مشروع إزالة الملوثات البلاستيكية الدقيقة في سلطنة عُمان

عبد الحكيم محمود

2026-04-23

المواد البلاستيكية الدقيقة هي الجسيمات الصغيرة للبلاستيك التي يبلغ قطرها أقل من 5 ملليمترات ـ أي ما يعادل حجم حبة السمسم، وتتسلل خلسةً وتُسبب أضرارًا لصحة الإنسان والنظام البيئي؛ فقد عثر الباحثون على مثل هذه الجسيمات الدقيقة في العديد من عناصر النظام البيئي والحيوي، ولا سيما في الهواء والماء والغذاء وحتى في الأنسجة البشرية.

وحول المفهوم العلمي لتلوث الجسيمات البلاستيكية الدقيقة والنانوية، تقول الدكتورة زينب يافاري، أستاذ مساعد في قسم الهندسة المدنية والمعمارية، جامعة السلطان قابوس، سلطنة عمان، في **تصريحاتها الخاصة لموقع منظمة المجتمع العلمي العربي في 14 أبريل/نيسان 2026**: "يُعرَّف تلوث الجسيمات البلاستيكية الدقيقة بأنه انتشار واسع النطاق لجزيئات البلاستيك في مختلف البيئات، بما في ذلك الأنظمة المائية والبيئات البرية والغلاف الجوي والكائنات الحية. وتنشأ هذه الجسيمات من تحلل مخلفات البلاستيك الأكبر حجمًا (الجسيمات البلاستيكية الدقيقة الثانوية) ومن الإطلاق المباشر لجزيئات صغيرة مُصنَّعة عمدًا (الجسيمات البلاستيكية الدقيقة الأولية). ومن منظور علمي، تتميز الجسيمات البلاستيكية الدقيقة بثباتها وتنوع خصائصها الفيزيائية والكيميائية (مثل الحجم والشكل وتركيب البوليمر والتركيب الكيميائي للسطح) وسلوكها البيئي المعقد".

ومن المهم الإشارة إلى أن الجسيمات البلاستيكية الدقيقة تعمل كناقلات للملوثات المصاحبة، بما في ذلك المركبات العضوية الكارهة للماء والمعادن الثقيلة والمجتمعات الميكروبية، مما يزيد من أهميتها البيئية. ويُقرّ الفهم العلمي الحالي بشكل متزايد بأن تلوث الجسيمات البلاستيكية الدقيقة مشكلة متعددة الأوجه لها آثار على وظائف النظام البيئي ومخاطر محتملة على صحة الإنسان من خلال الابتلاع والاستنشاق والانتقال الغذائي."

وتشير المصادر إلى أن المواد البلاستيكية الدقيقة، كملوث منتشر في كل مكان وله تداعيات عميقة على البيئة والمجتمع والاقتصاد، ونظرًا للحجم الصغير للبلاستيك، فقد أدى ذلك إلى سهولة وسرعة انتشارها على نطاق واسع عبر النظم البيئية، مما يؤدي إلى تلوث واسع النطاق وعواقب وخيمة على جبهات متعددة.

الأضرار والمخاطر الصحية المحتملة

تختلف التأثيرات الصحية المحتملة للتعرض للمواد البلاستيكية الدقيقة بناءً على عدة عوامل مثل حجم هذه الجزيئات وشكلها وزمن التعرض لها والتركيب الكيميائي.

وقد أظهرت الدراسات أن التعرض لجزيئات البلاستيك الدقيقة والنانوية يمكن أن يُحدث تأثيرات ضارة على صحة وأعضاء الإنسان والكائنات الحية، ومنها تأثيرات ضارة على القلب والأوعية الدموية، وتأثيرات ضارة على الجهاز التنفسي مثل التهاب الرئتين بفعل التعرض لهذه الملوثات البلاستيكية عن طريق الاستنشاق. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يؤدي إلى اضطرابات التمثيل الغذائي في الجسم، بما في ذلك اضطراب محور الأمعاء والكبد، مما يؤدي إلى ارتفاع خطر الإصابة بمقاومة الأنسولين واضطراب وظيفة الهرمونات، مما قد يساهم في زيادة الوزن.

التلوث البلاستيكي في مياه الصرف الصحي

يزداد طلب العالم على البلاستيك وإنتاجه عامًا بعد عام، وينتهي المطاف بمعظمه في الأنهار والبحيرات والمحيطات، وتشير تحليلات المياه والرواسب في جميع أنحاء العالم إلى انتشار الجزيئات البلاستيكية الدقيقة في المياه العذبة والنظم البيئية البحرية والتربة. وتُعدّ العديد من المنتجات البلاستيكية ضرورية، ولكن علينا مراعاة الآثار السلبية، ومنها تلوث الجزيئات البلاستيكية الدقيقة والاحتباس الحراري. ومع مرور الوقت، تميل المنتجات البلاستيكية إلى إطلاق جزيئات أصغر حجمًا بفعل عوامل التجوية الطبيعية، مُكوِّنةً جزيئات بلاستيكية دقيقة.

وقد تم رصدها على نطاق واسع في البيئة، بما في ذلك مياه الصرف الصحي. وتنشأ هذه الجسيمات من مصادر متنوعة، منها تحلل المخلفات البلاستيكية الكبيرة، وانطلاق الألياف البلاستيكية من المنسوجات، والخرزات البلاستيكية الدقيقة الشائعة الاستخدام في منتجات العناية الشخصية. وفي مياه الصرف الصحي، يمكن للجسيمات البلاستيكية الدقيقة أن تمر عبر عملية المعالجة وتدخل البيئة، مما يُلحق الضرر بالتنوع البيولوجي من خلال احتمال دخولها السلسلة الغذائية.

بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تعمل الجسيمات البلاستيكية الدقيقة كناقل للملوثات الضارة، مما يزيد من انتقالها وانتشارها في البيئة. ولمعالجة هذه المشكلة، تزداد الحاجة إلى طرق فعالة لمعالجة مياه الصرف الصحي قادرة على إزالة هذه الجسيمات بكفاءة. وتتوفر حاليًا عدة طرق فيزيائية وكيميائية تشمل الترشيح والترسيب والتحلل الكيميائي. إلا أن هذه الطرق مكلفة ومنخفضة الكفاءة وتُنتج ملوثات ثانوية. علاوة على ذلك، فإن غياب التوحيد القياسي في قياس الجسيمات البلاستيكية الدقيقة في مياه الصرف الصحي والإبلاغ عنها يُصعّب تقييم تأثيرها على البيئة بدقة. ولإدارة هذه المشكلات بفعالية، من الضروري إجراء المزيد من البحوث والتطوير لطرق فعالة لإزالة الجسيمات البلاستيكية الدقيقة من مياه الصرف الصحي، فضلًا عن توحيد معايير القياس والإبلاغ، وذلك لإدارة هذه الملوثات الضارة بفعالية.

width= مشروع إزالة الجزيئات البلاستيكية الدقيقة في محطات معالجة مياه الصرف الصحي في سلطنة عمان.

في سلطنة عمان، هناك مشروع بحثي لإزالة الجزيئات البلاستيكية الدقيقة في مختلف أنظمة البيئة العمانية، بقيادة الدكتورة زينب يافاري، الأستاذ المساعد في قسم الهندسة المدنية والمعمارية، جامعة السلطان قابوس. وقد انطلق هذا المشروع البحثي الميداني من دراسات علمية عمانية خاصة بإزالة الجزيئات البلاستيكية الدقيقة وتحليل المخاطر في محطات معالجة مياه الصرف الصحي في سلطنة عمان.

وبشكل عام، تُعد محطات معالجة مياه الصرف الصحي مصدرًا رئيسيًا للملوثات الناشئة عن الجسيمات البلاستيكية الدقيقة، بحسب ما جاء في الورقة البحثية لباحثين من جامعة السلطان قابوس، والتي نُشرت في موقع ScienceDirect لنشر الدراسات في المجلات العلمية الدولية، والتي حملت عنوان "كفاءة إزالة الجزيئات البلاستيكية الدقيقة وتحليل المخاطر في محطات معالجة مياه الصرف الصحي في سلطنة عمان Microplastics removal efficiency and risk analysis of wastewater treatment plants in Oman".

وحول هذا المشروع البحثي الذي ينطلق من إزالة الجزيئات البلاستيكية الدقيقة وتحليل المخاطر في محطات معالجة مياه الصرف الصحي في سلطنة عمان، تقول الدكتورة زينب يافاري: "يركز بحثي على الملوثات الناشئة، مع التركيز بشكل خاص على الجزيئات البلاستيكية الدقيقة، متناولًا أحد أكثر التحديات البيئية إلحاحًا وتعقيدًا في عصرنا. أدرس وجودها ومصيرها وتحولاتها في كل من الأنظمة البيئية والهندسية في سلطنة عُمان."

وتضيف الدكتورة زينب: "بدأ عملي بتقييم شامل للجزيئات البلاستيكية الدقيقة في ثلاث محطات رئيسية لمعالجة مياه الصرف الصحي في مسقط، تستخدم

كل منها عمليات معالجة مختلفة. وقد أسفرت هذه الدراسة عن رؤية بالغة الأهمية: فبدلًا من إزالتها بفعالية، تُحتجز الجزيئات البلاستيكية الدقيقة وتتراكم في الحمأة، مما يؤكد دور أنظمة معالجة مياه الصرف الصحي كمسارات لنقل هذه الجزيئات وليست حلولًا نهائية لإزالتها.

وانطلاقًا من هذا الأساس، يمتد بحثي الحالي إلى أطروحة دكتوراه تركز على وجود الجزيئات البلاستيكية الدقيقة وسلوكها في أنظمة التسميد. يستكشف هذا العمل إمكانات عمليات التسميد الطبيعية والمحسّنة لتسهيل تحلل الجزيئات البلاستيكية الدقيقة وتحولاتها، مما يساهم في تطوير استراتيجيات مستدامة ودائرية لإدارة النفايات. وبالتوازي مع ذلك، أجريتُ دراسات ميدانية واسعة النطاق حول وجود الجزيئات البلاستيكية الدقيقة وغيرها من الملوثات الناشئة في سد وادي ضيقة، وهو مورد مائي ذو أهمية استراتيجية في سلطنة عُمان. ومن خلال دمج التحليل الموسمي، يُقدّم هذا البحث رؤى بالغة الأهمية حول أنماط التوزيع المكاني والزماني، ذات آثار بيئية هامة."

وحول الدعم المادي واللوجستي للمشاريع البحثية في رصد وإزالة الجزيئات البلاستيكية الدقيقة، تقول الدكتورة زينب يافاري: "في عام 2024، حصلتُ على إحدى أكثر المنح البحثية الوطنية تنافسيةً، والممولة من صندوق جلالة السلطان الاستثماني، والتي تركز على الكشف عن الجزيئات البلاستيكية الدقيقة وقياس كميتها في محطات معالجة مياه الصرف الصحي في سلطنة عُمان. يتضمن هذا العمل أخذ عينات منهجية من مياه الصرف الداخلة والخارجة والمعالجة، بالإضافة إلى الحمأة، يليه توصيف دقيق للجزيئات البلاستيكية الدقيقة بناءً على شكلها وحجمها ولونها ونوع البوليمر، مما يُنتج مجموعة بيانات شاملة وعالية القيمة لدعم البحوث المستقبلية وإثراء السياسات وتوجيه الإدارة البيئية."

وقد نُشرت نتائج هذه الدراسات البحثية في مجلات دولية مرموقة، وهناك العديد من الدراسات الأخرى قيد المراجعة من قبل النظراء حاليًا، مما يسلط الضوء على الاهتمام العلمي العالمي المتزايد بتلوث الجسيمات البلاستيكية الدقيقة باعتباره قضية بيئية بالغة الأهمية.

دور أنظمة معالجة مياه الصرف الصحي في إزالة الجزيئات البلاستيكية الدقيقة

وفي سؤالنا للدكتورة زينب يافاري حول أهمية أنظمة معالجة مياه الصرف الصحي في إزالة الجزيئات البلاستيكية الدقيقة، قالت الدكتورة زينب: "لا تُصمَّم عمليات معالجة مياه الصرف الصحي التقليدية خصيصًا لإزالة الجزيئات

البلاستيكية الدقيقة. وما يُشار إليه غالبًا بـ"الإزالة" يعكس في الغالب انتقال هذه الجزيئات من الطور المائي إلى حمأة الصرف الصحي عبر الترسيب أو الاحتجاز، وليس إزالتها بالكامل. ويعتمد هذا السلوك بشكل كبير على تصميم المعالجة. فعلى سبيل المثال، أظهرت عملية المفاعل الحيوي الغشائي (MBR) في دراستنا قدرةً أعلى بكثير على احتجاز الجزيئات البلاستيكية الدقيقة مقارنةً بالمفاعل الدفعي المتسلسل (SBR)، ويعود ذلك أساسًا إلى تحسين الاحتجاز الفيزيائي وارتباط الحمأة.

وأشارت نتائج تقييم المخاطر أيضًا إلى أن حمأة المفاعل الحيوي الغشائي تحتوي على تركيزات أعلى من الجزيئات البلاستيكية الدقيقة. وبينما قد يوحي هذا في البداية بأداء إزالة فائق، فإنه يثير في الوقت نفسه مخاوف بالغة الأهمية بشأن إدارة الحمأة واحتمالية إعادة إدخال الجزيئات البلاستيكية الدقيقة إلى البيئة، مما يُبرز الحاجة إلى استراتيجيات متكاملة للمعالجة والتخلص."

البلاستيك الدقيق والتسميد

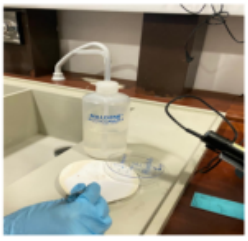
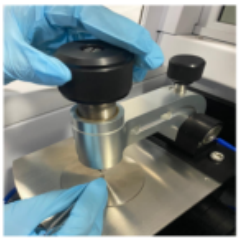
إن تلوث التربة الزراعية بجسيمات البلاستيك الدقيق يمكن أن يؤدي إلى اختلاطها بالسماد العضوي، مما ينتج عنه أضرار كثيرة على صحة الإنسان المستهلك للمنتجات الزراعية الغذائية.

في هذا الصدد، تقول الدكتورة زينب يافاري: "يمكن أن تعمل الجزيئات البلاستيكية الدقيقة كملوثات فيزيائية في السماد العضوي، مما يقلل من قيمته الجمالية والزراعية، وقد يؤثر على قبوله في السوق. إضافةً إلى ذلك، قد يعيق وجودها النشاط الميكروبي ويغير معايير أساسية في عملية التسميد، مثل المسامية وتوزيع الرطوبة وتفاعلات الميكروبات مع الركيزة.

ومن الجدير بالذكر أن حمأة معالجة مياه الصرف الصحي تُستخدم غالبًا كمادة خام في مرافق التسميد، مما يُبرز الدور الحاسم للعمليات البيولوجية وديناميكيات التحلل الحيوي في أنظمة التسميد. وهذا يؤكد على ضرورة مواصلة تحسين هذه العمليات لضمان ألا يصبح السماد العضوي النهائي، المستخدم على نطاق واسع كسماد أو مُحسّن للتربة، مصدرًا ثانويًا لتلوث التربة بالجزيئات البلاستيكية الدقيقة.

ومن منظور بيئي، يُعد هذا الأمر بالغ الأهمية، لأن الجزيئات البلاستيكية الدقيقة المُضافة إلى التربة عبر السماد العضوي قد تبقى وتتراكم، وقد تدخل السلسلة

الغذائية من خلال امتصاصها من قِبل النباتات وانتقالها عبر العناصر الغذائية. لذلك، يُعد تحسين إزالة الجزيئات البلاستيكية الدقيقة وإدارتها في المراحل المبكرة أمرًا ضروريًا لضمان إنتاج سماد عضوي مستدام، وللحد من المخاطر البيئية ومخاطر سلامة الغذاء على المدى الطويل."

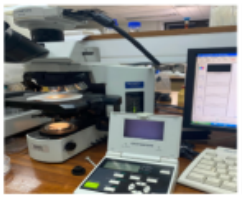
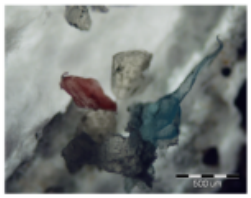
أبرز نتائج المشروع البحثي في حماية البيئة العمانية

تقول الدكتورة زينب يافاري: "يقدم بحثنا العديد من النتائج المهمة لحماية البيئة العمانية من تلوث الجسيمات البلاستيكية الدقيقة والملوثات الناشئة ذات الصلة، حيث تشير النتائج إلى أنه على الرغم من أن محطات معالجة مياه الصرف الصحي في سلطنة عُمان مجهزة عمومًا بعمليات معالجة متطورة، إلا أن هذه الأنظمة ليست مُحسَّنة بالكامل لإزالة الملوثات ذات الأولوية والناشئة، بما في ذلك الجسيمات البلاستيكية الدقيقة، وهذا يُبرز الحاجة إلى مزيد من التكامل والتحسين في تقنيات المعالجة لضمان إزالة أكثر فعالية ودقة للملوثات.

وبالتوازي مع ذلك، يُتيح مشروعنا الجاري، المُموَّل من قِبَل وزارة الصحة، تطوير قاعدة بيانات وطنية شاملة لأداء محطات معالجة مياه الصرف الصحي في جميع أنحاء سلطنة عمان، لا سيما فيما يتعلق بوجود الجسيمات البلاستيكية الدقيقة وكفاءة إزالتها. يُمثل هذا خطوة هامة نحو دعم اتخاذ القرارات القائمة على الأدلة ومواءمة ممارسات المعالجة مع المعايير البيئية.

بشكل عام، يُساهم هذا العمل بشكل مباشر في رؤية سلطنة عُمان 2040، من خلال تعزيز إدارة المياه المُستدامة، وضمان أن تكون أنظمة معالجة مياه الصرف الصحي ليست فقط فعالة من الناحية التشغيلية، بل أيضًا مُتوافقة مع المعايير البيئية وجاهزة للمستقبل في معالجة الملوثات الناشئة.

وحول دعم المشروع البحثي لجامعة السلطان قابوس لاستراتيجيات حماية البيئة العمانية، تقول الدكتورة زينب يافاري: يلعب البحث العلمي دورًا أساسيًا في دعم استراتيجيات التخفيف من آثار الملوثات الناشئة والملوثات ذات الأولوية، وذلك من خلال توفير معرفة قائمة على الأدلة عبر إطار المصدر والمسار والمستقبل. فهو يُمكّن من تحديد مصادر التلوث، ويُحسّن فهم آليات النقل والمصير، ويدعم تقييم المخاطر البيئية والصحية المرتبطة بها.

بالإضافة إلى ذلك، يُسهم البحث العلمي بشكل مباشر في تحسين تقنيات المعالجة من خلال تقييم الأنظمة القائمة وتطوير حلول أكثر

فعالية واستدامة للملوثات الناشئة. كما يُعزز أطر تقييم المخاطر، مما يُمكّن صانعي السياسات من تحديد أولويات التدخلات وتصميم لوائح بيئية أكثر استنارة.

في سياق سلطنة عُمان، هناك التزام وطني قوي ومتنامٍ بحماية البيئة، يتجلى في التمويل المستمر لمشاريع بحثية مؤثرة في هذا المجال. وهذا يُظهر رؤية استراتيجية واضحة لمواجهة التحديات البيئية المستقبلية بشكل استباقي. والأهم من ذلك، أن مثل هذه المبادرات البحثية تضمن أن تكون النتائج العلمية متوافقة بشكل مباشر مع حل المشكلات البيئية الحقيقية، مما يدعم صنع السياسات القائمة على الأدلة ويساهم في تحقيق أهداف الاستدامة طويلة الأجل ورؤية سلطنة عُمان 2040."

المراجع

Microplastics removal efficiency and risk analysis of wastewater - /https://www.sciencedirect.com/science treatment plants in Oman Microplastic contamination in - article/abs/pii/S0045653524010993 wastewater: Sources, distribution, detection and remediation through //:https physical and chemical-biological methods - www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969724003899 /https://www.unep.org Microplastics in wastewater: towards solutions news-and-stories/story/microplastics-wastewater-towards-solutions

---

Doctor of EngineeringProfessor z.yavari@squ.edu.om | Zeinab Yavari
at Sultan Qaboos University (Assistant)

البريد الإلكتروني للكاتب: abdulhakimkaid8@gmail.com