعزز تراكم السموم في الكائنات ذات الهياكل الجيرية والمفترسات العليا على حد سواء. يسعى هذا التقرير إلى تحليل الآليات المعقدة لهذا التفاعل المزدوج، من المستوى الجزيئي والخلوي وصولاً إلى الهياكل الغذائية الكبرى، معتمداً على أحدث النماذج الإحصائية والنتائج المختبرية لعامي 2024 و2025 لتقديم رؤية علمية دقيقة تدعم جهود الحماية الدولية واستدامة الموارد البحرية للأجيال القادمة.

مشكلة البحث :

تتمحور مشكلة البحث حول التسارع غير المسبوق في تدهور التنوع البيولوجي البحري وعجز النظم الطبيعية عن التكيف مع الضغوط الكيميائية والمادية المتزامنة، حيث تفتقر النماذج البيئية التقليدية إلى القدرة على التنبؤ بالتفاعلات المشتركة بين تحمض المحيطات والجسيمات البلاستيكية الدقيقة. وتطرح الدراسة الأسئلة الأساسية التالية:

1 .ما هي الآليات الكيميائية الحيوية التي تفسر تأثير تحمض المياه على معدلات امتصاص واحتفاظ الكائنات البحرية بالجسيمات البلاستيكية؟

2 .كيف يؤثر التفاعل بين الجسيمات النانوية البلاستيكية وانخفاض أيونات الكربونات على كفاءة عملية التكلس في المرجان والرخويات؟

3 .ما هي الآثار الفسيولوجية طويلة المدى للضغط المزدوج على ميزانية الطاقة والقدرة التناسلية للكائنات البحرية؟

4 .إلى أي مدى تساهم ظاهرة التضخم الغذائي للملوثات البلاستيكية في ظل ظروف التحمض في تهديد استقرار السلاسل الغذائية المائية والأمن الغذائي البشري؟

فرضيات البحث :

تستند فرضيات البحث إلى إطار تحليلي متسق يربط بين المتغيرات البيئية والاستجابات البيولوجية، حيث تفترض الفرضيات ما يلي:

[1] Dayananda, Nalika R., et al. "Ocean Warming, Acidification, Plastic Pollution, and Water Quality Deterioration: A Multifaceted Crisis Unveiled." Coastal and Marine Pollution: Source to Sink, Mitigation and Management (2025): 111-138.

1 .وجود علاقة مشتركة ذات دلالة إحصائية بين انخفاض درجة الحموضة وزيادة تراكم الجسيمات البلاستيكية الدقيقة في الأنسجة الهضمية والحيوانية، نتيجة اختلال آليات التنظيم الأسموزي.

2 .أن التعرض المزدوج للتحمض والجسيمات النانوية البلاستيكية يؤدي إلى تثبيط إنزيمات التكلس (مثل أنهيدراز الكربونيك) بنسب تفوق مجموع تأثيراتهما المنفردة، مما يشير إلى وجود تأثير مضاعف للإجهاد.

3 .أن استراتيجية "إعادة تخصيص الطاقة" التي تتبعها الكائنات للتكيف مع التحمض تزيد من حساسيتها تجاه السموم البلاستيكية، مما يؤدي إلى خلل مناعي وإجهاد تأكسدي مزمن.

4 .أن معدل التضخم الغذائي للملوثات البلاستيكية يتسارع في البيئات المحمضة، مما يزيد من مخاطر التسمم الثانوي للمفترسات في المستويات الغذائية العليا.

أهمية البحث :

تنبع أهمية البحث من معالجته إحدى أكثر القضايا البيئية تعقيداً في العصر الحديث، حيث يوفر قاعدة بيانات علمية دقيقة تربط بين تغير المناخ والتلوث المادي، وهو أمر بالغ الأهمية لتطوير استراتيجيات الإدارة المتكاملة للمناطق الساحلية. وتتمثل الأهمية الأكاديمية في سد الفجوة المعرفية المتعلقة بالآليات الجزيئية للتفاعل بين الجسيمات البلاستيكية النانوية وكيمياء الكربونات، وتقديم نماذج رياضية للتنبؤ بمصير الشعاب المرجانية المهددة بالاختفاء بنسبة 50% خلال العقود القادمة. أما أهداف البحث، فتركِّز على:

1 .تحديد المسارات الخلوية الأكثر تأثراً بالضغوط المزدوجة.

2 .تقييم كفاءة الأنظمة الإنزيمية الدفاعية ضد الإجهاد التأكسدي.

3 .وضع إطار عمل لتقييم المخاطر البيئية يعتمد على مقاييس التضخم الحيوي.

4 .اقتراح حلول تقنية وتشريعية دولية تتماشى مع "اتفاقية بازل" والمعاهدات العالمية الناشئة بشأن البلاستيك.

أهداف البحث:

يتصدى هذا البحث لقضية بيئية بالغة التعقيد من خلال سلسلة من الأهداف المتدرجة والمترابطة، والتي تسعى مجتمعةً لفهم وحلّ جوانب الأزمة المزدوجة التي تواجه المحيطات. أولاً، يهدف البحث إلى **تحديد ووصف المسارات الخلوية والجزيئية الأكثر حساسية وتأثراً** بالضغطين المتزامنين: تحمض المياه والتعرض للجسيمات البلاستيكية الدقيقة، مع التركيز على آليات الامتصاص الخلوي والتنظيم الأسموزي والدفاع. ثانياً، يهدف إلى **تقييم كفاءة واستجابة الأنظمة الإنزيمية والدفاعات المضادة للأكسدة** في الكائنات البحرية المستهدفة تحت وطأة هذا الإجهاد المزدوج، لقياس مدى قدرتها على التكيف أو نقطة انهيارها. ثالثاً، يسعى البحث إلى **وضع إطار عمل كمّي متكامل لتقييم المخاطر الإيكولوجية**، يعتمد بشكل رئيسي على نمذجة ومقاييس التضخم الحيوي والتضخم الغذائي للملوثات ضمن السلسلة الغذائية في ظل ظروف الحموضة المتغيرة. رابعاً وأخيراً، يطمح إلى **صياغة مقترحات عملية وتوصيات استباقية**، تتضمن حلولاً تقنية رائدة وتشريعات دولية معززة، تتماشى وتُكمِّل الأطر القائمة مثل "اتفاقية بازل" والمبادرات العالمية الناشئة للحد من تلوث البلاستيك، وذلك لحماية النظم البحرية وضمان استدامة مواردها للأجيال القادمة.

مناهج البحث:

يتميز البحث بتكامل مجموعة من المناهج العلمية التي تشكل إطاراً شاملاً لاستكشاف الظاهرة المدروسة، وهي:

١. **المنهج الوصفي التحليلي :**ويهدف إلى وصف وتشخيص الظواهر الرئيسية للبحث، وهي ظاهرة تحمض المحيطات وانتشار النفايات البلاستيكية الدقيقة، من خلال جمع وعرض البيانات الكمية والنوعية المتعلقة بانتشارها وتطورها وآثارها الملحوظة.

٢. **المنهج الاستنباطي :**ويعتمد على تطبيق القوانين والنظريات الكيميائية والبيوكيميائية الراسخة (مثل كيمياء محاليل الكربونات وديناميكية الإنزيمات) لاستنتاج الآليات المحتملة وتفسير النتائج المتعلقة بتفاعل الضغوط المزدوجة على العمليات الحيوية، كعملية الكلسنة.

٣. **المنهج المقارن :**ويتم استخدامه لمقارنة استجابات الكائنات البحرية أو النظم الإيكولوجية المختلفة (مقارنة الرخويات بالمرجان، أو مقارنة الأنظمة الساحلية بالمحيطية) للضغوط محل الدراسة، مما يساعد في تحديد الأنواع أو النظم الأكثر عرضة للخطر.

٤. **المنهج التجريبي (الاستقرائي غير المباشر) :**ويتمثل في تحليل ونقد البيانات والنتائج المستمدة من التجارب المخبرية والميدانية التي أجرتها الدراسات السابقة، وخاصة تلك التي صممت لمحاكاة السيناريوهات المستقبلية)مثل(RCP 8.5 ، وذلك للخروج باستنتاجات عامة قابلة للتعميم.

أساليب البحث:

تتضمن الخطة التنفيذية للبحث استخدام مجموعة من الأساليب الإجرائية والتقنيات التحليلية المحددة، وهي:

١. **أسلوب المراجعة المنهجية :(Systematic Review)** كإجراء محدد ومنظم لجمع وتقييم جميع الدراسات العلمية ذات الصلة المنشورة في قاعدة زمنية محددة (2020-2025)، وفق معايير شمول واستبعاد واضحة.

٢. **أسلوب التحليل التلوي :(Meta-analysis)** كأسلوب إحصائي كمي يتبع المراجعة المنهجية، بهدف دمج النتائج الرقمية من الدراسات الأولية المتعددة لحساب تقدير واحد موجز لتأثير الظاهرة (مثل حجم التأثير التآزري) بدرجة عالية من الدقة الإحصائية.

٣. **الأسلوب الإحصائي المتقدم:**

- **تحليل التباين ثنائي الاتجاه :(Two-way ANOVA)** كأداة إحصائية لتقييم التأثير المنفرد لكل من متغيري التحمض والتلوث البلاستيكي، بالإضافة إلى قياس الأثر التفاعلي بينهما على المتغيرات التابعة (مثل معدل النمو أو البقاء).
- **نمذجة المعادلات الهيكلية :(SEM)** كأسلوب إحصائي متعدد المتغيرات لاختبار وفحص شبكة كاملة من العلاقات السببية الافتراضية بين المتغيرات الكامنة والمرصودة في النموذج البحثي.

٤. **أسلوب التصحيح والنمذجة البيئية :**ويشمل تطبيق "نهج كولمانز "(Koelmans approach) كإطار منهجي محدد لتصحيح وتحجيم تقديرات التعرض للبلاستيك الدقيق في البيانات المجمعة، بناءً على خصائص الجسيمات الفيزيائية وسلوكها البيئي.

٥. **أسلوب التحليل البرمجي :**باستخدام برمجيات إحصائية متخصصة مثل **IBM SPSS** لتحليل البيانات الأساسية والمتقدمة، و **R-Project** لإجراء التحليلات التلوية المتخصصة والنمذجة الإحصائية المعقدة وتمثيل البيانات بيانياً.

منهجية البحث :

تعتمد منهجية البحث على معايير النشر العالمية في المجلات المصنفة (Scopus Q1)، حيث تم استخدام منهجية المراجعة المنهجية (Systematic Review) مع التحليل التلوي (Meta-analysis) للبيانات التجريبية والميدانية المنشورة بين عامي 2020 و2025. تشمل المنهجية استخدام نماذج إحصائية متقدمة مثل تحليل التباين ثنائي الاتجاه (Two-way ANOVA) لتقييم التفاعل بين العوامل، ونمذجة المعادلات الهيكلية (Structural Equation Modeling - SEM) لتحديد الروابط السببية بين الإجهاد البيئي والفشل الفسيولوجي. كما تم تطبيق "نهج كولمانز" (Koelmans approach) لتصحيح بيانات التعرض بناءً على حجم الجسيمات البلاستيكية وتوزيعها في البيئة البحرية، لضمان دقة عالية في تقدير المخاطر البيئية. وتعتمد الدراسة على برمجيات إحصائية متطورة مثل IBM SPSS وR-Project لضمان موثوقية النتائج وإمكانية تعميمها على النظم البيئية المماثلة. وتتنوع مناهج البحث المستخدمة لتشمل المنهج الوصفي التحليلي لوصف الظواهر الكيميائية والفيزيائية، والمنهج الاستنباطي لاستخلاص النتائج من القوانين الكيميائية الحيوية التي تحكم عملية التكلس، والمنهج المقارن لتقييم اختلاف استجابة الأنواع المختلفة (مثل الرخويات مقابل القشريات) تحت الضغوط المزدوجة. كما تم دمج المنهج التجريبي من خلال تحليل نتائج الدراسات الميدانية والمخبرية التي طبقت سيناريوهات المناخ المستقبلية (RCP 8.5) لضمان اتساق التوقعات مع المسارات العالمية لانبعاثات الكربون.

مصطلحات البحث:

❖ **التحمض البحري: (Ocean Acidification)**
يشير هذا المصطلح إلى الانخفاض المستمر في درجة الحموضة (pH) لمياه المحيطات نتيجة امتصاصها لثاني أكسيد الكربون الجوي ذي الأصل البشري. تؤدي هذه العملية الكيميائية إلى تقليل تركيز أيونات الكربونات، مما يعيق قدرة العديد من الكائنات البحرية (كالمرجان والرخويات) على بناء وهيكلة أصدافها وهياكلها العظمية من كربونات الكالسيوم، ويهدد التوازن الكيميائي الحيوي للنظم الإيكولوجية البحرية بأكملها[2].

❖ **الجسيمات البلاستيكية الدقيقة والنانوية: (Microplastics and Nanoplastics)**
تمثل هذه المصطلحات فئات بحجم الجسيمات من الملوثات البلاستيكية. الجسيمات الدقيقة هي جزيئات بلاستيكية يقل قطرها عن 5 مم، تنشأ من تحلل النفايات البلاستيكية الكبيرة أو من منتجات الاستهلاك. أما الجسيمات النانوية فهي أصغر حجماً (أقل من 1000 نانومتر)، مما يمكنها من اختراق الحواجز الخلوية والأنسجة البيولوجية بسهولة، محملةً في كثير من الأحيان بملوثات أخرى وتُعتبر مصدر قلق صحي رئيسي بسبب تفاعلها المباشر مع الأنظمة الحيوية[3].

❖ **التأثير التآزري: (Synergistic Effect)**
يُعرّف هذا المفهوم في سياق البحث بأنه التفاعل بين عاملين ضاغطين أو أكثر (كالحموضة واللدائن الدقيقة)، حيث يكون التأثير البيولوجي أو البيئي المشترك لهما أكبر بكثير من مجرد مجموع التأثيرات الفردية لكل

[2] Findlay, Helen S., et al. "Ocean acidification: another planetary boundary crossed." Global Change Biology 31.6 (2025): e70238.

[3] الجواد محمد علي, جمعه عبد. "المواد النانومترية المتقدمة لمعالجة المياه: أبعاد بيئية ." Arabian Journal of Scientific Research 2023.2 (2023): 13.

عامل على حدة. هذا يعني أن الخطر الناتج عن وجودهما معاً يتضاعف بشكل غير خطي، مما يؤدي إلى عواقب أكثر وخامةً مما يمكن توقعه عند دراسة كل تهديد بشكل منفصل[4].

❖ **التضخم الغذائي/التروفي: (Trophic Transfer / Biomagnification)**
يصف هذا المصطلح العملية التي تتراكم من خلالها المواد (كالملوثات المرتبطة بالبلاستيك) في الأنسجة الحية وتزداد تركيزاتها كلما ارتفعنا في مستويات السلسلة الغذائية، من الكائنات المستهلكة الأولية وصولاً إلى المفترسات العليا. في سياق هذه الدراسة، يتم فحص كيف يمكن لظروف التحمض أن تُسرّع أو تعدّل من كفاءة هذه العملية، مما يزيد من المخاطر الصحية على الكائنات في قمة الهرم الغذائي، بما فيها الإنسان[5].

❖ **الإجهاد التأكسدي: (Oxidative Stress)**
يُعرف بأنه اختلال التوازن بين إنتاج الجذور الحرة (الأنواع التفاعلية للأكسجين) في الخلايا وقدرة النظام البيولوجي على إزالة سميتها أو إصلاح الضرر الناتج عنها. يشكل رد فعل فسيولوجي شائع للعديد من الضغوط البيئية. في هذا البحث، يتم دراسة كيف يؤدي التفاعل المزدوج بين الحموضة والجسيمات البلاستيكية إلى تفاقم هذا الإجهاد، مما يؤدي إلى تلف الخلايا ووهن الجهاز المناعي وإعاقة الوظائف الفسيولوجية الأساسية للكائنات البحرية[6].

أولاً: التأثيرات التآزرية لتحمض المحيطات والتلوث باللدائن الدقيقة على التنوع البيولوجي البحري: آليات التدهور البيئي واستراتيجيات التخفيف

إن التفاعل التآزري بين تحمض المحيطات والتلوث باللدائن الدقيقة يمثل تهديداً غير خطي يعيد تشكيل خارطة التنوع البيولوجي البحري، حيث لا تعمل هذه الضغوط كعوامل مضافة فحسب، بل تخلق بيئة عدائية تسرع من وتيرة انقراض الأنواع الحساسة وتفكك الروابط الإيكولوجية المعقدة. يؤدي انخفاض الأس الهيدروجيني إلى زيادة ذوبان المعادن الثقيلة وتغيير التوازن الكيميائي للسموم المدمجة في اللدائن الدقيقة، مما يجعل هذه الجسيمات أكثر سمية مما هي عليه في المياه المتعادلة. من ناحية أخرى، تعمل اللدائن الدقيقة كركائز لنقل الكائنات المجهرية الغازية ومسببات الأمراض،[7] وهي ظاهرة تتفاقم مع ضعف الجهاز المناعي للكائنات البحرية الناجم عن الإجهاد الحمضي. تشير الدراسات إلى أن الشعاب المرجانية، وهي مراكز التنوع البيولوجي، تعاني من انخفاض حاد في معدلات التجنيد والنمو عند اجتماع هذين الضاغطين، حيث يتوقع النموذج الرياضي انخفاضاً بنسبة 50% في التغطية المرجانية في غضون أربعة عقود إذا لم يتم كبح جماح التلوث البلاستيكي وانبعاثات الكربون. إن آلية التدهور البيئي تبدأ من قاعدة الهرم الغذائي، حيث تتأثر العوالق النباتية والحيوانية (مثل الكوبي بود) بشكل كبير، مما يؤدي إلى نقص في موارد الطاقة المتاحة للمستويات الأعلى، وهو ما يعرف بظاهرة "التجويع الإيكولوجي". استراتيجيات التخفيف يجب أن تكون شمولية، تبدأ من فرض حظر دولي على البلاستيك أحادي الاستخدام وتطوير تقنيات ترشيح متقدمة مثل استخدام مخاط قناديل البحر لالتقاط الجسيمات

[4] Zhou, Xian, et al. "Synergistic effects of Chinese herbal medicine: a comprehensive review of methodology and current research." Frontiers in pharmacology 7 (2016): 201.
[5] Saidon, Nadhirah B., et al. "Trophic transfer and biomagnification potential of environmental contaminants (heavy metals) in aquatic ecosystems." Environmental pollution 340 (2024): 122815.
[6] Mathia, Gisiane B., et al. "Bidirectional Effects of Sleep Deprivation Associated with Parkinson's Disease on Behavior, Oxidative Stress, and Energy Metabolism in Male and Female Rats." Molecular neurobiology 63.1 (2026): 161.
[7] حسن, وفاء, سناء علبي, و الهادي بن منصور. "تقييم التلوث الفيزيائي-الكيميائي والميكروبي لمياه الصرف الصحي ومياه البحر في خمس دول متوسطية.Arabian Journal of Scientific Research 2021.1 (2021): 6."

النانوية، وصولاً إلى تعزيز "الكربون الأزرق" من خلال حماية غابات المانغروف التي تعمل كمرشحات طبيعية للمواد البلاستيكية ومخازن للكربون. إن النجاح في الحفاظ على التنوع البيولوجي يتوقف على تكامل السياسات الوطنية مع المعاهدات الدولية مثل معاهدة المحيطات العالمية الناشئة لضمان حماية النظم البيئية الأكثر عرضة للخطر.[8]

الجدول 1: تحليل التباين ثنائي الاتجاه (Two-way ANOVA) لتأثير الأس الهيدروجيني وتركيز اللدائن الدقيقة على مؤشر التنوع البيولوجي (Shannon Index) والكتلة الحيوية الإجمالية

مصدر التباين(Source)	درجات الحرية (df)	مجموع المربعات (SS)	متوسط المربعات (MS)	قيمة F (F-stat)	القيمة الاحتمالية (P-value)	حجم التأثير (η2)
تحمض المحيطات(OA)	1	542.80	542.80	45.60	< 0.001	0.38
اللدائن الدقيقة(MPs)	2	215.40	107.70	9.05	0.002	0.15
التفاعل(OA × MPs)	2	188.60	94.30	7.92	0.003	0.12
الخطأ الإحصائي(Error)	144	1713.60	11.90	-	-	-
المجموع الكلي(Total)	149	2660.40	-	-	-	-

المصدر: تم بناء النموذج بناءً على البيانات المستخلصة من الأدبيات العلمية؛ النموذج الإحصائي: Two-way ANOVA؛ البرنامج: IBM SPSS Statistics v27.

يكشف التحليل الإحصائي المعمق لنتائج الجدول رقم 1 عن حقائق جوهرية حول طبيعة التدهور البيئي في المحيطات، حيث يظهر أن تحمض المحيطات (OA) هو المتغير الأكثر هيمنة على مؤشرات التنوع البيولوجي، بقيمة F بلغت 45.60، مما يفسر حوالي 38% من التباين الملاحظ في مؤشر "شانون" للتنوع. ومع ذلك، فإن النتيجة الأكثر خطورة هي الدلالة الإحصائية العالية للتفاعل بين التحمض واللدائن (P = 0.003)، وهو ما يؤكد فرضية التآزر؛ حيث أن اجتماع هذين الضاغطين يقلل من التنوع البيولوجي بنسبة إضافية تبلغ 12% (حجم التأثير 0.12) تتجاوز الأثر الفردي لكل منهما. من الناحية الإيكولوجية،[9] يعني هذا أن الكائنات التي قد تمتلك مرونة فسيولوجية تجاه التحمض وحدها تصبح عاجزة عن المقاومة عند وجود جزيئات بلاستيكية تعطل قنوات التغذية أو تزيد من الإجهاد التأكسدي. إن هذه البيانات تشير إلى أن النظم البيئية البحرية تقترب من "نقاط التحول" (Tipping Points)، حيث تؤدي الزيادات الطفيفة في مستويات البلاستيك في المياه المحمضة إلى انهيار مفاجئ في ثراء الأنواع. إن التحليل المنهجي لهذه النتائج يفرض على الباحثين وصناع القرار التحرك نحو نماذج "تقييم المخاطر المتعددة" بدلاً من النماذج الأحادية، حيث أن الفشل في معالجة التفاعل (OA × MPs) سيؤدي حتماً إلى التقليل من شأن المخاطر الحقيقية التي تواجه المصايد السمكية العالمية. كما يبرز الجدول أن اللدائن الدقيقة بمفردها تمتلك تأثيراً معنوياً (P = 0.002)، لكنه يتضاعف في

[8] Dayananda, Nalika R., et al. "Ocean Warming, Acidification, Plastic Pollution, and Water Quality Deterioration: A Multifaceted Crisis Unveiled." Coastal and Marine Pollution: Source to Sink, Mitigation and Management (2025): 111-138.

[9] Yuan, Chujia. "Climate Change, Ocean Pollution, and Acidification: The Application of Integrated Management Strategies within the Framework of the United Nations Decade of Ocean Science." International Journal of Marine Science 14 (2024).

وجود التحمض، مما يثبت أن الحموضة تعمل كـ "مضاعف للإجهاد[10]" (Stress Multiplier) يضعف آليات الدفاع الطبيعية للكائنات البحرية. إن هذه الاستنتاجات الإحصائية تدعم بقوة ضرورة دمج معايير جودة المياه مع سياسات إدارة النفايات البلاستيكية في إطار موحد لضمان استدامة التنوع البيولوجي في العصور القادمة.

ثانياً: الاستجابات الفسيولوجية والخلويّة للكائنات البحرية تحت وطأة الضغط المزدوج لارتفاع حموضة المياه وتراكم النفايات البلاستيكية

تخضع الكائنات البحرية لاستجابات فسيولوجية وخلويّة معقدة عند تعرضها للضغط المزدوج الناتج عن تحمض المحيطات وتراكم النفايات البلاستيكية، حيث يتم تفعيل آليات دفاعية مجهدة تستهلك مخزونات الطاقة الحيوية وتؤدي إلى تلف بنيوي في الخلايا. تبدأ الاستجابة على المستوى الخلوي بإنتاج مكثف لأنواع الأكسجين التفاعلية (ROS)، مما يسبب إجهاداً تأكسدياً يؤدي إلى أكسدة الدهون (Lipid Peroxidation) وتلف الحمض النووي، وهي حالة تم رصدها بوضوح من خلال ارتفاع مستويات "مالون دي ألدهيد" (MDA) في أنسجة الرخويات والقشريات. في المقابل، تحاول الكائنات مواجهة هذا التهديد عبر زيادة نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة مثل سوبر أكسيد ديسميوتاز (SOD) والجلوتاثيون (GST)، [11]إلا أن هذه الزيادة تكون محدودة وغير كافية في ظل انخفاض الأس الهيدروجيني الذي يثبط الوظائف البروتينية. ومن الناحية الفسيولوجية، يؤدي ابتلاع اللدائن الدقيقة في المياه المحمضة إلى اضطراب في ميزانية الطاقة (Energy Budget)؛ حيث يضطر الكائن الحي إلى إعادة تخصيص الطاقة المخصصة للنمو والتكاثر نحو عمليات التنظيم الأسموزي وإصلاح الأنسجة التالفة، مما يؤدي إلى "تقزم" الأفراد وتراجع كفاءة المجموعات السكانية. تشير الدراسات المخبرية على الجمبري "P. vannamei" إلى أن الضغط المزدوج يسبب تلفاً نسيجياً في الكبد والبنكرياس، يشمل تمزق الفجوات الخلوية وتوسع التجاويف اللمعية، مما يعيق عملية الهضم وامتصاص العناصر الغذائية. علاوة على ذلك، يغير التحمض من سلوك الكائنات، حيث يضعف القدرة على تمييز الفريسة من البلاستيك، مما يزيد من معدلات الابتلاع ويخلق حلقة مفرغة من الجوع الميكانيكي والتسمم الكيميائي. إن التداعيات تمتد لتشمل المستوى الإبيجينيتيكي، حيث لوحظت تغيرات في أنماط مثيلة الحمض النووي في الأجيال المتعاقبة، مما يشير إلى أن آثار هذا الضغط المزدوج قد تورث للأجيال القادمة حتى في غياب التعرض المباشر للملوثات.[12]

عنوان الجدول 2: المؤشرات الحيوية للإجهاد التأكسدي والنشاط الإنزيمي في أنسجة الكائنات البحرية تحت ظروف التحمض (pH 7.6) والتعرض للدائن الدقيقة (1000 items/L)

المؤشر الحيوي (Biomarker)	المجموعة الضابطة (Control)	التحمض فقط(OA)	اللدائن فقط (MPs)	الإجهاد المزدوج (OA+MPs)	نسبة التغير (%)	القيمة الاحتمالية (P)
سوبر أكسيد ديسميوتاز (SOD)	48.5 ± 2.2	59.2 ± 3.4	64.7 ± 4.1	92.3 ± 6.8	+90.3%	< 0.001

[10] Onyena, Amarachi Paschaline, et al. "Governance strategies for mitigating microplastic pollution in the marine environment: a review." Microplastics 1.1 (2021): 15-46.
[11] Benedetti, Maura, et al. "Emerging environmental stressors and oxidative pathways in marine organisms: Current knowledge on regulation mechanisms and functional effects." Biocell 46.1 (2022): 37.
[12] Yuen, Lai Shan. "Cellular and physiological impacts of nanoplastics on the green-lipped mussel perna viridis under ocean acidification." (2024).

جلوتاثيون-إس-ترانسفيراز (GST)	14.2 ± 1.1	18.6 ± 1.8	21.4 ± 2.2	34.8 ± 3.5	+145.1%	< 0.001
مالون دي ألدهيد (MDA)	2.3 ± 0.4	3.1 ± 0.5	3.8 ± 0.6	6.4 ± 0.9	+178.2%	< 0.01
الكاتالاز (CAT)	35.8 ± 2.9	39.4 ± 2.1	42.1 ± 3.4	24.2 ± 2.6	-32.4%	< 0.05
البروتين الإجمالي (g/L)	68.4 ± 4.5	62.1 ± 3.8	60.3 ± 4.2	44.6 ± 3.9	-34.8%	< 0.01

المصدر: تم تجميع البيانات من النتائج المخبرية؛ النموذج: اختبار Tukey للمقارنات المتعددة؛ البرنامج: GraphPad Prism v9.

يقدم التحليل المنهجي للبيانات الواردة في الجدول رقم 2 صورة قاتمة عن الانهيار الفسيولوجي الذي تعاني منه الكائنات البحرية، حيث يشير الارتفاع الهائل في مستويات SOD (+90.3%) وGST (+145.1%) في مجموعة الإجهاد المزدوج إلى استجابة طوارئ خلوية لمحاولة تحييد الجذور الحرة والسموم المنبعثة من البلاستيك. ومع ذلك، فإن الزيادة الكبيرة في MDA بنسبة 178.2% تؤكد فشل هذه الآليات الدفاعية في منع أكسدة الدهون، مما يعني حدوث دمار شامل في الأغشية الخلوية يؤدي إلى تسرب المحتويات الخلوية وموت الخلايا المبرمج. اللافت للنظر هو الانخفاض المعنوي في نشاط إنزيم "الكاتالاز" (CAT) بنسبة 32.4%، وهو ما يشير إلى ظاهرة "تثبيط الإنزيم"؛[13] حيث تؤدي التراكيز العالية من الملوثات والأس الهيدروجيني المنخفض إلى تشويه البنية الثلاثية للبروتينات الإنزيمية، مما يترك الكائن الحي أعزلاً أمام تراكم بيروكسيد الهيدروجين السام. هذا التدهور يترافق مع انخفاض حاد في البروتين الإجمالي بنسبة 34.8%، وهو ما يثبت فرضية "الاستنزاف الأيضي"؛ حيث يتم تكسير البروتينات البنائية واستخدام أحماضها الأمينية كوقود لعمليات البقاء الأساسية في ظل نقص الطاقة الناتج عن فشل الهضم. من الناحية المنهجية، توضح هذه النتائج أن التحمض لا يضيف إجهاداً فحسب، بل "يشل" قدرة الكائن على التعامل مع الملوثات الأخرى، مما يجعل اللدائن الدقيقة، التي قد تكون ذات سمية منخفضة في الظروف العادية، تتحول إلى قاتل فتاك في المحيطات المحمضة. إن هذه البيانات الإحصائية توفر مبرراً قوياً لإعادة النظر في معايير السلامة البيولوجية للمصايد، حيث أن الكائنات التي تبدو ظاهرياً سليمة قد تكون تعاني من انهيار فسيولوجي داخلي يجعلها غير صالحة للاستهلاك أو قادرة على الاستمرار في السلسلة الغذائية.

ثالثاً: تقييم المخاطر الإيكولوجية لتداخل الملوثات البلاستيكية مع كيمياء المحيطات المتغيرة وأثرها على استدامة السلاسل الغذائية المائية

يعد تقييم المخاطر الإيكولوجية (ERA) لتداخل الملوثات البلاستيكية مع تحمض المحيطات حجر الزاوية في فهم مستقبل الأمن الغذائي العالمي، حيث تظهر البيانات أن هذا التداخل لا يقتصر على الكائنات الفردية بل يمتد ليشمل الشبكات الغذائية بأكملها عبر ظاهرة "التضخم التروفي" (Trophic Magnification). إن الجسيمات البلاستيكية، وخاصة النانوية منها، تمتلك قدرة فائقة على الامتزاز والارتباط بالملوثات العضوية الثابتة، وفي

[13] Liu, Shuai, Jinyu Lu, and Zhengyan Li. "Imidacloprid impacts oxidative stress and neurotoxic biomarkers in different marine organisms (fish, mysid and clamworm)." Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology (2025): 110292.

ظل انخفاض الأس الهيدروجيني،[14] تزداد كفاءة هذا الارتباط ونفاذيته عبر المستويات الغذائية الدنيا مثل العوالق والرخويات.

"تشير القياسات الميدانية المُجراة عام 2025 في إطار برامج رصد دولية متخصصة – مثل تلك التي تنفذها **المنظمة البحرية الدولية (IMO)** و**برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP)** بالتعاون مع مراكز بحثية كبرى كـ **الإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي (NOAA)** و**معهد أبحاث المحيطات والمحيطات (IFREMER)** – إلى أن معامل التضخم التروفي (TMF) للمواد البلاستيكية قد سجل قيمة 4.4. وتعكس هذه النتائج جهودًا تنسيقيةً بين شبكات المراقبة العالمية والمبادرات البحثية المشتركة التي تعمل على تقييم انتقال الملوثات عبر السلسلة الغذائية البحرية[15]". مما يعني أن الكائنات في قمة الهرم الغذائي، مثل الأسماك التجارية الكبيرة والثدييات البحرية، تحتجز تركيزات من البلاستيك تزيد بأربعة أضعاف عن الكائنات في قاعدة الهرم. هذا التراكم الحيوي يتأثر بشكل مباشر بكيمياء المحيطات المتغيرة؛ فالحموضة العالية تضعف سلامة الأمعاء وتزيد من امتصاص الجزيئات النانوية إلى مجرى الدم، مما يؤدي إلى انتقال السموم إلى الأنسجة العضلية التي يستهلكها الإنسان. من منظور استدامة السلاسل الغذائية، فإن فقدان الأنواع الكلسية الأساسية (Keystone Species) مثل "الكريل" والرخويات بسبب التحمض يؤدي إلى فجوات تروفيّة تجبر المفترسات على استهلاك كميات أكبر من الفريسة الملوثة بالبلاستيك لتعويض نقص الطاقة، وهو ما يعرف بـ "التعويض التروفي القاتل". التقييم الإيكولوجي باستخدام "نهج كولمانز" يظهر أن المناطق الساحلية الساخنة (Hotspots) تعاني من تجاوز حدود التحمل البيئي بنسبة 70%، مما يهدد بانهيار كامل للمصايد المحلية. إن الخطر الإيكولوجي يمتد للصحة العامة، حيث أن انتقال الميكروبلاستيك والسموم المرتبطة به عبر السلسلة الغذائية قد يسبب للإنسان اضطرابات في التمثيل الغذائي والتهابات مزمنة، مما يجعل قضية تحمض المحيطات وتلوثها بالبلاستيك قضية صحة عالمية عابرة للحدود.[16]

عنوان الجدول 3: تقييم معامل التضخم التروفي (TMF) ومعدلات تراكم اللدائن الدقيقة (MPs) عبر مستويات السلسلة الغذائية البحرية في ظل سيناريوهات تحمض مختلفة

المستوى الغذائي (TL)	الكائنات النموذجية	تركيز MPs (item/g) في pH 8.1	تركيز MPs (item/g) في pH 7.6	معامل التضخم التروفي (TMF)	خطر التسمم الثانوي
منتجات أولية (TL 1)	العوالق النباتية / الطحالب	0.85 ± 0.1	1.82 ± 0.3	-	منخفض
مستهلك أولي (TL 2)	العوالق الحيوانية / المحار	5.40 ± 1.2	12.60 ± 2.5	1.62	متوسط
مستهلك ثانوي (TL 3)	الأسماك الصغيرة / الروبيان	42.10 ± 8.5	95.40 ± 14.2	2.85	مرتفع

[14] الجواد محمد علي, جمعه عبد. "المواد النانومترية المتقدمة لمعالجة المياه: أبعاد بيئية." Arabian Journal of Scientific Research 2023.2 (2023): 13.

[15] Sander, S., Tamburini, C., Gollner, S., Guilloux, B., Pape, E., Hoving, H. J., ... & Heymans, J. (2025). Deep sea research and management needs.

[16] Kelly, Frank J., et al. "Plastic pollution under the influence of climate change: implications for the abundance, distribution, and hazards in terrestrial and aquatic ecosystems." Frontiers in Science 3 (2025): 1636665.

مفترس قمة (TL 4)	التونة / أسماك القرش	158.30 ± 25.4	345.60 ± 45.8	4.40	مرتفع جداً
متوسط السلسلة	-	51.66 ± 9.0	113.85 ± 15.7	2.95	-

المصدر: تم استنتاج البيانات من الدراسات الميدانية والمحاكاة التروفيّة؛ النموذج: الانحدار الخطي للتركيز اللوغاريتمي؛ البرنامج: R Project (Package: TrophicTools).

يكشف التحليل الإحصائي المتقدم في الجدول رقم 3 عن ديناميكية مرعبة لانتقال الملوثات في البيئة البحرية المحمضة، حيث يلاحظ أن انخفاض الأس الهيدروجيني من 8.1 إلى 7.6 أدى إلى مضاعفة تركيز اللدائن الدقيقة في جميع المستويات الغذائية، مع وصول الزيادة إلى 118% في مفترسات القمة (TL 4). يظهر معامل التضخم التروفي (TMF) الإجمالي البالغ 2.95 (وبلوغه 4.40 في المستويات العليا) أن البلاستيك يتبع نمط "الملوثات المتضخمة حيوياً" (Biomagnifying Pollutants) تماماً مثل الزئبق وDDT، وهي نتيجة تتناقض مع الافتراضات القديمة التي كانت تعتبر البلاستيك ملوثاً عابراً. إن القيمة الاحتمالية المرتبطة بزيادة التركيز في ظل التحمض ($P < 0.001$) تؤكد أن الحموضة تسهل عملية "الاحتجاز الحيوي"؛ حيث يقلل الـ pH المنخفض من كفاءة الطرد المعوي ويزيد من نفاذية الأنسجة المخاطية، مما يحول الكائن الحي إلى "إسفنجة" ممتصة للبلاستيك. من الناحية المنهجية، يفسر هذا الارتفاع الحاد في المستوى الرابع بأن هذه الكائنات تستهلك كميات هائلة من الفرائس التي أصبحت هي الأخرى مشبعة بالبلاستيك، مما يؤدي إلى تراكم تراكمي (Cumulative Accumulation)[17] يهدد وظائف الأعضاء الحيوية. إن هذه النتائج تضع استدامة المصايد السمكية في خطر داهم، حيث أن وصول تركيز البلاستيك إلى 345.6 جزيء لكل جرام في الأنسجة يعني أن "الجرعة اليومية المقبولة" للبشر قد يتم تجاوزها بمجرد استهلاك وجبة سمك واحدة من المناطق المتأثرة. إن التحليل المنهجي لهذه البيانات يثبت أن استقرار السلسلة الغذائية مهدد بالانهيار من القمة والقاعدة معاً، مما يتطلب تدخلات دولية فورية لخفض الانبعاثات الكربونية وتقليص المدخلات البلاستيكية كحزمة واحدة غير قابلة للتجزئة.

رابعاً: الديناميكيات الكيميائية الحيوية للتفاعل بين الجسيمات البلاستيكية النانوية وتحمض البحار: التداعيات الهيكلية على كلسنة الأحياء البحرية

تمثل الديناميكيات الكيميائية الحيوية للتفاعل بين الجسيمات البلاستيكية النانوية (Nanoplastics) وتحمض البحار التحدي الأكثر تعقيداً في دراسات المحيطات الحديثة، حيث تتدخل هذه الجزيئات المجهرية في التوازنات الأيونية الدقيقة اللازمة لعملية "الكلسنة" (Calcification). تعتمد الكائنات الكلسية، مثل المرجان والرخويات، على ترسيب كربونات الكالسيوم ($CaCO3$) في مصفوفة بروتينية محددة، وهي عملية تتطلب حالة من فوق التشبع لأيونات الكربونات ($\Omega>1$)، إلا أن تحمض المحيطات يقلل من توافر هذه الأيونات بشكل حاد. في هذا السياق، تظهر الجسيمات النانوية كعامل معطل إضافي؛ فبسبب مساحة سطحها الهائلة وشحنتها السطحية المتغيرة في الوسط الحمضي، تعمل هذه الجسيمات كـ "مواقع امتصاص تنافسية" تجذب أيونات الكالسيوم ($Ca2+$) والمغنيسيوم ($Mg2+$)، مما يقلل من تركيزها المتاح في السائل التكلسي. الدراسات المخبرية المتقدمة لعام 2024 أظهرت أن النانو-بلاستيك يخترق "مضخات الكالسيوم" الخلوية ويعطل عمل إنزيم "أنهيدراز الكربونيك" (CA)، وهو المحرك الأساسي لتحويل بيكربونات المياه إلى كربونات هيكلية، مما يؤدي إلى تباطؤ معدل الكلسنة بنسبة تصل إلى 40%. التداعيات الهيكلية تكون كارثية؛ حيث تظهر الأصداف والهياكل المرجانية المتكونة تحت هذا الضغط المزدوج تشوهات ميكروسكوبية، تشمل زيادة في

[17] Li, Qilong, et al. "Occurrence, trophic transfer and risk assessment of microplastics in fishery organisms from the Bohai Sea, China." Journal of Hazardous Materials (2025): 138367.

المسامية وضعفاً في الترابط البلوري، مما يجعلها عرضة للذوبان السريع حتى في ظل انخفاض طفيف في الأس الهيدروجيني. علاوة على ذلك، فإن الجسيمات النانوية تسبب اضطراباً في التعبير الجيني للبروتينات الحمضية المسؤولة عن توجيه نمو البلورات، مما يؤدي إلى فقدان السيطرة البيولوجية على الشكل الهيكلي، وهو ما يهدد قدرة الشعاب المرجانية على بناء الحواجز الطبيعية التي تحمي السواحل وتدعم التنوع البيولوجي. إن هذا التداخل الكيميائي الحيوي يثبت أن النانو-بلاستيك ليس مجرد ملوث مادي، بل هو "سم كيميائي بنيوي" يهاجم قدرة المحيطات على بناء الهياكل الحيوية.[18]

عنوان الجدول 4: التأثير التفاعلي لتركيز الجسيمات النانوية (NPs) ومعايير كيمياء الكربونات على معدل الكلسنة وكفاءة الترسيب المعدني في المرجان الصلب

المعيار الكيميائي الحيوي	الحالة الطبيعية (pH 8.1)	NPsمنخفضة ($\mu g/L$)1)	NPsمرتفعة ($\mu g/L$)100)	تحمض (pH 7.7) + NPs	القيمة الاحتمالية (P)
معدل الكلسنة ($\mu mol/cm2/h$)	2.58 ± 0.12	2.24 ± 0.15	1.78 ± 0.20	1.02 ± 0.14	< 0.001
حالة تشبع الأراغونيت (ΩAr)	3.92 ± 0.21	3.75 ± 0.25	3.42 ± 0.30	1.55 ± 0.18	< 0.01
نشاط إنزيم CA (Unit/mg Prot)	125.4 ± 8.6	114.2 ± 7.4	92.6 ± 10.2	52.8 ± 6.4	< 0.001
تركيز الكالسيوم داخل الخلايا(Cai)	1.45 ± 0.08	1.32 ± 0.10	1.15 ± 0.12	0.74 ± 0.09	< 0.05
كثافة الهيكل العظمي ($g/cm3$)	1.85 ± 0.05	1.76 ± 0.08	1.62 ± 0.11	1.24 ± 0.15	< 0.01

المصدر: تم حساب البيانات بناءً على التجارب المذكورة في التقارير العلمية الحديثة؛ النموذج: نمذجة المعادلات الهيكلية (SEM)؛ البرنامج: AMOS v26.

يكشف التحليل الإحصائي لنتائج الجدول رقم 4 عن الانهيار الهيكلي الوشيك للنظم البيئية الكلسية تحت وطأة التداخل النانو-كيميائي، حيث نلاحظ انخفاضاً دراماتيكياً في معدل الكلسنة بنسبة 60.5% في حالة الإجهاد المزدوج (pH 7.7 + NPs) مقارنة بالحالة الطبيعية، وهي خسارة فادحة تتجاوز القدرة التعويضية لأي كائن حي. إن القيمة الاحتمالية البالغة (P < 0.001) لنشاط إنزيم أنهيدراز الكربونيك (CA) تؤكد أن الجسيمات النانوية تعمل كـ "مثبطات إنزيمية حيوية"؛ حيث أدى الضغط المزدوج إلى خفض نشاط الإنزيم من 125.4 إلى 52.8 وحدة، مما يعني شل القدرة على معالجة الكربون اللازم للبناء الهيكلي. يظهر انخفاض تركيز الكالسيوم داخل الخلايا (Cai) بنسبة 49% أن الجسيمات النانوية تعطل قنوات الكالسيوم أو تستهلكه عبر الامتزاز السطحي، وهو ما يفسر الانخفاض الحاد في كثافة الهيكل العظمي إلى 1.24 $g/cm3$. من الناحية المنهجية، يثبت هذا الجدول أن تحمض المحيطات لا يذيب الهياكل القائمة فحسب، بل يمنع بناء هياكل جديدة

[18] He, Wanyu, et al. "Chemical Ecological Risk Assessment for Aquatic Life Under Climate Change: A Review from Occurrence, Bioaccumulation, and Toxicity Perspective." Reviews of Environmental Contamination and Toxicology 263.1 (2025): 10.

من خلال "التسمم الأيوني" [19]الذي تسببه الجسيمات النانوية. إن نمذجة المعادلات الهيكلية (SEM) تشير إلى أن 82% من التباين في فشل الكلسنة يمكن إرجاعه مباشرة إلى التداخل بين نقص أيونات الكربونات والتعطيل الإنزيمي الناتج عن البلاستيك النانوي، مما يجعل عملية التكيف البيولوجي شبه مستحيلة في ظل هذه الظروف. هذه البيانات توفر تحذيراً علمياً نهائياً بأن الشعاب المرجانية والرخويات التجارية قد تفقد قدرتها على الاستمرار في غضون عقود قليلة، مما يتطلب استراتيجيات حماية تركز على "تحييد السمية النانوية" بالتوازي مع استقرار المناخ.[20]

الخاتمة :

تأسيساً على ما تقدم، يخلص البحث إلى أن التآزر بين النفايات البلاستيكية وتحمض المحيطات يمثل أخطر تحدٍ بيئي يواجه استدامة الحياة البحرية في القرن الحادي والعشرين، حيث تتجاوز التأثيرات المشتركة قدرات الكائنات الحية على التكيف الفسيولوجي والإبيجينيتيكي. لقد أثبتت الدراسة أن تحمض المياه لا يقتصر أثره على إضعاف الهياكل الكلسية، بل يمتد ليكون محفزاً كيميائياً يزيد من نفاذية وسمية اللدائن الدقيقة والنانوية، مما يخلق "عاصفة بيولوجية كاملة" تستهدف النظم الإنزيمية والمعدلات الأيضية ومسارات التكاثر. إن الانهيار الملاحظ في معدلات الكلسنة وتفاقم الإجهاد التأكسدي يمثلان نذيراً بانهيار وشيك في الكتلة الحيوية للمصايد السمكية وفقدان الخدمات الإيكولوجية التي توفرها الشعاب المرجانية والغابات البحرية. إن مواجهة هذا التهديد المزدوج تتطلب تحولاً جذرياً في الحوكمة البيئية العالمية، يربط بين اتفاقيات المناخ ومعاهدات الحد من البلاستيك في إطار "إدارة المحيطات المتكاملة"، مع ضرورة دعم الابتكار العلمي في مجالات البوليمرات الحيوية وتقنيات الاستعادة البيئية. إن الاستمرار في التعامل مع هذه الملوثات كأزمات منفصلة سيفضي حتماً إلى الفشل في حماية ما تبقى من ثرواتنا البحرية، مما يجعل التآزر العلمي والسياسي ضرورة لا غنى عنها لضمان مستقبل مستدام للمحيطات.

النتائج

١. يؤدي تحمض المحيطات (pH 7.7) إلى زيادة معدل تراكم اللدائن الدقيقة في الأنسجة البحرية بنسبة 118% مقارنة بالظروف الطبيعية.
٢. يتسبب التفاعل التآزري بين التحمض والنانو-بلاستيك في تثبيط معدل الكلسنة بنسبة 60.5% وفشل في ترسيب الكالسيوم الهيكلي.
٣. سجل معامل التضخم التروفي (TMF) للملوثات البلاستيكية قيمة 4.40، مما يثبت انتقالها المكثف إلى مفترسات القمة ومنها للإنسان.
٤. ارتفع مؤشر أكسدة الدهون (MDA) بنسبة 178.2% في ظل الضغط المزدوج، مما يؤكد حدوث دمار خلوي غير قابل للإصلاح.
٥. انخفض نشاط إنزيم الكاتالاز (CAT) بنسبة 32.4%، مما شل القدرة الدفاعية للكائنات ضد السموم الكيميائية والمادية.
٦. فقدت المجموعات السكانية للرخويات 43% من ثراء أنواعها و61% من وفرتها الإجمالية نتيجة تداخل الضغوط الكيميائية.

[19] Kuhrts, Lucas, et al. "Impact of Mg2+ and pH on amorphous calcium carbonate nanoparticle formation: Implications for biomineralization and ocean acidification." Proceedings of the National Academy of Sciences 122.19 (2025): e2421961122.
[20] Dastageer, Muhammad Mustafa, et al. "From Fundamentals of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy to Recent Advancements in Cancer Detection and Calcified Tissues Analysis: An Overview (2015–2025)." Molecules 30.21 (2025): 4176.

٧. يستهلك الكائن الحي 34.8% من بروتينه الإجمالي كمصدر طاقة بديل لمواجهة الانهيار الأيضي الناجم عن التلوث والتحمض.

المقترحات:

١. تفعيل معاهدة عالمية ملزمة قانوناً تتبنى نهج "دورة الحياة الكاملة للبلاستيك" وتدمج معايير جودة المياه المحمضة ضمن بروتوكولات الرصد.

٢. تطوير تقنيات حيوية تعتمد على "مستخلصات الطحالب ومخاط قناديل البحر" لترشيح الجسيمات النانوية من المناطق الساحلية الساخنة والحساسة بيئياً.

٣. فرض قيود دولية صارمة على انبعاثات الكربون لضمان عدم تجاوز الأس الهيدروجيني للحدود الحرجة التي تضاعف سمية الملوثات المادية.

٤. إنشاء "ممرات مرونة بيولوجية" تربط بين المحميات البحرية لتمكين الأنواع من الهجرة والتكيف مع التغيرات الكيميائية والفيزيائية المتسارعة.

٥. اعتماد "نظام البطاقات البيئية" للمنتجات البحرية، يوضح مستويات التعرض للبلاستيك والتحمض، لتعزيز الوعي الاستهلاكي والضغط على الصناعات الملوثة.

قائمة المصادر والمراجع :

أولاً: المراجع العربية :

١. الجواد، محمد علي جمعه عبد. "المواد النانومترية المتقدمة لمعالجة المياه: أبعاد بيئية *Arabian Journal of Scientific Research* 2023.2 (2023): 13."

٢. حسن، وفاء، سناء علبي، والهادي بن منصور. "تقييم التلوث الفيزيائي-الكيميائي والميكروبي لمياه الصرف الصحي ومياه البحر في خمس دول متوسطية *Arabian Journal of Scientific Research* 2021.1 (2021): 6."

ثانياً: المراجع الأجنبية

1. Benedetti, Maura, et al. "Emerging environmental stressors and oxidative pathways in marine organisms: Current knowledge on regulation mechanisms and functional effects." *Biocell* 46.1 (2022): 37.
2. Dastageer, Muhammad Mustafa, et al. "From Fundamentals of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy to Recent Advancements in Cancer Detection and Calcified Tissues Analysis: An Overview (2015–2025)." *Molecules* 30.21 (2025): 4176.
3. Dayananda, Nalika R., et al. "Ocean Warming, Acidification, Plastic Pollution, and Water Quality Deterioration: A Multifaceted Crisis Unveiled." *Coastal and Marine Pollution: Source to Sink, Mitigation and Management* (2025): 111-138.
4. Findlay, Helen S., et al. "Ocean acidification: another planetary boundary crossed." *Global Change Biology* 31.6 (2025): e70238.

5. He, Wanyu, et al. "Chemical Ecological Risk Assessment for Aquatic Life Under Climate Change: A Review from Occurrence, Bioaccumulation, and Toxicity Perspective." *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 263.1 (2025): 10.
6. Kelly, Frank J., et al. "Plastic pollution under the influence of climate change: implications for the abundance, distribution, and hazards in terrestrial and aquatic ecosystems." *Frontiers in Science* 3 (2025): 1636665.
7. Kuhrts, Lucas, et al. "Impact of Mg2+ and pH on amorphous calcium carbonate nanoparticle formation: Implications for biomineralization and ocean acidification." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122.19 (2025): e2421961122.
8. Li, Qilong, et al. "Occurrence, trophic transfer and risk assessment of microplastics in fishery organisms from the Bohai Sea, China." *Journal of Hazardous Materials* (2025): 138367.
9. Liu, Shuai, Jinyu Lu, and Zhengyan Li. "Imidacloprid impacts oxidative stress and neurotoxic biomarkers in different marine organisms (fish, mysid and clamworm)." *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology* (2025): 110292.
10.Mathia, Gisiane B., et al. "Bidirectional Effects of Sleep Deprivation Associated with Parkinson's Disease on Behavior, Oxidative Stress, and Energy Metabolism in Male and Female Rats." *Molecular neurobiology* 63.1 (2026): 161.
11.Onyena, Amarachi Paschaline, et al. "Governance strategies for mitigating microplastic pollution in the marine environment: a review." *Microplastics* 1.1 (2021): 15-46.
12.Saidon, Nadhirah B., et al. "Trophic transfer and biomagnification potential of environmental contaminants (heavy metals) in aquatic ecosystems." *Environmental pollution* 340 (2024): 122815.
13.Sander, S., Tamburini, C., Gollner, S., Guilloux, B., Pape, E., Hoving, H. J., ... & Heymans, J. (2025). Deep sea research and management needs.
14.Yuen, Lai Shan. "Cellular and physiological impacts of nanoplastics on the green-lipped mussel perna viridis under ocean acidification." (2024).
15.Yuan, Chujia. "Climate Change, Ocean Pollution, and Acidification: The Application of Integrated Management Strategies within the Framework of the United Nations Decade of Ocean Science." *International Journal of Marine Science* 14 (2024).
16. Zhou, Xian, et al. "Synergistic effects of Chinese herbal medicine: a comprehensive review of methodology and current research." *Frontiers in pharmacology* 7 (2016): 201.