جمهورية العراق
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة ميسان
كلية العلوم
قسم علوم الحياة

التلوث البلاستيكي وتأثيراته البيئية

بحث مقدم إلى

مجلس كلية العلوم / جامعة ميسان كجزء من متطلبات نيل درجة البكالوريوس

في علوم الحياة

من قِبل الطالبتين:

سرور جاسم طارش

زينب عزيز حيال

بإشراف:

أ.م.د. أسراء ابراهيم لازم

1466هـ

2025م

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿يَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ﴾

صدق الله العلي العظيم

(المجادلة آية: ١١)

توصية الاستاذ المشرف

اشهد ان اعداد البحث الموسوم **(التلوث البلاستيكي وتأثيراته البيئية)** من قبل الطالبتان **(سرور جاسم طارش وزينب عزيز حيال)** قد جرى تحت اشرافي وهو جزء من متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في علوم الحياة

الاسم: أ.م.د. اسراء ابراهيم لازم

اللقب العلمي: أستاذ مساعد دكتور

العنوان: جامعة ميسان / كلية العلوم

التوقيع:

التاريخ: / / ٢٠٢٥

توصية رئيس قسم علوم الحياة

اشارة الى التوصيات المقدمة من قبل **أ.م.د. أسراء ابراهيم لازم** احيل هذا البحث الى لجنة المناقشة لدراسته وبيان الرأي فيه

رئيس القسم: أ.د. صالح حسن جازع

اللقب العلمي: أستاذ دكتور

التوقيع:

التاريخ: / / ٢٠٢٥

الاهداء

إلى من غرسوا في قلبي حبّ العلم وكانوا السند والنور في طريقي إلى والديَّ العزيزين لولا دعاؤكما وصبركما لما بلغت هذه اللحظة إلى من كانوا بقربي بالكلمة والدعاء أصدقائي وأحبّتي إلى كل من آمن بي وشجّعني في لحظات ضعفي أهدي هذا البحث ثمرة جهدي وتعب سنيني راجية أن يكون بذرةً لخيرٍ يُزهر في طريقي وطريق من يأتي بعدي.

وإلى نفسي...

شكرًا لكِ لأنكِ صبرتِ حين كان الصبر مُرهقًا ولأنكِ واصلتِ الطريق رغم التعب والنهوض رغم العثرات هذا الإنجاز لكِ لكل لحظةٍ وجعٍ خبّأتِها خلف ابتسامة ولكل دمعةٍ مسحتِها بصمت... وأكملتِ المسير بثبات.

الشكر والتقدير

الشكر والثناء لله عز وجل على نعمة الصبر والقدرة على إنجاز العمل ف لله الحمد على هذه النعم

يطيب لي أن أتقدم بالشكر الجزيل والامتنان إلى أ.م.د. اسراء ابراهيم لازم التي تفضلت بالإشراف على هذا البحث ولكل ما قدمته لي من دعم وتوجيه وإرشاد لإتمام هذا العمل على ما هو عليه ف لها أسمى عبارات الثناء والتقدير

كما أتقدم بالشكر إلى الأساتذة الكرام وكل من ساهم في تعليمي

كما أشكر كل من ساعدني من قريب أو من بعيد ولو بكلمة أو دعوة صالحة

قائمة المحتويات

اسم الموضوع	رقم الصفحة
الخلاصة	V
المقدمة	2-1
اهداف البحث	3
التلوث البلاستيكي	
مفهوم التلوث البلاستيكي	5-4
أنواع التلوث البلاستيكي	7-5
أسباب ومصادر التلوث البلاستيكي	14-8
تأثيرات التلوث البلاستيكي	25-15
الاســـــتـــنتاجات	27-26
التـــوصـــيات	29-28
المصادر	34-30

قائمة الأشكال

رقم الشكل	اسم الشكل	رقم الصفحة
1	التلوث بالبلاستيك الكبير	7
2	تلوث الشواطئ بأدوات بلاستيكية تستخدم لمرة واحدة	9
3	مكب نفايات بلاستيكية مفتوح في منطقة حضرية	10
4	حيوانات بحرية عالقة في شبكة الصيد	12

5	تلوث السواحل	13
6	مكب نفايات بلاستيكية ناتجة عن المصانع	14
7	تـــظهر تلوث البحر	15
8	صورة الجسيمات البلاستيكية الدقيقة في التربة	16
9	النفايات البلاستيكية والبلاستيك الدقيق في قاع البحر	17
10	نباتات نابتة في تربة ملوثة بجزيئات بلاستيكية	19
11	تلوث بلاستيكي داخل المحيط سلحفاة بحرية عالقة داخل كيس بلاستيكي	20
12	الانبعاثات الناتجة عن صناعة البلاستيك	22
13	دولفين عالق في شبكة صيد	23
14	انتقال البلاستيك الدقيق في شبكة الغذاء البحرية	25

قائمة المخططات

رقم المخطط	اسم المخطط	رقم الصفحة
1	الاستهلاك المقدر للبلاستك حسب قطاع الاستخدام النهائي	11

الخلاصة

Abstract

يُعد التلوث البلاستيكي من أبرز التحديات البيئية المعاصرة التي تهدد توازن النظم البيئية وصحة الكائنات الحية والإنسان. وقد تناول هذا البحث دراسة شاملة لأسباب التلوث البلاستيكي ومصادره وأنواعه بالإضافة إلى تحليل علمي مفصّل لتركيبه الكيميائي وتأثيراته الواسعة على البيئة البرية والبحرية والهواء والتربة. أن البلاستيك نظرًا لبطء تحلله يتراكم في مختلف عناصر البيئة ويسهم في تدهور خصوبة التربة وتلوث المحاصيل واختناق الكائنات البحرية وتدهور المواطن الطبيعية للأنواع الحيوانية إضافة إلى انتقال مكوناته الدقيقة عبر السلسلة الغذائية إلى الإنسان مما يؤدي إلى آثار صحية مزمنة.

كما بيّن البحث أن أحد أبرز مسببات هذا التلوث هي التطور والتزايد في إنتاج البلاستيك خصوصًا المنتجات أحادية الاستخدام إلى جانب قصور في أنظمة إدارة النفايات وضعف الوعي البيئي. وقد استعرضت الدراسة كذلك التصنيفات المختلفة للتلوث البلاستيكي ومنها التلوث الأولي الناتج عن الجسيمات المصنعة مباشرة والثانوي الناتج عن تحلل النفايات البلاستيكية الكبيرة.

يلخص البحث إلى أن التلوث البلاستيكي لا يُعد مجرد نفايات مرئية بل هو أزمة بيئية عالمية ذات أبعاد صحية واقتصادية خطيرة تتطلب تبنّي استراتيجيات متكاملة ترتكز على مفاهيم الاستدامة والاقتصاد الدائري وترشيد الاستهلاك وتعزيز البحث العلمي وتشديد الرقابة على الأنشطة الصناعية والتشريعية بهدف الحد من تفاقم هذه الظاهرة وضمان بيئة سليمة وآمنة للأجيال القادمة.

1. المقدمة Introduction

يُعرف التلوث البيئي بأنه إدخال مواد أو طاقة إلى البيئة سواء كانت طبيعية أو صناعية تؤدي إلى تغييرات غير مرغوبة تضر بالنظم البيئية وتؤثر على الكائنات الحية وقد أوضح Smith أن التلوث ليس ظاهرة حديثة بل يمتد إلى العصور القديمة إلا أنه تفاقم بشكل كبير منذ الثورة الصناعية نتيجة الاستغلال المفرط للموارد الطبيعية دون مراعاة التوازن البيئي[Smith, 2020]. في حين يرى Jones أن التلوث يحدث عندما تتجاوز كمية الملوثات قدرة البيئة على استيعابها أو معالجتها مما يؤدي إلى خلل في استقرار النظم البيئية [Jones, 2018]. وبيّن Williams أن التلوث يُعد نتيجة مباشرة للأنشطة البشرية مثل الصناعة والزراعة واستهلاك الطاقة وله تأثيرات تتراوح بين المحلية والعالمية تشمل تغيّر المناخ وتدمير المواطن الطبيعية للكائنات الحية ,Williams] [2017.أما Brown فقد وصف التلوث بأنه خلل في النظام البيئي ناتج عن تراكم الملوثات بمعدلات تفوق قدرة البيئة على تحييدها مثل المعادن الثقيلة والمبيدات الحشرية [Brown, 2019] في المقابل اعتبر Miller التلوث أحد أبرز العوائق أمام تحقيق التنمية المستدامة لما يسببه من استنزاف للموارد الطبيعية وتدهور في الصحة العامة مؤكدًا على ضرورة تبني استراتيجيات كالاستهلاك الرشيد والاقتصاد الدائري للحد من هذه الظاهرة [Miller, 202]. يعد التلوث البلاستيكي من الأنواع المهمة للتلوث البيئي، ويُعرف التلوث البلاستيكي بأنه تراكم المواد البلاستيكية في البيئة نتيجة الاستهلاك غير المستدام وسوء إدارة النفايات مما يؤدي إلى آثار بيئية وصحية خطيرة. تُعد مادة البلاستيك من المركبات الصناعية التي غيّرت وجه العالم في القرن العشرين فهي مادة مرنة، خفيفة، رخيصة وسهلة التصنيع وتُستخدم على نطاق واسع في مجالات التعبئة والتغليف والصناعات الطبية، وصناعة السيارات، والمنتجات الإلكترونية. يُصنّع البلاستيك من مشتقات البترول الخام والغاز الطبيعي، ويحتوي على بوليمرات صناعية مثل البولي إيثيلين والبولي فينيل كلورايد، بالإضافة إلى مضافات كيميائية مثل الملدنات والمثبتات الحرارية والأصباغ. هذا التركيب الكيميائي المعقد يجعل من البلاستيك مادة غير قابلة للتحلل البيولوجي بسهولة، ما يساهم في تراكمه في البيئة لفترات طويلة تمتد إلى مئات السنين[Geyer *et al*., 2017] .

تشير التقديرات إلى أن أكثر من ٣٠٠ مليون طن من البلاستيك تُنتَج سنويًا، ولا يُعاد تدوير سوى جزء ضئيل منها بينما يُلقى الباقي في المحيطات، الأنهار، التربة وحتى الهواء مسبّبًا تدهورًا متسارعًا في النظم البيئية المختلفة[Andrady, 2011] .

تتعدد مُسبّبات التلوث البلاستيكي فإلى جانب الاستخدام الواسع للبلاستيك أحادي الاستخدام يعاني العالم من ضعف في أنظمة إدارة النفايات وقصور تشريعي واستهلاك مفرط من قبل الأفراد وتزايد معدلات التصنيع دون رقابة بيئية فعّالة[PlasticsEurope, 2023] .

وتكمن خطورة هذا النوع من التلوث في تأثيراته الواسعة التي تطال مختلف مكوّنات البيئة فهي تؤثر على النباتات تمنع النفايات البلاستيكية تسرب المياه والهواء إلى الجذور وتُطلق مواد سامة تضر بالبنية الفسيولوجية للنبات كذلك الحيوانات فتؤدي المخلفات البلاستيكية إلى اختناق الكائنات البحرية والبرية وتدهور سلوكها الغذائي والتكاثري بعد تأثيرات تدخل جزيئات البلاستيك الدقيقة إلى الجسم عبر السلسلة الغذائية وقد تسبب اضطرابات هرمونية وأمراضًا مزمنة مثل السرطان وأمراض القلب

من الناحية المناخية فإن صناعة البلاستيك تُعد من المصادر الرئيسية لانبعاثات الغازات الدفيئة، مما يسهم في تفاقم ظاهرة الاحتباس الحراري [Zheng & Suh, 2019].

كما يؤدي التلوث البلاستيكي إلى تشويه النُظم البيئية وتشويش التوازن الطبيعي، إذ تُلقى ملايين الأطنان من المخلفات البلاستيكية سنويًا في البيئات البحرية والبرية مما يؤدي إلى تراكمها في المواطن الطبيعية وتعطيل الوظائف البيئية الأساسية. وقد أوضح Jambeck وزملاؤه أن هذه الظاهرة تُمثل تهديدًا مباشرًا للنُظم البيئية الساحلية والبحرية وتؤدي إلى أضرار طويلة الأمد على الكائنات الحية (Jambeck *et al*., 2015).

كذلك يؤثر التلوث البلاستيكي على التنوع البيولوجي، حيث تُبتلع الجزيئات البلاستيكية الدقيقة من قبل العديد من الكائنات البحرية مثل الأسماك والسلاحف والطيور مما يؤدي إلى انسداد الجهاز الهضمي، ضعف التغذية، وأحيانًا الوفاة، كما بيّن Gall و Thompsonفي دراستهما حول تأثير الحطام البحري على الحياة المائية.(Gall & Thompson, 2015)

ولا يقتصر الأثر على الكائنات الحية، بل يمتد إلى التربة والمياه، حيث يطلق البلاستيك المتحلل ببطء مركبات كيميائية سامة تتسرب إلى البيئة مسببة تلوثًا للتربة والمياه الجوفية، مما قد يؤثر على سلامة الموارد الطبيعية، كما أشار إلى ذلك Lithner وآخرون في تصنيفهم للمخاطر الكيميائية للبوليمرات (Lithner *et al*., 2011).

أما من حيث التأثيرات المناخية، فإن عمليات تصنيع البلاستيك ونقله وحرقه تُسهم في انبعاث كميات كبيرة من الغازات الدفيئة مثل ثاني أكسيد الكربون والميثان، مما يجعل البلاستيك مساهمًا غير مباشر في تغير المناخ وزيادة ظاهرة الاحتباس الحراري، وفق ما بينه Zheng و Suh (Zheng & Suh, 2019).

ومن الناحية الاقتصادية، يُثقل التلوث البلاستيكي كاهل الحكومات من خلال التكاليف المرتفعة المرتبطة بعمليات التنظيف والتخلص من النفايات، فضلًا عن خسائر في قطاعي السياحة والصيد البحري، كما أوضح McIlgorm وزملاؤه في تقييمهم للتكاليف الاقتصادية للحطام البحري في منطقة آسيا والمحيط الهادئ.(McIlgorm *et al*., 2011)

كل هذه المعطيات تجعل من التلوث البلاستيكي خطرًا بيئيًا متصاعدًا يتطلب استجابة شاملة وفعّالة من صناع القرار والمجتمع العلمي والسكّان على حد سواء.

2. أهداف البحث Aim of study

1. التعرف على التلوث البلاستيكي بشكل مفصل، من حيث مفهومه وتأثيراته على البيئة.
2. دراسة أنواع التلوث البلاستيكي ومدى تأثيره على الأنظمة البيئية المختلفة.
3. معرفة أسباب التلوث البلاستيكي، والمصادر الرئيسية لهذه المشكلة.
4. مناقشة التأثيرات البيئية للتلوث البلاستيكي وتأثيره علىٰ الكائنات الحية بصورة عامة.

استعراض المراجع Literatures Review

التلوث البلاستيكي

1. مفهوم التلوث البلاستيكي

يُعرَّف التلوث البلاستيكي بأنه تراكم المواد البلاستيكية في البيئة، مما يؤدي إلى أضرار بيئية وصحية خطيرة بسبب صعوبة تحللها واستمرارها لفترات طويلة في الطبيعة وفقًا للدراسات الحديثة فإن البلاستيك يُعد أحد أكثر الملوثات البيئية انتشارًا حيث يتم إنتاج أكثر من (400 مليون طن سنويًا) ولا يتم إعادة تدوير سوى نسبة صغيرة منه بينما ينتهي الباقي في المحيطات والتربة والمسطحات المائية.[Geyer *et al*., 2022]

في العقود الأخيرة تفاقمت مشكلة التلوث البلاستيكي بسبب الاعتماد المتزايد على المنتجات البلاستيكية ذات الاستخدام الواحد إذ تشير التقديرات إلى أن أكثر من (١٤ مليون طن) من البلاستيك تصل إلى المحيطات سنويًا مما يهدد الحياة البحرية ويؤدي إلى اختلال التوازن البيئي [Borrelle *et al*., 2020].

وتؤكد التقارير أن الميكروبلاستيك (Microplastics) أصبح يشكل خطورة خاصة حيث يدخل في سلاسل الغذاء ويصل إلى جسم الإنسان عبر استهلاك المياه والأطعمة البحرية [Campanale *et al*., 2021].

يتكوَّن البلاستيك من مركبات عضوية تُصنّع أساسًا من مشتقات النفط الخام والغاز الطبيعي عبر عمليات بتروكيميائية معقدة وتُستخدم في تصنيعه أنواع مختلفة من البوليمرات مثل:

البولي إيثيلين(PE) ، البولي بروبيلين (PP)، البولي فينيل كلورايد(PVC) ، البوليسترين (PS)، والبولي إيثيلين تيرفثالات (PET) والتي تُشكّل معًا أكثر من ٩٠٪ من البلاستيك المستخدم عالميًا [Geyer *et al*., 2017].

يتألف كل نوع من هذه البوليمرات من سلاسل طويلة من الجزيئات تُعرف باسم المونومرات والتي يتم ربطها ببعضها البعض عبر تفاعلات كيميائية تُعرف بـ "تفاعلات البلمرة" على سبيل المثال يتم تصنيع البولي إيثيلين من مونومر الإيثيلين (C_2H_4) بينما يُنتج البولي فينيل كلورايد من مونومر فينيل كلورايد (C_2H_3Cl) وتتميّز هذه السلاسل البوليمرية بأنها مقاومة للتحلل البيولوجي ما يجعلها تبقى في البيئة لمئات السنين دون أن تتحلل طبيعيًا.

ولا يتوقف الأمر على المكونات الأساسية فحسب بل يُضاف إلى تركيبة البلاستيك العديد من المضافات الكيميائية لتحسين خصائصه الفيزيائية والميكانيكية مثل:

- الملدنات (Plasticizers) :لجعل البلاستيك أكثر مرونة مثل مادة الفثالات.
- المثبتات الحرارية (Heat stabilizers): لمنع تدهوره عند التعرض للحرارة.

- المثبطات الضوئية (UV stabilizers) :للحماية من تأثير الأشعة فوق البنفسجية.
- الأصباغ والألوان :(Pigments and dyes) لإضفاء اللون المطلوب.
- المضادات الحيوية أو مضادات الأكسدة :لإطالة عمر المنتج.

هذه الإضافات قد تُطلق في البيئة مع الوقت خاصة عند تعرض البلاستيك للتآكل أو التحلل الجزئي أو الحرق غير السليم وقد أثبتت الدراسات أن بعض هذه المواد مثل الفثالات وثنائي الفينول A (BPA) لها تأثيرات سمية شديدة على الكائنات الحية، وتُصنّف على أنها مُعطّلات للغدد الصماء لما لها من تأثيرات تشبه تأثير الهرمونات في الجسم البشري [[Talsness et al., 2009.

ويُظهر التحليل الكيميائي للنفايات البلاستيكية أن بعضها يحتوي على آثار من المعادن الثقيلة مثل الكادميوم والرصاص، خصوصًا في المنتجات البلاستيكية الملونة أو المستخدمة صناعيًا مما يفاقم من خطورتها البيئية والصحية عند دخولها في السلسلة الغذائية.

وبسبب هذا التركيب المعقد فإن التلوث البلاستيكي لا يتمثل فقط في تراكم المواد البلاستيكية المرئية بل يشمل أيضًا تسرّب المركّبات الكيميائية الخطرة المرتبطة بالبلاستيك إلى التربة والماء والهواء ما يجعله أحد أكثر أنواع التلوث تعقيدًا وخطورة على الكوكب.

2.أنواع التلوث البلاستيكي

يُعتبر التلوث البلاستيكي من أكبر التحديات البيئية في العصر الحديث حيث يشمل تراكم المواد البلاستيكية بمختلف أحجامها وأشكالها في النظم البيئية المختلفة مما يؤدي إلى أضرار مباشرة وغير مباشرة على الكائنات الحية والتوازن البيئي .يمكن تصنيف التلوث البلاستيكي بناءً على حجم الجسيمات البلاستيكية أو المصدر الذي تنشأ من وتشير الدراسات الحديثة إلى أن التأثيرات البيئية لكل نوع تختلف باختلاف خواصه الفيزيائية والكيميائية وقدرته على الانتشار في البيئة [Geyer et al., 2022].

تصنيف التلوث البلاستيكي حسب الحجم

- **التلوث بالبلاستيك الكبير(Macroplastic Pollution) :**

يشير هذا النوع إلى القطع البلاستيكية الكبيرة التي يزيد قطرها عن ٥ ملم وتشمل:

- الأكياس البلاستيكية.
- العبوات والزجاجات البلاستيكية.
- معدات وأدوات الصيد المهملة مثل (الشباك والحبال) .

- مخلفات التعبئة والتغليف.

تُعد هذه المواد من أكثر المخلفات البلاستيكية وضوحًا في البيئة حيث تتسبب في اختناق الحيوانات البرية والبحرية وانسداد المجاري المائية وتدهور التربة على سبيل المثال أظهرت الدراسات أن السلاحف البحرية غالبًا ما تخلط بين الأكياس البلاستيكية وقناديل البحر مما يؤدي إلى انسداد جهازها الهضمي والموت البطيء.[Jambeck *et al*., 2023] .

- **التلوث بالبلاستيك الدقيق(Microplastic Pollution)**

يشير هذا النوع إلى الجزيئات البلاستيكية التي يقل قطرها عن ٥ ملم والتي يمكن أن تكون:

- لدائن دقيقة أولية (Primary Microplastics): وهي الجسيمات البلاستيكية الصغيرة التي يتم تصنيعها عمدًا لاستخدامها في المنتجات مثل مستحضرات التجميل ومعاجين الأسنان، والمنظفات الصناعية.
- لدائن دقيقة ثانوية (Secondary Microplastics): وهي ناتجة عن تحلل القطع البلاستيكية الكبيرة بسبب التعرض للعوامل البيئية مثل الأشعة فوق البنفسجية والاحتكاك والتآكل الميكانيكي [Campanale *et al*., 2021].

تكمن خطورة هذه الجسيمات في قدرتها على التغلغل في التربة والمياه وحتى الهواء مما يجعلها متواجدة في كل مكان تقريبًا كما تم العثور على الميكروبلاستيك في مياه الشرب والملح البحري والأسماك، مما يزيد من احتمالية انتقاله إلى الإنسان عبر السلسلة الغذائية [Wright & Kelly, 2022].

التلوث بالبلاستيك النانوي (Nanoplastic Pollution)

يُعتبر هذا النوع الأخطر حيث يتكون من جزيئات بلاستيكية دقيقة جدًا يقل حجمها عن (1 ميكرومتر) يمكن لهذه الجزيئات أن:

- تخترق الأغشية الخلوية للكائنات الحية مما يؤدي إلى تأثيرات بيولوجية خطيرة.
- تنتقل عبر مجرى الدم في الكائنات الحية وتستقر في الأعضاء الحيوية مثل (الدماغ والكبد).
- تمتص المواد الكيميائية السامة والمعادن الثقيلة مما يزيد من خطورتها عند دخولها إلى الجسم البشري [Koelmans *et al*., 2023].

على الرغم من أن الدراسات حول تأثير النانوبلاستيك على صحة الإنسان ما زالت في مراحلها الأولى فإن الأدلة الأولية تشير إلى أنه قد يؤدي إلى اضطرابات هرمونية وخلل في الجهاز المناعي وزيادة مخاطر الأمراض المزمنة مثل السرطان [Leslie *et al*., 2022].

ويُصنَّف التلوث البلاستيكي حسب المصدر إلى نوعين رئيسيين: التلوث البلاستيكي الأولي والتلوث البلاستيكي الثانوي.

يشير التلوث البلاستيكي الأولي (Primary Plastic Pollution) إلى ذلك النوع من التلوث الناتج عن إطلاق جسيمات بلاستيكية صغيرة مباشرة في البيئة خلال عمليات الإنتاج أو الاستخدام. ومن أبرز أشكاله الألياف البلاستيكية الدقيقة التي تنفصل عن الملابس المصنوعة من ألياف صناعية مثل البوليستر والنايلون أثناء غسلها، وتنتقل عبر مياه الصرف إلى الأنهار والبحار. كما يشمل هذا النوع أيضًا الميكروبيدات البلاستيكية التي تدخل في تركيب العديد من منتجات العناية الشخصية مثل مستحضرات التجميل ومعاجين الأسنان والمنظفات الصناعية، إذ تُصمم هذه الجزيئات عمدًا لتكون صغيرة الحجم مما يسهل انتشارها في البيئة ومن المصادر الأخرى لهذا النوع جسيمات البلاستيك الصناعية التي تُستخدم كمادة خام في خطوط الإنتاج المختلفة، والتي قد تتسرب إلى البيئة أثناء النقل أو التصنيع[Li *et al*., 2022] .

أما التلوث البلاستيكي الثانوي (Secondary Plastic Pollution) فينجم عن تحلل أو تفكك المنتجات البلاستيكية الكبيرة نتيجة التعرض لعوامل بيئية مثل ضوء الشمس، والاحتكاك، والرياح، والأمواج. ففي هذا السياق تتحلل الأكياس البلاستيكية بفعل الأشعة فوق البنفسجية إلى شظايا صغيرة تنتقل بسهولة إلى التربة والمسطحات المائية كما يُعد تفتت معدات الصيد المهملة كالشباك والحبال من أهم المصادر الثانوية التي تؤثر سلبًا على الكائنات البحرية ويُضاف إلى ذلك تآكل الإطارات المطاطية أثناء قيادة المركبات ما يؤدي إلى إطلاق جسيمات بلاستيكية دقيقة تنتشر في الهواء وتتسرب إلى التربة والمياه مُشكلةً تهديدًا غير مرئي للأنظمة البيئية [Jambeck *et al*., 2023].

صورة (1) التلوث بالبلاستيك الكبير

3. أسباب ومصادر التلوث البلاستيكي:

رغم أن البلاستيك كان يُعتبر ثورة صناعية في القرن العشرين إلا أن تحوّله إلى أحد أخطر الملوثات البيئية في العصر الحديث يُعد نتيجة معقدة لنُظم إنتاج واستهلاك مختلّة تتغذّى على ثقافة استهلاكية مفرطة واقتصاد رأسمالي لا يأبه بالتكاليف البيئية.

ويمثّل التلوث البلاستيكي إحدى أعقد القضايا البيئية في القرن الحادي والعشرين إذ لا يقتصر أثره على البيئة فحسب بل يمتد ليطال الصحة البشرية والتنوع الحيوي والمناخ ويتطلب فهم هذه الأزمة تحليلًا عميقًا لمُسبّباتها المتنوعة التي تتداخل فيها العوامل الاقتصادية، والاجتماعية، والتقنية، والتشريعية.

التلوث البلاستيكي لم يكن أزمة لحظية بل هو نتيجة حتمية لتراكم أنماط غير مستدامة من الإنتاج والاستهلاك منذ عقود. فقد خُلق البلاستيك ليكون المادة المعجزة: قوي، مرن، خفيف، ورخيص. غير أن هذه الصفات ذاتها تحوّلت إلى لعنة بيئية بسبب سوء الاستخدام وسوء إدارة المخلفات.

تؤكد الدراسات الحديثة أن التلوث البلاستيكي لا ينتج عن عامل مفرد بل هو ظاهرة متعددة الأبعاد تشمل أنماط الاستهلاك، السياسات العامة، الاقتصاد الصناعي، والثقافة الاجتماعية [PlasticsEurope, 2023]. وفيما يلي استعراض مفصل لأبرز المسبّبات التي أدت إلى استفحال هذه المشكلة:

1. النمو الهائل في إنتاج البلاستيك عالميًا

شهد إنتاج البلاستيك تضاعفًا متسارعًا خلال العقود الماضية إذ ارتفع من 2 مليون طن فقط في عام 1950 إلى أكثر من 390 مليون طن في عام 2022. ويُتوقع أن يتجاوز 500 مليون طن بحلول عام 2030 في ظل غياب تدخلات تنظيمية حقيقية.[OECD, 2022]

هذا النمو الكبير مدفوع بتنوع استخدامات البلاستيك في مجالات (التغليف، والصناعة، والزراعة، والطب، والبناء، والإلكترونيات). ومع ذلك، فإن نحو 60% من إجمالي البلاستيك المنتَج عالميًا يتحول إلى نفايات خلال فترة قصيرة من إنتاجه ومعظم هذه النفايات لا تُدار بصورة سليمة بل تنتهي في (مكبّات النفايات، أو تحترق، أو تتسرب إلى النظم البيئية).

وقد شهد إنتاج البلاستيك العالمي نموًا غير مسبوق منذ منتصف القرن العشرين فقد أصبحت الصناعات الحديثة تعتمد عليه نظرًا (لمرونته، وانخفاض تكلفته، وتعدد استخداماته). ومع ذلك فإن هذا النمو لم يُرافقه تطوير لأنظمة إدارة النفايات بنفس الوتيرة مما أدى إلى تراكم كميات هائلة من النفايات البلاستيكية التي تُطرح في البيئة دون معالجة فعالة.

وتعد من أبرز المسببات الجذرية للتلوث البلاستيكي هو النمو الهائل في إنتاج البلاستيك عالميًا ضمن ما يُعرف بالاقتصاد الخطي (Linear Economy) والذي يتبع مبدأ "استخرج – صمّم – استخدم – تخلّص". هذا النمط يتجاهل مبدأ التدوير، ويؤدي إلى تراكم نفايات يصعب تحللها أو إدارتها.

2.الاعتماد المتزايد على البلاستيك أحادي الاستخدام

يُعد الاعتماد المتزايد على المواد البلاستيكية ذات الاستخدام الواحد من أبرز مظاهر التلوث البيئي المعاصر إذ تمثل هذه المواد أحد أخطر أنواع البلاستيك من حيث الأثر البيئي نظرًا لكونها تُستخدم لمدد قصيرة جدًا لا تتجاوز دقائق أو ساعات بينما تستغرق مئات السنين لتتحلل. وتشمل هذه المنتجات الأكياس البلاستيكية، وزجاجات المياه، وعبوات الطعام الجاهز وأدوات المائدة البلاستيكية، وأغلفة التغليف، التي يتم التخلص منها بسرعة بعد استخدامها لمرة واحدة فقط، مما يؤدي إلى تراكمها بشكل هائل في البيئة، سواء في البر أو في البحر. تشير بيانات برنامج الأمم المتحدة للبيئة إلى أن العالم يُنتج سنويًا ما يقارب 139 مليون طن من المواد البلاستيكية أحادية الاستخدام ولا يتم إعادة تدوير سوى 9% منها بينما يتم حرق نحو 12% منها فقط، أما النسبة المتبقية فتنتهي في البيئة مسببة تلوثًا طويل الأمد يصعب التخلص منه [UNEP, 2022]. وتشير الدراسات الحديثة إلى أن أكثر من نصف المنتجات البلاستيكية المنتجة عالميًا تُستخدم لمرة واحدة فقط، وتشكل هذه المنتجات النسبة الأكبر من النفايات البلاستيكية التي تُلقى في المحيطات والتربة والأنظمة البيئية المختلفة وقد ساهمت ثقافة الاستهلاك الحديثة في ترسيخ "ثقافة التخلص السريع" أو ما يُعرف بـ (Throwaway Culture) وهي ثقافة استهلاكية مُمَنهجة تُعزز من استخدام البلاستيك الرخيص والمريح على حساب الاعتبارات البيئية. ورغم تصاعد الوعي العالمي بشأن أخطار البلاستيك، إلا أن غياب البنية التحتية المتكاملة لإدارة النفايات خاصة في الدول النامية يُعد من أكبر التحديات التي تُعيق السيطرة على هذه الظاهرة وتتجلى أبرز هذه التحديات في غياب محطات فرز ومعالجة حديثة، وانعدام برامج فعالة لإعادة التدوير، إضافة إلى الاعتماد على ممارسات غير آمنة بيئيًا مثل الحرق المكشوف أو الطمر العشوائي للنفايات إلى جانب نقص حاد في التعليم البيئي لدى المجتمعات المحلية. ووفقًا لإحصائيات البنك الدولي، فإن أكثر من ٢ مليار شخص حول العالم يعيشون في مناطق لا تتوفر فيها خدمات آمنة لإدارة النفايات الصلبة، مما يؤدي إلى تراكم النفايات البلاستيكية في الشوارع والمجاري المائية والسواحل، ويُفاقم من الآثار البيئية والصحية والاجتماعية لهذا النوع من التلوث العالمي [World Bank, 2022].

صورة (2) " تلوث الشواطئ بأدوات بلاستيكية تستخدم لمرة واحدة"

3. قصور إدارة النفايات البلاستيكية

رغم أن تدوير البلاستيك يمثل إحدى الحلول المثلى إلا أن النسبة العالمية لإعادة التدوير لا تتجاوز 9% فقط. أما باقي النفايات فإما (تُحرق، أو تُلقى في المكبات، أو تُهمل في الطبيعة). ويعاني كثير من الدول خصوصًا النامية من ضعف البنية التحتية لأنظمة جمع النفايات وعدم توفر معامل كافية للفرز والتدوير، ونقص الوعي لدى السكان.

وتعد من أهم العوامل التي تفاقم من مشكلة التلوث البلاستيكي هو ضعف أو غياب أنظمة فعّالة لجمع وفرز وتدوير النفايات البلاستيكية وذكرنا يكون هذا خصوصًا في الدول النامية. وحتى في بعض الدول المتقدمة لا تتجاوز نسبة إعادة التدوير الفعلي 10% من إجمالي البلاستيك المستهلك.

كما أن بعض الدول الصناعية تقوم بتصدير نفاياتها البلاستيكية إلى دول أقل تطورًا ما يزيد العبء البيئي على تلك البلدان ويخلق مشكلة عالمية غير متوازنة في توزيع النفايات وايضا تشير تقارير البنك الدولي إلى أن أكثر من ثلث سكان العالم لا يستفيدون من خدمات منتظمة في إدارة النفايات مما يؤدي إلى تكدّس النفايات في الشوارع والمجاري المائية والمناطق الريفية [World Bank, 2022].

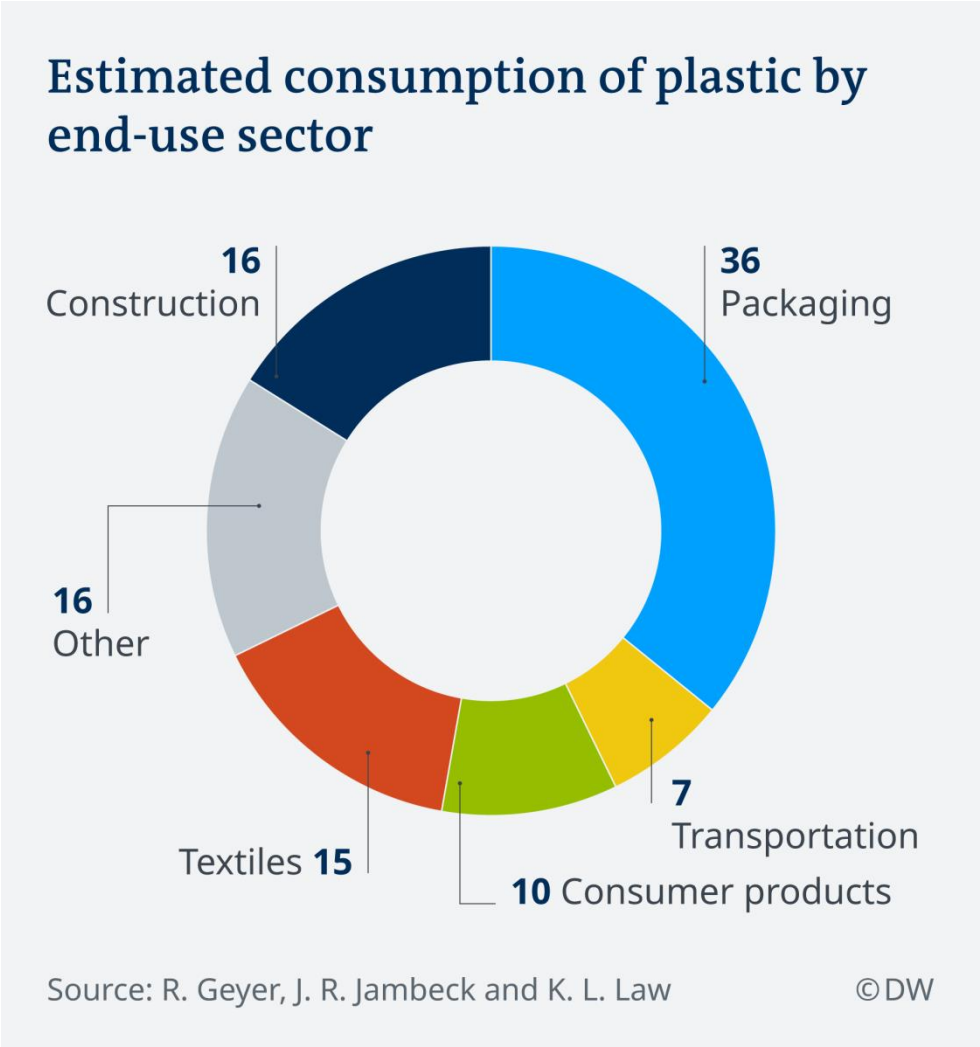
صورة (3) "مكب نفايات بلاستيكية مفتوح في منطقة حضرية"

ويعد التصنيع المكثف والتسويق الصناعي للبلاستيك قطاع التصنيع العالمي يعزّز بلا هوادة استخدام البلاستيك في مختلف القطاعات خاصة التغليف حيث يتم إنتاج البلاستيك بشكل غير مسبوق لتلبية متطلبات التعبئة السريعة.

تشير تقارير برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP ,2021) من أكثر الصناعات توليدًا لنفايات البلاستيك هي الصناعات الغذائية، المستحضرات الطبية، الإلكترونيات والتجارة الإلكترونية.

ومن أكثر الصناعات توليدًا للنفايات البلاستيكية هي الصناعات الغذائية والمستحضرات الطبية والإلكترونيات والتجارة الإلكترونية

وان تقرير "PlasticsEurope" لعام 2023 أشار إلى أن قطاع التغليف وحده مسؤول عن أكثر من 44% من إجمالي استهلاك البلاستيك في أوروبا [PlasticsEurope & Packaging Report,2023].



مخطط توضيحي (1) الاستهلاك المقدر للبلاستك حسب قطاع الاستخدام النهائي

4. انعدام السياسات الرادعة والاستهلاك غير المقنن

في العديد من الدول ما تزال القوانين البيئية الخاصة باستخدام البلاستيك ضعيفة أو غير مفعلة بشكل فعّال حيث لا تُفرض ضرائب أو رسوم حقيقية على المنتجات البلاستيكية الأمر الذي يُشجع على استهلاكها دون قيود أو محاسبة كما أن غياب الحوافز الاقتصادية التي تدعم البدائل المستدامة يجعل من البلاستيك الخيار الأرخص والأكثر توفرًا سواء للمصنّعين أو للمستهلكين. هذا الواقع التشريعي الهش يفتح المجال أمام الشركات لتحقيق أقصى ربح ممكن من خلال الاعتماد على التغليف البلاستيكي منخفض التكلفة بدلاً من تحمل أعباء التحول إلى حلول صديقة للبيئة وأكثر استدامة [PlasticsEurope, 2023]. ويُعد انخفاض تكلفة إنتاج البلاستيك أحد العوامل الاقتصادية الرئيسية التي تدفع إلى الاعتماد المتزايد عليه، فبالمقارنة مع البدائل مثل الورق، الكرتون، أو الزجاج، يُعتبر البلاستيك أقل تكلفة وأسهل في المعالجة مما يجعله الخيار الأول لتغليف المنتجات ونقلها وتسويقها في معظم دول العالم وتعزز السياسات الحكومية غير الصارمة من انتشار هذه الظاهرة حيث لا تفرض كثير من الحكومات ضرائب أو قيودًا حقيقية على تداول البلاستيك، مما يؤدي إلى استمراره كخيار اقتصادي مفضل رغم أضراره البيئية الفادحة [PlasticsEurope, 2023]

ومن بين الأشكال الأخطر للتلوث البلاستيكي في البحار والمحيطات هو ما يُعرف بـ "معدات الأشباح" (Ghost Gear)، وهو مصطلح يُطلق على معدات الصيد البلاستيكية المفقودة أو المهملة، والتي تستمر في صيد الكائنات البحرية بشكل غير مرئي ودون أي رقابة. وتشمل هذه المعدات شباك الصيد البلاستيكية التي تظل عالقة في الماء، وخيوط الطُعم، والفخاخ البحرية التي تستمر في أداء وظيفتها القاتلة حتى بعد فقدانها من قبل الصيادين. وحسب تقرير مشترك صادر عن منظمة الأمم المتحدة ومنظمة الأغذية والزراعة، فإن ما لا يقل عن 640000 طن من معدات الصيد البلاستيكية يتم فقدها أو إلقاؤها سنويًا في البحار، مما يجعلها واحدة من أخطر مصادر التلوث غير المرئي في البيئات البحرية. هذه المعدات المهملة تُسهم بشكل كبير في نفوق الكائنات البحرية عبر الخنق أو التجويع أو الإصابة، وتُوصف بأنها "القاتل الصامت للبحار"، لما تسببه من ضرر بيئي طويل الأمد يستمر لسنوات أو حتى عقود [FAO & UNEP, 2021].

صورة (4) حيوانات بحرية عالقة في شبكة الصيد

5. انخفاض وعي المستهلكين وسلوكياتهم غير البيئية

يلعب السلوك الفردي دورًا رئيسًا في التلوث البلاستيكي إذ إن كثيرًا من المستهلكين لا يدركون الأثر البيئي لاستخدامهم اليومي للبلاستيك. وتُشير الإحصاءات إلى أن حوالي 30% من النفايات البلاستيكية التي تلوث الشواطئ والمحيطات مصدرها مباشر من الاستهلاك المنزلي أو الشخصي. ويُعتبر نقص التوعية البيئية أحد أبرز المسببات غير المباشرة للتلوث البلاستيكي إذ يُسهم السلوك الفردي غير المسؤول مثل رمي الأكياس والزجاجات في الشوارع أو الأنهار في تراكم هذه المواد وانتقالها إلى المحيطات والأنظمة البيئية.

وقد أظهرت دراسات ميدانية أن نسبة كبيرة من الناس تجهل التأثيرات السلبية للبلاستيك على البيئة، وأن السلوكيات الفردية تسهم بنسبة تصل إلى 30% من التلوث البلاستيكي في بعض المناطق الساحلية يرتبط ذلك بانخفاض مستوى التعليم البيئي وعدم تفعيل برامج توعية فعالة وغياب ثقافة "الاقتصاد الدائري" لدى معظم المجتمعات [UNEP, 2022].

وأنه في ظل ضعف التشريعات البيئية في العديد من الدول وعدم وجود سياسات إلزامية لتقليل إنتاج واستخدام البلاستيك تبقى مسؤولية الوقاية محدودة. كما أن قلة البرامج التوعوية والتثقيفية تُبقي المواطن بعيدًا عن فهم مخاطر التلوث ومبادئ إعادة التدوير.

حتى في الدول ذات الدخل المرتفع لا تزال معدلات إعادة التدوير أقل بكثير من المطلوب إذ أن أقل من 9% فقط من النفايات البلاستيكية العالمية تُعاد تدويرها [OECD, 2022]. وأن التسويق التجاري للبلاستيك كحل اقتصادي سطحي في سعي الشركات لتعظيم الأرباح تم تقديم البلاستيك للمستهلكين على أنه الحل الأرخص والأسهل في تجاهل تام لعواقبه البيئية. هذا التسويق الممنهج ساهم في تشكيل وعي اجتماعي زائف يرى في البلاستيك وسيلة "ضرورية لا غنى عنها."

صورة (5) تلوث السواحل

6. دور الصناعات الكبرى في تلويث البيئة

تُعد الصناعات الضخمة مسؤولة عن النسبة الكبرى من إنتاج البلاستيك، خصوصًا في قطاعات التعبئة والتنظيف والغذاء والمشروبات. وتفتقر الكثير من هذه الشركات إلى برامج فعالة لمعالجة نفاياتها أو استرداد منتجاتها بعد الاستخدام. كما أن بعضها يُصدر نفاياته إلى دول ذات قدرة محدودة على المعالجة، ما يجعل الأمر يتعدى البعد المحلي ليصبح أزمة عالمية .(UNEP, 2021)

حيث إن الإهمال الصناعي والتجاري في مرحلة ما بعد الاستهلاك يتحمل الشركات والمؤسسات الصناعية قدراً كبيراً من المسؤولية فيما يخص التلوث البلاستيكي، إذ لا تُولي كثير من الشركات الاهتمام الكافي بمعالجة نفايات ما بعد الاستهلاك. كما أن بعض الصناعات تُصدر نفاياتها البلاستيكية إلى دول ذات قدرة ضعيفة على إدارتها، مما يُفاقم الأزمة على المستوى العالمي .(Brooks *et al.*, 2018)

صورة (6) مكب نفايات بلاستيكية ناتجة عن المصانع

7.الممارسات الزراعية والصناعية غير المستدامة

تستخدم بعض المزارع خصوصًا في الزراعة الحديثة الأغطية البلاستيكية لتغطية التربة (mulching) أو أنابيب الري البلاستيكية والتي غالبًا لا تُعاد تدويرها بعد الاستخدام. كما تطرح الصناعات مواد بلاستيكية دقيقة في الهواء والماء من خلال مخلّفات الإنتاج مما يساهم في تلوث التربة والأنهار. وتشير دراسات بيئية إلى أن التلوث البلاستيكي الزراعي يُعد من الأنواع الأكثر صعوبة في المعالجة، نظرًا لتشتته على مساحات واسعة ومحدودية أنظمة جمعه[FAO, 2021].

4. تأثيرات التلوث البلاستيكي:

1. التأثير على البيئة

يمثل التلوث البلاستيكي تهديدًا متزايدًا للبيئة نتيجة لطبيعته غير القابلة للتحلل البيولوجي وتراكمه في النظم البيئية على مدى سنوات طويلة تتعرض العديد من البيئات الطبيعية البرية والبحرية لضغوط شديدة بفعل تراكم المخلفات البلاستيكية التي تؤثر على توازن الكائنات الحية داخلها. إذ يُمكن أن تشكّل هذه المخلفات عوائق فيزيائية تؤدي إلى تدمير المواطن الطبيعية وعرقلة حركة الكائنات البرية والبحرية، وإعاقة التفاعلات البيئية الأساسية مثل التلقيح وانتقال المغذيات ودورات المواد العضوية [Thompson *et al*., 2009].

كما أن التلوث البلاستيكي يُحدث تغيرات في درجات الحرارة المحلية نتيجة تراكم البلاستيك ذي الألوان الداكنة على الأرض ما يخلق "جزرًا حرارية مصغرة" تؤثر على بقاء بعض الأنواع النباتية والحيوانية الحساسة للحرارة، مما يساهم في الإخلال بالتنوع البيولوجي المحلي، ويفتح الباب أمام أنواع غازية جديدة قد تستغل هذا التغير لصالحها.

وتشير تقارير حديثة إلى أن التراكم المزمن للبلاستيك في البيئات المفتوحة يؤدي إلى تغيّر في البنية المجتمعية للكائنات الحية حيث تختفي بعض الأنواع الحساسة وتُستبدل بأخرى أكثر مقاومة للبلاستيك والملوثات المرتبطة به مثل: بعض الحشرات والفطريات الغازية هذا التحوّل يؤدي إلى إخلالات في سلاسل الغذاء الطبيعية كما تم رصد تغير موائل طبيعية كاملة مثل المستنقعات والشواطئ التي أصبحت غير صالحة لتعشيش الطيور أو تكاثر الزواحف بسبب تراكم المخلفات البلاستيكية [Rochman *et al*., 2016].

صورة (7) تـــظهر تلوث البحر

2. التأثير على التربة

تُعد التربة من أكثر العناصر البيئية تأثرًا بالتلوث البلاستيكي، خصوصًا في المناطق الزراعية التي تُستخدم فيها الأغشية البلاستيكية لتغطية المحاصيل أو كأدوات ري تؤدي الجزيئات البلاستيكية الدقيقة (Microplastics) والنانومترية (Nanoplastics) إلى تغييرات ملحوظة في خواص التربة الفيزيائية والكيميائية. فهذه الجزيئات تتراكم في المسامات الطبيعية للتربة مما يؤدي إلى:

- تقليل قدرة التربة على الاحتفاظ بالماء أو تصريفه بشكل طبيعي.
- عرقلة تهوية الجذور والتقليل من توافر الأكسجين.
- تراكم الرطوبة في أماكن غير مناسبة مما يخلق بيئة مثالية لنمو الفطريات الضارة.

هذه التغيرات تعيق من تطور الجذور السليمة وتؤثر على امتصاص العناصر الغذائية، وتؤدي في النهاية إلى انخفاض في إنتاجية المحاصيل [Rillig, 2012]. بالإضافة إلى ذلك فإن المضافات الكيميائية الموجودة في البلاستيك مثل الفثالات والستايرين تتسرب تدريجيًا إلى التربة مما يؤدي إلى اضطرابات كبيرة في المجتمعات الميكروبية وقد لوحظ أن هذه المركبات تقلل من تنوع الميكروبات المفيدة مثل بكتيريا تثبيت النيتروجين والفطريات التكافلية مما يؤثر سلبًا على دورة الكربون والنيتروجين وبالتالي تقل خصوبة التربة على المدى الطويل حتى بعد إزالة مصدر التلوث [Chen *et al*., 2020].

وايضا تشير الدراسات الحديثة إلى أن وجود جزيئات البلاستيك الدقيقة في التربة يؤدي إلى اختلال في توازن دورات الكربون والنيتروجين حيث يُعطّل النشاط الإنزيمي للبكتيريا المسؤولة عن تثبيت النيتروجين وتحلل المواد العضوية هذا الخلل قد يؤدي إلى تراكم المواد غير المتحللة في التربة وانخفاض كفاءة تدوير المغذيات، مما يُضعف الخصوبة الزراعية ويؤثر على إنتاج المحاصيل في المواسم التالية [de Souza Machado *et al*., 2018].

صورة (8) الجسيمات البلاستيكية الدقيقة في التربة

3. التأثير على المياه

يُعد التلوث البلاستيكي أحد أخطر مهددات البيئات المائية سواء في المياه العذبة أو المالحة فعلى الرغم من الاعتقاد السائد بأن البلاستيك يطفو على السطح إلا أن العديد من أنواعه الثقيلة أو المتحللة جزئيًا تستقر في الأعماق محدثة ما يُعرف بـ"البيئات اللاهوائية" حيث يتناقص تركيز الأوكسجين بشكل كبير مما يخلق ظروفًا خانقة للكائنات القاعية مثل الديدان البحرية، نجم البحر والمحار.

كما تعمل الجزيئات البلاستيكية المتحللة على امتصاص ونقل الملوثات الكيميائية مثل المعادن الثقيلة والمبيدات ومركبات عضوية سامة كالبوليسترين وكلوريد الفينيل والتي يمكن أن تتسرب إلى الماء وتؤثر على:

- درجة الحموضة (pH) للمياه.
- التركيب الكيميائي الحيوي لموائل الكائنات المائية.
- معدلات التكاثر والبقاء للعديد من الأنواع [Koelmans *et al*., 2016].

وتؤدي هذه الظروف إلى نفوق أعداد كبيرة من الأحياء المائية أو هجرتها إلى مناطق جديدة ما يساهم في اختلال الشبكات الغذائية المائية ويؤثر بالتالي على الأمن الغذائي البشري والصيد التجاري وأشارت تحاليل مختبرية إلى أن الجزيئات البلاستيكية الدقيقة يمكن أن تمتص وتحتفظ بالأملاح والمعادن من المياه المالحة مما يؤدي إلى اختلال في التوازن الأيوني داخل الأوساط المائية وهذا قد يؤثر سلبًا على تنفس الأسماك وكفاءة تبادل الغازات في الكائنات المائية مثل الرخويات والشعاب المرجانية [Besseling *et al*., 2019]. كما لوحظ أن هذه الجسيمات قد تغير من التركيب الميكروبي للمياه مما يسهم في ازدهار الطحالب الضارة.

صورة (9) النفايات البلاستيكية والبلاستيك الدقيق في قاع البحر

تعد الأسماك من اكثر الكائنات المائية تأثيراً بالمواد البلاستيكية، لقد ثبت أن التعرض للمواد البلاستيكية الدقيقة يحفز تغييرات سلوكية كبيرة لدى الأسماك، مما يؤثر على جوانب مختلفة من وظائفها الفسيولوجية وتفاعلاتها الاجتماعية. وتشير الأبحاث إلى أن هذه التغييرات يمكن أن تختلف بناءً على نوع المواد البلاستيكية الدقيقة والسمات الشخصية الأولية للأسماك. توضح الأقسام التالية التغييرات السلوكية الرئيسية التي لوحظت في الأسماك بسبب التعرض للمواد البلاستيكية الدقيقة:

1. السباحة والحركة:

تُظهر الأسماك المعرضة للمواد البلاستيكية الدقيقة سرعة سباحة منخفضة وأنماط حركة متغيرة، مما يشير إلى ضعف الوظائف الحركية (Jabri et al., 2024; Hua *et al*., 2024).

2. التفاعلات الاجتماعية:

يمكن للمواد البلاستيكية الدقيقة أن تعطل السلوكيات الاجتماعية، مما يؤدي إلى زيادة القلق وتغير التفاعل الاجتماعي بين الأسماك، الأمر الذي قد يؤثر على قدرتها على تكوين مجموعات اجتماعية (Arman *et al*., 2024; Alves et al., 2024).

3. السلوك الإنجابي:

ارتبط التعرض للبلاستيك الدقيق بضعف الإنجاب، بما في ذلك الاضطرابات في الإشارات الهرمونية التي يمكن أن تؤثر على نجاح التزاوج وديناميكيات السكان (Arman *et al*., 2023).

4. الإجهاد التأكسدي:

يؤدي التعرض للبلاستيك الدقيق إلى الإجهاد التأكسدي، والذي يمكن أن يؤدي إلى ضعف السلوك والاختلالات الفسيولوجية مثل تغير مستويات النواقل العصبية (Hua *et al*., 2023; Arman et al., 2023).

5. تغيرات ميكروبيوم الأمعاء:

يتأثر تكوين ميكروبيوم الأمعاء في الأسماك بشكل كبير بالتعرض للبلاستيك الدقيق، مما قد يؤثر بشكل أكبر على السلوك والصحة العامة (Jabri *et al*., 2023).

4. التأثير على النباتات

تتجلى خطورة التلوث البلاستيكي على النباتات من خلال تأثير مزدوج: أولًا عبر البيئة التي تنمو فيها، وثانيًا من خلال امتصاص الجزيئات البلاستيكية الدقيقة عبر الجذور فالدراسات الحديثة أظهرت أن النباتات يمكنها امتصاص جزيئات النانوبلاستيك من خلال الشعيرات الجذرية وتُخزنها في أنسجتها مما يؤدي إلى إحداث تغييرات فسيولوجية خطيرة في عمليات التمثيل الضوئي وتكوين البروتينات والإنزيمات [Li *et al*., 2021].

بالإضافة إلى ذلك فإن المواد الكيميائية المتحررة من البلاستيك مثل ثنائي الفينول (BPA) لها القدرة على التفاعل مع أنظمة الهرمونات النباتية فتُحدث خللاً في مستويات الأوكسين والسيتوكينين ما يؤدي إلى توقف النمو أو ظهور تشوهات في السيقان والأوراق وعند تراكم البلاستيك في التربة الزراعية تنخفض معدلات الإنبات ويقل إنتاج الثمار وتظهر عيوب في المذاق، واللون، وحتى في القيمة الغذائية للمحاصيل.

وكما اظهرت أبحاث تجريبية أن النباتات الطبية مثل النعناع والريحان ونباتات الزينة كـ الخُزامى والورد تُظهر استجابات فسيولوجية غير طبيعية عند نموها في تربة ملوثة بالبلاستيك مثل انخفاض إنتاج الزيوت العطرية وخلل في مستويات الكلوروفيل مما يقلل من جودتها الدوائية أو التجارية [Wang *et al*., 2022] كما يؤثر البلاستيك على نمو البذور الصغيرة ويزيد من احتمالية ظهور طفرات جينية في الخلايا النباتية نتيجة التعرض المزمن للملوثات المنبعثة منه.

صورة (10) نباتات نابتة في تربة ملوثة بجزيئات بلاستيكية

5. التأثير على الحيوانات

لا تقتصر تأثيرات التلوث البلاستيكي على الإنسان والبيئة فحسب، بل تمتد لتُهدد بشكل مباشر وبالغ الخطورة حياة الحيوانات بمختلف أصنافها وأحجامها، سواء في البيئات البحرية أو البرية أو حتى في النظم البيئية الانتقالية كالمناطق الساحلية والأنهار في البيئات البحرية، تتعرض الكائنات الحية يوميًا إلى خطر البلاستيك العائم أو الغاطس، حيث أثبتت الدراسات الميكروبلاستيك (Microplastics) أصبح جزءًا شائعًا من النظام الغذائي للعديد من الكائنات البحرية، بدءًا من الكائنات المجهرية كالعوالق والكريل، ووصولًا إلى الحيتان العملاقة. فالكائنات الصغيرة مثل

البلانكتون والروبيان تستهلك هذه الجزيئات البلاستيكية ظنًا منها أنها غذاء طبيعي، وهو ما يؤثر على كفاءة الجهاز الهضمي، ويعيق امتصاص العناصر الغذائية الأساسية، ويُسبب اضطرابات أيضية تنعكس في شكل ضعف النمو، فقدان الوزن، العقم، وتراجع المناعة [Cole *et al*., 2013]. أما الكائنات البحرية الأكبر مثل الحيتان، الدلافين، وأسماك التونة، فتعاني من تراكم الجزيئات البلاستيكية الدقيقة والمواد السامة المرتبطة بها داخل أنسجتها. وقد تم توثيق حالات كثيرة تم فيها العثور على كميات ضخمة من البلاستيك داخل أمعاء الحيتان النافقة، بعضها تجاوز وزنه ٨٠ كيلوغرامًا من البلاستيك، كما حصل في الفلبين عام 2019 مع حوت نفق بسبب ابتلاع أكياس وأغلفة بلاستيكية [Laist, 1997; WWF, 2020].هذه المواد تؤدي إلى تقرّحات داخلية، التهابات مزمنة، وتلف في بطانة المعدة والأمعاء، بالإضافة إلى تأثيرها طويل الأمد على الجهاز العصبي والتناسلي نتيجة امتصاص السموم الكيميائية المنبعثة من البلاستيك.في البيئات البرية، لا تقل الكارثة شأنًا، خصوصًا في المناطق المحاذية لمكبات النفايات أو المناطق الزراعية الملوثة. فقد تم توثيق حالات نفوق جماعي للأبقار والجمال بسبب تناولها أكياسًا بلاستيكية أو بقايا تغليف أثناء الرعي، خاصة في الهند ومناطق من إفريقيا. وقد أظهرت التشريحات وجود عشرات الكيلوغرامات من البلاستيك في المعدة الواحدة، ما أدى إلى انسدادات معوية مزمنة، توقف الهضم، تسمم دموي، ثم الموت البطيء المؤلم [Kumar *et al*., 2021].

إضافة إلى ذلك، فإن بعض الطيور الجارحة والمهاجرة تستهلك البلاستيك أيضًا، سواءً كخطأ في التمييز الغذائي أو نتيجة تراكمه داخل فرائسها، وهو ما لوحظ في طيور القطرس البحرية التي

صورة (11) تلوث بلاستيكي داخل المحيط سلحفاة بحرية عالقة داخل كيس بلاستيكي

6. التأثير على صحة الإنسان

أصبح التلوث البلاستيكي يشكّل تهديدًا غير مسبوق لصحة الإنسان خاصة بعد أن كشفت الدراسات الحديثة عن وجود الميكروبلاستيك والنانوبلاستيك في العديد من مكونات الجسم البشري، مثل الدم، واللعاب، والبول، وحليب الأم، وحتى المشيمة. هذا الانتشار الواسع يُشير إلى أن البلاستيك لم يعد ملوثًا خارجيًا بل أصبح جزءًا من البيئة الداخلية لجسم الإنسان [Leslie *et al*., 2022].عند

دخول جزيئات البلاستيك الدقيقة إلى الجسم – سواء عبر تناول الطعام أو شرب المياه الملوثة أو استنشاق الهواء – تبدأ سلسلة من التفاعلات البيولوجية الخطيرة من أبرزها ما يُعرف بـ الإجهاد التأكسدي (Oxidative Stress) وهي حالة يحدث فيها اختلال بين الجذور الحرة (Free Radicals) والأنظمة المضادة للأكسدة في الجسم هذا الخلل يُعد عاملًا رئيسيًا في تطور السرطان، وأمراض القلب، والسكري، وأمراض الجهاز العصبي [Wright & Kelly, 2017].الأخطر من ذلك أن النانوبلاستيك الذي يقل قطره عن 100 نانومتر يمتلك القدرة على اختراق الحواجز الحيوية الحساسة بما في ذلك الحاجز الدموي الدماغي (Blood-Brain Barrier) وهو ما يُفسر وجوده في أدمغة بعض الحيوانات المستخدمة في الدراسات التجريبية. هذا الاختراق قد يؤدي إلى التهاب الخلايا العصبية تلف الميتوكوندريا وتراكم البروتينات الشاذة مما يزيد من خطر الإصابة بأمراض مثل الزهايمر، وباركنسون، والتصلب الجانبي الضموري [Prüst *et al.*, 2020) (ALS). من الفئات الأكثر تأثرًا النساء الحوامل حيث اكتشف الباحثون وجود جزيئات بلاستيكية في المشيمة، والسائل الأمنيوسي، والحبل السري. هذه الجزيئات قد تؤثر على تطور الجنين من خلال إحداث تغيرات هرمونية والتسبب بخلل في الإشارات الجينية والتأثير على نظام المناعة الخاص بالجنين كما أظهرت التجارب على الفئران أن تعرض الأمهات الحوامل للميكروبلاستيك يؤدي إلى انخفاض وزن الجنين تشوهات خلقية، وخلل في نمو الدماغ [Ragusa *et al.*, 2021].علاوة على ذلك فإن الأسطح الخارجية للميكروبلاستيك تُعد ناقلًا ممتازًا للعديد من المواد الكيميائية السامة، مثل الفثالات، والبيسفينول والمعادن الثقيلة، والتي ثبت ارتباطها بـ الاختلالات الهرمونية، والعقم والتأثير على الغدة الدرقية وزيادة معدل الإجهاض ومشاكل الخصوبة لدى الرجال والنساء على حد سواء وقد حذّرت منظمة الصحة العالمية (WHO) والعديد من مراكز الأبحاث العالمية من أن العبء الصحي للتلوث البلاستيكي سيتفاقم في العقود القادمة خاصة مع استمرار التعرض المزمن غير المرئي لهذه الجزيئات .

7. التأثير على المناخ

لا يقتصر التلوث البلاستيكي على تأثيرات بيئية محلية بل يمتد ليُشكل تهديدًا عالميًا يتشابك بشكل وثيق مع تغير المناخ فدورة حياة البلاستيك بأكملها — من استخراج المواد الخام إلى الإنتاج والاستخدام، والتخلص — ترتبط بإطلاق كميات كبيرة من غازات الدفيئة (Greenhouse Gases) ما يساهم بشكل مباشر في تسريع ظاهرة الاحتباس الحراري (Global Warming). يبدأ التأثير المناخي للبلاستيك من مرحلة استخراج المواد الأولية حيث يُعد البلاستيك منتجًا بتروليًا بالدرجة الأولى ويُشتق معظمه من النفط والغاز الطبيعي. وتؤدي عمليات الحفر والنقل والتكرير إلى انبعاث غازات مثل الميثان (CH_4) وأكسيد النيتروز (N_2O) والتي تتجاوز قدرتها على احتباس الحرارة قدرة ثاني أكسيد الكربون بعشرات إلى مئات المرات على المدى القصير مما يزيد من التأثير الحراري الكلي لهذه العمليات [Zheng & Suh, 2019].ثم تأتي مرحلة تصنيع البلاستيك التي تتطلب طاقة هائلة وتستخدم درجات حرارة مرتفعة جدًا ما يستدعي تشغيل محطات طاقة تعتمد غالبًا على الوقود الأحفوري خصوصًا الفحم والغاز هذه العمليات تُنتج الديُوكسينات (Dioxins) والفورانات (Furans) والبيروكسيدات وهي ملوثات هوائية شديدة السمية تُعد من بين أكثر المركبات خطورة على صحة الإنسان والبيئة إلى جانب تأثيرها في تعزيز ظاهرة

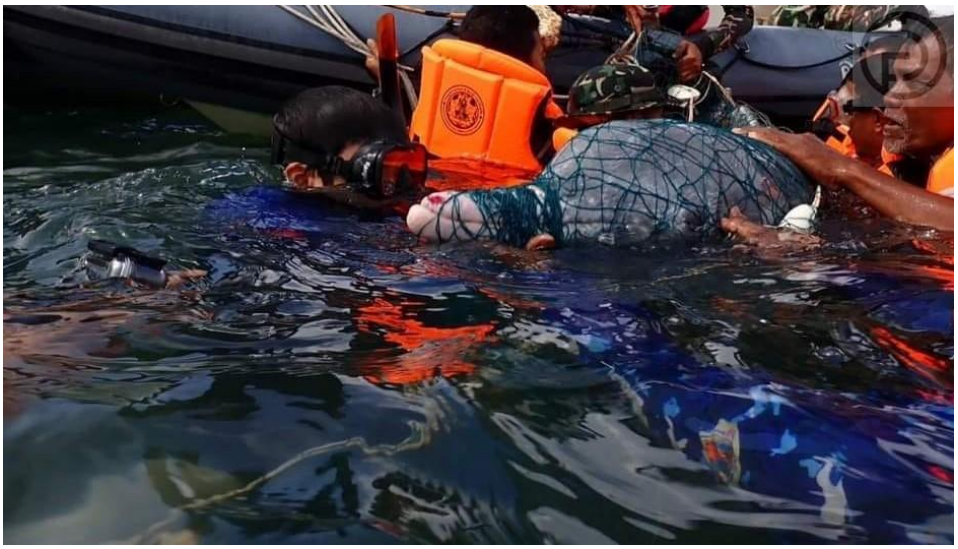
الاحتباس الحراري اما في نهاية دورة الحياة فإن التخلص من النفايات البلاستيكية سواء عبر الطمر الصحي أو الحرق أو الحرق المفتوح يُنتج كميات إضافية من غازات الدفيئة وتُعد ممارسات الحرق المفتوح التي تنتشر في البلدان النامية نتيجة لضعف أنظمة إدارة النفايات مصدرًا رئيسيًا لانبعاث الجسيمات الدقيقة (PM2.5) وأكاسيد الكربون والمركبات العضوية المتطايرة (VOCs)، وكلها تساهم في تدهور نوعية الهواء وتفاقم أزمة المناخ وقد أشارت دراسة حديثة صادرة عن "برنامج الأمم المتحدة للبيئة" [UNEP, 2022] إلى أن دورة حياة البلاستيك مسؤولة عن أكثر من ٨٥٠ مليون طن من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون سنويًا ومن المتوقع أن يتضاعف هذا الرقم بحلول عام ٢٠٥٠ إذا لم تُتخذ إجراءات عاجلة لخفض الإنتاج، بالإضافة إلى ذلك فإن التحلل الجزئي للبلاستيك في البيئات المكشوفة مثل الصحارى أو الشواطئ قد يؤدي إلى انبعاث غازات دفيئة نتيجة تعرضه لأشعة الشمس فوق البنفسجية وهي ظاهرة تُعرف بـ التحلل الضوئي (Photodegradation). وتشير دراسات إلى أن بعض أنواع البلاستيك مثل البولي إيثيلين (PE) تطلق كميات قابلة للقياس من غازي الإيثلين والميثان عند تعرضها للشمس [Royer *et al.*, 2018]. وهكذا، فإن البلاستيك لا يُعد مجرد ملوّث بيئي صلب، بل هو عنصر نشط ومؤثر في معادلة المناخ العالمية، يُسهم في تفاقم الأزمة المناخية بشكلٍ لا يمكن تجاهله.

صورة (12) "الانبعاثات الناتجة عن صناعة البلاستيك"

8. التأثير على التنوع البيولوجي

يُعد التنوّع البيولوجي حجر الأساس في استقرار واستدامة النظم البيئية حيث تساهم الأنواع المختلفة من الكائنات الحية في الحفاظ على توازن العمليات البيئية مثل تدوير المغذيات، التلقيح، مكافحة الآفات، وتنقية المياه غير أن التلوث البلاستيكي بات يشكل تهديدًا مباشرًا لهذا التنوع سواء في البيئات البحرية أو البرية أو حتى الهوائية من خلال عدة آليات مترابطة ومدمّرة. أحد أبرز التأثيرات يتمثل في اختناق الكائنات الحية أو ابتلاعها للبلاستيك ظنًا منها أنه غذاء وهو ما لوحظ بشكل خاص

في السلاحف البحرية، والطيور، والحيتان فابتلاع البلاستيك يؤدي إلى انسداد الجهاز الهضمي أو الشعور الكاذب بالشبع مما يمنع الكائن من تناول غذائه الحقيقي ويموت جوعًا ببطء [Gall & Thompson, 2015]. إضافة إلى ذلك فإن النفايات البلاستيكية مسببة جروحًا، إعاقات، أو حتى الوفاة وهو ما يُعرف بـ"التشابك البلاستيكي" (Plastic entanglement).كما تُحدث المعدات البلاستيكية المهملة في البحار، مثل شباك الصيد الضائعة أو المقطوعة (وتُعرف باسم "الأشباح الصيّادة" Ghost Nets) صيدًا عشوائيًا لا يُميز بين نوع وآخر، مما يؤدي إلى تناقص سريع في أعداد كائنات غير مستهدفة منها أنواع نادرة أو مهددة أصلًا بالانقراض، مثل الدلافين، وأسماك القرش، والفقمات ويُحدث هذا اضطرابًا خطيرًا في التوازن الطبيعي بين المفترسات والفريسة ما يؤدي إلى تغير ديناميكية النظام البيئي بالكامل [Wilcox *et al.*, 2016].أيضًا، فإن تراكم البلاستيك في المواطن الطبيعية (مثل الشعاب المرجانية، الغابات الساحلية، والمناطق الرطبة) يؤدي إلى تدهور الموائل habitat degradation مما يجعلها غير صالحة للعيش بالنسبة لبعض الأنواع الحساسة ويدفعها للهجرة أو الانقراض المحلي وفي كثير من الحالات تحل أنواع دخيلة أو مقاومة محل الأنواع الأصلية مما يؤدي إلى فقدان التنوع الجيني وظهور نظم بيئية غير متوازنة، إضافة لذلك، فإن المواد الكيميائية المتسربة من البلاستيك — مثل الفثالات، ومركبات الفينول، والمركبات العضوية الثابتة — تؤثر على الخصوبة وسلوكيات التكاثر والجهاز المناعي للعديد من الأنواع مما يهدد استمراريتها على المدى الطويل، حتى في حال عدم تعرضها المباشر لابتلاع البلاستيك. وقد حذرت تقارير برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP, 2021) من أن استمرار التلوث البلاستيكي على هذا النحو قد يؤدي إلى فقدان ما يقارب ١ مليون نوع بحري خلال العقود القادمة، ما لم يتم اتخاذ إجراءات عاجلة للحد من دخول البلاستيك إلى النظم البيئية.

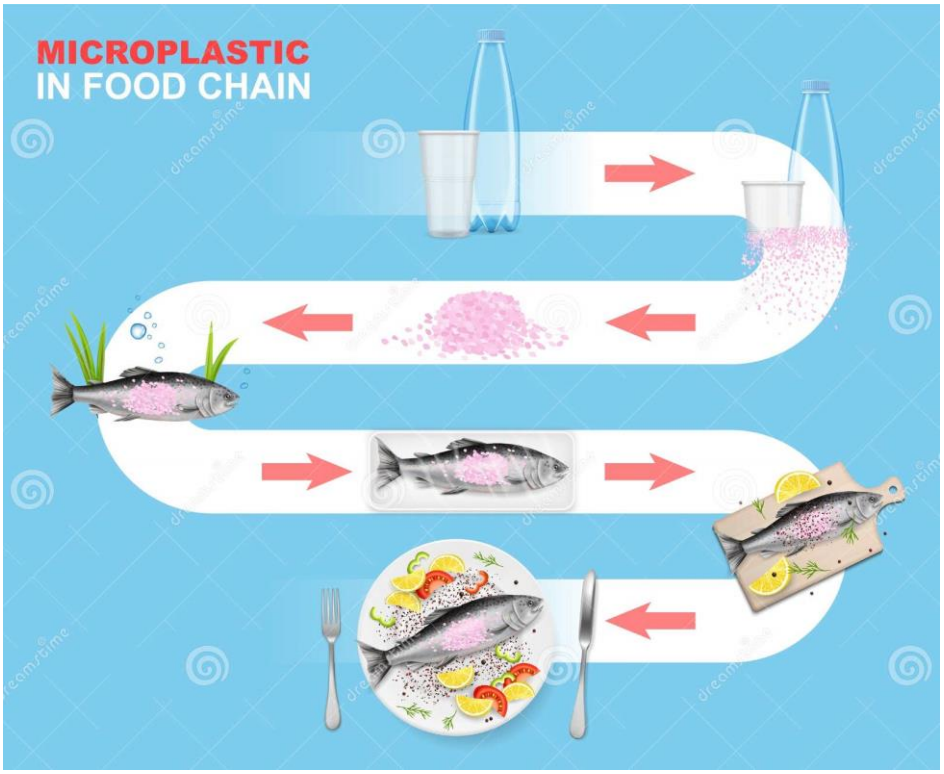


صورة (13) دولفين عالق في شبكة صيد

9. التأثير على السلسلة الغذائية

لا يُعد الميكروبلاستيك (Microplastics) مجرد ملوث خامل بل هو مركب نشط كيميائيًا يعمل كناقل للعديد من الملوثات البيئية الخطرة فهذه الجزيئات البلاستيكية الدقيقة التي يقل قطرها عن ٥ مم تمتلك سطحًا عالي المساحة يسهل عليه امتصاص وتراكم مواد سامة مثل المبيدات الزراعية والمركبات العضوية الثابتة (POPs) والمعادن الثقيلة كالزئبق والكادميوم والرصاص إلى جانب المركبات الفلورية مثل PFAS Per- and polyfluoroalkyl substancesالمعروفة بخصائصها المسرطنة والمقاومة للتحلل [Wright & Kelly, 2017]. حين تدخل هذه الجزيئات الملوثة إلى البيئة المائية تبدأ في التسلل إلى قاعدة السلسلة الغذائية من خلال استهلاكها من قبل العوالق النباتية والحيوانية (Plankton) والتي تشكل المصدر الغذائي الأساسي للعديد من الكائنات البحرية الصغيرة مثل القشريات والأسماك الصغيرة. وما أن تُستهلك هذه الكائنات بدورها من قبل مفترسات أكبر، تبدأ عملية "التركيز التصاعدي" (Biomagnification) وهي ظاهرة تشير إلى زيادة تركيز السموم كلما صعدنا في السلسلة الغذائية. في مراحل لاحقة، تستهلك الأسماك الكبيرة والطيور البحرية والثدييات البحرية هذه الكائنات المتوسطة مما يؤدي إلى تراكم كميات أكبر من الملوثات في أنسجتها، خصوصًا في الأنسجة الدهنية والكبد. وحين يصل هذا التراكم إلى الإنسان الذي يُعد قمة الهرم الغذائي يكون التعرض للمخاطر في أعلى مستوياته. وتشير الدراسات إلى أن استهلاك الأسماك والمأكولات البحرية الملوثة بالميكروبلاستيك يرتبط بزيادة نسب المواد السامة في دم الإنسان مثل الزئبق والكادميوم والتي ترتبط بأمراض الكبد، اضطرابات الجهاز العصبي، واضطرابات الغدد الصماء، بل وحتى السرطان [Smith *et al*., 2018].

كما أن مركبات PFAS التي ترتبط بالميكروبلاستيك تُعد من أخطر الملوثات كونها لا تتحلل بسهولة وتبقى في أنسجة الإنسان لفترات طويلة وتُظهر الدراسات الحديثة أن هذه المركبات قد تسبب اضطرابات هرمونية وتؤثر على تطور الأجنة والجهاز المناعي بل ويُشتبه في علاقتها ببعض أنواع السرطان مثل سرطان الكلى والخصية [Grandjean & Clapp, 2015]. وهكذا يتحول الميكروبلاستيك من مجرد جسيم بيئي ملوث إلى عنصر سام متنقل داخل السلسلة الغذائية يحمل معه "قنبلة كيميائية موقوتة" تهدد صحة الإنسان والتوازن البيئي على حد سواء.



صورة (14) انتقال البلاستيك الدقيق في شبكة الغذاء البحرية

الاســـــتـــنتاجات Conclusions

1. أصبح التلوث البلاستيكي أزمة عالمية مركبة تتغلغل في جميع مكونات البيئة ولم يعد مجرد مشكلة محصورة في قطاع معين أو منطقة جغرافية محددة فالبلاستيك بمختلف أشكاله وأحجامه أثبت أنه ملوّث طويل الأمد قادر على اختراق الأنظمة البيئية الطبيعية والتأثير في توازنها وصحتها عبر التراكم المباشر أو من خلال انتقال الجزيئات الدقيقة إلى الكائنات الحية.

2. لم يعد تأثير البلاستيك محصورًا في الكائنات البحرية كما كان يُعتقد بل يمتد ليشمل البيئات البرية والزراعية حيث يُضعف من خصوبة التربة ويُهدد المحاصيل الزراعية كما يُساهم في نقل الملوثات إلى الكائنات البرية والإنسان مما يجعل تأثيراته شاملة للنظم البيئية كافة.

3. أثبتت الجزيئات البلاستيكية الدقيقة والنانومترية قدرتها على التسلل إلى داخل الكائنات الحية بما في ذلك الإنسان حيث تم رصدها في الدم، والمشيمة، وأعضاء حيوية أخرى وتشير هذه النتائج إلى أن التلوث البلاستيكي دخل مرحلة "التهديد الخفي" إذ يصعب اكتشافه ولكنه يسبب آثارًا بيولوجية خطيرة تشمل اضطرابات الغدد الصماء والجهاز المناعي بالإضافة إلى زيادة خطر الإصابة بالأمراض المزمنة والسرطان.

4. يرتبط التلوث البلاستيكي ارتباطًا وثيقًا بأنماط الإنتاج والاستهلاك غير المستدامة خاصة استخدام البلاستيك أحادي الاستخدام الذي يُنتج بكميات هائلة ويُستهلك في فترات زمنية قصيرة دون وجود أنظمة فعالة للتدوير أو المعالجة مما يؤدي إلى تراكمه في البيئة وتفاقم آثاره.

5. تشير التقديرات إلى تراكم أكثر من ٨ مليارات طن من البلاستيك منذ منتصف القرن الماضي مما يعكس حجم الكارثة البيئية الناتجة عن الإنتاج الصناعي المتزايد للبلاستيك في ظل غياب أنظمة فعالة لإدارة النفايات وغياب تشريعات رادعة تضع قيودًا على هذا التوسع غير المستدام.

6. يُظهر البحث أن البلاستيك لا يؤثر فقط على البيئة الحية بل يمتد ليؤثر على استقرار المناخ من خلال مساهمته في زيادة انبعاثات غازات الدفيئة في كل مراحل دورة حياته بدءًا من استخراج المواد الخام إلى الحرق أو التحلل الضوئي ما يفاقم ظاهرة الاحتباس الحراري.

7. التلوث البلاستيكي يهدد التوازن البيولوجي للأنظمة البيئية فهو يؤدي إلى تغيرات في سلاسل الغذاء ويؤثر على التنوع الأحيائي نتيجة نفوق الأنواع الحساسة أو هجرتها أو دخول أنواع دخيلة تستغل التغيرات الجديدة في المواطن الطبيعية.

8. يُظهر التحليل أن الجوانب الثقافية والتشريعية تُعد جزءًا جوهريًا من المشكلة إذ أن ضعف الوعي البيئي بين الأفراد وغياب قوانين بيئية فعالة وتجاهل الصناعات الكبرى لمسؤولياتها كلها عوامل تُعمّق من أزمة التلوث البلاستيكي وتجعل مواجهته أكثر تعقيدًا.

9. لا يمكن حل أزمة التلوث البلاستيكي بالحلول السطحية أو المحدودة بل تتطلب استجابة شاملة تشمل التحول إلى أنماط استهلاك وإنتاج مستدامة وتفعيل مفهوم الاقتصاد الدائري وسن قوانين بيئية صارمة تضمن التزام الأفراد والمؤسسات والدول بمسؤولياتهم.

10. استمرار هذه الأزمة دون تدخل جذري من الجهات المعنية سيقود إلى تدهور بيئي واسع النطاق وتزايد الأمراض المرتبطة بالتلوث، وانخفاض جودة الحياة البيئية والصحية والاقتصادية عالميًا كما حذرت تقارير علمية متعددة.

التـــوصـــيات Recommendations

في ضوء ما توصل إليه هذا البحث من نتائج علمية متعمقة وبالاستناد إلى ما ورد في الأدبيات العالمية المتخصصة تبرز الحاجة إلى تبني منظومة متكاملة من الإجراءات والسياسات التي تهدف إلى الحد من التلوث البلاستيكي بجميع أشكاله وتقليل آثاره بعيدة المدى على البيئة وصحة الإنسان والتنوع البيولوجي.

1. على الصعيد البيئي يُوصى بإعادة تصميم دورة حياة المنتجات البلاستيكية من خلال التحول التدريجي نحو الاقتصاد الدائري، الذي يقوم على مبدأ "التقليل، وإعادة الاستخدام وإعادة التدوير" إن اعتماد هذا النموذج يتطلب من الحكومات والمؤسسات الصناعية فرض قيود واضحة على تصنيع وتداول البلاستيك غير القابل للتحلل وتوجيه الاستثمارات نحو تطوير مواد بديلة مستدامة مثل البوليمرات الحيوية المصنوعة من نشا الذرة أو السيليلوز والتي تمتاز بقدرتها على التحلل دون ترك أثر سام في البيئة.

2. من الناحية الصحية تؤكد الأدلة العلمية الحديثة على أهمية تقنين استخدام المواد الكيميائية المُضافة إلى المنتجات البلاستيكية، مثل الفثالات وثنائي الفينول A والتي تُصنف ضمن المواد المعطلة للغدد الصماء والمسببة المحتملة للسرطان. لذا توصي الجهات البحثية بضرورة اعتماد أنظمة رقابة صارمة على مكوّنات البلاستيك المُستخدم في تعبئة الأغذية والمياه وتحديد حدود قصوى لنسب المواد السامة فيه مع تشديد الرقابة على المنتجات المستوردة التي قد لا تخضع لنفس المعايير الصحية.

3. على المستوى التشريعي والتنظيمي ينبغي أن تشرع الحكومات في إصدار قوانين ملزمة للحد من إنتاج وتداول البلاستيك أحادي الاستخدام خاصة في قطاعات التغليف، والتجزئة، والخدمات الغذائية. كما ينبغي فرض ضرائب بيئية على الشركات التي تعتمد على البلاستيك بشكل مفرط، وتوفير حوافز مالية للشركات التي تستثمر في بدائل صديقة للبيئة. وتشير التجربة الأوروبية في هذا المجال إلى أن فرض رسوم على أكياس البلاستيك أدى إلى خفض استخدامها بنسبة وصلت إلى أكثر من 70% خلال خمس سنوات فقط.

4. من منظور اقتصادي توصي مؤسسات التنمية المستدامة بدمج قطاع إدارة النفايات البلاستيكية ضمن خطط التنمية الوطنية واعتباره مصدرًا محتملاً لفرص العمل والدخل من خلال دعم المشاريع الصغيرة والمتوسطة التي تُعنى بجمع وفرز وإعادة تدوير البلاستيك خاصة في المناطق الحضرية الفقيرة. كما يُنصح بإطلاق برامج تمويل خضراء موجّهة لدعم الابتكار في تصميم منتجات قابلة للتدوير وذات بصمة بيئية منخفضة.

5. على الصعيد الأكاديمي والبحثي هناك حاجة ماسّة إلى توسيع قاعدة الدراسات التطبيقية حول التأثيرات البيولوجية للميكروبلاستيك والنانوبلاستيك على صحة الإنسان والنظم البيئية حيث لا تزال الكثير من آليات الضرر غير مفهومة بشكل كافٍ كما يُوصى بتأسيس مراكز علمية متخصصة لدراسة الآثار التراكمية لتلوث البلاستيك وقياس مدى انتشاره في عناصر البيئة المختلفة .

6. من الناحية المجتمعية والثقافية فإن نجاح أي استراتيجية بيئية يعتمد على الوعي الجماعي والسلوك الفردي لذلك توصي نتائج هذا البحث بضرورة تضمين موضوع التلوث البلاستيكي ضمن المناهج التعليمية وتفعيل الحملات الإعلامية الهادفة إلى تغيير السلوكيات اليومية تجاه استخدام البلاستيك وتبنّي ممارسات أكثر استدامة مثل استخدام الأكياس القماشية وزجاجات الماء القابلة لإعادة التعبئة والتقليل من الاعتماد على المنتجات المعبّأة في البلاستيك.

إن تبنّي هذه التوصيات على مستوى السياسات والمجتمعات والأفراد لا يمثّل فقط خطوة نحو الحد من التلوث البلاستيكي بل هو استثمار طويل الأمد في صحة البيئة والإنسان معًا وضمان لمستقبل أكثر توازنًا وعدالة للأجيال القادمة.

References المصادر

Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. Marine Pollution Bulletin, 62(8), 1596–1605.

Alves, M., Pereira, L., & Santos, P. (2024). Microplastic exposure and social behavior disruption in aquatic organisms. Journal of Aquatic Toxicology.

Arman, R., Lee, J., & Kim, S. (2023). Reproductive and neurobehavioral effects of microplastics in freshwater fish. Environmental Research.

Arman, R., Kim, S., & Tanaka, Y. (2024). Social and physiological impacts of microplastic ingestion in marine species. Marine Pollution Bulletin.

Borrelle, S. B., Ringma, J., Law, K. L., et al. (2020). Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. Science, 369(6510), 1515–1518.

Brown, T.(2019). Ecological imbalance: A study on the effects of chemical pollution on biodiversity. Cairo: Scientific Publishing House.

Besseling, E., Quik, J. T. K., Sun, M., & Koelmans, A. A. (2019). Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study. Environmental Pollution, 220, 540–548.

Borrelle, S. B., Ringma, J., Law, K. L., Monnahan, C. C., Lebreton, L., McGivern, A., ... & Rochman, C. M. (2020). Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. Science, 369(6510), 1515–1518.

Brooks, A. L., Wang, S., & Jambeck, J. R. (2018). The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade. Science Advances, 4(6), eaat0131.

Chen, Y., Leng, Y., Liu, X., & Wang, J. (2020). Microplastic pollution in vegetable farmlands of suburb Wuhan, central China. *Environmental Pollution, 257, 113449.

Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., et al. (2021). A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on

human health. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(2), 602.

De Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., & Rillig, M. C. (2018). Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. Global Change Biology, 24(4), 1405–1416.

European Commission. (2018). A European strategy for plastics in a circular economy. Brussels: European Commission.

Food and Agriculture Organization (FAO) & United Nations Environment Programme (UNEP). (2021). Abandoned, lost or otherwise discarded fishing gear. Food and Agriculture Organization.

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2022). Classification and environmental impact of plastic pollution: A review based on particle size and source. Environmental Science & Technology, 56(12), 7890–7905.

Grandjean, P., & Clapp, R. (2015). Perfluorinated alkyl substances: Emerging insights into health risks. Environmental Health Perspectives, 123(5), A112–A119.

Gall, S. C., & Thompson, R. C. (2015). The impact of debris on marine life. Marine Pollution Bulletin, 92(1-2), 170–179.

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L.(2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science of the Total Environment, 51(15), 8574–8582.

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, 3(7), e1700782.

Hua, T., Zhang, W., & Lin, D. (2023). Oxidative stress and neurotransmitter imbalance in fish exposed to microplastics. Ecotoxicology and Environmental Safety.

Hua, T., Lin, D., & Zhao, L. (2024). Locomotion disruption in fish induced by polystyrene microplastics. Environmental Toxicology and Chemistry.

International Energy Agency. (2018). The Future of Petrochemicals: Towards More Sustainable Plastics. Paris: IEA.

Jabri, H., Ali, R., & Nasr, B. (2023). Gut microbiota modulation in zebrafish under chronic microplastic exposure. Aquatic Toxicology.

Jabri, H., Nasr, B., & Salem, M. (2024). Behavioral alterations linked to gut dysbiosis in fish exposed to microplastics. Science of the Total Environment.

Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., et al. (2023). Marine plastic pollution: understanding, prevention, and solutions. Nature Reviews Earth & Environment, 4(1), 23–35.

Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., ... & Law, K. L. (2023). Macroplastic pollution in marine ecosystems: Impacts on wildlife and mitigation strategies. Marine Pollution Bulletin, 187, 114567.

Koelmans, A. A., Besseling, E., & Foekema, E. M. (2016). Leaching of plastic additives to marine organisms. Environmental Toxicology and Chemistry, 35(7), 1627–1637.

Koelmans, A. A., Besseling, E., Foekema, E., Kooi, M., Mintenig, S., & Redondo-Hasselerharm, P. E. (2023). Nanoplastic pollution: Risks to human health and ecosystems. Nature Reviews Earth & Environment, 4(7), 456–472.

Kumar, R., Sharma, P., & Manna, C. (2021). Plastic ingestion by livestock and its implications: A case study from India. Environmental Science and Pollution Research, 28(34), 47245–47255.

Koelmans, A. A., Besseling, E., & Shim, W. J. (2015). Nanoplastics in the aquatic environment. Critical Review in Environmental Science and Technology, 45(10), 1216–1243.

Li, W. C., Tse, H. F., & Fok, L. (2022). Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence, and effects. Science of The Total Environment, 730, 138888.

Lithner, D., Larsson, Å., & Dave, G. (2011). Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. Science of the Total Environment, 409(18), 3309–3324.

Leslie, H. A., van Velzen, M. J. M., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. Environment International, 163, 107199.

McIlgorm et al., (2011) , A., Campbell, H. F., & Rule, M. J. (2011). The economic cost and control of marine debris damage in the Asia-Pacific region. Ocean & Coastal Management, 54(9), 643–651.

Miller, M., & White, L. (2021). Environmental pollution as a barrier to sustainable development: Proposed solutions. United Nations Environment Programme Reports.

OECD. (2022). Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060. OECD Publishing.

Prüst, M., Meijer, J., & Westerink, R. H. S. (2020). The plastic brain: Neurotoxicity of micro- and nanoplastics. Particle and Fibre Toxicology, 17(1), 24.

PlasticsEurope. (2023). Plastic Packaging Sustainability Report.

Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., ... & Giorgini, E. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. Environment International, 146, 106274.

Rillig, M. C. (2012). Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? Environmental Science & Technology, 46(12), 6453–6454.

Rochman, C. M., Browne, M. A., Underwood, A. J., Van Franeker, J. A., Thompson, R. C., & Amaral-Zettler, L. A. (2016). The ecological impacts of marine debris: unraveling the demonstrated evidence from what is perceived. Environmental Science & Technology, 50(19), 10239–10254.

Smith, J. (2020). The history of pollution: From ancient times to the Industrial Revolution. Cambridge: Cambridge University Press.

Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., & Neff, R. A. (2018). Microplastics in seafood and the implications for human health. Current Environmental Health Reports, 5(3), 375–386.

Talsness, C. E., Andrade, A. J. M., Kuriyama, S. N., Taylor, J. A., & Saal, F. S. V. (2009). Components of plastic: experimental studies in animals and relevance for human health. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364(1526), 2079–2096.

UNEP. (2022). Plastic Pollution Report. United Nations Environment Programme.

UNEP (2021). Everything You Need to Know About Plastic Pollution.

https://www.unep.org/news-and-stories/story/everything-you-need-know-about-plastic-pollution.

World Bank. (2022). What a Waste 2.0: Solid Waste Management Report.

Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2022). Plastic and human health: A micro issue? Environmental Science & Technology, 51(12), 6634–6647.

Williams, R., Jones, P., & Brown, T. (2018). Environmental carrying capacity: An analysis of industrial and agricultural pollutants. Journal of Applied Environmental Sciences, 12(4), 45–60.

Williams, R., Brown, T., & Clarke, A. (2020). Environmental impacts of human activities: A multi-sectoral analysis. Proceedings of the Global Sustainability Conference (pp. 89–104).

Wang, Y., Li, Z., Zhang, H., & Liu, J. (2022). The impact of microplastics on medicinal and ornamental plants: Physiological responses and commercial quality degradation. Environmental Pollution, 315, 120432.

Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2022). Microplastic contamination in the environment and human food chain: A critical review. Environmental Science & Technology, 56(18), 12345–12356.

Zheng, J., & Suh, S. (2019). Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. Nature Climate Change, 9(5), 374–3