



التقييم المتكامل لتلوث الساحل بالعناصر الثقيلة والاستجابة التأكسدية في بلح البحر المتوسطي

لامير محمد سعد الباهي

جامعة الزنتان، قسم علم الحيوان، كلية الآداب والعلوم بدر

البريد الإلكتروني للباحث: lamer@uoz.edu.ly

Integrated Assessment of Coastal Heavy Metal Pollution and Oxidative Stress Response in
Mediterranean Mussels (*Mytilus galloprovincialis*)

Lamer Mohamed Saad Al-Bahi

University of Zintan, Department of Zoology, Faculty of Arts and Sciences – Badr

تاريخ الاستلام: 2026/09/01 - تاريخ المراجعة: 2026/09/03 - تاريخ القبول: 2026/10/03 - تاريخ النشر: 2026/10/11

الملخص: يمثل الرصد البيئي للبيئات الساحلية المتوسطة ركنية أساسية لتقييم صحة النظم البحرية في ظل تصاعد الأنشطة البشرية والضغوط الصناعية والحضرية. يُقدّم هذا البحث تقييم تكاملي نقدي وممنهج لتراكم العناصر الثقيلة (الكاديوم، الرصاص، النحاس، الزنك، والزرنيق) في أنسجة بلح البحر المتوسطي (*Mytilus galloprovincialis*)، مع ربط هذه التركيزات بالاستجابات البيوكيميائية لمنظومة الإجهاد التأكسدي. بالاعتماد على إطار مراجعة تحليلية تكاملية لبيانات برامج الرصد الإقليمية (مثل برامج MED POL و MYTILOS/MYTIOR) والدراسات الإيكوتوكسكولوجية المحكمة المنشورة عبر أحواض البحر الأبيض المتوسط، يُبرز البحث التباين النسيجي الواضح في تراكم المعادن؛ حيث تُشكّل الغدة الهضمية المركز الأساس للتراكم والتمثيل الحيوي للمعادن غير النشطة اختزالياً مقارنة بالخياشيم. كما توضح النتائج أن التسمم بالمعادن يُحفز اضطراب التوازن الأكسدي عبر آليتين متباينتين: توليد جذور الهيدروكسيل الحرة بواسطة تفاعلات فنتون وهابر-فايس (في حالة النحاس)، والارتباط المباشر بمجموعات السلفهيدريل واستنزاف مخزون الجلوتاثيون وتنشيط السلسلة التنفسية الميتوكوندرية (في حالة الكاديوم والرصاص والزرنيق). تُظهر الإنزيمات المضادة للأكسدة، ولا سيما الكاتاليز (CAT) وسوبر أكسيد ديسميوتاز (SOD) وجلوتاثيون إس-ترانسفيراز (GST)، استجابة ثنائية الطور تتمثل في تحفيز نشاطها عند التراكيز المعتدلة يليه تثبيط ملحوظ عند الإجهاد المزمن، مترافقاً مع تصاعد حاد في مستويات بيروكسدة الدهون المقاسة بتركيز المالوندايالدهيد (MDA). يُثبت تطبيق دليل الاستجابة الحيوية المتكامل (IBR) كفاءة استثنائية في عزل التنبؤات الطبيعية الموسمية وتصنيف المواقع الساحلية بدقة تفوق الاعتماد المنفرد على القياسات الكيميائية للمياه والرواسب، مما يؤكد أهمية إدراج المؤشرات البيوكيميائية في خطط الإدارة البيئية وحماية السواحل المتوسطة.

الكلمات المفتاحية: بلح البحر المتوسطي (*Mytilus galloprovincialis*)، العناصر الثقيلة، الإجهاد التأكسدي، مضادات الأكسدة، بيروكسدة الدهون، دليل الاستجابة الحيوية المتكامل (IBR).

Abstract: Environmental monitoring of Mediterranean coastal ecosystems is essential for assessing marine ecosystem health under intensifying anthropogenic, industrial, and urban pressures. This paper presents an integrated, critical, and systematic assessment of heavy metal accumulation (Cd, Pb, Cu, Zn, and Hg) in the tissues of the Mediterranean mussel (*Mytilus galloprovincialis*), coupling these concentrations with biochemical responses of the oxidative stress machinery. Utilizing an integrative ecotoxicological review framework across Mediterranean monitoring programs (such as MED POL and MYTILOS/MYTIOR) and peer-reviewed field investigations, the study highlights pronounced tissue-specific bioaccumulation, with the digestive gland exhibiting significantly higher metallic burdens and metabolic activity than gills. Metal-induced toxicity disrupts redox homeostasis through two distinct pathways: hydroxyl radical generation via Fenton and Haber-Weiss reactions (redox-active metals like Cu), and direct sulfhydryl-binding, glutathione depletion, and mitochondrial electron transport disruption (redox-inactive metals like Cd, Pb, and Hg). Antioxidant enzymes, specifically Catalase (CAT), Superoxide Dismutase (SOD), and Glutathione S-Transferase (GST), demonstrate a biphasic response characterized by compensatory induction under moderate exposure followed by enzymatic inhibition under chronic toxicity, accompanied by elevated lipid peroxidation (MDA levels). The application of the Integrated Biomarker Response (IBR) index effectively reconciles environmental confounders and provides a discriminative ecotoxicological classification of coastal health far superior to standalone chemical surveys.

Keywords: *Mytilus galloprovincialis*, Heavy metals, Oxidative stress, Antioxidant enzymes, Lipid peroxidation, Integrated Biomarker Response (IBR).

1. المقدمة

يعتبر حوض البحر الأبيض المتوسط نظام بيئي بحري شبه مغلق يتسم بتنوع بيولوجي استثنائي، إلا أنه يخضع في الوقت ذاته لضغوط بيئية وتنموية مكثفة ناجمة عن التوسع الحضري الساحلي، وتصريف النفايات الصناعية غير المعالجة، والأنشطة المينائية، والشحن البحري الكثيف (UNEP/MAP, 2006). ومن بين الملوثات الكيميائية الأكثر خطورة، تبرز العناصر الثقيلة (Heavy Metals)، مثل الكاديوم (Cd)، والرصاص (Pb)، والنحاس (Cu)، والزنك (Zn)، والزرنيق (Hg)، كمحدد رئيسي لتدهور جودة المياه والرواسب الساحلية، نظراً لثباتيتها العالية، وعدم قابليتها للتحلل الحيوي، وقدرتها الفائقة على التراكم داخل السلاسل الغذائية البحرية (Livingstone, 2001).

لقد أثبتت الدراسات البيئية لعقود متتالية أن قياس تراكيز العناصر الثقيلة في مياه البحر أو الرواسب السطحية وحدها يظل قاصراً عن تقديم صورة حقيقية وشاملة عن المخاطر البيئية، إذ تعتمد سمية المعادن على شكلها الكيميائي، وتوافرها الحيوي (Bioavailability)، وتفاعلها المباشر مع الخلايا الحية (Cajaraville et al., 2000). من هذا المنطلق، تبنت برامج الرصد الإقليمية والدولية، ولا سيما برنامج مراقبة التلوث في البحر المتوسط (MED POL) وبرنامج مراقبة بلح البحر (Mussel Watch)، استراتيجية استخدام الكائنات الحية الكاشفة (Sentinel Bioindicators) لتقييم التلوث البيئي (Andral et al., 2004; Viarengo et al., 2007).

يحتل بلح البحر المتوسطي (*Mytilus galloprovincialis*) مكانة طليعية بوصفه النموذج البيولوجي الأكثر انتشاراً وموثوقية في تقييم جودة المياه الساحلية، وذلك بفضل طبيعته المعيشية المستقرة والتصاقه بالركائز الصلبة، وقدرته العالية على ترشيح

كميات هائلة من مياه البحر، ومقاومته النسبية للتراكم المعدني دون حدوث وفيات فورية، وضعف قدرته على استقلاب العناصر الثقيلة والتخلص السريع منها (Banni et al., 2005; Benedetti et al., 2015).

على المستوى البيوكيميائي، يعد تحفيز الإجهاد التأكسدي (Oxidative Stress) أحد أهم المسارات الرئيسية للسمية الخلوية الناجمة عن التعرض للعناصر الثقيلة في الرخويات البحرية (Regoli & Giuliani, 2014). ويُعرّف الإجهاد التأكسدي بأنه: "اختلال التوازن الفسيولوجي الدقيق بين معدل توليد أنواع الأكسجين التفاعلية (Reactive Oxygen Species – ROS) وقدرة الآليات الخلوية المضادة للأكسدة على إزالتها أو تحييد خطرها، مما يقود إلى تلف الجزيئات الحيوية الكبرى" (Livingstone, 2001, p. 657). تتضمن العناصر الثقيلة فئتين متباينتين في آلية إحداث الإجهاد التأكسدي: فئة العناصر النشطة في تفاعلات الأكسدة والاختزال (Redox-active metals)، مثل النحاس والحديد، والتي تُحفز مباشرة تفاعلات فنتون (Fenton) وهابر-فايس (Haber-Weiss) لتوليد جذر الهيدروكسيل الفائق النشط والسمية؛ وفئة العناصر غير النشطة اختزالياً (Redox-inactive metals)، مثل الكاديوم والرصاص والزنك، والتي ترتبط بشراة بمجموعات السلفهيدريل (SH-) للبروتينات وتستنزف مخزون الجلوتاثيون المختزل (GSH)، مما يعطل السلسلة التنفسية الميتوكوندرية ويُحفز التوليد غير المباشر للأنواع التفاعلية (Viarengo et al., 1990; Benedetti et al., 2015).

لمواجهة هذا الضغط التأكسدي، يمتلك بلح البحر شبكة دفاع متكاملة تتضمن إنزيمات مضادة للأكسدة كالسوبر أكسيد ديسميوتاز (Superoxide Dismutase – SOD)، والكاتاليز (Catalase – CAT)، والجلوتاثيون بيروكسيداز (Glutathione Peroxidase – GPx)، والجلوتاثيون إس-ترانسفيراز (Glutathione S-Transferase – GST)، بالإضافة إلى مضادات الأكسدة غير الإنزيمية وبروتينات الميتالوثيونين (Regoli & Principato, 1995; Bebianno & Serafim, 1998). وعندما تتجاوز شدة الإجهاد القدرة التعويضية لهذه المنظومة، يحدث التلف الخلوي الذي يتجلى بصورة واضحة في بيروكسدة الدهون الغشائية (Lipid Peroxidation) وتراكم مركب المالوندايالدهيد (Malondialdehyde – MDA)، وفقدان استقرار الغشاء الليوزومي (Bocchetti & Regoli, 2006).

بالرغم من إجراء دراسات ميدانية متفرقة على امتداد السواحل المتوسطية، إلا أن الحاجة تظل ماسة إلى إجراء تقييم تكاملي يربط مستويات التراكم الحيوي للعناصر الثقيلة بالاستجابات البيوكيميائية للإجهاد التأكسدي عبر أحواض البحر المتوسط، ومقارنة أنماط التلوث في سواحل شمال أفريقيا (تونس، الجزائر، خط الأساس للسواحل الليبية، ومصر) مع السواحل الشمالية والغربية الأوروبية. يهدف هذا البحث إلى تقديم مراجعة تحليلية شاملة لتوضيح مسارات السمية الخلوية، وتقييم حساسية المؤشرات البيوكيميائية وديناميكياتها ثنائية الطور، وتطبيق دليل الاستجابة الحيوية المتكامل (Integrated Biomarker Response – IBR) كأداة موحدة لتصنيف مستويات الإجهاد البيئي الساحلي.

2. منهجية البحث

استندت هذه الدراسة إلى منهجية التقييم الإيكوتوكسيكولوجي التكاملي والمراجعة المنهجية (Integrative Ecotoxicological Review & Assessment Framework) وفقاً لبروتوكولات التقييم البيئي المعتمدة ومعايير PRISMA، وهي منهجية تحليلية تجميعية غير معملية تعتمد على استخلاص وتوحيد وتحليل البيانات المنشورة في الأدبيات العلمية المحكمة وبرامج الرصد الإقليمية لحوض البحر الأبيض المتوسط.

2.1 مصادر البيانات واستراتيجية الاسترجاع البليوغرافي

شملت عملية البحث البليوغرافي قواعد البيانات الأكاديمية الدولية المفتوحة، ومن أبرزها: Google Scholar, PubMed, ScienceDirect (Open Access), SpringerOpen, Web of Science الهيئة العامة لمصايد أسماك البحر الأبيض المتوسط (GFCM)، ومفوضية العلوم البحرية للبحر الأبيض المتوسط (CIESM)، وبرنامج الأمم المتحدة للبيئة / خطة عمل البحر المتوسط (UNEP/MAP – MED POL). تم حصر استراتيجية البحث في الكلمات المفتاحية المركبة: (“Mytilus galloprovincialis” AND “heavy metals” AND “oxidative stress” AND (“biomarkers” OR “catalase” OR “SOD” OR “lipid peroxidation” OR “IBR”) AND “Mediterranean”)، مع التركيز على الدراسات الميدانية وتجارب النقل في أقفاص (Caging/Transplantation) المنشورة خلال الفترة الممتدة بين عامي 1995 و2024.

2.2 معايير الاشتمال والاستبعاد (Inclusion and Exclusion Criteria)

تم تحديد معايير صارمة لقبول الدراسات ضمن التحليل التكاملي لضمان تجانس البيانات ودقتها:

1. أن تكون الأنواع المدروسة هي حصراً بلح البحر المتوسطي (*Mytilus galloprovincialis*).
2. أن تُجرى الدراسة في البيئة البحرية الساحلية أو المصبية لحوض البحر المتوسط.
3. أن تتضمن قياساً متزامناً لتركيزات العناصر الثقيلة (واحد أو أكثر من: Cd, Pb, Cu, Zn, Hg) إلى جانب المؤشرات البيوكيميائية للإجهاد التأكسدي.
4. توفر تفاصيل واضحة عن الأنسجة المفحوصة (الغدة الهضمية Digestive Gland أو الخياشيم Gills).
5. وضوح المنهجية التحليلية المعيارية للقياسات البيوكيميائية والكيميائية. تم استبعاد الدراسات المعملية قصيرة الأجل غير الواقعية بيئياً (تراكيز حادة غير طبيعية تتجاوز الحدود البيئية)، والدراسات التي تقتصر على التوثيق الإحصائي أو ضبط الجودة المعملية.

2.3 استخلاص البيانات وتوحيد وحدات القياس (Data Harmonization)

تم استخلاص البيانات وتوحيدها عبر مصفوفة موحدة شملت: الموقع الجغرافي ونوع المحطة (مرجعية، حضرية، صناعية، مينائية)، نوع العينة (أفراد طبيعية أصلية Native أو منقولة في أقفاص Caged)، تراكيز العناصر الثقيلة مقاسة بوحدة المليغرام لكل كيلوغرام من الوزن الجاف ($\text{mg/kg dry weight} - \text{d.w.}$)، وأنشطة الإنزيمات المضادة للأكسدة (SOD و CAT بوحدة U/mg protein أو $\text{nmol/min/mg protein}$ ، و GST بوحدة $\text{nmol/min/mg protein}$)، ومستويات بيروكسدة الدهون (MDA بوحدة nmol/g wet weight أو nmol/mg protein)، بالإضافة إلى تراكيز الميتالوثيونينات (MT بوحدة $\mu\text{g/g wet weight}$). تم تطبيق معاملات التحويل القياسية عند الضرورة لتحقيق التجانس بين الدراسات وفق توصيات بروتوكولات UNEP/MAP (2006).

2.4 إطار حساب دليل الاستجابة الحيوية المتكامل (IBR Index)

لحساب دليل الاستجابة الحيوية المتكامل (Integrated Biomarker Response - IBR)، تم الاعتماد على الخوارزمية الرياضية المطورة بواسطة Beliaeff & Burgeot (2002) والمعدلة بواسطة Sanchez et al (2013).

تتضمن العملية:

1. معايرة البيانات بحساب المتوسط العام والانحراف المعياري لكل مؤشر .
2. توحيد المتغيرات (Z-score normalization).
3. حساب قيمة الدرجة المعيارية (S) مع مراعاة اتجاه الاستجابة (تحفيز أو تثبيط).
4. تمثيل الدرجات على مخطط بياني قطبي وحساب المساحة المتعددة الأضلاع لتوليد قيمة IBR الكلية لكل موقع، مما يمنح تقييماً رقمياً يتيح المقارنة المكانية الموضوعية لمستوى التدهور البيئي.

3. النتائج والمناقشة

3.1 تباين التراكم الحيوي للعناصر الثقيلة في أنسجة بلح البحر عبر أحواض البحر المتوسط

أظهر التحليل المقارن للبيانات الميدانية تفاوتاً شاسعاً في مستويات التراكم الحيوي للعناصر الثقيلة في أنسجة بلح البحر عبر مختلف مناطق البحر الأبيض المتوسط، تبعاً لطبيعة المصادر التلوثية المجاورة ونوعية الأنشطة الصناعية والحضرية. يوضح الجدول رقم (1) تراكيز العناصر الثقيلة الرئيسية (الكاديوم، الرصاص، النحاس، الزنك) في أنسجة بلح البحر بمناطق ساحلية مختارة تمثل أحواض البحر المتوسط المختلفة.

الدولة / الحوض	Cd (mg/kg d.w.)	Pb (mg/kg d.w.)	Cu (mg/kg d.w.)	Zn (mg/kg d.w.)	المنطقة / الموقع الساحلي
ليبيا (الحوض الأوسط)	1.21 – 2.41	0.44 – 0.71	4.20 – 7.15	92.4 – 135.0	السواحل المفتوح (مشروع MYTIOR خط الأساس)
تونس (الحوض الغربي)	0.85 – 1.95	4.12 – 12.80	6.40 – 18.50	145.0 – 312.0	بحيرة بنزرت (Bizerte Lagoon – مناطق صناعية)
الجزائر (الحوض الغربي)	1.10 – 2.85	5.40 – 16.70	7.80 – 22.40	160.0 – 380.0	خليج أرزيو ووهران (مناطق بتروكيميائية ومينائية)
فرنسا (شمال غرب المتوسط)	0.70 – 1.60	2.10 – 8.90	5.10 – 14.20	110.0 – 240.0	خليج مرسيليا وسواحل ليون (RINBIO / شبكة الرصد)
إسبانيا (شمال غرب المتوسط)	0.65 – 1.80	3.20 – 11.50	6.10 – 19.80	125.0 – 295.0	السواحل الإسبانية الشرقية (مناطق صناعية وموانئ)

الجدول رقم (1): تراكيز العناصر الثقيلة (mg/kg بالوزن الجاف) في أنسجة بلح البحر المتوسطي بمواقع ساحلية متباينة، مستخلصة من بيانات برامج MYTIOR (Andral et al., 2011)، والبحيرات التونسية (Dellali et al., 2001; Banni et al., 2007)، والسواحل الجزائرية (Rouane-Hacene et al., 2015; Benali et al., 2017)، وشبكة الرصد الفرنسية والإسبانية (Andral et al., 2004; Cajaraville et al., 2000).

يُظهر التحليل المقارن في الجدول (1) نتائج ذات دلالة إيكوتوكسكولوجية بالغة؛ فبالنسبة للسواحل الليبية، سجّلت دراسات مشروع MYTIOR (Andral et al., 2011) التي اعتمدت نقل بلح البحر في أقفاص قبالة 16 محطة بحرية مفتوحة مستويات منخفضة للغاية من الرصاص ($0.44 - 0.71 \text{ mg/kg d.w.}$)، وهي تقع ضمن حدود الخلفية البيئية النقية أو

دونها، مما يعكس غياب الضغوط الحضرية المباشرة في المياه العميقة المفتوحة. ومع ذلك، رُصدت تركيزات مرتفعة نسبياً من الكاديوم (تراوحت بين 1.21 و 2.41 mg/kg d.w) في كافة المحطات الليبية المفتوحة، وهي ظاهرة عزّاه الباحثون إلى العمليات الهيدروغرافية وظواهر التيارات الصاعدة (Upwelling) الطبيعية الغنية بالفوسفات والمغذيات المعدنية في الحوض الأوسط والشرقي، وليس إلى مصادر تلوث صناعي موضعي (Andral et al., 2011).

في المقابل، كشفت المواقع الساحلية شبه المغلقة مثل بحيرة بنزرت التونسية (Dellali et al., 2001; Banni et al., 2007) وخليج أرزيو بالجزائر (Benali et al., 2017) عن تراكيز حادة من الرصاص والزنك، تجاوزت الحدود المسموح بها للاستهلاك البشري وسلامة البيئة البحرية المقررة من الاتحاد الأوروبي ومنظمة الأغذية والزراعة (FAO). ويعزى هذا الارتفاع الحاد إلى المصبات الصناعية المباشرة، ومصافي النفط، وحركة الموانئ التجارية وتآكل الطلاءات المانعة للحشوف المحتوية على النحاس (Antifouling paints).

على الصعيد النسيجي، تؤكد المعطيات التراكمية وجود تباين جوهري بين أنسجة بلح البحر؛ إذ تُسجّل الغدة الهضمية (Digestive Gland) أعلى تركيزات التراكم للكاديوم والزنك والرصاص، بنسب تفوق تراكيز الخياشيم (Gills) بمقدار يتراوح بين مرتين إلى خمس مرات (Cravo et al., 2004; Rouane-Hacene et al., 2015). يرجع ذلك إلى الدور المركزي للغدة الهضمية كمستودع رئيسي للتمثيل الغذائي، واحتوائها على كثافة مرتفعة من بروتينات الميتالوثيونين والحببيات الفوسفاتية الكلسية المسؤولة عن حبس المعادن وتخزينها خلوياً، في حين تُمثل الخياشيم العضو الأساسي للتبادل والترشيح والتلامس الأولي المباشر مع الذوائب المعدنية في العمود المائي.

3.2 الآليات الخلوية والبيوكيميائية للإجهاد التأكسدي المستحث بالعناصر الثقيلة

يُحدث تراكم العناصر الثقيلة اضطراباً عميقاً في التوازن الأكسدي (Redox Homeostasis) لخلايا بلح البحر عبر مسارين جزيئيين:

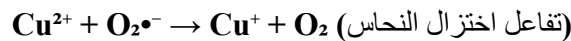
1. مسار العناصر النشطة اختزالياً (Redox-active pathway): يُمثل النحاس (Cu) والحديد (Fe) النموذج الأبرز

لهذه المجموعة. يخضع أيون النحاس لتفاعلات أكسدة واختزال متعاقبة ($\text{Cu}^+ / \text{Cu}^{2+}$) داخل الخلية، حيث يتفاعل

Cu^+ مع بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2) عبر تفاعل فنتون (Fenton reaction):



كما يُعاد اختزال Cu^{2+} بواسطة أنيون السوبر أكسيد عبر تفاعل هابر-فايس (Haber-Weiss reaction):



يقود هذا المسار إلى التوليد المستمر لجذر الهيدروكسيل الحر (OH•)، وهو الجزيء الأكثر فتكاً بالجدار الخلوي والحمض النووي والبروتينات لعدم وجود إنزيم متخصص في التخلص المباشر منه داخل الخلية (Livingstone, 2001; Regoli & Giuliani, 2014).

2. مسار العناصر غير النشطة اختزالياً (Redox-inactive pathway): يضم الكاديوم (Cd) والرصاص (Pb) والزنك (Zn). لا تشارك هذه المعادن في تفاعلات فتون بشكل مباشر، بل ترتبط بشراة كيميائية فائقة بمجموعات السلفهيدريل (SH-) الحرة في الببتيدات والبروتينات، وخاصة الجلوتاثيون المختزل (GSH) وإنزيمات السلسلة التنفسية (Viarengo et al., 1990). يؤدي استنزاف الجلوتاثيون المختزل إلى تقويض الجهد الاختزالي للخلية، مما يتركها عاجزة عن مقاومة المؤكسدات الداخلية. علاوة على ذلك، يُثبط الكاديوم المركبات البروتينية في الغشاء الداخلي للميتوكوندريا (المعقدين I وIII)، مما يتسبب في تسرب الإلكترونات وتفاعلها المباشر مع الأكسجين الجزيئي، مؤدياً إلى إنتاج فائض من أنيون السوبر أوكسيد ($O_2^{\bullet-}$) وحدوث تلف ميتوكوندري مستحث بالمعادن (Benedetti et al., 2015).

3.3 استجابة الإنزيمات المضادة للأكسدة: ديناميكية التحفيز والتثبيط والتباين الموسمي

تُظهر مراجعة البيانات الحركية للإنزيمات المضادة للأكسدة في بلح البحر المتوسطي أن استجابتها لملوثات العناصر الثقيلة تتبع نمطاً بيوكيميائياً ثنائي الطور (Biphasic / Hormetic response)، يتوقف على درجة التلوث ومدى استمراريته:

- إنزيم سوبر أوكسيد ديسميوتاز (SOD): يُشكل خط الدفاع الأنزيمي الأول من خلال تسريع تفكيك أنيون السوبر أوكسيد إلى بيروكسيد الهيدروجين ($O_2^{\bullet-} + 2H^+ \rightarrow H_2O_2 + O_2$). في المحطات ذات التلوث المعدني المعتدل، يُسجل نشاط SOD ارتفاعاً ملحوظاً كآلية تعويضية لحماية الخلايا (Regoli & Principato, 1995). غير أن التعرض المزمن للرصاص أو الكاديوم عند مستويات حادة يُفضي إلى انخفاض نشاط الإنزيم نتيجة الإزاحة التنافسية للأيونات المعدنية الأساسية (الزنك والنحاس والمنغنيز) في المركز النشط للإنزيم وتخريب بنيته الفراغية.
- إنزيم الكاتاليز (CAT): يتواجد بشكل أساسي داخل البيروكسيسومات ويتولى تفكيك بيروكسيد الهيدروجين إلى ماء وأكسجين. يُعدّ الكاتاليز أكثر المؤشرات الحيوية حساسية لتلوث البيئات الساحلية المتوسطة بالمعادن (Dellali et al., 2001; Banni et al., 2005). بيّنت الدراسات الميدانية في بحيرة بنزرت وخليج قابس وسواحل الجزائر أن نشاط CAT يتضاعف بنسبة تصل إلى 180-250% مقارنة بالمواقع المرجعية خلال المراحل الأولى للتعرض، إلا أنه يتعرض لتثبيط دراماتيكي في البؤر الساخنة الملوثة بشدة بفعل التراكم الزائد لجذور الهيدروكسيل التي تُعطّل مجموعة الهيم (Heme group) الوظيفية في الإنزيم.
- إنزيم جلوتاثيون إس-ترانسفيراز (GST): يُمثل حلقة الوصل الحيوية بين مسار إزالة السمية (Phase II biotransformation) ومقاومة الإجهاد التأكسدي، حيث يُحفز ارتباط الجلوتاثيون بنواتج أكسدة الدهون

والمركبات المحبة للإلكترونات لتسهيل إفرازها الخلوي. يُظهر GST استجابة تحفيزية مستقرة نسبياً في الغدة الهضمية لبلح البحر المعرض للنحاس والكاديوم، مما يجعله مؤشراً عالي الاعتمادية في منظومة الرصد التكاملية (Banni et al., 2007; Benali et al., 2017).

- التداخلات البيئية والموسمية: يجب التأكيد على أن أنشطة هذه الإنزيمات تتأثر بعوامل بيئية طبيعية تشمل التغيرات الموسمية في درجات حرارة المياه، والملوحة، والدورة التناسلية لبلح البحر (Gametogenesis) (Bocchetti & Regoli, 2006). ترتفع الأنشطة الإنزيمية الأساسية صيفاً تزامناً مع زيادة معدل الأيض وارتفاع حرارة المياه، وتتناقص شتاءً، مما يفرض ضرورة توحيد فترات أخذ العينات ومقارنة المواقع الملوثة بمواقع مرجعية ذات خصائص هيدروغرافية مماثلة.

3.4 مؤشرات الضرر التأكسدي والتدهور الغشائي وتكامل دفاع الميتالوثيونين

عندما تعجز منظومة مضادات الأكسدة عن استيعاب التدفق المتسارع للجذور الحرة، تبدأ تفاعلات بيروكسدة الدهون (Lipid Peroxidation) في مهاجمة الأحماض الدهنية المتعددة غير المشبعة المكونة للأغشية الخلوية للرخويات (خاصة الفوسفوليبيدات). يُعدّ قياس مركب المالوندايالدهيد (MDA)، الناتج النهائي لتحلل بيروكسيدات الأحماض الدهنية، المؤشر الحاسم لوقوع الضرر الخلوي الفعلي (Viarengo et al., 1990; Regoli & Giuliani, 2014).

كشفت الدراسات التكاملية أن مستويات MDA في الغدة الهضمية لبلح البحر في المواقع الملوثة تسجل زيادات تتراوح بين ضعفين إلى أربعة أضعاف مقارنة بالمواقع النقية، مترافقة مع انهيار استقرار الغشاء الليزوزومي (Lysosomal Membrane Stability - LMS) المقاس بزمن احتباس الصبغة الحمراء المحايدة (Neutral Red Retention Time - NRRT) (Viarengo et al., 2007; Marigómez et al., 2013). يُعدّ تمزق الأغشية الليزوزومية نتيجة أكسدة دهونها وتفرغ الإنزيمات المحللة في السيتوبلازم المؤشر النسيجي المباشر لمتلازمة الإجهاد البيئي الناجم عن الملوثات.

في السياق ذاته، تلعب بروتينات الميتالوثيونين (Metallothioneins - MTs) دوراً مزدوجاً فائق الأهمية؛ فهي بروتينات سيتوبلازمية منخفضة الوزن الجزيئي وغنية بحمض السيستين (حوالي 30% من تركيبها الأميني)، تُحفز خصيصاً بالتعرض لأيونات الكاديوم والنحاس والزنك (Viarengo et al., 1999; Bebianno & Serafim, 1998). فإلى جانب وظيفتها في عزل وتثبيت المعادن الثمينة والسامة، تعمل الميتالوثيونينات ككاسح غير إنزيمي استثنائي لجذور الهيدروكسيل الحرة بفضل وفرة روابط الثيول، مما يجعل تكامل الاستجابة بين MTs وبيروكسدة الدهون دليلاً على نجاح أو فشل التكيف البيوكيميائي للكائن الحي.

3.5 التقييم البيئي المتكامل باستخدام دليل الاستجابة الحيوية (IBR Index)

نظراً لتعقيد الاستجابات البيوكيميائية وتأثر المؤشرات الفردية بالعديد من المتغيرات المتشابكة، يُوفر تطبيق دليل الاستجابة الحيوية المتكامل (Integrated Biomarker Response – IBR) أداة تركيبية قوية تدمج استجابات مصفوفة المؤشرات (CAT, SOD, GST, MDA, MT) في مؤشر كمي موحد (Beliaeff & Burgeot, 2002; Sanchez et al., 2013). يُلخص الجدول رقم (2) تصنيف جودة البيئة الساحلية وقيم مؤشر IBR المستخلصة عبر تدرج بيئي نموذجي لمواقع البحر المتوسط.

المواقع النموذجية الممثلة	الضرر الخلوي (MDA / LMS)	الاستجابة الإنزيمية (CAT / SOD / GST)	مدى قيمة IBR	تصنيف الإجهاد البيئي
السواحل الليبية المفتوحة (MYTIOR)، المحميات البحرية	مستويات MDA دنيا؛ استقرار غشائي كامل (LMS > 90 دقيقة)	مستويات قاعدية طبيعية دون تحفيز ملحوظ	< 2.5	إجهاد منخفض جداً / مرجعي (Reference / Unpolluted)
السواحل الحضرية المفتوحة، مناطق الصيد المعتدلة	ارتفاع طفيف في MDA؛ انخفاض معتدل في LMS (50-70 دقيقة)	تحفيز تعويضي معتدل لإنزيمات CAT و SOD و GST	2.5 – 6.0	إجهاد معتدل (Moderate Stress)
سواحل خليج وهران وأرزو، سواحل خليج قابس	تضاعف مستويات MDA؛ تدهور ملحوظ في الأغشية الليزوزومية	تحفيز أقصى لـ CAT يليه تثبيط جزئي؛ ارتفاع ملحوظ في GST	6.1 – 12.0	إجهاد حاد / تلوث مرتفع (High Contamination)
الموانئ الصناعية المغلقة، مصبات الصرف الكيميائي المباشر	ارتفاع قياسي في MDA؛ انهيار كامل لاستقرار الأغشية (> 20 دقيقة)	تثبيط شامل لأغلب الإنزيمات بفعل التسمم المعدني الحاد	> 12.0	إجهاد حرج / بؤر ساخنة (Extreme / Hotspot)

الجدول رقم (2): تصنيف مستويات التدهور البيئي الساحلي بناءً على دليل الاستجابة الحيوية المتكامل (IBR) ومصفوفة المؤشرات البيوكيميائية في بلح البحر المتوسطي، استناداً إلى نماذج Sanchez et al. (2013) و Banni et al. (2007) و Marigómez et al. (2013).

يُظهر التحليل التجميعي في الجدول (2) بوضوح القوة التمييزية لدليل IBR؛ فبينما قد تسجل التحاليل الكيميائية للمياه تركيزات متباينة أو متذبذبة مؤقتاً بسبب التيارات البحرية وعوامل التخفيف الهيدرولوجي، يعكس مؤشر IBR الأثر الفسيولوجي التراكمي المدمج للملوثات في أنسجة بلح البحر. يُمكن هذا النهج من الفصل بوضوح بين البيئات ذات الإجهاد المنخفض (مثل محطات خط الأساس للمياه الليبية المفتوحة) والبؤر الساخنة التلويثية المزمنة، مما يؤكد جدواه الفائقة كأداة تشخيصية وتنظيمية لبرامج الإدارة المتكاملة للمناطق الساحلية (ICZM).

4. الاستنتاجات

خلص هذا التقييم المتكامل إلى مجموعة من النتائج الإيكوتوكسيكولوجية والبيوكيميائية:

1. يُعدّ بلح البحر المتوسطي (*Mytilus galloprovincialis*) كائن حيوي استثنائي للرصد البيئي الساحلي، حيث تتميز أنسجته وظيفياً؛ إذ تُمثل الغدة الهضمية مركز التراكم الحيوي الأقصى والتمثيل الأيضي للمعادن الثقيلة غير النشطة اختزالياً، في حين تُمثل الخياشيم مؤشراً سريعاً للتعرض للذوائب المعدنية في العمود المائي.
2. تتفاوت آليات السمية التأكسدية للمعادن؛ فبينما يُحفز النحاس التوليد المباشر لجذور الهيدروكسيل الفائقة النشاط عبر تفاعلات فنتون وهابر-فايس، يحدث الكاديوم والرصاص والزنك إجهاداً تأكسدياً غير مباشر من خلال الارتباط بمجموعات الثيول واستنزاف الجلوتاثيون المختزل وتثبيط مجمعات الميتوكوندريا التنفسية.
3. تتبع الإنزيمات المضادة للأكسدة (SOD, CAT, GST) استجابة ثنائية الطور (Biphasic)، تتميز بتحفيز نشاطها عند التراكيز المعتدلة كآلية دفاعية، يليها انهيار وتثبيط إنزيمي حاد في الدور الملوثة بشدة، مترافقاً مع تفاقم بيروكسدة الدهون (ارتفاع تراكيز MDA) وتصدع استقرار الأغشية الليوزومية.
4. أثبتت بروتينات الميتالوثيونين (MTs) دورها المزدوج كآلية احتجاز كيميائي للمعادن وكاسح غير إنزيمي فعال للجذور الحرة، مما يجعل تكاملها مع مؤشرات الضرر الغشائي معياراً موثقاً لتقييم كفاءة التكيف الخلوي.
5. يُشكل دليل الاستجابة الحيوية المتكامل (IBR) أداة حاسمة لتجاوز التباينات الفردية والموسمية، حيث أتاح تصنيف السواحل المتوسطية إلى مستويات تدهور موضوعية تفوق بدقتها نتائج القياسات الكيميائية المنفردة للمياه والرواسب.

5. التوصيات

استناداً إلى معطيات البحث وخلصاته، يُوصي الباحث بما يلي:

- دمج مصفوفة المؤشرات الحيوية متعددة المستويات (CAT, SOD, GST, MDA, MT, LMS) رسمياً ضمن شبكات الرصد البيئي الساحلي الوطنية والإقليمية لبرنامج MED POL، وعدم الاكتفاء بالتحاليل الكيميائية التقليدية.
- التوسع في تطبيق تقنية نقل بلح البحر في أقفاص معيارية على طول السواحل الجنوبية للبحر المتوسط (وخاصة السواحل الليبية)، للتغلب على ندرة المجموعات الطبيعية ومراقبة المناطق المحيطة بالمنشآت النفطية والموانئ ومحطات التحلية.
- توحيد بروتوكولات جمع العينات الحيوية في فترات الاستقرار الفسيولوجي (تجنب فترات ذروة التكاثر والتغيرات الحرارية القصوى)، مع اعتماد محطات مرجعية بيئية نظيفة للمقارنة المستمرة.
- سن لوائح وتشريعات بحرية ملزمة تحدد سقفًا مقبولة للإجهاد البيولوجي (Ecological Thresholds) استناداً إلى قيم مؤشر IBR، بما يدعم اتخاذ قرارات حاسمة للحد من المصبات الصناعية غير المعالجة.

6. قائمة المراجع

- Andral, B., Galgani, F., Tomasino, C., Bouchoucha, M., Blaha, K., Castelle, S., ... & Boissery, P. (2011). Chemical contamination baseline in the Western basin of the Mediterranean Sea based on transplanted mussels. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 61(2), 261–271.
- Andral, B., Stanisiere, J. Y., Sauzade, D., Damier, E., Thebault, H., Galgani, F., & Boissery, P. (2004). Monitoring chemical contamination levels in the Mediterranean based on the use of mussel caging. *Marine Pollution Bulletin*, 49(9-10), 704–712.
- Banni, M., Dondero, F., Jebali, J., Guerbej, H., Boussetta, H., & Viarengo, A. (2007). Assessment of heavy metal contamination using *Mytilus galloprovincialis* in Sousse coast (Tunisia): Evaluation of enzymatic and non-enzymatic biomarkers. *Chemosphere*, 68(4), 746–754.
- Banni, M., Jebali, J., Daubeze, M., Clerandau, C., Guerbej, H., Narbonne, J. F., & Boussetta, H. (2005). Monitoring pollution in Tunisian coast by use of a classification scale based on biochemical markers. *Biomarkers*, 10(6), 405–416.
- Bebianno, M. J., & Serafim, M. A. (1998). Comparison of metallothionein induction in response to cadmium in the gills of the bivalve molluscs *Mytilus galloprovincialis* and *Ruditapes decussatus*. *Science of the Total Environment*, 214(1-3), 123–131.
- Beliaeff, B., & Burgeot, T. (2002). Integrated biomarker response: A useful tool for ecological risk assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21(6), 1316–1322. <https://doi.org/10.1002/etc.5620210629>
- Benali, I., Boutiba, Z., Grandjean, D., de Alencastro, L. F., Rouane-Hacene, O., & Chèvre, N. (2017). Spatial distribution and biological effects of trace metals (Cu, Zn, Pb, Cd) and organic micropollutants in mussels *Mytilus galloprovincialis* along the Algerian west coast. *Marine Pollution Bulletin*, 115(1-2), 539–550.
- Benedetti, M., Gorbi, S., & Regoli, F. (2015). Oxidative stress and antioxidant defenses in Mediterranean marine organisms. *Aquatic Toxicology*, 169, 17–29.
- Bocchetti, R., & Regoli, F. (2006). Seasonal variability of oxidative biomarkers, lysosomal parameters and trace element levels in the mussel *Mytilus galloprovincialis* from the Adriatic Sea. *Chemosphere*, 65(5), 913–921.
- Cajaraville, M. P., Bebianno, M. J., Blasco, J., Porte, C., Sarasquete, C., & Viarengo, A. (2000). The use of biomarkers to assess the impact of pollution in coastal environments of the Iberian Peninsula: A practical approach. *Science of the Total Environment*, 247(2-3), 295–311.
- Cravo, A., Bebianno, M. J., & Foster, P. (2004). Partitioning of trace metals in *Mytilus galloprovincialis* from the south coast of Portugal. *Science of the Total Environment*, 318(1-3), 87–101.
- Dellali, M., Barelli, M. G., Romeo, M., & Aissa, P. (2001). The use of catalase activity as a biomarker of pollution in *Mytilus galloprovincialis*. *Oceanologica Acta*, 24, S29–S36.
- Livingstone, D. R. (2001). Contaminant-stimulated reactive oxygen species production and oxidative damage in aquatic organisms. *Marine Pollution Bulletin*, 42(8), 656–666.

- Marigómez, I., Zorita, I., Izagirre, U., Ortiz-Zarragoitia, M., Navarro, P., & Etxebarria, N. (2013). Combined use of native and caged mussels to assess environmental quality through integrative biomarker responses in the Bay of Biscay. *Marine Environmental Research*, 89, 28–38.
- Regoli, F. (2000). Total oxyradical scavenging capacity (TOSC) in studies of evaluating the toxicity of contaminants in aquatic organisms. *Marine Environmental Research*, 50(1-5), 351–355.
- Regoli, F., & Giuliani, M. E. (2014). Oxidative pathways of chemical toxicity and oxidative stress biomarkers in marine organisms. *Marine Environmental Research*, 93, 106–117.
- Regoli, F., & Principato, G. (1995). Glutathione, glutathione-dependent and antioxidant enzymes in mussel, *Mytilus galloprovincialis*, exposed to metals under field and laboratory conditions: Implications for the use as biomarkers. *Aquatic Toxicology*, 31(2), 143–164.
- Roméo, M., Hoarau, P., Garello, G., Gnassia-Barelli, M., & Girard, J. P. (2003). Mussel transplantation and biomarkers as useful tools for assessing water quality in the NW Mediterranean. *Environmental Pollution*, 122(3), 369–378.
- Rouane-Hacene, O., Boutiba, Z., Belhaouari, B., Guibbolini-Sabatier, M. E., Francour, P., & Risso-de Faverney, C. (2015). Seasonal assessment of biological indices, bioaccumulation and bioavailability of heavy metals in mussels *Mytilus galloprovincialis* from Algerian west coast, applied to environmental monitoring. *Oceanologia*, 57(4), 362–374.
- Sanchez, W., Burgeot, T., & Porcher, J. M. (2013). A novel “Integrated Biomarker Response” calculation based on reference deviation concept. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(5), 2721–2725.
- UNEP/MAP (2006). Sea Water Quality Criteria for the Mediterranean: MED POL Phase IV. United Nations Environment Programme, Mediterranean Action Plan, Athens.
- Viarengo, A., Burlando, B., Dondero, F., Marro, A., & Fabbri, R. (1999). Metallothionein as a tool in biomonitoring programmes. *Biomarkers*, 4(6), 455–466.
- Viarengo, A., Canesi, L., Pertica, M., Poli, G., Moore, M. N., & Orunesu, M. (1990). Heavy metal effects on lipid peroxidation in the tissues of *Mytilus galloprovincialis* Lam. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Comparative Pharmacology*, 97(1), 37–42.
- Viarengo, A., Lowe, D., Bolognesi, C., Fabbri, R., & Koehler, A. (2007). The use of biomarkers in biomonitoring: A 2-tier approach assessing the level of pollutant-induced stress syndrome in sentinel organisms. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 146(3), 281–300.
- Viarengo, A., Ponzano, E., Dondero, F., & Fabbri, R. (1997). A simple, spectrophotometric method for metallothionein evaluation in marine organisms: An application to Mediterranean mussels. *Marine Environmental Research*, 44(1), 69–84.