تلوث التربة

Soil Pollution

مدخل إلى مفهوم تلوث التربة:

تُعد التربة أحد المكونات الأساسية للبيئة الطبيعية، بل هي الركيزة التي تقوم عليها معظم أشكال الحياة البرية. وإذا كان الهواء والماء يمثلان عنصري الحياة المباشرين، فإن التربة تمثل الوعاء الذي ينطلق منه الغذاء وتستقر فيه جذور النباتات، وتتخذ منه آلاف الكائنات الحية الدقيقة والكبيرة موئلاً لها.

لكن هذه التربة مثلها مثل الهواء والماء، تتعرض للتلوث نتيجة التدخلات البشرية المتزايدة. ويُعرف تلوث التربة بأنه **إدخال أي مادة صلبة أو سائلة أو غازية، أو أي كائن حي، إلى طبقات التربة بكميات أو تركيزات تؤدي إلى تغير خواصها الطبيعية، والإضرار بقدرتها الإنتاجية، أو بإحداث أضرار بالكائنات الحية التي تعيش فيها أو عليها**، سواء كان الضرر مباشراً أو عبر انتقال الملوثات إلى الماء أو الهواء أو إلى السلسلة الغذائية.

ما يميز تلوث التربة عن غيره من أنواع التلوث هو **بطء تجدد التربة وصعوبة عودتها إلى حالتها الطبيعية** مقارنة بالماء والهواء، فالماء يتحرك ويُصفى، والهواء يتجدد بالرياح، أما التربة فتحتاج إلى مئات السنين لتكوين بضع سنتيمترات من طبقتها الخصبة. ولذلك فإن أي ضرر يلحق بالتربة قد يستمر لعقود طويلة بل قد يصبح غير قابل للإصلاح في بعض الحالات، خاصة إذا تعلق الأمر بتراكم المعادن الثقيلة أو الملوثات العضوية الثابتة.

لكي نفهم تلوث التربة فهماً دقيقاً ينبغي أن نميز بين **نوعين من مصادر التلوث** وفق مقياس الانتشار المكاني، وهما مفهومان أساسيان في أي مقرر بيئي:

- النوع الأول يُسمى **التلوث النقطي** وفيه تدخل الملوثات إلى التربة من مكان واحد محدد يمكن تحديده بوضوح، كتسرب خزان وقود تحت الأرض، أو تسرب مجاري من أنبوب مكسور، أو تسرب مواد كيميائية من مصنع معين.
- أما النوع الثاني فهو **التلوث المنتشر** وفيه تدخل الملوثات من مناطق واسعة غير محددة، مثل ترسب المبيدات المحمولة جواً من الحقول الزراعية المجاورة، أو ترسب المعادن الثقيلة من عوادم السيارات على طول الطرق السريعة، أو انتشار الأسمدة النيتروجينية على مساحات شاسعة. هذا التمييز ليس أكاديمياً فحسب، بل له آثار عملية كبيرة على رصد التلوث ومعالجته وتحديد الجهة المسؤولة قانونياً، فمعالجة التلوث النقطي أسهل (بإصلاح التسرب مثلاً) بينما معالجة التلوث المنتشر أصعب بكثير وتتطلب تغييرات في سلوك المجتمعات بأكملها.

أهمية التربة:

قبل الخوض في مسببات التلوث وآثاره، لا بد من التوقف عند **أهمية التربة** من الناحية البيئية والحيوية، فهي ليست مجرد طبقة سطحية نعيش عليها أو نغرس فيها البذور، بل هي نظام حيوي معقد يتكون من أربعة عناصر رئيسية تتفاعل مع بعضها: المواد المعدنية (كالرمل والطين)، والمواد العضوية (بقايا النباتات والحيوانات المتحللة)، والماء، والهواء. هذه المكونات الأربعة لا توجد منفصلة بل تترتب في حبيبات ومسامات تشكل بنية فيزيائية وكيميائية فريدة تسمح باحتباس الماء ومرور الهواء وتبادل العناصر الغذائية.

وتتجلى أهمية التربة في النقاط التالية:

1. التربة هي القاعدة الصلبة التي تثبت فيها النباتات جذورها: وبدونها لا يمكن للنباتات أن تنمو أو تقاوم الرياح والسيول، ومن ثم تنهار السلسلة الغذائية بأكملها، لأن النباتات هي المنتج الأول الذي تعتمد عليه جميع الكائنات الأخرى في الحصول على الطاقة.
2. التربة هي المصدر الرئيسي للماء والعناصر الغذائية الأساسية لنمو النباتات: مثل النيتروجين والفوسفور والبوتاسيوم والمغذيات الصغرى كالحديد والزنك. وتحصل النباتات على هذه العناصر عن طريق الجذور التي تمتصها من **محلول التربة** (وهو الماء الذي يذيب الأملاح والعناصر الموجودة بين حبيبات التربة). فإذا تلوثت التربة بمواد سامة فإنها تنتقل مباشرة إلى جذور النباتات، ومنها إلى ثمارها وأوراقها، ثم إلى الحيوانات والإنسان.
3. التربة موطن لمجموعة هائلة من الكائنات الحية المجهرية والكبيرة: ففي كل غرام واحد من التربة الخصبة، يمكن أن توجد مئات الملايين من البكتيريا، والفطريات، والطحالب المجهرية، بالإضافة إلى كائنات أكبر حجماً مثل ديدان الأرض والحشرات والعناكب والقوارض الصغيرة. وهذه الكائنات ليست مجرد ضيوف عابرين، بل تقوم بوظائف حيوية لا غنى عنها: فهي تُحلل المواد العضوية الميتة وتحولها إلى دبال (Humus) يغذي التربة، وتُهوي التربة بحفرها وأنفاقها، وتكافح الآفات طبيعياً. ولذلك فإن تلوث التربة يؤدي إلى موت هذه الكائنات، ومن ثم تعطل الدورة الطبيعية للمواد العضوية، وتدهور خصوبة التربة تدريجياً. ومما زاد الاهتمام العلمي بالتربة في العقدين الأخيرين اكتشاف **الميكروبيوم الترابي** (Soil microbiome): وهو المجتمع الكامل من البكتيريا، والفطريات، والأوليات، والفيروسات التي تعيش في التربة، والتي تشكل شبكة معقدة من التفاعلات. تقدر أعداد الكائنات الحية الدقيقة في غرام واحد من التربة الخصبة بما يتراوح بين مليار وألف مليار خلية، وتمثل آلاف الأنواع المختلفة، معظمها لم يُكتشف بعد. وهذه الكائنات لا تقوم فقط بتحليل المواد العضوية، بل تؤدي وظائف حيوية أخرى مثل تثبيت النيتروجين الجوي (عن طريق بكتيريا الريزوبيوم التي تعيش في جذور البقوليات)، وتذويب المعادن (إذ تفرز بعض الفطريات أحماضاً عضوية تذيب الفوسفات وتجعله متاحاً للنباتات)، وحماية النباتات من مسببات الأمراض (عن طريق إنتاج مضادات حيوية طبيعية). كما أن الميكروبيوم الترابي يشكل خط الدفاع الأول ضد بعض الملوثات، حيث تستطيع بعض سلالات البكتيريا تحليل المبيدات والهيدروكربونات النفطية وتحويلها إلى مواد غير ضارة. ولهذا السبب فإن تدمير الميكروبيوم الترابي بالتلوث الكيميائي لا يؤدي فقط إلى موت الكائنات الدقيقة، بل إلى انهيار وظائف كاملة في التربة لا يمكن تعويضها بسهولة.

4. تلعب التربة دوراً مهماً في تنقية المياه الجوفية: فعندما يتسرب الماء خلال طبقات التربة، فإن الحبيبات المعدنية والمواد العضوية والدقائق الطينية تعمل كمرشح طبيعي يحجز الملوثات والجسيمات العالقة. لكن هذه القدرة الترشيحية ليست لانهائية، فعندما تزداد كمية الملوثات عن حد معين، فإن التربة تفقد قدرتها على التنقية، بل قد تصبح هي نفسها مصدراً لتلوث المياه الجوفية.

لذا فإن القول المأثور (التربة السليمة تعني حياة سليمة) ليس مجرد شعار، بل حقيقة بيئية تؤكد أن الحفاظ على تربة نظيفة هو حجر الأساس للحفاظ على صحة الإنسان والتنوع الحيوي والنظام البيئي ككل.

المصادر الرئيسية لتلوث التربة:

تتنوع مصادر تلوث التربة بتنوع الأنشطة البشرية والعمليات الطبيعية، إلا أن النصيب الأكبر يأتي من الأنشطة البشرية. ويمكن تقسيم هذه المصادر إلى أربع مجموعات كبرى سنتناولها بالشرح التفصيلي:

أولاً: الكيميائيات الزراعية (الأسمدة والمبيدات):

شهدت الزراعة الحديثة استخداماً واسعاً للأسمدة الكيميائية والمبيدات بهدف زيادة الإنتاج ومكافحة الآفات، لكن الاستخدام غير الرشيد لهذه المواد أدى إلى تلوث التربة بدرجات متفاوتة. ولنميز هنا بين المجموعتين:

- **الأسمدة الكيميائية:** هي مركبات تُضاف إلى التربة لتعويض العناصر الغذائية التي تستنزفها النباتات، وأكثرها شيوعاً هي الأسمدة النيتروجينية والفوسفورية والبوتاسية. ولعل أبرز أثر سلبي للأسمدة النيتروجينية هو أنها تزيد من حموضة التربة (أي تخفض قيمة الـ pH)، لأن النتروجين عندما يتحول إلى نترات في التربة يطلق أيونات هيدروجين تسبب الحموضة. والتربة الحمضية تعيق امتصاص الجذور للعناصر الغذائية، وتؤدي إلى إذابة معادن سامة مثل الألمنيوم الذي يؤذي الجذور. أما الأسمدة الفوسفورية: فليست ضارة بحد ذاتها من حيث الحموضة، ولكنها غالباً ما تحتوي على شوائب من معادن ثقيلة، **وأخطرها** الكادميوم (Cadmium)، الذي يتراكم في التربة ثم تنتقل إلى النباتات ثم إلى الحيوانات والإنسان.

وعموماً يؤدي الإفراط في التسميد إلى اختلال التوازن الطبيعي لأحياء التربة، فتموت ديدان الأرض مثلاً، وتتكاثر أنواع ضارة من البكتيريا أو الفطريات.

- **المبيدات:** تعرف المبيدات بأنها أي مادة أو خليط من المواد الكيميائية يُستخدم لقتل أو طرد أو منع تكاثر الكائنات التي تعتبر آفات زراعية أو صحية، وتشمل مبيدات الحشرات، ومبيدات الفطريات، ومبيدات الأعشاب الضارة، ومبيدات القوارض. وتشير إحصاءات منظمة الأغذية والزراعة (FAO)إلى وجود أكثر من ألف مادة كيميائية مختلفة تستخدم كمبيدات حول العالم. ما يميز المشكلة هنا هو أن معظم هذه المبيدات ليست انتقائية (أي أنها تقتل الكائنات النافعة مع الضارة)، كما أنها تتصف بالثبات النسبي، أي أنها لا تتحلل بسرعة في التربة، بل تبقى فيها لأسابيع أو شهور أو حتى سنوات، وتُعرف هذه المواد باسم الملوثات العضوية الثابتة (POPs): ولعل أشهر مثال على ذلك هو مركب الـDDT ، الذي استخدم لعقود كمبيد حشري فعال، لكنه اكتشف لاحقاً أنه يسبب ترقق قشر بيض الطيور الجارحة والمائية، مما كاد يؤدي إلى انقراض أنواع مثل العقاب الأصلع والصقر

الشاهين. وتكمن خطورة الـ DDT في آلية انتقاله في البيئة: فعند رش المبيد على المحصول يسقط جزء منه على سطح التربة، ثم تمتصه ديدان الأرض التي تعيش في التربة فتركزه في أجسامها، وعندما تأكل الطيور المهاجرة هذه الديدان مثل طائر الشحرور(Eurasian Blackbird) ، فإنها تحصل على جرعة مركزة من المبيد الذي يؤثر في جهازها العصبي مسبباً الشلل ثم الموت. وهكذا ينتقل المبيد من التربة إلى ديدان الأرض إلى الطيور، وقد يصل في النهاية إلى الإنسان إذا تناول لحوم هذه الطيور أو بيضها أو حتى المنتجات الزراعية المزروعة في تربة ملوثة. وهذا المثال يوضح بوضوح مبدأ **التراكم الحيوي** و**التضخم الحيوي.**

ضمن حديثنا عن المبيدات لا بد من إفراد جزء خاص بما يُعرف بـ **الملوثات العضوية الثابتة (** Persistent Organic Pollutants – POPs**):** وهي مجموعة من المركبات الكيميائية العضوية التي تتسم بأربع خصائص خطيرة: الثبات البيئي (أي مقاومتها للتحلل الكيميائي والحيوي والضوئي)، والسمية العالية، والتنقل لمسافات بعيدة عبر الهواء والماء، والتراكم الحيوي في الأنسجة الدهنية للكائنات الحية. وتشمل هذه المجموعة مركبات مثل ثنائي الفينيل متعدد الكلور (PCBs) المستخدمة في المحولات الكهربائية سابقاً، ومبيد الدي دي تي (DDT) ومبيد الديلدرين، بالإضافة إلى الديوكسينات والفيورانات التي تنتج كمنتجات ثانوية غير مقصودة لحرق النفايات وبعض العمليات الصناعية. وتجدر الإشارة إلى أن 12 من هذه الملوثات العضوية الثابتة تم حظرها أو تقييد استخدامها بموجب **اتفاقية استوكهولم** (Stockholm Convention) لعام 2001، وهي معاهدة دولية وقعتها أكثر من 180 دولة بهدف حماية صحة الإنسان والبيئة من هذه المواد شديدة الخطورة. وقد تم لاحقاً إضافة ملوثات أخرى إلى القائمة، ليصبح العدد 30 مادة. وبالرغم من حظرها منذ سنوات تبقى هذه الملوثات موجودة في التربة لعقود، ولا تزال تظهر في أنسجة البشر والحيوانات في مناطق نائية لم تستخدم فيها هذه المواد مطلقاً، وذلك بسبب نقلها عبر الرياح والمياه لآلاف الكيلومترات وهي ظاهرة تُعرف بـ تأثير الجراد (grasshopper effect).

ثانياً: الفضلات المنزلية والصناعية:

تنتج المجتمعات البشرية كميات هائلة من الفضلات الصلبة والسائلة، وإذا لم تُدار هذه الفضلات بشكل سليم، فإنها تصبح مصدراً خطيراً لتلوث التربة. تشمل الفضلات المنزلية بقايا الطعام، والورق، والبلاستيك، والزجاج، والمعادن، والمنسوجات، والمواد الكيميائية المنزلية كالمنظفات والمبيدات المنزلية والدهانات. أما الفضلات الصناعية فتشمل مخلفات المصانع الكيميائية، ومصانع المعادن، والمستشفيات (الفضلات الطبية الخطرة كالإبر الملوثة والأنسجة)، ومحطات الطاقة، وورش السيارات.

تتسبب هذه الفضلات عندما تُلقى على الأرض أو تدفن بطريقة غير صحية في مشكلتين متداخلتين:

1. إن تحلل المواد العضوية (كبقايا الطعام والورق) في غياب الأكسجين يُنتج غازات كريهة وميثان (وهو غاز دفيء قابل للاشتعال)، وسائلاً أسود اللون يُسمى **المُرشَح** (Leachate) يتسرب إلى داخل التربة ويحمل معه الملوثات العضوية والمعادن الثقيلة والفيروسات والبكتيريا إلى المياه الجوفية.
2. إن أكوام الفضلات تصبح أرضاً خصبة لتكاثر الحشرات الناقلة للأمراض (كالذباب والبعوض) والقوارض (كالجرذان والفئران)، مما ينشر الأمراض بين السكان المجاورين.

ولمواجهة هذه المشكلة ظهر في السنوات الأخيرة مفهوم متكامل لإدارة الفضلات يُعرف بمبدأ **الـ R4**: وهي أربع كلمات إنجليزية تبدأ بحرف R تعبر عن أربع استراتيجيات متسلسلة حسب الأفضلية: **التقليل** (Reduction) أي تقليل كمية الفضلات المنتجة من المصدر، **إعادة الاستخدام** (Reuse) أي استخدام المنتج مرة أخرى دون تحويله إلى مادة خام، **التدوير** (Recycling) أي تحويل الفضلات إلى منتجات جديدة كتحويل الورق المستعمل إلى ورق جديد أو الزجاج المكسور إلى زجاج جديد، و**الاسترجاع** (Recovery) أي استخلاص قيمة من الفضلات مثل حرقها لإنتاج الطاقة. ويتعين على المجتمعات أن تتبع هذا المبدأ بدلاً من التخلص العشوائي في مكبات غير مهيأة.

ثالثاً: الأمطار الحمضية:

قد يبدو ربط تلوث التربة بالأمطار غريباً للوهلة الأولى، لكن الحقيقة أن الأنشطة البشرية تؤثر في التربة عبر الهواء أيضاً. تنطلق من محطات توليد الكهرباء التي تعمل بالفحم، ومن مصانع الأسمنت وصهر المعادن، ومن عوادم السيارات، كميات هائلة من غازات مثل ثاني أكسيد الكربون (CO_2) وأكاسيد النيتروجين (NOx) وثاني أكسيد الكبريت (SO_2). ترتفع هذه الغازات إلى الجو، وتتفاعل مع بخار الماء والأكسجين بفعل أشعة الشمس والرطوبة، لتتحول إلى أحماض: حمض الكربونيك، وحمض النيتريك، وحمض الكبريتيك. ثم تعود إلى الأرض مع مياه الأمطار، وعندها تصبح هذه الأمطار حمضية (أي أن قيمة pH لها تنخفض عن 5.6 الطبيعي) وتُسمى **الأمطار الحمضية**.

عندما تتساقط الأمطار الحمضية على التربة يحدث تأثيران خطيران:

a. التأثير المباشر هو زيادة حموضة التربة: وهذه الزيادة كما ذكرنا سابقاً تؤدي إلى إذابة معادن سامة مثل الألومنيوم الذي يضر بجذور النباتات ويمنعها من امتصاص الماء والعناصر الغذائية، كما تقتل الكائنات الدقيقة المفيدة وديدان الأرض.

b. التأثير غير المباشر هو أن الأحماض تتفاعل مع معادن التربة وتذيبها: فتتحرر أيونات الكالسيوم والمغنيسيوم والبوتاسيوم (وهي عناصر غذائية) وتغسلها إلى المياه الجوفية، فتصبح التربة فقيرة بهذه العناصر ومن ثم غير خصبة. وفي المناطق التي تتعرض لأمطار حمضية متكررة، نلاحظ موت الغابات بأكملها، وتسمى هذه الظاهرة موت الغابات (Waldsterben) وقد لوحظت بشكل كبير في أوروبا وأمريكا الشمالية.

لفهم آلية تلف التربة بسبب الأمطار الحمضية بشكل أعمق ينبغي النظر إلى التفاعلات الكيميائية التي تحدث، فعندما تهطل الأمطار الحمضية المحتوية حمض الكبريتيك (H_2SO_4) على تربة غنية بكربونات الكالسيوم ($CaCO_3$)، يحدث تفاعل معادل ينتج عنه كبريتات الكالسيوم ($CaSO_4$) وثاني أكسيد الكربون والماء، مما قد يحيد الحموضة مؤقتاً إذا كانت التربة ذات قدرة تخزين عالية (قاعدة عازلة). لكن في التربة الفقيرة بالكربونات (كالترب الرملية أو الغرانيتية) يبقى الحمض حراً، فيذيب أيونات الألمنيوم (Al^{3+}) من معادن السيليكات، وهذه الأيونات الحرة سامة للجذور، إذ تمنع امتصاص الكالسيوم والمغنيسيوم وتسبب توقف النمو. وقد دلت الأبحاث أن تركيز الألمنيوم الذائب الذي يتجاوز 2 ppm في محلول التربة يكفي لإحداث ضرر ملحوظ في جذور معظم النباتات الحساسة، بينما في التربة السليمة غير الحمضية يبقى الألمنيوم محبوساً في معادن صلبة غير قابلة للذوبان. وهذا يفسر لماذا تموت غابات بأكملها في المناطق التي تعرضت لأمطار حمضية لسنوات خاصة على سفوح الجبال حيث التربة رقيقة وفقيرة بالمعادن القلوية.

رابعاً: المعادن الثقيلة:

ربما يكون تلوث التربة بالمعادن الثقيلة من أخطر أنواع التلوث وأكثرها استدامة، لأن هذه المعادن لا تتحلل ولا تفسد بفعل البكتيريا أو الحرارة أو الوقت، بل تبقى في التربة لمئات السنين. تُعرف المعادن الثقيلة بأنها **العناصر المعدنية التي تزيد كثافتها عن 5 غرامات في السنتيمتر المكعب مثل الرصاص، والكادميوم، والزئبق، والنحاس، والزنك، والكروم، والنيكل، والزرنيخ.**

بعض هذه المعادن بتراكيز ضئيلة جداً تعتبر ضرورية للحياة (مثل النحاس والزنك والحديد) لأنها تدخل في تركيب الانزيمات والبروتينات، لكنها تصبح سامة فور تخطيها تركيزاً معيناً. أما معادن أخرى مثل الرصاص والكادميوم والزئبق فليست لها أي وظيفة حيوية معروفة، وهي سامة حتى بأقل التراكيز.

كيف تصل المعادن الثقيلة إلى التربة؟

هناك طرق متعددة، منها: الغبار المتساقط من مصانع صهر المعادن، ومخلفات المناجم، والسماد البلدي الملوث (عندما تتغذى الحيوانات على أعلاف ملوثة)، والأسمدة الفوسفاتية التي تحتوي الكادميوم كشائب، والري بمياه الصرف الصحي أو الصناعي، وتسرب الوقود من محطات البنزين، وعوادم السيارات (خاصة الرصاص الصادر من البنزين المحتوي على رباعي إيثيل الرصاص)، ومنتجات البطاريات والدهانات التي ترمى في المكبات.

لماذا تشكل المعادن الثقيلة خطورة بالغة؟

1. لأنها لا تفسد ولا تتحلل: فتبقى في التربة إلى الأبد تقريباً.
2. لأنها تنتقل من التربة إلى النباتات عن طريق الجذور، فتدخل السلسلة الغذائية.
3. لأنها تميل إلى **التراكم الحيوي**، أي يزداد تركيزها في أجسام الكائنات الحية كلما ارتفعنا في السلسلة الغذائية، فنجد أن تركيز الرصاص مثلاً في عشب المرعى (وهو المنتج الأول) قد يكون قليلاً، لكن تركيزه في لحم البقرة التي ترعى عليه يكون أعلى بعدة مرات، وتركيزه في الإنسان الذي يأكل لحم البقرة يكون أعلى بكثير.
4. لأن أجسام الكائنات الحية لا تستطيع التخلص من هذه المعادن بسهولة، فتتراكم في الأعضاء الداخلية (الكبد، الكلى، العظام، الدماغ) وتسبب أمراضاً مزمنة. خامساً، بعض المعادن الثقيلة ذات خواص إشعاعية (مثل اليورانيوم 235، والراديوم، والثوريوم) مما يضيف خطر الإشعاع إلى خطر السمية.

أسس سلوك المعادن في التربة:

لا تتصرف جميع المعادن الثقيلة في التربة بالطريقة نفسها، بل يعتمد سلوكها بشكل كبير على خصائص التربة الفيزيائية والكيميائية. فمعظم المعادن الثقيلة تميل إلى **الامتزاز** (Adsorption)على سطوح جزيئات الطين والمادة العضوية، أي أنها ترتبط كهروستاتيكياً بهذه الجزيئات، مما يقلل من حركتها وقابليتها للامتصاص من قبل النباتات. وكلما زادت نسبة الطين والمادة العضوية في التربة، زادت قدرتها على تثبيت المعادن الثقيلة. كما أن **درجة حموضة التربة (pH)** تعتبر العامل الأكثر تأثيراً:

ففي التربة الحمضية تتنافس أيونات الهيدروجين (H^+) مع أيونات المعادن الثقيلة مثل (Pb^{2+}, Cd^{2+}) على مواقع الامتزاز، مما يؤدي إلى تحرر المعادن الثقيلة إلى محلول التربة، وبالتالي تصبح أكثر توفراً للجذور وأكثر قابلية للتسرب إلى المياه الجوفية.

أما في التربة القاعدية فتترسب المعادن الثقيلة على شكل هيدروكسيدات أو كربونات غير قابلة للذوبان، وتقل خطورتها بشكل كبير. لهذا السبب، فإن إضافة الجير (كربونات الكالسيوم) إلى التربة الملوثة بالمعادن الثقيلة هي إحدى طرق المعالجة الكيميائية التي سنذكرها لاحقاً.

التقدير الكمي للتراكم الحيوي والتضخم الحيوي:

لجعل مفهوم التراكم الحيوي قابلاً للمقارنة بين الدراسات المختلفة يستخدم العلماء **عامل التراكم الحيوي** (Bioaccumulation Factor – BAF): ويُحسب على أنه نسبة تركيز المادة الملوثة في أنسجة الكائن الحي إلى تركيزها في التربة (أو الماء) المحيطة. فعلى سبيل المثال: إذا كان تركيز الكادميوم في التربة 1 ملغ/كغ، ووجدنا تركيزه في أنسجة دودة الأرض 50 ملغ/كغ ، فإن عامل التراكم الحيوي هو 50، مما يعني أن دودة الأرض ركزت الملوث 50 ضعفاً.

أما **عامل التضخم الحيوي** (Biomagnification Factor – BMF): فيعبر عن الزيادة في التركيز بين مستوى غذائي والآخر. فلو كان تركيز الكادميوم في ديدان الأرض 50 وفي الطيور التي تأكلها 200، فإن عامل التضخم بين المستويين هو 4. وهذه العوامل الكمية تسمح للعلماء بتصنيف الملوثات حسب خطورتها من حيث قدرتها على التضخم الحيوي، وقد وجد أن المبيدات العضوية الثابتة مثل الـ DDT والـ PCBs لديها عوامل تضخم عالية جداً قد تصل إلى مئات الآلاف بين المستوى الغذائي الأول والنهائي.

أمثلة تفصيلية عن بعض المعادن الثقيلة:

الزئبق (Mercury): هذا المعدن السائل الوحيد في درجة حرارة الغرفة، له قابلية عالية للتطاير، أي أنه يتحول إلى بخار وينتقل في الهواء لمسافات بعيدة قبل أن يترسب في التربة. يستخدم الزئبق في الصناعات الكهربائية (مصابيح الفلورسنت، البطاريات، المفاتيح الكهربائية)، وفي صناعة الورق، وفي طب الأسنان (حشوات الأملغم)، وفي محارير قياس الضغط والحرارة. عندما يُلقى الزئبق في مكبات النفايات، أو عندما تنكسر مصابيح الفلورسنت في الطبيعة، يتبخر الزئبق ويترسب على التربة، ومن ثم تمتصه النباتات. لكن أخطر تحول يحدث للزئبق في البيئات الرطبة (مثل الأراضي الرطبة والبحيرات) حيث تتحول البكتيريا اللاهوائية بعض الزئبق إلى مركب **ميثيل الزئبق** (Methylmercury)، وهو شديد السمية للجهاز العصبي، وقد تسبب التسمم به في كارثة مينماتا باليابان في خمسينيات القرن الماضي.

الكادميوم (Cadmium): فيدخل التربة أساساً من الأسمدة الفوسفاتية (لأن صخر الفوسفات الطبيعي يحتوي على الكادميوم)، ومن البطاريات، وبعض الدهانات. يتميز الكادميوم بأنه يبقى في جسم الإنسان لعشرات السنين، ويتركز في الكلى والكبد والعظام، ويمكن أن يسبب مرض إيتاي-إيتاي (Itai-Itai) الذي اكتشف في اليابان، حيث أدى التسمم بالكادميوم إلى هشاشة العظام وآلام مبرحة وتشوهات.

الرصاص (Lead): هو الأكثر شيوعاً في البيئات الحضرية، والمصدر الرئيسي له كان عوادم السيارات، فقد كان يضاف مركب رباعي إيثيل الرصاص إلى البنزين لتحسين أداء المحرك، وعند احتراقه يتحول

الرصاص إلى جسيمات دقيقة تنتشر في الهواء ثم تترسب على التربة. وقد أظهرت الدراسات أن أطفال المدن الكبرى (مثل بغداد، القاهرة) لديهم نسب رصاص في أسنانهم أعلى بكثير من أطفال الريف، لأنهم يتنفسون هواء ملوثاً برصاص السيارات، ويبتلعون غبار الشوارع الملوث. الرصاص يؤثر في الجهاز العصبي المركزي، ويسبب تأخراً في النمو العقلي للأطفال، وتشوهات خلقية للأجنة، وارتفاع ضغط الدم لدى البالغين. وحتى بعد أن منعت معظم دول العالم إضافة الرصاص إلى البنزين، يبقى الرصاص المتراكم في التربة على جوانب الطرق مصدر تهديد لسنوات طويلة.

النحاس (Copper) والزنك (Zinc): هما من العناصر الأساسية للحياة، إذ يدخلان في تركيب العديد من الإنزيمات (مثل إنزيم ديسموتاز الفائق الأكسيد الذي يحمي الخلايا من التلف). لكنهما يصبحان سامين عند التركيزات المرتفعة، حيث يثبطان إنزيمات أخرى ويسببان أكسدة الخلايا. مصادرهما في التربة: الأسمدة الفوسفاتية، ومبيدات الفطريات المحتوية على النحاس، ومخلفات المناجم .

الزرنيخ (Arsenic): وهو شبه فلز، يوجد طبيعياً في القشرة الأرضية، لكن الأنشطة البشرية كصهر الخامات واستخدام مبيدات الزرنيخ في الماضي أدت إلى تلوث واسع. يتميز الزرنيخ بأن سُميته تعتمد على شكله الكيميائي: الزرنيخ ثلاثي التكافؤ (As^{3+}) أكثر سمية بـ 60 مرة من الزرنيخ خماسي التكافؤ(As^{5+}) ، والمركبات العضوية للزرنيخ (مثل الزرنيخوبيتين) أقل سمية بكثير. وقد تسبب التسمم المزمن بالزرنيخ عبر مياه الشرب في بنغلاديش والهند في أكبر كارثة تسمم جماعي في التاريخ، حيث تعرض أكثر من 100 مليون شخص لمياه آبار حفرت في طبقات جيولوجية غنية بالزرنيخ الطبيعي، مما أدى إلى أمراض جلدية وسرطانات متعددة.

الكروم (Chromium): الذي يوجد غالباً في صورتي الكروم ثلاثي التكافؤ (Cr^{3+}) وهو ضروري لعملية الأيض السكري، والكروم سداسي التكافؤ (Cr^{6+}) وهو شديد السمية ومسرطن. ينطلق الكروم سداسي التكافؤ من الصناعات الجلدية (دباغة الجلود)، وطلاء المعادن، ومخلفات الكروميت، ويمكن أن يبقى في التربة لعقود.

الآثار البيئية والصحية لتلوث التربة:

بعد أن استعرضنا مصادر التلوث، لا بد من إلقاء نظرة على الآثار المترتبة على هذه الملوثات، والتي يمكن تلخيصها في النقاط التالية مع شرح كل منها:

أولاً: تدهور خصوبة التربة وفقدان الإنتاجية الزراعية:

الملوثات الكيميائية (خاصة المعادن الثقيلة والمبيدات) تقتل الكائنات الدقيقة التي تحلل المواد العضوية، وتثبط نشاط الإنزيمات في جذور النباتات، وتغير pH التربة، مما يجعل التربة غير قادرة على دعم النمو الطبيعي للنباتات، وتضطر المجتمعات إما إلى التخلي عن تلك الأراضي أو إنفاق مبالغ طائلة لاستصلاحها.

ثانياً: انتقال الملوثات إلى الإنسان عبر السلسلة الغذائية:

عندما تزرع الخضراوات والحبوب في تربة ملوثة، تمتص جذورها الملوثات وتخزنها في أجزائها الصالحة للأكل. ويتناول الإنسان هذه المنتجات، فتدخل الملوثات إلى جسمه. كما أن الحيوانات التي ترعى على نباتات ملوثة أو تشرب مياهاً ملوثة تنتقل الملوثات إلى لحومها وألبانها وبيضها، ومنها إلى الإنسان. وهكذا تصبح التربة الملوثة مصدراً صامتاً للأمراض المزمنة كالسرطان، والفشل الكلوي، وأمراض الكبد، والتشوهات الخلقية، واضطرابات الغدد الصماء، والأمراض العصبية.

ثالثاً: تلوث المياه الجوفية:

تتسرب الملوثات مع مياه الأمطار أو مياه الري عبر مسام التربة إلى الطبقات العميقة حيث توجد المياه الجوفية (الخزانات الجوفية التي نحفر الآبار للوصول إليها). وبمجرد تلوث المياه الجوفية، يصبح تنظيفها شبه مستحيل بسبب صعوبة الوصول إليها وبطء حركتها. وقد وجد في كثير من المناطق الزراعية أن الآبار التي كانت تزود القرى بمياه شرب نقية أصبحت تحتوي على النترات (من الأسمدة) والمبيدات والمعادن الثقيلة بتركيزات تفوق الحدود المسموحة عالمياً.

رابعاً: فقدان التنوع الحيوي للتربة:

التربة السليمة تحتوي على مئات الأنواع من البكتيريا والفطريات والديدان والحشرات والعناكب والقشريات الصغيرة، كل منها يؤدي دوراً محدداً في دورة العناصر وتحسين بنية التربة. تلوث التربة يقضي على كثير من هذه الأنواع، ويصبح النظام البيئي للتربة فقيراً وهشاً، ومن ثم تقل قدرته على التعافي من أي إجهاد إضافي.

التفاعل بين تلوث التربة وتغير المناخ:

يمثل تلوث التربة وتغير المناخ قضيتين بيئيتين غالباً ما تدرسان بشكل منفصل، لكنهما تتفاعلان في الواقع بطرق تجعل كل واحدة منهما تزيد من حدة الأخرى. من جهة، يؤدي تغير المناخ (ارتفاع درجات الحرارة وتغير أنماط الأمطار وزيادة تواتر الجفاف والفيضانات) إلى تغير سلوك الملوثات في التربة: فالحرارة الأعلى تزيد من تطاير الملوثات العضوية (مثل المبيدات والمذيبات) وتسرع من تحول الزئبق إلى ميثيل الزئبق في الأراضي الرطبة. كذلك فإن الجفاف يقلل من رطوبة التربة، فيقل نشاط الكائنات المحللة، فتتراكم الملوثات بدلاً من أن تتحلل. والفيضانات قد تنشر الملوثات من التربة إلى المياه السطحية والجوفية وتوسع رقعة التلوث. من جهة أخرى، فإن التربة الملوثة تفقد قدرتها على تخزين الكربون، إذ تقل كتلتها الحيوية (النباتات والكائنات الدقيقة)، وتتحول المادة العضوية إلى ثاني أكسيد الكربون بمعدل أسرع بسبب الإجهاد الكيميائي. كما أن بعض طرق معالجة التربة كالحرق تؤدي إلى انبعاثات غازات الدفيئة. وهناك جانب آخر يتمثل في أن الملوثات نفسها قد تتداخل مع العمليات البيوجيوكيميائية المرتبطة بالمناخ، فالمعادن الثقيلة تثبط إنزيمات التربة المسؤولة عن تحويل الميثان (غاز دفيء قوي) إلى ثاني أكسيد الكربون الأقل ضرراً، مما يعني أن التربة الملوثة قد تنبعث منها كميات أكبر من الميثان. لذا، فإن أي استراتيجية للتعامل مع تلوث التربة يجب أن تراعي آثارها المناخية، والعكس صحيح.

معالجة التربة الملوثة واستصلاحها:

هناك عدة طرق لمعالجة التربة الملوثة، يعتمد اختيار الطريقة المناسبة على نوع الملوث وتركيزه وعمق التلوث ومساحة الأرض الملوثة وتكلفة المعالجة:

أ. **المعالجة الطبيعية:** تُستخدم للملوثات المتطايرة أو القابلة للغسل، مثل بعض المذيبات العضوية أو الأملاح. وتتضمن إما حفر التربة وغسلها بالماء (قد يضاف إليه مواد مذيبة أو مرسبة) ثم إعادة الماء النظيف إلى التربة، أو حقن هواء ساخن في التربة لتبخير الملوثات المتطايرة وجمعها من السطح. هذه الطريقة بسيطة لكنها لا تصلح للمعادن الثقيلة.

ب. **المعالجة الحرارية:** تُستخدم للملوثات العضوية الثابتة (مثل المبيدات) أو الزيوت. يتم حفر التربة الملوثة وإدخالها في أفران دوارة تصل درجة حرارتها إلى 500-1000 درجة مئوية، مما يؤدي إلى تبخر أو احتراق الملوثات، ثم تعاد التربة المعالجة إلى موقعها. هذه الطريقة فعالة لكنها مكلفة وتستهلك طاقة عالية وقد تدمر الخصائص الطبيعية للتربة (كالمواد العضوية والبكتيريا النافعة).

ج. **المعالجة الكيميائية:** تعتمد على إضافة مواد كيميائية إلى التربة لتحويل الملوث إلى مركب أقل سمية أو أقل ذوباناً (وبالتالي يبقى ثابتاً في التربة ولا ينتقل إلى الماء أو النباتات). على سبيل المثال، يمكن إضافة الفوسفات أو الجير (كربونات الكالسيوم) إلى التربة الملوثة بالرصاص، فيتكون فوسفات الرصاص أو كربونات الرصاص وهما مركبان غير قابلين للذوبان في الماء تقريباً، وبالتالي لا تمتصهما النباتات ولا تتسرب إلى المياه الجوفية. لكن هذه الطريقة لا تزيل الملوث من التربة بل تثبته فقط، وأي تغير في pH التربة قد يحرره مرة أخرى.

د. **المعالجة الحيوية (Bioremediation):** من أكثر الطرق استدامة وصديقة للبيئة، وتستغل قدرة بعض الكائنات الحية (بكتيريا، فطريات، نباتات) على تفكيك الملوثات العضوية أو امتصاص المعادن الثقيلة. هناك أسلوبان رئيسيان: الأول هو **التحلل الحيوي**، حيث تُضاف إلى التربة سلالات مختارة من البكتيريا والفطريات التي تتغذى على الملوثات العضوية (مثل النفط، والبنزين، والمبيدات) وتحولها إلى ثاني أكسيد الكربون والماء، وتُستخدم هذه الطريقة بنجاح في تنظيف التربة الملوثة بتسربات النفط. والأسلوب الثاني هو **المعالجة النباتية (Phytoremediation):** حيث تزرع أنواع معينة من النباتات تُعرف باسم النباتات فائقة التراكم (Hyperaccumulators): وهي نباتات قادرة على امتصاص المعادن الثقيلة من التربة عبر جذورها وتخزينها في سيقانها وأوراقها بكميات كبيرة جداً دون أن تموت، ثم تُحصد هذه النباتات وتُتخلص منها كمواد خطرة. أشهر الأمثلة نبات الحَرْف (*Thlaspi caerulescens*) الذي يمتص الزنك والكادميوم، ونبات الخردل الهندي الذي يمتص الرصاص. هذه الطريقة رخيصة وجمالية لكنها بطيئة وقد تستغرق عدة مواسم زراعية.

تقنيات حديثة في المعالجة:

إلى جانب الطرق التقليدية توجد تقنيات حديثة بدأت تنتشر في السنوات الأخيرة لمعالجة الترب الملوثة بالمعادن الثقيلة والملوثات العضوية الثابتة. من أبرزها:

1. **المعالجة الكهروحركية** (Electrokinetic remediation): وتعتمد على تطبيق تيار كهربائي مباشر بين أقطاب مغمورة في التربة. يعمل التيار على تحريك أيونات المعادن الثقيلة (كاتيونات موجبة نحو القطب السالب، وأنيونات سالبة نحو القطب الموجب)، فتتجمع حول الأقطاب حيث يمكن إزالتها بسهولة. هذه التقنية فعالة بشكل خاص في الترب قليلة النفاذية (كالترب الطينية) حيث يصعب غسل الملوثات بالماء، لكن عيوبها أنها تحتاج إلى استهلاك طاقة كبير وقد تغير الخصائص الطبيعية للتربة.
2. أما التقنية الثانية فهي **المعالجة باستخدام المواد النانوية** (Nanoremediation): حيث تُحقن جسيمات نانوية (بأبعاد أقل من 100 نانومتر) في التربة لتتفاعل مع الملوثات وتحولها إلى مواد غير ضارة. على سبيل المثال، تستخدم جسيمات الحديد النانوي الصفري (nZVI) لاختزال وتثبيت الملوثات العضوية المهلجنة (مثل ثنائي الفينيل متعدد الكلور) وتحويلها إلى هيدروكربونات بسيطة غير سامة، كما تختزل الكروم سداسي التكافؤ (Cr^{6+}) إلى كروم ثلاثي (Cr^{3+}) الأقل سمية. وتتميز هذه الجسيمات بمساحة سطحية هائلة بالنسبة لحجمها، مما يجعلها شديدة التفاعل. ومع ذلك لا تزال المخاطر المحتملة للجسيمات النانوية على الكائنات الحية في التربة غير مفهومة تماماً، لذلك يستخدم هذا الأسلوب بحذر في التطبيقات الميدانية.
3. **منع حدوث تلوث جديد:** وهو أهم إجراء على الإطلاق، إذ يجب على السلطات المحلية والدولية تنفيذ سياسات تمنع تلوث التربة من البداية، بدلاً من إنفاق المليارات على معالجتها بعد تلوثها. يشمل ذلك: إدارة النفايات الصلبة والسائلة بطرق آمنة، فرض قيود صارمة على استخدام المبيدات والأسمدة، منع إضافة الرصاص إلى البنزين، معالجة مياه الصرف الصناعي قبل إلقائها، اختيار مواقع مكبات النفايات بعيداً عن المناطق السكنية والمياه الجوفية، وتشجيع الزراعة العضوية والسماد الأخضر.

حالة دراسية:

تلوث التربة بالرصاص في مدينة جرانيت سيتي بالولايات المتحدة – نموذج على العدالة البيئية

نختم هذه المحاضرة بحالة واقعية توضح تداخل العوامل الاجتماعية والاقتصادية مع تلوث التربة، وهي قضية تُعرف بالعدالة البيئية، يوضح هذا النموذج كيف تتحمل المجتمعات العمالية وذات الدخل المنخفض العبء الأكبر من التلوث الصناعي والتراكمي عبر العقود.

في مدينة جرانيت سيتي بولاية إلينوي الأمريكية، كانت تعمل شركة لصهر الرصاص (Lead smelter) لأكثر من 100 عام (حتى إغلاقها عام 1982)، وخلال تلك الفترة انبعثت أطنان من غبار الرصاص والزرنيخ والكادميوم من مداخن المصنع وترسبت على مساحة واسعة من التربة السكنية.

بعد عقود من التوقف اكتشف مسؤولو الصحة أن نسبة الرصاص في دم الأطفال الذين يعيشون بالقرب من المصنع تفوق بكثير الحدود الآمنة، وأن بعض الحدائق والمنازل تحتوي على تركيزات من الرصاص في تربتها تصل إلى 20,000 ppm (أي 2٪ من وزن التربة)، بينما الحد الآمن للأراضي السكنية هو 400 ppm.

تم إعلان المنطقة كمنطقة كوارث بيئية، وبدأت عملية معالجة ضخمة تضمنت إزالة التربة السطحية من آلاف العقارات (بسمك 30 سم)، واستبدالها بتربة نظيفة، وإعادة زراعة المروج.

بلغت التكلفة النهائية للمعالجة أكثر من 200 مليون دولار أمريكي، واستغرقت أكثر من 15 سنة. وما يجعل القصة مثيرة من الناحية الأكاديمية هو أن التلوث لم يقتصر على أراضي المصنع، بل انتشر بشكل غير متساوٍ بسبب اتجاه الرياح السائدة، وأن أغلب السكان المتضررين كانوا من الفئات ذات الدخل المنخفض والأقليات العرقية، مما أثار نقاشاً حول العدالة البيئية وضرورة ألا تتحمل المجتمعات الفقيرة وحدها عبء التلوث الصناعي.

هذه الحالة تذكرنا بأن تلوث التربة ليس مجرد مسألة فيزيائية كيميائية، بل هو قضية اجتماعية وسياسية وأخلاقية أيضاً.