



Environmental Digital Pollution in the Era of New Information and Communication Technologies: Types, Risks and Prevention



Received: 25/04/2025; Accepted: 18/02/2026

Ahlem BEY*

Constantine 3 University, (Algeria), ahlem.bey@univ-constantine3.dz

الكلمات المفتاحية:

تلوث إلكتروني بيئي؛
تكنولوجيا الإعلام
والاتصال الحديثة؛
بيئة؛
تكنولوجيا نظيفة؛

التلوث الإلكتروني البيئي في عصر تكنولوجيا الإعلام والاتصال الحديثة: أشكاله ومخاطره وسبل الوقاية منه

ملخص

يهدف هذا المقال، بالاعتماد على مراجعة الأدبيات المتخصصة، إلى عرض مظاهر التلوث الإلكتروني البيئي ودور صناعة واستخدام تكنولوجيا الإعلام والاتصال الحديثة ومخلفاتها الإلكترونية فيه، انطلاقاً من الإحاطة بمفهوم التلوث الإلكتروني البيئي؛ أشكاله، ومخاطره، وصولاً إلى سبل الوقاية وحماية البيئة عبر مختلف مراحل تصنيع واستخدام الوسائل الإلكترونية وما بعدهما، وإمكانية التحول نحو التكنولوجيا النظيفة.

Abstract

Based on a review of specialized literature, this article aims to present the types of environmental digital pollution and the role of new information and communication technologies production and use in this pollution.

The article begins by understanding the concept of environmental digital pollution; its types and risks, and finally, methods of prevention and environmental protection across various stages: the production and use of electronic media, then electronic waste and the possibility of transitioning to clean technology.

Keywords:

Environmental digital pollution ;
New information and communication technology ;
Environment ;
Clean technology.

* Corresponding author, e-mail: ahlem.bey@univ-constantine3.dz

Doi:

1 - مقدمة

شهد العالم خلال العقود الثلاثة الأخيرة تحولا جذريا نتيجة التطور الهائل في مجال تكنولوجيا الاتصال والمعلومات، وانعكس ذلك على مختلف مناحي الحياة اليومية للإنسان المعاصر، فمن الهواتف الذكية وشبكات الجيل الخامس إلى انترنت الأشياء والحوسبة السحابية والذكاء الاصطناعي... أصبحت تكنولوجيايات الاتصال الرقمية ركيزة أساسية في التواصل الاجتماعي، التعليم، والاقتصاد ومختلف المجالات والقطاعات (الحكومة، المجال العسكري، الأمني، الزراعة...)، حيث سهلت هذه الأخيرة الوصول إلى المعلومات والتواصل عن بعد، وضمان الحصول على الخدمات الرقمية المتنوعة عبر مختلف الوسائط والتطبيقات والمواقع.

خلال مسار هذا التحول الرقمي ومع كل طفرة تقنية تحتد المنافسة للاستثمار في هذه التقنيات والترويج لاستغلالها في قطاعات مختلفة، ومع تزايد استخدام تكنولوجيايات الاتصال الحديثة بشكل واسع، بدأت الدراسات في الاهتمام بآثارها الفردية والاجتماعية.

ضمن هذا السياق تعالت أصوات أولئك الذين يرون أن هذا التحول الرقمي له مقابل بيئي، وأن هناك مخاوف متزايدة من تفاقم الوضع أكثر، حيث أشارت إحصائيات وتقارير أممية وأخرى صادرة عن الاتحاد الأوروبي، وحتى دراسات أكاديمية أن التطور المتسارع لأنظمة الاتصال الرقمي رافقه ارتفاع كبير في استهلاك الطاقة لتشغيل مراكز البيانات وتصنيع الأجهزة، ونقل البيانات... والنتيجة بصمة كربونية تتزايد مع المنحنى المتصاعد لهذا التطور، وأعداد هائلة من الأجهزة الالكترونية الفردية وتلك الخاصة بمراكز البيانات والتي يستنزف تصنيعها الثروات الطبيعية وتخلف مع نهاية دورة حياتها القصيرة ملايين الأطنان من النفايات السامة.

لقد حازت النفايات الالكترونية على اهتمام أغلب الدراسات حول الآثار البيئية لتكنولوجيايات الاتصال الحديثة، لكن البحث في هذا المجال يتطلب النظر إلى ما هو أبعد من ذلك؛ وهو التلوث الإلكتروني البيئي الذي يبدأ من مرحلة تصنيع الأجهزة الالكترونية وكافة مكونات البنية التحتية لأنظمة الاتصال الرقمي وصولا إلى الاستخدام ثم النفايات. وهنا تبرز الحاجة إلى التعمق أكثر في آليات هذا التلوث وآثاره، وعليه نسعى في هذا المقال إلى الإجابة عن التساؤلات التالية:

- ما هو التلوث الإلكتروني البيئي؟ وما أهم أشكاله ومخاطره؟
- ما الحلول والإمكانيات المتاحة لحماية البيئة والتخفيف من هذه الآثار؟ وهل يمكن تحقيق مبدأ الاستدامة في تطوير تكنولوجيايات الاتصال المستقبلية؟

2- ماهية التلوث الإلكتروني

عند البحث عن "التلوث الإلكتروني" في الأدبيات باللغة الانجليزية يظهر المصطلح الأشهر والأكثر استخداما (E-Waste) "النفايات الالكترونية"، يقابله في الأدبيات باللغة الفرنسية مصطلح (la pollution digitale) أو la pollution numérique) أي التلوث الرقمي والذي يعد مرادفا للتلوث الإلكتروني بينما تعد النفايات الالكترونية شكلا فقط من أشكال هذا التلوث.

ويشير التلوث الرقمي إلى جميع أشكال التلوث الناتجة عن قطاع تكنولوجيا المعلومات: انبعاث الغازات المسببة للاحتباس الحراري، والتلوث الكيميائي، وفقدان التنوع البيولوجي، وإنتاج النفايات الإلكترونية.¹

كما يعرف التلوث الإلكتروني بأنه: الضرر أو التغيير الذي يلحق بعناصر البيئة، والذي يسببه إنتاج أو استخدام المنتجات الالكترونية التي تحتوي على مواد سامة أو ضارة، تؤدي بطريقة مباشرة أو غير مباشرة إلى الإضرار بالكائنات الحية المتصلة بها.²

وعليه يشمل التلوث الإلكتروني كل ضرر أو تغيير يلحق بالبيئة وبعناصرها الأساسية جراء إنتاج أو استخدام أو تلف الأجهزة الالكترونية وملحقاتها وضروريات تشغيلها (الكهرباء، الشبكات، الانترنت... الخ).

وينقسم إلى أشكال رئيسية هي:

- التلوث الناجم عن عملية التصنيع
- الانبعاثات الناجمة عن الاستهلاك المتزايد للطاقة
- التلوث الكهرومغناطيسي (Electromagnetic pollution)

- النفايات الإلكترونية (E-Waste)

3- أشكال التلوث الإلكتروني البيئي ومخاطره

في الواقع لا يقتصر التلوث الإلكتروني البيئي على النفايات الإلكترونية فقط بل يشمل كل مراحل حياة الأجهزة الإلكترونية من مرحلة التصنيع إلى الاستخدام وصولاً إلى نهاية عمرها الافتراضي وتلفها لتصبح نفايات إلكترونية. وفيما يلي شرح لمظاهر التلوث البيئي الناجمة عن كل مرحلة من هذه المراحل ومخاطرها؛

3-1- التلوث الإلكتروني الناجم عن التصنيع:

من بين مراحل حياة الأجهزة الإلكترونية يعتبر البعض "مرحلة التصنيع الأكثر تأثيراً على البيئة وتتمثل التأثيرات السلبية بشكل خاص في استنفاد الموارد المعدنية والأحفورية، واستهلاك الطاقة وانبعثات الغازات الدفيئة، وتحمض المياه..."³

يبدأ التصنيع بمرحلة أولية وهي استخراج الموارد اللازمة، وتتعلق هذه المرحلة بشكل أساسي باستخراج المعادن والمواد الخام اللازمة لإنتاج الأجهزة الإلكترونية الرقمية، فعلى سبيل المثال يتطلب تصنيع الهاتف الذكي العادي استخراج 30 معدناً مختلفاً مثل الغاليوم والنحاس والتنتالوم والكوبالت والذهب...⁴

ويعد قطاع تكنولوجيا الإعلام والاتصال مستهلكاً رئيساً للمعادن مما يساهم في استنفاد المواد الخام؛ فهو مصدر 3٪ من الطلب العالمي على الذهب والفضة، و 13٪ من البلاديوم، و 15٪ من الكوبالت. وقد بلغ الاستهلاك اليومي من المواد الخام من قبل الأوروبيين سنة 2013 ما يعادل 43 كغ، وقدرت منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية "أنه مع معدل نمو سنوي لإنتاجها الأولي البالغ 2٪، فإن احتياطات النحاس والرصاص والنيكل والفضة والقصدير والزنك لن تتجاوز 30 عاماً والألمنيوم والحديد بين 60 إلى 80 عاماً".⁵

وتجدر الإشارة أيضاً إلى أن 8 إلى 10٪ من الاستهلاك العالمي للطاقة ينجم عن استخراج الموارد المعدنية وتنقيتها، علاوة على ذلك فإن استخراج المعادن اللازمة لتكنولوجيا الإعلام والاتصال ينطوي على استخراج مواد أكبر بكثير من استخراج المعادن المستهلكة، بالتالي تكون الكتلة الحقيقية للأجهزة الإلكترونية (أي الكمبيوتر والشاشة والهاتف الذكي) أكبر بنسبة 50 إلى 350 مرة من الكتلة النهائية ويمثل وزن المنتج النهائي 2٪ فقط من إجمالي كتلة المواد الأولية، على سبيل المثال يتطلب صنع شريحة 2 غ استخدام 2 كغ من المادة الخام.

هذا الاستخدام المكثف للمواد المتعددة في تكنولوجيا الإعلام والاتصال لا يتجه للتضاؤل مع الاتجاه الملحوظ نحو تصغير الأجهزة في السنوات الأخيرة، بل إن هذا التصغير أدى إلى زيادة وتعقيد العناصر المستخدمة، مثال ذلك الهاتف الذكي؛ يمكن أن تحتوي الهواتف الذكية على 40 إلى 60 من المعادن المختلفة، بكميات تتراوح من بضعة مليغرامات إلى بضعة غرامات، ويتطلب إنتاج جهاز يبلغ وزنه 140 غ؛ طاقة تقدر بـ 700 ميغا جول، وينجم عنه انبعاثات أثقل بـ 400 مرة من تلك الناجمة عن استخدامه.⁶

من جهة أخرى؛ يطرح تصنيع تكنولوجيا الإعلام والاتصال مشاكل بيئية أخرى، حيث تستخدم المذيبات والأحماض والمعادن الثقيلة والمركبات العضوية المتطايرة التي تلوث البيئة وتتراكم في السلاسل الغذائية.⁷

3-2- التلوث الإلكتروني الناجم عن الاستخدام

تعد مرحلة الاستخدام أيضاً جزءاً مهماً من التأثير البيئي لتكنولوجيا الرقمية وتتمثل في مظهرين أساسيين هما؛ الاستهلاك المتزايد للكهرباء والتلوث الكهرومغناطيسي.

3-2-1- الاستهلاك المتزايد للكهرباء

يتراوح استهلاك النظام الرقمي للكهرباء بين 6 و 10٪ من إجمالي الاستهلاك العالمي للكهرباء (10٪ سنة 2019) أي ما يقارب 4٪ من انبعاث غازات الاحتباس الحراري (GHG)، مع اتجاه تصاعدي قدر بـ 5 إلى 7٪ سنوياً.⁸

لكن الأجهزة المنزلية ليست هي الوحيدة التي تستهلك الكهرباء، فعلى المستوى العالمي تمثل أجهزة الكمبيوتر الثابتة والمحمولة بالإضافة إلى أجهزتها الطرفية ما يعادل النصف من مساهمة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات في انبعاث غازات الاحتباس الحراري، بينما يرجع الباقي إلى البنية التحتية للاتصالات (الربع) ومراكز البيانات (الربع المتبقي).⁹

ووفقاً لـ "جوليت بوليت"- المتحدثة باسم منظمة السلام الأخضر في بلجيكا- إذا كانت الإنترنت دولة فستكون ثالث أكبر مستهلك للطاقة على هذا الكوكب بعد الولايات المتحدة الأمريكية والصين. لذلك فإن تأثير الويب والقطاع الرقمي على البيئة كبير جداً... ويرجع ذلك إلى الوجود الشامل للتكنولوجيا الرقمية في حياتنا اليومية وكذلك إلى كمية البيانات التي ينشئها المستخدمون ويخزنونها ويعالجونها عبر الأجهزة المتصلة.¹⁰

وبصرف النظر عن استهلاك الكهرباء لجهاز ما، فإن تكنولوجيا المعلومات والاتصالات لها أيضاً استهلاك للطاقة من خلال تشغيل الخوادم، التي تعمل بشكل مستمر لتقديم خدمات مختلفة مثل: قاعدة البيانات والبريد الإلكتروني والوصول إلى معلومات شبكة الويب العالمية والألعاب والبرامج، لذلك تستهلك هذه الخوادم الكثير من الطاقة. فعلى سبيل المثال يستهلك أكبر مركز بيانات Google، والذي يضم مليون خادم في المجموع، ما يصل إلى استهلاك مدينة يبلغ عدد سكانها 200000 نسمة.

إن استخدام الإنترنت له تكلفة طاقة وبيئية، حيث قدر أحد الباحثين "ويسنر جروس" "Wissner-Gross" أن بحثاً على Google يطلق 7 غرامات من مكافئ ثاني أكسيد الكربون. رغم أن الشركة تدعي أن البحث على خادمها ينتج عنه 0.2 غراماً من مكافئ ثاني أكسيد الكربون، مع العلم أن هناك ما يقرب 3.5 مليار عملية بحث على Google يومياً، والتي من شأنها أن تمثل بالأرقام التي قدمتها Google 700 طن من ثاني أكسيد الكربون.¹¹

3-2-2- التلوث الكهرومغناطيسي Electromagnetic pollution :

لا ينجم عن استخدام تكنولوجيا الاعلام والاتصال الحديثة استهلاك الكهرباء المؤدي إلى تزايد انبعاث الغازات المسببة للاحتباس الحراري فحسب، إنما هناك ظاهرة أخرى تنتج عن هذا الاستخدام تسمى التلوث الكهرومغناطيسي أو التلوث الناجم عن الحقول الكهرومغناطيسية (EM)(Electromagnetic fields).

التلوث الكهرومغناطيسي أو الموجي أو الضباب الإلكتروني (E-Smog) هو "كل ما يمكن أن ينتج عن الإلكترونيات من أضرار وأخطار، وتنحصر مصادره في المجالات الكهرومغناطيسية، التي تنبعث من شبكات الضغط العالي، وأجهزة الإرسال والبيث الإذاعي أو التلفزيون، وأجهزة الرادار والكمبيوتر، والأجهزة الكهربائية المنزلية، وأجهزة أبراج التليفون المحمول، والميكروويف أو الموجات القصيرة، والأشعة الكونية، والأشعة السينية أو أشعة إكس، وأشعة غاما، والأشعة فوق البنفسجية وتحت الحمراء".¹²

والحقول الكهرومغناطيسية (EM) موجودة في كل مكان، لذا فإن التعرض لها ليس ظاهرة جديدة. لكن خلال القرن العشرين كان تعرض البيئة للحقول الكهرومغناطيسية من صنع الإنسان في زيادة مطردة. هذه الحقول الكهرومغناطيسية مصدرها كل شيء يستخدم الكهرباء في محيطنا... لذلك فالجميع معرضون لمزيج معقد من المجالات الكهربائية والمغناطيسية سواء في المنزل أو في العمل لكن بأشكال متفاوتة. وأظهرت الدراسات أن التعرض لبضع دقائق فقط لمثل هذا النوع من الحقول سيؤثر على الإنسان لأكثر من 24 ساعة.

وتشير الدلائل المباشرة وغير المباشرة -رغم الجدل حول إثباتها- إلى أن المجال الكهرومغناطيسي يزيد من خطر الإصابة ببعض أنواع السرطان (مثل اللوكيميا وأورام الدماغ الأولية) وغيرها من التشوهات الفسيولوجية والنفسية نتيجة التعرض المستمر حيث؛ تم الإبلاغ عن أن بعض الأشخاص يفقدون التركيز عند تعرضهم لمجال مغناطيسي عالٍ، في حين تشير بعض الدراسات إلى أن هذه الحقول تثبط إنتاج الميلاتونين الذي يحفز النوم. وقد يؤثر هذا التعرض أيضاً على الجهاز العصبي والدليل على ذلك أقوى إلى حد ما من السرطان كأثر له.¹³

ومع دخول شبكة الجيل الخامس (5G) حيز الخدمة سنة 2019، وانتشارها في كل من أمريكا ودول الاتحاد الأوروبي والصين، بدأ العلماء في التحذير من تعاطم مخاطر المجالات الكهرومغناطيسية عن سابقتها رغم الميزات واليجابيات التي ستندعم بها التكنولوجيا الحالية.

تشكل تكنولوجيا شبكة الجيل الخامس ثورة هائلة في عالم الاتصالات، إذ توفر سرعة فائقة في نقل البيانات مقارنة بتكنولوجيا الجيل الرابع، مما يتيح وصولاً أسرع إلى المحتويات، مع إمكان نقل مليارات البيانات من دون عوائق. وتسمح تكنولوجيا الجيل الخامس بالربط بين الأجهزة الإلكترونية على أنواعها، مما يساهم في انتشار تقنيات أحدث على نطاق أوسع، كالسيارات الذاتية القيادة والمصانع المشغلة آلياً والعمليات الجراحية عن بعد والروبوتات "الذكاء" وغيرها.

وبهدف زيادة حجم البيانات المتداولة تستخدم شبكة الجيل الخامس نطاق ترددات أعلى من تلك المستخدمة في شبكة هواتف الجيل الرابع تتطوّر من 3.4 غيغا هيرتز لتتخطى 26 غيغا هيرتز مستقبلاً. ولكن كلما علت الترددات كانت الموجات أقصر، لذلك يتطلب نشر شبكة الجيل الخامس زيادة عدد الهوائيات، وهو ما يثير المخاوف حول تأثيراتها المحتملة.¹⁴

وتقول منظمة الصحة العالمية إن "الأثر البيولوجي الرئيسي للحقول الكهرومغناطيسية الناجمة عن الترددات اللاسلكية هو أثر حراري"، مما يعني ارتفاع الحرارة في المناطق المعرضة لهذه الحقول.¹⁵

في السياق ذاته، وقع حوالي 250 عالماً من جميع أنحاء العالم على عريضة إلى الأمم المتحدة ومنظمة الصحة العالمية حذروا فيها من أن الأجهزة الباعثة للإشعاع، على غرار الهواتف النقالة وأجهزة البث، يمكن أن ترفع من خطر الإصابة بالسرطان.

وأظهرت عدة دراسات سابقة على الأجيال الثاني والثالث والرابع لشبكات الهاتف النقال أن المجالات الكهرومغناطيسية يمكن لها أن تترك أثراً على جسم الإنسان تشبه الإجهاد، وتتسبب في تلف الحيوانات المنوية وأثار عصبية ونفسية. ويرى العلماء أن ضرر هذه التكنولوجيا لا يقتصر فقط على البشر، بل يمتد أيضاً إلى الحيوانات والنباتات.

تشير "سارة درايسن" من جامعة "آخن" الألمانية إلى أن دراسة أمريكية سابقة كشفت عن صلة واضحة بين المجالات الكهرومغناطيسية والإصابة بمرض السرطان لدى الفئران، حيث لاحظ الخبراء تغييرات في الجهاز العصبي والدماغ والقلب لدى العينة .

وتضيف "درايسن" "عندما يتم استخدام مجالات كهرومغناطيسية عالية التردد في الجيل الخامس لشبكات الخلوي، فإن الوضع يبدو أسوأ بكثير من ترددات الهاتف المحمول المعروف حالياً".¹⁶

3-3- نهاية العمر الافتراضي... النفايات الإلكترونية

3-3-1- تعريف النفايات الإلكترونية

النفايات الإلكترونية (E-waste, Electronic waste) والخردة الإلكترونية (E-scrap)، والإلكترونيات التي انتهى عمرها الافتراضي (End-Of-Life electronics) مصطلحات تُستخدم غالباً لوصف الإلكترونيات المستعملة التي انتهى أو أوشك عمرها على الانتهاء، ويتم التخلص منها أو التبرع بها أو تقديمها لإعادة التدوير.

وتُعرّف الأمم المتحدة النفايات الإلكترونية (E-waste) بأنها أي منتجات يتم التخلص منها سواء كانت تشتغل ببطارية أو قابس، وتحتوي على مواد سامة وخطيرة مثل الزئبق، والتي يمكن أن تشكل خطرًا شديدًا على صحة الإنسان والبيئة.¹⁷

وتشمل النفايات الإلكترونية أنماطًا مختلفة من المعدات الكهربائية والإلكترونية التي لم تعد ذات قيمة لمستخدميها. وقد تم تصنيفها إلى عدة فئات أكثرها قبولًا التصنيف المعتمد على تعليمات الاتحاد الأوروبي الخاصة بإدارة النفايات الكهربائية والإلكترونية (EU WEEE directive/2012/19/EU) التي تقسم النفايات الإلكترونية إلى الفئات العشر التالية:¹⁸

- **الأجهزة المنزلية الكبيرة** (Large household appliances): ثلاجات، مجمدات، غسالات، مجففات ملابس، غسالات أطباق، مواقد كهربائية وألواح تسخين، ميكروويف، مراوح كهربائية، ومكيفات الهواء.
- **الأجهزة المنزلية الصغيرة** (Small household appliances): المكانس الكهربائية، والمطاحن، وآلات القهوة، وأجهزة الحلاقة والتجفيف، وتنظيف الأسنان...
- **تكنولوجيا المعلومات (IT) ومعدات الاتصالات السلكية واللاسلكية** (Information technology and telecommunications equipment): الحواسيب الكبيرة والصغيرة، وأجهزة الكمبيوتر المحمولة، الطابعات، الهواتف والهواتف المحمولة...
- **المعدات الاستهلاكية** (Consumer equipment): أجهزة الراديو والتلفزيون وكاميرات الفيديو ومسجلات الفيديو ومسجلات الاستريو ومكبرات الصوت والآلات الموسيقية.
- **معدات الإضاءة** (Lighting equipment): مصابيح فلورية مستقيمة ومضغوطة ومصابيح تفريغ عالية الكثافة.
- **الأدوات الكهربائية والإلكترونية** (Electrical and electronic tools): المثاقب والمناشير، آلات الخياطة، مكواة اللحام، ومعدات الخراطة، والطحن، والحفر، والطي والثني، أو معالجة مماثلة للخشب والمعدن.
- **الألعاب والمعدات الترفيهية والسلع الرياضية** (Toys, leisure equipment, and sporting goods): القطارات الكهربائية أو مجموعات سيارات السباق وألعاب الفيديو والمعدات الرياضية بعناصر كهربائية.
- **الأجهزة الطبية** (Medical devices): أجهزة العلاج الإشعاعي وأمراض القلب وغسيل الكلى، وأجهزة التنفس الرئوية، وأجهزة التحليل.
- **أجهزة المراقبة والتحكم** (Monitoring and control instruments): كاشفات الدخان، منظمات التسخين، والحرارة.
- **الموزعات الآلية** (Automatic dispensers): موزعات المشروبات الساخنة والمنتجات الصلبة، الموزعات المالية، وجميع الأجهزة التي تقدم منتجات متنوعة آليًا.

وتمثل ثلاث فئات من نفايات المعدات الكهربائية والإلكترونية ما يقارب 90٪ من إجمالي النفايات الناتجة وهي:¹⁹

- الأجهزة المنزلية الكبيرة 42٪ .
- معدات تكنولوجيا الاعلام والاتصال 34٪ .
- المعدات الاستهلاكية 14٪ .

3-3-2- حجمها

يشير الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU) إلى أن النفايات الإلكترونية هي واحدة من أكبر تدفقات النفايات وأكثرها تعقيداً في العالم. وفقاً لـ Global E-waste Monitor 2020 أنتج العالم 53.6 مليون طن من النفايات الإلكترونية في عام 2019، 17% منها فقط (9.3 مليون طن) تم جمعها وإعادة تدويرها. بالإضافة إلى السموم الخطرة، تحتوي النفايات الإلكترونية على مواد قيمة، مما يجعل استعادتها بكفاءة وإعادة التدوير الآمن للنفايات الإلكترونية أمراً بالغ الأهمية للقيمة الاقتصادية وكذلك لصحة البشر والبيئة.

كما قدر برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP) في تقرير له عام 2015 "أن حوالي 60-90 % من النفايات الإلكترونية في العالم سنوياً، والتي تبلغ قيمتها حوالي 19 بليون دولار أمريكي، تبقى مهمة مرمية أو يتم تداولها بشكل غير قانوني.²⁰

3-3-3- مكوناتها ومخاطرها البيئية:

يتنوع تكوين النفايات الإلكترونية ويندرج ضمن فئتين "الخطرة hazardous" و"غير الخطرة non-hazardous". وبشكل عام، تتكون النفايات الإلكترونية من المعادن الحديدية وغير الحديدية والبلاستيك والزجاج والخشب والرقائقي ولوحات الدوائر المطبوعة والسيراميك والمطاط وعناصر أخرى، يشكل الحديد والصلب حوالي 50% منها، يليه البلاستيك (21%) والمعادن غير الحديدية (13%) ومكونات أخرى، وتتكون المعادن غير الحديدية من معادن مثل النحاس والألمنيوم والمعادن الثمينة مثل الفضة والذهب والبلاتين والبلاديوم وما إلى ذلك.

لكن ما يجعل النفايات الإلكترونية خطرة هو وجود عناصر مثل الرصاص، والزرنيق، والزرنيخ، والكاديوم، والسيلينيوم، والكروم سداسي التكافؤ، ومثبطات اللهب التي تتجاوز الكميات الحدية. حيث تحتوي النفايات الإلكترونية على أكثر من 1000 مادة مختلفة، العديد منها سام، ويخلق تلوثاً خطيراً عند التخلص منها. ومن بين النفايات الإلكترونية تعد أجهزة الكمبيوتر المتقدمة الأكثر خطراً على البيئة والصحة.²¹

وفيما يلي جدول يوضح أهم الملوثات المتضمنة في نفايات المعدات الكهربائية والإلكترونية:

جدول (1) يوضح أهم الملوثات المتضمنة في النفايات الإلكترونية

الملوث	التواجد
الزرنيخ	أشباه الموصلات، الصمامات الثنائية (الدايود)، الميكروويف، المصابيح (الصمامات الثنائية الباعثة للضوء)، الخلايا الشمسية
الباريوم	أنابيب الكترونية، حشو البلاستيك والمطاط، إضافات زيوت التشحيم
مثبطات اللهب البرومينية (المعالجة بالبروم)	التغليف، لوحات الدوائر (البلاستيك)، الكابلات، وكابلات PVC
الكاديوم	البطاريات، الأصباغ، اللحام، السبائك، لوحات الدوائر الكهربائية، بطاريات الكمبيوتر، الشاشات، أنابيب أشعة الكاثود (CRTs)
الكروم	الأصباغ، المفاتيح (الأزرار)، الألواح الشمسية
الكوبالت	العوازل
النحاس	الكابلات وأشرطة النحاس، لفائف، الدوائر، الأصباغ
الرصاص	بطاريات الرصاص القابلة لإعادة الشحن، الألواح الشمسية،

الترانزستورات ، بطاريات الليثيوم، مثبتات PVC (كلوريد البوليفينيل) ، الليزر، المصابيح، العناصر الكهروحرارية، لوحات الدوائر	الكريستال السائل
شاشات العرض	الليثيوم Lithium
الهواتف المحمولة، معدات التصوير الفوتوغرافي، معدات الفيديو (بطاريات)	الزئبق
المكونات في آلات النحاس والمكاوي البخارية؛ البطاريات في الساعات والآلات الحاسبة، الأزرار والمفاتيح، شاشات الكريستال السائل (الشاشات المسطحة)	النيكل
السبائك، البطاريات، المرحلات، أشباه الموصلات، الأصباغ	ثنائي الفينيل متعدد الكلور (PCBs)
المحولات، المكثفات، عوامل تليين للدهان، صمغ، بلاستيك	السيليونيوم
الخلايا الكهروضوئية، الأصباغ، آلات النسخ والفاكس	الفضة
المكثفات، المفاتيح، البطاريات والمقاومات	الزنك
الصلب والنحاس والسبائك والبطاريات التي يمكن التخلص منها والقابلة لإعادة الشحن والمواد المضيئة	

المصدر (Research Unit (LARRDIS) RAJYA SABHA Secretariat, 2011, pp 20-21)

أما عن مخاطرها وأضرارها، فالعديد من هذه المواد –السابقة الذكر- سامة ومسرطنة وتعد معقدة لدرجة يصعب معها إعادة التدوير بطريقة مستدامة بيئياً حتى في البلدان المتقدمة، وفيما يلي رصد لأهم مكونات النفايات الالكترونية التي تشكل خطراً على الصحة والبيئة؛

جدول (2) يوضح مخاطر أهم مكونات النفايات الالكترونية على الصحة والبيئة

العناصر	المخاطر
الرصاص	سم عصبي يؤثر على الكلى والجهاز التناسلي، ويمكن أن تكون الكميات الكبيرة منه قاتلة. يؤثر على النمو العقلي للأطفال. يؤدي التكسير الميكانيكي لأنابيب أشعة الكاثود (CRTs) وإزالة اللحام من الرقائق الدقيقة إلى إطلاق الرصاص كمسحوق وأبخرة.
البلاستيك	يحتوي البلاستيك الموجود في لوحات الدوائر الالكترونية والخزائن والاسلاك على مواد مسرطنة، حيث تنتج مثبطات اللهب المعالجة بالبروم أو مثبطات اللهب البرومينية الديوكسين البروميني والفيوران المسرطنين. يمكن أن تلحق الديوكسينات أضراراً بالجهاز التناسلي وجهاز المناعة. كما ينتج الديوكسين كذلك عن حرق الـ PVC - وهو أحد مكونات البلاستيك - ويمكن أن تتسرب مثبطات اللهب المعالجة بالبروم إلى التربة في مدافن النفايات، حتى الغبار الموجود على خزانات الكمبيوتر يحتوي على الديوكسينات البرومينية.
الكروميوم	يستخدم لحماية الحاويات المعدنية والألواح في الكمبيوتر من التآكل. يمكن أن يؤدي استنشاق الكروم سداسي التكافؤ أو الكروميوم 6 إلى إتلاف الكبد والكلى والتسبب في أمراض الشعب الهوائية بما في ذلك الربو الشعبي وسرطان الرئة.
الزئبق	يؤثر على الجهاز العصبي المركزي والكلى وجهاز المناعة. يعيق نمو الجنين ويؤذي الأطفال من خلال حليب الأم. يتم تحريره أثناء كسر وحرق لوحات الدوائر الالكترونية والمفاتيح. يمكن للزئبق الموجود في المسطحات المائية أن يشكل الزئبق الميثيلي من خلال النشاط الجرثومي. وهو مادة سامة ويمكن أن

تدخل في السلسلة الغذائية للإنسان من خلال الأحياء المائية	
البريليوم	يوجد في لوحات المفاتيح ولوحات الدوائر المطبوعة، وهو مادة مسرطنة وتسبب أمراض الرئة
الكاديوم	مادة مسرطنة. يتسبب التعرض لها على المدى الطويل في الإصابة بمرض إيتاي إيتاي (Itai-itai) الذي يسبب ألماً شديداً في المفاصل والعمود الفقري. كما يؤثر الكاديوم على الكلى ويلين العظام. يتم إطلاق الكاديوم في البيئة كمسحوق أثناء سحق وطحن البلاستيك، أنابيب أشعة الكاثود (CRTs) ولوحات الدوائر الإلكترونية. قد ينطلق الكاديوم في الجو مع الغبار وقد يدخل إلى المياه السطحية والجوفية.

المصدر بتصريف (Research Unit (LARRDIS) RAJYA SABHA Secretariat, 2011, p22)

ويعد الرصاص المادة الأكثر إثارة للقلق في النفايات الإلكترونية، إذ يشكل حوالي 6.3% من كتلة جهاز الكمبيوتر العادي، ويبلغ متوسط محتوى الرصاص حوالي 2 كغ في كل كمبيوتر، ويتم استخدامه كدرع من الإشعاع في زجاج الشاشة واللحام الذي يصل رقائق الكمبيوتر ولوحات الأسلاك المطبوعة. ويتسبب الرصاص بشكل أساسي في تلف الجهاز العصبي المركزي والمحيطي والدم والكلى والجهاز التناسلي كما تمت الإشارة له سابقاً.²²

وعلى سبيل المثال، تؤدي أنشطة إعادة تدوير النفايات الإلكترونية إلى تدهور مياه الشرب المحلية حيث تم العثور على أن عينة من مياه النهر من نهر "ليانجيانغ" بالقرب من "قرية إعادة التدوير" الصينية كانت تحتوي على مستويات من الرصاص أعلى بـ 2400 مرة من إرشادات مياه الشرب لمنظمة الصحة العالمية وبالتالي تنطوي على مخاطر صحية جسيمة.²³

إضافة إلى الرصاص والمواد المذكورة في الجدول أعلاه، هناك العديد من المواد الضارة الأخرى في النفايات الإلكترونية وهي الزرنيخ وثنائي الفينيل متعدد الكلور (PCBs) ومركبات الكربون الكلوروفلورية (CFCs) ومركبات الكربون الهيدروكلوروفلورية (HCFCs) والنيكل والأسبستوس.

بعض هذه المواد الكيميائية يساهم غالباً في ظهور الرشح والأبخرة السامة في مكبات النفايات، كتبخير الزئبق المعدني وثنائي الميثيلين. علاوة على اندلاع الحرائق الخارجة عن السيطرة التي تنشأ في مدافن النفايات، وإطلاق الديوكسينات والفيورانات شديدة السمية في الغلاف الجوي.²⁴

4- الحلول الممكنة والوقاية

مع اختلاف مستويات التلوث الإلكتروني البيئي من التصنيع إلى الاستهلاك إلى نهاية عمر المنتجات، تتباين الحلول من مستوى إلى آخر نستعرضها في الآتي:

4-1- تقليص الموارد المهددة في التصنيع

هناك اتجاه لتقليص الموارد المستهلكة في تصنيع وسائل الاتصال الإلكترونية من خلال خفض أحجام المنتجات لكن ذلك يخلق مشكلات أخرى متعلقة بزيادة استهلاك الطاقة عند الاستخدام وزيادة وتعقيد العناصر المستخدمة في التصنيع.²⁵

من جهة أخرى تم اقتراح تطوير عمليات استخراج ومعالجة المواد الضرورية للصناعات الرقمية، إذ ثمة مجال واسع لرفع كفاءة هذه العمليات مما يؤدي إلى خفض معدل نموها وكذلك خفض معدلات التلوث البيئي الناتجة عن هذه العمليات. كما ينبغي إلزام شركات التكنولوجيا الكبرى بتمويل عمليات التطوير هذه خاصة في الدول الفقيرة والنامية.²⁶

وعلى العموم ينصح لتقليل التلوث وإهدار الموارد في مرحلة التصنيع بما يلي²⁷:

- تعديل عملية الإنتاج
- تقليل حجم الأجهزة المصنعة
- الاسترداد وإعادة الاستخدام بدل استخدام موارد جديدة
- استخدام المواد والطاقة المتجددة
- تصنيع المكونات الإلكترونية والأجهزة الطرفية من مواد قابلة للتحلل البيولوجي
- النظر في خيار التغليف الأخضر واستخدام الحد الأدنى من مواد التغليف.

4-2- مرحلة الاستخدام

في مرحلة الاستخدام تم التركيز على المخاطر الواقعة على الأفراد وإهدار الطاقة الكهربائية الذي ينجم عنه زيادة انبعاث الغازات الملوثة والمساهمة في تغير المناخ لذلك فإن حل الحلول صبت في هذين النقطتين الرئيسيتين كما يلي:

أولاً- تخفيض استهلاك الكهرباء؛ ويتطلب ذلك تطوير تقنيات أكثر كفاءة لاستهلاك الكهرباء في مراكز البيانات والأجهزة الإلكترونية، إضافة إلى دفع مستخدمي الإنترنت إلى ممارسات أكثر مسؤولية حيث ينصح هنا ب²⁸:

- **إطفاء الأجهزة الإلكترونية عند عدم استخدامها؛** بما في ذلك جهاز استقبال الإنترنت، وجهاز استقبال التلفزيون، والشاشات لتقليل استهلاك الطاقة والإشعاع.

- **الحد من استخدام الحوسبة السحابية أو تجنبها؛** تعتمد الحوسبة السحابية (مثل I Cloud ، Google Drive) على تخزين البيانات عبر الإنترنت، مما يتطلب عمليات نقل مستمرة للبيانات بين الأجهزة الطرفية والخوادم، لذلك يفضل تخزين البيانات محلياً وحذف البيانات غير المستخدمة من الحوسبة السحابية لتقليل استهلاك الطاقة والحد من الانبعاثات.

- **تجنب مشاهدة مقاطع الفيديو عبر الإنترنت، والبث المباشر، والتلفزيون عبر الإنترنت؛** إذ يستهلك بث الفيديو عبر الإنترنت كمية كبيرة من الطاقة بسبب نقل كميات هائلة من البيانات. وبالتالي، يجب الحد من هذه الأنشطة أو تجنبها قدر الإمكان.

- **الحد من عدد المستقبلين والمرفقات في رسائل البريد الإلكتروني؛** إذ يمكن استبدال المرفقات الثقيلة بروابط لمشاركة المستندات.

ثانياً- الوقاية من خطر التلوث الكهرومغناطيسي؛ وينصح هنا باستخدام شاشات عالية الجودة للحد من الإشعاعات الصادرة من الكمبيوترات أو أجهزة التلفاز الرقمي، والابتعاد ما أمكن عن الإقامة الطويلة، أو الجلوس لفترات طويلة على مقربة من أماكن استقبال الإشعاعات، واستخدام الفلاتر وواقيات الشاشات.²⁹

4-3- معالجة النفايات الإلكترونية

تعد قضية التخلص من الأجهزة الإلكترونية في نهاية عمرها الافتراضي أو التي لم تعد تواكب التطور التكنولوجي جوهر مشكلة التلوث الإلكتروني³⁰، حيث يؤدي الانسحاق وراء التحديث المستمر للأجهزة إلى آثار سلبية متعددة؛ فهو يؤدي إلى قصر دورة حياة الأجهزة، مما يزيد من معدلات إنتاج المخلفات الإلكترونية. كما يشجع شركات التكنولوجيا على التخطيط المسبق لتحديث منتجاتها بمعدلات طفيفة على أجيال متعددة، مما يرفع من مبيعاتها في حين يكون العائد الفعلي للتحديث على المستخدم ضئيلاً.³¹

ولمعالجة مشكلة النفايات الإلكترونية المتراكمة حول العالم وبمعدلات خيالية، قدمت مقترحات بالتوجه نحو إدارة مستدامة لهذه النفايات لأن إعادة تدويرها بطرق تقليدية خلف مشكلات بيئية جديدة. ونقترح في هذا الصدد ما يلي: ³²

- الحد من التجديد المستمر للنفايات الطرفية الرقمية (الحواسيب والهواتف المحمولة) من خلال الحد من الإنهاء المتعمد لصلاحية الأجهزة عن طريق عدم دعمها من قبل البرمجيات الجديدة.
- رفع معدلات المعالجة الصديقة للبيئة للمخلفات الإلكترونية، وتقديم العون للدول الفقيرة والنامية لتطبيق سياسات إعادة تدوير صديقة للبيئة.
- تجنب إلقاء النفايات الإلكترونية مع المخلفات العادية في مكبات القمامة، أو في العراء أو في المجاري المائية.
- تجنب التفكيك اليدوي للمعدات الإلكترونية أو حرق وتسخين مخلفاتها أو محاولة إذابتها بالأحماض.
- إصدار تشريعات ملائمة وتحديد وتفعيل الإجراءات المختلفة التي من شأنها تمكين المواطنين من التخلص من النفايات الإلكترونية بشكل آمن وذلك بتحديد مراكز لجمع النفايات الإلكترونية في مختلف الأحياء والمدن لغرض إعادة تصنيعها. بالإضافة إلى تعزيز الشراكة مع القطاع الخاص لإنجاح التنمية البيئية، واعتماد تكنولوجيا صديقة للبيئة لإدارة النفايات بمختلف أنواعها.
- عدم إغفال مسؤولية الشركات العملاقة المصنعة للأجهزة الإلكترونية، والتي تجني أرباحاً هائلة، في حل مشكلة النفايات الإلكترونية، بدءاً من توقفها عن استخدام المواد الكيميائية السامة في التصنيع، وتحسين برامج إعادة التصنيع. وبالتالي فإن هذه الشركات مطالبة باعتماد المعايير البيئية الوقائية التي ينبغي أن تفرضها التشريعات الحكومية الصارمة لضمان إعادة تصنيع المنتجات الإلكترونية بأمان.

4-4- تعزيز الوعي البيئي في المجتمع

لضمان نجاعة الحلول المقترحة على المستويات المختلفة يجب رفع الوعي الجماهيري بالأثر البيئي للاستخدامات المختلفة للتكنولوجيا الرقمية، ويشمل ذلك توعية الأفراد والشركات بضرورة تجنب إنتاج كميات كبيرة من النفايات الإلكترونية، والحد من الاستهلاك غير الضروري للطاقة. ³³

5- خاتمة

في الأخير نؤكد بما لا يدع مجالا للشك الآثار السلبية الناجمة عن صناعة واستخدام تكنولوجيا الاتصال الحديثة (في مقدمتها تصنيع الحواسيب والهواتف الذكية) الذي يستنزف الموارد الطبيعية وما ينتج عنها من مخلفات بعد انتهاء صلاحيتها، إضافة إلى آثار شبكات الاتصال الرقمية ومراكز البيانات التي توفر الخدمات للأفراد مخلفة معدلات مرتفعة من استهلاك الطاقة، ينجم عنها تزايد الانبعاثات الملوثة للبيئة وتلك التي تساهم في تغير المناخ. إضافة إلى مخاطر الأشعة الكهرومغناطيسية على صحة الأفراد .

ومع استمرار الاعتماد المتزايد على هذه التكنولوجيا في ظل التحول الرقمي أصبح من الضروري النظر في حتمية تحقيق التوازن بين التطور التكنولوجي في مجال الاتصال من جهة وحماية البيئة من التلوث واستنزاف الموارد وتغيير المناخ من جهة أخرى.

وعليه فإن أي محاولة للتطور أكثر في هذا المجال تستدعي الالتزام بمبدأ الاستدامة، مع ضرورة تضافر الجهود بين مختلف الفاعلين من الحكومات والشركات والأفراد.

ونشير إلى أن محاولة حل مشكلة التلوث الإلكتروني على مستوى واحد غير مجدية، بل لابد من حلول متكاملة تنطلق من مستوى التصنيع وصولاً إلى مستوى انتشار النفايات الإلكترونية، والوعي بخطورتها على البيئة.

المراجع

- 1 -Greenpeace France, (s d), **La pollution numérique, qu'est-ce que c'est?**, disponible en ligne <https://www.greenpeace.fr/la-pollution-numerique> , consulté le 01/08 /2023.
- 2 - أحمد السيد، (د س)، **التلوث الإلكتروني ومدى خضوعه للقوانين المعالجة لإشكالية التلوث في القانونين المصري والإماراتي**، متاح على موقع كلية القانون، جامعة طنطا – مصر،
<https://law.tanta.edu.eg/files/conf5/التلوث%20الإلكتروني%20ومدى%20خضوعه%20لللقوانين%20المعالجة%20لإشكالية%20التلوث%20في%20القانونين%20المصري%20والإماراتي%20.pdf> ،
تاريخ الزيارة 2023/08/01، ص 4.
- 3 - Développement Durable Wallonie, (s d), **Les impacts du numérique sur l'environnement**, disponible en ligne https://developpementdurable.wallonie.be/sites/default/files/user_uploads/Les%20impacts%20du%20numérique.pdf , consulté le 01/08 /2023.
- 4 - Schurmans Maxime ; (2019-2020), **La pollution numérique, la face cachée de la dématérialisation**, Mémoire Présenté en vue de l'obtention du Master en Ingénieur de Gestion, Solvay Brussels School Economics & Management, Université Libre de Bruxelles, pp 91-92.
- 5 - Développement Durable Wallonie, Op Cit.
- 6 - Ibid.
- 7 - Ibid.
- 8 - Schurmans Maxime, Op Cit, p 31
- 9 - Flipo Fabrice ,et al. (2013). **La face cachée du numérique ; L'impact environnemental des nouvelles technologies**, disponible en ligne <https://www.researchgate.net/publication/297712483>, consulté le 28/01/2023, p11 .
- 10 -Schurmans Maxime, Op Cit, p 31.
- 11 - Développement Durable Wallonie, Op Cit.
- 12- دماج همدان، (2015/7/3)، **مخاطر النفايات الإلكترونية على حياة الإنسان وبيئته**، متاح على الخط <http://hamdandammag.blogspot.com>، تاريخ الزيارة 2023/01/25.
- 13 -Maina Ibrahim, and Al, (2013), **Risk Assessment of Magnetic Field Pollution in Average Home**, International Journal of Engineering, IJERA, Vol. 3, Issue 2 , p1126, available online www.ijera.com/papers/Vol3_issue2/GB3211261130.pdf .
- 14 - الجزيرة نت، (2019/11/18)، **المخاطر الصحية لشبكة اتصالات الجيل الخامس.. بين الحقيقة والوهم**، متاح على
www.aljazeera.net/health/2019/11/18/الجيل-الخامس-شبكة-اتصالات-الجيل-الخامس، تاريخ الزيارة، 2023 /4/9.
- 15 - المرجع نفسه.
- 16 - موقع DW عربية، (2019/03/23)، **هل تضع تكنولوجيا "G5" صحة الإنسان في خطر؟**، متاح على الخط <https://p.dw.com/p/3FYxB>، تاريخ الزيارة 2023/4/9.

17 -Geneva Environment Network ,(2023) , **The Growing Environmental Risks of E-Waste**, available online www.genevaenvironmentnetwork.org/fr/ressources/nouvelles/the-growing-environmental-risks-of-e-waste/#scroll-nav__2, 15/08 /2023 .

18 -Britannica, (2023), **Electronic Waste**, available online, www.britannica.com/technology/electronic-waste, 15/08/2023 .

19 - Sahu. K. K, and Agrawal. A , (2008), **Processing of Electronic Waste (E-Waste)**, In: Proceedings on Extraction of Nonferrous Metals and their Recycling - A Training Programme, Feb. 27-29th, 2008, National Metallurgical Laboratory, Jamshedpur (INDIA), p117 , available online <https://eprints.nmlindia.org/5850/> .

20 - Geneva Environment Network, Op Cit.

21 - Research Unit (LARRDIS) RAJYA SABHA Secretariat, **e-waste in India** , NEW DELHI , June 2011, pp 3-4.

22 - Sahu. K. K, and Agrawal. A , Op Cit, p 120.

23 -Research Unit (LARRDIS) RAJYA SABHA Secretariat, Op Cit , p24.

24 - Sahu. K. K, and Agrawal. A , Op Cit, p 120.

25 - Schurmans Maxime, Op Cit, p34

26- مسار(جمعية حقوقية وتقنية)، (2024 /7/29)، الأثر البيئي للتكنولوجيا: من مراكز البيانات إلى الذكاء الاصطناعي،

<https://masaar.net/ar/الب-مراكز-من-مراكز-البيانات-إلى-الذكاء-الاصطناعي> ، تاريخ الزيارة 2024/10/07

27 - Sitaramaiah .Y, Kusuma Kumari .M, (October 2014), **Impact of Electronic Waste leading to Environmental Pollution**, National Seminar on Impact of Toxic Metals, Minerals and Solvents leading to Environmental Pollution(India), Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences, JCHPS Special Issue 3, P 41, available online; www.jchps.com .

28 - Développement Durable Wallonie, Op Cit

29 - دماج همدان ، مرجع سابق.

30 - دماج همدان ، المرجع نفسه.

31 - مسار(جمعية حقوقية وتقنية)، مرجع سابق.

32 - مسار(جمعية حقوقية وتقنية)، مرجع سابق، و دماج همدان، مرجع سابق.

33 - مسار(جمعية حقوقية وتقنية)، مرجع سابق.