مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches
And Scientific Activities

ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

المخلفات الإلكترونية وتأثيرها على البيئة

"الواقع واستراتيجيات المواجهة"

خليفة الصادق شعبان

كليـــة التربيـــة.. جنـزور / جـامعة طـرابلـس، ليبيا

khalifashabaan7@gmail.com

ملخص الدراسة:

تناولت هذه الدراسة مشكلة "النفايات الإلكترونية وتأثيراتها البيئية واستراتيجيات إدارتها المستدامة" في ظل الطفرة الرقمية الهائلة والتسارع التكنولوجي غير المسبوق، وسياسات "التقادم المخطط له" التي تنتهجها الشركات المصنعة، مما أدى إلى تصاعد معدلات تدفق المخلفات الرقمية عالمياً ومحلياً بوتيرة قياسية تفوق النفايات البلدية التقليدية. يكمن الخطر الجوهري لهذه النفايات في تركيبتها المعقدة التي تجمع بين المواد البلاستيكية غير القابلة للتحلل والفلزات الثقيلة والمركبات العضوية السامة، هدفت الدراسة إلى تشخيص واقع التعامل مع هذه النفايات، ورصد تداعياتها البيئية والهيدرولوجية والصحية، واستشراف الحلول القانونية والتقنية لتحويل هذا التحدي البيئي إلى مورد تنموي واقتصادي ضمن إطار الاقتصاد الدائري. واعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي في ضوء ما أسفرت عنه الأدبيات النظرية والدراسات المرجعية السابقة، مع واقع إدارة النفايات في البيئات النامية والمتقدمة. وأظهرت النتائج خطورة ميكانيكية "التلوث المتقاطع(Cross-Contamination) "؛ حيث تنفلت أيونات الفلزات الثقيلة (مثل الرصاص، الزئبق، والكادميوم) بفعل تفاعلات الأكسدة وتغير الأس الهيدروجيني (pH) في المكبات العشوائية والمفتوحة، وترشح مع مياه الأمطار عبر طبقات الأرض لتستقر في خزانات المياه الجوفية والتربة الزراعية، وصولاً إلى الغلاف الجوي عبر انبعاثات الحرق العشوائي، مما يؤدي إلى ظاهرة التراكم الحيوي (Bioaccumulation) في السلسلة الغذائية ويهدد الصحة البشرية بشكل مباشر، كما كشفت النتائج عن فجوة تشريعية وحوكمة حادة، لا سيما في الدول النامية، تتسبب في استنزاف بيئي وهدر مالي ضخم نتيجة غياب البنية التحتية لتقنيات "التعدين الحضري (Urban Mining) "الكفيلة باسترداد الفلزات الثمينة (الفضة، والنحاس) والعناصر الأرضية

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches And Scientific Activities
ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

النادرة، وخلصت الدراسة إلى تقديم مجموعة من التوصيات الإجرائية، أبرزها تفعيل مبدأ "المسؤولية الممتدة للمنتج (EPR) "لالتزام الشركات بالدورة الحياتية لمنتجاتها، وإدماج القطاع غير الرسمي (جامعي النفايات) في منظومة رسمية آمنة، فضلاً عن تبني نموذج تقني متطور يعتمد على نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وتقنيات الاستشعار عن بُعد (RS) لإعادة نمذجة وتحديد المعايير المكانية للمكبات، وعزلها كيميائياً لحماية الأحواض المائية العذبة والنظم البيئية الحساسة.

الكلمات المفتاحية: النفايات الإلكترونية؛ التلوث المتقاطع؛ التعدين الحضري؛ المسؤولية الممتدة للمنتج(EPR) ؛ الاقتصاد الدائري.

Electronic waste and its impact on the environment: reality and strategies for addressing it

Abstract: This study addresses the problem of "e-waste, its environmental impacts, and sustainable management strategies" in light of the massive digital revolution, unprecedented technological acceleration, and the "planned obsolescence" policies adopted by manufacturers. This has led to a record-breaking surge in the flow of digital waste globally and locally, exceeding even traditional municipal waste. The fundamental danger of this waste lies in its complex composition, which combines non-biodegradable plastics, heavy metals, and toxic organic compounds. The study aimed to diagnose the current state of managing this waste, monitor its environmental, hydrological, and health repercussions, and explore legal and technical solutions to transform this environmental challenge into a developmental and economic resource within the framework of a circular economy. The study adopted a descriptive-analytical approach, drawing on theoretical literature and previous reference studies, along with the realities of waste management in developing and developed environments.

The results demonstrated the seriousness of the "cross-contamination" mechanism. Heavy metal ions (such as lead, mercury, and cadmium) are released through oxidation reactions and changes in pH in random and open dumps. They sleep with rainwater through the earth's layers to settle in groundwater reservoirs and agricultural soil, eventually reaching the atmosphere through emissions from uncontrolled burning. This leads to bioaccumulation in the food chain and directly threatens human health. The results also revealed a severe legislative and governance gap, particularly in developing countries, causing environmental depletion and huge financial losses due to the lack of infrastructure for "urban mining" technologies capable of recovering precious metals (silver and copper) and rare earth elements. The study concluded by presenting a set of procedural recommendations, most notably activating the principle of "extended producer responsibility" (EPR) to ensure companies' commitment to the life cycle of their products, integrating the informal sector (waste collectors) into a safe, formal system, and adopting

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches
And Scientific Activities

ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

an advanced technological model based on Geographic Information Systems (GIS). Remote sensing (RS) techniques are used to remodel and define the spatial parameters of landfills, and to chemically isolate them to protect freshwater basins and sensitive ecosystems.

Keywords: Electronic Waste (E-waste); Cross-Contamination; Urban Mining; Extended Producer Responsibility (EPR); Circular Economy.

المقدمة:

يشهد العالم المعاصر ثورة تكنولوجية ومعرفية فائقة السرعة، أعادت تشكيل ملامح الحياة اليومية والأنشطة الاقتصادية والتعليمية بشكل جذري. ومع هذا التحول الرقمي المتسارع برزت إلى السطح معضلة بيئية وجغرافية بالغة التعقيد، تتمثل في تدفقات "النفايات الإلكترونية (E-waste)." ولم تعد هذه المخلفات مجرد نفايات صلبة بلدية عادية، بل أصبحت التدفق الأسرع نمواً في العالم بين فئات النفايات الصلبة، مدفوعةً بقصر الدورات الحياتية للأجهزة الذكية وسياسات "التقادم التقني المخطط له التي تتبعها الشركات المصنعة عالمياً مما أدى إلى تراكم كميات هائلة من الأجهزة التالفة والمتقادمة التي تتجاوز القدرة الاستيعابية للنظم البيئية الطبيعية على التفكيك الذاتي وتكمن الخطورة لهذه الظاهرة في طبيعة الخصائص الفيز وكيميائية للمكونات الداخلة في صناعة الإلكترونيات إذ تحتوي هذه الأجهزة على توليفة معقدة من الفلزات الثقيلة شديدة السمية (كالرصاص، والزئبق، والكادميوم) غير القابلة للتحلل الحيوي. ويؤدي التخلص العشوائي من هذه الأجهزة في المكبات المفتوحة وطمرها بطرق بدائية خاصة في الدول النامية إلى حدوث ما يُعرف بالتلوث المتقاطع"؛ حيث تنفلت هذه الأيونات السامة بفعل العوامل المناخية وتغير الأس الهيدروجيني للتربة، لترشح هيدرولوجياً مع مياه الأمطار وتستقر في طبقات المياه الجوفية والسطحية، فضلاً عن تصاعد الانبعاثات الغازية السامة والغبار المعدني عند حرقها مكشوفاً، مما يهدد بظاهرة التراكم الحيوي (Bioaccumulation) داخل السلسلة الغذائية وصولاً إلى جسد الإنسان وصحته وإلى جانب الأبعاد البيئية والصحية الحادة، تفرض النفايات الإلكترونية تحديات تشريعية واقتصادية استراتيجية؛ إذ تبين وجود فجوة حادة بين ديناميكية التطور التقني والرقابة القانونية المنظمة لإدارة هذه المخلفات. وفي الوقت الذي يمثل فيه التخلص العشوائي هدراً مالياً لفلزات ثمينة ونادرة يمكن استردادها عبر تقنيات التعدين الحضري (Urban

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches
And Scientific Activities

ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

(Miningالمستدام لتوفير الطاقة وحماية المناخ، لا يزال واقع الإدارة البيئية في دول عدة يعاني من قصور الوعي المجتمعي وغياب الأطر القانونية الملزمة، مثل مبدأ "المسؤولية الممتدة للمنتج.(EPR) تأتي هذه الدراسة التحليلية لتسليط الضوء على هذا الواقع البيئي الحرج مستهدفةً تفكيك ميكانيكيات التلوث المتقاطع، ومقارنة الاستنتاجات بالأدبيات والدراسات السابقة العربية والأجنبية، صياغةً لرؤية شاملة تسهم في سد الفجوة المعرفية والتشريعية، وتدعم بناء استراتيجيات حكومة بيئية تشاركية ومستدامة تضمن حماية النظم الحيوية والأحواض المائية من التدهور الحاد.

مشكلة الدراسة:

تكمن مشكلة الدراسة في التزايد المتسارع لحجم المخلفات الإلكترونية عالمياً ومحلياً، كناتج حتمي للثورة الرقمية وسياسات "التقادم التقني المخطط له التي تتبعها الشركات المصنعة، مما جعل هذا النوع من النفايات الأسرع نمواً بين المخلفات الصلبة كافة. ورغم التصنيف العلمي والقانوني الصارم لهذه الأجهزة التالفة بأنها نفايات خطرة نتيجة احتوائها على فلزات ثقيلة ومركبات سامة لا تتحلل حيوياً (مثل الرصاص والزئبق والكادميوم)، إلا أن آليات التعامل معها في معظم الدول النامية لا تزال تعاني العشوائية وغياب الاستراتيجيات المنظمة.

وتتبلور المشكلة بيئياً في ظاهرة التلوث المتقاطع المتسلسل حيث يؤدي التخلص العشوائي من هذه النفايات في مكبات مفتوحة أو غير مهيأة هندسياً إلى ترشح هذه العناصر السامة هيدرولوجياً مع مياه الأمطار لتصل إلى طبقات المياه الجوفية وتسمم التربة، أو تتبخر في الغلاف الجوي بفعل الحرق المكشوف، مما يهدد بظاهرة "التراكم الحيوي" في السلسلة الغذائية للإنسان هذا التدهور البيئي المتفاقم يصطحب معه فجوة تشريعية وإدارية حادة، تتمثل في غياب المرجعية القانونية الملزمة مثل المسؤولية الممتدة للمنتج (EPR) والاعتماد بدلاً من ذلك على الحرق و الطمر البدائي والقطاع العشوائي غير الرسمي ويضاف إلى ذلك أبعاد استراتيجية مهدورة؛ حيث يمثل التخلص العشوائي خسارة اقتصادية فادحة لفرص "التعدين الحضري "الكفيلة باسترداد الفلزات الثمينة والنادرة بتكلفة بيئية وطاقة أقل من التعدين التقليدي، بالتوازي مع قصور معرفي ومجتمعي يعزز ظاهرة "التراكم للأجهزة القديمة.

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches
And Scientific Activities

ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

تساؤلات الدراسة

- ما هو الواقع الراهن للمخلفات الإلكترونية من حيث حجمها ومكوناتها السامة؟
- كيف يؤثر التخلص غير الآمن من هذه المخلفات على العناصر البيئية (التربة، الماء، الهواء)؟
- ما هي استراتيجيات المواجهة (التقنية، القانونية،) الكفيلة بالحد من هذه المخاطر وتحقيق التنمية المستدامة
- ما هي التحديات والمعوقات التي تحول دون إدارة سليمة للنفايات الإلكترونية في الوقت الحالي؟

أهداف الدراسة

1. معرفة المكونات الكيميائية الخطرة السامة والخطرة الكامنة داخل الأجهزة الإلكترونية الشائعة.
2. التعرف على انتقال الملوثات الإلكترونية عبر النظم الإيكولوجية وتأثيرها التراكمي على والهواء والصحة العامة لتصل إلى الإنسان عبر البيئة التربة والمياه
3. استعراض أفضل الممارسات الدولية في "استراتيجيات المواجهة" لتعميم الفائدة منها.
4. رصد المعوقات وتشخيص التحديات التنظيمية والتقنية والاقتصادية التي تعيق الانتقال من التخلص العشوائي إلى التدوير المستدام.

أهمية الدراسة:

تنبثق أهمية الدراسة من ضرورتها الملحة كمرجع علمي يربط بين الرفاهية الرقمية والاستدامة البيئية، حيث تسعى لسد الفجوة المعرفية بين التطور التكنولوجي ومتطلبات حماية البيئة. وتقديم رؤية تحليلية تدعم صناع القرار لسن تشريعات وطنية تواكب حجم الأزمة، بالإضافة إلى تسليط الضوء على الفرص الاقتصادية الضائعة في "التعدين الحضري كرافد استراتيجي يدعم ركائز الاقتصاد الوطني وعلى الصعيد الحيوي والمجتمعي، تكتسب الدراسة أهمية ق في حماية الأمن الصحي والغذائي عبر التحذير من المسارات الخفية لتلوث التربة والمياه الجوفية بالمعادن الثقيلة وتأثيرها التدميري على

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches And Scientific Activities
ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

الأنظمة الحيوية. يتكامل ذلك مع بُعدها الإنساني المتمثل في رفع مستوى الوعي لدى المستهلكين بالمخاطر السمّية الكامنة في أجهزتهم القديمة، وتوجيههم نحو السلوك البيئي الآمن للتخلص منها.

منهجية الدراسة (Research Methodology)

تعتمد هذه الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي لوصف وتحليل البيانات ا المكتبية (Data Sources) المتمثلة في المفاهيم والمصطلحات الأساسية والطرق التقنية للتخلص من المخلفات الإلكترونية وتأثيرها على البيئة واستراتيجيات معالجتها.ومقارنتها مع والدراسات التطبيقية السابقة، وجمع البيانات تم الاعتماد على مجموعة متنوعة من المصادر ، شملت:مراجعة الدراسات المنشورة في المجلات الوطنية والدولية ، لضمان الحصول على معلومات حول طرق التخلص والكتب والمراجع التخصصية الاعتماد على مؤلفات رائدة وفهم قواعد البيانات الرقمية باستخدام محركات البحث الأكاديمية مثل (*Google Scholar*) للوصول إلى دراسات حالة وربط الجانب النظري بالتطبيقي ، من خلال استقراء الأدبيات العلمية الحديثة، وتحليل التقارير الدولية الصادرة عن المنظمات البيئية والربط بين المعطيات الكيميائية للأجهزة وبين النتائج الميدانية للدراسات السابقة، وصولاً إلى استنباط حلول استراتيجية تتلاءم مع الواقع المحلي والإقليمي.

الدراسات السابقة (Literature Review)

تم تصنيف الدراسات السابقة موضوعياً حيث تعكس الأبعاد البيئية، والصحية، والتشريعية، والتقنية لظاهرة المخلفات الإلكترونية:

1 – دراسة بهاء الدين نزار (2023) "إدارة النفايات الإلكترونية وتداعياتها على السلامة البيئية في الجزائر"، عن طبيعة المخاطر الكيموفيزيائية الناجمة عن المكونات السامة للأجهزة الإلكترونية عند التخلص العشوائي منها في المكبات المفتوحة. وركز على تحليل أثر الرمي العشوائي، وظاهرة الاتجار غير المشروع بهذه المخلفات عبر الحدود خارج الأطر القانونية. وخلصت الدراسة إلى أن غياب الرقابة البيئية الصارمة يسرع من ترشيح أيونات الفلزات الثقيلة السامة إلى المجاري المائية والطبقات الحاملة للمياه الجوفية، مشدداً على حتمية تفعيل آليات الرقابة القانونية الصارمة لحماية المنظومة البيئية من التدهور الحاد. **(بهاء الدين 2023، ص389)**

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches And Scientific Activities
ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

2- دراسة جامعة ابن خلدون(2024) "أثر النفايات الإلكترونية على الوسط البيئي في الجزائر" حيث ركزت بشكل أساسي على الإشكاليات القانونية والبيئية الناجمة عن سوء تداول المخلفات الرقمية وتخزينها بطرق بدائية وغير آمنة. وأوضحت الدراسة السبل العلمية والتقنية للإدارة البيئية السليمة للحد من هذه الأخطار، مع تبيان دور المشرع المحلي والاتفاقيات الدولية في ضبط وتوجيه التعامل الآمن مع هذه النفايات، وخلصت إلى ضرورة تحديث المعايير الجغرافية المعتمدة لاختيار مواقع المكبات ومراكز المعالجة لتفادي القضاء على النظم الحيوية المحيطة. **(بن خلدون، 2024، ص213)**

3- دراسة حمّاد (2002) "المسؤولية الممتدة للمنتج (EPR) كآلية لإدارة النفايات الإلكترونية في مصر" وضعت هذه الدراسة التحليلية تصوراً قانونياً متكاملاً لكيفية إلزام الشركات المصنعة والموردة للأجهزة الإلكترونية بإنشاء نظم لوجستية عكسية تضمن استعادة وجمع الأجهزة التالفة من المستهلكين وتحمل كلفة معالجتها بيئياً. وخلصت الدراسة إلى أن القوانين الصارمة والملزمة لتفعيل مبدأ (EPR) هي الخطوة الأساسية والشرط الأول لإنجاح أي تكنولوجيا أو بنية تحتية مخصصة لإعادة التدوير الآمن. **(حماد، 2002، ص471)**

4- دراسة مقداد (2021) "إعادة تدوير النفايات الإلكترونية كمدخل لتحقيق متطلبات الاقتصاد الدائري في الجزائر" ركزت الدراسة على الجانب التطبيقي الكيميائي والاقتصادي لإدارة النفايات. حيث ناقشت بالتفصيل مفهوم "التعدين الحضري(Urban Mining) "، وأثبتت بالبيانات الرقمية كيف يمكن لاسترداد المعادن النفيسة والنادرة (كالذهب، والفضة، والنحاس) من الأجهزة التالفة واللوحات الأم أن يشكل مورداً اقتصادياً مستداماً يغني الدول عن استيراد المواد الخام من الخارج. وأكدت النتائج أن عمليات التعدين الحضري تقلل بنسب حاسمة من معدلات التلوث الناتجة عن الطمر التقليدي، فضلاً عن خفض الانبعاثات الكربونية مقارنة بالتعدين الجيولوجي الطبيعي. **(مقداد، 2021، ص245)**

5- دراسة الشمري وآخرون (2020) "تقييم واقع إدارة النفايات الإلكترونية واستكشاف آليات التخلص الآمن منها في المملكة العربية السعودية " حيث هدفت هذه الدراسة التطبيقية والتي أُجريت حيث أوضحت النتائج الميدانية وجود فجوة في مستوى الوعي البيئي لدى المستهلكين بخصوص مخاطر الطمر العشوائي للأجهزة التالفة، فضلاً عن غياب المسارات التنظيمية المحددة للجمع

اللوجستي. وخلصت الدراسة إلى أهمية وضع استراتيجية وطنية متكاملة تلزم القطاعات ذات العلاقة بتطبيق معايير فرز صارمة من المنبع لتسهيل عمليات التدوير النظامي.

6 – دراسة (Baldé et al., UNITAR & ITU, 2024) "تتبع اتجاهات توليد وتدفق المخلفات الرقمية بالمرصد العالمي للنفايات الإلكترونية " وكشفت النتائج الكمية للتقرير يُعد هذا التقرير الدولي المشترك الصادر عن معهد الأمم المتحدة للتدريب والبحث والاتحاد الدولي للاتصالات، المرجع الإحصائي الأحدث والأعلى رصانة وموثوقية على المستوى العالمي عن وصول حجم النفايات الإلكترونية عالمياً إلى رقم قياسي غير مسبوق بلغ 62 مليون طن متري؛ حيث دعمت المؤشرات الفرضية العلمية القائلة بأن سياسات "التقادم التقني المخطط له (Planned Obsolescence) " وقصر الدورات الحياتية للأجهزة الذكية هما الدافعان الرئيسيان وراء هذا الاستهلاك المفرط، مما جعل هذا النوع من المخلفات التدفق الأسرع نمواً بين جميع فئات النفايات الصلبة، متجاوزاً معدل نموه السنوي النفايات البلدية التقليدية بثلاثة أضعاف. كما حذر التقرير من الفجوة الهيدرولوجية والبيئية الخطيرة الناتجة عن تدني معدلات التدوير الرسمية عالمياً، مما يترك الكتلة الأكبر من هذه النفايات عرضة لعمليات الطمر والحرق العشوائي التي تتجاوز القدرة الاستيعابية للنظم البيئية على التفكيك الذاتي، الأمر الذي ينعكس سلباً بآثار تدميرية حادة على الصحة العامة، والسلامة البيئية لمنظومتي التربة والمياه الجوفية

7– دراسة أندرسون وزملاؤه (Anderson et al., 2023 "معوقات تطبيق نموذج المسؤولية الممتدة للمنتج (EPR) في اقاليم الدول النامية " ركزت هذه الدراسة الأجنبية على سوق النفايات التي يسيطر فيها القطاع غير الرسمي وأوضحت النتائج أن إلزام الشركات الدولية أو المحلية باستعادة الأجهزة يصطدم ميدانياً بواقع التفكيك البدائي والعشوائي الذي يمارسه جامعو الخردة المحليون. وخلصت الدراسة إلى أن سد "الفجوة التشريعية" يتطلب دمج وتأهيل هذا القطاع غير الرسمي ضمن منظومة تدوير قانونية تضمن تبني معايير "التصميم من أجل البيئة (Design for Environment) " لتقليل مخاطر السموم الحادة.(**Anderson et al., 2023p14**)

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches
And Scientific Activities

ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

الإطار النظري

المبحث الأول: المخلفات_الإلكترونية كالمخلفات خطرة والآثار والبيئية

يُعد فهم واقع النفايات الإلكترونية حجر الأساس في تقييم حجم الكارثة البيئية المعاصرة؛ فهي لا تمثل مجرد "خردة" أو نفايات صلبة عادية، بل هي مستودعات ومخازن معقدة لمواد كيميائية مما يجعل تحللها في البيئة الطبيعية أمراً مستحيلاً دون تدخل تقني وعلمي

- يُقصد بالمخلفات الإلكترونية ((E-waste كافة الأجهزة والأنظمة التي تعتمد في تشغيلها على الطاقة الكهربائية أو البطاريات والتي انتهى عمرها الافتراضي، أو استغنى عنها مستهلكوها. **(الشمري وآخرون ،2020 ص84)**

ويشير الواقع الإحصائي الدولي بحسب تقرير برنامج الأمم المتحدة للبيئة ويشير الواقع الإحصائي الدولي بحسب تقرير مرصد النفايات الإلكترونية العالمي الصادر عن الاتحاد الدولي للاتصالات إلى أن حجم التدفقات العالمية لهذه النفايات قد قفز ليصل إلى 62 مليون طن متري، محققاً تسارعاً خطيراً يجعله التدفق الأسرع نمواً بين المخلفات الصلبة على مستوى العالم". البنية الكيميائية ومظاهر السمّية في الأجهزة الرقمية

تحاكي التركيبة الداخلية للأجهزة الإلكترونية المعاصرة نموذجاً مصغراً للجدول الدوري للعناصر الكيميائية، ولكن بجانبه المظلم والخطير. حيث يوضح أن الجهاز الواحد قد يحتوي على أكثر من مكوّن كيميائي معقد، يقع في طليعتها مجموعتان رئيسيتان

أ- المعادن الثقيلة (: (Heavy Metals تضم منها:

- الرصاص :(Lead) يتواجد بكثافة في شاشات أنبوب الأشعة الكاثودية وسبائك اللحام بلوحات الدوائر المطبوعة وهو ملوث ذو سمية تراكمية حادة تستهدف الجهاز العصبي المركزي والدورة الدموية.

- الكادميوم :(Cadmium) يدخل في صناعة البطاريات القابلة لإعادة الشحن والرقائق الإلكترونية والمقاومات، ويصنف كعنصر مسرطن ذي تأثيرات تدميرية للتربة والنظم الحيوية.

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches
And Scientific Activities

ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

-الزئبق :(Mercury) يُستخدم في مفاتيح الاستشعار والإضاءة الخلفية لشاشات العرض البلوري (LCD) ويمتاز بقدرته العالية على التسامي والتبخر والترشح السريع للمحيط المائي. (***Baldé et al., 2024p65***)

ب- المركبات العضوية الثابتة والغازات: مثبطات اللهب البرومية (BFRs) تُدمج في الأغلفة البلاستيكية لمنع الاشتعال، إلا أنها تصنف بيئياً كمواد عنيدة ومقاومة للتحلل الحيوي، ولها قدرة على الانتقال العابر للحدود عبر التيارات الهوائية إدارة النفايات الإلكترونية وتداعياتها على السلامة البيئية في الجزائر، مجلة العلوم البيئية والتنمية المستدامة،

- غازات الكلوروفلوروكربون (: (CFCs تتواجد في أنظمة التبريد والتكييف القديمة، وتتسبب عند تفكك الأجهزة عشوائياً في إطلاق مركبات حرة تؤدي إلى استنزاف طبقة الأوزون.

نظراً للتعقيد البنيوي والسمّي السابق، لم تعد التشريعات والاتفاقيات الدولية تنظر لهذه المخلفات كنفايات بلدية صلبة عادية. ويذكر تقرير (منظمة الإيسيكو 2019) أن إجماع الهيئات الدولية على تصنيف هذه المواد ك "نفايات خطرة" يرتكز علمياً على خاصيتين هي السمية (Toxicity) القدرة للمكونات الكيميائية على إحداث ضرر فسيولوجي للكائنات الحية وايضا الثبات البيئي (: (Persistence قدرة العناصر (خاصة البوليمرات البلاستيكية والفلزات الثقيلة) على البقاء في الأوساط البيئية لعقود وقرون طويلة دون فقدان خواصها السامة الأصلية، مما ينتج أزمة تهدد عناصر فناء البيئة إذا لم تُعالج ضمن استراتيجيات مواجهة علمية. **(بهاء الدين2023 ص389)**

- **تدهور النظام والآثار والبيئية_للتلوث الإلكتروني**

ان تدهور النظام البيئي والآثار الجيومورفولوجية والهيدرولوجية للتلوث الإلكتروني عندما تخرج النفايات الإلكترونية عن مسارات الإدارة البيئية الرشيدة والآمنة، تبدأ رحلة "التلوث المتقاطع والممتد " (Cross and Extended Contamination)؛ حيث لا يقتصر تأثيرها السلبي على النطاق الجغرافي الساكن للمكب العشوائي، بل يتعداه ليتخذ صفة "الديناميكية الحركية" عبر الأوساط البيئية الثلاثة المتداخلة). ينتج عن هذا التداخل تدهوراً هيدرولوجياً، وبيولوجياً، وجيومورفولوجياً شاملاً يعيد تشكيل الخصائص الطبيعية للمنظومة البيئية **(الشمري وآخرون، مرجع سابق، 2020، ص87).**

ويمكن تفصيل هذه الآثار التدميرية وهندسة انتشارها عبر المحاور والمستويات التالية:

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches
And Scientific Activities

ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

أولاً: تدمير (التربة والمنظومة الجيومورفولوجية)

تُمثل التربة المستودع الجيولوجي الأول والمباشر لمستخلصات التحلل الفيز وكيميائي العشوائي عند طمر النفايات الإلكترونية أو إلقائها في الهواء الطلق. ويتجلى هذا الأثر التدميري في محورين علميين رئيسيين:

- **اختلال الخصائص الفيز وكيميائية وبنية التربة الحيوية**

إن تسرب أيونات المعادن الثقيلة عالية السمية والعدوانية الكيميائية—مثل الكادميوم(Cd) ، النيكل (Ni)، الرصاص(Pb) ، (Cr)، والزئبق(Hg) يؤدي إلى إحداث خلل حاد ومزمن في الأس الهيدروجيني (pH) للتربة، مما يتسبب في رفع مستويات الحموضة أو الملوحة الكيميائية الفوق–طبيعية.

هذا التغير الجذري في كيمياء التربة يقود إلى ما يُعرف بـ "العقم البيولوجي للتربة عبر القضاء التام على الكتلة الحيوية الدقيقة(Microbial Biomass) ، بما تشمله من مجتمعات وفطرية بكتيرية نافعة المسؤولة عن عمليات تثبيت النيتروجين وتحلل المواد العضوية. إعاقة الدورة الطبيعية للعناصر الغذائية(N, P, K) ، مما يغير من القوام الميكانيكي للتربة ويفقدها تماسكها الجيومورفولوجية، ويجعلها أكثر عرضة لعوامل الانجراف والتعرية.

- **السمية النباتية العالية وظاهرتي التراكم والتضخيم الحيوي**

لا يتوقف الأثر عند حدود تدمير التربة حيوياً، بل يمتد إلى إضعاف القدرة الإنتاجية للأرض الزراعية وتسميم المنظومة النباتية .(Phytotoxicity) فمع هطول الأمطار الحمضية أو ذوبان المعادن في المحلول المائي للتربة، تمتص الجذور النباتية تلك المعادن الثقيلة على أنها مغذيات طبيعية نظراً للتشابه الأيوني.

يقود هذا الامتصاص إلى تلوث الأنسجة النباتية، والثمار، والحبوب، ومن ثم انتقال السموم رأسياً إلى المستهلكين الأوائل (الحيوانات الرعوية) والمستهلكين الأواخر (الإنسان) عبر السلسلة الغذائية (Food Chain).تتجسد هذه الكارثة في ظاهرتين علميتين:

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches
And Scientific Activities

ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

– التراكم الحيوي :(Bioaccumulation) وهو زيادة تركيز المادة السامة داخل جسم الكائن الحي بمعدل أسرع من قدرته على تصريفها أو تمثيلها غذائياً.

– التضخيم الحيوي :(Biomagnification) وهو تضاعف تركيز هذه المعادن الثقيلة مئات المرات كلما انتقلنا إلى أعلى الهرم الغذائي، حتى تصل إلى الإنسان بأعلى مستويات سُميتها الحادة، مسببة فشلاً كلوياً، وتلفاً في الجهاز العصبي المركزي، وطفرات جينية مسرطنة **(بهاء الدين، مرجع سابق 2023، ص390).**

ثانياً: التحلل الهيدرولوجي (تلوث الموارد المائية السطحية والجوفية)

يُشكل جريان المياه (سواء كانت مياه أمطار، أو سيول، أو مياه صرف) فوق ومن خلال مكبات النفايات الإلكترونية العشوائية تهديداً هيدرولوجياً وجودياً للأمن المائي العام. ويتحرك هذا التلوث المائي المتدفق عبر مسارين فائقَي الخطورة :عندما تتغلغل مياه الأمطار داخل طبقات المكب العشوائي، فإنها تعمل كمذيب كيميائي قوي يستخلص العناصر الثقيلة والمواد البلاستيكية المضافة (مثل مثبطات اللهب) من الأجهزة المتآكلة. تتكون نتيجة لذلك عصارة كيميائية عالية السمية تنفذ هذه العصارة عبر مسامات التربة والشقوق الجيولوجية حتى تصل إلى طبقات الأرض العميقة وخزانات المياه الجوفية (Aquifers) والآبار الارتوازية. يتسبب هذا التغلغل في إفساد المخزون الاستراتيجي من المياه العذبة كيميائياً وصحياً، وتحويله إلى مياه غير صالحة للاستهلاك البشري أو الري الزراعي لقرون طويلة، نظراً لصعوبة واستحالة معالجة المياه الجوفية طبيعياً في معزل عن الأكسجين وأشعة الشمس.

تسمم الأنظمة البيئية المائية (Aquatic Ecosystems)

يؤدي الانجراف السطحي للنفايات الإلكترونية، أو إلقائها المتعمد بالقرب من ضفاف الأودية، والأنهار، والمجاري المائية، إلى نقل مباشر للملوثات إلى المسطحات المائية السطحية. في هذا الوسط المائي، تحدث تفاعلات كيميائية وحيوية بالغة التعقيد؛ حيث تتحول المعادن الثقيلة بفعل النشاط البكتيري اللاهوائي في القاع إلى مركبات عضوية معدنية فائقة السُمية والخطورة.

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches And Scientific Activities
ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

على سبيل المثال، تتكامل بكتيريا اختزال الكبريتات في الماء لتحويل عنصر الزئبق الخامل نسبيًا إلى مركب "ميثيل الزئبق " (Methylmercury). يمتاز هذا المركب بقدرته العالية جداً على الذوبان في الدهون واختراق الأغشية الخلوية، مما يجعله يتراكم بكثافة عالية في الأنسجة العضلية للأسماك، والقشريات، والأحياء البحرية. يؤدي ذلك إلى حدوث تسمم حاد في السلسلة الغذائية البحرية، يرتد بآثار كارثية على المجتمعات البشرية الساحلية التي تعتمد على الصيد كعنصر غذائي رئيسي **(الشمري وآخرون، مرجع سابق 2020 ص95)**.

ثالثاً: تلوث الغلاف الجوي والانبعاثات الغازية

لا تقتصر الكارثة البيئية للمخلفات التقنية على الأوساط الجامدة والسائلة، بل ينعكس تأثيرها السلبي على الغلاف الجوي نتيجة عمليات المعالجة البدائية وغير الرسمية (Informal Recycling Sector)التي تُجرى في مكبات الدول النامية خارج رقابة القوانين البيئية. وتتخذ الملوثات المنبعثة في الهواء شكلين فيزيائيين وكيميائيين:

الحرق المكشوف للبلاستيك والكابلات وتخليق المركبات العضوية الثابتة يلجأ العمال في القطاع غير الرسمية بطرق بدائية وبحثاً عن مكاسب اقتصادية سريعة—إلى الحرق المكشوف لأغلفة الأسلاك والكابلات البلاستيكية المصنوعة من مادة بولي فينيل الكلوريد (PVC) بهدف استخلاص النحاس عالي القيمة النقية. ينتج عن عملية الاحتراق غير المكتمل هذه، وفي درجات حرارة منخفضة، إطلاق كميات هائلة من الغازات والملوثات العضوية الثابتة (POPs) شديدة الخطورة، وفي مقدمتها (الديوكسينات ، الفيورانات)

تُصنف هذه الانبعاثات دولياً بأنها مواد مسرطنة ومثبطة للمناعة وتسبب تشوهات خلقية للأجنة. وبسبب ثباتها الكيميائي، فإنها لا تتحلل في الهواء بل تنتقل بواسطة التيارات الهوائية والرياح لتسقط بعيدة عن مصدر المكب على شكل غبار ساقط أو مدمجة مع الأمطار الحمضية، مما يوسع دائرة الكارثة لتصبح ذات أبعاد إقليمية ودولية.

تطاير الغبار المعدني الدقيق والجسيمات العالقة ينتج عن عمليات التكسير، والسحق، والفك اليدوي البدائي لشاشات الكاثود القديمة، واللوحات الإلكترونية المطبوعة، تطاير هائل لجزيئات غبارية ميكروبية دقيقة محملة بعناصر الرصاص، الفسفور، البريليوم، والكادميوم. هذه الجسيمات العالقة

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches And Scientific Activities
ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

الفائقة الدقة تظل سابحة في الهواء لفترات طويلة، مما يسهل استنشاقها ونفاذها مباشرة إلى أعمق أجزاء الجهاز التنفسي (الحويصلات الهوائية) ومنها إلى مجرى الدم للكائنات الحية.

يتسبب هذا الغبار المعدني في إصابة المجتمعات السكنية المحيطة بالمكبات بأمراض تنفسية مزمنة، مثل التليف الرئوي، والتسمم بالرصاص (Plumbism) الذي يؤدي إلى تراجع القدرات الذهنية والإدراكية لدى الأطفال بشكل غير قابل للعلاج **(بهاء الدين، 2021 ص395)**.

عندما تخرج النفايات الإلكترونية عن مسارات الإدارة البيئية الرشيدة والآمنة، تبدأ رحلة "التلوث المتقاطع"؛ حيث لا يقتصر تأثيرها على النطاق الجغرافي للمكب، بل يمتد عبر الأوساط البيئية الثلاثة (التربة، الماء، الهواء) مسبباً تدهوراً هيدرولوجياً وجيومورفولوجياً شاملاً. حيث تُمثل التربة المستودع الأول والمباشر لمستخلصات التحلل العشوائي عند طمر النفايات الإلكترونية. ويتمثل هذا الأثر التدميري في محورين:

تغيير الخصائص الفيز وكيميائية: تسرب أيونات المعادن الثقيلة كالكادميوم والنيكل والرصاص يؤدي إلى خلل حاد في الأس الهيدروجيني (pH) ورفع حموضة التربة، مما يقتلها حيوياً عبر القضاء التام على المجتمعات البكتيرية والفطرية الدقيقة النافعة وان السمية النباتية والتراكم الحيوي: يمتد الأثر إلى إضعاف القدرة الإنتاجية للأرض، حيث تمتص جذور النباتات المحاصيل تلك المعادن الذائبة، مما يقود إلى تلوث الثمار وانتقال السموم رأسياً إلى الإنسان عبر السلسلة الغذائية في ظاهرة تُعرف علمياً بالتراكم الحيوي .(Bioaccumulation)

تلوث الموارد المائية السطحية والجوفية ويُشكل جريان مياه الأمطار فوق المكبات العشوائية تهديداً هيدرولوجياً وجودياً للأمن أن تلوث المياه يتحرك عبر مسارين.

- المسار الجوفي: عبر عملية الترشيح أو الاستخلاص الكيميائي (Leaching) حيث تنقل المياه المتسربة الفلزات الثقيلة الذائبة إلى طبقات الأرض وخزانات المياه الجوفية، مما يتسبب في إفسادها كيميائياً وصحياً لقرون طويلة.

- المسار السطحي: يؤدي جرف النفايات بالقرب من الأودية والمجاري المائية إلى تسمم الأنظمة البيئية المائية حيث يتحول الزئبق على سبيل المثال بفعل البكتيريا اللاهوائية في الماء إلى مركب شديد السمية، والذي يتراكم في الأنسجة العضلية للأسماك والأحياء البحرية. **(الشمري وآخرون، 2020 ص98)**

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches And Scientific Activities
ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

المبحث الثاني: الاستراتيجيات الشاملة لمواجهة أزمة النفايات الإلكترونية

إن مجابهة التدفقات السنوية المتسارعة للنفايات الإلكترونية لا يمكن أن تنجح عبر حلول أحادية أو معالجات جزئية مؤقتة؛ بل تتطلب تبني نموذج "**الاقتصاد الدائري المغلق Closed-Loop)** " **Circular Economy)**المتكامل. وهو النموذج البديل للاقتصاد الخطي التقليدي القائم على مبدأ (الاستخراج، التصنيع، الاستهلاك، ثم التخلص النهائي).

يرتكز الاقتصاد الدائري على إغلاق حلقة تدفق المواد وتقليل الهدر والمخلفات إلى الحد الأدنى الصِفري عبر الموازنة والدور المتبادل بين ثلاثة محاور استراتيجية متكاملة تدمج صرامة التشريع القانوني، بذكاء التقنية الهندسية، وحيوية الوعي التربوي والمجتمعي.

أولاً: الاستراتيجية التشريعية والرقابة البيئية

تُمثل الأطر القانونية والتشريعات التنظيمية حجر الزاوية لحماية المنظومة البيئية من التدفقات غير المنضبطة للمخلفات الرقمية. وتستند هذه الاستراتيجية إلى أداتين وسياسيتين رئيسيتين:

- تفعيل وتدويل مبدأ المسؤولية الممتدة للمنتج (Extended Producer Responsibility – EPR)

تُعد سياسة المسؤولية الممتدة للمنتج أداة اقتصادية وقانونية حتمية تُلزم الشركات المصنعة والمستوردة للأجهزة الإلكترونية بتحمل المسؤولية الكاملة—المالية والتشغيلية—طوال دورة حياة المنتج، وخاصة في مرحلة ما بعد الاستهلاك .(Post-Consumer Stage) ويتجاوز التطبيق الأكاديمي لهذا المبدأ مجرد جمع الأجهزة، إلى هندسة مسارات إجبارية تشمل:

1- **تأسيس منظومات الامتثال المشتركة** حيث تتشارك الشركات في تمويل بنية تحتية وطنية لجمع النفايات الإلكترونية ومعالجتها.

2- **الضغط الاقتصادي لإعادة التصميم :(Eco-Design)** عندما تتحمل الشركات تكلفة التدوير العالية للمواد السامة، فإنها تنجذب تلقائياً نحو مفهوم "التصميم من أجل البيئة (Design for " Environment – DfE).ويتضمن ذلك تقليل عدد البوليمرات البلاستيكية المستخدمة، وإحلال المعادن الثقيلة ببدائل حيوية، وتصنيع أجهزة بنمط "الموديلات المفككة (Modular Design) "التي تسهل صيانتها وتحديث أجزائها دون الحاجة للاستغناء عن الجهاز بأكمله.

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches
And Scientific Activities

ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

- الالتزام الصارم بالمعاهدات الدولية والمكافحة

يتطلب البُعد التشريعي تفعيلاً حازماً لمقررات)**اتفاقية بازل** (بشأن التحكم في نقل النفايات الخطرة عبر الحدود، وتحديداً "تعديل الحظر الذي يحظر تصدير النفايات الخطرة من الدول المتقدمة صناعياً إلى الدول النامية. إن تشديد الرقابة الجمركية عبر الحدود وتطوير منظومات التتبع الرقمي (Blockchain Tracking)لشحنات الأجهزة الإلكترونية يهدف إلى:

أ- حظر الممارسات غير المشروعة للشركات الدولية العابرة للقارات التي تستغل الثغرات القانونية في الدول النامية لتحويل أراضيها إلى مقابر ومكبات عشوائية مفتوحة للنفايات الإلكترونية تحت غطاء "الأجهزة المستعملة القابلة لإعادة الاستخدام" أو "المساعدات والمنح التقنية."

ب- سد الفجوة التشريعية المحلية عبر سن قوانين وطنية تجرّم استيراد أي نفايات رقمية وتضع عقوبات جنائية ومالية صارمة على المؤسسات المخالفة لمعايير السلامة البيئية الصادرة عن برنامج الأمم المتحدة للبيئة.(UNEP)

ثانياً: الاستراتيجية التقنية والهندسية (التعدين الحضري والتدوير الآمن)

في هذه الاستراتيجية، تتحول التكنولوجيا من مسبب أساسي للأزمة البيئية إلى أداة تصحيحية هندسية قادرة على معالجة مخلفاتها ذاتياً وتدوير عناصرها بصفة مستدامة. وتعتمد هذه الرؤية على مسارين تقنيين متطورين:

1- تقنيات التعدين الحضري (Urban Mining) واسترداد الثروات السيادية

يُمثل التعدين الحضري متغيراً استراتيجياً واقتصادياً فائق الأهمية في القرن الحادي والعشرين؛ فهو يقوم على فكرة التوقف عن استنزاف الموارد الطبيعية البكر من باطن الأرض، والتوجه بدلاً من ذلك إلى استغلال واستخلاص الفلزات النادرة والمعادن الثمينة (الفضة، البلاتين، النحاس،) المخزنة في اللوحات الأم (Motherboards) ورقاقات المعالجة المركزية للهواتف والحواسيب المهملة.

وتؤكد البيانات البيئية والتعدينية الحديثة **(Anderson, M., et al., 2023p14)** على جدوى هذا المسار من خلال المقارنة الجيولوجية التالية:

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches
And Scientific Activities

ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

2- تقنيات المعالجة الآمنة والعزل الكيميائي المتقدم

لتحقيق مبدأ "**صفر تلوث (Zero Pollution)** "ومنع انبعاث الملوثات أثناء استخلاص المعادن، تعتمد المنشآت الصناعية الحديثة للتدوير على هندسة معالجة ثلاثية المراحل:

- **المرحلة الميكانيكية الآلية** :سحق وتفكيك الأجهزة الكهرومغناطيسية وبصرياً باستخدام أشعة الليزر والذكاء الاصطناعي لفصل البلاستيك والزجاج عن المكونات المعدنية دون أي تماس بشري مباشر لحماية العمال من الغبار المعدني السام.
- **المعالجة الهيدروميتالورجية :(Hydrometallurgical Processing)** بديل بيعي متطور لعمليات الحرق الحراري (Pyrometallurgy) التقليدية؛ حيث تُستخدم محاليل وأحماض كيميائية منضبطة في دوائر مغلقة ومستمرة لإذابة واستخلاص المعادن بدقة متناهية وبكفاءة طاقة عالية، ودون إطلاق غازات الديوكسين أو الفيوران في الغلاف الجوي.
- **التثبيت والعزل الكيميائي :(Vitrification & Stabilization)** عزل العناصر غير القابلة للتدوير وعالية السُمية (كالمركبات الفسفورية، الزئبق، والبريليوم) وتعديل بنيتها الجزيئية عبر عمليات صهر حراري زجاجي لتحويلها إلى مواد خاملة كيميائياً وبيولوجياً وثابتة هيكلياً، مما يضمن استحالة ترشح أيونات سُميتها إلى الأوساط البيئية حتى عند طمرها النهائي في المدافن الهندسية المخصصة للنفايات الخطرة.

ثالثاً: الاستراتيجية التوعوية والتربوية والمسؤولية المجتمعية

لا يمكن للقوانين الصارمة أو التقنيات المتقدمة أن تحقق أهدافها البيئية ما لم تكن مدعومة بوعي مجتمعي واستهلاكي نشط؛ فالمستهلك هو الحلقة المركزية التي تتحكم في تدفق المخلفات أو حبسها في المنازل والمؤسسات. وحسب ما أكده بهاء الدين 2021)، تتطلب هذه الاستراتيجية إعادة بناء العلاقة بين الفرد والمنتج الرقمي عبر آليتين تربويتين وسلوكيتين:

1-إعادة هندسة السلوك الاستهلاكي وتأصيل ثقافة "الحق في الإصلاح (Right to Repair) "

تستهدف هذه الرؤية التربوية محاربة ثقافة "النزعة الاستهلاكية المفرطة" وسيكولوجية "التقادم النفسي الموجه" التي تزرعها الإعلانات التجارية لدفع الأفراد نحو الاستبدال الدوري للأجهزة الرقمية دون وجود حاجة تقنية حقيقية. ويتطلب هذا المحور:

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches And Scientific Activities
ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

- **إدراج التربية البيئية الرقمية (Digital Eco-Education):** في المناهج الدراسية والجامعية لتوعية الأجيال الناشئة بالبصمة البيئية والمائية والتحليلية للأجهزة التي يمتلكونها.
- **دعم وتفعيل حركة الإصلاح (Right to Repair Movement):** "كخيار أخلاقي وتشريعي يفرض على الشركات إتاحة أدلة الصيانة، وقطع الغيار الأصلية، والتحديثات البرمجية طويلة الأجل للمستخدمين والورش المحلية بأسعار تشجيعية، مما يساهم مباشرة في إطالة العمر الافتراضي للأجهزة وخفض معدلات التوليد السنوي للنفايات التقنية.

2- الفرز من المصدر وبناء منظومة التجميع الذكي والآمن

يتوقف نجاح منشآت التدوير الحديثة على جودة ونقاء المواد الواصلة إليها، وهو ما يفرض فرز النفايات الإلكترونية والبطاريات بشكل كلي وصارم من نقطة التوليد (المنازل والشركات) وعزلها عن النفايات البلدية والعضوية التقليدية. ولتحقيق ذلك، يجب توفير بنية تحتية لوجستية محفزة تشمل:

- **نشر "الحاويات الخضراء الذكية (Smart E-Bins):** "المدعومة بتقنيات إنترنت الأشياء ومستشعرات الوزن والامتلاء في التجمعات السكنية والمؤسسات التعليمية والمراكز التجارية، لتسهيل إيداع الأجهزة التالفة والبطاريات بأمان وتنبيه سيارات الجمع آلياً عند امتلائها.
- **استراتيجيات "التحفيز والتدوير العكسي (Incentivized Reverse Logistics):** "ربط عمليات التخلص الآمن بنظام المكافآت الاقتصادية، مثل تقديم قسائم شراء(Vouchers) ، أو نقاط رقمية تُصرف كحوافز عينية ومادية، أو تخفيضات على الرسوم والضرائب البلدية للمواطنين والشركات الملتزمة بالفرز والتسليم البيئي.
- **حماية أمن الخصوصية وسرية البيانات (Data Security & Sanitization):** إنشاء مراكز تجميع حكومية أو خاصة معتمدة تضمن للمستهلك محو وتدمير كافة البيانات والمعلومات الشخصية الحساسة المخزنة على الأجهزة (الهواتف، الأقراص الصلبة) باستخدام معايير برمجية وفوتونية مشددة قبل توجيهها للكسر الميكانيكي، مما يزيل المخاوف الأمنية والنفسية التي تدفع الأفراد للاحتفاظ بأجهزتهم القديمة وتخزينها في المنازل والمكاتب لسنوات طويلة دون تدوير **(بهاء الدين، مرجع سابق، ص405)**

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches
And Scientific Activities

ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

- **المناقشة (Discussion)**

هذه الدراسة تشكل حلقة علمية متكاملة مع الأدبيات البيئية السابقة، ولا تقف عند حدود الرصد الظاهري للأزمة بل تقدم تفسيراً تفاعلياً والاستنتاج المتعلق بخطورة المواد الكيميائية وآلية التلوث المتقاطع حيث تفسر كيف أن اختلال الأس الهيدروجيني في البيئات المفتوحة يحفز انفلات أيونات المعادن الثقيلة كالكادميوم والرصاص، وهو ما يمنح استنتاجنا تفسر كيفية ترشح هذه السموم هيدرولوجياً إلى المياه الجوفية والسطحية، متطابقة في ذلك مع ما حذر منه (بلال نزار ،2023) في دراسته حول تداعيات السلامة البيئية، ليتأكد قطعياً أن التلوث الإلكتروني يتحرك في دورة متسلسلة تنتهي حتماً في السلسلة الغذائية للإنسان عبر ظاهرة التراكم الحيوي.

واستنتجت الدراسة بوجود فجوة زمنية وتشريعية حادة تؤدي إلى الطمر البدائي في الدول النامية ليتكامل مع ما طرحه أندرسون وزملاؤه (Anderson et al., 2023p14) في دراستهم الأجنبية حول معوقات حكومة النفايات؛ إذ أثبتوا ميدانياً أن غياب القوانين يترك المجال مفتوحاً لعشوائية القطاع غير الرسمي وجامعي الخردة، وهي النتيجة ذاتها التي قادتنا لتأييد الاطروحات التشريعية لكل من حمّاد (2022) وجامعة ابن خلدون (2024). فالتكامل بين هذه الاستنتاجات يوضح أن عجز المنظومة البيئية المحلية يرجع أساساً إلى غياب الآليات القانونية الملزمة كنموذج المسؤولية الممتدة للمنتج(EPR) مما يجعل الاجتهادات الفردية هي السائدة في التعامل مع تدفقات التكنولوجيا المتسارعة ويمتد إلى المحور التطبيقي والاقتصادي، حيث يتقاطع استنتاجنا حول الهدر المالي الفادح الناتج عن رمي الأجهزة التالفة مباشرة مع النتائج الرقمية لدراسة وانغ ولي أن تفعيل "التعدين الحضري" يوفر نحو 80% من الطاقة الكلية مقارنة بالتعدين التقليدي من باطن الأرض. وتدعم هذه البيانات الأجنبية ما توصل إليه مقداد (2021) في دراسته حول الاقتصاد الدائري، لتقدم دراستنا الحالية برهاناً جديداً على أن النفايات الرقمية ليست عبئاً بيئياً يجب التخلص منه، بل هي مناجم غنية فوق الأرض قادرة على رفد الاقتصاد الوطني بالمواد الخام النادرة بتكلفة بيئية واقتصادية أقل وأخيراً، إن خطورة ضعف الوعي المجتمعي وتأثير التراكم للأجهزة القديمة في المنازل يجد تفسيره في البيانات الإحصائية الصادمة لتقرير المرصد العالمي للنفايات الإلكترونية(Baldé et al. 2024) والذي

مجلة الريادة للبحوث والأنشطة العلمية
Al-Riyadah Journal For Researches
And Scientific Activities

ملحق العدد الثالث عشر
تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

كشف عن قفزة الإنتاج العالمي إلى 62 مليون طن متري مقابل نسبة تدوير رسمية ضئيلة جداً هذا الخلل الإحصائي يثبت ميدانياً ما جاء به بهاء الدين (2021) بشأن ضرورة الفرز من المصدر وتغيير السلوك الاستهلاكي؛ لتخلص الدراسة إلى أن مواجهة هذا الزحف الرقمي ا يقتضي بناء استراتيجية تشاركية متكاملة، تدمج إيكولوجيا التصميم لدى الشركات العالمية، مع الوعي المعرفي والسلوكي للمستهلك المحلي، وتحت حماية وتشريعات رقابية حكومية صارمة.

النتائج: من خلال الدراسة والتحليل لواقع النفايات الإلكترونية وتأثيراتها، توصل البحث إلى النتائج التالية:

- خطورة المواد الكيميائية :أثبتت الدراسة أن الأجهزة الإلكترونية القديمة ليست مجرد نفايات صلبة عادية، بل "نفايات خطرة "تحتوي على معادن سامة (مثل الرصاص والزئبق) لا تتحلل في الطبيعة، مما يجعل بقاءها تهديداً مستمراً.

استنتج أن خطر هذه النفايات ينتقل عبر سلسلة متصلة؛ حيث يبدأ بتلويث التربة وقتل خصوبتها، ثم تتسرب هذه السموم مع مياه الأمطار إلى المياه الجوفية، وتنتهي في الهواء عند حرقها عشوائياً، لتصل في النهاية إلى طعام الإنسان وصحته.

- وجود فجوة كبيرة بين السرعة الهائلة لإنتاج التكنولوجيا الحديثة، وبين القوانين البيئية التي تنظم التخلص منها؛ لا تزال معظم الدول النامية تعتمد على الطمر البدائي أو الحلول العشوائية.

- خلصت الدراسة إلى أن رمي الأجهزة التالفة يمثل هدراً مالياً كبيراً؛ فإعادة تدويرها واستخراج المعادن الثمينة منها (الفضة والنحاس) فيما يُعرف بـ "التعدين الحضري"، يوفر مواد خاماً بتكلفة وطاقة أقل بكثير من المناجم الطبيعية.

- اتضح أن حماية البيئة من هذا التلوث تتطلب تعاوناً جماعياً؛ يبدأ من الشركات المصنعة عبر تصميم أجهزة أقل سمية مراراً بوعي المستهلك في طريقة التخلص منها، وصولاً إلى الرقابة والقوانين الحكومية الصارمة.

- استنتج أن غياب المعلومات الواضحة لدى الأفراد حول مخاطر الأجهزة القديمة (سواء بتخزينها في البيوت أو رميها مع القمامة العادية) هو أحد الأسباب الرئيسية التي تزيد من حجم الأزمة وتمنع الاستفادة من إعادة تدويرها

تاريخ الاستلام Received 14-5-2026
تاريخ القبول Accepted 27-5-2026
تاريخ النشر published 8-6-2026

التوصيات (Recommendations) بناءً على ما أسفرت عنه هذه الدراسة من نتائج، وفي سبيل بناء استراتيجية وطنية مستدامة لمواجهة مخاطر المخلفات الرقمية، يوصي الباحث **بالآتي:**

1- تفعيل القوانين البيئية وسن وتطوير تشريعات وطنية صارمة تُلزم وكلاء وموزعي الأجهزة الإلكترونية والكهربائية بتطبيق مبدأ "المسؤولية الممتدة للمنتج.(EPR) "

2- إلزام الشركات بتخصيص مراكز معتمدة لاستلام الأجهزة المستعملة والتالفة من الجمهور، مع تفعيل نظام الحوافز المادية أو الائتمانية لتشجيع المستهلكين على التخلص الآمن منها.

3- دعم مشروعات التعدين الحضري بتقديم تسهيلات وحوافز استثمارية للمشاريع الناشئة والشركات المتخصصة في "التعدين الحضري(Urban Mining) "، لاسترداد الفلزات والمعادن النفيسة من الأجهزة التالفة.

4- اعتماد التقنيات الخضراء وإلزام منشآت التدوير باتباع طرق علمية وهندسية آمنة بيئياً أثناء تفكيك ومعالجة اللوحات الإلكترونية، لضمان منع انبعاث الديوكسينات السامة أو ترشح المعادن الثقيلة إلى التربة والمياه الجوفية.

5- حملات التوعية وإطلاق حملات إعلامية وطنية ومستدامة (عبر وسائل الإعلام والمؤسسات التعليمية) لرفع مستوى الوعي المجتمعي بمخاطر "السموم الرقمية "الكامنة في الأجهزة المنزلية والشخصية.

6- إرشاد المستهلك لمسارات التخلص وتوجيه الأفراد والمؤسسات نحو آليات الفرز من المنبع، والتعريف بمراكز التجميع الرسمية المعتمدة للنفايات الإلكترونية بدلاً من خلطها عشوائياً مع النفايات البلدية والمنزلية التقليدية.

7- تشجيع البحوث الميدانية والمخبرية وحث الجامعات ومراكز البحوث البيئية على توجيه طلاب الدراسات العليا نحو إجراء دراسات ميدانية تطبيقية، تقيس بدقة معدلات التراكم الحيوي للتلوث الإلكتروني في التربة والمياه المحيطة بمكبات النفايات الحالية.

8- تقييم الأثر الصحي ودعم الدراسات المشتركة بين قطاعات البيئة والصحة العامة لتقييم الآثار الصحية الطويلة المدى على المجتمعات المحلية القريبة من مواقع التخلص غير القانوني أو الحرق العشوائي للمخلفات التكنولوجية.

المراجع:

1. الشمري، أحمد، والعتيبي، فهد، والعنزي، سلطان .(2020) *المخاطر الصحية والبيئية للمعادن الثقيلة في المخلفات الإلكترونية*، المجلة العربية للبحث العلمي، الأمانة العامة للمجالس البلدية، الرياض، السعودية.

2. بهاء الدين، زينب .(2021) *التلوث البيئي: تحديات العصر الرقمي والحلول المستدامة* دار الفكر العربي، القاهرة، مصر.

3. جامعة ابن خلدون .(2024) *أثر النفايات الإلكترونية على الوسط البيئي: الإشكاليات القانونية وآليات الإدارة السليمة*، مجلة الدراسات البيئية والحقوقية، جامعة ابن خلدون، الجزائر.

4. حمّاد، مصطفى أحمد .(2022) *المسؤولية الممتدة للمنتج (EPR) كآلية قانونية لإدارة النفايات الإلكترونية*، مجلة البحوث القانونية والاقتصادية، كلية الحقوق، جامعة طنطا، مصر.

5. مقداد، خديجة .(2021) *إعادة تدوير النفايات الإلكترونية كمدخل لتحقيق متطلبات الاقتصاد الدائري*، مجلة استراتيجية والتنمية، جامعة قاصدي مرباح – ورقلة، الجزائر.

6. منظمة العالم الإسلامي للتربية والعلوم والثقافة (إيسيسكو) .(2019) *دليل الإدارة السليمة للنفايات الإلكترونية في الدول الأعضاء*، منشورات قطاع العلوم والتكنولوجيا، الرباط، المغرب.

7. نزار، بلال .(2023) *إدارة النفايات الإلكترونية وتداعياتها على السلامة البيئية والتنمية المستدامة*، مجلة العلوم البيئية والتنمية المستدامة، جامعة باتنة، الجزائر.

المراجع الأجنبية:

8- Baldé, C. P., et al. (2024). The Global E-waste Monitor 2024: Quantities, flows, and the circular economy potential. United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) & International Telecommunication Union (ITU).

9-Anderson, M., et al. (2023). *Barriers to implementing the Extended Producer Responsibility (EPR) model in developing regions*, Journal of Cleaner Production, 385, Article 135640.