رصد وتقييم التلوث البيئي باللدائن الدقيقة (الميكرو و النانوبلاستيك) في المنطقة العربية

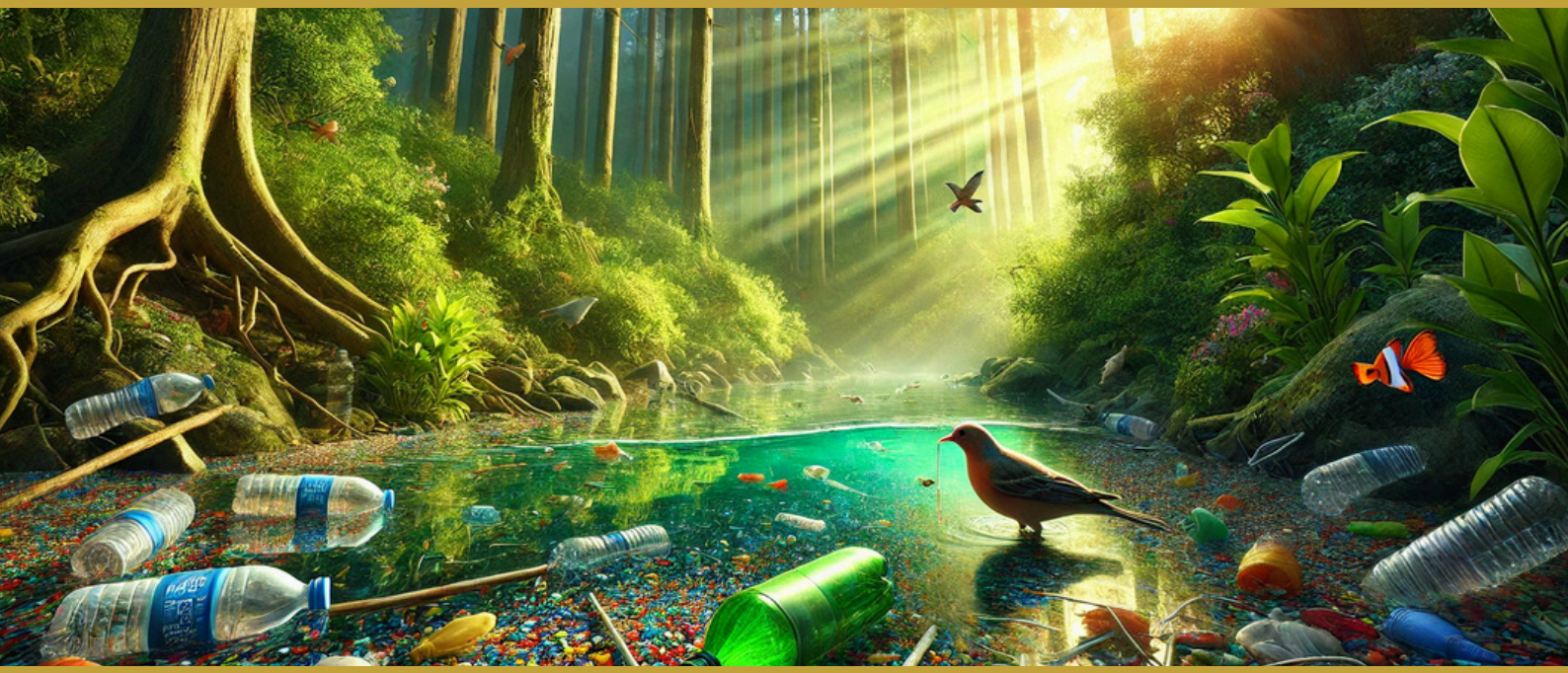
Monitoring and Assessment of Environmental Pollution by Micro- and Nano-Plastics (MPs & NPs) in the Arab Region

Report No 2

صادر عن الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة

أحد شبكات المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا

Emerging Pollutant Network (EPN-ASTF)



تقرير رقم ٢

يناير ٢٠٢٦م

رصد وتقييم التلوث البيئي باللدائن الدقيقة (الميكرو-النانو بلاستيك) في المنطقة العربية

تقرير رقم 2

Monitoring and Assessment of Environmental Pollution by Micro- and Nano-Plastics in the Arab Region

Report No. 2

صادر عن الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة

أحد شبكات المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا

Emerging Pollutant Network (EPN-ASTF)

الشارقة، الإمارات العربية المتحدة

Sharjah, United Arab Emirates

يناير 2026م

الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة،

سلسلة التقارير الفنية، **العدد 2**، يناير 2026م

حقوق الطبع والنشر EPN.ASTF © ، 2026م

هذا الكتاب محمي بموجب مرسوم القانون الاتحادي رقم (38) لسنة 2021 بشأن حقوق المؤلفين والحقوق المجاورة.
لا يجوز نسخ أي جزء من هذا التقرير أو تخزينه أو نقله بأي شكل أو بواسطة أي وسيلة، سواء كانت إلكترونية أو غير ذلك، إلا بعد الحصول على إذن كتابي صريح مسبق من مالك حقوق الطبع والنشر.
جميع الحقوق محفوظة، ويُعتبر أي استخدام غير مصرح به انتهاكًا للقانون ويخضع للمساءلة القانونية.

الرقم المعياري الدو ي للكتاب E-Book (*ISBN*) 9789948642848

المعرّف الرقمي الدائم DOI: 10.5281/zenodo.18252974

المراجعة الخارجية

تم إعداد هذا التقرير من قبل فريق الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة(EPN) ، وقد خضع لمراجعة ومساهمة خبراء مستقلين من عدة جامعات عربية متخصصة في الملوثات البيئية والعلوم البيولوجية، لضمان الدقة والمصداقية العلمية (يشار اليهم ادناه كمراجعين)

توثيق المراجعة

تم مشاركة النسخة الأولية من التقرير مع المراجعين في تاريخ 6 سبتمبر، جميع التوصيات والتصحيحات التي قدمها الخبراء تم دمجها في النسخة النهائية لضمان أعلى مستوى من الدقة والمصداقية العلمية. وتم تعديل التقرير المقدمة بنسختها النهائية بتاريخ **10 ديسمبر 2025م**

ملاحظات حول الدراسة

يعكس هذا التقرير النتائج الحالية للمراقبة والتحليل، وقد تم تدعيمه بمراجعة خبراء مستقلين. هذا التقرير يمثل المرحلة الحالية من العمل، وقد تُجرى دراسات مستقبلية لتوسيع نطاق التحليل أو تحديث النتائج بما يتوافق مع البيانات الجديدة.

الاستفسارات والنسخ الإضافية:
الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة
المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا.
المدينة الجامعية بالشارقة
الشارقة، الإمارات العربية المتحدة
هاتف 4622626 50 971 +

البريد الإلكتروني ، info@astf.net evpt.epn@astf.net

يجب الاستشهاد بهذا التقرير كما يلي:

EPN (2026) رصد وتقييم التلوث البيئي باللدائن الدقيقة الميكرو-النانو بلاستيك في المنطقة العربية، تقرير رقم 2 (يناير 2026) . الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة-المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا، الشارقة - الإمارات العربية المتحدة *ISBN* 9789948642848

Cited as

EPN (2026). Monitoring and Assessment of Environmental Pollution by Micro- and Nano-Plastics in the Arab Region e opportunities (Report no. 2, January 2026). Emerging Pollutant Network (EPN) – Arab Science and Technology Foundation (ASTF), Sharjah, United Arab Emirates. ISBN: 9789948642848

إخلاء المسؤولية:

تم إعداد هذا التقرير لغرض نشر المعلومات المتعلقة بالملوّثات البيئية بالميكرو بلاستيك في البيئة العربيَّة. ولا تتحمَّل الشبكة العربيَّة للتصدِّي للملوِّثات البيئيَّة الناشئة والمؤسسة العربيَّة للعلوم والتكنولوجيا أيَّ مسؤوليَّة عن أيِّ خسارة و/أو ضرر، بما في ذلك الخسائر الماليَّة، الناتجة عن الاعتماد على أيِّ معلومات أو نصائح أو توصيات واردة في هذا المنشور. كما لا ينبغي اعتبارُ محتوى هذا المنشور مُمثِّلًا بالضرورة لآراء المنظمات المشاركة.

تنويه:

جميعُ محتويات هذا التقرير، بما في ذلك البيانات الرقمية، مستخلصة من أبحاث علمية محكّمة منشورة في مجلات علمية موثوقة، وقد تم توثيق كل معلومة باقتباس مباشر داخل التقرير، مع إدراج قائمة بالمراجع العلمية في نهايته. تم استخدام أدوات الذكاء الاصطناعي لأغراض تحليلية وإحصائية محددة بما فيها الترجمة للعربية، مع مراجعة بشرية دقيقة لكل المخرجات. هذا التقرير عمل أصلي بالكامل، ولم يُنشر مسبقًا في أي مجلة أو دار نشر. يستهدف التقرير جميع فئات القراء، بهدف رفع مستوى الوعي المجتمعي بمخاطر ومراقبة التلوث بالميكرو بلاستيك.

مع ملاحظة أن التقرير لا يخضع لمراجعة الأقران (Peer Review) المتّبعة في النشر الأكاديمي.

التمويل والرعاية

ترحب الشبكة بتلقي الدعم من الجهات الراغبة في المساهمة في طباعة التقارير الفنية وتوزيعها.

وَقُلِ اعْمَلُوا
فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ

المؤلفون الرئيسيون :

أ.م. د. عادل الغيثي الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة – الشارقة-الامارات العربية المتحدة.
د. محمد السحاري الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة – الشارقة-الامارات العربية المتحدة
د. قيس المقطري جامعة بوترا الماليزية-ماليزيا
الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة - الشارقة الامارات العربية المتحدة.
د. إيفاق علي نعمان قسم الميكروبيولوجي-كلية العلوم التطبيقية-جامعة تعز
الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة - الشارقة الامارات العربية المتحدة.
د. شيرين عبدالناصر بحوث الاطفال ذوي الاحتياجات الخاصة -المركز القومي للبحوث، مصر
أ.د/نجوى عبدالمجيد بحوث الاطفال ذوي الاحتياجات الخاصة -المركز القومي للبحوث، مصر
الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة - الشارقة الامارات العربية المتحدة

المراجعة الخارجية :

أ.د. فاطمة أحمد محمد القادري –جامعة نجران – السعودية
أ.د. فريد عبد الرحيم عبد العزيز بدرية –جامعة المنصورة – مصر
أ.د. نجية فرج علي –المركز القومي للبحوث – مصر
أ.د. سرحان راشد سرحان –جامعة واسط – العراق
أ.د. سمر أحمد أحمد عامر – Public Health Authority –السعودية
أ.د. علاء خضير هاشم –جامعة القاسم الخضراء – العراق
أ.د. وائل خليفة الحراري –المركز الليبي لبحوث اللدائن – ليبيا
أ.د. هاجر المتولي محمد محمد –جامعة العريش – مصر
أ.د.م. سهى جمدي شبكة – National Institute of Oceanography and Fisheries –مصر
د. حذيفة عصام أشقر – Arab American University –فلسطين
د. سارة الهاشمي –مركز بحوث وتكنولوجيات المياه – تونس
د. شيماء عبدالفتاح جمال محمد-قسم الميكروبيولوجي -كلية العلوم التطبيقية-جامعة تعز
د. كريستيل بو متري –جامعة سيدة اللويزة – لبنان
د. محمد الأمين بن طاع الله –جامعة غليزان – الجزائر
د. نور نهاد باقر –هيئة البحث العلمي – العراق
د. يونس سيف عبدالقادر غانم –جامعة تعز – اليمن
د. رغد سلمان محمد –هيئة البحث العلمي – العراق
محمد باحو –باحث دكتوراه، جامعة محمد الخامس – المغرب
هبة الرحمن أحمد –دكتور مهندس، استشاري علوم المواد وإدارة المخلفات

مراجعة لغوية وتدقيق :
د. مرية الشويخ كلية الآداب والعلوم الإنسانية، جامعة محمد الخامس - المغرب

المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا (ASTF)

تأسست المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا (Arab Science and Technology Foundation - ASTF) عام 2000 كمؤسسةٍ إقليميةٍ مستقلةٍ غير ربحية، يقع مقرّها في إمارة الشارقة بدولة الإمارات العربية المتحدة. تُعنى المؤسسة بدعم البحث العلمي والتطوير التكنولوجي وريادة الأعمال العلمية في الدول العربية، وتُعد من أبرز الكيانات العلمية غير الحكومية في المنطقة.

الرؤية:

تحقيق الريادة العربية في مجالي العلوم والتكنولوجيا من خلال تمكين المجتمعات العلمية وربط البحث العلمي بالتنمية الاقتصادية والاجتماعية المستدامة.

الرسالة:

تعزيز قدرات العلماء والباحثين والمبتكرين العرب داخل الوطن العربي وخارجه، وتحفيز الابتكار وريادة الأعمال في مجالي العلوم والتكنولوجيا، لمواجهة التحديات التنموية وتحقيق التقدم العلمي والاقتصادي في المنطقة.

مجالات الأنشطة:

- دعم وتمويل الأبحاث العلمية التطبيقية ذات الأولوية التنموية .
- بناء شراكات فاعلة بين الجامعات ومراكز البحث والمؤسسات الصناعية .
- رعاية الابتكار وريادة الأعمال التكنولوجية .
- تدريب الكفاءات الشابة على مهارات الابتكار والتفكير النقدي العلمي .
- تنظيم مؤتمرات وفعاليات علمية لتعزيز التعاون الإقليمي والدولي.

مشاريع ومبادرات المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا:

- مسابقة خطط الأعمال التكنولوجية العربية :مبادرة لدعم رواد الأعمال العرب في تحويل الابتكارات العلمية إلى مشاريع استثمارية.
- برنامج الباحث العربي :يهدف إلى تمويل المشاريع البحثية التطبيقية في مجالات المياه، الطاقة، والصحة.
- منتدى العلماء العرب :منصة حوار وتنسيق بين العلماء العرب في الداخل والمهجر.
- حاضنات الابتكار الجامعي :دعم إنشاء حاضنات داخل الجامعات العربية لتعزيز ثقافة ريادة الأعمال.

الموقع الإلكتروني الرسمي:

https://www.astf.net

كلمة رئيس المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا

تقديم التقرير الفني الثاني للشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة

السيدات والسادة المعنيون بقضايا البيئة من المختصين، وواضعي السياسات، ومتخذي القرار،

يسر المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا أن تقدم إليكم التقرير الفني الثاني حول واقع الملوثات البيئية الناشئة في العالم العربي. يأتي هذا التقرير ثمرة جهود جماعية وتعاون علمي متميز، من نتاج الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة، والتي أطلقتها المؤسسة كمبادرة استراتيجية استشعاراً منها بأهمية تضافر الجهود العلمية لمواجهة التحديات البيئية المعاصرة.

حرصت المؤسسة منذ إطلاق برنامج الشبكات العلمية المتخصصة على توفير بيئات حاضنة للعلماء والخبراء العرب، إدراكاً منها لأهمية الترابط بين التخصصات، ونقل المعرفة وتوطين التقنيات الحديثة. إن ربط الباحثين عبر منظومة متكاملة يعزز فرص بناء مجتمع علمي تفاعلي، يسهم في تطوير البحث العلمي والارتقاء به إلى مصاف العالمية، ويدعم في الوقت ذاته تحقيق أهداف التنمية المستدامة في منطقتنا.

كما تضع المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا مسألة التشبيك العلمي وتبادل الخبرات في صميم استراتيجيتها، معتبرةً ذلك من ركائز العمل المؤسسي الفعال. فالتكامل بين العلماء يسرّع إنجاز الأبحاث المشتركة ويتيح تقديم حلول مبتكرة لمواجهة الملوثات البيئية الخطيرة، وفي مقدمتها مركبات البلاستيك التي تمثل تهديدًا متزايدًا لصحة الإنسان والبيئة. وفي هذا السياق، تبذل المؤسسة جهوداً كبيرة لتيسير التعاون الإقليمي والدولي، إضافة إلى توفير الدعم المالي والفني للمبادرات البحثية ذات الصلة.

ويعكس هذا التقرير الفني الثاني التزام المؤسسة الراسخ بتمكين العلماء العرب، وتعزيز حضورهم في المحافل العلمية العالمية، فضلاً عن دعمهم المستمر للارتقاء بالبحث العلمي البيئي. كما يجسد ذلك حرص المؤسسة على تحويل التحديات البيئية إلى فرص للابتكار والتطوير، إيمانًا منها بقوة التغيير الذي يمكن أن يتحقق عبر التعاون بين مختلف الجهات الفاعلة.

وفي الختام، تتوجه المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا بالشكر والتقدير لكل من ساهم في إعداد هذا التقرير، وتثمن الدور الحيوي لمجلس إدارة الشبكة وأعضائها الكرام. كما تدعو جميع الشركاء والمعنيين إلى مواصلة دعم هذه المبادرات والمشاركة الفاعلة في مسيرة التقدم العلمي، في سبيل بيئة عربية أكثر صحة واستدامة.

د. عبدالله عبد العزيز النجار

رئيس المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا

الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة (EPN)

الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة هي مبادرة عربية تأسّست تحت مظلة المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا (ASTF) .تهدف إلى مواجهة التحديات البيئية والصحية المرتبطة بـ"الملوثات الناشئة" وهي مواد كيميائية أو ملوثات تتسلل إلى البيئة والهواء والتربة، وغالبًا ما تكون غير مرئية للعين المجردة وصعبة المعالجة . من أمثلة تلك الملوثات: المواد المشبعة والمفلورة مثل PFAS ، بقايا الأدوية ومستحضرات العناية الشخصية(PPCPs) ، والميكروبلاستيك (جزيئات البلاستيك الدقيقة)، وغيرها من ملوثات حديثة ومعقدة

تسعى EPN لأن تكون "بيت خبرة" يجمع خبراء وتقنيين متخصصين في معالجة الملوثات الناشئة، وتطوير حلول مستدامة للتحديات البيئية في الوطن العربي

و تتضمن رسالتها دعم البحث العلمي، تعزيز قدرات المختصين، نشر الوعي، والمساهمة في صياغة سياسات بيئية فعّالة

أنشطة الشبكة

- تقديم تدريب تقني وورش عمل متخصصة في تحليل ومعالجة الملوثات البيئية الناشئة .
- توفير مكتبة موارد بحثية وتشجيع البحث العلمي، ونشر نتائج دراسات حول الملوثات وتأثيراتها على الصحة والبيئة
- تنظيم مؤتمرات، ندوات، وحوارات لتبادل المعرفة والخبرات بين باحثين ومؤسسات بيئية وصناعية وحكومية .
- حملات توعية للمجتمع، ووسائط إعلامية مثل البودكاست الخاص بـ EPN ("مع البيئة")، لتبسيط المفاهيم البيئية والتهديدات المرتبطة بالملوثات الناشئة
- العضوية العامة و المهنية مع شهادات مهنية لمن يعمل في هذا المجال

لماذا EPN مهمة الآن؟

- لأن الملوثات الناشئة تمثّل "أزمة بيئية وصحية صامتة" في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا ولها آثار طويلة الأمد على الصحة العامة، التنوع البيولوجي، والأمن الغذائي
- نظرًا لأن هذه الملوثات غالبًا تتجاوز قدرات المراقبة البيئية التقليدية، تحتاج المنطقة إلى كيان متخصص يجمع خبراء ويُطوّر قدرات رصد ومعالجة متقدمة
- تعد أول شبكة مهنية في المنطقة العربية تقدم عضوية مهنية متخصصة في "الملوثات البيئية الناشئة"

لمزيد من المعلومات:

https://astf.net/epn/ar/

كلمة رئيس الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية

أعضاء الشبكة الكرام، شركاؤنا الأعزاء، وقراؤنا المحترمون،

الجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) هي جسيمات بلاستيكية يقلّ قطرها عن 5 مم تنشأ إما أوليًا بصناعتها بهذا الحجم (مثل الحبيبات والكرات البلاستيكية الدقيقة) أو ثانويًا من تفتّت وتحلل المنتجات البلاستيكية الأكبر بفعل العوامل البيئية. تتراكم هذه الجزيئات في النظم البيئية، مسببة أضرارًا بيئية وصحية، منها التسمم البيولوجي والتأثير السلبي على السلسلة الغذائية. تواجه المنطقة العربية تحديات بيئية متزايدة نتيجة للتلوث بالجسيمات البلاستيكية الدقيقة MPs، والذي يُعد من الملوثات الناشئة ذات التأثيرات السلبية الكبيرة على صحة الإنسان والبيئة. يهدف هذا التقرير إلى تسليط الضوء على حجم هذه المشكلة، وآثارها، والجهود المبذولة من قبل الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة للتعامل معها، بالإضافة إلى تقديم توصيات علمية وعملية للتقليل من مخاطرها.

جهود الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة (EPN)

منذ تأسيسها، قامت الشبكة بتنفيذ عدد من المبادرات الرئيسية، منها:

- الدعم الفني والتدريب: تنظيم ورش عمل ودورات تدريبية لتعزيز قدرات الجهات المعنية في رصد وإدارة الملوثات البيئية، مع التركيز على الـ MPs.
- إصدار التقارير والدراسات: إصدار تقارير فنية ودراسات تحليلية عن الوضع البيئي الحالي وتقديم حلولاً مستدامة لمواجهة التحديات.
- تعزيز التعاون الإقليمي والدولي: بناء شراكات مع منظمات دولية وإقليمية لتبادل الخبرات والمعرفة، وضمان تبني أفضل الممارسات البيئية.

يستوجب التصدي لتلوث الـ MPs اتباع استراتيجيات متعددة تشمل:

- زيادة الوعي البيئي من خلال نشر المعلومات العلمية والتوعوية حول مخاطر الـ MPs وأثرها على الصحة والبيئة.
- تعزيز القدرات الفنية وتطوير برامج تدريبية متخصصة للكوادر العاملة في مجال البيئة.
- تشجيع البحث العلمي ودعم الدراسات البحثية لتحديد مصادر التلوث وطرق معالجته.
- تنظيم السياسات والتشريعات وصياغة قوانين ولوائح صارمة للحد من استخدام البلاستيك وتعزيز تدويره.
- التعاون متعدد القطاعات وتشجيع مشاركة القطاعين الحكومي والخاص والمجتمع المدني في جهود الحد من التلوث.

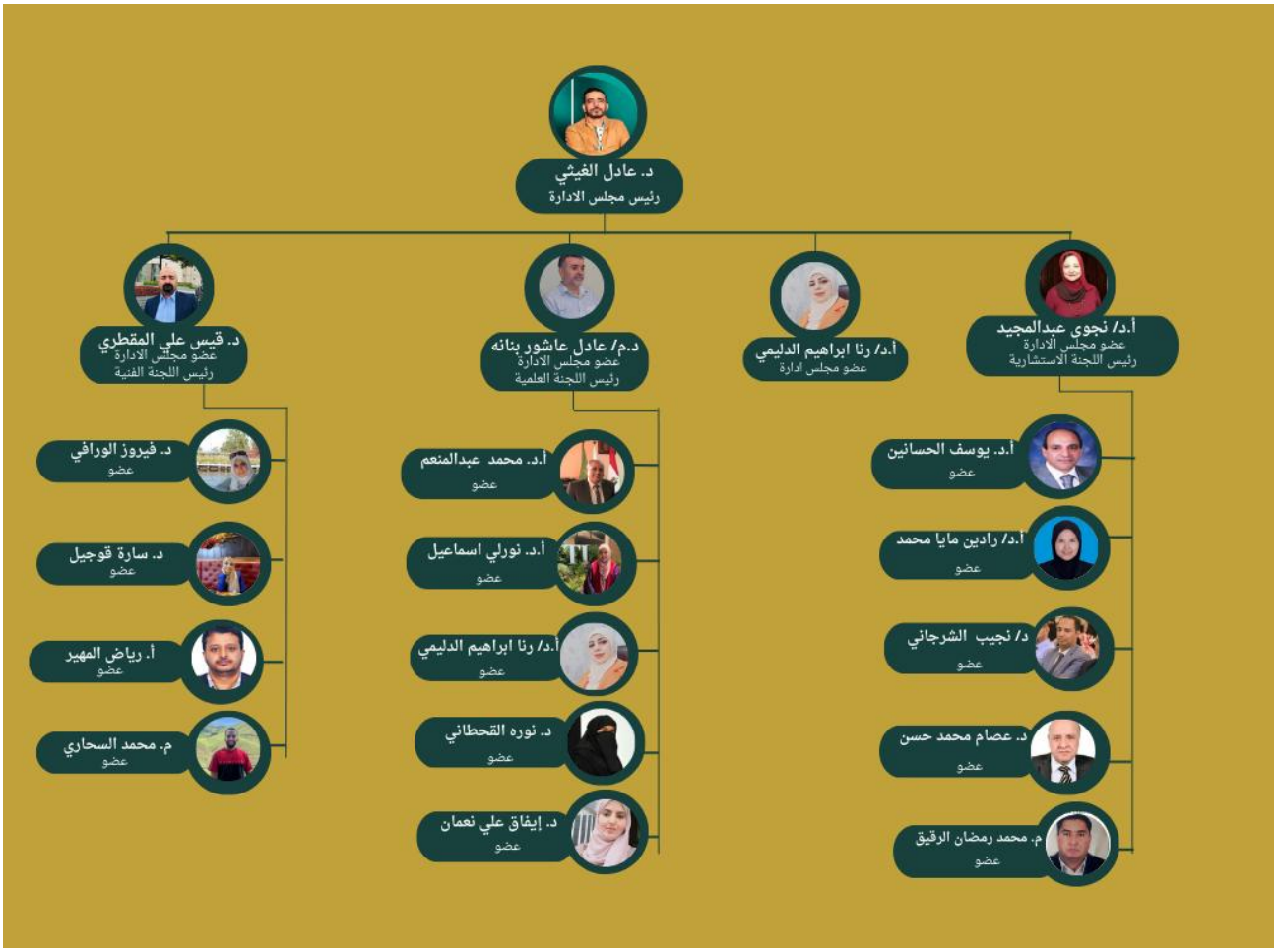
يشكل التلوث بالـ MPs تحديًا بيئيًا وصحيًا هامًا في المنطقة العربية، يتطلب تكاتف الجهود على المستويات المحلية والإقليمية والدولية. تؤكد الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة على أهمية الاستمرار في العمل المشترك، وتبني حلول مبتكرة ومستدامة للحفاظ على البيئة وصحة الإنسان.

أ.د/ عادل الغيثي

أستاذ مشارك

رئيس الشبكة العربية للتصدي للملوّثات البيئية

الهيئة الإدارية للشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة



الملخص التنفيذي

تزايد القلق العالمي من الملوثات البلاستيكية الدقيقة (MPs) (جسيمات بلاستيكية أقل من 5 مم) والملوثات النانوية (NPs) (أقل من 100 نانومتر) وإنتشارهما في البيئات المائية والبرية في السنوات الأخيرة. ينتج العالم سنويًا نحو 300 مليون طن من البلاستيك، وقد بلغ إجمالي الإنتاج التاريخي حتى عام 2015 حوالي 6.3 مليار طن أُعيد تدوير أو أُحرق منها 21% فقط. تُظهر التقديرات أن التربة تستقبل كميات من الـ MPs تفوق الكميات التي تصل إلى المحيطات بنسبة تتراوح بين 4 و23 ضعفًا، وأن حوالي 85% من البيئات البحرية ملوّثة بالبلاستيك، يصل نحو 90% منها إلى حجم الميكرو. من المتوقع أن تتجاوز النفايات البلاستيكية المتراكمة في البيئات المائية 12 مليار طن بحلول 2050م إن لم تُتخذ إجراءات حازمة. تنشأ هذه الجسيمات من مصادر أولية (كالحُبيبات المصنعة مباشرة بهذا الحجم للاستخدام في مستحضرات التجميل مثلًا) أو مصادر ثانوية عبر تحلل المخلفات البلاستيكية الأكبر حجمًا بالعوامل البيئية كالأشعة فوق البنفسجية والتجوية الميكانيكية. تتميز المواد البلاستيكية بمقاومة عالية للتحلل، مما يؤدي إلى بقاء جسيماتها الدقيقة مدة طويلة في البيئة. تكمن خطورة الـ MPs و NPs في قدرتها على امتصاص الملوثات الكيميائية السامة مثل مبيدات الـ DDT وثنائيات الفينيل PCBs والمعادن الثقيلة كالزئبق والرصاص والكادميوم والتصاقها بسطح الجسيمات. عند ابتلاع الكائنات الحية لهذه الجسيمات الملوَّثة، تنتقل السموم عبر السلسلة الغذائية وصولًا إلى الإنسان. وقد ثَبُت وجود تأثيرات صحية معقدة لهذه الملوثات، مثل اضطرابات الجهاز الهضمي واختلالات هرمونية وتراكم بيولوجي طويل المدى في الأنسجة. كل هذه المعطيات جعلت من التلوث بالميكرو والنانو بلاستيك تحديًا بيئيًا وصحيًا عالميًا يستدعي تحركًا علميًا عاجلًا.

يُظهر التقرير الحالي أن المنطقة العربية ليست بمعزل عن أزمة الميكروبلاستيك العالمية، تشير البيانات الإقليمية إلى وجود تلوث ملحوظ بـMPs في عدة أوساط بيئية. سُجل إنتشار (MPs) في البحار الإقليمية مثل مياه الخليج العربي والبحر الأحمر نتيجة التصريفات الصناعية، والنشاط السياحي، وضعف إدارة النفايات الساحلية. كما تم توثيق تلوث التربة الزراعية بهذه الجسيمات الدقيقة، خاصة في المناطق التي تعتمد على مياه الري المعالَجة أو استخدام الأسمدة العضوية التي قد تحتوي على بقايا بلاستيكية. وتُظهر قياسات بيئية في بعض الدول ارتفاع مستويات MPs في الرواسب والشواطئ.

على صعيد التلوث في الكائنات الحية، أظهرت دراسات عربية وجود MPs في أمعاء الأسماك التجارية والأحياء البحرية على طول السواحل الخليجية والمتوسطية. وقدّر الباحثون أن استهلاك الفرد السنوي من بلح البحر قد يُدخِل إلى جسمه حوالي 4.2 جسيمًا من MPs سنويًا عبر هذه السلسلة الغذائية. وفي دراسات أخرى بالمملكة العربية السعودية والكويت، وُجدت MPs في الأجهزة الهضمية لأسماك متنوعة، مما يدل على إنتقال الملوثات في الشبكة الغذائية و إحتمال وصولها إلى الإنسان عبر إستهلاك المنتجات البحرية. كما رُصد تلوث مياه الصرف الصحي المعالَجة بـMPs ، ما يثير القلق حول إعادة استخدامها في الري ودورها في إعادة تدوير التلوث إلى البيئة. هذه المؤشرات جميعها تدق ناقوس الخطر بأن التلوث بـMPs بات واقعًا ملموسًا في البيئة العربية، سواء في الأنظمة البحرية أو البرية أو الحضرية.

يُبرز التقرير جملة من الآثار السلبية للتلوث بـMPs على النظم البيئية وصحة الكائنات الحية والإنسان. بيئيًا، تتسبب جزيئات الـ MPs في إلحاق الضرر بالحياة البحرية عبر ابتلاعها من قبل العوالق والأسماك والطيور البحرية؛ مما

قد يؤدي إلى انسداد الجهاز الهضمي، أو شعور زائف بالشبع يقلل التغذية، وحدوث اضطرابات في النمو والتكاثر لدى تلك الكائنات. وقد سجلت دراسات تجريبية انخفاضًا في معدل نجاة بعض الكائنات القاعية (مثل ديدان البحر) بنسبة 22% وتباطؤًا في النمو بنسبة 2% عند التعرض للMPs ، نتيجة إحداث إجهاد تأكسدي واضطرابات في مسارات الإشارات العصبية لديها. كما تتراكم MPs في الرواسب البحرية على المدى الطويل، مما يُغيّر من خصائص التربة البحرية ويهدد الأحياء القاعية ويرفع تركيز الملوثات في البيئات قليلة التيارات.

أما على الصحة العامة، فيحذر التقرير من انتقال MPs إلى جسم الإنسان عبر عدة طرق، أبرزها السلسلة الغذائية (استهلاك الأسماك والرخويات الملوثة) أو المياه والأغذية المعبأة في بلاستيك. تؤكد الأبحاث الحديثة إمكانية وصول هذه الجزيئات إلى أنسجة جسم الإنسان المختلفة بل وحتى الدورة الدموية والدماغ، خاصة الجسيمات النانوية لصغر حجمها وقدرتها على اختراق الأغشية الخلوية.

يوضح التقرير أن MPs لم يعد مجرد مشكلة تلوث بيئي، بل أصبح قضية صحة عامة .فهو يهدد التنوع البيولوجي عبر إضعاف الحياة البرية والبحرية، وفي الوقت ذاته يتسلل إلى غذاء الإنسان ومائه مسببًا أخطارًا صحية كامنة قد لا تظهر آثارها مباشرةً ولكنها تراكمية وبعيدة المدى. هذه النتائج تدعم الحاجة الماسة لاتخاذ إجراءات علمية وعملية للحد من هذه الملوثات في البيئة العربية.

يعرض التقرير تحليلًا شاملًا لقدرات الدول العربية في مواجهة التلوث بMPs من حيث البنية البحثية والتقنية، والأطر المؤسسية والسياسات المعمول بها. وتكشف البيانات وجود تباين كبير بين الدول في مستوى الاستعداد والاهتمام بهذه القضية. يُظهر مسح الأدبيات أن حجم الأبحاث المنشورة حول الـ MPs يختلف بشكل ملحوظ عبر المنطقة.

تختلف القدرات التحليلية للكشف عن الميكروبلاستيك بشكل حاد بين الدول. تمتلك بعض الدول الخليجية كمثل الإمارات والسعودية وقطر مختبرات مجهزة بأجهزة حديثة نسبيًا. في المقابل، العديد من الدول الأخرى تفتقر لهذه التجهيزات المتقدمة، مما يصعّب اكتشاف الـ NPsوالـ MPs الصغيرة جدًا في بيئاتها. وتعتمد غالبية المختبرات البيئية في المنطقة حاليًا على وسائل بسيطة نسبيًا كالفحص المجهري الضوئي الذي رغم بساطته فإنه لا يستطيع رصد الجسيمات النانوية بدقة .ضعف البنية المختبرية هذا أدى إلى انخفاض قدرة عدة دول على رصد التلوث بدقة ووضع خرائط واضحة لانتشاره. وسد هذه الفجوة يتطلب استثمارات في تجهيز المختبرات وتدريب الكوادر على التقنيات الحديثة بالتعاون مع مراكز دولية.

من الناحية التشريعية، بدأ وعي الدول العربية يتنامى بشأن مخاطر MPs ، إلا أن الإجراءات التنظيمية لا تزال في مراحلها الأولى. عدد قليل من الدول اتخذ خطوات قانونية للحد من البلاستيك أحادي الاستخدام (مثل فرض قيود على الأكياس البلاستيكية والأدوات ذات الاستخدام الواحد)، وذلك كجزء من الالتزام العالمي المتزايد بالحد من النفايات البلاستيكية. ومع ذلك، يشير التقرير إلى غياب تشريعات خاصة ب MPs في معظم الدول العربية حتى تاريخ إصدار التقرير. يُعزى ذلك جزئيًا إلى تحديات اقتصادية؛ فبعض الاقتصادات تعتمد صناعاتها بشكل كبير على إنتاج البلاستيك، مما يجعل فرض قيود صارمة أمرًا حساسًا اقتصاديًا. فضلًا عن ذلك، تواجه الدول النامية في المنطقة معوقات في تطبيق القوانين البيئية القائمة بسبب ضعف الموارد المالية ونقص الخبرات التنفيذية. فعلى الرغم من وجود سياسات وطنية عامة لإدارة النفايات، يبقى إنفاذها دون المستوى المطلوب، وكثيرًا ما تُغرق الأسواق المحلية بمنتجات بلاستيكية غير

مطابقة للمعايير البيئية لضعف الرقابة. لذا فإن الحاجة ملحّة إلى تحديث الإطار التشريعي ليتضمن معايير وضوابط تعنى بجسيمات البلاستيك الدقيقة، إلى جانب تعزيز آليات الرقابة والتقييم لتحقيق الامتثال الفعلي على أرض الواقع.

يسلط التقرير الضوء على مجموعة تحديات رئيسية تعوق الجهود المبذولة لرصد ومكافحة التلوث ب MPs في العالم العربي، من أبرزها:

- **نقص البيانات والمعلومات** :تعاني عدة دول من غياب نظم رصد منتظمة وشاملة، ما يؤدي إلى فجوات معرفية بشأن مدى انتشار الملوثات الدقيقة في البيئات المحلية. على سبيل المثال، لا تتوفر بيانات كافية عن تراكيز الـ MPs في البحرين وسوريا واليمن وليبيا ودول أخرى، مما يصعّب رسم صورة واضحة لحجم المشكلة. هذا النقص في البيانات يضعف القدرة على وضع سياسات مبنية على الأدلة العلمية.
- **ضعف البنية التحتية والموارد** :العديد من الدول تفتقر إلى المعدات التقنية المتقدمة والكفاءات المدربة لرصد الجسيمات متناهية الصغر. كما تحد محدودية التمويل من تنفيذ مشاريع تطوير البنية التحتية لإدارة النفايات أو شراء أجهزة التحليل المختبري اللازمة. والنتيجة هي اقتصار الرصد على مواقع أو فترات محدودة، وعدم القدرة على معالجة النفايات بكفاءة، ما يؤدي إلى تراكم المخلفات البلاستيكية وتسربها المستمر إلى البيئة.
- **قصور التشريعات والرقابة** :حتى الآن، تفتقد كثير من الدول العربية إلى قوانين متخصصة تحد من إطلاق الملوثات البلاستيكية الدقيقة. يُضاف إلى ذلك ضعف إنفاذ التشريعات البيئية القائمة نتيجة تحديات مؤسسية واقتصادية. على سبيل المثال، مبدأ "الملوِّث يدفع "ومبادرات المسؤولية الممتدة للمنتِج نادرًا ما تُطبق في إدارة النفايات، مما يعني أن صانعي ومستهلكي البلاستيك لا يتحملون تبعات التلوث. ويفاقم المشكلة الاعتماد الاقتصادي على صناعات البلاستيك في بعض البلدان، والذي يجعل تبنّي قيود صارمة على الإنتاج أو الاستهلاك أمرًا صعبًا من المنظور الاقتصادي.
- **ضعف إدارة النفايات الصلبة** :تعاني البنية التحتية لإدارة المخلفات في كثير من الدول من قصور مزمن .فلا تزال كميات كبيرة من النفايات (بما فيها البلاستيك) تُرمى في المكبات المفتوحة أو البيئات الطبيعية دون معالجة. هذا الخلل يؤدي إلى تسرّب البلاستيك إلى الأنهار والبحار والتربة باستمرار. كما أن محطات معالجة مياه الصرف ليست مجهزة بعد للتعامل مع MPs ، ما يجعل جزءًا منها يعود للدورة البيئية عبر المياه المعالَجة. إن ضعف منظومة الفرز وإعادة التدوير وانخفاض كفاءة جمع النفايات وخاصة خارج المدن الكبرى يظلان تحديين مؤثرين يسهمان في استمرار انتشار الملوثات البلاستيكية في البيئة.
- **انخفاض الوعي المجتمعي** :يبرز التقرير أن الوعي البيئي العام بمخاطر MPs لا يزال غير كافٍ. الكثير من المستهلكين لا يدركون حجم المشكلة ولا يربطون بين سلوكياتهم (كالاستخدام المفرط للأكياس والعبوات البلاستيكية) وبين التلوث الناجم عنها. ينعكس ذلك على ضعف المشاركة الشعبية في جهود الحد من الاستهلاك أحادي الاستعمال، أو الفرز المنزلي للنفايات، أو دعم المبادرات التطوعية لتنظيف الشواطئ. هذا التحدي الثقافي يتطلب برامج تثقيفية مستمرة لتغيير العادات وتعزيز الشعور بالمسؤولية البيئية لدى الأفراد والمؤسسات.

هذه التحديات المتداخلة تؤكد أن مشكلة التلوث ب MPs في المنطقة معقدة، فهي ليست مجرد قضية فنية، بل تمتد لأبعاد اقتصادية واجتماعية. لذا، فإن معالجتها تحتاج إلى مقاربة شاملة تأخذ بالاعتبار توفير الموارد اللازمة، وبناء القدرات، وتحديث السياسات، وتغيير السلوك الاجتماعي نحو استهلاك وإدارة أكثر استدامة للمواد البلاستيكية.

خلص التقرير إلى حزمة توصيات إستراتيجية موجهة لصنّاع القرار والجهات البحثية في الدول العربية، بهدف تقليل التلوث بالميكروبلاستيك والحد من أضراره الحالية والمستقبلية. من أهم هذه التوصيات:

- **تعزيز البحث العلمي والتنسيق الإقليمي** :ضرورة تكثيف الدراسات التطبيقية لرصد MPs في البيئات العربية المختلفة، مع تشجيع التعاون بين الجامعات والمراكز البحثية عربيًا ودوليًا .يجب إنشاء قاعدة بيانات إقليمية مشتركة وتوحيد منهجيات البحث لجمع بيانات قابلة للمقارنة تمكّن من فهم أعمق للمشكلة. كذلك أوصى الخبراء بتبادل الخبرات عبر شبكات علمية إقليمية وتنظيم ورش عمل ودورات تدريب حول أحدث التقنيات التحليلية.
- **تطوير القدرات التقنية والمخبرية** :توصي الشبكة بتوجيه استثمارات لتجهيز المختبرات البيئية بأجهزة حديثة ورفع كفاءة الكوادر الفنية .يشمل ذلك توفير أجهزة التحليل الطيفي عالي الدقة لرصد MPs ، واعتماد بروتوكولات موحدة لأخذ العينات وتحليلها لضمان دقة النتائج. إن سد الفجوة التقنية في بعض الدول سيساعد على مراقبة التلوث بشكل أفضل ودعم القرارات البيئية بالمعلومات الموثوقة.
- **إصلاح إدارة النفايات والبنية التحتية :**دعت التوصيات إلى استثمارات استراتيجية في تحديث أنظمة إدارة النفايات الصلبة ومياه الصرف. يتضمن ذلك إنشاء مرافق متقدمة لفرز المخلفات وإعادة تدويرها، وتحسين تغطية خدمات جمع القمامة، وضمان المعالجة السليمة لمياه الصرف بما يوقف إعادة انبعاث الملوثات الدقيقة للبيئة. كما أكدت على تبني نهج الاقتصاد الدائري في التعامل مع البلاستيك لتعزيز إعادة الاستخدام وتقليل الفاقد.
- **تشريعات بيئية صارمة وحوافز خضراء** :أوصى التقرير بضرورة سنّ أو تحديث التشريعات لوضع قيود واضحة على البلاستيك أحادي الاستخدام ومنع مصادر التلوث المعروفة. ينبغي للحكومات فرض إجراءات مثل حظر منتجات معينة (الأكياس، الأدوات البلاستيكية) تدريجيًا، وإلزام الصناعات بتخفيض الحبيبات البلاستيكية المنبعثة أثناء عمليات التصنيع. كما تم التأكيد على تفعيل مبدأ المسؤولية الممتدة للمنتِج (EPR) بحيث يشارك المنتجون في تحمل كلفة جمع ومعالجة النفايات الناجمة عن منتجاتهم. ويمكن تقديم حوافز للشركات التي تتبنى مواد بديلة قابلة للتحلل أو نظم إنتاج أكثر نظافة، بما يخلق سوقًا لتقنيات مبتكرة صديقة للبيئة.
- **تعزيز الوعي والتعليم البيئي** :شددت التوصيات على إطلاق وتوسيع حملات توعية وطنية لإبراز مخاطر الميكروبلاستيك على البيئة والصحة. يشمل ذلك إدماج موضوعات التلوث البلاستيكي في المناهج الدراسية لغرس المفاهيم البيئية من سن مبكرة، واستخدام الإعلام ووسائل التواصل الاجتماعي في نشر الرسائل التوعوية للمجتمع. كما تم اقتراح تشجيع مبادرات المجتمع المدني (مثل حملات تنظيف الشواطئ والبحيرات) وتوفير

الدعم للمنظمات غير الحكومية الناشطة في مجال البيئة لتوسيع نطاق تأثيرها. إن رفع مستوى الوعي المجتمعي سيؤدي إلى تغيير إيجابي في أنماط الاستهلاك والتخلص من النفايات.

- **تطوير التعاون الإقليمي والدولي** :نظرًا للطبيعة العابرة للحدود للتلوث البلاستيكي، أكّد التقرير على أهمية إنشاء منصة تنسيق عربية لمواجهة الملوثات الناشئة. يمكن عبرها تبادل المعلومات بين الدول، وتنفيذ مشاريع بحثية مشتركة (مثلاً لدراسة تيارات البلاستيك في البحر الأحمر أو المتوسط)، وتوحيد المواقف في المحافل الدولية المتعلقة بالبيئة. كما يُنصَح بالاستفادة من خبرات المنظمات الدولية (كبرنامج الأمم المتحدة للبيئة ومنظمة الصحة العالمية) في بناء القدرات المحلية، وجلب الدعم الفني والمالي للمبادرات الإقليمية. إن تكاتف الدول العربية وتحدثها بصوت موحد في ملف التلوث البلاستيكي سيعزز القدرة على جذب الاهتمام العالمي والمساعدة التقنية اللازمة.

في الختام، يبرز التقرير أن التلوث باللدائن الدقيقة والنانومترية تحدٍ بيئي وصحي متفاقم في المنطقة العربية، لكنه قابل للمعالجة عبر خطة شمولية متعددة المحاور. تنفيذ التوصيات أعلاه سيساعد على تقليل تدفق MPs إلى البيئة، وحماية النظم البيئية الساحلية والبرية، وصون صحة الإنسان للأجيال الحالية والمستقبلية. يتطلب ذلك إرادة سياسية مدعومة بالعلم الحديث، وتعاونًا بين القطاعات الحكومية والبحثية والخاصة والمجتمع المدني. إن مستقبل بيئة نظيفة ومستدامة في العالم العربي مرهون بالخطوات التي نتخذها اليوم لمواجهة هذه الملوثات الناشئة

Executive Summary

Global concern over microplastic (MPs)—plastic particles smaller than 5 mm—and nanoplastic (NPs)—particles smaller than 100 nm—has intensified in recent years due to their widespread presence in aquatic and terrestrial environments. The world produces approximately 300 million tons of plastic annually, and cumulative plastic production reached about 6.3 billion tons by 2015, of which only 21% was recycled or incinerated. Estimates indicate that soils receive 4 to 23 times more MPs than oceans, and roughly 85% of marine environments are contaminated with plastics, about 90% of which are micro-sized. Without decisive measures, accumulated plastic waste in natural waters is projected to exceed 12 billion tons by 2050.

These particles originate from primary sources (e.g., microbeads and pellets manufactured at micro-scale for cosmetics and other uses) and secondary sources via the degradation of larger plastic items under environmental stressors such as ultraviolet radiation and mechanical weathering. Because plastics are highly resistant to degradation, their micro- and nano-scale fragments persist in the environment for prolonged periods. MPs and NPs pose significant risks due to their capacity to adsorb toxic chemicals including DDT, PCBs, and heavy metals such as mercury, lead, and cadmium—and carry them on their surfaces. Once ingested by organisms, these contaminated particles enable trophic transfer of pollutants through the food web to humans. The health impacts include gastrointestinal disturbances, endocrine disruption, and long-term bioaccumulation in tissues. These factors render micro- and nanoplastic pollution a pressing global environmental and public health challenge that demands urgent scientific and policy action.

The present report revealed that the data document notable contamination by MPs across multiple environmental compartments in the Arab region. MPs are prevalent in regional seas, including the Arabian Gulf and the Red Sea, driven by industrial discharges, tourism-related pressures, and weak coastal waste management. Agricultural soils are also affected, particularly where treated wastewater is reused for irrigation or organic fertilizers contain plastic residues. Environmental surveys in several countries report elevated MP levels in sediments and beaches.

The studies across Arab countries have identified MPs in the gastrointestinal tracts of commercial fish and other marine organisms along Gulf and Mediterranean coasts. One

estimate suggests that annual consumption of mussels could introduce approximately 4.2 microplastic particles per person per year via this dietary pathway. The studies in Saudi Arabia and Kuwait have found MPs in the digestive systems of various fish species, substantiating trophic transfer and the potential for human exposure via seafood. MPs have also been detected in treated wastewater, raising concerns about their re-introduction into the environment through agricultural reuse. Taken together, these indicators underscore that microplastic pollution is a present and tangible reality across marine, terrestrial, and urban systems in the Arab region.

The report highlighted a range of environmental and health impacts. Ecologically, MP ingestion by plankton, fish, and seabirds causes gastrointestinal blockage, false satiation leading to reduced feeding, and disrupted growth and reproduction. Experimental studies have reported, for example, a 22% reduction in survival and a 2% growth slowdown in certain benthic organisms (e.g., marine worms) exposed to microplastics, associated with oxidative stress and altered neuronal signaling. MPs accumulate in marine sediments over time, modifying sediment properties, threatening benthic communities, and concentrating pollutants in low-circulation areas.

The report warns that MPs reach humans through multiple exposure pathways, most notably dietary intake (contaminated fish and shellfish) and plastic-packaged food and water. Recent evidence suggests that these particles, especially NPs, access multiple human tissues, and even enter the bloodstream and the brain, owing to their minute size and ability to cross cellular barriers. MPs are no longer merely an environmental contamination issue; they constitute a public health concern. They erode biodiversity by undermining wildlife and marine health while simultaneously infiltrating human food and water, posing latent, cumulative, and long-term risks. The findings reinforce the urgent need for coordinated scientific and practical interventions to mitigate MP/NP pollution in Arab environments.

The report provided a comprehensive assessment of Arab states' capacities to confront MPs/NPs pollution across research and technical infrastructure, institutional frameworks, and policy instruments. The data reveal substantial heterogeneity in readiness and prioritization.

Analytical capacity for MP detection also varies sharply. Some Gulf states—the UAE, Saudi Arabia, and Qatar—operate laboratories equipped with relatively advanced

instrumentation. Elsewhere, many countries lack such capabilities; the report notes limited availability of high-end analytical tools and scarcity of specialized expertise in countries such as Sudan, Yemen, Libya, and Syria, complicating detection of very small MPs and NPs. Many environmental labs still rely on basic optical microscopy, which cannot reliably detect nanoscale particles. This infrastructure gap diminishes monitoring accuracy and hampers spatial mapping of contamination. Bridging it will require targeted investments in laboratory equipment and capacity building through international partnerships.

On the regulatory front, awareness of plastic-related risks is growing, but policy measures remain nascent. A limited number of countries have enacted controls on single-use plastics (e.g., restrictions on bags and disposable utensils) as part of broader efforts to curb plastic waste. However, MP-specific legislation remains largely absent across the region. Economic dependencies on plastic manufacturing can make stringent restrictions politically and economically sensitive. Enforcement of existing environmental laws is also hindered by resource constraints and implementation challenges. While national waste strategies exist in several states, their on-the-ground enforcement is often insufficient, and local markets are frequently flooded with non-compliant plastic products due to weak oversight. Updating the legislative framework to include microplastic standards and controls, alongside stronger compliance and monitoring mechanisms, is therefore imperative.

The capacity analysis suggests that Arab countries possess foundational assets trained young scientists, select central laboratories, and isolated success stories but require stronger regional integration and knowledge exchange to close gaps. Advancing research and technical capabilities, bolstering regulatory readiness, and scaling public awareness will be critical to a more effective, region-wide response to microplastic pollution in the coming years.

The report identified five principal challenges impeding monitoring and mitigation in the Arab world:

1. **Data scarcity:** Many countries lack routine, comprehensive monitoring, creating knowledge gaps in local MP prevalence and distributions. For several states (e.g., Bahrain, Syria, Yemen, Libya), data are insufficient to construct a reliable regional baseline, undermining evidence-based policymaking.

2. **Infrastructure and resource limitations:** A shortage of advanced analytical equipment, trained personnel, and sustainable funding constrains environmental monitoring and waste-management upgrades, allowing plastic leakage to persist.
3. **Regulatory and enforcement shortfalls:** Few countries have MP-specific rules; enforcement of existing environmental regulations is inconsistent. Mechanisms like "polluter pays" and extended producer responsibility (EPR) are rarely implemented, while economic dependence on plastics complicates the adoption of strict controls.
4. **Weak solid waste management:** Significant volumes of waste—including plastics—still end up in open dumps or natural environments. Wastewater treatment plants are generally not optimized to capture micro-sized particles, enabling their recirculation into ecosystems. Low sorting/recycling rates and uneven collection coverage, especially beyond major cities, further exacerbate leakage.
5. **Low public awareness:** Many consumers do not connect everyday behaviors (e.g., single-use plastics) with environmental and health risks. Public participation in source reduction, household sorting, and clean-up campaigns remains limited, necessitating sustained education and outreach.

To address these constraints, the report proposes the following strategic recommendations for policymakers and research institutions:

- **Strengthen research and regional coordination:** Expand applied monitoring studies across Arab ecosystems and foster Arab–international collaborations. Establish a shared regional database and harmonized methodologies to enable comparable datasets; promote expert networks, workshops, and advanced training.
- **Upgrade technical and laboratory capacity:** Invest in modern analytical platforms (e.g., high-resolution spectroscopy and imaging) and staff development; adopt standardized sampling and analysis protocols to ensure data quality; and close detection gaps for NPs.
- **Reform waste and wastewater systems:** Prioritize infrastructure investments for solid waste and wastewater management, expanding sorting, recycling, and reliable collection services; ensure effective wastewater treatment to prevent microplastic re-emission; and embed circular economy principles to reduce plastic throughput.

- **Adopt robust regulation and green incentives:** Enact or update laws to phase down single-use plastics and control known MP sources; activate EPR schemes and “polluter pays” mechanisms; and deploy incentives for biodegradable alternatives and cleaner production.
- **Scale public awareness and education:** Launch comprehensive national awareness campaigns, integrate plastic pollution topics into school curricula, leverage media and social platforms, and support civil society initiatives (e.g., shoreline clean-ups).
- **Deepen regional and international cooperation:** Create an Arab coordination platform on emerging pollutants to share data, design joint research (e.g., Red Sea and Mediterranean transport studies), and align diplomatic positions in international environmental fora; leverage UN agencies and global NGOs for technical and financial support.

It can be concluded that micro- and nanoplastic pollution is an escalating environmental and public health threat in the Arab region, yet it is actionable through a multi-pronged approach. Implementing the recommendations above will curb microplastic inflows, protect coastal and terrestrial ecosystems, and safeguard human health for current and future generations. Achieving a cleaner, more sustainable Arab environment depends on decisive, science-informed policies and cross-sectoral collaboration undertaken now.

قائمة الإختصارات

الإسم باللغة العربية	الإختصار	Name
نظام التحليل الطيفي بالأشعة السينية	**EDS**	X-ray Spectroscopy system
مطياف الأشعة تحت الحمراء بتقنية تحويل فوريه	**FT-IR**	Spectroscopy Fourier Transform Infrared
بولي ستايرين عالي التأثير	**HIPS**	High-impact Polystyrene
بولي إيثيلين منخفض الكثافة	**LDPE**	Low-density Polyethylene
الجسيمات البلاستيكية الدقيقة	**MPs**	Microplastic Particles
الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات	**PAHs**	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
بولي (بيوتيلين أدبات-كو-تيريفثاليت)	**PBAT**	Poly (butylene-adipate-co-terephthalate)
مركبات إيثرات ثنائي الفينيل متعدد البروم	**PBDEs**	Polybrominated Diphenyl Ethers
بولي بيوتيلين سكسينات	**PBS**	Polybutylene Succinate
بولي كابرولاكتون	**PCL**	Polycaprolactone
بولي إيثيلين	**PE**	Polyethylene
بولي إيثيلين تيرفثالات	**PET**	Polyethylene Terephthalate
بولي هيدروكسي ألكانوات	**PHA**	Polyhydroxyalkanoate
بولي هيدروكسي بيوتيرات	**PHB**	Polyhydroxybutyrate
بولي حمض اللاكتيك (شكل L)	**PLA**	Poly L-lactic Acid
بولي بروبيلين	**PP**	Polypropylene
بولي بروبيولاكتون	**PPL**	Poly (propiolactone)
بولي ستايرين	**PS**	Polystyrene
بولي فينيل كلوريد	**PVC**	Polyvinyl Chloride
المجهر الإلكتروني الماسح	**SEM**	Scanning Electron Microscope

جدول المحتويات

الملخص التنفيذي		xii
Executive Summary		xvi
قائمة الإختصارات		xxi
الفصل الأول: المقدمة		1
1.1	مقدمة التقرير	2
1.2	التلوث البيئي بالجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) في المنطقة العربية	2
1.3	أهـداف التقـريـر	2
1.4	أهمية التعاون الإقليمي والدولي	3
1.5	دور الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة (EPN) في مواجهة التلوث بالـ MPs	3
1.6	أهمية التقارير التقنية في دعم الوعي البيئي	4
1.7	أهداف التقارير الفنية	4
الفصل الثاني: الجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs)		
2.1	مقدمة عن الجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs)	7
2.2	التنظيمات والتشريعات العالمية في إدارة النفايات البلاستيكية الدقيقة (MPs)	13
2.3	المصادر المختلفة للجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs)	15
الفصل الثالث: التأثيرات البيئية والعصبية للجسيمات البلاستيكية الدقيقة والنانوية (MPs & NPs)		
3.1	التأثيرات الضارة للـ MPs على الحياة البحرية	18
3.2	المخاطر الصحية المرتبطة بالـ MPs في البيئة	19
3.3	التأثيرات السمية العصبية للميكروبلاستيك والنانو بلاستيك (MPs & NPs)	21
3.4	الآليات الميكانيكية للتأثيرات العصبية الناتجة عن التعرض للـ MPs	22
3.5	الاضطراب الجيني والعصبي عند التعرّض للـ MPs	24
3.6	تطور السمية العصبية في أدمغة الحيوانات بسبب التعرض للMPs وNPs	26
3.7	التراكم الحيوي للميكروبلاستيك في أدمغة البشر المتوفين	27
3.8	التعرّض المبكر للملوثات البلاستيكية: مسارات التأثير على النمو العصبي لدى الأطفال	27
الفصل الرابع: رصد وتقييم التلوث البيئي بالجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) في الدول العربية		
4.1	الكشف الكمي والنوعي للـ MPs في البيئة	30
4.2	تلوث البيئة بالـ MPs في الدول العربية	37
4.2.1	الجمهورية التونسية	37
4.2.2	جمهورية مصر العربية	48
4.2.3	الجمهورية اللبنانية	56
4.2.4	الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية	59
4.2.5	دولة قطر	61

4.2.6 المملكة العربية السعودية 63
4.2.7 المملكة المغربية 69
4.2.8 المملكة الأردنية الهاشمية 75
4.2.9 الإمارات العربية المتحدة 77
4.2.10 دولة الكويت 80
4.2.11 سلطنة عمان 83
4.2.12 جمهورية العراق 85
الفصل الخامس: الدراسات والجهود البحثية لتلوث الجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) في الدول العربية
5.1 تحليل توزيع الدراسات المنشورة حول الـ MPs في الدول العربية 90
5.2 نطاق الدراسات التي تمت على الـ MPs وأنواع العينات ومواقع جمعها في الدول العربية 92
الفصل السادس: البنية التقنية والجهود الإقليمية لرصد التلوث بالـ MPs في المنطقة العربية
6.1 البنية المعملية والتقنية لأجهزة تحليل الـ MPs في الدول العربية 99
6.1.1 المجهر الضوئي (OM) 99
6.1.2 مجهر المسح الإلكتروني (SEM) 100
6.1.3 التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء باستخدام تحويل فورييه (FTIR) 101
6.1.4 تقنية الرامان (Raman Spectroscopy) 102
6.1.5 تحليل الجاذبية الحرارية والتحليل الحراري التفريقي (TGA/DSC) 102
6.1.6 مطيافية الامتصاص فوق البنفسجي والمرئي (UV-Vis) 103
6.1.7 الطرد المركزي عالي السرعة (Ultracentrifuge) 104
6.1.8 مطيافية الكتلة (MS) 105
6.1.9 تقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR) 105
6.1.10 تقنية تشتت الضوء الديناميكي (DLS) 106
6.1.11 جهاز تحليل حجم الجسيمات بالليزر (LPSA) 107
6.1.12 تقنية التحليل الحراري والتفكك المدمجة مع الكروماتوغرافيا الغازية ومطياف الكتلة (Py-GC-MS) 107
6.1.13 تقنية التصوير المجهري المحوسب بالأشعة السينية (Micro-CT) 108
6.1.14 تقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء وتقنية المجهر القريب من المجال (Nano–FTIR) 108
6.1.15 تقنية المجهر البؤري اليزري الماسح (CLSM) 109
6.1.16 مطياف الكتلة الأيونية الثانوية لزمن الطيران (ToF-SIMS) 110
6.1.17 مجهر القوة الذرية (AFM) 111
6.2 توفر البيانات حول تركيز الـ MPs في البيئة العربية 111
6.3 التعاون الدولي 117
الفصل السابع: الاستراتيجيات البحثية والإدارية والسياسية لمواجهة التلوث بالـ MPs في المنطقة العربية
7.1 البحث والرصد البيئي 119
7.2 إدارة النفايات 119
7.3 تطوير السياسات 119
الفصل الثامن: التحديات والتوجهات المستقبلية
8.1 التحديات التقنية ونقص البيانات البحثية حول الـ MPs في بعض الدول العربية 122

8.2 التوجهات المستقبلية 122
8.3 توحيد أساليب التحليل 123
8.4 توصيات مستقبلية لتعزيز البحث وإدارة التلوث 123
المراجـــــع 125

قائمة الجداول

		الصفحة
جدول 2.1	الخصائص الكيميائية والميكانيكية للبوليمرات البلاستيكية	9
جدول 4.1	ملخص الدراسات التي أُجريت في تونس للكشف عن وتحديد الـ MPs	39
جدول 4.2	ملخص الدراسات التي أُجريت في مصر على الـ MPs	51
جدول 4.3	ملخص الدراسات التي أُجريت في الكويت على الـ MPs	80
جدول 5.1	نطاق دراسات رصد الـ MPs وأنواع العينات التي تم جمعها ومواقعها في الدول العربية	95

قائمة الاشكال

		الصفحة
شكل 2.1	تطبيقات ونسبة إعادة تدوير أنواع مختلفة من المنتجات البلاستيكية	8
شكل 2.2	أنواع البلاستيك الحيوي والقابل للتحلل والبدائل المستدامة للبلاستيك التقليدي	11
شكل 2.3	آليات التحلل الميكروبي للبلاستيك ومصادره واستراتيجيات تعزيزه	12
شكل 2.4	التسلسل التاريخي للاهتمام بالتلوث البيئي بالـ MPs	14
شكل 2.5	مصادر التلوث بالـ MPs	15
شكل 3.1	التاثيرات الضارة للـ MPsعلى الحياة البحرية والبرية	18
شكل 3.2	التاثيرات الصحية للـ MPs على الكائنات الحية بما فيها الانسان	20
شكل 3.3	تأثير الجسيمات البلاستيكية الدقيقة والنانوية على الجهاز العصبي وآليات الضرر المحتملة	21
شكل 3.4	الآليات الميكانيكية لتأثير الجسيمات البلاستيكية الدقيقة والنانوية على الجهاز العصبي والمسارات البيولوجية	22
شكل 3.5	تأثير الجسيمات البلاستيكية الدقيقة والنانوية على التطور العصبي والسلوك البشري	25
شكل 4.1	خطوات استخراج MPs من عينات مياه الصرف الصحي	31
شكل 4.2	خطوات استخراج MPs من عينات الحمأة	32
شكل 4.3	خطوات استخراج الـ MPs من (A) أنسجة الأسماك، (B) العينات الهضمية	33
شكل 4.4	خطوات استخراج MPsمن عينات المرجان كما هو موضح في دراسة دينغ وآخرون78	34
شكل 4.5	خطوات استخراج MPs من عينات التربة كما ورد في دراسة لي وآخرون81	36
شكل 5.1	نموذج الدلو المثقوب: مسارات وتسرب التلوث البلاستيكي في المنطقة العربية	90
شكل 5.2	ملخص بياني لعدد الدراسات التي تم نشرها عن الـ MPs في الدول العربي	91
شكل 5.3	توزيع مواقع الدراسات المرتبطة بالميكروبلاستيك في الدول العربية	92
شكل 5.4	طيف العينات البيئية المستخدمة في تقييم مستويات الميكروبلاستيك في النُّظم البحرية والساحلي	94
شكل 6.1	التقنيات المستخدمة لكشف الـ MPs في الدول العربية ونسبة اعتماد الدول العربية عليها في الدراسات	99
شكل 6.2	نسب الكشف عن أنواع البوليمرات الشائعة في العينات البيئية	112
شكل 6.3	أحجام وأنواع البوليمرات المكتشفة في العينات	113
شكل 6.4	متوسط تراكيز MPS في عينات المياه المالحة في الدول العربية	114
شكل 6.5	متوسط تراكيز MPS في عينات المياه العذبة في الدول العربية	115
شكل 6.6	متوسط التوافر الحيوي لل MPS في عينات السمك والماكولات البحرية العذبة في الدول العربية	116
شكل 7.1	التنقيات المستقبلية للدول العربية في مكافحة انتشار الـ MPs	120

الفصل الأول

الفصل الأول: المقدمة

يستعرض الفصل الأول سبعة أقسام رئيسية، حيث يبدأ بمقدمة عامة للتقرير، ثم يستعرض التلوث البيئي بالجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) في المنطقة العربية. كما يتناول أهداف التقرير ويبحث في أهمية التعاون الإقليمي والدولي في هذا المجال. ويُبرز الفصل دور الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة (EPN) في مواجهة التلوث بالجسيمات البلاستيكية الدقيقة، بالإضافة إلى مناقشة أهمية التقارير التقنية في دعم الوعي البيئي، ويختتم بتوضيح أهداف التقارير الفنية.

1.1 مقدمة التقرير

تُعد الشبكة العربية للتَصدي للملوثات البيئية الناشئة (EPN) منظمة غير حكومية، تُعنى بتعزيز التعاون الإقليمي في التصدي للمخاطر البيئية الناشئة، لا سيما تلك التي تهدد الصحة العامة والتوازن البيئي في المنطقة العربية. وفي إطار التزامها بنشر المعرفة العلمية ودعم صُنَاع القرار البيئي، تُقدم الشبكة هذا التقرير الفني الذي يُسلط الضوء على التلوث الناجم عن MPs ، باعتباره أحد أكثر أنماط التلوث البيئي انتشاراً وخطورة في العصر الحديث.

الـ MPs هي جُزيئات بلاستيكية يقل حجمُها عن خمس مليمترات، وتُنتج إما بشكل مباشر (كالحُبيبات المُستخدمة في مستحضرات التجميل)، أو بشكل غير مباشر نتيجة لتفكك المواد البلاستيكية الأكبر حجما بفعل العوامل البيئية. تدخل هذه الجزيئات إلى النُظم البيئية البحرية والبرية، وتُنتقل عبر الماء والهواء والسلاسل الغذائية، مما يُفضي إلى آثارٍ بيئية وصحية معقدة وخطيرة. وتُشير الدراسات الحديثة إلى قدرة الـ MPs على امتصاص الملوثات الكيميائية السامة، كما يمكن أن تبتلعها الكائنات البحرية وتنتقل إلى الإنسان عبر استهلاك الأغذية البحرية، بما يُسبب اضطرابات في الجهاز الهضمي، وتأثيرات هرمونية، وتراكمًا بيولوجيًا طويل الأمد.

1.2 التلوث البيئي بالجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) في المنطقة العربية

تشير البيانات الإقليمية إلى وجود تلوث ملموس بالـ MPs في عدد من المواقع البيئية الحساسة، مثل السواحل، والمسطحات المائية، والمناطق الحضرية. وقد رصد وجود الـ MPs في مياه البحر الأحمر والخليج العربي، نتيجة التلوث الصناعي والنشاط السياحي وسوء إدارة النفايات. كما سُجل تلوث التربة الزراعية بهذه الجزيئات نتيجة استخدام مياه الري المعالجة أو الأسمدة العضوية المحتوية على بقايا بلاستيكية.

1.3 أهـداف التقـريـر

يهدفُ التقرير إلى ما يلي:

- توفير فهم علمي شامل حول الـ MPs.
- تحليل الوضع الراهن في الدول العربية وتقديمُ مسح علمي للدراسات المُتوفرة، وتحديد مصادر التلوث الرئيسية.
- تقييم المخاطر البيئية والصحية، واستعراض التأثيرات المحتملة على الكائنات الحية والإنسان، استنادا إلى الأدلة العلمية.
- تقديم توصيات فنية وسياساتية واقتراح حلول عملية للتخفيف من هذه الملوثات، من خلال تحسين إدارة النفايات، وتعزيز التشريعات، وزيادة الوعي المجتمعي.

1.4 أهمية التعاون الإقليمي والدولي

يتطلب التصدي لتلوث الـ MPs تنسيقًا فعالًا بين الدول العربية، من خلال تبادل المعرفة والخبرات، وتطوير برامج تدريبية ومشروعات بحثية مشتركة. كما يعد التعاون مع المؤسسات الدولية والمراكز البحثية المتخصصة ضروريا لتوفير الدعم الفني والتكنولوجي والمالي اللازم. يشكل تلوث البيئة بالـ MPs تحديا متزايدا في العالم العربي، يتطلب استجابة علمية وتنسيقية عاجلة. ومن خلال هذا التقرير، تأمل الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة أن تسهم في تحفيز العمل الجماعي، ودعم صناع القرار في تبني سياسات مستدامة تحمي الإنسان والبيئة على حد سواء.

1.5 دور الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة (EPN) في مواجهة التلوث بالـ MPs

تدرك الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة (EPN) حجم التحديات المتنامية المرتبطة بتلوث البيئة بالـ MPs في المنطقة العربية، وانطلاقا من رسالتها في حماية البيئة وصحة الإنسان، تتبنى الشبكة نهجًا استراتيجيًّا للتعامل مع هذه القضية البيئية المعقدة، والتي تُعد من الملوثات الناشئة ذات الأولوية.

- **بناء قاعدة بيانات إقليمية**

تعمل الشبكة على تطوير قاعدة بيانات إقليمية شاملة توثق مستويات التلوث بالـ MPs في النُّظم البيئية المختلفة، بما يشمل المسطحات المائية، والتربة، والهواء، والحياة البحرية. تُركز هذه المبادرة على جمع بيانات ميدانية وتحليلها لتحديد النقاط الساخنة للتلوث، ورسم صورة دقيقة عن حجم المشكلة في الدول العربية.

- **تطوير وتوحيد بروتوكولات القياس**

تسعى الشبكة إلى توحيد المنهجيات والتقنيات المستخدمة في رصد الـ MPs، بالتعاون مع شركاء علميين إقليميين ودوليين. يشمل ذلك إعداد أدلة فنية، وتدريب الفرق الوطنية على استخدام أدوات تحليل الـ MPs في المياه والتربة والأنسجة الحيوية، بما يضمن جودة البيانات ودقتها.

- **تعزيز التعاون الإقليمي والدولي**

إدراكا لأهمية التآزر بين الدول والمؤسسات، تعمل الشبكة على توطيد الشراكات مع الجامعات، والمراكز البحثية، والمنظمات الدولية المختصة. يُتيح هذا التعاون تبادل المعرفة، ونقل التقنيات، وتطوير حلول مستدامة تتناسب مع خصوصية البيئة العربية.

- **رفع مستوى الوعي والتثقيف البيئي**

تُطلق الشبكة حملات توعوية موسعة تستهدف صنَّاع القرار، والمجتمع المدني، ووسائل الإعلام، لتعريفهم بمخاطر الـ MPs وآثاره البيئية والصحية. تشمل هذه المبادرات إعداد كتيبات توعوية، وتنظيم فعاليات عامة وورش عمل للمدارس والجامعات.

- **دعم السياسات والتشريعات البيئية**

تسهم الشبكة في دعم تطوير سياسات وتشريعات تضع ضوابط لاستخدام البلاستيك وتحد من مصادر بالـ MPs، لا سيما في قطاعات التعبئة والتغليف، والمنتجات اليومية، والمنسوجات. تعمل الشبكة أيضا على تقديم توصيات تشريعية، والمشاركة في حوارات السياسات البيئية على المستويات الوطنية والإقليمية.

- **تشجيع البحث والابتكار**

تُحفز الشبكة البحث العلمي في مجال بالـ MPs من خلال توفير فرص التدريب والتطوير المهني للباحثين، وتأسيس منصات بحثية إقليمية تُعزز التعاون وتبادل المعرفة بين الخبراء. كما تدعم الابتكار في مجالات الكشف عن بالـ MPs وإزالته من البيئة.

- **مراقبة وتقييم التأثيرات الصحية والبيئية**

تنفذ الشبكة برامج لمراقبة التأثيرات الناتجة عن تلوث الـ MPs، تشمل جمع بيانات صحية وبيئية لتحليل آثار تراكم هذه الجزيئات في السلسلة الغذائية، ومدى ارتباطها بالمشكلات الصحية لدى الإنسان والحيوان.

- **تطوير برامج إدارة مستدامة للنفايات والبلاستيك**

تعمل الشبكة على تطوير نماذج لإدارة النفايات البلاستيكية بطريقة مستدامة، مع التركيز على منع تحلل البلاستيك إلى جزيئات دقيقة، وتعزيز إعادة التدوير، وتقليل الاستهلاك الأحادي للبلاستيك، وتقديم حلول بديلة قابلة للتحلل.

1.6 أهمية التقارير التقنية في دعم الوعي البيئي

تُعدّ التقارير الفنية إحدى الأدوات الأساسية التي تعتمدها الشبكة لتعزيز الوعي البيئي المبني على المعرفة. تُسلط الشبكة الضوء على واقع التلوث بالـ MPs في الدول العربية من خلال تقاريرها الدورية، وتُقدم توصيات مبنية على أحدث ما توصَلت إليه الأبحاث.

1.7 أهداف التقارير الفنية

- تعزيز المعرفة البيئية لدى مختلف فئات المجتمع وصنَّاع القرار.
- دعم عملية اتخاذ القرار عبر تقديم بيانات موثوقة.
- تشجيع الشراكات البيئية لمعالجة التحديات المشتركة.
- تقييم مصادر التلوث بالـ MPs في البيئات البحرية والبرية.
- دراسة انتقال الـ MPs عبر السلسلة الغذائية.
- تحليل الأضرار المحتملة على صحة الإنسان والتنوع البيولوجي.
- مراجعة السياسات الحالية، وتقديم توصيات عملية قابلة للتطبيق.

إنَّ تلوُّث البيئة بالـ MPs يُعد من أبرز التحديات البيئية في العصر الحديث، لما له من آثار خفية وطويلة الأمد على البيئة والصحة. ومن خلال هذا الإطار الشامل، تلتزم الشبكة العربيَّة للتَّصدي للملوثات البيئية بدورها في دفع عجلة البحث، والتوعية، والتشريعات، والتعاون الإقليمي والدولي، من أجل الوصول إلى بيئة نظيفة، مستدامة، وآمنة للأجيال القادمة.

الفصل الثاني

الفصل الثاني: الجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs)

يُسلّط الفصل الثاني الضوء على الجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) من حيث المفهوم والتنظيم والمصادر، موضحًا تصاعد القلق العالمي الناتج عن انتشارها في البيئات المائية والبرية وتداعياتها البيئية والصحية. يستعرض الفصل تطور الجهود الدولية والتشريعات التي سعت إلى الحد من التلوث البلاستيكي وتعزيز الإدارة المستدامة للنفايات. كما يبيّن تنوع مصادر الـ MPs بين أولية تُنتَج بحجمها الدقيق مباشرة وثانوية تنتج عن تحلل البلاستيك الكبير، إضافةً إلى دور العوامل البيئية في نقلها بين الأوساط المختلفة. ويخلص الفصل إلى أن معالجة هذه المشكلة تتطلب نهجًا تكامليًا يجمع بين التشريعات، والبحث العلمي، والتعاون الدولي لتحقيق بيئة أكثر استدامة.

2.1 مقدمة عن الجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs)

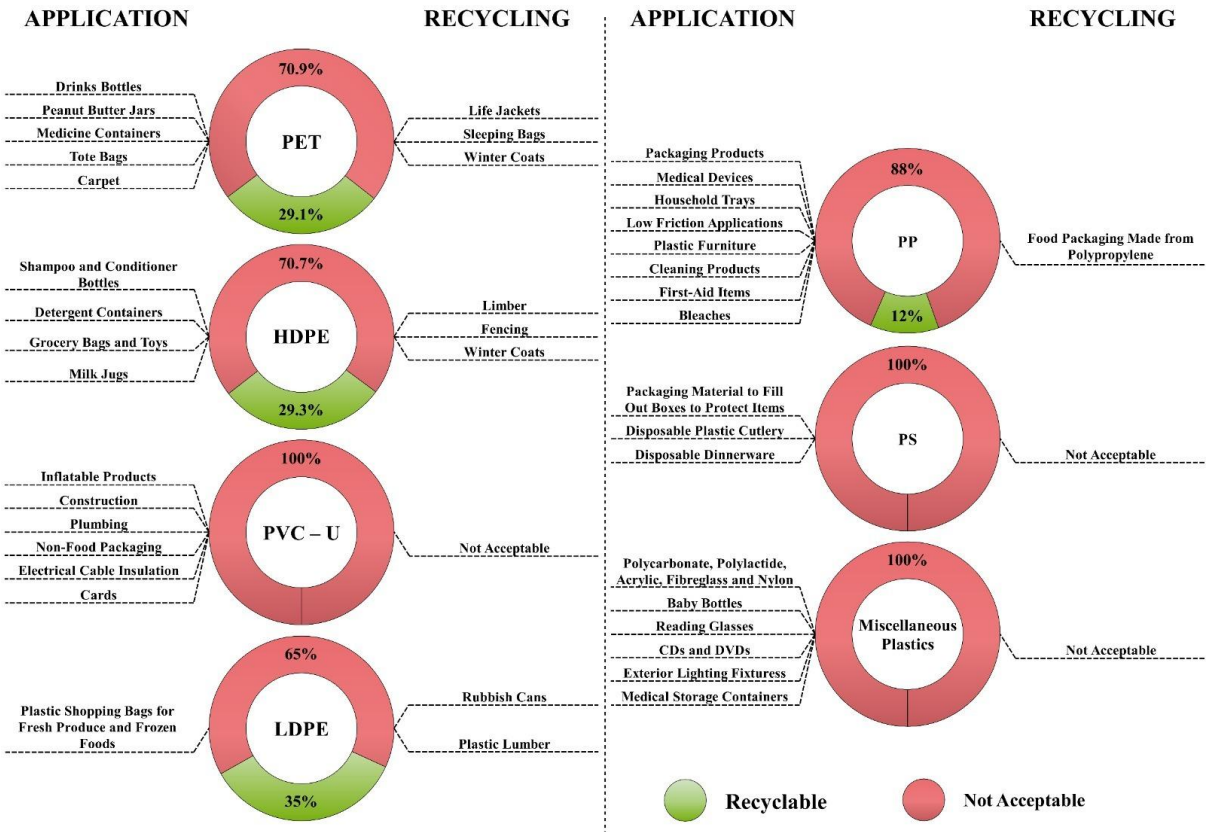
تعود أصول كلمة "بلاستيك" إلى الكلمة اليونانية *Plastikos*، التي تعني "القدرة على التشكل"، في إشارة إلى القابلية الفيزيائية للمادة لتغيير شكلها تحت ظروف معينة[1]. في العقود الأخيرة، تصاعد القلق العالمي بشأن التلوث البلاستيكي، لما له من آثار بيئية وصحية متعددة، خاصة في النظم البيئية المائية والبرية. يُنتج العالم سنويًا نحو 300 مليون طن من المواد البلاستيكية[2]، وقد أظهرت التقديرات أن إجمالي ما تم إنتاجه من البلاستيك حتى عام 2015 بلغ 6.3 مليار طن، لم يُسترجع منها سوى 21% عبر إعادة التدوير أو الحرق[3]. تؤكد هذه الأرقام تنامي أزمة التلوث البلاستيكي على مستوى العالم، لا سيما مع تزايد إطلاق الـ MPs إلى البيئة، والتي تمثل تحديًا خفيًا ومتناميًا.

تشير الدراسات إلى أن التربة تستقبل كميات من الـ MPs تفوق تلك التي تصل إلى المحيطات، بنسبة تتراوح بين أربعة إلى ثلاثة وعشرين ضعف[4]. كما أن ما يقارب 85% من البيئات البحرية تحتوي على ملوثات بلاستيكية، منها ما يصل إلى 90% يُصنف كـ MPs. وبحسب التوقعات، قد تتجاوز كمية النفايات البلاستيكية المتراكمة في الأنظمة المائية الطبيعية 12 مليار طن بحلول عام 2050، ما لم تُتخذ إجراءات جذرية للحد من الإنتاج غير المستدام[5, 6].

ساهمت جائحة كوفيد-19 في تفاقم مشكلة النفايات البلاستيكية، نتيجة الاستخدام المكثف لمواد الحماية الشخصية المصنوعة من البوليمرات الاصطناعية مثل البوليستيرين (Polystyrene, PS) والبولي بروبيلين (Polypropylene, PP) والبولي إيثيلين (Polyethylene, PE)، بما في ذلك الأقنعة الطبية والقفازات والمناديل[7]. يتم الْتخلص من هذه المواد غالبًا عبر مكبات النفايات دون معالجة كافية، مما يفاقم من احتمالية تحللها إلى جسيمات بلاستيكية دقيقة، وبالتالي تسربها إلى عناصر البيئة المختلفة.

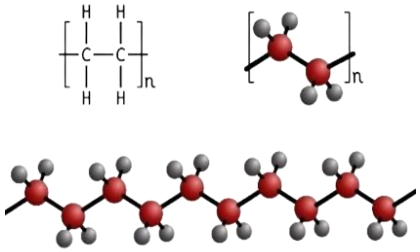
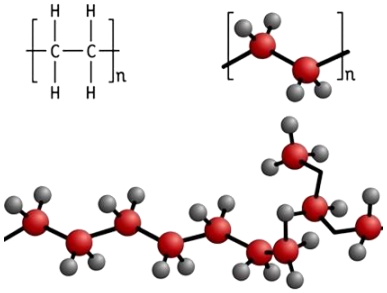
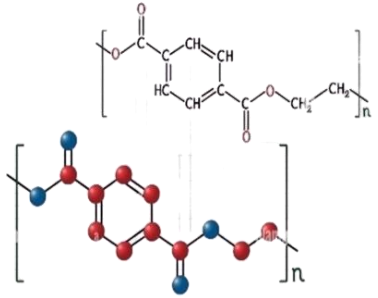
بينت الأدلة العلمية أن تاثير MPs لا تقتصر على التراكم في البيئة فقط، بل تدخل أيضا في السلسلة الغذائية، مما يهدد التنوع البيولوجي وصحة الإنسان على حد سواء. من بين المخاطر المصاحبة لهذه الجسيمات، قدرتها العالية على إمتصاص الملوثات العضوية والمركبات السامة، مثل ثنائي كلورو ثنائي فينيل ثلاثي كلورو الإيثان (DDT)، ثنائي الفينيل متعدد الكلور (PCBs)، والملدنات الصناعية (Plasticizers)، بالإضافة إلى العناصر الثقيلة كالكادميوم والنحاس والتيتانيوم، مما يعزز من سُميّتها البيولوجية[8, 9].

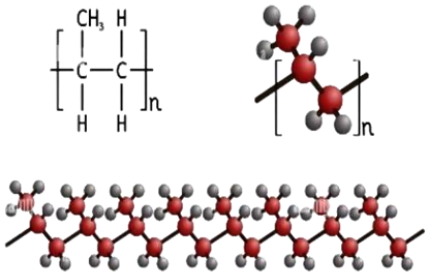
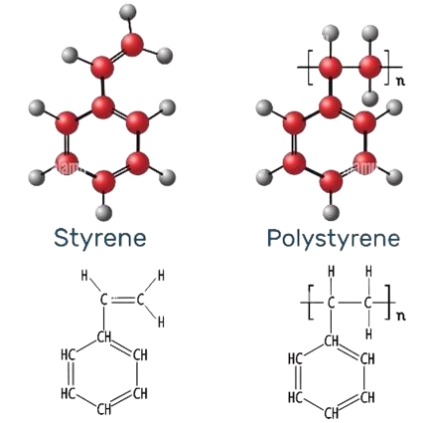
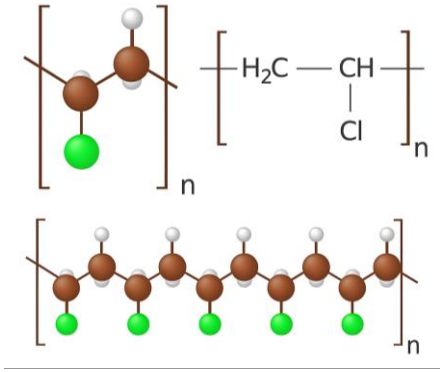
تُنتج معظم هذه الجسيمات من أنواع البلاستيك الأكثر استخدامًا عالميًا، مثل بولي بروبيلين (PP)، البولي إيثيلين منخفض الكثافة (Low-density Polyethylene, LDPE)، بولي ستايرين عالي التأثير (High-impact Polystyrene, HIPS)، وكلوريد البولي فينيل (Polyvinyl Chloride, PVC) .يوضح الشكل 2.1 التطبيقات ونسبة إعادة تدوير أنواع مختلفة من المنتجات البلاستيكية. وتتميّز هذه المواد بخصائص تجعلها شديدة المقاومة للتحلل، منها سلاسل الكربون الطويلة، والوزن الجزيئي المرتفع، ودرجة التبلور العالية، والطبيعة الكارهة للماء. كما تحتوي على مركبات مضافة مثل حمض الهيدروكلوريك، والكحوليات، والمركبات غير المتطايرة التي تُستخدم لتحسين خواصها الفيزيائية والكيميائية ولكنها تضيف في الوقت ذاته بُعدًا سُمّيًا جديدًا عند تسربها إلى البيئة[10].



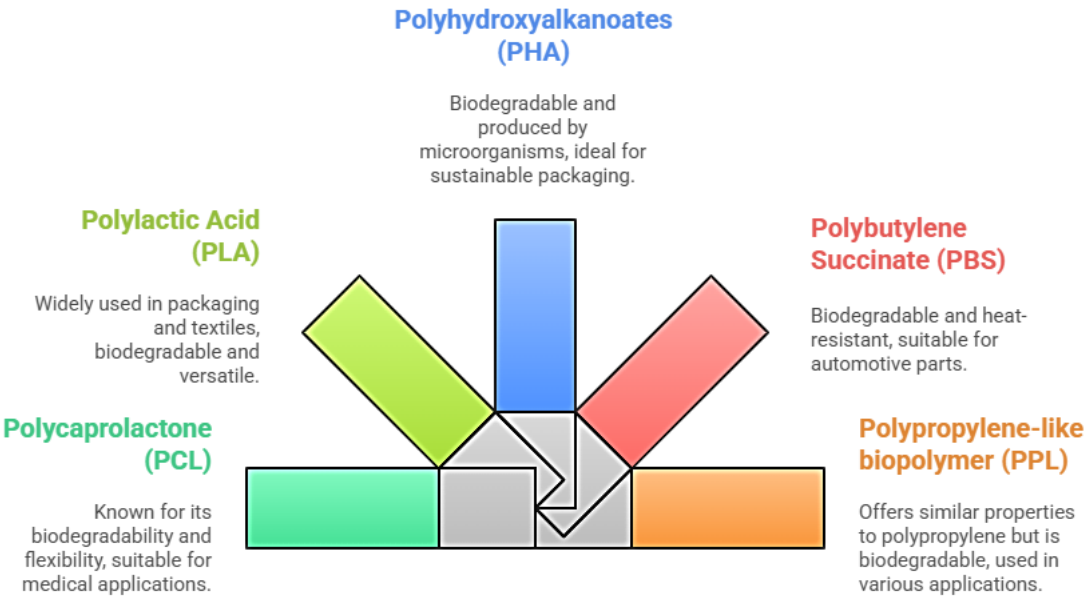
شكل 2.1: تطبيقات ونسبة إعادة تدوير أنواع مختلفة من المنتجات البلاستيكية

جدول 2.1 الخصائص الكيميائية والميكانيكية للبوليمرات البلاستيكية

الاسم	الصيغة الجزيئية والوزن الجزيئي	الاسم النظامي	الخواص الميكانيكية	طول السلسلة البوليمرية
PE (Polyethylene)	$(C_2H_4)_n$, M.Wt = 28.05 g/mol	Polyethene	**متين، مرن، ذو مقاومة جيدة للصدمات، وقوة شد متوسطة**	
LDPE (Low-Density Polyethylene)	$(C_2H_4)_n$, M.Wt = 28.05 g/mol	Polyethene (branched)	**ناعم، مرن، ذو قوة شد منخفضة، وليونة عالية؛ يتميّز بدرجة تبلور منخفضة**	
PET (Polyethylene Terephthalate)	$(C_{10}H_8O_4)_n$, M.Wt = 192.17 g/mol	Poly (oxyethylene-1,4-phenylene dicarbonyl)	**قوي، صلب، ذو قوة شد ممتازة، مقاوم للصدمات، ويتمتع بثبات أبعاد جيد**	

	صلب، خفيف الوزن، مقاومة عالية للإجهاد المتكرر، وقوة صدم جيدة.	Poly (propene)	$(C_3H_6)_n$, M.Wt = 42.08 g/mol	PP (Polypropylene)
	قاسي، هش، شفاف، ومقاومة ضعيفة للصدمات	Poly (1-phenyl-ethene)	$(C_8H_8)_n$, M.Wt = 104.15 g/mol	PS (Polystyrene)
	صلب أو مرن (اعتمادًا على مادة اللدائن المضافة)، ذو قوة شد عالية، مقاوم للهب	Poly (chloroethene)	$(C_2H_3Cl)_n$, M.Wt = 62.50 g/mol	PVC (Polyvinyl Chloride)

إن طبيعة الـ MPs وصعوبة رصدها، وتعدد مصادرها، تجعل منها تحديًا معقدًا يستلزم نهجًا علميًا متعدد التخصصات لفهم آليات تواجدها وتأثيراتها المحتملة ووضع استراتيجيات فعالة للحد منها. ويتطلب ذلك تعزيز البحث العلمي، وتطوير التشريعات البيئية، ورفع مستوى الوعي المجتمعي حول خطورة هذه الجسيمات على الأنظمة البيئية وصحة الإنسان .في السنوات الأخيرة، ازدادت الابحاث التي تناولت المواد البلاستيكية القابلة للتحلل الحيوي، والمعروفة بالبلاستيك الحيوي، نتيجة للضغوط البيئية المتزايدة والقيود المفروضة على استخدام البلاستيك أحادي الاستخدام[11]، تشمل هذه الأنواع من البلاستيك مركبات بولي كابرولاكتون (Polycaprolactone, PCL)، حمض البوللاكتيك أو بولي لاكتيك (Polylactic Acid, PLA)، بولي هيدروكسي ألكانوات (Polyhydroxyalkanoates, PHA)، بولي بيوتيلين سكسينات (Polybutylene Succinate, PBS) (شكل 2.2)، بالإضافة إلى بوليمرات حيوية شبيهة بالبولي بروبيلين مثل بولي بروبيلين لاكتيك (Polypropylene-like biopolymer, PPL). ويتم إنتاجها من مصادر متجددة، أبرزها الكائنات الحية الدقيقة التي تفرز بوليمرات طبيعية. على سبيل المثال، استخدمت كاميلا واخرون[12] زيت الطهي المستعمل كمصدر لإنتاج بولي 3-هيدروكسي بيوتيرات (poly(3-hydroxybutyrate), P(3HB)) من خلال بكتيريا *Cupriavidus necator*، مما أسفر عن إنتاج تراكيز وصلت إلى 14–17 غم/لتر. وعلى الرغم من أن البلاستيك الحيوي يتميز بقابليته العالية للتحلل البيولوجي، حيث تتحلل أكثر من 90% من كميته في فترات زمنية قصيرة، فإن هذا التحلل يؤدي أيضا إلى إطلاق جسيمات بلاستيكية دقيقة في الأوساط البيئية مثل الأنهار والمياه الساحلية والتربة، مما يثير تساؤلات حول أثره البيئي النهائي.

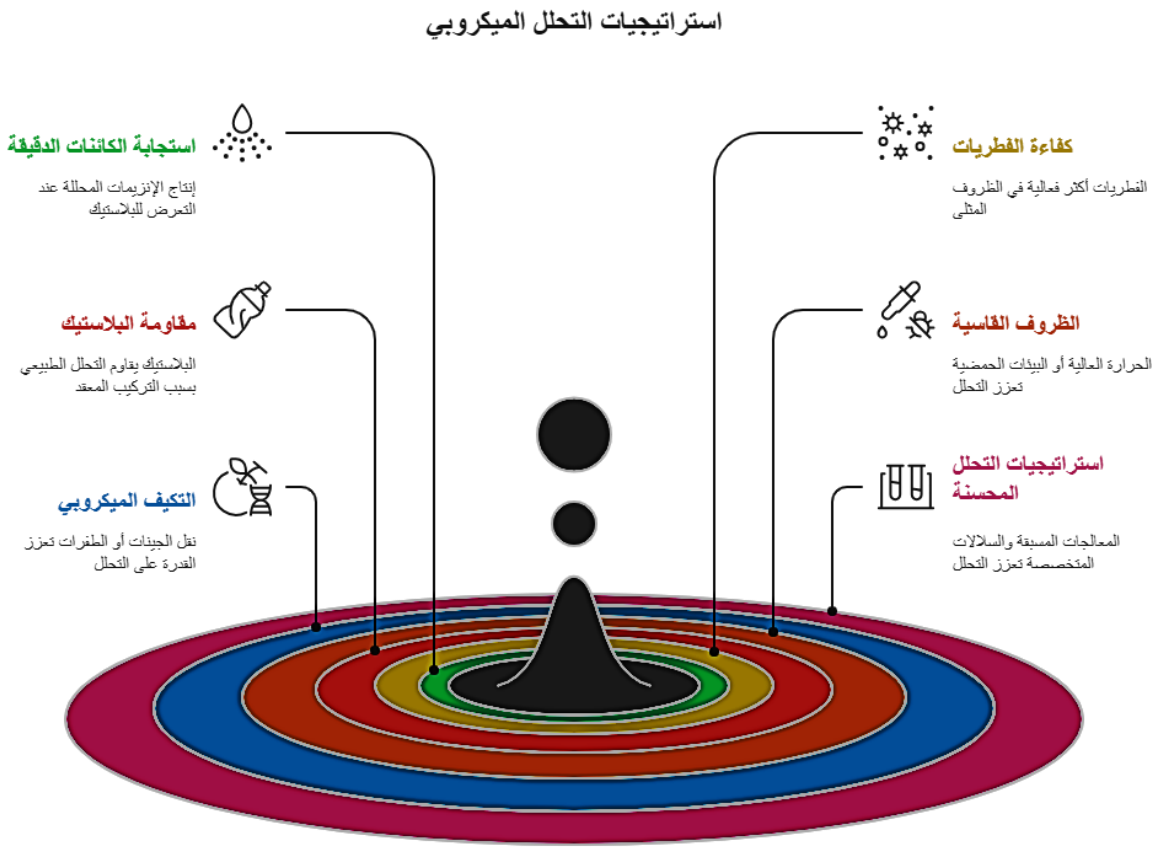


شكل 2.2 أنواع البلاستيك الحيوي والقابل للتحلل والبدائل المستدامة للبلاستيك التقليدي

تبرز مياه الصرف الصحي كمصدر واعد لعزل سلالات ميكروبية قادرة على تحلل المركبات البلاستيكية المعقدة، نظرًا لتنوعها البيولوجي واحتوائها على كائنات تطورت تحت ظروف تلوث عالية[13]. تظهر الكائنات الحية الدقيقة إستجابة

مماثلة للـ MPs في البيئة، ويمكن تعزيز قدراتها التحليلية من خلال تعديل الظروف البيئية لزيادة إنتاج الإنزيمات المحللة. وقد أثبتت الفطريات على وجه الخصوص كفاءة عالية في هذا المجال، عندما تتوفر الشروط المثلى لعملها الحيوي. ومع ذلك، تُظهر الـ MPs مقاومة ملحوظة للتحلل في الظروف الطبيعية، نتيجة لتركيبها الكيميائي المعقد. وفي المقابل، يصبح التحلل الإنزيمي أكثر فاعلية عند تعريض البلاستيك لظروف قاسية، مثل درجات الحرارة العالية أو البيئات الحمضية، مما يحفز تفعيل آليات التحلل الميكروبي[14]. تفسر هذه الظاهرة بآليات الانتقاء الطبيعي، حيث يُجبر التركيز العالي للملوثات في مياه الصرف الكائنات الدقيقة على تطوير استجابات بيولوجية تكيفية، غالبًا ما تكون نتيجة لنقل جينات المقاومة بين السلالات البكتيرية أو نتيجة للطفرات التكيفية[15-19]، ويمكن تعزيز فعالية هذه الكائنات من خلال المعالجات المسبقة مثل التحلل الحمضي أو الحراري، أو عبر الاستعانة بسلالات متخصصة أظهرت قدرات عالية في تحليل البوليمرات الصناعية، ضمن استراتيجيات تعرف باسم "التعزيز الحيوي" [19، 20] (شكل 2.3).

الهدف من هذا التقرير هو تسليط الضوء على مشكلة التلوث البلاستيكي، خاصة التحديات البيئية والصحية المرتبطة بتراكم الـ MPs في البيئات المختلفة، ومناقشة مصادر هذه الجسيمات وأنواع البلاستيك الأكثر استخدامًا وتأثيرها السلبي. بالإضافة إلى مناقشة الإجراءات والتدابير المتبعة دوليًا للحد من تلوث البلاستيك، مع التركيز على التشريعات والسياسات البيئية وأهمية التعاون الدولي في مواجهة هذه الأزمة البيئية المتفاقمة.



شكل 2.3 آليات التحلل الميكروبي للبلاستيك ومصادره واستراتيجيات تعزيزه

2.2 التنظيمات والتشريعات العالمية في إدارة النفايات البلاستيكية الدقيقة (MPs)

يُعتبر التلوث البلاستيكي من أبرز التحديات البيئية التي تواجه البشرية في العصر الحديث، حيث أثرت الـ MPs بشكل سلبي على النظم البيئية البرية والبحرية، مهددة التنوع البيولوجي وصحة الإنسان على حد سواء. مع الارتفاع المستمر في إنتاج البلاستيك واستهلاكه، تصاعدت الضغوط الدولية لتطوير استراتيجيات فعالة للحد من هذه الظاهرة المتفاقمة[21]. بدأ الاهتمام بالبلاستيك في القرن التاسع عشر مع اختراع أول أنواع البلاستيك الاصطناعي، مثل الباكليت عام 1907، والذي كان بداية لحقبة جديدة في تصنيع المواد. خلال منتصف القرن العشرين، شهد العالم طفرة كبيرة في إنتاج البلاستيك، خصوصا بعد الحرب العالمية الثانية، حيث أصبح البلاستيك مادة أساسية في الصناعة والحياة اليومية، نظرًا لرخص تكلفته وسهولة تصنيعه ومتانته. بحلول السبعينيات والثمانينيات، بدأ القلق حول تأثيرات البلاستيك على البيئة يتزايد، خاصة مع اكتشاف مشكلة النفايات البلاستيكية في المحيطات وتأثيرها السلبي على الحياة البحرية. ظهرت أولى المبادرات التنظيمية والتشريعات التي تهدف للحد من التلوث البلاستيكي، ومنها فرض قيود على الأكياس البلاستيكية وبعض المنتجات ذات الاستخدام الواحد في بعض الدول.

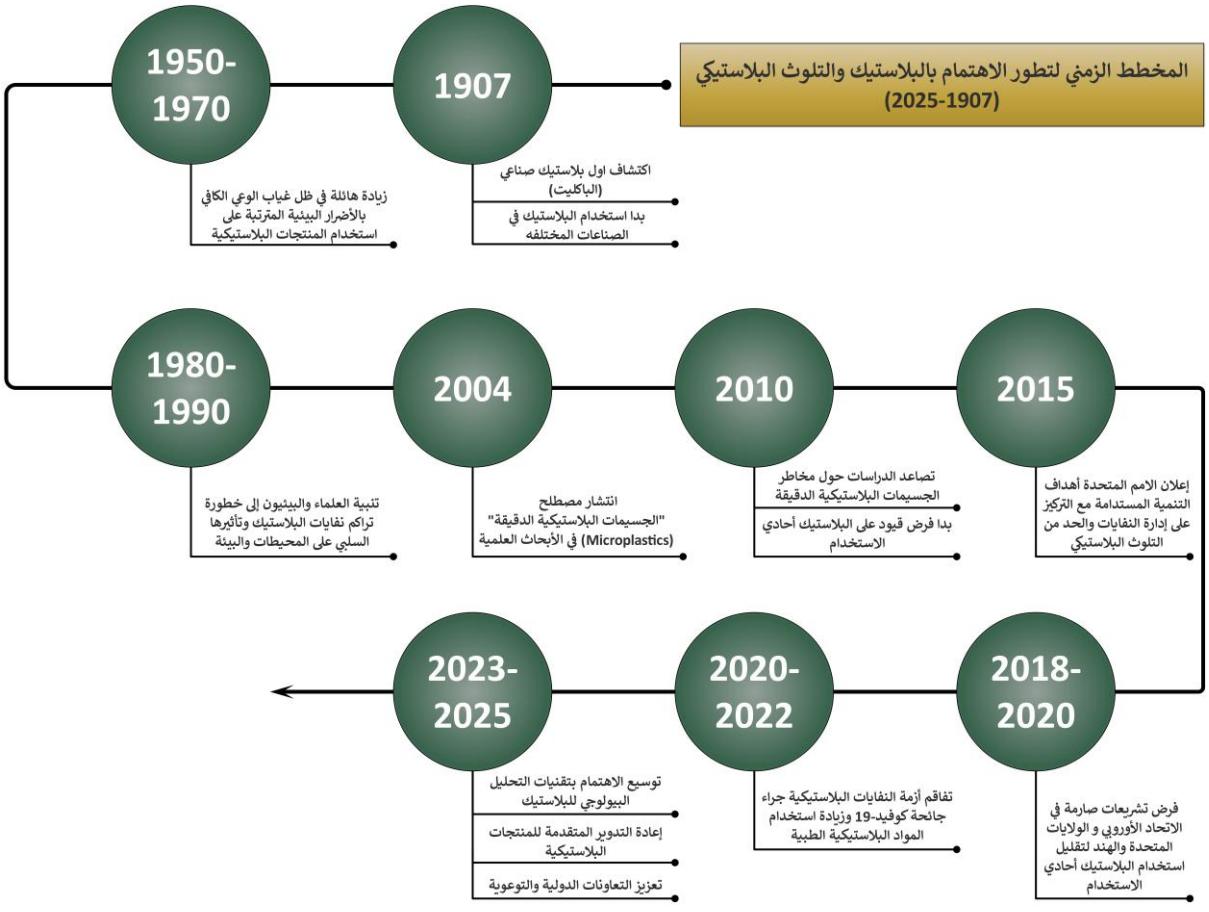
مع دخول الألفية الجديدة، توسعت الدراسات والأبحاث العلمية التي ركزت على مخاطر الـ MPs، التي تظهر من تحلل المواد البلاستيكية في البيئة. ازداد القلق العالمي مع تزايد الأدلة على تراكم هذه الجسيمات في المياه والتربة وتأثيرها المحتمل على صحة الإنسان والنظم البيئية. في هذه الفترة، برزت مبادرات دولية قوية، مثل برامج الأمم المتحدة للبيئة، وحملات التوعية العالمية، وأطلقت قوانين صارمة في عدة دول لتقليل إنتاج البلاستيك أحادي الاستخدام. في العقد الأخير (2015-2025)، تصاعدت الجهود البحثية لتطوير بدائل بيولوجية قابلة للتحلل البيولوجي، مع تركيز على البلاستيك الحيوي (Bioplastics) وتقنيات إعادة التدوير المتقدمة. كما أدت جائحة كوفيد-19 إلى زيادة كبيرة في استهلاك البلاستيك، خاصة في مواد الحماية الشخصية، مما أعاد تسليط الضوء على أهمية إدارة النفايات البلاستيكية بشكل أكثر فاعلية. حتى عام 2025، يشهد العالم حراكًا مكثفًا على المستوى السياسي والعلمي لتطوير حلول مستدامة لمشكلة التلوث البلاستيكي.

في هذا السياق، أقدمت دول كبرى مثل الهند، والولايات المتحدة الأمريكية، والصين على سن تشريعات صارمة للحد من استخدام البلاستيك أحادي الاستخدام، وتحفيز إعادة التدوير، وتطوير بدائل صديقة للبيئة. على سبيل المثال، فرضت هذه الدول قيودًا على استخدام الأكياس البلاستيكية وأدوات المائدة ذات الاستخدام الواحد، مع دعم الصناعات القائمة على البلاستيك القابل للتحلل الحيوي[11]. اما على المستوى الدولي، لعبت المنظمات البيئية دورًا محوريًا في التصدي لمشكلة التلوث البلاستيكي. فقد أطلق برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP) عدة حملات توعوية وبرامج تنظيمية تستهدف تقليل التلوث في البحار والمحيطات، كما أتاح الصندوق العالمي للطبيعة (WWF) دعماً واسع النطاق للأبحاث العلمية التي تهدف إلى تقييم تأثيرات البلاستيك على النظم البيئية البحرية وإيجاد حلول مبتكرة[22].

فيما يتعلق بالإدارة المستدامة للنفايات، طورت الرابطة الدولية للنفايات الصلبة (ISWA) أدلة إرشادية شاملة لمساعدة الحكومات والبلديات على تطوير سياسات فعالة لجمع وفرز النفايات، مع التركيز على تحسين البنية التحتية وإدخال تقنيات متقدمة لإعادة التدوير. دعم بنك التنمية الآسيوي (ADB) هذه الجهود من خلال توفير تمويل تقني ومالي

لتحديث أنظمة إدارة النفايات في العديد من الدول النامية، مما ساعد في تعزيز قدرات هذه الدول على التعامل مع مشكلة النفايات البلاستيكية[23]. ومن جانب آخر، دعت منظمة الصحة العالمية (WHO) إلى إجراء بحوث مستفيضة حول التأثيرات الصحية المحتملة للتعرض المستمر للجسيمات البلاستيكية الدقيقة (Microplastics)، خصوصًا في مصادر المياه والغذاء، مما يسهم في صياغة سياسات صحية وقائية فعالة[22] (الشكل 2.4).

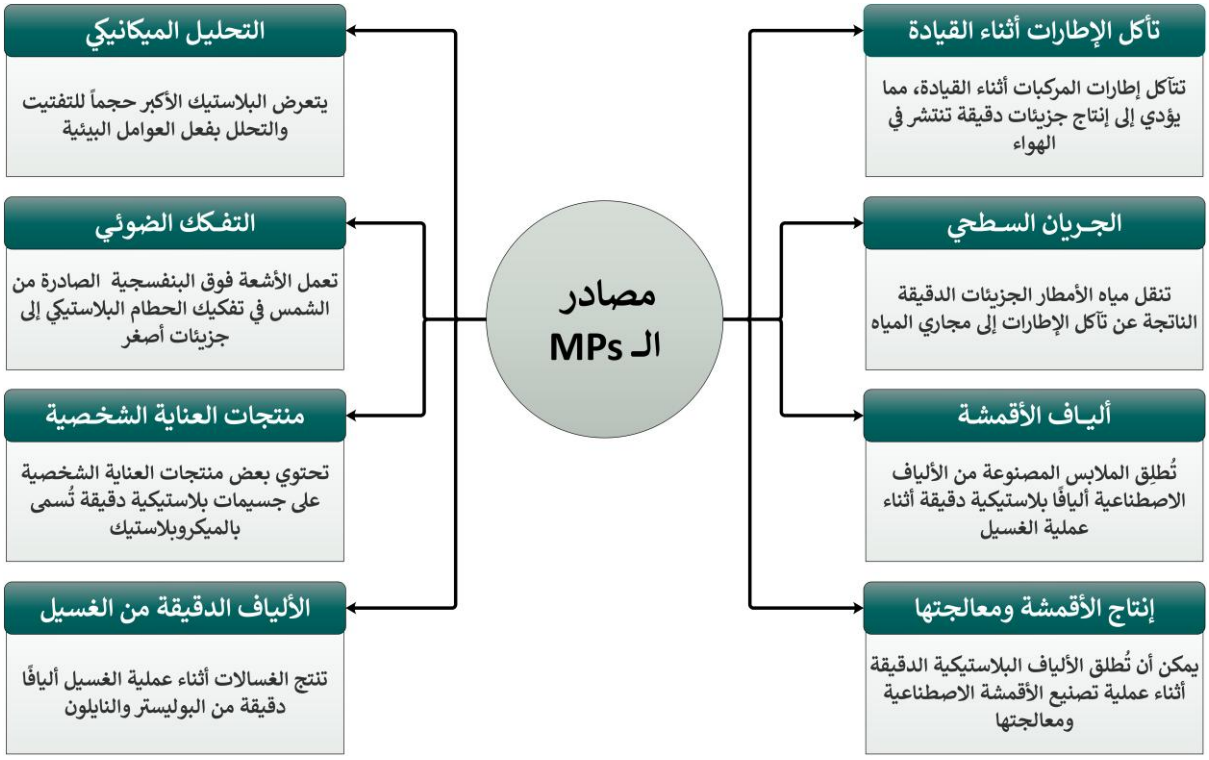
ورغم هذه الجهود المكثفة، تواجه الدول النامية تحديات عميقة في تطبيق التشريعات وتنفيذ برامج الإدارة البيئية. تشمل هذه التحديات ضعف الموارد المالية، ونقص الخبرات الفنية المتخصصة، إلى جانب غياب الوعي المجتمعي اللازم لدعم المبادرات البيئية. يؤدي ذلك إلى تفاقم مشكلة تراكم النفايات البلاستيكية، التي تؤثر سلبًا على صحة السكان والبيئة على حد سواء، مما يستدعي استراتيجيات مخصصة وتدخلات عاجلة[23]. لذا، فإن مواجهة التلوث البلاستيكي تتطلب نهجًا متعدد الأبعاد، يشمل التعاون الدولي لتبادل الخبرات والدعم المالي والتقني، فضلاً عن تعزيز الأبحاث العلمية لتطوير مواد بديلة صديقة للبيئة وتقنيات متطورة لإعادة التدوير والتحلل البيولوجي. كما أن إشراك القطاع الخاص والمجتمع المدني يعد ركيزة أساسية لنجاح هذه المبادرات، من خلال تعزيز التوعية وتبني ممارسات مستدامة في الإنتاج والاستهلاك[11].



شكل 2.4: التسلسل التاريخي للاهتمام بالتلوث البيئي بالـ MPs

2.3 المصادر المختلفة للجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs)

تُعد جسيمات الـ MPs من الملوثات البيئية الناشئة، والتي تعود في نشأتها إلى مجموعة متنوعة من الأنشطة البشرية. تشمل هذه المصادر الأنشطة الزراعية، وعمليات الحرق، وقطاع البناء، فضلًا عن الأنشطة المنزلية والصناعية، وتآكل إطارات المركبات، والنفايات البلاستيكية، والمكبات[24]. تنتشر هذه الجسيمات على نطاق واسع في البيئات المائية والبرية، وكذلك في الغلاف الجوي، ويُعزى ذلك في المقام الأول إلى سوء إدارة النفايات والتخلص غير السليم من المواد البلاستيكية[25] (الشكل 2.5).



شكل 2.5: مصادر التلوث بالـ MPs

تصل جسيمات الـ MPs إلى البيئة عبر مصدرين رئيسيين. مصادر أولية، وهي الجسيمات التي تُنتج مباشرةً بحجمها الدقيق مثل تلك الموجودة في العشب الصناعي، وحمأة الصرف الصحي، ومنتجات العناية الشخصية (PCPs)، وتآكل الإطارات، والحبيبات البلاستيكية، والدهانات، ومياه الغسيل[26، 27]. أما المصادر الثانوية، فتتكوّن نتيجة تحلل المنتجات البلاستيكية الكبيرة مثل القوارير، والأكياس، ومخلفات معدات الصيد، والأغشية الزراعية، بفعل عوامل بيئية متعددة كأشعة الشمس والاحتكاك الميكانيكي[28].

تُساهم العوامل البيئية بدور مهم في نقل الـ MPs بين الأوساط البيئية. فالأمطار والتيارات الهوائية مثلًا تلعب دورًا حيويًا في انتقال هذه الجسيمات من مكبات النفايات إلى النظم البيئية المجاورة. ويُعد الغبار المتراكم على الطرقات

أحد المصادر الأساسية للجسيمات المحمولة جوًا، حيث إن شكلها الديناميكي الهوائي يتيح لها الانتقال لمسافات طويلة قبل أن تترسب[25، 26]. وتُشير الدراسات إلى أن الأنهار تشكل مسارات رئيسية لنقل هذه الجسيمات من البيئات البرية إلى المحيطات، في حين يسهم الدوران الجوي في توزيعها الأفقي والرأسي بين النظم البيئية المختلفة[29، 30].

وتبعًا للظروف البيئية والعوامل الديناميكية الهوائية، يتفاوت تركيز الجسيمات المحمولة جوًا من منطقة إلى أخرى، ويتأثر ذلك بكثافة الأنشطة البشرية، والكثافة السكانية، ومعدلات هطول الأمطار، والرطوبة، ودرجات الحرارة[31]. وقد أفاد تشين وآخرون[32] بأن 80% من الـ MPs التي وُجدت في عينات مياه الأمطار كان حجمها أقل من 25 ميكرومتر، مشيرين إلى أن هطول الأمطار يسهم في إزالة هذه الجسيمات من الهواء، إلا أنه في الوقت ذاته يؤدي إلى ترسيبها في التربة الحضرية والمسطحات المائية، مما يزيد من الأعباء البيئية والمخاطر الصحية[32].

تُعد محطات معالجة مياه الصرف الصحي (STPs) من البيئات التي تشهد تجميعًا كبيرًا للـ MPs، خصوصًا الناتجة عن المنتجات الاستهلاكية والمنسوجات الصناعية. ويؤدي ضعف آليات فرز النفايات إلى تسرب هذه الجسيمات إلى محطات المعالجة، حيث تتراكم غالبًا في الحمأة الناتجة، والتي تُستخدم لاحقًا كأسمدة زراعية، ما يساهم في نقل التلوث إلى البيئات البرية[33، 34]. وقد أشار فورست وآخرون[35] إلى أن غسيل كيلوجرام واحد من القماش قد يُطلق حوالي 13 مليون ليفة بلاستيكية دقيقة، يتم احتجاز ما بين 72% إلى 99% منها داخل الحمأة المتبقية، حيث يمكن أن تتجاوز تراكيزها 56,000 جسيم دقيق لكل كيلوجرام[35].

كما تُعد العمليات الصناعية وورش العمل الصغيرة من العوامل المساهمة في إطلاق الـ MPs والـ NPs إلى البيئة، وذلك نتيجة عدم خضوع نفاياتها لأي معالجة أو رقابة بيئية فعالة[36، 37]. وقد لوحظ أن هذه الجسيمات تنتشر بشكل واسع في النُظم البيئية المختلفة، بما في ذلك المياه العذبة والبحار والمحيطات[21].

وتكمن خطورة الـ MPs في كونها غير قابلة للتحلل البيولوجي، ما يجعلها باقية في البيئة لفترات زمنية طويلة، وتشكل تهديدًا متعدد الأبعاد. فهي تُهدد الصحة البشرية من خلال دخولها إلى السلسلة الغذائية والمياه التي يستهلكها الإنسان، كما تُؤثر سلبًا على الاقتصاد العالمي من خلال الإضرار بالزراعة، ومصايد الأسماك، والسياحة. بالإضافة إلى ذلك، تسهم في تشويه المنظر الطبيعي وتدهور جماليات البيئة بسبب انتشارها الواسع في النظم البيئية المختلفة[38].

الفصل الثالث

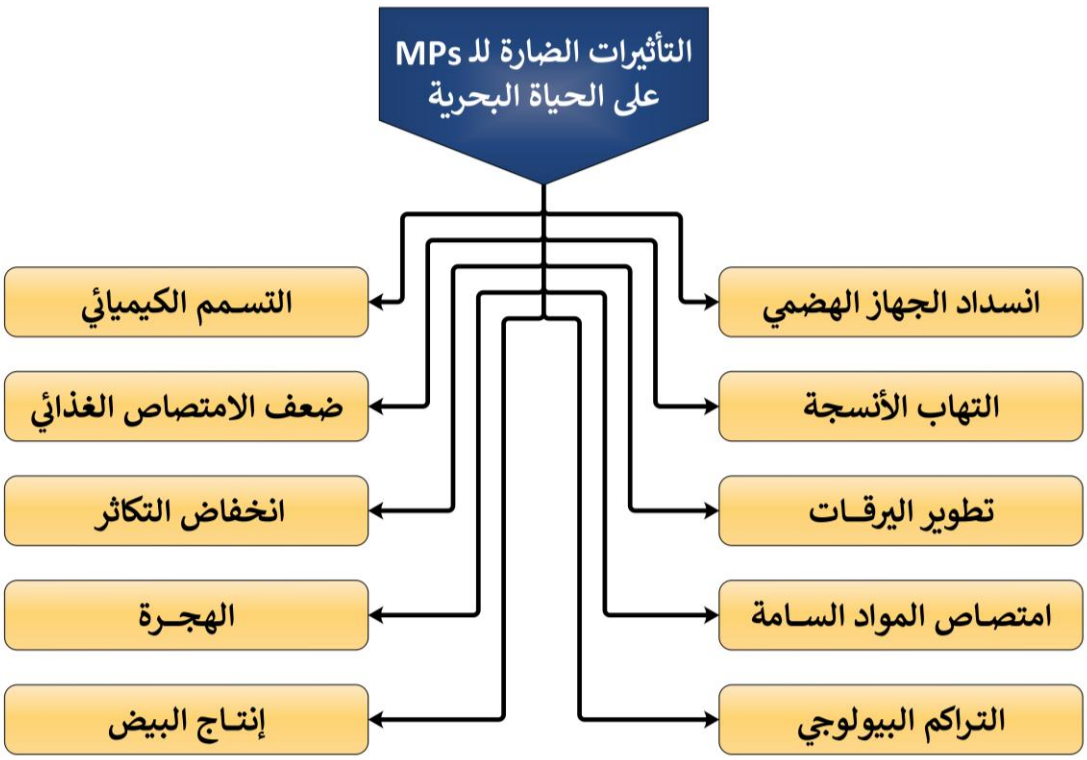
الفصل الثالث: التأثيرات البيئية والعصبية للجسيمات البلاستيكية الدقيقة والنانوية (MPs & NPs)

يتناول الفصل الثالث التأثيرات الضارة للجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) والنانوية (NPs) على الكائنات الحية والإنسان من خلال ثمانية أقسام مترابطة. يبدأ بعرض الأضرار البيئية على الحياة البحرية، ثم يناقش المخاطر الصحية الناتجة عن التعرض لها في الماء والغذاء والهواء. يتناول الفصل التأثيرات السمية العصبية وآلياتها الميكانيكية مثل الالتهاب والإجهاد التأكسدي، إضافةً إلى الاضطرابات الجينية والعصبية الناتجة عنها. كما يوضح تطور السمية العصبية في أدمغة الحيوانات وأدلة تراكمها في أدمغة البشر، وينتهي بتأثير التعرض المبكر لها على النمو العصبي لدى الأطفال.

3.1 التأثيرات الضارة للـ MPs على الحياة البحرية

تشكل الـ MPs تهديدًا بالغًا على الحياة البحرية في الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، وذلك نظرًا لقدرتها على التراكم ضمن قنوات السلسلة الغذائية البحرية. فالابتلاع المتكرر لهذه الجسيمات ليس محصورًا على الكائنات الدقيقة فحسب، بل يشمل الأسماك، الطيور البحرية، والثدييات، مما يهدد التنوع البيولوجي والصحة الإيكولوجية (شكل 3.1).

في الأنظمة البيئية الأرضية، تؤثر الـ MPs سلبًا على خصوبة التربة. وفقًا لـ بوست وآخرون[39]، فإن البولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE) كان له تأثير سلبي على كتلة ديدان الأرض الحيوية .في دراستهم، تم التحقيق في تأثير البولي لاكتيك (PLA) وHDPE في تربة تحتوي على نبات عشب الجاودار المعمر (*Perennial ryegrass*) ونوع من ديدان الأرض (*Aporrectodea rosea*). أظهرت النتائج انخفاض معدل إنبات البذور في وجود PLA، بينما انخفضت الكتلة الحيوية لديدان الأرض في وجود HDPE، ويرجح ذلك إلى تغيرات في درجة حموضة التربة (pH) واضطرابات في استقرارها. قام زيو وآخرون[40] بدراسة تأثير الـ MPs على النمو، والتكاثر، والميكروبيوم المعوي، والدورة الأيضية للنظائر في الكائن الحي *Folsomia candida*، الذي تعرض للـ MPs في التربة لمدة 8 أسابيع .كشفت الدراسة أن المجتمع الميكروبي المعوي في الكائن الحي كان مختلفًا تمامًا عن نظيره في التربة غير الملوثة، كما أن الـ MPs أثرت سلبًا على النمو والتكاثر بنسبة تجاوزت 16.8%[40].



شكل 3.1: التاثيرات الضارة للـ MPsعلى الحياة البحرية والبرية

أظهرت الدراسات أن الـ MPs قد تتسبب في انسداد القناة الهضمية للحيوانات البحرية، مما يؤدي إلى انخفاض امتصاص الغذاء، ضعف النمو، وفي بعض الحالات قد يصل إلى الوفاة[41]. إضافة إلى ذلك، فإن تراكم الـ MPs داخل الأنسجة المعوية يؤدي إلى حدوث التهابات مزمنة، ما يضعف وظائف الجهاز الهضمي ويؤثر سلبًا على الصحة العامة للأحياء المتأثرة.

من ناحية أخرى، تعمل الجسيمات الدقيقة كحامل للمركبات السامة مثل الملوثات العضوية الثابتة (POPs) والمعادن الثقيلة، والتي يمكن أن تنصهر داخل الكائنات الحية عند ابتلاعها، مما يؤدي إلى تلوث داخلي شديد وسُميّة. تنتقل هذه السموم بعد ذلك بشكل تراكم حيوي عبر السلسلة الغذائية، ما يمثل مخاطرة كبيرة عند استهلاك الإنسان للحياة البحرية الملوثة .على المستوى السلوكي والفسيولوجي، كشفت الدراسات أن التعرض لـ MPs يغير أنماط تغذية الأسماك، مما يؤدي إلى خفض معدلات استهلاك الغذاء أو تغيير نوعيته. في بعض الأنواع، تداخلت الجسيمات مع العمليات التناسلية، حيث قللت من معدلات التزاوج وأعداد البيض، وأثرت سلبًا على الخصوبة .كما أظهرت بعض الأبحاث أن التعرض للـ MPs يرتبط بارتفاع مستويات الالتهاب والضغط التأكسدي داخل أنسجة الكائنات المستهدفة، مما يعيق وظائفها الحيوية. كما لوحظ أن الجسيمات الدقيقة قد تعيق تطور اليرقات، مما يؤثر على النمو الطبيعي ويقلل من فرص بقائها في البيئة، وهو ما من شأنه أن يضعف التجدد السكاني لكثير من الأنواع البحرية الحساسة[19، 42]. ومن ناحية أخرى، أثرت هذه الجسيمات على أنماط هجرة بعض الأسماك، محدثة تغيرات في توزيعها الموسمي والجغرافي، الأمر الذي قد يغير ديناميكيات النظم البيئية المحلية.

أبلغت بعض الأبحاث عن حالات مرضية جديدة مثل *Plasticosis* لدى الطيور البحرية، حيث تسبب تراكم الجسيمات الدقيقة في حدوث ندبات والتهاب مزمن في الأنسجة، وهو دليل إضافي على الأثر المادي والبيوكيميائي لهذه الملوثات على الحياة البحرية[43].

3.2 المخاطر الصحية المرتبطة بالـ MPs في البيئة

تشكل MPs خطرًا بيئيًا وصحيًا متزايدًا نتيجة لخصائص سطحها الفريدة، والتي تمنحها القدرة على امتصاص أيونات المعادن الثقيلة والجسيمات النانوية من البيئات الملوثة، مما يسهم في انتقال هذه الملوثات عبر السلسلة الغذائية ومياه الشرب إلى الإنسان[44]، وقد وُثق تأثير وجود هذه الجسيمات في البيئات المائية على قطاعات حيوية مثل الاسترزاع المائي والتنوع البيولوجي، حيث تبين أنها تقلل من قدرة الكائنات البحرية على امتصاص العناصر الغذائية وتؤثر على توازنها الهرموني[45]. إضافة إلى ذلك، فإن انتشار الـ MPs على سطح المياه يحد من اختراق أشعة الشمس، مما يُضعف عملية البناء الضوئي للطحالب الدقيقة نتيجة انخفاض شدة الضوء[46] (شكل 3.2).

تمتاز هذه الجسيمات بسمّية غير انتقائية، حيث تؤثر على الكائنات الحية غير المستهدفة، مسببة تغيرات في معدلات النمو، واضطرابات في التكاثر، بالإضافة إلى التأثير في التوازن الخلوي للعناصر[40]. وفي السياق نفسه، يُعد تناول المأكولات البحرية أحد المسارات الرئيسية لانتقال الـ MPs إلى الإنسان. إذ يمكن أن تسد هذه الجسيمات الجهاز الهضمي للكائنات البحرية، وتُعد وسيلة فعالة لنقل الملوثات العضوية الدقيقة إلى الأنسجة الحيوانية[47]. كما يمكن أن ترتبط الـ

MPs بمجموعة من الملوثات الكيميائية الخطرة، مثل الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات (PAHs)، والمبيدات الكلورية العضوية، وPCBs، إلى جانب المعادن الثقيلة، وهو ما يزيد من خطر انتقال هذه المواد إلى المستهلك البشري مسببة تأثيرات صحية مزمنة[7، 48].

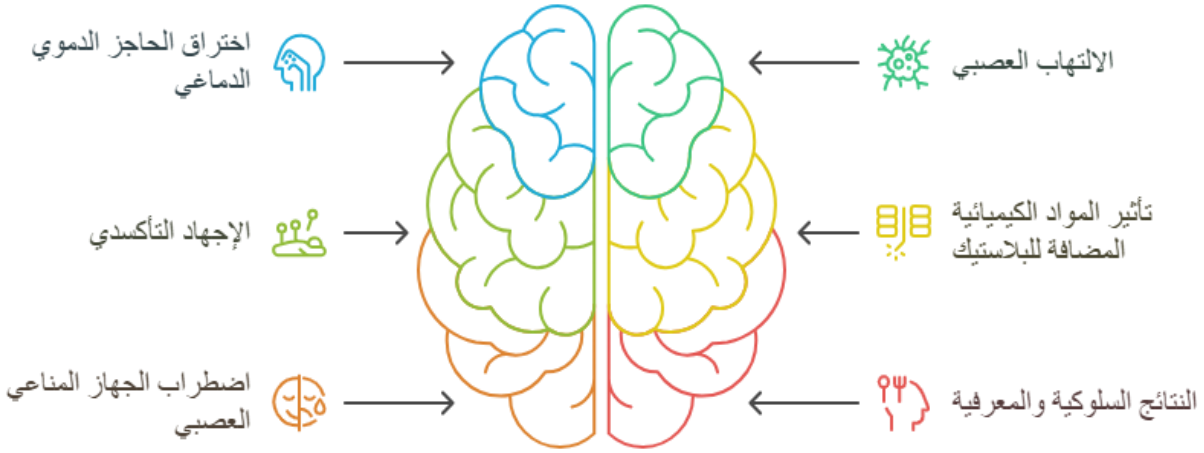
في دراسة أجراها كوي وآخرون[49] على الكائن المائي *Daphnia galeata*، تم تعريضه لجسيمات نانوية من البولي ستايرين (PS-NP) بتركيز 5 ملغم/لتر لمدة خمسة أيام، وأظهرت النتائج تراكمًا واضحًا للجسيمات داخل الأعضاء الداخلية للكائن، مما أدى إلى زيادة تخزين الدهون، وهي علامة على اضطرابات أيضية، إلى جانب انخفاض ملحوظ في معدل الفقس[49].

ومن أبرز الأخطار الصحية الإضافية المرتبطة بالـ MPs قدرتها على العمل كمركبات ناقلة لمسببات الأمراض. فبفضل مقاومتها للانهيار الفيزيائي والكيميائي، وقدرتها على الطفو، تُسهم هذه الجسيمات في نقل مسببات الأمراض لمسافات طويلة داخل البيئات المائية والهوائية. ويمكن لتلك الكائنات الدقيقة الانتقال لاحقًا عبر السلسلة الغذائية، مما يجعلها عرضة للاستنشاق أو الابتلاع من قبل الكائنات المختلفة[50].كما أشارت دراسات متعددة إلى أن البكتيريا المرتبطة بهذه الجسيمات قد تحمل جينات مقاومة للمضادات الحيوية (ARGs)، حيث تم التبليغ عن وجود هذه الجينات في المجتمعات الميكروبية المستوطنة للجسيمات البلاستيكية الدقيقة[51، 52، 53].

شكل 3.2: التاثيرات الصحية لـ MPs على الكائنات الحية بما فيها الانسان

3.3 التأثيرات السمية العصبية للميكروبلاستيك والنانو بلاستيك (MPs & NPs)

تُشير الأدلة العلمية المتزايدة إلى أن MPs وNPs تؤثر سلبًا على الجهاز العصبي، خصوصًا خلال الفترات الحرجة من النمو العصبي مثل المراحل الجنينية وسنوات الطفولة المبكرة. ويُعزى هذا التأثير إلى قدرة هذه الجزيئات على اختراق الحاجز الدموي الدماغي (Blood-Brain Barrier, BBB)، الذي يُعد حاجزًا فسيولوجيًا بالغ الأهمية لحماية الدماغ من الجزيئات السامة أو الغريبة. أظهرت الدراسات أن الـ MPs تستطيع التراكم داخل أنسجة الجهاز العصبي المركزي (او ما يسمى بال Central Nervous System, CNS)، مما يثير سلسلة من التفاعلات الحيوية الضارة (شكل 3.3).



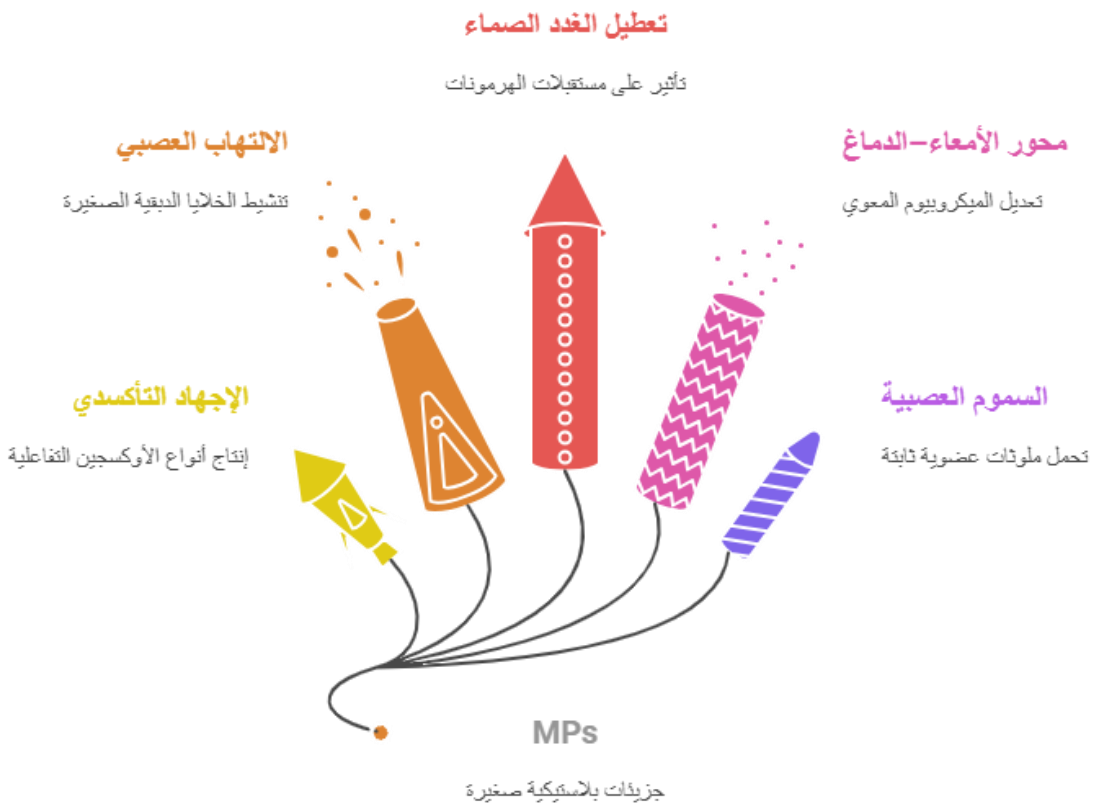
شكل 3.3: تأثير الجسيمات البلاستيكية الدقيقة والنانوية على الجهاز العصبي وآليات الضرر المحتملة

من أبرز هذه التأثيرات هو الالتهاب العصبي (Neuroinflammation)، حيث يؤدي وجود الجزيئات الغريبة إلى تنشيط الخلايا الدبقية (Glial Cells)، مما ينتج عنه إطلاق مفرط للسيتوكينات الالتهابية (Inflammatory Cytokines) التي تؤثر في بيئة الدماغ وتُضعف نمو الخلايا العصبية. كما يُعد الإجهاد التأكسدي (Oxidative Stress) آلية رئيسة أخرى، حيث يرتبط التعرّض لـ MPs بزيادة مستويات أنواع الأوكسجين التفاعلية (Reactive Oxygen Species, ROS) داخل الخلايا العصبية، ما يؤدي إلى تلف في البروتينات، والدهون الغشائية، وحتى الحمض النووي. إضافة إلى ذلك، فإن بعض المكونات الكيميائية التي تضاف عند تصنيع المواد البلاستيكية مثل البيسفينول أ (Bisphenol A, BPA) والفثالات (Phthalates)، تعمل كعوامل مخلة او معطله لوظائف الغدد الصماء مما يؤدي إلى تعطيل النظام الهرموني الذي ينظّم عمليات النمو العصبي، وهو ما يمكن أن يُحدث تغيرات في تكوين المشابك العصبية (*Synaptic Plasticity*) وتطوّر الدوائر العصبية (Neural Circuit Development). كما ترتبط هذه الجزيئات بتفعيل غير طبيعي للجهاز المناعي العصبي، حيث تشير الدراسات إلى أن التعرّض لـ MPs قد يؤدي إلى اضطرابات مزمنة في الاستجابة المناعية، وهو ما يُعرف بالتأثيرات المناعية العصبية، والتي قد تفضي إلى ضعف في الاتصالات العصبية ووظائف الدماغ. كما تشير نتائج الدراسات التي اجريت على الحيوانات إلى ظهور اضطرابات في السلوك، والتعلم، والذاكرة

بعد التعرّض المزمن للـ MPs، مثل زيادة مستويات القلق وتراجع الأداء المعرفي. ورغم أهمية هذه النتائج، إلا أن الأدلة البشرية لا تزال محدودة، ما يُبرز الحاجة إلى دراسات وبائية وسريرية طولية لفهم العلاقة بين التعرّض البيئي للميكروبلاستيك وظهور اضطرابات النمو العصبي (*Neurodevelopmental Disorders, NDDs*) لدى الأطفال.

3.4 الآليات الميكانيكية للتأثيرات العصبية الناتجة عن التعرض للـ MPs

يحدث التعرّض البشري للـ MPs من خلال عدة مسارات، تشمل تناول الأطعمة أو المياه الملوّثة، خاصة المياه المعبأة، واستنشاق جسيمات الـ MPs المحمولة جوًا، أو الاتصال الجلدي المباشر. وقد أظهرت الأدلة أن الـ MPs التي يقل قطرها عن 150 ميكرومتر (µm) تمتلك القدرة على عبور الحواجز الحيوية مثل الحاجز المعوي، والحاجز الدموي–الدماغي، وكذلك الحاجز المشيمي. تشير دراسات حديثة إلى إمكانية تراكم هذه الجزيئات في حليب الأم، مع تزايد الأدلة على انتشارها في أنسجة متعددة من الجسم البشري، بما في ذلك القلب، والرئتين، والكبد، والكلى، والجهاز الهضمي، والجهاز العصبي [54، 55]. وقد أظهرت دراسة أجراها فابيانو وآخرون[56] أن الـ MPs المتراكم في أنسجة الدماغ كان صغير الحجم للغاية (أقل من 200 نانومتر)، ويتكوّن في الغالب من البولي إيثيلين (PE) كما كانت مستويات هذه الجسيمات في أنسجة الدماغ أعلى 7 إلى 30 مرة من مستوياتها في أعضاء أخرى مثل الكلى أو الكبد، مما يشير إلى ميل واضح للتراكم العصبي (*Neuroaccumulation*) (شكل 3.4).



شكل 3.4: الآليات الميكانيكية لتأثير الجسيمات البلاستيكية الدقيقة والنانوية على الجهاز العصبي والمسارات البيولوجية

تُعد قدرة الـ MPs على تحفيز الإجهاد التأكسدي في أنسجة الدماغ مصدر قلق بالغ، نظرًا لارتباط هذا الإجهاد بعدد من اضطرابات النمو العصبي، مثل اضطراب طيف التوحد (*Autism Spectrum Disorder, ASD*) واضطراب فرط الحركة وتشتت الانتباه (*Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder, ADHD*). يُحدث الـ MPs هذا التأثير من خلال إنتاج الأوكسجين التفاعلي، مما يؤدي إلى خلل في وظائف الميتوكوندريا (*Mitochondrial Function*) داخل الخلايا العصبية. هذا الخلل يُسهم بدوره في تعطيل التوازن الخلوي، وتلف المكونات الحيوية مثل البروتينات والحمض النووي .علاوة على ذلك، تؤدي هذه الجزيئات إلى استنزاف دفاعات الجسم الطبيعية المضادة للأكسدة (*Antioxidant Defense Systems*)، ما يُضعف قدرة الدماغ على مقاومة التوتر التأكسدي المزمن، مما يعزز الفرضية القائلة بأن الإجهاد التأكسدي الناتج عن الـ MPs يشكل مسارًا محوريًا في تطوّر الاضطرابات العصبية التنموية[54، 57].

في سياق الآليات المعقدة التي تبين الدور السام للـ MPs في التأثير على الجهاز العصبي، يُشكل الالتهاب العصبي محورًا حيويًا يترابط بشكل وثيق مع الإجهاد التأكسدي والاختلال الميتوكوندري، كما تُظهر الأدلة أن الـ MPs، بعد تراكمها داخل أنسجة الدماغ، تُفعِل الخلايا الدبقية الصغيرة (*Microglia*)، وهي الخلايا المناعية المقيمة في الجهاز العصبي المركزي. هذا التنشيط المناعي يؤدي إلى إنتاج سيتوكينات التهابية محفزة (*Pro-inflammatory Cytokines*) مثل إنترلوكين-1 بيتا (*Interleukin-1 beta - IL-1β*)، عامل نخر الورم-ألفا (*Tumor Necrosis Factor-alpha, TNF-α*)، وإنترلوكين-6 (*Interleukin-6, IL-6*)، وإنترلوكين-8 (*Interleukin-8, IL-8*)، والتي تُسهم في تعطيل النقل المشبكي (*Synaptic Transmission*) وتعزيز الالتهاب العصبي المزمن (*Chronic Neuroinflammation*). يتداخل هذا المسار الالتهابي مع مسارات أخرى مثل زيادة أنواع الأوكسجين التفاعلية (ROS)، وانخفاض قدرة مضادات الأكسدة الطبيعية، مما يُفاقم من الضرر العصبي. وقد أظهرت الدراسات أن هذا الضرر لا يقتصر على البنية الخلوية فقط، بل يشمل كذلك انخفاضًا في حيوية الخلايا العصبية (*Cell Viability*)، وتغيرات في أيض الطاقة العصبي (*Neuronal Energy Metabolism*). وقد أبرزت الأبحاث دور مسار الإنفلامازوم (*NLRP3 Inflammasome Pathway*)NLRP3 كآلية مركزية تربط بين الـ MPs والاستجابة الالتهابية العصبية[57] وتُعزّز هذه النتائج ما ورد في دراسات سابقة، منها ما قدّمه الشامي وآخرون[58]، حيث أظهروا أن التعرّض المبكر لمادة البيسفينول (BPA)، وهي إحدى مكونات البلاستيك الشائعة، يؤدي إلى سلوكيات شبيهة بالقلق (*Anxiety-like Behaviors*) وتراجع معرفي (*Cognitive Deficits*) في فئران التجارب، كنتيجة مباشرة لآليات تشمل الالتهاب العصبي والموت الالتهابي الخلوي (Pyroptosis).

يلعب MPs وNPs دورًا إضافيًا في تعزيز السُمية العصبية من خلال عملهم كالناقلات لمُعطلات الغدد الصماء (*Endocrine Disrupting Chemicals, EDCs*)، مثل البيسفينول (*Bisphenol*) والفثالات. تتميز هذه المواد بوجود تشابه بنيوي مع الهرمونات الستيرويدية (*Steroid Hormones*)، ما يسمح لها بالتفاعل مع مستقبلات هرمونية في الجسم، بما في ذلك مستقبلات الأندروجين (*Androgen Receptors*)، مستقبلات الإستروجين (*Estrogen Receptors*)، مستقبلات هرمون الغدة الدرقية (*Thyroid Hormone Receptors*). تؤثر هذه المواد على النتائج العصبية النمائية (*Neurodevelopmental Outcomes*) من خلال اختلال تنظيم الجينات

(*Gene Dysregulation*)، بالإضافة إلى تعديلات فوق جينية (*Epigenetic Modifications*) تشمل مثيلة الحمض النووي (*DNA Methylation*) تعديلات على الهستونات (*Histone Modifications*)، وتغيّرات في أنماط المايكرو RNA(*microRNA Profiles*). وتُعد هذه التغيرات دائمة وقابلة للوراثة، مما يجعل آثارها على تنظيم الجينات طويلة الأمد. وقد أظهرت أبحاث تجريبية سابقة أن التعرّض لمُعطّلات الغدد الصماء خلال المراحل السابقة للولادة وما بعد الولادة المبكرة قد يزيد من خطر الإصابة باضطراب طيف التوحد[59].

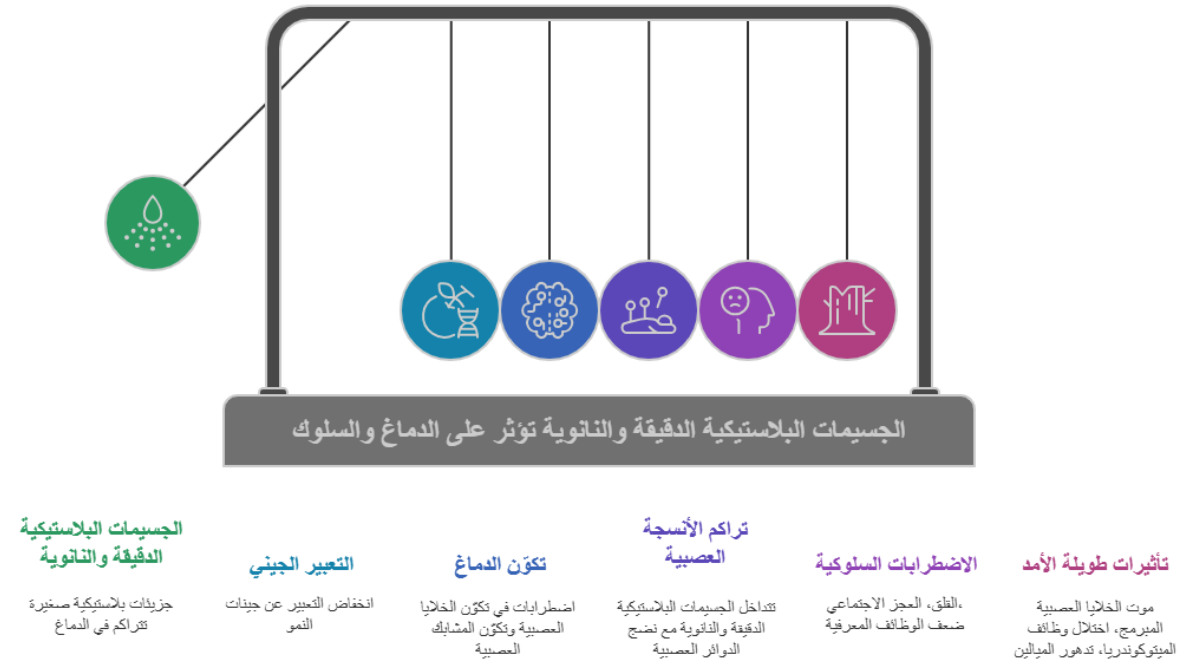
من الجانب الآخر تؤثر جسيمات الـ NPs بشكل مباشر على محور الأمعاء–الدماغ (Gut–Brain Axis) من خلال تعديل تركيب الميكروبيوم المعوي (Gut Microbiota)، مما يُسبب التهابًا مزمنًا (Chronic Inflammation)، ويُحدث اضطرابًا في عملية التمثيل الغذائي المعوي (Gut Metabolism)، عبر التسبب في إنتاج غير منتظم للطاقة واختلال التعبير الجيني المحلي[54] ويُعتقد أن اختلال هذا الاتصال الحيوي بين الأمعاء والدماغ يرتبط بظهور بعض اضطرابات النمو العصبي، كما أشار جوش وجورين[60]، حيث يمكن أن يؤثر اضطراب الميكروبيوم سلبًا على تطور الدوائر العصبية وتنظيم السلوك المعرفي والعاطفي.

و إلى جانب كونه ناقلًا لمُعطّلات الغدد الصماء، تعمل الـ MPs "كحصان طروادة" في حمل ونقل العديد من السموم العصبية البيئية (*Environmental Neurotoxins*) والتي تشمل الملوّثات العضوية الثابتة (*Persistent Organic Pollutants*)، المعادن الثقيلة (*Heavy Metals*) مثل الزئبق (*Mercury*)، الرصاص (*Lead*)، الكادميوم (*Cadmium*) الزرنيخ (*Arsenic*)، والألمنيوم (*Aluminium*)، بالإضافة الى المُضافات البلاستيكية مثل الفثالات، البيسفينول، ومثبطات اللهب (*Flame Retardants*) تلتصق هذه المواد بسهولة على سطح الـ MPs، الذي يعمل كوسيط ناقل يسمح لها بعبور الحاجز الدموي الدماغي، لتُحرر داخل نسيج الدماغ بتركيزات عالية موضعية. هذا النمط من التوصيل يتجاوز آليات إزالة السُموم الطبيعية في الجسم، مما يزيد من شدة التأثيرات السُمية العصبية [57].

3.5 الاضطراب الجيني والعصبي عند التعرّض للـ MPs

يؤدي التعرّض لجزيئات البولي ستايرين إلى انخفاض كبير في التعبير عن الجينات النمائية، مثل جين Gabra2، والذي يرتبط بالعجز الاجتماعي والسلوكيات المشابهة للقلق والاكتئاب كما تم الكشف عنه في التجارب التي تمت على الفئران[61]. وقد ارتبط البيسفينول والفثالات بحدوث اضطرابات في تكوّن الخلايا العصبية القشرية (Cortical Neurogenesis) وتكوّن المشابك العصبية (Synaptogenesis) ، إضافةً إلى تعديلات فوق جينية خاصة بالجنس (Sex-specific epigenetic modulation) لجينات مرتبطة باضطراب طيف التوحد (ASD)[59]. كما يمكن للـ MPs وNPs أن يتداخلا مع العمليات العصبية الحيوية مثل تشكيل ونضج الدوائر العصبية (Circuit formation and maturation) المرتبطة باضطرابات الدماغ النمائية إذا تراكمت في الأنسجة العصبية[62، 63]. وقد كشفت الدراسات أن بعض جسيمات البولي ستايرين النانوية تتراكم في مناطق من دماغ الأجنة وتُعيق وظائف مثل تكوّن الميالين (Myelination)، وتوازن النواقل العصبية (Neurotransmitter balance)، وسلامة المشابك العصبية (Synaptic integrity). ولوحظ أيضًا انخفاض في سُمك القشرة الدماغية (Cortical thickness)، واضطراب في هجرة الخلايا العصبية (Neuronal

migration)، إلى جانب ظهور اختلالات سلوكية طويلة الأمد مثل القلق، والعجز الاجتماعي، والضعف المعرفي[64] (شكل 3.5).



شكل 3.5 تأثير الجسيمات البلاستيكية الدقيقة والنانوية على التطور العصبي والسلوك البشري

و من المحتمل أن تؤثر هذه التغيّرات سلبًا على الأداء المعرفي، والتحكم العاطفي (Emotional control)، والوظائف الاجتماعية (Social functioning). كما تم ربط MPs وNPs بتغيّرات في مدى الانتباه (Attention span)، وزيادة فرط النشاط (Hyperactivity)، وتغير أنماط التفاعل الاجتماعي (Social engagement)[62]، وتُعد الـ MPs من اهم عوامل الخطر في اضطرابات الصحة النفسية، حيث يمكن أن يُسبب القلق، والاكتئاب، والسلوكيات غير الطبيعية، وغيرها من اضطرابات المزاج[65].

وقد أشارت الدراسات الى ان تراكيز الـ MPs في البول، بما في ذلك PA، PP، PVC، ترتبط بشكل كبير بمشكلات سلوكية سلبية لدى الأطفال، تشمل الصعوبات العاطفية (Emotional difficulties)، ومشاكل السلوك (Conduct problems)، وفرط النشاط، وتحديات العلاقات مع الأقران (Peer relationship challenges)، والخلل السلوكي العام (Overall behavioural dysfunction)[62].

بينما تلعب مدة التعرّض وتكراره دورًا حاسمًا في تحديد شدة السُمية العصبية. وقد ارتبط التعرّض المطوّل للميكروبلاستيك بحدوث موت الخلايا العصبية المبرمج (Neuronal apoptosis)، واختلال في وظائف الميتوكوندريا (Mitochondrial dysfunction)، وتدهور الميالين (Myelin degradation). وتختلف التأثيرات السمية العصبية اعتمادًا على حجم الجزيئات، وشكلها، وشحنتها السطحية، وتركيبها الكيميائي، ونوع البلاستيك مثل البولي ستايرين،

والبولي إيثيلين (PE)، والبولي بروبيلين (PP)، والبولي فينيل كلوريد (PVC)، حيث يُظهر كل نوع منها تأثيرات مختلفة على بنية الدماغ ووظائفه[63، 65].

3.6 تطور السمية العصبية في أدمغة الحيوانات بسبب التعرض للMPs وNPs

أظهرت دراسات تجريبية أن التعرّض لجزيئات الـ NPs يؤثر سلبًا في الجهاز العصبي في نماذج حيوانية مختلفة، ويؤدي إلى تغيرات سلوكية مثل انخفاض النشاط الحركي وظهور أعراض تشبه النوبات. كما بينت هذه الدراسات إمكانية انتقال الـ NPs من الأم إلى الجنين، مما يرتبط بارتفاع معدلات وفيات الأجنة وتثبيط النواقل العصبية مثل السيروتونين (Serotonin)، الأوكسيتوسين (Oxytocin)، والدوبامين (Dopamine)، كما ارتبط التعرّض لـ MPs في أسماك الزرد (*Zebrafish*) بزيادة الإجهاد التأكسدي، واختلال استقلاب الدهون، وتنشيط العمليات الالتهابية. وتبين أن الـ MPs يغيّر من توازن الميكروبيوم المعوي، وهو ما يؤثر سلبًا على توازن الكائن الحي (*Eubiosis*) ويعطّل محور الأمعاء–الدماغ، في كل من الفئران وأسماك الزرد. ويشمل هذا الاضطراب تغيرات في فصائل بكتيرية نافعة مثل *Bacteroidetes*، و*Proteobacteria*، و*Firmicutes*، و*Actinobacteria*، مما يؤدي إلى اختلالات في إنتاج المخاط المعوي، وتفاقم الاضطرابات الأيضية الناتجة عن ضعف الحاجز المعوي. وقد ارتبطت هذه الآثار بعدة مسارات تنظيمية، من بينها العصب الحائر (Vagus Nerve)، الجهاز المناعي (Immune System)، الجهاز الصماوي العصبي (Neuroendocrine System)، إضافة إلى المركّبات العصبية المشتقة من الميكروبات[54].

أشارت دراسات أخرى إلى أن التعرّض لجزيئات البولي ستايرين في القوارض وأسماك الزرد يرتبط بتغيّرات في السلوك الحركي، وانخفاض استجابات القلق، وضعف الذاكرة والتعلّم، إلى جانب اختلال في الإشارات الكولينية وارتفاع في المؤشرات الحيوية التأكسدية في قرن آمون (Hippocampus)[66، 67]. وفي دراسة أجراها زهير وزملائه[68] تم استكشاف العلاقة بين التعرّض الفموي للميكروبلاستيك من نوع بولي إيثيلين (PE) واضطراب طيف التوحد (ASD)، حيث تم رصد تراكم جسيمات الـ PE في الأمعاء والدماغ. وُجدت شظايا دقيقة (Fragments) من الـ PE داخل أنسجة الدماغ، مما يدل على قدرة هذه الجزيئات على عبور الحواجز البيولوجية. وقد أظهرت الفئران المعرضة لـ PE، خاصة خلال الفترات السابقة للولادة وما بعدها مباشرة، سلوكيات شبيهة بالتوحد، شملت ضعف التفاعل الاجتماعي، وانخفاض الذاكرة العاملة، وزيادة السلوكيات التكرارية والقهرية. كما غيّر التعرّض لـ PE تركيب الميكروبيوم المعوي، ونتج عن ذلك تغير في وفرة بعض الأنواع البكتيرية، وزيادة في تنوّعها الكلي. وُجد أن بعض الأنواع المرتبطة بالتوحد لدى البشر قد ازدادت، بينما انخفضت الأنواع المفيدة مثل *Lactobacillus reuteri*. وقد رُصد ارتفاع في التعبير عن جينات مرتبطة باضطرابات نفسية–عصبية، منها *EGR-1* و *ARC*. إضافة إلى ذلك، لوحظت مؤشرات للالتهاب العصبي، مثل زيادة إنترلوكين-6 وإنترلوكين-1 بيتا، إلى جانب انخفاض مستويات حمض غاما أمينوبيوتيريك (Gamma-Aminobutyric Acid, GABA) وحمض الأسيتيل أسبارتيك (N-Acetylaspartate - NAA). كما أظهرت دراسات التصوير الجزيئي انخفاضًا في التمثيل الغذائي للجلوكوز ونشاط ناقل الدوبامين في القشرة الجبهية الأمامية (Prefrontal Cortex)، وهي سمات تتوافق مع حالات التوحد[68].

وبيّنت تجارب لاحقة أن الـ MPs يتراكم في المادة السوداء (Substantia Nigra)، وهي منطقة دماغية غنية بالخلايا العصبية الدوبامينية (Dopaminergic neurons)، مما يؤدي إلى انخفاض الدوبامين واضطراب في الوظيفة الحركية. كما وُجد أن النانو بلاستيك يعزز انتشار بروتين ألفا-سينوكلين (Alpha-Synuclein) في هذه الخلايا، ويُفاقم من الالتهاب العصبي عن طريق تحفيز التحلل الخلوي الالتهابي في الخلايا الدبقية الصغيرة. كذلك، أكدت الدراسات أن تراكم الميكروبلاستيك في الدماغ يرتبط بانخفاض مستويات بروتين (*Glial Fibrillary Acidic Protein*) *GFAP*، وهو بروتين تنظيمي يرتبط بالمراحل المبكرة من الأمراض العصبية التنكسية. وتشير النتائج إلى أن التعرّض للبولي ستايرين يُحدث القلق في الفئران من خلال تنشيط مسار *HRAS–PERK–NF-κB* داخل الدماغ. وقد أظهرت دراسات سريرية وأخرى على الحيوانات أن تعرض الأمهات لمُعطّلات الغدد الصماء مثل الـ MPs أثناء الحمل أو الرضاعة مرتبط بزيادة خطر الإصابة لدى الأطفال باضطرابات في الصحة النفسية، مثل القلق، الاكتئاب، فرط النشاط، واضطرابات ذهانية[65]. وفي دراسة حديثة، قام شيا وآخرون[64] بتقييم السُمية العصبية الناجمة عن التعرض للـ MPs وNPs في أنظمة الثدييات، مشيرين إلى خطورة هذه الجزيئات نظرًا لقدرتها على اختراق الحواجز البيولوجية والتداخل مع المسارات العصبية الحيوية خلال مراحل التطور الدماغي المبكر.

3.7 التراكم الحيوي للميكروبلاستيك في أدمغة البشر المتوفين

أشار نيهارت وآخرون[69] إلى أن الـ MPs والـ NPs يتم توزيعهما في أنسجة الإنسان، مع تركيز خاص على الدماغ، والكبد، والكلى، وذلك في عينات ما بعد الوفاة جُمعت على مدى عدة سنوات. وُجدت جسيمات الميكروبلاستيك في جميع الأعضاء التي تم فحصها، إلا أن تركيزها في الدماغ كان أعلى بشكل ملحوظ مقارنة بالكبد أو الكلى[69]. وقد تبيّن أن البولي إيثيلين (PE) هو البوليمر الأكثر شيوعًا في أنسجة الدماغ. وخلال الفترة الممتدة من عام 2016 إلى 2024، ارتفعت مستويات الـ MPs والـ NPs في الكبد والدماغ بشكل كبير، مما يدل على تزايد العبء الداخلي المتراكم بمرور الزمن، بالتوازي مع الاتجاهات البيئية العامة. ورغم أن غالبية المواد البلاستيكية المكتشفة في الدماغ كانت من نوع البولي إيثيلين (PE)، فقد سُجل أيضًا ارتفاع في مستويات بوليمرات أخرى مثل مطاط ستايرين-بيوتاديين (Styrene-Butadiene Rubber)، والبولي بروبيلين، والبولي فينيل كلوريد على مدار السنوات. "وقد أظهرت تقنيات المجهر الإلكتروني (Electron Microscopy) والتحليل الطيفي (Spectroscopy) أن معظم جسيمات البلاستيك في الدماغ كانت على شكل شظايا (Fragments) أو رقائق نانوية (Nanoflakes)، يقل طولها عادة عن 200 نانومتر (200 nm) وعلى الرغم من ذلك لم يُلاحظ ارتباط بين تراكم هذه الجسيمات في الدماغ وبين عوامل مثل العمر، أو الجنس، أو العرق/الإثنية، أو سبب الوفاة، إلا أن التراكم كان مرتبطًا بشكل قوي بسنة الوفاة، مما يعكس اتجاهات التعرّض البيئي المتزايد.

3.8 التعرّض المبكر للملوثات البلاستيكية: مسارات التأثير على النمو العصبي لدى الأطفال

وفقًا لتصنيف نوفا للأطعمة (*Nova Food Classification System*)، تُعرف الأطعمة فائقة المعالجة (*Ultra-Processed Foods*) بأنها تركيبات صناعية تعتمد على مكونات مستخرجة من الغذاء أو مشتقة من مكوناته، أو مركبة في المختبر. ومن الأمثلة على ذلك المعكرونة سريعة التحضير، والمشروبات الغازية، والأطعمة المعلبة. يسجل

استهلاك هذه الأطعمة نسبًا مرتفعة في الولايات المتحدة وكندا، مع ازدياد ملحوظ في البلدان ذات الدخل المتوسط بسبب ارتفاع استهلاك الوجبات السريعة والوجبات الخفيفة التي تحتوي على هذه المنتجات. وقد تم الكشف عن تركيزات عالية من الـ MPs داخل هذه الأطعمة، ويُعزى ذلك إلى عمليات التصنيع والتغليف. فعلى سبيل المثال، تحتوي وجبات مثل قطع الدجاج المقلية (Chicken Nuggets) على كمية من الميكروبلاستيك تفوق بنحو 30 ضعفًا الكمية الموجودة في صدور الدجاج، مما يبرز التأثير الكبير لعمليات التصنيع على محتوى الطعام. بالإضافة إلى ذلك، غالبًا ما تُخزَّن هذه الأطعمة أو تُسخن في عبوات بلاستيكية، وهي مصدر مباشر للتعرّض للـ MPs. فقد أظهرت البيانات أن بعض الحاويات البلاستيكية تطلق ما يصل إلى 4.22 مليون جسيم ميكروبلاستيك، و2.11 مليار جسيم نانو بلاستيك من كل سنتيمتر مربع من السطح البلاستيكي خلال 3 دقائق فقط من التسخين في الميكروويف. كما أن مركب بيسفينول أ، وهو مادة كيميائية تدخل في صناعة البلاستيك وتُطلق مع تحلل المواد البلاستيكية، يوجد بكثرة في تغليف الأطعمة فائقة المعالجة. لذلك، فإن استهلاك هذه الأطعمة قد يُعد عامل خطر كبير لتراكم الميكروبلاستيك و BPA في جسم الإنسان[56]. كما يُعد البولي فينيل كلوريد، مصدرًا كبيرًا لتلوث الميكروبلاستيك، وتم ربطه باضطراب طيف التوحد[70].

تشير البيانات الوبائية إلى ارتفاع في معدلات اضطرابات النمو العصبي، بما في ذلك اضطراب فرط الحركة وتشتت الانتباه (ADHD)، والتوحد (ASD)، والإعاقات الذهنية، في مختلف أنحاء العالم. وتُعزى هذه الاضطرابات إلى تداخل العوامل الوراثية مع العوامل البيئية، وخصوصًا خلال الفترات الحرجة من تطوّر الدماغ. وقد أظهرت العديد من الدراسات أن السموم البيئية مثل الرصاص، والميثيل-زئبق (Methylmercury)، وبعض المبيدات، تُسهم في نتائج سلبية على النمو العصبي. ومع ذلك، يبقى الدور المحتمل للميكروبلاستيك في هذا المجال غير مُتناوَل بشكل كافٍ في أدبيات طب الأطفال والنمو العصبي. ونظرًا لأن التعرّض للـ MPs يبدأ منذ المرحلة الجنينية (In Utero)، ويستمر خلال الرضاعة والطفولة، من الضروري التحقق من تأثير هذه الجزيئات على مراحل النمو العصبي الحرجة التي تتّسم بمرونة الدماغ العالية (Neuroplasticity). ومع ذلك، لا تزال الأبحاث التي تربط بين التعرّض للميكروبلاستيك خلال الحمل أو الطفولة المبكرة وبين التقييمات السلوكية أو المعرفية محدودة، وتفتقر إلى مراعاة الفروقات الجنسية أو الاستعداد الوراثي. كما لا توجد دراسات طولية بشرية تربط مباشرةً بين التعرض للميكروبلاستيك ونتائج عصبية لا رجعة فيها في مرحلة الطفولة.

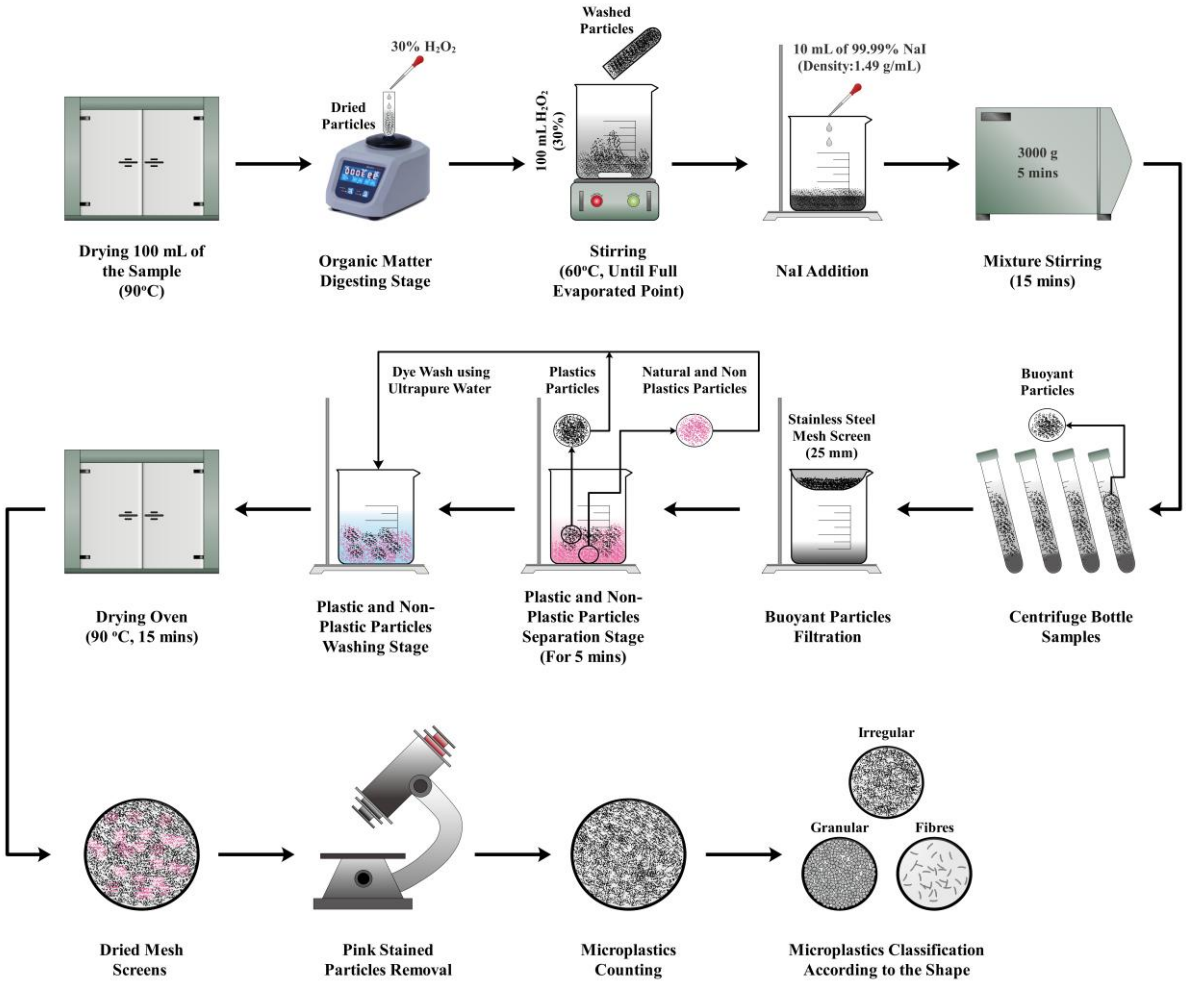
الفصل الرابع

الفصل الرابع: رصد وتقييم التلوث البيئي بالجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) في الدول العربية

يتناول الفصل الرابع واقع التلوث بالجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) في البيئة، مع التركيز على طرق الكشف والتحليل ومستوى التلوث في الدول العربية. يبدأ القسم الأول عرض الأساليب الكمية والنوعية للكشف عن ال MPs في مختلف الأوساط البيئية باستخدام التقنيات الحديثة كالفحص المجهري والتحليل الطيفي والكروماتوغرافي. أما القسم الثاني فيستعرض حالة التلوث بال MPs في الدول العربية من خلال دراسات ميدانية وتقييمات بحثية، تغطي 12 دولة تشمل تونس، مصر، لبنان، الجزائر، قطر، السعودية، المغرب، الأردن، الإمارات، الكويت، عُمان، والعراق .

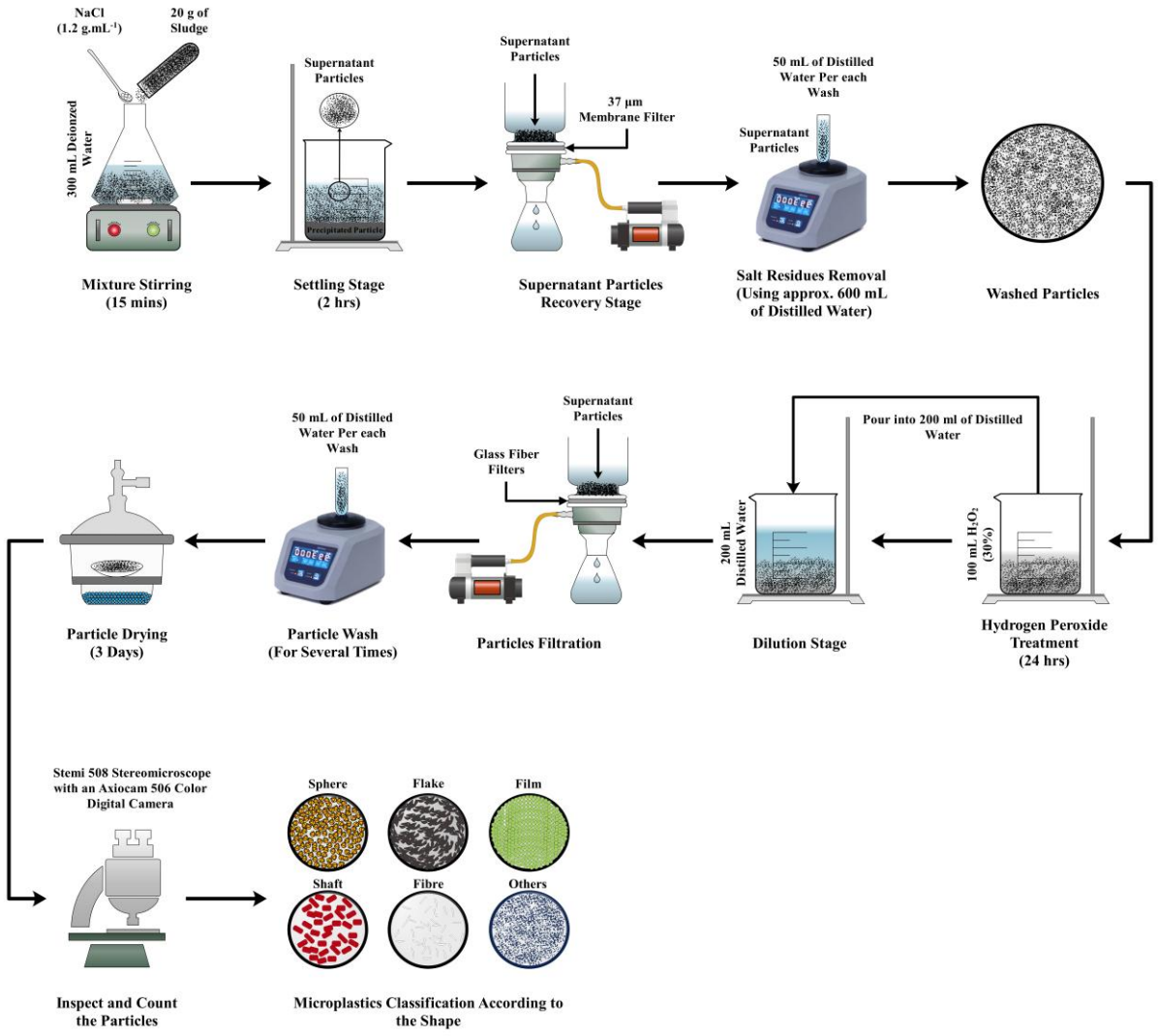
4.1 الكشف الكمي والنوعي للـ MPs في البيئة

تتمثل التحديات الرئيسية المرتبطة بالكشف عن الـ MPs في البيئة في تركيزاتها المنخفضة جدًا، مما يتطلب إستخدام تقنيات تحليلية متقدمة لضمان التعرف الدقيق عليها[71]. ورغم أن بعض الميكروبات قادرة على تحلل هذه الجسيمات، إلا أن هذا التحلل غالبًا ما يكون جزئيًا، ولا يكفي للحد من المخاطر الصحية الناتجة عنها. وقد تم رصد كميات قابلة للكشف من الـ MPs في المياه الناتجة عن المعالجة الثانوية في STPs ، وكذلك في البيئات المائية المختلفة[72، 73]. تُستخدم أدوات متقدمة مثل مطيافية رامان (Raman Spectroscopy)، ومطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)، والمجهر الإلكتروني الماسح (Scanning Electron Microscopy, SEM) في تحليل وتحديد هوية الميكروبلاستيك من حيث التركيب الكيميائي والبنية السطحية[74]. ومن بين أكثر الأنواع شيوعًا للجسيمات المكتشفة في المياه المعالجة النايلون (Nylon)، والبولي إيثيلين (PE)، والبولي إيثيلين تيريفثاليت (Polyethylene Terephthalate, PET)، طور زياجهرومي وآخرون[75] طريقة لإستخلاص هذه الجسيمات من المياه الناتجة عن محطات المعالجة، شملت التجفيف، والهضم بإستخدام محلول فوق أكسيد الهيدروجين (30%)، والفصل الكثافي بمحلول يوديد الصوديوم (NaI) بنسبة نقاء 99.99%، ثم صبغ العينة بمحلول روز بينغال (Rose Bengal). وقد تم تحديد الهوية الكيميائية للجسيمات باستخدام FTIR ، وتراوحت تراكيزها بين 0.28 إلى 1.54 جسيم بلاستيكي دقيق لكل لتر من المياه المعالجة (شكل 4.1).



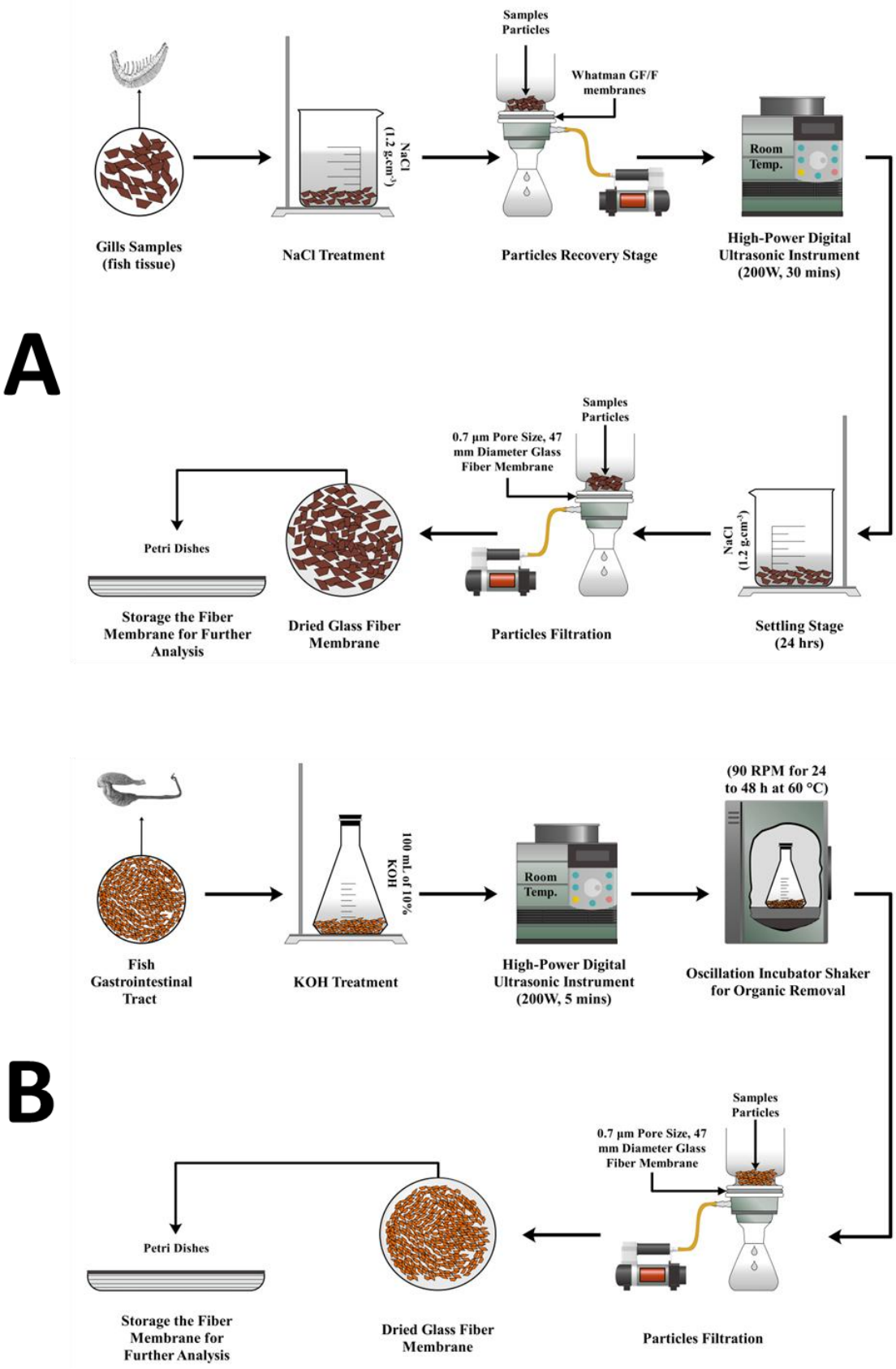
شكل 4.1: خطوات استخراج MPs من عينات مياه الصرف الصحي وفقًا لطريقة زياجهرومي وآخرون[75]

وفي دراسة أخرى، فحص ماسون وأخرون[76] وجود الجسيمات في 90 عينة من 17 محطة معالجة مياه صرف في الولايات المتحدة، باستخدام هضم كيميائي بمحلول H_2O_2 بنسبة 30% ومحفز الحديد الثنائي، ثم تحليل FTIR و SEM. وقد كشفت النتائج عن تراكيز تراوحت بين 0.026 إلى 0.074 جسيم لكل لتر من المياه المعالجة، كما أشارت إلى أن حوالي 23.52% من محطات المعالجة تنتج أكثر من 4 ملايين جسيم بلاستيكي دقيق يوميًا. كما أجرى لي واخرون[77] دراسة على 79 عينة من الحمأة الناتجة عن 28 محطة معالجة مياه صرف صحي في 11 مقاطعة صينية، بإستخدام طريقة الإستخلاص المبينة في الشكل 4.2. كشفت النتائج عن تراكيز للجسيمات تراوحت ما بين 1600 إلى 56400 جسيم لكل كيلوجرام من الحمأة الجافة. ووفقًا لتقديرات الدراسة، تنتج الصين سنويًا حوالي 15.6×10^{13} جسيم بلاستيكي دقيق من الحمأة وحدها.

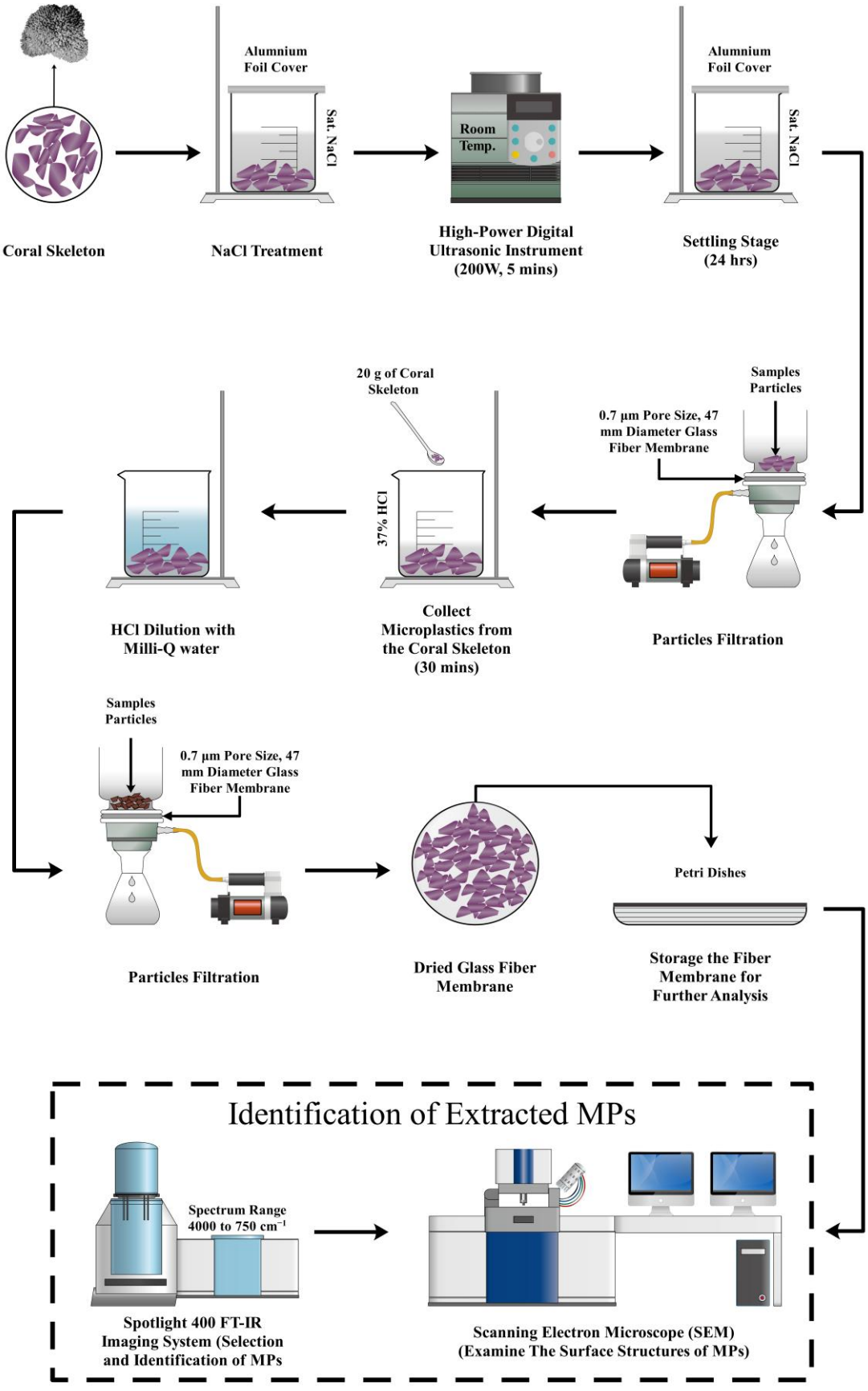


شكل 4.2: خطوات استخراج MPs من عينات الحمأة كما هو موصوف في دراسة لي وآخرون[77]

وفي دراسة دينغ واخرون[78] حول خصائص وتوزيع الـ MPs في الشعاب المرجانية والأسماك في بحر الصين الجنوبي، تم إستخدام طرق الإستخلاص الموضحة في الشكلين 4.3 و4.4. أظهرت النتائج تراكيزا تراوحت بين 0 إلى 4.7 جسيم لكل غرام من الأسماك، و0.02 إلى 1.3 جسيم لكل غرام من الشعاب المرجانية، وكان PET هو النوع الأكثر شيوعًا، بأقطار تتراوح بين 20 و330 ميكرومتر في الأسماك، وأكثر من 5 ملم في الشعاب المرجانية[78].



شكل 4.3: خطوات استخراج الـ MPs من (A) أنسجة الأسماك، (B) العينات الهضمية كما ورد في دراسة دينغ وآخرون[78]

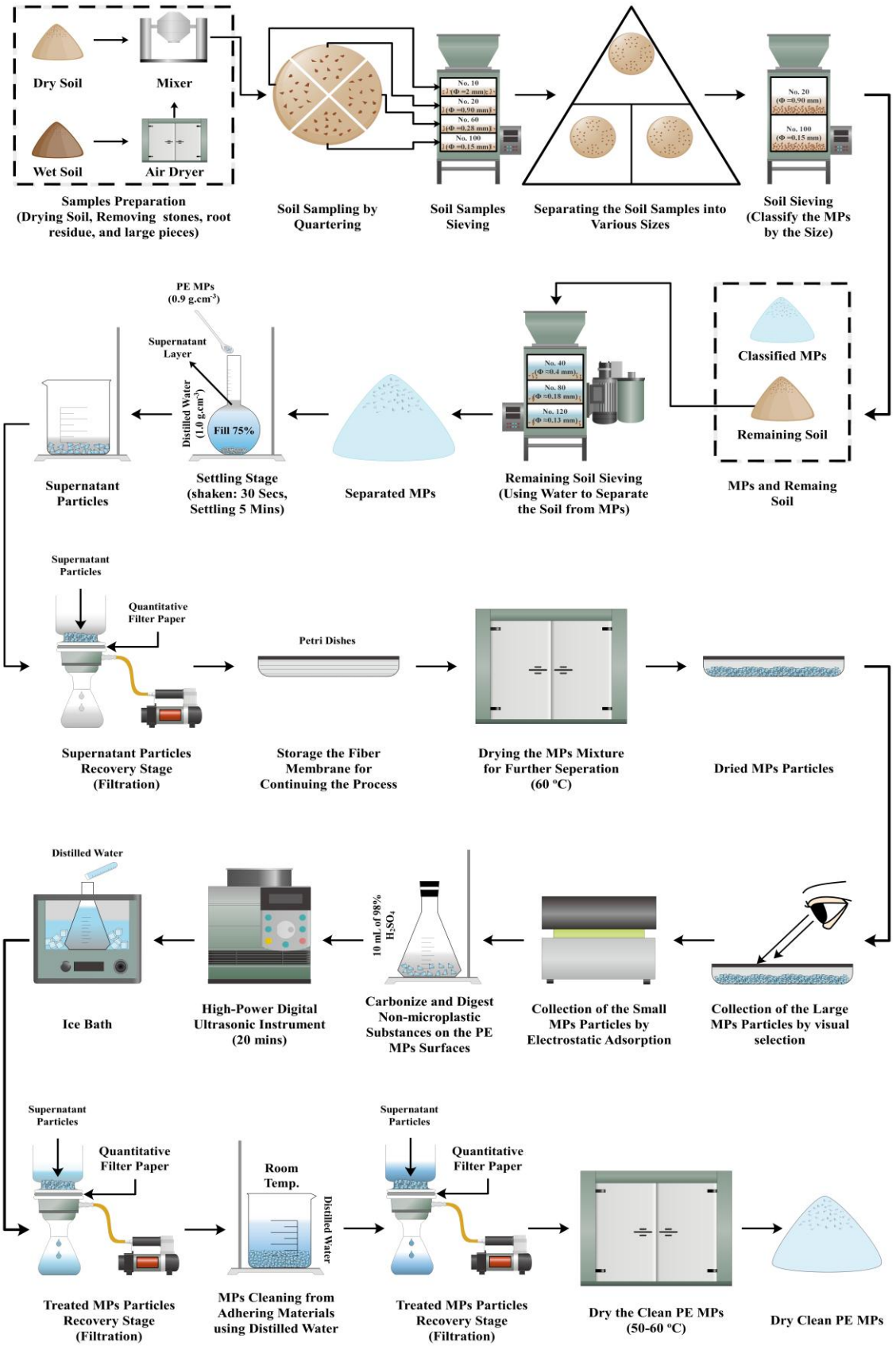


شكل 4.4: خطوات استخراج MPsمن عينات المرجان كما هو موضح في دراسة دينغ وآخرون[78]

أما إريكسن واخرون[79] فقد جمعوا 21 عينة من بحيرات لورنتيان العظمى في الولايات المتحدة، وتم فرز هذه العينات حسب الحجم، ثم تحليلها باستخدام SEM، وتحديد تركيبها العنصري باستخدام التحليل الطيفي للطاقة المشتتة (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) وكشفت النتائج عن وفرة تراوحت بين 997 إلى 44,435 جسيم لكل كيلومتر مربع، حيث بلغ عدد الجسيمات التي يقل قطرها عن 1 ملم نحو 20% من إجمالي الجسيمات.

من ناحية اخرى يُعد استخلاص الـ MPs من التربة أكثر تعقيدًا من إستخلاصها من المياه أو الحمأة، وذلك بسبب التصاقها القوي بجزيئات الطين الدقيقة. وقد أجرى دينغ وآخرون[80] دراسة على تلوث التربة الزراعية في الصين، باستخدام الفصل الكثافي بمحاليل NaCl و $CaCl_2$المشبعة، ثم هضم المادة العضوية بمحلول H_2O_2 عند درجة حرارة 65 م° لمدة ليلة كاملة ، تلاها الترشيح باستخدام ورق ترشيح، ثم التجفيف عند 50 م°. وتم تحديد التركيب والشكل السطحي للجسيمات باستخدام SEM ، بينما جرى تحليل البنية الكيميائية باستخدام FTIR . وقد بيّنت النتائج أن جميع العينات إحتوت على MPs تعود الى PET، PE، PS، HDPE، PVC، وPP، بتراكيز تراوحت بين 1430 إلى 3410 جسيم لكل كيلوجرام من التربة[80].

وأخيرًا، طور لي واخرون[81] طريقة فعالة لاستخلاص الجسيمات من التربة باستخدام مبدأ تُستخدم تقنيات متقدمة مثل الامتصاص الكهروستاتيكي (Electrostatic Adsorption)، والتعويم (Flotation)، والاستخلاص بالضغط (Pressurized Extraction)، والكربنة بحمض الكبريتيك (Sulfuric Acid Carbonization) في معالجة وتحليل العينات البيئية (انظر الشكل 4.5). تم تقييم كفاءة الاستخلاص من خلال مقارنة وزن الجسيمات الخام والمستخلصة، بينما جرى توصيف الشكل السطحي باستخدام SEM ، وتحليل البنية الكيميائية باستخدام FTIR وقد كشفت الدراسة عن وجود الجسيمات بتراكيز بلغت 40.35 ملغ/كغم، وبأحجام تراوحت بين 0.9 إلى 2.0 ملم.



الشكل 4.5: خطوات استخراج MPs من عينات التربة كما ورد في دراسة لي وآخرون[81]

4.2 تلوث البيئة بالـ MPs في الدول العربية

تم تحليل الدراسات التي اجريت في الدول العربية على الـ MPs طبقا لما يسمى بالدراسات التحليلية الوصفية (Descriptive Analytical Studies) والتي تهدف إلى رصد وتحليل محتوى الأدبيات العلمية المنشورة المتعلقة بتلوث البيئات البحرية بالـ MPs في الدول العربية. وقد تم اتباع منهج مراجعة منهجية للأدبيات (Systematic Literature Review, SLR) في هذا التقرير من خلال خطوات منظمة شملت البحث، والتصنيف، والاستخلاص، والتحليل المقارن للبيانات. تم جمع البيانات من مجموعة واسعة من المصادر العلمية المحكمة، بما في ذلك قواعد البيانات الأكاديمية العالمية مثل Scopus، Web of Science، Google Scholar، PubMed، بالإضافة إلى مصادر إقليمية وعربية مثل المجلات الجامعية، ومراكز الأبحاث البيئية في الدول العربية. كما شملت البيانات تقارير تقنية من منظمات بيئية حكومية وغير حكومية في الدول المعنية، بشرط أن تكون موثقة وتمت مراجعتها علميًا أو ميدانيًا.استبعاد الدراسات التي ركزت فقط على التلوث البلاستيكي الكلي دون بيانات عن الجسيمات الدقيقة.

بعد استخراج الدراسات المؤهلة، تم بناء جدول تركيبي يتضمن نوع العينة البيئية أو البيولوجية، الموقع الجغرافي أو البحري لجمع العينة، الدولة المعنية وتفاصيل تقنية أو نوعية عند توفرها (مثل نوع الكائن الحي المدروس، أو تقنية التحليل المستخدمة). ثم تم إجراء تحليل مقارن بين الدول من حيث مدى شمول النطاق الجغرافي، تنوع أنواع العينات المدروسة، الأنواع الحية التي شملتها الدراسة، البنية التحتية للدراسة مثل توفر الاجهزة المتقدمة.

وبالرغم الجهد المبذول لتضمين أكبر عدد ممكن من الدراسات ذات الصلة، الا أن هناك عدة قيود تؤخذ بعين الاعتبارتضمنت قلة الدراسات المنشورة في بعض الدول العربية، تفاوت المعايير المنهجية بين الدراسات، سواء في تقنيات التحليل أو أنواع العينات، عدم توفر بيانات مفصلة أو صعوبة الوصول إلى بعض التقارير الفنية غير المنشورة، اقتصرت الدراسة على البيانات المتاحة باللغة الإنجليزية، مما قد يستثني دراسات بلغات محلية أو غير منشورة علنًا. بينما لم يتم إجراء تحليل إحصائي كمي شامل بسبب عدم تجانس البيانات الرقمية، إلا أنه تم استخدام أسلوب التحليل النوعي المقارن (Qualitative Comparative Analysis) لتحديد الفجوات البحثية والنماذج الجيدة للممارسات البحثية. كما تم تقييم تمثيل الدول والبيئات المدروسة من خلال مؤشرات نسبية لتغطية العينات في كل فئة (مثلاً عدد أنواع العينات التي درست في كل دولة).

4.2.1 الجمهورية التونسية

تم نشر أول تقرير في عام 2016م،أكثر من 90% من الدراسات تمت بالتعاون مع باحثين من فرنسا. وقد تم تصنيف هذه الدراسات إلى فئتين، بما في ذلك انتشار الـ MPs في بيئات مختلفة (مثل التربة، المياه، الرسوبيات، والكائنات الحية ، والتوافر الحيوي والسمية للميكروبلاستيك على الكائنات البحرية . بالإضافة إلى ذلك، ركزت دراستان قام بها باندیني واخرون[82] وبوغاطا واخرون[83] على استخدام المؤشرات البيئية للكشف عن الـ MPs كما تناولت الدراسات التغيرات الموسمية، بالإضافة إلى بعض التجارب والمحاكاة التي تهدف إلى دراسة دور الـ MPs في نقل المعادن الثقيلة وتغيير المجتمعات الميكروبية في البيئة. أظهرت الدراسات أن معظم الأبحاث التي أجريت في تونس تمت على عينات تم الحصول

عليها من بحيرة بنزرت، التي تغطي حوالي 150 كم^2. في جميع الدراسات التي أُجريت في هذه المنطقة، كانت الألياف المصنوعة من الـ PE هي الأكثر هيمنة.

وتشير الدراسات التي أُجريت في تونس إلى وجود بعض الأدوات المتقدمة، مثل الميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM)، طيف الأشعة تحت الحمراء (FTIR)، الكروماتوغرافيا الغازية - مطياف الكتلة (GC-MS)، وأجهزة Raman، والتي يتم استخدامها لتحديد الـ MPs وفقًا لقواعد البيانات التجارية وقياس حجم الـ MPs باستخدام برنامج RM Software Labspec® تُعتبر هذه الأدوات هي الأدوات الرئيسية المستخدمة في الدراسات المتعلقة بالـ MPs. بالإضافة إلى ذلك، تم استخدام محتوى الميتالوثيونين (MTs)، نشاط إنزيم الكاتلاز (إنزيم مضاد للأكسدة)، نشاط إنزيم الجلوثاثيون-S-ترانسفيراز (GST) (إنزيم مخصص لإزالة السموم)، وإنزيم أستيل كولين إستراز (AChE) لتقييم سمية الـ MPs على الخلايا الحية. لم يتم إجراء أي تطورات في بروتوكولات استخراج أو تحديد الـ MPs في الدراسات التي تم استعراضها هنا.

جدول 4.1: ملخص الدراسات التي أُجريت في تونس للكشف عن وتحديد الـ MPs

نوع العينة	حجم الـ MPs	سنة الدراسة	الانواع الاكثر شيوعا	التراكيز	المراجع
عينات رمال *Sand samples*	0.3 – 5 مم	2016	Fibers, Fragments	3 – 18 جزء/غرام	**84**
عينات رخويات *Mollusk samples*	0.1 – 1 مم	2018	PP, PE	0.7 – 1.4 جزء/غرام	**85**
عينات رمال *Sand samples*	0.1 – 1 مم	2018	PE, PP	252 – 5332 جزء/م^2	**86**
الجهاز الهضمي وعضلات الأسماك *Fish gastrointestinal tract and muscle tissues*	0.45 – 3 ميكرومتر	NR	PE, PA	3.63 – 6.11 جزء/غرام	**87**
الجهاز الهضمي للأسماك *Fish gastrointestinal tract*	0.2 – 5 مم	2019	PE, PP	60 – 72 جزء/سمكة	**88**
ديدان بحرية، عينات رمال *Marine worms and sand samples*	0.22 – 3 ميكرومتر 1.2 – 1000 ميكرومتر	2018	PE وPP	0.5 – 3.7 جزء/غرام 129 – 606 جزء/كغ	**89**
المحار وعينات مياه البحر *Oyster and seawater samples*	NR	2019	PP, PE	2.6 – 12 جزء/محار 0.2 – 0.7 جزء/لتر ماء البحر	**90**
عينات رمال *Sand samples*	NR	NR	PE, PP	117.8 – 788.2 جزء/م^3	**91**
أنسجة الديدان البحرية *Marine worm tissues*	1.2 – 100 ميكرومتر	2018	PE، PP، PA	NR	**92**
التربة Soil	0.22 – 1.22 ميكرومتر	NR	PBAT, PE	13.21 – 124.2 جزء/كغ	**83**

التربة Soil	0.3 – 2.5 مم	NR	PE, PP	50 – 880 جزء/كغ	**93**
سمك سيرانوس سكريبا *Serranus scriba (Painted comber fish)*	0.45 و3 ميكرومتر	NR	PE	34 جزء/غرام أنسجة	**94**
عينات رمال *Sand samples*	78.35 – 97.25 ميكرومتر	2019	شظايا (منتجات الطلاء)	680 – 4900 جزء/كغ	**95**
عينات رمال *Sand samples*	NR	2019-2020	PE، PP	33.2 – 307 جزء/كغ جاف	**96**
محار Oyster	33 – 4860 ميكرومتر	NR	PE,PP	0.92 – 1.88 جزء/غرام (المغرب) 0.97 – 1.47 جزء/غرام (تونس)	**97**
عينات رمال *Sand samples*	> 5مم	NR	NR	2.77 – 71.89 جزء/م^2	**98**
سمك ساردينا بيلكاردوس *Sardina pilchardus (European pilchard)*	0.033 و0.5 مم	NR	ألياف، شظايا، أفلام	1.1 – 5.86 جزء/سمكة	**NR**
حُزم رجعية من بقايا طيور النورس ذات الساق الصفراء Larus michahellis	0.026 – 3.965 مم	2022	ألياف، شظايا (سليلوز صناعي)	1.44 و8.46 جزء	**99**

توجد بيانات غير متوفرة (NR: غير مذكور) لبعض الأنواع في بعض الدول، مما يشير إلى نقص في الدراسات أو عدم توفر بيانات دقيقة

تُعد دراسة عبيدلي وآخرون[84] من أوائل الدراسات التي تناولت التلوث بالـ MPs في البيئة البحرية التونسية. وقد أُجريت هذه الدراسة في شمال البلاد، وتحديدًا في بحيرة بنزرت، والتي تُعد من أبرز النظم البيئية الساحلية ذات الأهمية الاقتصادية نظرًا لتعدد الأنشطة الصناعية والاقتصادية التي تشهدها المنطقة، بما في ذلك صيد الأسماك، وتربية الأحياء المائية، وبناء السفن، وصناعات معالجة البلاستيك، والحديد والصلب، والمنسوجات، والبتروكيماوي. تم جمع عينات من الرسوبيات من أربعة مواقع مختلفة في البحيرة. وقد أظهرت نتائج التحليل وجود الـ MPs ضمن تراكيز تراوحت بين 3 إلى 18 جزءًا لكل غرام من الرسوبيات. وتراوحت أحجام هذه الجسيمات بين 0.3 مم و5 مم، وهي تقع ضمن النطاق التعريفي المتعارف عليه للMPs من حيث الشكل واللون، و كشفت الدراسة أن الألياف (Fibers) كانت الشكل السائد بين MPs، خصوصًا الألياف ذات الألوان الأخضر، الأسود، الأزرق، والأبيض، تلتها الشظايا البلاستيكية (Fragments) التي تنوعت ألوانها بين الأحمر، الأسود، الأخضر، والأزرق. ولم يُسجّل وجود للحبيبات البلاستيكية أو الكرات (Microbeads) في العينات المأخوذة. تؤكد هذه النتائج على التأثير المباشر للأنشطة الصناعية والاقتصادية الكثيفة في المنطقة على مستويات التلوث بالـ MPs في الرسوبيات البحرية. كما تسلط الدراسة الضوء على الحاجة الملحة لتبني استراتيجيات فعالة لإدارة النفايات ومراقبة التلوث الصناعي في المناطق الساحلية ذات الكثافة الصناعية العالية[84]. أجرى عبيدلي وآخرون[85] ايضا دراسة مهمة ركزت على التوافر البيولوجي (Bioavailability) لل MPs في أنواع من الرخويات البحرية في بحيرة بنزرت، تونس. شملت الدراسة نوعين من الرخويات ذات الأهمية الاقتصادية والاستهلاكية هما المحار الهادي *Crassostrea gigas*، وحلزون *Hexaplex trunculus* وقد هدفت الدراسة إلى تقييم مدى دخول الـ MPs إلى الدورة الدموية للكائنات البحرية، باعتبار أن هذا المفهوم يتجاوز مجرد رصد التركيزات البيئية، حيث يشير إلى مدى انتقال الجسيمات إلى أنسجة الكائنات الحية وإمكانية تأثيرها على المستهلكين النهائيين، مثل الإنسان. كشفت نتائج التحليل عن تراكيز عالية من الـ MPs تراوحت بين 703.95 و1482.82 جسيم/كغ من الوزن الرطب للكائنات المدروسة، ضمن نطاق حجمي يتراوح بين 0.1 و1 مم. وقد بيّنت الفحوصات الميكروسكوبية أن الألياف (Fibers) كانت الشكل المهيمن، تلتها الأغشية (Films) والشظايا (Fragments). أظهر تحليل البنية الكيميائية للجسيمات باستخدام تقنية FTIR-ATR أن البوليمرات السائدة كانت PP وPE، وهما من أكثر أنواع البلاستيك استخدامًا في الصناعات الاستهلاكية (جدول 4.1).

وفي دراسة أخرى أجراها شوشان وآخرون[93]، تم فحص التلوث بالـ MPs في منطقة سيدي منصور الواقعة في محافظة صفاقس، جنوب تونس. اختيرت هذه المنطقة نظرًا لطبيعتها الإيكولوجية المميزة، حيث تغطيها كثافة من الشجيرات البحرية المنتمية للبحر الأبيض المتوسط، المعروفة بقدرتها على احتجاز الجزيئات العالقة ومن ضمنها الجسيمات البلاستيكية .جمعت الدراسة 35 عينة من الرواسب الرطبة خلال عام 2018م، وتم تحليلها باستخدام SEM وتقنية FTIR أظهرت النتائج أن الشظايا (Fragments) والحبيبات (Pellets) كانت أكثر أنواع الـ MPs شيوعًا، وبتراكيز تراوحت بين 252 و5332 جسيم/متر^2. كما تم رصد وجود ألياف، خطوط أنبوبية (Tube-like filaments)، وهياكل رغوية (Foam structures). تُعد هذه التراكيز مرتفعة نسبيًا وتشير إلى درجة تلوث بيئي كبيرة قد تعود إلى مصادر بشرية محلية تشمل تصريف النفايات البلاستيكية، إضافةً إلى العوامل البيئية مثل التيارات والمد والجزر التي تسهم في تفتيت المواد البلاستيكية وتحويلها إلى MPs . من الناحية الحجمية، كان معظم الجسيمات المكتشفة في النطاق بين 0.1 و1 مم، في حين لم تتجاوز الجسيمات التي يزيد حجمها عن 5 مم نسبة 3%. من حيث اللون، كان اللون الأبيض هو الأكثر

شيوعًا (50%>)، يليه الأحمر بنسبة 19%. أكدت تحليلات FTIR مرة أخرى هيمنة بوليمري PE وPP ضمن المواد المكتشفة، مما يدل على مصدر بشري مشترك وعالمي الاستخدام لهذه الأنواع من البلاستيك في المنتجات الاستهلاكية

أجرى زيتوني وآخرون[87] دراسة حول التوافر البيولوجي لل MPs ذات الحجم أقل من 3 ميكرومتر في الجهاز الهضمي والأنسجة العضلية لأسماك جُمعت من ستة مواقع ساحلية مختلفة على طول الساحل التونسي، والتي تتعرض لتأثيرات أنشطة بشرية متنوعة. كشفت النتائج عن وجود MPs في جميع عينات الأنسجة التي تم تحليلها، بتركيزات تراوحت بين 3.63 و6.11 جسيم/غرام. وقد تم تصنيف الجسيمات المكتشفة إلى ثلاث فئات وفقًا لحجمها أقل من 0.45–1.2 ميكرومتر، ومن 1.2–3 ميكرومتر (وهي الأكثر شيوعًا في الأنسجة العضلية بنسبة 60%، بتركيزات تراوحت بين 1.78 و6.03 جسيم/غرام)، وأكبر من 3 ميكرومتر. أظهرت التحليلات الطيفية أن البوليمرات السائدة في الجسيمات المكتشفة هي البولي أميد (PA) والبولي إيثيلين (PE)، كما كانت الشظايا (Fragments) هي الشكل الأكثر تكرارًا.

أجرى عابدي واخرون[88] دراسة لتحديد التوافر البيولوجي لل MPs في الجهاز الهضمي لعينات أسماك جُمعت من بحيرتي بنزرت وغار الملح خلال عام 2019. كشفت نتائج الدراسة عن وجود جسيمات الـ MPs بتركيزات تراوحت بين 60 و72 جسيمًا/سمكة، وبأحجام تراوحت بين 0.2 و5 مم. تبيّن أن الألياف (Fibers) شكّلت النسبة الأكبر من الجسيمات المكتشفة (60%)، تلتها الأفلام (Films) بنسبة 37%. كما أظهرت النتائج أن اللون الأسود كان الأكثر شيوعًا بين الجسيمات، تلاه اللونان الأزرق والأصفر، فيما أظهرت التحاليل أن البوليمرات السائدة كانت من نوعي البولي بروبيلين (PP) والبولي إيثيلين (PE). من جهة أخرى، قامت ميساوي وآخرون[89] برصد وجود الـ MPs (<3 µm) في عينات من ديدان البحر والرواسب جُمعت من ثمانية مواقع مختلفة على السواحل التونسية خلال عام 2018، والتي تم اختيارها نظرًا لقربها من مناطق تشهد أنشطة زراعية وصناعية. بالإضافة إلى التحليل الكمي والنوعي لـ MPs، تناولت الدراسة التقييم السُمّي للجسيمات باستخدام عدد من المؤشرات الحيوية، شملت Acetylcholinesterase، وMalondialdehyde، وGlutathione-S-Transferase، وCatalase. أظهرت نتائج التحاليل وجود جسيمات الـ MPs بأحجام تراوحت بين 1.2 و1000 ميكرومتر في جميع عينات الرواسب، وبتركيزات تراوحت بين 129 و606 جسيم/كغ. أما في ديدان البحر، فقد تم الكشف عن جسيمات تتراوح أحجامها بين 0.22 و3 ميكرومتر، بتركيزات تراوحت بين 0.5 و3.7 جسيم/غرام. أشارت التحاليل إلى أن هذه الجسيمات تتكون بشكل رئيسي من بوليمري PE وPP، وأن الجسيمات ذات الحجم الأصغر كانت مرتبطة بشكل أكبر بحدوث الإجهاد التأكسدي، مما يدل على تأثيرها السُمّي المحتمل على الكائنات الحية.

قام وقّاف وآخرون[90] بجمع عينات من بلح البحر ومياه البحر من إحدى البحيرات الساحلية في جنوب البحر الأبيض المتوسط، بهدف الكشف عن وجود الـ MPs وتحديد تركيزاته. أظهرت النتائج أن المكونات الرئيسية للجسيمات المكتشفة تمثلت في البولي بروبيلين (PP)، والبولي إيثيلين (PE)، والسيلوفان. تراوحت تركيزات الـ MPs في بلح البحر بين 2.6 و12 جسيم/عينة، بينما تراوحت في مياه البحر بين 0.2 و0.7 جسيم/لتر. وبناءً على متوسط الاستهلاك السنوي لبلح البحر، قدّر الباحثون كمية الـ MPs المنتقلة إلى الإنسان عبر هذه السلسلة الغذائية بنحو 4.2 جسيم/فرد/سنة.

في دراسة لاحقة، بحث وقّاف وفريقه[91] تركيزات وتوزيع جسيمات الـ MPs في عدد من البحيرات الساحلية في تونس، بالإضافة إلى دراسة دور العوامل البيئية مثل سرعة الرياح، درجة الحموضة (pH)، الملوحة، درجة الحرارة، وعمق المياه في توزيع وتراكم جسيمات الـ MPs. كشفت الدراسة أن غالبية الجسيمات كانت من نوع الألياف (Fibers) (50.9%)، تليها الشظايا (Fragments) (26.9%)، ثم الأغشية (Films) (22.2%). وكانت البوليمرات الأكثر شيوعًا هي PE بنسبة 51.0% و PP بنسبة 25.1%، في حين كان اللون الأبيض والشفاف هو الأكثر شيوعًا بين الجسيمات (36%) تراوحت تركيزات الـ MPs في المياه بين 117.8 و788.2 جسيم/م^3، وبمتوسط إجمالي يقدر بعدد 1.7×10^{10} جسيم في الطبقة السطحية (25 سم) من الماء. أشارت نتائج الدراسة إلى أن تأثير العوامل البيئية على توزيع الـ MPs يختلف باختلاف نوع البوليمر، إذ ارتبط عمق المياه بشكل إيجابي مع جسيماتPP وPS، بينما ارتبطت سرعة الرياح والملوحة إيجابيًا مع PE، وأظهرت درجة الحرارة ارتباطًا إيجابيًا مع NL.

ركزت دراسة مساوي وآخرون[92] على تقييم التأثيرات الضارة لجسيمات الـ MPs خلال دورة حياتها في البيئة، وذلك استنادًا إلى مفهوم التغيرات في الخصائص الفيزيائية والكيميائية لهذه الجسيمات مع مرور الزمن. استهدفت الدراسة فهم آلية الامتصاص والتراكم الحيوي للميكروبلاستيك في أنسجة ديدان البحر، حيث أظهرت النتائج أن أحجام الجسيمات تراوحت بين 1.2 و100 ميكرومتر، وكانت المكونات الأساسية لها تشمل PE، PP، PA، HDPE وLDPE. كشفت تحاليل دورة حياة ديدان البحر عن انخفاض في معدل البقاء بنسبة 22% ومعدل النمو بنسبة 2%، نتيجة لتأثير الـ MPs على المسارات البيوكيميائية الخاصة بالإجهاد التأكسدي ونواقل الإشارات العصبية. إلا أن هذه التأثيرات لا تظهر بشكل فوري، وإنما تعتمد على فترة التعرض، تركيز الجسيمات، وحجمها. وقد استمرت فترة التعرض في هذه الدراسة لمدة 14 يومًا. أظهرت النتائج أن أقل من 1% من جسيمات الـ MPs المتواجدة في البيئة تم امتصاصها وتراكمها في أنسجة الديدان، إلا أن هذه النسبة كانت كافية لإحداث اضطرابات في المسارات الأيضية على المستوى الخلوي. كما لوحظ أن بوليمر الـ PE كان الأكثر شيوعًا بين الجسيمات المتراكمة في أنسجة ديدان البحر، مما يدل على سلوك بعض البوليمرات في البيئة؛ إذ أن البوليمرات ذات القابلية الأعلى للتحلل الطبيعي، مثلPE وPP، تكون أكثر عرضة للابتلاع من قبل الكائنات الحية نظرًا لحجمها الصغير وسهولة تجزئها.

قامت دراسة بوغاطا واخرون[83] بتقييم مدى انتشار جسيمات الـ MPs في التربة، واستخدمت دودة الأرض *Eisenia andrei* كمؤشر حيوي لتقييم السمية الناتجة عن هذه الجسيمات. اشتملت الدراسة على أربعة أنواع من التربة، وهي التربة المروية بالمياه المعالجة، التربة المغطاة بالبلاستيك الزراعي (Mulching)، التربة داخل البيوت المحمية، والتربة العضوية. في بداية الدراسة، تم الكشف عن وجود الـ MPs في عينات التربة المختلفة بتراكيز تراوحت بين 13.21 و124.2 جسيم/كغ، وبأحجام تراوحت بين 0.22 و1.22 ميكرومتر، وكانت هذه الجسيمات مكوّنة أساسًا من بوليمري PEو.PBAT. لتقييم السمية، تم تحضير جسيمات بلاستيكية بحجم أقل من 100 ميكرومتر واحتضانها في أنواع التربة الأربعة مع *E.andrei* لفترتي تعرض استغرقت أسبوعًا وأسبوعين. تم قياس الاستجابة الحيوية للإجهاد التأكسدي في ديدان الأرض من خلال نشاط إنزيمات الكاتالاز (Catalase)، المالونداياليديهيد (MDA)، أستيل كولين إستيراز (AChE)، وإنزيم غلوتاثيون-أس-ترانسفيراز (GST). أظهرت التحاليل الكيميائية والكمّية أن جسيمات الـ MPs المتراكمة في أنسجة

E.andrei كانت تتكون بنسبة 75% من الألياف (Fibers)، إضافة إلى شظايا ملونة(Fragments). وقد بلغت أعلى تركيزات لجسيمات الـ MPs في أنسجة الديدان المعرضة لتربة مروية بالمياه المعالجة، بمتوسط 35.6 جسيم/غرام من الأنسجة، وبحجم تراوح بين 0.22 و1.22 ميكرومتر. وتكوّنت هذه الجسيمات من الـ PE بنسبة 100%، تلاه PP بنسبة 37.83% و PBAT بنسبة 42.42%. سُجل أعلى نشاط لإنزيم الكاتالاز (466.09 ± 91.44 ميكرومول/دقيقة/ملغ بروتين) لدى ديدان *E.andrei* المعرضة لجسيمات الـ MPs من تربة البيوت المحمية بعد أسبوع واحد من التعرض، إلا أن النشاط انخفض بعد أسبوعين إلى 163.27 ± 23.05 ميكرومول/دقيقة/ملغ بروتين، ما يعكس التأثير السلبي للتعرض المطول للإجهاد التأكسدي. من ناحية أخرى، أظهرت الدراسة زيادة في نشاط إنزيم GST بعد 14 يومًا مقارنة بالأسبوع الأول (من 239.41 ± 18.51 إلى 249.26 ± 29.11 نانومول/دقيقة/ملغ بروتين)، مما يدل على استجابة إزالة السموم الناتجة عن التعرض للميكروبلاستيك.

أجرى بوغاطا وآخرون[83] دراسة حول تأثير جسيمات MPs على التغيرات في المجتمعات البكتيرية البيئية. نُفّذت الدراسة في أربع مواقع ملوثة بMPs، وتم تحديد المجتمعات البكتيرية المرتبطة بالجسيمات البلاستيكية الطافية (Floating Plastics, FP) باستخدام تقنية تحليل تسلسل جين SrDNA16. تم استخدام الرخويات *Mytilus galloprovincialis* كنموذج حي للتغذية على MPs المجمعة من المواقع الأربعة، ثم تحليل الميكروبيوم الخاص بها بنفس التقنية الجينية. كما تم تقييم الاستجابة المناعية للرخويات من خلال قياس مستوى التعبير الجيني لبروتين الجلايكوبروتين الغني بالهيستيدين (HRG). أظهرت النتائج أن أحجام MPs المكتشفة في المواقع الأربعة تراوحت بين 300 ميكرومتر و1 ملم، وكانت مكونة من بوليمرات مختلفة، شملت PE (35.62%)، وPP (26.07%)، وPS (18.01%)، وPA (10.62%)، كما لوحظت اختلافات في تركيزات الـ MPs المستخرجة من أنسجة الرخويات، اعتمادًا على مصدر الجسيمات. علاوة على ذلك، كشفت الدراسة عن وجود تباين كبير في تركيبة المجتمعات الميكروبية داخل الرخويات، تبعًا لاختلاف مصادر الجسيمات البلاستيكية. كما تم تسجيل ارتفاع ملحوظ في مستوى التعبير الجيني للـ HRG، ما يشير إلى استجابة مناعية فسيولوجية تجاه التلوث البلاستيكي[83].

من جانب آخر، نفذ علوش وآخرون[99] دراسة هدفت إلى تقييم التأثيرات الإيكوتوكسولوجية (Ecotoxicological effects) لدواءي البيسوبرولول (Bisoprolol) والدلتيازيم (Diltiazem) وتفاعلهما مع الـ MPs من نوع PVC على مجتمعات النيماتودا (Nematoda) في الكائنات الحيوية القاعية الدقيقة (Meiobenthos) في خليج بنزرت، تونس. شملت التجربة تعريض هذه المجتمعات لتركيز 1.8 ملغ/لتر من البيسوبرولول، و 1.8 ميكروغرام/لتر من الدلتيازيم، بالإضافة إلى 20 ملغ/كغ من جسيمات الـ PVC. كما تم اختبار تأثير البيسوبرولول مع الـ MPs بتركيزات مركبة تبلغ 1.8 ميكروغرام/لتر و1.8 ملغ/لتر من البلاستيك. أظهرت النتائج انخفاضًا ملحوظًا في تنوع الأحياء الدقيقة القاعية (Meiobenthic biodiversity)، نتيجة للتأثير التآزري (Synergistic effect) بين الـ MPs والمواد الدوائية، مما يشير إلى خطر مركب (Combined risk) على التنوع البيولوجي البحري (Marine biodiversity) من جراء التلوث المشترك بالبلاستيك والملوثات الصيدلانية (Pharmaceutical pollutants).

أجرى شوشان وآخرون[93] دراسة في عام 2022 على 16 عينة من التربة الزراعية جُمعت من ولاية المكنين، حيث تُروى هذه الأراضي بمياه الصرف الصحي باستخدام تقنية التغطية بالأغشية البلاستيكية الزراعية (Films). هدفت الدراسة إلى تقييم دور الـ MPs في نقل المعادن الثقيلة إلى التربة، بالإضافة إلى تحديد تراكيز هذه الجسيمات المتراكمة في العينات. تراوحت تراكيز الـ MPs بين 50 و880 جسيمًا/كغ من التربة. وُجد أن الألياف (Fibers) بنسبة 59% والفتات البلاستيكي (Fragments) بنسبة 41% كانت الأشكال الأكثر شيوعًا، بأحجام تراوحت بين 0.3 ميكرومتر و2.5 ملم، في حين شكّلت الجسيمات التي يقل حجمها عن 1 ملم ما نسبته 74% من إجمالي الـ MPs. أما من حيث اللون، فكانت الجسيمات عديمة اللون (Colorless) الأكثر وفرة (49.1%)، تلتها الزرقاء (blue) (20.3%)، وأظهرت تحاليل FTIR أن البوليمرات الأكثر شيوعًا في العينات كانت الـ PE، وNL، وPP. كما بيّنت الدراسة قدرة هذه الجسيمات البلاستيكية على امتصاص معادن ثقيلة متنوعة، أبرزها الزئبق بتركيزات تراوحت بين 4.27 و80.58 ميكروغرام/غ، والزرنيخ الذي بلغ تركيزه 44.54 ميكروغرام/غ. وتبرز هذه النتائج خطورة الجسيمات البلاستيكية الدقيقة كمصدر ثانوي لتلوث التربة بالمعادن السامة.

في دراسة أخرى، بحث زيتوني وآخرون[94] في عام 2022 في مدى توفّر الـ MPs في أنسجة كبد الأسماك من نوع *Serranus scriba*. تم جمع العينات من ثلاث مناطق ساحلية مختلفة في تونس، تم اختيارها بناءً على تفاوت النشاط البشري فيها وتوقُّع اختلاف مستويات التلوّث البلاستيكي. كشفت النتائج عن وجود الـ MPs بتركيز بلغ 34 جسيمًا/غ من نسيج الكبد، وبأحجام تراوحت بين 0.45 و3 ميكرومتر، وكانت الجسيمات المكتشفة تتكون بنسبة 58.4% من PE وتشير نتائج الدراسة إلى أن وجود هذه الجسيمات في كبد الأسماك يُحدث تأثيرات سمية خلوية (Cytotoxicity)، وذلك من خلال الزيادة في محتوى المالونداياldهيد (MDA)، وظهور أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS)، بالإضافة إلى تغيرات في أنشطة إنزيمي الغلوتاثيون-أس-ترانسفيراز (GST) والكاتالاز (CAT)، نتيجة للإجهاد التأكسدي.كما أُثبتت السمية الجينية (Genotoxicity) من خلال التغيرات في عدد النوى الدقيقة (Micronuclei)، والسمية العصبية (Neurotoxicity) من خلال التثبيط الملحوظ في نشاط إنزيم أستيل كولين إستيراز (AChE). إضافةً إلى ذلك، تسببت جسيمات الـ MPs في اضطرابات شملت 36 مسارًا أيضيًا (Metabolic pathways)، معظمها مرتبط بعملية التمثيل الغذائي للأحماض الأمينية والطاقة، مما يبرز أثرها العميق على الصحة الحيوية للأسماك ويشير إلى إمكانية انتقال تلك التأثيرات عبر السلسلة الغذائية إلى الإنسان.

ركّزت دراسة الجعواني وآخرون[96] على التوزيع الموسمي للـ MPs في البيئة البحرية، حيث تم جمع عينات الرواسب من ثلاث مواقع خلال فصول الصيف والشتاء والربيع لعام 2019. تم الحصول على العينات من السطح حتى عمق 2 سم ومن عمق 15 سم. تراوحت التراكيز المتوسطة للـ MPs بين 680 و4900 جسيم/كغ من الرواسب في السطح والعمق، وبأحجام تراوحت بين78.35 و297.25 ميكرومتر. كشفت نتائج الدراسة أن المنتجات الطلائية (Paint particles) كانت تمثل النسبة الأكبر من الجسيمات المكتشفة (80.27%)، بينما شكّلت البوليمرات مثل PVC، وPET، وPP ما نسبته 1.97% فقط، وكانت الشظايا البلاستيكية (Plastic fragments) الشكل الأكثر شيوعًا بنسبة 70%. أظهرت الدراسة تباينًا موسميًا في وجود الـ MPs، حيث تم تسجيل تراكيز أعلى خلال فصل الربيع مقارنة بالشتاء قدر

بعدد 275 مقابل 110 جسيم/كغ، ويُعزى ذلك إلى تأثير الأشعة فوق البنفسجية (UV radiation) ودرجات الحرارة المرتفعة، التي تُسرّع من عملية التحلل الطبيعي للبلاستيك (Natural plastic degradation) إلى جسيمات صغيرة. وعلى النقيض من ذلك، في موقع آخر، كانت التراكيز أعلى خلال فصل الشتاء (405 جسيم/كغ) مقارنة بالربيع (130جسيم/كغ) والصيف (80 جسيم/كغ)، ويُحتمل أن يكون ذلك مرتبطًا بأنشطة صناعية موسمية مكثفة خلال الشتاء وما يرافقها من تصريف للنفايات[95]. وفي دراسة مماثلة، قام وقّاف وآخرون بالتحقيق في التغيرات الموسمية لتلوث الـMPs من خلال تحليل 112 عينة من الرواسب السطحية جُمعت من 28 محطة ضمن البحيرات الساحلية خلال عامي 2019 و2020. تم تحديد 715 جسيمًا بلاستيكيًا من ألوان وأشكال مختلفة للبوليمرات PE، PP، و PVC، تراوحت تراكيزها بين 33.2 جسيم/كغ جاف في عام 2020 إلى 307 جسيم/كغ جاف في عام 2019. وعلى الرغم من هذا التفاوت، لم تُسجل فروقات معنوية (Statistically significant differences) في التراكيز خلال الفصول المختلفة، مما يشير إلى استقرار نسبي في مستويات التلوث (Pollution levels) على مدار العام ضمن هذه البيئة الساحلية (Coastal environment).

أجرى أبلوح وآخرون[100] دراسة هدفت إلى تقييم وجود الـ MPs وخصائصها الفيزيائية والكيميائية في عينات بلح البحر (Mussels) المُجمّعة من المغرب وتونس. أظهرت نتائج الدراسة وجود ألياف ميكروبلاستيكية (Microplastic fibers) سوداء وزرقاء اللون، بأحجام تقل عن 1 مم، وبتكوين بلغ 87% من البولي إيثيلين (PE) في 100% من العينات. كما كشفت النتائج عن تركيزات أعلى لـ MPs في بلح البحر القادم من المغرب 0.92 – 1.88 جسيم/غرام من الوزن الرطب مقارنةً بتلك القادمة من تونس 0.97 – 1.47 جسيم من ألياف/PE غرام من الوزن الرطب، وهو ما يعكس تباين مستويات التلوث البلاستيكي بين البلدين. أشارت الدراسة إلى أن الساحل الأطلسي الأوسط في المغرب يُعدّ منطقة ساخنة (Hotspot) لتراكم الـ MPs، ويُعزى ذلك إلى ضعف كفاءة محطات معالجة مياه الصرف الصحي المحيطة، والتي تقوم بتصريف نفاياتها مباشرة إلى الساحل. في المقابل، تُعتبر أنشطة الاستزراع المائي (Aquaculture activities) وبعض الأنشطة الساحلية (Coastal activities) في تونس من المصادر الأساسية لتلوث الـ MPs في البلاد. وقدّر الباحثون أن التعرّض الغذائي السنوي لـ MPsعبر الاستهلاك يصل إلى 1262.17 جسيم/سنة في المغرب، و 78.18جسيم/سنة في تونس، خاصة بين فئة الأطفال، مما يثير القلق بشأن المخاطر الصحية (Health risks) المرتبطة بتناول المأكولات البحرية الملوثة. تم حساب مؤشر خطورة البوليمرات (Polymer Hazard Index, PHI) والذي بلغ 2168.36 في المغرب، مصنفًا ضمن المستوى الخامس، أي مستوى الخطورة العالي جدًا (1000<)، بينما بلغ 523.67 في تونس، مصنفًا ضمن المستوى الرابع، أي خطورة مرتفعة (100–1000). وتُشير هذه القيم إلى القابلية العالية لتحلل البوليمرات إلى ميكروبلاستيك، بالإضافة إلى احتمالية انتقال المواد الكيميائية السامة الناتجة عن هذا التحلل إلى الإنسان عبر السلسلة الغذائية والمياه.

ركّز عبد القادر وآخرون[101] على توزيع الـ MPs في عينات الرمال المأخوذة من ثلاث شواطئ تقع في شمال شرق تونس. وقد تم جمع ما مجموعه 7737 جسيمًا من شظايا (Fragments) وبقايا البولي إيثيلين (PE)، بتراكيز تراوحت بين 2.77 و71.89 جسيمًا/م^2. كما سجّلت الدراسة علاقة ارتباط بين تركيز الـ MPs والكثافة السكانيفي مناطق الدراسة. في دراسة أخرى، قام حسّين وآخرون[102] بالتحقيق في التوافر البيولوجي للـ MPs في 40 عينة من أسماك السردين (Sardina

pilchardus) تم جمعها من مواقع مختلفة على الساحل الشمالي التونسي. كشفت نتائج الدراسة عن وجود ألياف ميكروبلاستيكية بألوان الأسود، الأزرق، الأحمر، والأخضر في 92.5% من أجهزة الهضملدى الأسماك، بتراكيز تراوحت بين 1.1 و5.86 جسيمًا/سمكة، وفي 72.5% من خياشيم الأسماك بتراكيز تراوحت بين 1.2 و4 جسيمات/سمكة .وقد تراوحت أحجام الجسيمات بين 0.033 و0.5 ملم[101].

قدّم الصوفي وآخرون[98] دليلًا واضحًا على التوافر البيولوجي لـ MPs في 18 عينة من كريات القيء (Regurgitated pellets) لطائر النورس أصفر الساق (Yellow-legged gull) تم جمعها من منطقة صفاقس، تونس، والتي تم اختيارها نظرًا لشدة الأنشطة البشرية فيها. من بين 309 جسيمًا تم رصدها، تراوحت تراكيز الـ MPs في العينات بين 1.44 و8.46 جسيمًا/غرام. شكّلت الألياف (Fibers) نسبة 63.8% من الجسيمات المكتشفة، بينما مثّلت الشظايا البلاستيكية نسبة 36.2%، بتراكيز تراوحت بين 1.13 و4.61 جسيمًا/غرام. أظهرت التحاليل أن 40% من الـ MPs المكتشفة تتكوّن من السليلوز الصناعي (Synthetic cellulose)، كما تم تحديد وجود البولي إيثيلين (PE) والإيثيلين-فينيل أسيتات (Ethylene-vinyl acetate, EVA) تراوحت أحجام شظايا الـ MPs بين 0.026 و3.965 ملم، في حين تراوحت أطوال الألياف (Fibers) بين 0.025 و2.821 ملم[98]. في دراسة أخرى، قيّم الشبّي وآخرون[103] تأثير جزيئات الـ MPs في التربة الملوثة على العمليات الفسيولوجية للنباتات، مثل محتوى الكلوروفيل، والمعايير الزراعية، وتراكم المعادن الثقيلة في أنسجة النبات، بالإضافة إلى الحالة التأكسدية (Oxidative status). استخدم الباحثون نبات البرسيم (Alfalfa) كنموذج للتعرض لتربة ملوثة بالمعدن الثقيل والـ MPs بتركيزات1 و100 ملغم/كغ من التربة لمدة 60 يومًا. أظهرت النتائج أن عملية التمثيل الضوئي والمعايير الزراعية تأثرت سلبًا بوجود الـ MPs، حيث لوحظ انخفاض في محتوى الكلوروفيل، بينما زاد طول الساق عند التعرض لتركيز 1 ملغم/كغ. تراكمت المعادن الثقيلة في جذور النباتات، حيث سُجل تراكم النحاس (Cu) عند التركيز المنخفض، في حين انخفض تراكم الزنك (Zn) والرصاص (Pb). أما عند التركيز الأعلى (100 ملغم/كغ)، فلوحظ تراكم أكبر للزنك، إلى جانب تحفيز الإجهاد التأكسدي، كما دلّت تحاليل نشاط إنزيم الكاتالاز (Catalase, CAT) ومستوى المالونديالدهيد (Malondialdehyde, MDA). تعكس هذه النتائج دور جزيئات الـ MPs في إظهار السمية الفطرية للنباتات (Phytotoxicity)، وإعاقة عملية التمثيل الضوئي، بالإضافة إلى تعزيز تراكم المعادن الثقيلة، حيث تعمل هذه الجسيمات كناقلات تسهم في انتقال المعادن الثقيلة إلى أجزاء النبات المختلفة مثل الساق والجذور.

وتُظهر هذه الدراسات أن الجهود البحثية في تونس لا تقتصر على رصد وتوصيف وجود الـ MPs في الأوساط البيئية فحسب، بل تميل بوضوح نحو تحليل التوافر الحيوي والتأثيرات السمية لهذه الجزيئات على الكائنات البحرية .إذ ركزت نسبة كبيرة من الأوراق العلمية على فهم الاستجابات الفسيولوجية والبيوكيميائية للكائنات الحية نتيجة التعرض للميكروبلاستيك، مستخدمة مؤشرات متقدمة مثل نشاط الإنزيمات ومحتوى البروتينات المرتبطة بالإجهاد الخلوي. يعكس هذا الاتجاه تطورًا نوعيًا في مقاربة مشكلة التلوث البلاستيكي في تونس، من مجرد الرصد الكمي إلى تقييم الأثر البيئي والصحي المحتمل، ما يعزز من أهمية هذه الأبحاث في دعم جهود الإدارة البيئية ووضع السياسات الوقائية في المنطقة.

4.2.2 جمهورية مصر العربية

مصر تناولت موضوع الـ MPs خلال العقد الأخير، وتحديدًا منذ عام 2016، حيث بدأت الاهتمامات تتزايد تدريجيًا بتأثير هذا النوع من التلوث على البيئات المائية. وقد أُجريت أكثر من 70% من هذه الدراسات بالتعاون مع مؤسسات بحثية دولية، خاصةً من ألمانيا وإيطاليا (انظر جدول 4.2). وقد تم تصنيف هذه الدراسات إلى ثلاث فئات رئيسية بما في ذلك، تقييم انتشار الـ MPs في البيئات المختلفة مثل نهر النيل، البحر الأحمر، البحر المتوسط، والبحيرات الشمالية، دراسة التأثيرات السمية والتوافر الحيوي على الكائنات الحية المائية وأخيرًا استخدام التحليلات الكيميائية والبيولوجية للكشف عن خصائص الـ MPs. أبرز هذه الدراسات كانت تلك التي أُجريت على نهر النيل، حيث تبين أن النهر يمثل أحد أكبر المصادر الطبيعية الملوثة بالـ MPs في مصر، نتيجة الصرف الصناعي والمنزلي، والنفايات البلاستيكية. وقد أظهرت النتائج أن أكثر الأشكال شيوعًا للميكروبلاستيك كانت الألياف (Fibers) والشظايا (Fragments)، مع انتشار واسع للبولي إيثيلين (PE) والبولي بروبيلين (PP)، نتيجة الاستخدام الواسع لهذين النوعين من البلاستيك في الزراعة والتعبئة. كما أظهرت الدراسات التي أُجريت في خليج السويس والبحر الأحمر تركزًا واضحًا للميكروبلاستيك في المناطق القريبة من النشاط السياحي والموانئ، حيث تم العثور على تراكيز تجاوزت 3000 جسيم/كغ من الرواسب الجافة في بعض المواقع. في المقابل، كانت البحيرات الشمالية، مثل بحيرة البرلس والمنزلة، عرضة لتراكم الـ MPs نتيجة الأنشطة الزراعية والصيد المكثف.

وقد استعان الباحثون في مصر بمجموعة من الأدوات التحليلية الدقيقة مثل FTIR وRaman spectroscopy، إلى جانب SEM لتحديد أشكال الجسيمات، كما استخدموا تقنيات مثل GC-MS و TGA لتحديد نوع البوليمر والمكونات المرتبطة به. أما من الناحية البيولوجية، فقد تم استخدام إنزيمات مثلAChE وGST كمؤشرات حيوية لتقييم الإجهاد التأكسدي والتأثيرات العصبية للميكروبلاستيك، خاصة على الأسماك والمحار. ورغم دقة التحاليل، لم تشهد مصر حتى الآن تطويرًا كبيرًا في بروتوكولات استخراج أو تصنيف الـ MPs مقارنةً بالمعايير الدولية، حيث لا تزال معظم الدراسات تعتمد على الطرق التقليدية للفصل الكثافي (Density separation) والترشيح اليدوي (Manual filtration)، وهذا يشير إلى الحاجة لتعزيز الاستثمار في البنية التحتية البحثية وتدريب الكوادر على استخدام تقنيات أكثر تطورًا.

في هذا الإطار تعد دراسة خان وزملائه[104] من أوائل الدراسات التي قدمت دليلًا واضحًا على تلوث نهر النيل بجزيئات الـ MPs، حيث ركز الباحثون على تحليل تواجد هذه الجسيمات في الجهاز الهضمي لنوعين من الأسماك المهمة اقتصاديًا وبيئيًا هما البلطي النيلي (*Oreochromis niloticus*) وسمك السلور (*Bagrus bayad*) في مدينة القاهرة. تم جمع 43 عينة من الأسماك من بائعين محليين في أسواق المدينة، وكشفت النتائج أن أكثر من 75% من الأسماك المدروسة تحتوي على جزيئات MPs في أجهزتها الهضمية، حيث بلغت النسبة 75.9% للبلطي النيلي و78.6% لسمك السلور، مما يدل على تعرض واسع النطاق لهذه الأنواع الحيوانية لهذه الملوثات. شكلت الألياف (Fibers) النوع الأكثر شيوعًا من الـ MPs بنسبة 65%، تلتها الأغشية (Films) بنسبة 26.5%، ثم القطع البلاستيكية، وهو نمط يتوافق مع الدراسات السابقة حول مصادر النفايات البلاستيكية. وباستخدام تقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR)، تم التعرف على الأنواع البوليمرية الأكثر انتشارًا في العينات، والتي شملت البولي إيثيلين (PE)، البولي إيثيلين تيرفثالات

(PET)، والبولي بروبيلين (PP)، وهي مواد بلاستيكية شائعة في الاستخدامات اليومية. تُبرز هذه الدراسة أن نسبة ابتلاع الـ MPs بين أسماك نهر النيل بالقاهرة تعد من بين الأعلى على مستوى العالم مقارنة ببيئات مائية أخرى، مما يشير إلى وجود تهديد بيئي وصحي واضح يواجه هذه الأنواع وبالتالي النظام البيئي المحيط .وتوصي الدراسة بضرورة تكثيف الأبحاث المتخصصة ووضع استراتيجيات عاجلة للحد من تلوث الـ MPs في نهر النيل، لما له من أثر مباشر على صحة الإنسان والثروة السمكية. إضافة إلى ذلك، أجرى سيد وآخرون[105] دراسة مسحية لرصد مدى توزيع وتركيز وتركيب الـ MPs في المياه السطحية، الرواسب، والأسماك على السواحل المصرية في البحرين الأحمر والمتوسط. كشفت الدراسة عن أعلى تراكيز في عينات الرواسب والمياه في محطة رأس غارب بالبحر الأحمر، ومحطتي دمياط وبورسعيد في البحر المتوسط، فيما سُجلت أدنى التراكيز في عين السخنة ومرسى مطروح. أما في الأسماك، فكان البوليمران الأكثر شيوعًا هما الرايون (Rayon) والبولي إيثيلين تيريفثاليت (PET)، ما يشير إلى تعرض الكائنات البحرية لمصادر متنوعة من النفايات البلاستيكية. تؤكد هذه النتائج انتشار الـ MPs في البيئات البحرية المصرية، مما يعزز من فهم المخاطر البيئية المحتملة على الثروة السمكية والنظم البيئية، ويبرز الحاجة لتطبيق إجراءات صارمة للحد من تدفق البلاستيك إلى البيئات الساحلية. أما في دراسة أخرى، قدم غاني وآخرون[106] تحليلاً مفصلاً لجسيمات البلاستيك المتراكمة على شواطئ الإسكندرية، باعتبارها ثاني أكبر مدينة في مصر ومصدرًا رئيسيًا لمخلفات البلاستيك التي تدخل شرق البحر المتوسط. استخدم الباحثون تقنيات المجهر (Microscopy) والتحليل الحراري (Thermal analysis) لفحص أنواع وتركيب الـ MPs وتحديد مصادره المحتملة. بلغت متوسط تراكيز الرواسب 285.9 ± 389.1 جسيم/كغم، وهي مستويات مشابهة لمناطق أخرى من شرق البحر المتوسط، بينما كان متوسط تراكيز المياه السطحية 281.8 ± 457.4 جسيم/م^3، وهو الأعلى مسجلًا في المياه الساحلية للبحر المتوسط. أظهر التحليل الحراري التدرجي (Thermogravimetric analysis, TGA) أن البلاستيك يشكّل ما بين 0.5 و72% من المواد المستخرجة من الرواسب، وما بين 0.58 و20.6 % من عينات المياه. كما حدد التحليل الماسح التفاضلي للحرارة (Differential scanning calorimetry, DSC) عشرة بوليمرات شبه بلورية، مع شيوع البولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE) وبولي إيثيلين فينيل أسيتات (PEVA). حددت الدراسة مصادر التلوث البرية، مثل الأكياس البلاستيكية ذات الاستخدام الواحد ومنتجات التنظيف، والمصادر البحرية مثل الطلاءات المضادة للتآكل، صيانة السفن، ومعدات الصيد المهجورة. أوصت الدراسة بوضع خطط فعالة لإدارة النفايات المنزلية، وتطبيق مبدأ "الملوث يدفع (Polluter pays principle)"، وتنفيذ برامج توعية للصيادين للحد من تأثيرات تلوث البلاستيك على معيشتهم.

فيما يتعلق بتدفق الـ MPs من المياه العذبة إلى البحر، قدمت شباكة وآخرون[107] تقييمًا شاملاً لانتشار ال MPs في مصبات دلتا النيل، التي تُعرف بـ"النيل البلاستيكي"، نظرًا للأهمية الحيوية للمياه العذبة. ركزت الدراسة على قياس تدفق الـ MPs من فرعي رشيد ودمياط ومياه بحيرة البرلس (Lake Burullus) إلى البحر المتوسط خلال عام 2021. أظهرت النتائج تراكيز مرتفعة من الـ MPs في المياه السطحية (319 ± 761 إلى 1008 ± 1718 جسيم/م^3)، وفي الرواسب (137 ± 167 إلى 1303 ± 1630 جسيم/ كغم جاف). استخدم الباحثون خرائط استخدام الأراضي (Landuse maps) من صور Sentinel-2 لتحديد مصادر التلوث المختلفة، وطبقوا تحليلات حرارية (Thermal analyses) لتحديد سبعة أنواع من البوليمرات شملت البولي إيثيلين (PE)، والبولي بروبيلين (PP)، والبولي إيثيلين

تيرفتالات (PET)، والبولي إيثيلين فينيل أسيتات (PEVA)، والبولي تترا فلورو إيثيلين (PTFE). كانت جسيمات الـ MPs من شظايا ملونة ولامعة (Fragments)، بحجم أقل من 500 ميكرومتر، ومرتبطة أساسًا بمصادر تلوث برية. وُقدرت كمية الـ MPs المتدفقة إلى البحر المتوسط بين 80 إلى 106 مليار جسيم سنويًا، مما يؤكد الحاجة إلى وضع خطط ملزمة للحد من النفايات البلاستيكية في دلتا النيل، وإنشاء نقاط مراقبة بيئية منتظمة على الساحل[107].

في سياق متصل، قدم السيد وآخرون[108] تقييمًا لتلوث الـ MPs في الأسماك التجارية بمدينة الإسكندرية، التي تقع على الساحل المتوسطي لمصر. وبالنظر إلى أن البحر الأبيض المتوسط يُعد حوضًا شبه مغلق وكثيف السكان، فقد اعتُبر مركزًا رئيسيًا لتلوث البلاستيك، وكانت الإسكندرية من المدن الكبرى المساهمة في هذه المشكلة في الحوض الشرقي . شملت الدراسة تحليل تلوث الـ MPs في الجهاز الهضمي لأسماك تجارية مأخوذة من خليج أبو قير (Abu Qir Bay) والميناء الشرقي (Eastern Harbor)، اللتين تتأثران بشدة بتلوث البلاستيك. بلغت نسبة التلوث بالـ MPs في الأسماك 91.8 ± 8.4%، بمتوسط 9.5 ± 11.7 جسيمًا لكل سمكة، وهي مستويات مشابهة لمناطق متضررة في جنوب شرق البحر المتوسط. كان تركيز الـ MPs الأعلى في سمكة *Sparus aurata*، تليها *Siganus rivulatus* و *Boops boops*. أما من حيث التركيب البوليمري، سادت مادة البولي إيثيلين (PE)، وبولي إيثيلين-فينيل أسيتات (PEVA)، مع تسجيل أربعة أنواع من البوليمرات في *Siganus rivulatus* وخمسة في *Parupeneus macronemus*. وأشارت الدراسة إلى أن القطع الصغيرة اللامعة (أصغر من 500 ميكرومتر) في عينات خليج أبو قير تعود إلى مصادر تلوث برية مثل النفايات المنزلية والزراعية والصناعية، بينما في الميناء الشرقي كانت القطع الأكبر والخيوط الملونة (Filaments) أكثر شيوعًا، مما يشير إلى مصادر بحرية مثل معدات الصيد والنشاطات الترفيهية.

جدول 4.2: ملخص الدراسات التي أُجريت في مصر على الـ MPs

نوع العينة	حجم الـ MPs	سنة الدراسة	أكثر أنواع MPs اكتشافًا	التركيزات	المراجع
أسماك بحرية (Marine fish)	نانومتر، وميكرومتر، و 2 – 5 ملم	2025	Thermoplastics (7 types)	28 – 7527 جسيم/سمكة	**109**
مياه، رواسب شاطئية (Water, Beach sediment)	ميكرومتر	2024	Polyamide, Rayon	1.3 جسيم/لتر (مياه)، 446.9 جسيم/كغ (رواسب)	**110**
لا فقاريات بحرية (Marine invertebrates)	ميكرومتر	2023	Diverse (Tourism-related)	8.2 – 136.5 جسيم/فرد، 0.2 – 18.1 جسيم/غرام	**111**
مياه، رواسب (Sediment ,Water)	ميكرومتر	2023	PE, PP	أقل من 200 جسيم/كغ	**112**
أسماك بحرية (Marine fish)	ميكرومتر	2023	PE, PP	تراكيز أعلى في الغردقة	**113**
مياه، رواسب، أسماك، جمبري (Water, Sediment, Fish, Shrimp)	ميكرومتر ومتوسط الحجم	2023	NR	بلاستيك متوسط/كبير الحجم، تلوث مرتفع في بعض الأنواع	**114**
أسماك بحرية (Marine fish)	ميكرومتر (1-5 ملم)	2022	PE, PEVA	11.7 جسيم/سمكة، 91.8% معدل حدوث	**108**
محار (Mussels)	ميكرومتر (1-2 ملم)	2022	PE, PP, PS	1.65 جسيم/فرد، 0.58 جسيم/غرام	**115**
مياه، رواسب (Sediment ,Water)	ميكرومتر (متفاوت الحجم)	2022	LDPE, PEVA	389.1 جسيم/كغ في الرواسب، 457.4 جسيم/م^3 في المياه	**106**
مياه، رواسب (Sediment ,Water)	ميكرومتر	2022	PE, PP, PET, PEVA, PTFE	80 – 106 مليار جسيم/سنة (دلتا النيل)	**107**
مياه، رواسب، أسماك (Water, Sediment, Fish)	ميكرومتر	2021	PET, Rayon	أعلى تراكيز في دمياط وبورسعيد	**105**

توجد بيانات غير متوفرة (NR: غير مذكور) لبعض الأنواع في بعض الدول، مما يشير إلى نقص في الدراسات أو عدم توفر بيانات دقيقة

في دراسة متميزة، استغل برومر وآخرون[116] حطام سفينة SS Hamada الغارقة منذ 29 عامًا على ساحل محمية وادي الجمال الوطنية (Wadi El Gemal National Park) في مصر كمعمل طبيعي لدراسة تحلل MPs في البيئة البحرية. وفرت هذه الحالة الفريدة فرصة نادرة لتحديد زمن بقاء جزيئات البلاستيك ضمن الحطام والشاطئ المجاور بدقة غير مسبوقة. اعتمد الباحثون في تحليلهم على مجموعة من التقنيات المتقدمة، منها الميكروسكوبية (Microscopy)، والتصوير بالأشعة السينية المقطعية (X-ray computed tomography)، والتحليل الطيفي (Spectroscopy)، والمعايرة الحرارية (Thermal analysis)، وكروماتوغرافيا الاختراق الهلامي (Gel permeation chromatography, GPC)، والريولوجيا (Rheology) لفحص تركيب وجوانب التحلل المختلفة لجسيمات البلاستيك. وأظهرت النتائج أن الغالبية العظمى من الجسيمات تتألف من البولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE)، مع وجود نسبة أقل من البولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE). على صعيد التحلل، تباينت حالة الجسيمات بحسب موقعها، حيث لم تظهر جزيئات البلاستيك داخل الحطام علامات ملحوظة على التحلل مقارنةً بالعينات المرجعية غير المتأثرة، بينما كشفت الجسيمات التي جرفتها الأمواج إلى الشاطئ عن تغيرات بنيوية واضحة، وصلت أحيانًا إلى درجة تفتت البلاستيك. هذا يشير إلى بطء تحلل البلاستيك في بيئة المياه المالحة، مع دور بارز للتعرض للأشعة فوق البنفسجية (UV exposure) وارتفاع درجات الحرارة على الشواطئ في تعزيز عملية التحلل والتفتت. تُسلط هذه الدراسة الضوء على أهمية إجراء أبحاث طويلة الأمد لفهم آليات وأزمنة تحلل البلاستيك في البيئات البحرية والساحلية المختلفة، وهو أمر ضروري لتطوير استراتيجيات فعالة لإدارة النفايات البلاستيكية وحماية النظم البيئية البحرية [116]. على الجانب الآخر، قامت سعيد وآخرون[115] بدراسة لتقييم مستويات الـ MPs في البيئة البحرية للسواحل الجنوبية الشرقية للبحر الأبيض المتوسط، باستخدام المحار *Arca noae* كمؤشر حيوي (Bioindicator). جُمعت العينات من خمسة مواقع في محافظة الإسكندرية، وأظهرت النتائج أن 48% من العينات احتوت أنسجتهم الرخوية على الـ MPs، بمتوسط 1.65 ± 0.28 جسيمًا و0.04 ± 0.58 جسيم/غم من الوزن الرطب. كان البولي إيثيلين (PE) هو البوليمر الأكثر شيوعًا، يليه البولي بروبيلين (PP) والبولي ستيرين (PS). تؤكد الدراسة أهمية استخدام A.noae كمؤشر حيوي مبكر في برامج الرصد البيئي لرصد تلوث الـ MPs في النظم الساحلية.

على الساحل المصري للبحر الأحمر، أجرى عبد القادر وآخرون[111] أول تقييم شامل لتركيزات وتوزيع الـ MPs في اللافقاريات البحرية بهدف تقييم المخاطر البيئية المحتملة. شملت الدراسة جمع 110 عينه من 11 نوعًا من الشعب الحيوانية المختلفة مثل ذوات المصراعين (Bivalves)، والبطنقدميات (Gastropods)، وقنافذ البحر (Sea urchins)، وخيار البحر (Sea cucumbers) وذلك من منطقة سياحية نشطة. أظهرت النتائج وجود الـ MPs بنسبة 100% في العينات، بتراكيز تراوحت بين 8.2 و136.5 جسيم/عينه، أو بين 0.2 و18.1 جسيم/غم من وزن الأنسجة الرطبة، باختلاف الأنواع. سجّلت ذوات المصراعين (Bivalves) أعلى تركيز نسبي للميكروبلاستيك، خاصة النوع *Brachidontes pharaonis*، في حين أظهرت *Actinopyga crassa* خيار البحر أعلى وفرة إجمالية. أظهر تحليل البوليمرات ارتباط أنواع البلاستيك بالنشاطات السياحية والنقل البحري. وعلى الرغم من تعرض الإنسان للميكروبلاستيك عبر استهلاك ذوات المصراعين، قدّرت الدراسة المخاطر على الإنسان بأنها ضئيلة، مع التأكيد على ضرورة توسيع الأبحاث لرصد الملوثات البلاستيكية في البحر الأحمر وتقييم تداعياتها البيئية والصحية[111].

أجرت غاني وآخرون[112] تقييمًا شاملاً للـ MPs في مياه البحر الأحمر وخليجي السويس والعقبة على الشواطئ المصرية، حيث أظهرت النتائج تفاوتًا ملحوظًا في تراكيز الـ MPs بين المواقع، مع متوسط تراكيز تراوح بين 23.3 ± 15.28 و930.0 ± 181.9 جسيم/كغم من الوزن الجاف (Dry weight). سجلت 12 موقعًا من أصل 17 تراكيز أقل من 200 جسيم/كغم، مما يدل على انتشار منخفض نسبيًا مقارنة بسواحل البحر المتوسط المصرية. كان مؤشر تحميل التلوث (Pollution Load Index)منخفضًا إلى متوسط في معظم المواقع، مع تسجيل منطقة رأس محمد المحمية بحريًا أعلى معدلات تعرض للتلوث. جميع الجسيمات المكتشفة كانت من النوع الثانوي (Secondary MPs) أي شظايا متحللة. وأشارت التحاليل الطيفية بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) إلى أن البوليمرات الرئيسية كانت البولي إثيلين (PE)، البولي بروبيلين(PP) فيما أظهر التصوير المجهري الإلكتروني (SEM) المدمج مع التحليل الطيفي بالأشعة السينية للطاقة (EDX) علامات واضحة على التحلل، مما يشير إلى تكسر الجسيمات إلى قطع أصغر (Fragmentation) تمثل تهديدًا بيئيًا مستمرًا.

في إطار التوسع في تقييم تأثير الـ MPs على الثروة السمكية وصحة الإنسان، قام حامد وآخرون[113] بدراسة مفصلة لتوزيع وتراكم وتركيب الـ MPs في أسماك الأسواق البحرية التابعة للسواحل المصرية لكل من البحر الأحمر والبحر المتوسط. هدفت الدراسة إلى تقييم مدى انتشار جسيمات الـ MPs في الأسماك المتداولة في الأسواق، مع التركيز على التأثيرات المحتملة على الكائنات البحرية وصحة الإنسان عبر الاستهلاك المباشر لهذه الأسماك. جُمعت العينات من أربعة أسواق رئيسية في مايو 2021، شملت مدينتي الغردقة والسويس على ساحل البحر الأحمر، ومدينتي بورسعيد والإسكندرية . تم تحليل الجهاز الهضمي للأسماك، ممثلاً في المعدة والأمعاء، للتأكد من وجود جسيمات الـ MPs، لوحظ وجود علاقة إيجابية واضحة بين حجم الأسماك وتركيز الـ MPs المتراكم داخل الجهاز الهضمي، مما يشير إلى أن الأسماك الأكبر حجمًا تتعرض لتراكم أكبر من الجسيمات البلاستيكية، ربما نتيجة لطبيعة تغذيتها أو مدة بقائها في البيئات الملوثة. أما من حيث حجم جسيمات الـ MPs. فقد كانت أكثر الفئات تكرارًا هي الجسيمات الأكبر من 5000 ميكرومتر بنسبة 26%، والجسيمات بين 500 و1000 ميكرومتر بنسبة 25.8%، الجسيمات بين 1000 و5000 ميكرومتر بنسبة 22.7%، هذا التوزيع يدل على أن الجسيمات الكبيرة هي السائدة في التراكم داخل الأسماك، مع وجود نسبة مهمة من الجسيمات المتوسطة والصغيرة، والتي قد تكون أكثر قدرة على النفاذ إلى الأنسجة الأعمق في مراحل التلوث المتقدمة. توزيع تراكيز الـ MPs بين المواقع المختلفة أظهر تفاوتًا ملحوظًا، حيث سجلت أسماك الأسواق في الغردقة أعلى متوسط تركيز للـ MPs بمعدل 4.16 جسيم لكل عينة، مما يعكس مستوى التلوث المرتفع في مياه البحر الأحمر القريبة من هذه المنطقة، والذي قد يكون مرتبطًا بالنشاطات السياحية والصناعية أما من حيث التركيب الكيميائي ، فقد تبين أن أسماك البحر الأحمر تحتوي بنسبة 59.4% على البولي إيثيلين (PE)، تليه نسبة 24.8% من البولي بروبيلين (PP)، في حين كانت النسبة الأعلى في أسماك البحر المتوسط من البولي بروبيلين (PP) بنسبة 48.5%، يليه البولي إيثيلين (PE) بنسبة 35.9%. وقد خلصت الدراسة إلى أن هناك عدة عوامل رئيسية تؤثر في تراكم الـ MPs في الأسماك، من أبرزها حجم الأسماك، ونوع النظام الغذائي، والموطن الجغرافي. وتؤكد النتائج على الحاجة الملحة إلى تعزيز الجهود المبذولة لإزالة البلاستيك من البيئات البحرية المصرية، سواء من خلال تحسين إدارة النفايات أو عبر تعزيز السياسات البيئية، وذلك

بهدف الحد من التأثيرات السلبية المتزايدة التي يشكلها تلوث الـ MPs على النظم البيئية البحرية، والثروة السمكية، وكذلك صحة الإنسان الذي يعتمد بشكل مباشر على المنتجات البحرية كمصدر غذائي أساسي[113].

في سياق التقييم الشامل للـ MPs أجرى حسن وآخرون[114] دراسة ميدانية على انتشار الـ MPs في نهر النيل بمنطقة صعيد مصر. تركزت الدراسة على تحليل التلوث في المياه والحطام العائم والرواسب، إضافة إلى تقييم وجود هذه الجزيئات في الكائنات الحية مثل الأسماك والجمبري النهري. أظهرت نتائج الدراسة وفرة ملحوظة للـ MPs في جميع مكونات البيئة المائية المدروسة، مع تباين في التوزيع المكاني. برز موقع نجع حمادي (Nagaa Hammadi) كأعلى المواقع من حيث تلوث المياه والرواسب بهذه الجسيمات، ما يعكس وجود مصادر تلوث محلية ذات تأثير كبير. أما من الناحية البيولوجية، فقد كانت أسماك القرموط الإفريقي (African catfish, Clarias gariepinus) أكثر الكائنات احتواءً على هذه الجزيئات، إذ تم رصدها في الجهاز الهضمي والخياشيم، مع تسجيل أعلى تراكيز للجزيئات متوسطة الحجم (Mesoplastics) في إدفو وللجزيئات الكبيرة (Macroplastics) في موقع الوسطى. في المقابل، لم تُرصد أي MPs في البلطي النيلي (Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*)، مما يشير إلى اختلاف في طرق التعرض أو التراكم بين الأنواع . كما تم اكتشاف وجود جزيئات بلاستيكية متوسطة الحجم فقط في الجهاز الهضمي للجمبري النهري، مع غياب للجزيئات الكبيرة، وكان نجع حمادي أيضاً الموقع الأعلى من حيث وجود هذه الجزيئات في الجمبري. تؤكد هذه النتائج أن تلوث نهر النيل بالبلاستيك متغلغل على مستويات متعددة في النظام البيئي النهري، مما يستدعي تبني استراتيجيات مستدامة للحد من مصادر التلوث، بالإضافة إلى ضرورة مواصلة الرصد والتوعية لحماية الموارد المائية[114].

في دراسة حديثة أُجريت في محافظة سوهاج بصعيد مصر، قدّم خضر وآخرون[117] تقييمًا دقيقًا لتلوث مياه الصرف الصحي بالـ MPs مع استخدام يرقات الكيرونوموس (*Chironomus* sp.) كمؤشر حيوي لرصد التراكم الحيوي لهذه الملوثات. شملت الدراسة تحليل أربع عينات بيئية تمثلت في الحمأة، عمود الماء، وأجسام اليرقات، والأنابيب التي تبنيها هذه اليرقات. أظهرت النتائج انتشارًا واسعًا لجسيمات الـ MPs، حيث سادت الألياف المصنوعة من البوليستر بالألوان الحمراء والزرقاء من حيث النوع واللون. بلغ متوسط تركيز الـ MPs في الحمأة 84 ± 310 جزيئة/كغم (وزن جاف)، بينما كانت التراكيز في المياه السطحية أقل بكثير وبلغت 0.7 ± 1.55 جزيئة/لتر. على المستوى الحيوي، رُصدت جسيمات الـ MPs في أجسام اليرقات بمتوسط تراكم بلغ 21 ± 71 جزيئة/غرام (وزن رطب)، كما تم اكتشافها في الأنابيب بمعدل 1.1 ± 4.41 جزيئة/غرام. علاوة على ذلك، بيّنت التحاليل الكيميائية وجود تراكيز مرتفعة من المعادن الثقيلة المرتبطة بجسيمات الـ MPs وداخل أنسجة اليرقات، وخاصة النحاس (Cu)، والرصاص (Pb)، والكادميوم (Cd)، والنيكل (Ni). يشير هذا الترافق بين البلاستيك والمعادن إلى قدرة الـ MPs على امتصاص ونقل ملوثات كيميائية عالية السمية، مما يعزز فرضية دور هذه الجزيئات في تسهيل انتقال السموم عبر السلسلة الغذائية. وتؤكد هذه الدراسة أن مياه الصرف الصحي تمثل بيئة حرجة لتراكم الـ MPs، حيث لا تقتصر آثارها على تدهور جودة المياه، بل تمتد لتشمل الكائنات الحية من خلال آليات التراكم الحيوي والآثار السمية المصاحبة. وبناءً على هذه النتائج، توصي الدراسة بضرورة تعزيز برامج الرصد البيئي المستمر، ووضع إستراتيجيات وطنية متكاملة للحد من مصادر تلوث الـ MPs في البيئات المائية.

في دراسة رصدية رائدة امتدت خلال موسمين عام 2020 على طول الساحل الإسكندري في مصر، قام حمدي وآخرون[110] بتحليل توزيع الـ MPs في المياه السطحية، رواسب قاع البحر ورمال الشواطئ عبر خمس محطات من الشرق إلى الغرب. أظهرت النتائج تفاوتًا موسميًا واضحًا، فقد بلغ متوسط وفرة الـ MPs في المياه السطحية نحو 1.3 جسيم/لتر مع زيادة ملحوظة خلال الموسم الرطب، ما يعكس تأثير دورة الأمطار على نقل الـ MPs. وفي المقابل، تراكمت الجسيمات بشكل أكثر كثافة في رمال الشاطئ (446.9 جسيم/كغم) مقارنة برواسب القاع (170.6 جسيم/كغم)، مرجحين بأن حركة الأمواج والتيارات البحرية تركز الملوثات بالقرب من الشاطئ. اتسمت الغالبية العظمى من الـ MPs بشكل ألياف بألوان زرقاء وشفافة وأحجام تفوق 1 مم، مما يدل على تنوع مصادر التلوث، بينما كشف التحليل الكيميائي المتقدم هيمنة البولي أميد (Polyamide, Nylon) والرايون (Rayon) مما يشير إلى مساهمة الصناعات النسيجية في انبعاث هذه الجسيمات. وبالاستناد إلى مؤشري خطر البوليمر (Polymer Hazard Index, PHI) والخطر البيئي المحتمل (Potential Ecological Risk Index ,PERI) صنفت منطقة سيدي بشر أرفع درجات الخطورة، ما يستدعي إجراءات عاجلة لتعزيز استراتيجيات الحد من مصادر الميكروبلاستيك وتطوير برامج رصد دورية لقياس فاعلية التدخلات البيئية.

تناولت دراسة خضري وآخرون[118] موضوعًا مبتكرًا يسلط الضوء على دور الطفيليات المائية، وتحديدًا عناكب المياه، في التأثير على تراكم الـ MPs داخل الحشرات المائية في بيئات الصرف الصحي. أُجريت الدراسة في محافظة سوهاج بصعيد مصر، حيث جُمعت البيانات من موقعين مختلفين من حيث طبيعة الصرف أحدهما ذو طابع سكني، والآخر صناعي، بهدف تقييم التوزيع الموسمي للـ MPs، وخصائصها، وكذلك التفاعلات البيولوجية المرتبطة بها. كشفت النتائج عن تفاوت واضح في تركيز جزيئات الـ MPs بين الموقعين، حيث سجل الموقع الصناعي أعلى التراكيز بمعدل 0.9 ± 3.01 جزيئة/لتر، مقارنة مع 0.79 ± 2.05 جزيئة/لتر في الموقع السكني، عبر مختلف الفصول. كما بينت الدراسة أن الحشرات المائية المصابة بعناكب المياه في الموقع الصناعي احتوت على مستويات أعلى بكثير من جزيئات الـ MPs مقارنة بتلك غير المصابة، وهو ما لم يُسجل في الموقع السكني، حيث غابت هذه الطفيليات. علاوة على ذلك، أظهرت عناكب المياه البالغة نفسها تراكمًا ملموسًا لجزيئات الـ MPs، مما يدعم فرضية انتقال الملوثات عبر الشبكة الغذائية. من حيث الخصائص الشكلية، سادت الألياف (Fibers) تليها القطع البلاستيكية الصغيرة، وكان النطاق الحجمي الأكثر تكرارًا بين 500 و2000 ميكرومتر، بألوان شائعة تضمنت الأزرق، الأحمر، والأسود. أما التحليل الطيفي باستخدام FTIR فقد حدد ثلاثة بوليمرات رئيسية مكونة للجسيمات شملت البوليستر (PES)، والبولي بروبيلين (PP)، والبولي إيثيلين (PE). تمثل هذه الدراسة أول توثيق علمي للعلاقة بين الإصابة الطفيلية في الحشرات المائية وتراكم الـ MPs في أجسامها، مما يفتح آفاقًا بحثية جديدة لفهم تأثير الطفيليات على ديناميكيات التلوث البلاستيكي في الأنظمة البيئية للمياه العذبة .وتوصي الدراسة بضرورة إجراء أبحاث موسعة حول تأثير هذه التفاعلات البيولوجية على نقل الملوثات عبر السلسلة الغذائية، وعلى التوازن البيئي العام في بيئات الصرف والأنهار.

وبنظرة شاملة إلى مجمل الدراسات التي أُجريت في مصر حول تلوث الـ MPs، يمكن القول إنها شكّلت قاعدة معرفية أساسية وضرورية لرصد انتشار هذه الجسيمات في البيئة النهرية والبحرية، خصوصًا في دلتا النيل وشمال البلاد. فقد ركزت معظم هذه الأبحاث على توصيف الملوثات البلاستيكية في المياه والرواسب والكائنات الحية، مع توظيف

أدوات تحليلية تقليدية مثل FTIR و SEM. إلا أن الطابع الرصدي ظل غالبًا، في ظل غياب نسبي للدراسات التجريبية أو السمية التي تستهدف فهم التأثيرات البيولوجية العميقة لهذه الجسيمات على الأنظمة الحية. وفي هذا السياق، تُبرز المقارنة مع التجربة التونسية بُعدًا مهمًا؛ إذ تشير الأدبيات هناك إلى تركيز أوضح على التوافر الحيوي والتأثيرات الخلوية والسمية للميكروبلاستيك، من خلال استخدام مؤشرات بيوكيميائية مثل نشاط إنزيمات الدفاع الخلوي والارتباط بالمعادن الثقيلة. هذا التحول من الرصد إلى التحليل الوظيفي والبيولوجي يسلّط الضوء على اتجاه بحثي متقدم، يُمكن لمصر أن تستفيد منه لتوسيع آفاق البحث المحلي، والانتقال من توصيف الظاهرة إلى تشخيص آثارها على الصحة البيئية والإنسانية. وهكذا، تبرز الحاجة في مصر إلى تبني نهج تكاملي متعدد التخصصات، يجمع بين تقنيات التحليل الكيميائي، والاختبارات الحيوية، والدراسات الميكروبيولوجية، ليواكب التوجهات الدولية ويعزز دور البحث العلمي في مواجهة التحديات البيئية المتنامية.

4.2.3 الجمهورية اللبنانية

تعدّ مشكلة تلوّث الـ MPs في البيئات البحرية والساحلية من القضايا البيئية الحرجة التي يواجهها لبنان، نظرًا لموقعه الاستراتيجي على البحر الأبيض المتوسط، والتحديات المتزايدة الناتجة عن التحضّر والتغيّرات المناخية. وقد شهدت السنوات الأخيرة اهتمامًا متزايدًا بدراسة مدى انتشار الـ MPs وتأثيره على النظم البيئية البحرية وصحة الإنسان، خاصةً من خلال المنتجات الغذائية البحرية وملح البحر. تُظهر الدراسات المختلفة أن مصادر التلوّث في لبنان متعدّدة، وتشمل المكبّات الساحلية، وتصريف مياه الصرف الصحي غير المعالجة، إلى جانب الأنشطة الصناعية والحضرية، مع تباين واضح في تركيزات وأنواع جسيمات الـ MPs بحسب المواقع والفصول. ويُعدّ لبنان من أوائل الدول العربية التي تناولت قضية التلوث بالـ MPs ضمن السياق البحري، مستفيدًا من موقعه الجغرافي في الحوض الشرقي للبحر الأبيض المتوسط. وتُظهر الدراسات المنشورة منذ عام 2019 تصاعدًا ملحوظًا في الاهتمام العلمي بهذه القضية، إذ تنوّعت موضوعات البحث بين رصد وجودالـ MPs في المياه الساحلية والأنهار، وتحديد مصادر التلوّث، وتحليل تراكيز الجسيمات في الكائنات البحرية، إلى جانب تقييم التعرّض البشري عبر المنتجات الغذائية مثل ملح الطعام. اعتمدت الأبحاث اللبنانية على تقنيات تحليلية متقدّمة مثل FTIR وRaman spectroscopy، وجمعت بين الأبعاد البيئية والصحية، مما أضفى عليها طابعًا تطبيقيًا متعدد التخصّصات. كما تميّزت هذه الدراسات بتركيز خاص على العلاقة بين التحضّر، والتغيّرات الموسمية، ومصادر التلوّث، ما يعكس سعي الباحثين لفهم ديناميكيات انتشار MPs ضمن السياقين البيئي والاجتماعي المحلي.

في دراسة أُجريت بواسطة سوان واخرون[119] ، تم التركيز على تأثير التحضر والعوامل المناخية المختلفة على كمية الـ MPs التي تدخل البحر الأبيض المتوسط عبر الأنهار اللبنانية. شملت الدراسة جمع وتحليل عينات من المياه السطحية لنهرَيْ إبراهيم وأنتيلياس خلال فصلي الجفاف والرطوبة. أشارت النتائج إلى وجود تركيزات أكبر من جسيمات الـ MPs في نهر أنتيلياس، وهو النهر الأكثر تعرضًا للتحضر والأنشطة البشرية، حيث بلغ متوسط تركيز الجسيمات 9.8 ± 14.02 جسيم/لتر، مقارنةً بتركيز أقل بكثير في نهر إبراهيم حيث بلغ 1.38 ± 1.73 جسيم/لتر. كما بينت الدراسة وجود علاقة واضحة بين التغيرات الموسمية ومستويات تلوث الـ MPs، حيث لوحظت أعلى التركيزات في بداية موسم الأمطار،

ثم بدأ التركيز في التراجع تدريجيًا مع تراكم كميات الأمطار وارتفاع منسوب المياه. هذا التغير الموسمي يعكس الدور الهام للعوامل المناخية في توزيع وتراكم MPs، بالإضافة إلى أن بعض أنواع البوليمرات ظهرت في مواسم محددة فقط، مما يدل على تأثير متغيرات البيئة المناخية على أنواع الـ MPs المتواجدة. انتقلت دراسة أخرى إلى جانب مختلف، حيث قام نكات وآخرون[120] بتحليل وجود الـ MPs في ملح الطعام المتداول في السوق اللبناني، مع التركيز على تقييم مدى التعرض الغذائي لهذه الجسيمات بين السكان من خلال استهلاك الملح. شملت الدراسة جمع 27 عينة تمثل 16 علامة تجارية مختلفة، تم تحليلها باستخدام تقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) لتحديد أنواع الـ MPs الموجودة. بينت النتائج أن 81.3% من العلامات التجارية و55.6% من العينات كانت ملوثة، في حين احتوت جميع العينات على مواد غريبة أو ملوثات غير بلاستيكية. أظهرت البيانات أن عينات الملح المعبأ والملح البحري الخشن كانت أكثر عرضة للتلوث مقارنةً بالملح المكرر أو المعبأ بكميات كبيرة. من بين البوليمرات المحددة في العينات كانت PP، PES، وPE إضافة إلى مواد مرنة مثل البلاستيك المطاطي، ومُلدّنات كيميائية مثل البنزيل بيوتيل فثالات (Benzyl butyl phthalate, BBP). كما تم رصد ملوثات غير بلاستيكية مثل الشعر، النمل، وأجزاء من جلد الإنسان[120].

أما في الجانب البحري، فقد قدمت سيلين وآخرون[121] أول تقييم شامل لتلوث الرواسب البحرية بجسيمات الـ MPs على طول الساحل اللبناني في الحوض الشرقي للبحر الأبيض المتوسط، بهدف سد فجوة معرفية كبيرة في هذا المجال. جمعت الدراسة 23 عينة من الرواسب الساحلية والرصيف القاري من 10 مواقع مختلفة، تراوحت أعماقها بين 2 و120 مترًا، وذلك لتحديد مستويات تلوث الـ MPs مع التدرج في البُعد عن مصادر التلوث الساحلية. أظهرت النتائج تفاوتًا كبيرًا في تراكيز الـ MPs بين المواقع، حيث تراوحت بين 0 و4500 جسيم/كغ من الرواسب الجافة، بمتوسط بلغ 1126 ± 1363 جسيم/كغ. استخدم الباحثون التحليل الطيفي (Raman spectroscopy) لتحديد أنواع البوليمرات السائدة، والتي شملت، البولي بروبيلين (PP)، والبولي إيثيلين (PE)، والبولي إيثيلين تيرفثالات (PET)، والبولي ستيرين (PS). وأكدت الدراسة أن مكبات النفايات الساحلية، إضافة إلى تصريف مياه الصرف الصحي غير المعالجة، تمثل المصادر الرئيسية لتسرب الـ MPs إلى البيئة البحرية اللبنانية. وتمثل هذه النتائج قاعدة بيانات أولية مهمة تدعم جهود الرصد البيئي المستمرة وتساهم في تطوير خطط الإدارة الساحلية الفعالة في منطقة شرق البحر المتوسط.

بالانتقال إلى الجانب البيولوجي والنظام الغذائي، تناولت دراسة كزور وآخرون[122] تلوث الـ MPs في كائنات بحرية أساسية تُستهلك على نطاق واسع في النظام الغذائي اللبناني، مع تقييم لأنواع البوليمرات الشائعة، ودور المكبات الساحلية كمصدر محتمل للتلوث. جمعت الدراسة عينات من نوعين رئيسيين هما الأنشوفة الأوروبية (*Engraulis encrasicolus*) والمحار الشوكي (*Spondylus spinosus*) من ثلاث مواقع ساحلية رئيسية، وهم طرابلس، بيروت، وصيدا، إلى جانب تحليل عينات من مياه البحر ورواسب القاع في المواقع نفسها. أظهرت النتائج تفاوتًا ملحوظًا في تراكيز الـ MPs بين المواقع، حيث سجلت مياه صيدا أعلى تراكيز للجسيمات والذي بلغ 6.7 جسيم/م^3، في حين كانت رواسب طرابلس الأكثر تلوثًا بمعدل 4.68 جسيم/غرام من الرواسب الجافة. أما على مستوى الكائنات الحية، فقد كانت نسبة احتواء الكائنات على جسيمات الـ MPs مرتفعة، إذ بلغت 83.4% في الأنشوفة و86.3% في المحار الشوكي، مع تسجيل بيروت أعلى متوسط لعدد الجسيمات داخل الكائنات والذي قدر بعدد 1.9 ± 2.9 جسيم/للكائن في الأنشوفة، و4.4 ±

8.3 جسيم/ للكائن في المحار. تُعد هذه الدراسة الأولى التي توثق وجود الـ MPs في المحار الشوكي في المنطقة، وقد كشفت عن الأنواع البوليمرية السائدة، والتي شملت بشكل رئيسي البولي بروبيلين (PP)، والبولي إيثيلين (PE)، وذلك في مياه البحر، الرواسب، والأنسجة الحيوية للكائنات المدروسة. كما أظهرت النتائج أن مستويات التلوث في الساحل الشرقي للبحر الأبيض المتوسط، وخصوصًا في لبنان، تفوق تلك المسجلة في المناطق الغربية، مما يعزز فرضية أن المكبات الساحلية تُعد مصدرًا رئيسيًا لتسرب الـ MPs إلى البيئة البحرية.

على الرغم من التشابه الجغرافي والبحري بين لبنان ومصر ضمن منطقة شرق البحر الأبيض المتوسط، إلا أن الإنتاج العلمي في مجال تلوث الـ MPs في لبنان ما زال محدودًا من حيث العدد والتنوع مقارنةً بما تحقق في مصر. يعود هذا التفاوت بالدرجة الأولى إلى اختلاف مستوى الدعم المؤسسي والتمويل البحثي، حيث استفادت مصر من تمويل محلي ودولي مكثف، سمح بإجراء دراسات واسعة النطاق شملت مناطق متنوعة مثل دلتا النيل، والساحل المتوسطي، والساحل الأحمر، مع تحليل شامل لأنواع البوليمرات البلاستيكية وتأثيراتها البيئية والصحية. يُضاف إلى ذلك أن امتداد السواحل المصرية وطبيعة الأنشطة البشرية فيها، بما في ذلك الزراعة والصناعة والنقل البحري والذي يوفّر سياقًا غنيًا لتنوع مصادر التلوث، ويحفّز إجراء أبحاث متخصصة ودقيقة. أما في لبنان، فقد تمحورت الأبحاث أساسًا حول رصد التلوث في المياه السطحية والرواسب وبعض المنتجات الغذائية، مع التركيز على التحضّر والمكبات الساحلية كمصادر رئيسية للتلوث. كما أن التحديات الاقتصادية والسياسية التي تمر بها البلاد تُقيّد قدرة المؤسسات الأكاديمية على تطوير أبحاث طويلة الأمد أو متعددة التخصصات في هذا المجال.

ورغم هذه المحدودية، تُظهر الدراسات اللبنانية توجهًا بحثيًا متوازنًا من حيث التركيز على الرصد البيئي وفهم السلوكيات البشرية المرتبطة بالتلوث، إلى جانب محاولات أولية لتقييم مخاطر التعرض البشري عبر سلاسل الغذاء كملح البحر والأسماك. وقد استعانت هذه الدراسات بأدوات تحليلية متقدمة مثل FTIR وRaman spectroscopy، ما يعكس درجة من الدقة في توصيف الجسيمات وتحديد تركيبها الكيميائي، ويُبرز حساسية الباحثين للسياق الساحلي اللبناني المتأثر بالنفايات الصلبة والمياه غير المعالجة. وعند مقارنة التجربة اللبنانية بالتجربتين التونسية والمصرية، يتضح أن تونس تميّزت من حيث العمق في دراسة التوافر الحيوي والسمية الخلوية، إذ وظّفت مؤشرات بيوكيميائية مثل إنزيمات الإجهاد التأكسدي ونقل السموم لتقييم الآثار البيولوجية للميكروبلاستيك على الكائنات البحرية. بينما ركزت الدراسات المصرية على الرصد المكاني والوصفي للتلوث، دون التوسع في الجانب التجريبي والوظيفي كما هو الحال في تونس. في هذا السياق، يمكن اعتبار لبنان في موقع "وسيط" بين التجربتين، حيث تجاوزت مرحلة التوصيف البسيط من حيث تنوع البيئات المدروسة واعتمادها على أدوات تحليلية دقيقة، لكنها لم تبلغ بعد مستوى تونس في تطبيق النهج التجريبي البيولوجي المتقدم، كما أن لبنان تواجه تحديات مشابهة لمصر تتعلق بغياب بروتوكولات وطنية موحدة واستراتيجية واضحة لمواجهة التلوث البلاستيكي. وعليه، فإن الأولوية في لبنان ينبغي أن تتجه نحو توسيع الدراسات السُمية وتطوير برامج مراقبة طويلة الأمد، بما يعزز من الجاهزية العلمية لدعم السياسات البيئية الوطنية، ويُهيّئ الأرضية للمشاركة الفعالة في المبادرات الإقليمية والدولية الهادفة إلى إدارة ومراقبة التلوث البلاستيكي في البحر الأبيض المتوسط.

4.2.4 الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

يشكّل تلوث الـ MPs في البيئة البحرية أحد أبرز التحديات البيئية الناشئة على طول السواحل الجزائرية، لاسيما في المناطق التي تشهد كثافة سكانية ونشاطًا صناعيًا وسياحيًا متزايدًا. ورغم امتداد الساحل الجزائري لنحو 1622 كيلومترًا على البحر الأبيض المتوسط، مما يمنح البلاد واجهة بحرية واسعة، فإن الدراسات العلمية المتخصصة في هذا المجال لا تزال في مراحلها الأولى مقارنة بالدول الأخرى المجاورة، كمصر وتونس. بدأ البحث العلمي في الجزائر حول الـ MPs يتبلور خلال السنوات القليلة الماضية، مدفوعًا بارتفاع مستويات الوعي البيئي، وتزايد الضغوط البشرية على النظم الساحلية، وسوء إدارة النفايات الصلبة والمياه العادمة. وقد ركزت معظم الدراسات على تقييم تراكم الـ MPs في الرواسب والشواطئ، بهدف تحديد مدى انتشار التلوث ومصادره، وأشكاله، ومكوناته الكيميائية. كشفت النتائج أن القطع البلاستيكية هي الشكل الأكثر شيوعًا، تليها الحبيبات، والألياف، مع تفاوت واضح في التراكيز بين الشواطئ القريبة من المناطق الحضرية وتلك الواقعة في مناطق أقل ازدحامًا. وتم استخدام تقنيات تحليلية مثل FTIR وATR-FTIR لتحديد طبيعة البوليمرات، مع محاولات لتقدير مستوى التلوث بناءً على مؤشرات معيارية.

قدّمت دراسة تاتا وآخرون[123] تحليلًا ميدانيًا أوليًا لتقييم الـ MPs على السواحل الشمالية لإفريقيا، مركّزة على خليج عنابة في الجزائر، وهي منطقة تشهد ضغطًا سكانيًا وصناعيًا كثيفًا، ما يجعلها عرضة لتراكم الـ MPs في البيئات الساحلية. شملت الدراسة جمع وتحليل رواسب سطحية من أربع محطات تم اختيارها لتمثل أنشطة بشرية مختلفة، وتمت معالجة العينات باستخدام تقنية الفصل الكثافي، تلاها تحديد التركيب البوليمري عبر التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء بتقنية الانعكاس الكلي الكامن (ATR-FTIR).أظهرت النتائج تباينًا ملحوظًا في تراكيز الـ MPs، حيث تراوحت القيم بين 27.32 ± 182.66 و184.02 ± 649.33 جسيمًا/كغ من الرواسب الجافة، مع تركّز أعلى بالقرب من المناطق السكنية ومصبات مياه الصرف والمنشآت الصناعية. أرجعت الدراسة هذا التوزيع إلى تأثير الأنشطة البشرية والتغيرات الهيدروديناميكية مثل التيارات البحرية والمد والجزر، التي تؤثر على إعادة توطين الجسيمات. على صعيد الشكل المورفولوجي للجسيمات، كانت الألياف (Fibers) هي الشكل السائد بنسبة 70%، تلتها الشظايا (Fragments) بنسبة 21%، والكرات البلاستيكية (Microbeads) بنسبة 5%، والأفلام (Films) بنسبة 2%، والرغاوي (Foam) بنسبة 2%. أما من حيث التركيب الكيميائي، فقد تم تحديد خمسة أنواع رئيسية من البوليمرات هي البولي إيثيلين (PE) بنسبة 48%، والبولي بروبيلين (PP) بنسبة 16%، والبولي إيثيلين تيرفثالات (PET) بنسبة 14%، والبولي ستيرين (PS) بنسبة 9%، والبيوتيل برانهام (Butyl branham) بنسبة 7%، إلى جانب نسب أقل من الإيثيلين-بروبيلين والسيليلوز ثلاثي الأسيتات. تُعدّ هذه الدراسة من المحاولات الأولى لرسم خريطة التوزيع المكاني والكمي لتلوث الـ MPs في البيئة الساحلية الجزائرية، وتشير إلى ارتباط وثيق بين مصادر التلوث البري والأنشطة الساحلية، مما يدعو إلى تعزيز برامج المراقبة البيئية وتطوير استراتيجيات متكاملة لإدارة النفايات البلاستيكية ضمن المناطق الساحلية للبحر الأبيض المتوسط.

في دراسة حديثة أجرها بن طاع الله وآخرون[124] تم تقييم مدى انتشار MPs وتأثيره البيئي على الشواطئ الترفيهية للساحل الغربي الجزائري، وهي منطقة تشهد تزايدًا في النشاط السياحي والسكاني. هدفت الدراسة إلى سد فجوة معرفية تتعلق بتوزيع الـ MPs على ثلاثة مواقع رئيسية هم، ستيديا، سابليتس، وميرسات الحجاج، التي تُعد من الشواطئ النشطة

صيفيًا في المنطقة. أظهرت النتائج أن متوسط تركيز الـ MPs بلغ 48.01 ± 55.47 جسيمًا/م^2 من سطح الرمل، مع تباين ملحوظ بين المواقع، ما يعكس تأثير الأنشطة البشرية المختلفة وموقع الشاطئ الجغرافي. من حيث الخصائص المورفولوجية ، كانت القطع البلاستيكية هي الشكل الأكثر شيوعًا بنسبة 79.81%، تلتها الحبيبات بنسبة 10.58%، ثم الخيوط (Filaments) بنسبة 5.57%، وأخيرًا الرغاوي (Foam) بنسبة 3.85.% اعتمدت الدراسة على تطبيق عدة مؤشرات تقييم بيئي، شملت مؤشر تلوث الميكروبلاستيك (MPs Pollution Index)، ومؤشر تلوث الحبيبات(Pellet Pollution Index)، ومعامل تأثير الميكروبلاستيك (MPs Impact Factor). أشارت هذه المؤشرات إلى أن مستويات التلوث تتراوح بين المنخفضة والمعتدلة، ما يدل على تلوث بيئي محدود نسبيًا في الشواطئ المدروسة، لكنه لا يخلو من الآثار المحتملة على جودة البيئة الساحلية. تؤكد النتائج ضرورة مراقبة مستويات الـ MPs على الشواطئ الترفيهية بانتظام، خاصةً في المناطق التي تشهد ضغطًا بشريًا موسميًا، وذلك للحد من مخاطر تراكم هذه الجزيئات على النظم الإيكولوجية الساحلية. كما تدعو الدراسة إلى إدراج هذا النوع من التلوث ضمن خطط إدارة السواحل الوطنية لتعزيز الاستدامة البيئية في الجزائر. أما دراسة غريني وآخرون[125] فقدّمت أول توثيق علمي شامل لتوزيع الـ MPs في رواسب شواطئ خليج سكيكدة الواقع على الساحل الشمالي الشرقي للجزائر على البحر الأبيض المتوسط. جمعت الدراسة عينات من سبعة شواطئ مختلفة لتحليل وجود الـ MPs، 1 – 5 مم و5 – 25 مم. أظهرت النتائج تفوق عدد جسيمات الـ MPs، وكانت الكتلة المتوسطة للميزوبلاستيك ضعف نظيرتها للميكروبلاستيك، مما يشير إلى وجود خزان بلاستيكي ساحلي مهم غالبًا ما يتم تجاهله في الدراسات البيئية. اتضح أن الشظايا (Fragments) والحبيبات (Pellets) كانت الأشكال السائدة بين الجسيمات المكتشفة، وتميزت غالبًا باللون الأبيض أو الشفاف، وهو ما يعكس طبيعة مصادر التلوث في المنطقة. وقد سجلت الدراسة متوسطات تراكيز وصلت إلى 625.62 ± 1067.19 جسيمًا/م^2، و62.39 ± 106.98 جسيمًا/كغم من الرواسب الجافة، و9.82 ± 50.65 غرامًا/م^2 من حيث الكتلة، مع وجود تباين ملحوظ بين المواقع المدروسة. تعكس هذه النتائج المستوى المرتفع من الـ MPs الذي تعاني منه شواطئ سكيكدة مقارنة بمناطق أخرى في الحوض المتوسطي، وتؤكد الحاجة الملحة لاعتماد استراتيجيات فعالة لإدارة النفايات البلاستيكية الساحلية بشكل مستدام.

قام الطيبي وآخرون[126] بتقييم تراكم الـ MPs على الساحل الغربي للجزائر، حيث يُعزى هذا التراكم في الأساس إلى ضعف إدارة النفايات الصلبة وسلوكيات السكان المحليين. شملت الدراسة تحليل الـ MPs من رواسب تسعة شواطئ تمتد على طول 124 كيلومترًا. كشفت النتائج عن تراكيز متباينة من الـ MPs تراوحت بين 7.6 ± 18.8 و66 ± 107.28 جسيمًا لكل متر مربع، مع هيمنة واضحة للقطع البلاستيكية بنسبة بلغت 83.27% من إجمالي الـ MPs كما شكلت الحبيبات نسبة 14.93% بينما كانت نسبة الأفلام البلاستيكية منخفضة للغاية ولم تتجاوز 1.03%. أظهرت الدراسة أن أعلى التراكيز تركزت في الشواطئ القريبة من القرى الساحلية، وهو ما يعكس تأثير الأنشطة البشرية المباشرة، وبرز وجود تباينات واضحة في عدد ووزن الجسيمات بين المواقع المدروسة. وعلى الرغم من أن مستوى التلوث البلاستيكي في هذه المنطقة لا يزال يُصنَّف كمعتدل وفقًا للمعايير البيئية، إلا أن النتائج تسلط الضوء على اتجاه تصاعدي مقلق في معدلات التلوث. لذلك، توصي الدراسة بضرورة رفع وعي الجهات المحلية وسكان المناطق الساحلية بمخاطر التلوث البلاستيكي، إلى جانب الدعوة لتحسين عاجل في إدارة النفايات الصلبة للحد من تدفق البلاستيك إلى البيئة البحرية.

وعلى عكس تونس، التي أولت اهتمامًا خاصًا بالتوافر الحيوي والسمية الخلوية للميكروبلاستيك باستخدام مؤشرات حيوية (كالإنزيمات المضادة للأكسدة ومؤشرات الإجهاد الخلوي)، فإن الدراسات الجزائرية لا تزال تفتقر إلى التحليل التجريبي المعمّق لتأثير هذه الجسيمات على الكائنات الحية. كما أن التجربة الجزائرية تختلف عن مصر، التي ركزت على الرصد المكاني والوصفي في مختلف البيئات النهرية والبحرية، دون التوسع الكافي في الجانب البيولوجي. أما بالمقارنة مع لبنان، فإن الجزائر تتفوّق من حيث عدد الدراسات وتنوع المواقع المدروسة، لكنها تتشابه معها في ضعف التركيز على السمية البيئية، واقتصار الجهد على التوصيف الفيزيائي والكيميائي للمخلفات البلاستيكية، دون استكماله بتحليل المخاطر الصحية أو تقييم التأثيرات البيئية على المدى الطويل. في ضوء ما سبق، يمكن القول إن الدراسات الجزائرية قد أرست الأساس لرصد التلوث البلاستيكي على المستوى الساحلي، لكنها بحاجة إلى التوسع في الجوانب البيولوجية والتجريبية، وتطوير بروتوكولات موحدة لرصد وتحليل الـ MPs. كما أن تعزيز التعاون الإقليمي والدولي، وتوفير التمويل، يمثلان شرطين أساسيين للارتقاء بجهود البحث في هذا المجال الحيوي، بما يُمكّن الجزائر من لعب دور فاعل في التصدي لتلوث البلاستيك البحري في البحر المتوسط.

4.2.5 دولة قطر

في السنوات الأخيرة، بدأت قضية تلوث الـ MPs تكتسب اهتمامًا متزايدًا في دولة قطر، خاصة في ظل الوعي المتصاعد بالتحديات البيئية المرتبطة بالتنمية السريعة والنشاطات البحرية المكثفة في منطقة الخليج العربي. ورغم أن الخطاب البيئي في قطر كان يركّز سابقًا على قضايا مثل التصحر وإدارة المياه، فقد شهد العقد الأخير إدراكًا متناميًا لخطر الـ MPs على النظام البيئي البحري، ولا سيّما في المناطق الساحلية التي تُعد حيوية من الناحية الاقتصادية والبيئية. تُعد قطر دولة ساحلية صغيرة نسبيًا من حيث المساحة الجغرافية، لكنها تتمتع بسواحل طويلة على الخليج العربي، ما يجعلها عرضة بشكل خاص لتراكم الملوثات البحرية، بما في ذلك الـ MPs، نتيجة التيارات البحرية الإقليمية، وكثافة النشاط البحري المحلي، وتفريغ المياه المعالجة جزئيًا في البحر. وقد بدأت الدراسات البيئية في البلاد، بقيادة مؤسسات مثل جامعة قطر، ومعهد قطر لبحوث البيئة والطاقة (QEERI)، في استكشاف انتشار هذه الملوثات وتحليل خصائصها. أظهرت الأبحاث الأولية وجود كميات متفاوتة من الـ MPs في الرواسب الساحلية ومياه البحر، خاصة بالقرب من الموانئ والمناطق الصناعية. وقد ركزت هذه الدراسات بشكل أساسي على التوصيف المورفولوجي والكيميائي لـ MPs، باستخدام تقنيات مثلFTIR وRaman spectroscopy لتحديد نوع البوليمرات المنتشرة. وتم توثيق تواجد أشكال متعددة من الـ MPs، منها الألياف (Fibers) والبلّات والقطع الصغيرة الناتجة عن تفتت البلاستيك الكبير. إلا أن الدراسات لم تتوسع بعد نحو تحليل التوافر الحيوي أو تقييم التأثيرات السُمية على الكائنات البحرية.

ناقش أبايومي وآخرون[127] إنتشار الـ MPs في البيئة الساحلية للخليج العربي من خلال دراسة مسحية شملت ثمانية شواطئ رملية على الساحل القطري، بالإضافة إلى أربع محطات بحرية على سطح المياه شرق خليج الدوحة، وذلك خلال الفترة الممتدة بين ديسمبر 2014 ومارس 2015. أظهرت نتائج الدراسة وجود الـ MPs في جميع عينات الرواسب الساحلية ومياه البحر السطحية، ما يعكس انتشارًا واسعًا لهذا النوع من التلوث في المنطقة. وتم تحديد البوليمرات

السائدة على أنها البولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE) والبولي بروبيلين (PP)، وهي من أكثر أنواع البلاستيك استخدامًا في الصناعات الاستهلاكية. أما من حيث الخصائص الفيزيائية للجسيمات، فقد كانت الألياف الزرقاء التي يتراوح طولها بين 1 و5 ملم هي الشكل الأكثر شيوعًا. تراوحت كثافة الـ MPs على سطح البحر بين 10^4 × 4.38 و10^6 × 1.46 جسيم/كم^2، مع تسجيل أعلى التراكيز على بعد حوالي 10 كيلومترات من الساحل، ما يشير إلى وجود منطقة تجمّع مائي. ومع ذلك، لم تُسجل الدراسة أي تغيّرات زمنية ذات دلالة إحصائية في تركيزات الـ MPs على سطح البحر طوال فترة الرصد. في المقابل، تراوحت تركيزات الـ MPs في الرواسب الساحلية ضمن منطقة المد والجزر بين 36 و228 جسيمًا/م^2، ولم تُظهر البيانات فروقات كبيرة بين الشواطئ المختلفة من حيث درجة التلوث، مما يعكس توزيعًا شبه متجانس على طول الساحل المدروس.

في دراسة أجراها كاستيو وآخرون[128]، تم تقييم مدى انتشار الـ MPs في المياه البحرية ضمن المنطقة الاقتصادية الخالصة لدولة قطر. طوّر الباحثون بروتوكولًا محسّنًا ومثبتًا لاستخلاص جزيئات الـ MPs من عينات مياه البحر، خاصة تلك الغنية بالبلانكتون، مع ضمان عدم فقد أي من الجزيئات أثناء عملية الاستخلاص. تم تحليل هذه الجزيئات باستخدام التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء بتقنية الانعكاس الكلي الممتص (ATR-FTIR)، مما مكّن من تحديد ما مجموعه 30 نوعًا من البوليمرات البلاستيكية الدقيقة. بلغ متوسط تركيز الـ MPs حوالي 0.71 جسيم لكل متر مكعب، مع مدى تراكمي تراوح بين 0 إلى 3 جسيمات/م^3. كشفت النتائج عن أنواع بوليمرية متعددة، شملت البولي بروبيلين (PP)، والبولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE)، والبولي إيثيلين (PE)، والبولي ستايرين (PS)، والبولي أميد (PA)، والبولي ميثيل ميثاكريلات (Polymethyl Methacrylate, PMMA)، والسيلوفان (Cellophane)، وأكريلونيتريل بوتادين ستايرين (Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS). أما من حيث الشكل، فقد تنوعت الجسيمات بين الحبيبات (Pellets) التي تراوحت أحجامها بين 125 ميكرومتر و1.82 ملم، والألياف (Fibers) التي تراوح طولها من 150 ميكرومتر إلى 15.98 ملم. وأشارت الدراسة إلى أن المناطق الأكثر تلوثًا بهذه الجزيئات كانت تلك القريبة من الأنشطة البشرية المكثفة، مثل منصات استخراج النفط وطرق الشحن البحري، مما يعكس تأثير التوسع الصناعي واللوجستي على البيئة البحرية في المنطقة .

في دراسة استقصائية نُشرت بواسطة فيراسينغام وآخرون[129]، تم تقييم التوزيع العمودي لـ MPs في رواسب شواطئ جزيرة رأس ركان الواقعة شمال شرق قطر، والتي تُعتبر منطقة نائية ومعزولة نسبيًا عن التأثيرات المباشرة للنشاط البشري، لكنها لا تزال عرضة للتأثيرات البحرية مثل التيارات والمد والجزر. استهدفت الدراسة فهم كيفية تواجد الـ MPs عبر أعماق مختلفة من الرواسب الشاطئية، والعوامل التي تسهم في توزيعها. تم جمع عينات الرواسب من تسع محطات موزعة حول الجزيرة، وعلى أعماق تصل إلى 30 سم، على فواصل كل 5 سم، باستخدام منهجية دقيقة للفصل والتحليل. أظهرت نتائج التحليل باستخدام تقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء من نوع ATR-FTIR أن البوليمرات الأكثر شيوعًا شملت البولي إيثيلين (PE)، والبولي بروبيلين (PP)، والبولي أميد (PA)، والبولي إيثيلين تيرفثالات (PET)، وبولي فينيل كلورايد (PVC)، والبولي ستايرين الموسع (EPS). من حيث الكثافة، تركزت أعلى تراكيز لـ MPs في الطبقة السطحية (0–5 سم) من الرواسب، وبلغت 665 جزيئة/ كغم، مع ملاحظة تركز أكبر في الأجزاء الغربية والشمالية للجزيرة. وقد

تبين أن الكريات البلاستيكية (Beads) كانت الشكل السائد في الطبقات العليا، في حين أن الألياف (Fibers) كانت الأبرز في الطبقات السفلى، وهو ما يشير إلى عملية إعادة توزيع عمودية ناتجة عن التفاعلات الفيزيائية في البيئة الساحلية. تؤكد الدراسة أن العوامل الطبيعية مثل الرياح، الأمواج، المد والجزر، والتيارات البحرية تسهم في نقل الـ MPs من البحر إلى الشاطئ ثم في إعادة توزيعها داخل الرواسب. كما أشارت إلى أن مستوى التلوث في جزيرة رأس ركان يفوق المستويات المرصودة في سواحل البر الرئيسي القطري، مما يسلّط الضوء على أهمية تضمين المناطق النائية، مثل الجزر، في استراتيجيات وبرامج الرصد البيئي لتقييم مدى انتشار الـ MPs وتأثيراتها المحتملة على البيئة البحرية والكائنات الحية.

بالمقارنة مع تونس، التي أولت اهتمامًا عميقًا بالجوانب السُمية والخلوية للميكروبلاستيك، فإن قطر لا تزال في المرحلة التوصيفية الأولية، ولم تدخل بعد في مجال استخدام المؤشرات البيوكيميائية أو النماذج الحية لتقييم التأثير البيئي. كما أن حجم الأبحاث وعدد الأوراق المنشورة في قطر أقل بكثير مقارنة بـ مصر، التي تغطي نطاقًا جغرافيًا أوسع وبيئات متعددة (دلتا النيل، البحر الأحمر، المتوسط)، حتى وإن كانت هذه الأخيرة تفتقر للبُعد التجريبي المتخصص. أما لبنان، فجهوده البحثية تتركز على مراقبة التلوث في المياه والغذاء البحري باستخدام أدوات تحليلية متقدمة، لكنه يواجه تحديات تتعلق بتمويل وتوسيع البحث. وفيما يخص الجزائر، فرغم حداثة الدراسات هناك، إلا أن الجهد البحثي يُظهر توسعًا في المواقع المدروسة وتحسنًا في أدوات التحليل، بينما لا تزال قطر في مرحلة مبكرة نسبيًا من هذا المسار، مع اقتصار الأبحاث على نقاط ساحلية محددة دون توسيع النطاق الجغرافي أو الوظيفي للدراسة. بناءً على ما توفر من بيانات، يمكن اعتبار تجربة قطر في دراسة تلوث الـ MPs واعدة ولكنها ما تزال في بداياتها. هناك حاجة ملحّة لتوسيع نطاق البحوث لتشمل التأثيرات البيولوجية والصحية، ودمج نتائج الرصد في سياسات بيئية وطنية فعّالة. ومع توفّر البنية التحتية العلمية والدعم الحكومي للبحث، تملك قطر القدرة على التحول إلى مركز إقليمي مهم في مجال مراقبة الملوثات الدقيقة، خاصة في بيئة الخليج العربي التي تُعد من أكثر البيئات البحرية هشاشة عالميًا.

4.2.6 المملكة العربية السعودية

تُعد المملكة العربية السعودية من الدول ذات الامتداد الساحلي الواسع في منطقة الخليج العربي والبحر الأحمر، حيث يبلغ طول سواحلها مجتمعة نحو 3400 كيلومتر، مما يمنحها موقعًا استراتيجيًا هامًا في تقييم التلوث البحري الإقليمي، والتلوث بالـ MPs. ورغم التطور الملحوظ في البنية التحتية البحثية والوعي البيئي داخل المملكة، لا تزال هناك حاجة إلى المزيد من الأبحاث المتعلقة بتلوث الـ MPs في المنطقة. منذ عام 2018 ركزت الدراسات بشكل رئيسي على تقييم انتشار الـ MPs في بيئات ساحلية محددة، لا سيما على الساحل الغربي الممتد على البحر الأحمر والساحل الشرقي، المطل على الخليج العربي. وتم تصنيف الدراسات إلى فئتين رئيسيتين، حيث ان القسم الأول يختص بقياس وتوصيف انتشار الـ MPs في الرواسب والشواطئ ومياه البحر، بينما ركز القسم الثاني على تحديد أنواع البوليمرات المنتشرة وتأثيراتها المحتملة. إعتمدت معظم هذه الدراسات على تقنيات تحليلية متقدمة مثل مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM)، والتي استخدمت لتحديد وتوصيف الـ MPs. أظهرت النتائج هيمنة أنواع البوليمرات مثل البولي إيثيلين (PE)، والبولي بروبيلين (PP) ضمن العينات المدروسة، مع تفاوت واضح في تراكيز الـ MPs حسب

الموقع وكثافة الأنشطة البشرية. تُعزى مصادر التلوث بشكل رئيسي إلى النفايات البلاستيكية الناتجة عن النشاطات السياحية، والموانئ، ومياه الصرف الصحي المعالجة جزئيًا، إضافة إلى تأثير التيارات البحرية التي تنقل الملوثات من مناطق مجاورة في الخليج العربي.

على الرغم من هذا التقدم في توصيف انتشار الـ MPs وأنواع البوليمرات، تفتقر الدراسات المنشورة حتى الان إلى الأبحاث البيولوجية والتجريبية المتعمقة التي تقيم التوافر الحيوي وتأثيرات السمية للـ MPs على الكائنات البحرية المحلية. ويحد هذا النقص من القدرة على تقدير المخاطر البيئية والصحية طويلة الأمد المرتبطة بتلوث الـ MPs في المملكة العربية السعودية. لذا، تبرز الحاجة الملحة لتوسيع نطاق البحث العلمي ليشمل التحليلات البيولوجية والسمية، وتعزيز التعاون بين الجهات البحثية المختلفة، وذلك لتطوير سياسات بيئية مستدامة قادرة على مواجهة تحديات تلوث الـ MPs في سواحل المملكة العربية السعودية، ودعم حماية النظم البيئية البحرية والصحة العامة على المدى البعيد.

قدّم رويز-كومبيان وزملاءه[130] تقييمًا شاملًا لمستويات التلوث بالـ MPs في الرواسب الساحلية الضحلة للبحر الأحمر في المملكة العربية السعودية. تم جمع العينات بشكل رئيسي باستخدام أجهزة القبض، حيث لوحظ وجود كميات كبيرة من جزيئات الـ MPs، أغلبها من نوع البولي إيثيلين (PE)، بتراكيز وصلت إلى 1 جرام لكل متر مربع و160 قطعة لكل متر مربع. تركزت هذه الجسيمات بشكل خاص في المناطق التي تشهد نشاطًا بشريًا مكثفًا[130]. في المقابل، أجرى بالخُيّر وآخرون[131] دراسة على محتويات الجهاز الهضمي لـ 26 نوعًا من الأسماك التجارية وغير التجارية، جُمعت من أربعة مواطن مختلفة على طول الساحل السعودي للبحر الأحمر. شملت الدراسة فحص 178 عينة، حيث تم العثور على 26 قطعة ميكروبلاستيكية، كان منها 61.5% عبارة عن أفلام بلاستيكية، و38.5% خيوط صيد. وأظهرت تحليلات الـ FTIR أن البوليمرات الأكثر انتشارًا كانت البولي بروبيلين (PP)، والبولي إيثيلين (PE). سجلت أسماك *Parascolopsis eriomma*، التي جُمعت من منطقة جازان، أعلى معدل ابتلاع للجسيمات البلاستيكية، ويُعزى ذلك إلى طبيعتها القاعية واعتمادها الغذائي على اللافقاريات القاعية. وعلى الرغم من عدم وجود فروق ذات دلالة إحصائية في كمية الـ MPs بين الأنواع المختلفة، لوحظ اختلاف معنوي في مستويات الابتلاع بين المواطن المختلفة، حيث ارتبط ارتفاع كمية الـ MPs بوجود هذه الجسيمات بالقرب من قاع البحر في بعض المواطن. تشير نتائج هذه الدراسة إلى أن التلوث بالـ MPs يمثل تهديدًا متزايدًا للأسماك في البحر الأحمر، مما قد يؤثر سلبًا على الشبكة الغذائية ويشكل خطرًا على صحة المستهلكين البشريين[131]. أما في الخليج العربي الغربي، فقد أجرى بالخُيّر وآخرون[132] دراسة أخرى لتقييم كمية ونوعية الـ MPs في الجهاز الهضمي لتسعة أنواع من الأسماك ذات الأهمية التجارية والبيئية ضمن المنطقة الاقتصادية الخالصة للمملكة العربية السعودية. أظهرت الدراسة وجود ثمانية انواع للـ MPs فقط بين 140 سمكة، بمتوسط 0.019 ± 0.057 جسيم/سمكة، مع نسبة انتشار بلغت 5.71%. تمثل خيوط الصيد المصدر الرئيس للبلاستيك المبتلع، بمتوسط طول 0.06 ± 1.04 ملم، تلتها الشظايا البلاستيكية (Fragments) بمتوسط طول 0.11 ± 1.16 ملم. أشارت النتائج إلى أن هذه الألياف مصدرها مجموعة متنوعة من الأنشطة البشرية، مثل الصيد، والملاحة الترفيهية، والغسيل، وتصريف مياه الصرف المنزلية. وقد وُجدت هذه الألياف في حوالي 58.58% من الأسماك التي تحتوي على الـ MPs، مع غلبة البولي إيثيلين (PE)، والبولي بروبيلين (PP) كأكثر البوليمرات شيوعًا. رغم ارتفاع النشاط الصناعي في هذه المنطقة،

أكدت الدراسة أن مستويات انتشار الـ MPs في الأسماك لا تزال منخفضة نسبيًا مقارنة بمناطق أخرى، مما يشير إلى إمكانية نجاح بعض استراتيجيات الحماية البحرية، أو اختلاف في أنماط التوزيع المكاني للتلوث[132].

في دراسة أجراها دهافاماني وآخرون[133]، تم تنفيذ تقييم مشترك لوفرة الـ MPs في مياه شرم أبحر والساحل الشرقي للبحر الأحمر، إلى جانب تقدير مستويات المخاطر البيئية المرتبطة بها. أظهرت النتائج أن مستويات الـ MPs كانت منخفضة نسبيًا ومتجانسة عبر المناطق الثلاث التي شملتها الدراسة، حيث تراوحت وفرة الجسيمات بين 0.03 و0.05 جسيم/م^3. من حيث الشكل، تنوعت الجسيمات بين الشظايا (Fragments) بنسبة 39%، والألياف (Fibers) بنسبة 35%، والأغشية (Films) بنسبة 24%. كما بينت الدراسة أن نحو 78% من هذه الجسيمات كانت ذات قطر أقل من 5 مم^2، مما يشير إلى انتشار واسع للميكروبلاستيك الدقيق. استخدم الباحثون مؤشر تلوث المخلفات البلاستيكية (Plastic Litter Pollution Index)، الذي سجل قيمًا تراوحت بين 0.14 و0.36، ما يُصنّف على أنه مستوى تلوث منخفض نسبيًا في هذه المناطق. خلصت الدراسة إلى أن مناطق شرم أبحر والساحل الشرقي للبحر الأحمر لا تُظهر حاليًا إشارات على مخاطر بيئية كبيرة ناتجة عن التلوث البلاستيكي، لكنها شددت على أهمية الرصد المستمر وتطبيق إجراءات استباقية لمنع تفاقم المشكلة، خاصة في ظل النمو العمراني والأنشطة الساحلية المتزايدة في المنطقة[133].

في دراسة أولية أجرتها خطيب وآخرون[134]، تم تقييم التأثيرات البيولوجية لـ MPs من خلال تحليل 22 نوعًا من الأسماك البحرية المتاحة في سوق الطائف بالمملكة العربية السعودية. استخدمت الدراسة التحلل القلوي بهيدروكسيد البوتاسيوم (KOH digestion) لاستخلاص الـ MPs من الخياشيم والعضلات، وتم تطبيق صبغة النيل الأحمر (Nile red staining)، والمجهر الفلوري (Fluorescence microscopy) لتحديد الجسيمات، إلى جانب التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) لتحديد تركيب البوليمرات. أظهرت النتائج أن جميع الأنواع المدروسة كانت ملوثة بالـ MPs، لكن الأنواع الكيميائية لـ MPs اختلفت باختلاف بيئة الأسماك. فقد تم رصد بولي فينيل بوتيرال (Polyvinyl butyral, PVB) في الأسماك السطحية، وثنائي فلوريد البولي فينيلدين (Polyvinylidene fluoride, PVDF)، وبولي 2،4،6،-ثلاثي برومو ستايرين (poly 2,4,6,-tribromostyrene, PtBS) في الأنواع الطافية، بينما احتوت الأسماك القاعية على PtBS والبولي إيثيلين المكلور سلفوني (Chlorosulfonated polyethylene). وكان PtBS، وهو أحد أشكال البوليستيرين، هو البوليمر الأكثر شيوعًا في جميع العينات. كما لوحظ وجود زيادة تدريجية في تركيز الـ MPs من الأسماك الطافية إلى القاعية، مما يعكس تراكمًا بيئيًا أكبر في الطبقات السفلية للبيئة البحرية .تشير هذه النتائج إلى الانتشار الواسع لـ MPs في البيئة البحرية السعودية، وتسلّط الضوء على التأثيرات المحتملة لهذه الجسيمات على النظم البيئية البحرية، خاصة مع الأخذ في الاعتبار تنوع البوليمرات وتركيبها الكيميائي المرتبط بالمصادر البشرية المتعددة[134].

في إطار الجهود المبذولة لفهم التلوث بالـ MPs في نظم معالجة مياه الصرف الصحي، قدم الأنزعي[135] دراسة نوعية للتحقق من وجود الـ MPs في مياه الصرف المعالجة في محطة محلية بمدينة الرياض، بالإضافة إلى تقييم فعالية المعالجة الضوئية باستخدام جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NPs) كحل تكنولوجي مبتكر تم تصنيع جسيمات ZnOبحجم تقريبي بلغ 220 نانومتر، وبأشكال كروية وسداسية، واختُبرت بثلاث تراكيز مختلفة (10، و20، و30 ملي

مولار) (لتفعيل التحلل الضوئي تحت إشعاع الأشعة فوق البنفسجية . أظهرت تحاليل التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) وطيف رامان (Raman spectroscopy) تغيّرات واضحة في المجموعات الوظيفية للبوليمرات، مشيرة إلى حدوث أكسدة وانقسام للسلاسل البوليمرية، وهي علامات على تحلل الجزيئات البلاستيكية. عززت صور المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) هذه النتائج، حيث أظهرت وجود جسيمات متحللة، بينما أكدت تحليلات EDS تحليل الطاقة المشتتة للأشعة السينية (وجود عناصر مثل الكربون (C)، والأوكسجين (O)، والكلور (Cl))، ما يدعم وجود الـ MPs في العينات. وتم استخدام نسبة O/C كمؤشر كيميائي لتقدير مستوى أكسدة الجسيمات البلاستيكية. في الجانب البيولوجي، تم اختبار السمية للمياه المعالجة جزئيًا على أسماك البلطي النيلي (*Oreochromis niloticus*) من خلال تعريضها لتركيزين من مياه الصرف بنسبة 50% و75%. أظهرت الأسماك استجابات سمّية تضمنت ارتفاعًا في بيروكسيد الدهون، المالونديالدهيد (Malondialdehyde, MDA)، ومؤشر ضرر الحمض النووي (8-oxo-dG)، إضافة إلى تغيّرات في نشاط إنزيمات EROD وAChE في الدماغ، وهو ما يشير إلى ضغط أكسدي وتأثيرات سمّية عصبية (Neurotoxicity). تُبرز هذه الدراسة أهمية رصد الـ MPs في المياه المعالجة، ليس فقط من المنظور البيئي، وإنما من الجانب الصحي أيضًا، وتؤكد على فعالية المعالجة النانوية الضوئية باستخدام الـ ZnO NPs كوسيلة واعدة للحد من تلوث الـ MPs في البيئات الحضرية المائية[135].

في دراستين حديثتين، أُلقي الضوء على مسارين مهمين وغير تقليديين في انتشار الـ MPs في البيئة السعودية، مما يوسّع الفهم العلمي لتوزيعها خارج السياقات البحرية المعهودة. فقد قام بيكو وزملائة[136] بإجراء تقييم شامل لتوزيع الـ MPs في النظم المائية الداخلية بمنطقة الأحساء شرق المملكة، حيث شملت الدراسة شبكات الري وبحيرتي الأصفر والحبيل، وهما بيئتان حيويتان تعانيان من ندرة المياه وضغط بشري متزايد. أظهرت التحاليل أن تركيز الـ MPs تراوح بين 0.7 و9 جسيم/لتر، وهو ما يعكس مستوى مقلقًا من التلوث الذي قد يُشكّل خطرًا مباشرًا على الأنظمة الزراعية والمائية، نظرًا لاحتمال نقل الجسيمات إلى التربة أو المحاصيل عبر مياه الري[136]. أما على صعيد النقل الجوي، فقد قدّمت مارتينوفا وآخرون[137] دراسة نوعية حول الترسيب الجوي للألياف الدقيقة (Atmospheric Deposition of Microfibers) على الساحل الشرقي للبحر الأحمر، كاشفةً عن مسار إضافي مهم في دورة حياة الميكروبلاستيك. جمعت العينات من منطقة سكنية ذات كثافة سكانية منخفضة، وأظهرت النتائج أن أطوال الألياف (Fibers) تراوحت بين 183 و11,877 ميكرومتر، في حين أن أقل من 3% منها تجاوزت 5 مم. وبلغ متوسط الطول 934 ± 1378 ميكرومتر للألياف الأقصر من 5 مم. مثّلت الألياف البلاستيكية نحو 10% من إجمالي الألياف الدقيقة (Microfibers)، وكان البوليستر (Polyester) هو البوليمر السائد بنسبة 81.25%. سُجّل متوسط تركيز الألياف المحمولة جوًا (Airborne Fiber Concentration) عند 0.009 ± 0.008 ألياف/م^3، وبلغ معدل الترسيب اليومي (Daily Deposition Rate) حوالي 70 ألياف دقيقة/م^2، منها 8 ألياف بلاستيكية. اعتمدت الدراسة على نموذج حركة الكتل الهوائية (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model, HYSPLIT) لتحديد مصادر الانبعاث، والتي كانت في الغالب محلية وعلى بعد يقارب 25 كم. كما أشارت إلى هيمنة الكتل الهوائية الشمالية الغربية (Northwesterly Air Masses)، مما قد يفسّر انخفاض تركيز الألياف في موقع الدراسة. تؤكد هذه النتائج أهمية المسار الجوي (Atmospheric Pathway) في فهم انتشار

الميكروبلاستيك (MPs)، ليس فقط في البيئات المائية أو الأرضية، بل أيضًا في الهواء، مما يفتح آفاقًا جديدة لفهم تأثيراتها على الصحة البيئية والبشرية[137].

في سياق التقييم البيئي للكائنات البحرية كمستودعات أو مرشحات طبيعية للـ MPs، أجرت أروسا وآخرونا[138] دراسة رائدة لتقييم قدرة بلح البحر العملاق (*Tridacna maxima* – Giant Clam)، المنتشر في البحر الأحمر، على تناول وإزالة الـ MPs من عمود الماء. شملت التجربة جمع 24 عينه من حجمين مختلفين، وتم تعريضها على مدى 12 يومًا لأربع تركيزات متدرجة من كريات البولي إيثيلين (PE)، بأحجام تراوحت بين 53 و500 ميكرومتر. أظهرت النتائج أن بلح البحر أبدى نشاطًا ترشيحيًا فعالًا، حيث بلغ متوسط عدد الكريات المحتجزة داخل العينة الواحدة 7.55 ± 1.89 كريات في اليوم، أي ما يعادل 5.76 ± 1.16 جسيمًا لكل غرام من الوزن الجاف. ومن اللافت أن الاحتفاظ بالجسيمات (Particle retention) لم يقتصر على الجهاز الهضمي، بل أظهرت البيانات أن القوقعة الخارجية (External Shell) لعبت دورًا إضافيًا في التقاط الجسيمات، حيث وُجدت علاقة طردية بين كمية الجسيمات العالقة على القوقعة وتركيز الـ MPs في المياه المحيطة. من خلال تتبع التغير في تركيز الـ MPs في عمود الماء، تبين أن بلح البحر يمكن أن يزيل نحو 66.03 ± 2.50% من الـ MPs في البيئة المحيطة، مما يشير إلى دوره البيئي المحتمل ككائن مرشح ضمن جهود المعالجة الحيوية. وعند تحليل الاستجابة الفسيولوجية (Physiological response) للتعرض للبولي إيثيلين (PE) عبر قياس نسبة الإنتاج الأولي الصافي إلى التنفس (Gross Primary Production to Respiration ratio, GPP:R)، لم تظهر النتائج فروقًا ذات دلالة إحصائية بين العينات المعالجة وتلك الضابطة، مما يعكس تحمّلًا نسبيًا (Relative tolerance) لتركيزات البلاستيك المستخدمة. تؤكد هذه النتائج على أهمية *Tridacna maxima* ككائن بحري ذي قدرة ترشيحية عالية، وتدعم التوجهات نحو استخدام الترشيح الحيوي (Biofiltration) كحل مستدام لتقليل التلوث بالـ MPs في البيئات البحرية[138].

قدّمت بيكو وآخرون[139] أول دليل موثق على وجود الـ MPs في مياه السطح والمياه المعالجة المختلطة في مدينتين رئيسيتين في المملكة العربية السعودية، هما الرياض والجبيل. اعتمدت الدراسة على جمع عينات المياه من قنوات التصريف والبرك (Drainage Channels and Ponds) المستخدمة في نقل مياه الصرف داخل كلا الموقعين، تلتها تحاليل نوعية وكمية (Qualitative and Quantitative Analyses) للكشف عن وجود الـ MPs. أظهرت النتائج تباينًا كبيرًا في مستويات التلوث بين المدينتين، حيث بلغ متوسط التركيز في الرياض 3.2 جسيم/لتر مقارنة بالـ 0.2 جسيم/لتر فقط في الجبيل، وهو فرق ذو دلالة إحصائية يعكس تأثير الكثافة السكانية والنشاط الصناعي. كانت الألياف (Fibers) الشكل السائد للجسيمات في جميع المواقع بنسبة 60%، وتراوحت أبعادها غالبًا بين 80 – 250 ميكرومتر. من حيث اللون، سيطرت الألوان الأبيض (40%)، والأحمر (25%)، والأزرق (20%). أُجريت التحاليل الطيفية بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) لتحديد التركيب البوليمري، حيث كانت البوليمرات الأكثر شيوعًا هي البولي بروبيلين (PP)، والبولي إيثيلين (PE)، بنسبة بلغت 48.3% من العينات المصنفة. لتقييم الأثر البيئي المحتمل، تم استخدام مؤشرين ، وهما مؤشر الخطورة البيئية (Hazard Index, HI)، ومؤشر تحميل التلوث (Pollution Load Index, PLI). وأظهرت النتائج أن الـ PLI كان المعيار الأكثر حساسية للكشف عن التباينات بين المدن، مما يشير إلى أن الاختلاف في الأنشطة البشرية

والصناعية يلعب دورًا محوريًا في تحديد توزيع الـ MPs. برزت هذه الدراسة الحاجة الماسة إلى برامج رقابية فعّالة، إلى جانب رصد دوري لجودة المياه، بهدف تقليل المخاطر البيئية والصحية الناجمة عن التعرض المستمر للـ MPs، خاصةً في المناطق ذات الكثافة السكانية العالية والنشاط الصناعي المكثف[139].

قدّم الميمان وآخرون[140] دراسة استقصائية تهدف إلى تقييم وجود الـ MPs في مياه الشرب المعبأة ومياه الصنبور في خمس مناطق مختلفة من المملكة العربية السعودية، مع تقدير معدلات التعرض البشري اليومي (Daily human exposure) لهذه الجزيئات من خلال الاستهلاك الروتيني للمياه. شملت الدراسة 30 عينة تم جمعها من الأسواق المحلية، تضمنت مياه معبأة في عبوات بلاستيكية، وعبوتين زجاجيتين، بالإضافة إلى عينتين من مياه الصنبور تمثلان المياه الجوفية، ومياه التحلية. أجري الكشف عن الـ MPs باستخدام الترشيح بالغشاء غير العضوي الدقيق (Inorganic Membrane Filtration) بفتحة مسام 0.2 ميكرومتر، تلاه تحليل باستخدام مطيافية الأشعة تحت الحمراء الميكروسكوبية (FTIR) ضمن نطاق أحجام تراوح بين 25 و500 ميكرومتر. كشفت النتائج عن وجود الـ MPs في 17 من أصل 30 عينة، حيث تراوحت التراكيز بين 1.9 و4.7 جسيم/لتر. من حيث التركيب الكيميائي، كان البولي إيثيلين (PE) هو البوليمر الأكثر شيوعًا، يليه البولي ستايرين (PS)، والبولي إيثيلين تيرفثالات (PET). وبناءً على الكمية اليومية الموصى بها لاستهلاك المياه 3.7 لتر للرجال و2.7 لتر للنساء، قُدّرت الجرعة اليومية المحتملة (Estimated Daily Intake, EDI) من الـ MPs بما يتراوح بين 0.1 – 0.2 جسيم/كغم من وزن الجسم في ظروف الاستهلاك الاعتيادية، وقد تصل إلى 1.7 – 1.9 جسيم/كغم في سيناريوهات الاستهلاك العالي، خصوصًا في ظل ارتفاع درجات الحرارة التي تزيد من معدلات شرب المياه . خلصت الدراسة إلى أن مستويات الـ MPs في مياه الشرب السعودية منخفضة نسبيًا ولا تمثل خطرًا صحيًا مباشرًا على المستهلكين حسب المعطيات المتوفرة. ومع ذلك، أوصى الباحثون بأهمية المراقبة الدورية المنتظمة لمصادر مياه الشرب، مؤكدين على ضرورة الوقاية دون إثارة الذعر[140].

تُظهر المملكة العربية السعودية تقدمًا ملحوظًا في مجال دراسات تلوث الـ MPs مقارنةً بعدد من الدول العربية مثل تونس، مصر، قطر، لبنان، والجزائر. فقد اتسمت الأبحاث السعودية بالتنوع الشامل وشمولها لعدة بيئات (البحرية، الساحلية، الجوية، ومياه الشرب)، مع تبني تقنيات تحليلية متقدمة مثل مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR)، التحليل الطيفي (Raman)، والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM-EDS).هذا النهج المتكامل سمح بتقييمٍ أكثر دقة لانتشار الـ MPs وتأثيراته البيئية والبيوكيميائية، وهو ما يضع السعودية في موقع ريادي إقليمي في هذا المجال. في المقابل، أظهرت الدراسات في تونس تركيزًا أكبر على التأثيرات السمية والخلوية للميكروبلاستيك باستخدام مؤشرات حيوية دقيقة، إلا أن نطاق دراساتها كان محدودًا نسبيًا مقارنةً بالسعودية التي شملت نطاقًا بيئيًا أوسع ودمجت التقييمات الكيميائية والبيولوجية. أما مصر، فهي تمتلك قاعدة بيانات واسعة من الدراسات الرصدية التي تغطي بيئات متعددة، مثل دلتا النيل والبحر الأحمر والبحر المتوسط، إلا أن نقص الدراسات التطبيقية والتجريبية التي تستخدم النماذج الحية والمؤشرات البيوكيميائية يقيد قدرة هذه الأبحاث على تفسير التأثيرات البيئية بشكل شامل، بخلاف السعودية التي بدأت بالفعل في تعميق هذه الجوانب. على الصعيد الآخر، تُعد قطر في مرحلة مبكرة من البحوث التوصيفية حول الـ MPs، مع تركيز الأبحاث على التوزيع المكاني وتركيز الملوثات دون تقييمات بيئية أو سمّية متقدمة، مما يعكس حاجة ملحة لتوسيع

نطاق الدراسات والاهتمام بالتأثيرات البيولوجية. في لبنان، بالرغم من توفر أدوات تحليلية متقدمة، تواجه الدراسات تحديات مرتبطة بالتمويل وقلة التغطية الجغرافية، مما يؤثر على استمرارية وجودة البحث مقارنة بالسعودية التي تتمتع بدعم مؤسسي أكبر يمكنها من تحقيق استدامة وتوسع في بحوث الـ MPs. أما الجزائر، فهي في مرحلة نمو واضحة في مجال دراسة الـ MPs، مع توسع متزايد في المواقع المدروسة وتحسن في أدوات التحليل، غير أن السعودية تتفوق من حيث التطور التقني وتنوع مجالات البحث، مما يعزز مكانتها في المنطقة. في ضوء هذه المقارنات، يمكن استنتاج أن السعودية تملك إطارًا بحثيًا متقدمًا يُمكّنها من تقديم رؤى علمية معمقة وشاملة حول تلوث الـ MPs، مع إمكانية ترجمة النتائج إلى سياسات بيئية فعالة. يُوصى بمواصلة دعم البحث العلمي في هذا المجال وتوسيع الدراسات التطبيقية لتشمل تقييمات صحة الإنسان والتأثيرات البيئية طويلة المدى، بما يعزز الدور الريادي للمملكة في حماية البيئة البحرية والساحلية من مخاطر الـ MPs.

4.2.7 المملكة المغربية

تُعتبر المملكة المغربية من الدول ذات السواحل الممتدة على طول المحيط الأطلسي والبحر الأبيض المتوسط، حيث يبلغ طول سواحلها مجتمعة نحو 3500 كيلومتر، مما يمنحها موقعًا استراتيجيًا هامًا في دراسة تلوث الـ MPs في البيئة البحرية الإقليمية. ورغم التحديات البيئية والاقتصادية، شهدت المغرب اهتمامًا متزايدًا بالبحث العلمي المتعلق بتلوث الـ MPs، خاصةً خلال السنوات الأخيرة تتناول انتشار وتأثير الـ MPs في بيئات بحرية ومائية مختلفة بالمملكة، بدءًا من عام 2017. تركزت هذه الدراسات بشكل رئيسي على تقييم تلوث الـ MPs في مواقع ساحلية متعددة، شملت الشواطئ، الرواسب البحرية، والمياه السطحية والعذبة، لا سيما على طول الساحل الأطلسي الممتد من الشمال إلى الجنوب، وكذلك المناطق المطلة على البحر الأبيض المتوسط. يمكن تصنيف هذه الدراسات إلى فئتين رئيسيتين، الأولى تتعلق بقياس انتشار الـ MPs وتوصيفه في الرواسب والرمال والمياه، والثانية تهدف إلى تحديد أنواع البوليمرات السائدة وتحليل تأثيراتها المحتملة على النظام البيئي. إعتمدت أغلب هذه الدراسات على تقنيات تحليلية حديثة ومتطورة، منها مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR)، المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)، وتقنيات طيفية أخرى، والتي ساعدت في التعرف الدقيق على نوع وحجم جزيئات الـ MPs. أظهرت النتائج هيمنة أنواع البوليمرات مثل البولي إيثيلين (PE)، والبولي بروبيلين (PP)، والبولي فينيل كلورايد (PVC) في العينات المدروسة، مع اختلاف واضح في تراكيز الـ MPs حسب الموقع وكثافة النشاطات البشرية المحيطة. تُعزى مصادر تلوث الـ MPs في المغرب إلى مزيج من النفايات البلاستيكية الناتجة عن النشاطات البحرية والصناعية، بما في ذلك الصيد، والسياحة، والموانئ، بالإضافة إلى تصريف مياه الصرف الصحي ومخلفات الأنشطة الحضرية. كما تلعب التيارات البحرية والرياح دورًا مهمًا في توزيع الـ MPs عبر السواحل المغربية، مما يزيد من تعقيد المشكلة ويستدعي جهودًا بحثية وبيئية مكثفة للحد من انتشارها وحماية البيئة البحرية.

في الدراسة التي أجراها فيليز وآخرون[141]، تم إجراء تقييم ميداني شامل لمخلفات الشواطئ الكبيرة والـ MPs على طول السواحل الشمالية الشرقية للمحيط الأطلسي، تحديدًا في منطقتي جنوب البرتغال والساحل المغربي. هدفت الدراسة إلى تحليل التوزيع المكاني لهذه المخلفات في الرواسب الساحلية داخل المناطق المدّية، مع محاولة فهم مصادر

التلوث المحتملة وتأثيرها البيئي. أظهرت النتائج أن أكثر من 97% من المواد المجموعة كانت من الـ MPs، وشملت أشكالًا متنوعة مثل الشظايا (Fragments)، والخيوط البلاستيكية (Filaments)، والتي مثّلت الأشكال الأكثر شيوعًا في العينات. ولم يكن التوزيع الجغرافي لهذه المخلفات متجانسًا، إذ لم يُلاحظ نمط مرتبط بخط العرض، مما يشير إلى أن العوامل المؤثرة في تراكم البلاستيك في المناطق الساحلية معقدة وتتضمن التيارات البحرية، المد والجزر، والأنشطة البشرية المحلية. من حيث التركيب الكيميائي، أظهرت تحاليل الـ FTIR أن خيوط البلاستيك كانت تتكون بنسبة 50% من البولي بروبيلين (PP)، و29% من البولي إيثيلين تيريفثاليت (PET)، في حين كانت الشظايا البلاستيكية تتكون بنسبة 75% من البولي إيثيلين (PE)، و25% من البولي بروبيلين (PP). أما المصادر المحتملة لهذه المخلفات، فقد شملت أغلفة الطعام، معدات الصيد، وفضلات منتجات التبغ. تؤكد الدراسة على أن السواحل المعنية تتعرض لتلوث ملحوظ بالبلاستيك، مما يُحتّم ضرورة وضع استراتيجيات رصد ومراقبة بيئية دقيقة، إلى جانب تحسين إدارة النفايات الساحلية للحد من تراكم هذه الملوثات، خاصة في المواقع ذات الأهمية البيئية والاقتصادية[141].

في دراسة أجراها مغيلي وآخرون[142]، تم تسليط الضوء على نوع جديد من الـ MPs المرتبط بجائحة كوفيد-19 (COVID-19)، والمتمثل في الكمامات الطبية أحادية الاستخدام (Single-use Medical Masks) المنتشرة على الشواطئ السياحية المغربية المطلة على البحر الأبيض المتوسط. أُجريت الدراسة على مدار خمسة أشهر، من فبراير إلى يونيو 2021، واستهدفت خمس شواطئ سياحية ذات استخدامات مختلفة. بلغ إجمالي عدد الكمامات التي تم رصدها 321 كمامة، وكانت الغالبية الساحقة منها (96.27%) من النوع أحادي الاستخدام، وهو ما يعكس الاستخدام الكثيف لهذه المواد خلال فترة الجائحة. وقد بلغ متوسط الكثافة للكمامات الملقاة 0.0008 ± 0.0012 كمامة/م^2، مع تسجيل أعلى مستويات التلوث في الشواطئ الحضرية الترفيهية مقارنةً بالشواطئ المُصنفة كمنتجعات سياحية. هذا التباين يعكس الأثر المباشر للنشاط البشري المكثف في المناطق الحضرية على ازدياد حجم النفايات البلاستيكية الجديدة، لا سيما تلك المرتبطة بالاستخدامات الطبية والوقائية. تُعد هذه الدراسة من أوائل الدراسات التي توثق تلوث أدوات الوقاية الشخصية (Personal Protective Equipment Pollution) في البيئات الساحلية المغربية، وتؤكد على الحاجة الملحة لتحديث استراتيجيات إدارة النفايات لتشمل أنواعًا جديدة من الملوثات التي فرضتها التحولات الاجتماعية والبيئية الحديثة، مثل الأوبئة. كما تدعو إلى تعزيز الوعي البيئي لدى الزوار والمستخدمين المحليين، لضمان الحد من الأثر البيئي طويل الأمد لهذه النفايات[142].

قدّم عبلوه وآخرون[143] دراسة خط أساس لتقييم تلوث الـ MPs على سبعة شواطئ ساحلية تمتد على طول الساحل الأطلسي الأوسط للمغرب وتحديدًا في منطقة أكادير. تهدف الدراسة إلى فهم توزيع وكثافة هذه جسيمات الـ MPs وتحديد مصادرها المحتملة. أظهرت النتائج تسجيل كثافات عالية من الـ MPs تراوحت بين 7,680 و34,200 جسيم/ كغم من الرواسب الجافة، وهي من بين أعلى التراكيز المسجلة عالميًا على الشواطئ. وقد تنوعت الأشكال المورفولوجية للجسيمات، حيث شكلت الألياف (Fibers) النسبة الكبرى بنسبة بلغت 73%، تليها القطع، والأغشية (Films)، ثم الحبيبات (Pellets). تشير هذه النتائج إلى أن مصادر التلوث ترتبط في الغالب بـ النفايات النسيجية والمخرجات الصناعية ، إضافة إلى أنشطة الصيد والأنشطة الحضرية . أما التحليل الكيميائي باستخدام التحليل الطيفي

بالأشعة تحت الحمراء (FTIR)، فقد كشف عن هيمنة البولي إيثيلين (PE) بنسبة 59%، والبولي بروبيلين (PP) بنسبة 18%، والبولي ستيرين (PS) بنسبة 9%، وكلوريد البولي فينيل (PVC) بنسبة 8%، والأسيتات فينيل الإيثيلين (EVA) بنسبة 6%. تؤكد الدراسة على أن هذه النسبة المرتفعة من جسيمات الـ MPs تعكس وجود مصادر أولية ناتجة عن استخدام مباشر للبوليمرات، ومصادر ثانوية نتيجة تحلل المخلفات البلاستيكية في البيئة البحرية[143].

أظهرت دراسة بن حداد وآخرون[144] فعالية المحار الرملي *Donax trunculus* كمؤشر حيوي لرصد التلوث بالـ MPs الناتج عن التحضر الساحلي، خاصة في سياق تطوير منطقة خليج تغازوت السياحية على الساحل المغربي. شملت الدراسة ستة مواقع مختلفة، وبيّنت النتائج أن تراكيز جسيمات الـ MPs في أنسجة المحار الرطبة تراوحت بين 1.75 و5.93 جسيم/غرام، مع فروق مكانية وزمانية ملحوظة تعكس درجة التوسع العمراني في المنطقة. من حيث الشكل، كانت الألياف (Fibers) الأكثر شيوعًا بنسبة 90.5%، تلتها الشظايا (Fragments) بنسبة 9.5%. أما التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR)، فقد كشف عن هيمنة البولي إيثيلين (PE) بنسبة 65%، والبولي بروبيلين (PP) بنسبة 35%. وتميزت لجسيمات بألوان متعددة كان اللون الأزرق الفاتح الأكثر بروزًا، في حين تراوحت أحجامها بين 0.1 و0.5 ملم. علاوة على ذلك، أظهرت تحاليل المجهر الإلكتروني الماسح المقترن بتحليل طاقة تشتت الأشعة السينية (SEM/EDX) وجود عناصر كيميائية مثل النحاس (Cu)، والحديد (Fe)، والمغنيسيوم (Mg)، والكلور (Cl)، والكبريت (S) على أسطح جسيمات الـ MPs، تؤكد الدراسة أهمية *Donax trunculus* كمؤشر بيولوجي فعال لرصد تأثيرات الأنشطة البشرية الساحلية على البيئة البحرية، وتدعو إلى اعتماد استراتيجيات إدارة مستدامة للسواحل للحد من تلوث الـ MPs والحفاظ على جودة النظم البيئية الساحلية[144].

في إطار متابعة تأثير الـ MPs على الكائنات البحرية بالمغرب، قدمت دراسة مغلود وآخرون[145] تحليلًا مفصلًا لتناول سمك الحصان الأطلسي (*Trachurus trachurus*) لجزيئات الـ MPs على الساحل الأطلسي المغربي، بدءًا من منطقة لاراش (35°30′ شمالًا) وصولًا إلى بوجدور (26°30′ شمالًا). هدفت الدراسة إلى رسم خريطة للتوزيع المكاني للأسماك التي تحتوي على جسيمات الـ MPs في معدتها، وتحديد المناطق التي تمثل "نقاطًا ساخنة" لتراكم هذه الجزيئات. أظهرت النتائج أن أكثر من 73% من الأسماك المفحوصة احتوت على ثلاثة أنواع رئيسية من البوليمرات في أجهزتها الهضمية، شملت البولي أميد (PA)، والأكريليك(Acrylic)، والبولي ستيرين (PS). وتمثلت المناطق الشمالية الساحلية، التي تشهد نشاطًا حضريًا وصيديًا مكثفًا، كمواقع رئيسية لارتفاع نسب التلوث، حيث ظهرت فيها "النقاط الساخنة" لتراكم الجسيمات البلاستيكية داخل الأسماك. كان البولي أميد هو البوليمر الأكثر شيوعًا، إذ سُجل في حوالي 86% من العينات، يليه الأكريليك، وقد وُجد الاثنان معًا في نحو 47% من الأسماك التي احتوت على الـ MPs. لم تُظهر النتائج علاقة ذات دلالة إحصائية بين حجم الأسماك وكمية الجسيمات المكتشفة، إلا أن الأسماك الناضجة أظهرت معدلات ابتلاع أعلى، ما قد يُعزى إلى التراكم مع العمر أو اختلاف في سلوك التغذية. تؤكد هذه النتائج على أهمية مراقبة الأنواع السمكية الاقتصادية مثل *Trachurus trachurus*، نظرًا لدورها البيئي في السلسلة الغذائية البحرية، وأثرها المحتمل على صحة الإنسان من خلال استهلاك الأسماك الملوثة بالـ MPs[145].

أجرى مغلي وآخرون[146] مراجعة منهجية شاملة للبحوث المتعلقة بالـ MPs في البيئة البحرية المغربية خلال الفترة من 2014 إلى 2023. هدفت الدراسة إلى تحليل التوزيع المكاني والزماني للنفايات البلاستيكية، وأنواعها ومصادرها، بالإضافة إلى مناهج أخذ العينات وتقنيات التحليل المستخدمة في الدراسات السابقة. كما تطرقت المراجعة إلى التأثيرات البيئية المرتبطة بالـ MPs على التنوع البيولوجي والخدمات البيئية، مع تقييم السياسات الوطنية المعتمدة لإدارة النفايات البحرية. كشفت النتائج عن وجود فجوات معرفية ملحوظة، خصوصًا فيما يتعلق بانتشار الـ MPs في الكائنات البحرية، الرواسب، والمياه، حيث أظهرت 60% من الدراسات تركيزًا واضحًا على السواحل المتوسطية، بينما لم تحظَ السواحل الأطلسية الا على 40% من الاهتمام البحثي. على الرغم من ذلك، فقد سُجلت كثافات مرتفعة من الميكروبلاستيك في السواحل الأطلسية، تراوحت بين 7,680 و34,200 جسيم لكل كغ من الرواسب، وهي من بين الأعلى مقارنةً بالدول المجاورة .من حيث التكوين، شكلت المواد البلاستيكية أكثر من نصف النفايات المجمعة على الشواطئ، بنسبة تراوحت بين 53% و94%. كما تم توثيق ظاهرتي الابتلاع (Ingestion)، والتشابك (Entanglement) للبلاستيك في 16 نوعًا من الكائنات البحرية و18 نوعًا على التوالي، مما يعكس التأثير البيئي الواسع لهذا النوع من التلوث[146]. في دراسة أخرى، قام مغلود وآخرون[147] بتحليل تناول الـ MPs في محتويات معدة ثلاثة أنواع من الأسماك الطافية الصغيرة على الساحل الأطلسي المغربي، بين رأس كانتين (33° شمالًا) ورأس بوجدور (26° شمالًا). شملت الدراسة فحص 251 فردًا من الأسماك، تضمنت انواعًا مختلفه، شملت 118 نوعًا من أسماك الماكريل والمعروف ايضا بالسمك الاسقمري (*Scomber* spp)، و82 نوعًا من السردين (*Sardina pilchardus*)، و51 نوعًا من الهورس ماكريل (*Trachurus trachurus*). تم استخدام تقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) لتحديد أنواع البوليمرات الموجودة في الـ MPs التي تم تناولها. أظهرت النتائج أن 26% من الأسماك تحتوي على الـ MPs، مع أعلى نسبة في سمك الهورس ماكريل (30%)، تليه السمك الاسقمري (27%)، ثم السردين (9%). تركزت الأسماك التي تحتوي على الـ MPs بشكل رئيسي في الجزء الشمالي من منطقة الدراسة، حيث توجد نشاطات صيد حرفية مكثفة ومخلفات أنهر كبيرة قد تمثل مصدرًا رئيسيًا لهذه الجسيمات. وتبرز هذه النتائج أهمية التركيز على المصادر البرية للملوثات البلاستيكية وتأثيرها على الحياة البحرية في المناطق الساحلية المغربية[147].

سلّط بن حداد وآخرون[148] الضوء على تلوّث الـ MPs في رواسب الشواطئ الحضرية بمنطقة تغازوت الساحلية، الواقعة في وسط الساحل الأطلسي المغربي، من خلال دراسة تحليلية شاملة ذات بعد زمني ومكاني. أظهرت الدراسة أن الرواسب تتكون في معظمها من رمال ناعمة معتدلة التفرز، وسُجّلت كثافات جسيمات الـ MPs تراوحت بين 915 جسيم/كغم في عام 2018 و 1448جسيم/كغم في عام 2019. لوحظت أعلى نسب التلوث في الجزء الجنوبي من الساحل، خصوصًا في المواقع القريبة من المنشآت السياحية ومناطق الترفيه. استخدمت الدراسة عدة مؤشرات مثل مؤشر تلوث الجسيمات البلاستيكية الدقيقة (Microplastic Pollution Index, MPPI) ومعامل تأثير التلوث (Contamination Microplastic Impact, CMPI)، بالإضافة إلى تقنيات التحليل العنقودي (Agglomerative Hierarchical Clustering, AHC) والتحليل متعدد الأبعاد (Multidimensional Scaling, MDS)، التي كشفت عن تباين مكاني وزماني واضح في مستويات التلوث. أظهر تحليل المكونات الرئيسية (PCA) ضعف الارتباط بين خصائص الرواسب الفيزيائية (مثل حجم الحبيبات، والتفرز، والانحراف

المعياري) وكثافات الـ MPs، مما يشير إلى سيطرة مصادر تلوث خارجية أكثر من خصائص الموقع نفسه. توصي الدراسة بضرورة تطبيق سياسات فعالة لإدارة النفايات البلاستيكية، للحد من التأثيرات البيئية الناتجة عن تلوث الرواسب الساحلية[148]. في السياق نفسه، قدّم عزّاوج وآخرون[149] تقييمًا أساسيًا لتوزيع وانتشار جسيمات الـ MPs في الرواسب الشاطئية لي 19 شاطئًا رمليًا على الساحل المتوسطي الشرقي للمغرب. أظهرت النتائج تركيزات تراوحت بين 7.4 ± 40 و48.6 ± 230 جسيم/كغم من الرواسب الجافة. هيمنت الألياف (Fibers) بنسبة 74.72% من إجمالي الجسيمات، تلتها الشظايا (Fragments) بنسبة 20.26%، ثم الأغشية (Films)، والكريات (Beads)، والرغوة (Foam) بنسب أقل. كذلك، كانت الجسيمات الكبيرة (1–5 مم) أكثر وفرة وشكّلت 58% من العيّنات، 1 – 2 مم (30.67%). أما من حيث اللون، فقد سادت الجزيئات الشفافة (50%)، والزرقاء (17%)، بينما أظهرت معظم الجسيمات شكلًا زاويًا غير منتظم، مما يعكس عمليات التجوية والتحلل الفيزيائي. أما من حيث التركيب الكيميائي، فقد كشفت التحاليل الطيفية بالأشعة تحت الحمراء (FTIR-ATR) عن وجود أربعة أنواع رئيسية من البوليمرات، شملت البولي إيثيلين (PE)، والبولي بروبيلين (PP)، والبولي ستايرين (PS)، وكلوريد البولي فينيل (PVC). تشير هذه النتائج إلى مستوى تلوث معتدل نسبيًا، مع ارتباط واضح بالأنشطة البشرية مثل الصيد التقليدي والأنشطة الساحلية[149].

أجرى كريكيش وآخرون[150] أول تقييم لتراكم الـ MPs بحجم ≥ 10 ميكرومتر في أربعة أنواع من الإسفنجات البحرية على طول الساحل المتوسطي المغربي، باستخدام منهجية استخلاص مبتكرة مقرونة بتحليل المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) مع التحليل الطيفي للطاقة المشتتة (EDX). كشفت النتائج عن تواجد الـ MPs في جميع العينات بنسبة تلوث بلغت 100%، مع تباين واضح في وفرة الجسيمات بين المواقع المدروسة، بينما لم تُسجل اختلافات ذات دلالة إحصائية بين الأنواع الإسفنجية *Chondrosia reniformis*، و*Ircinia variabilis*، و*Petrosia ficiformis*، و*Sarcotragus spinosulus*. تراوحت تراكيز الجسيمات بين $10^5 \times 3.95$ و $10^6 \times 1.05$ جسيم/غرام وزن جاف، مع ملاحظة أن أصغر الجسيمات كانت في *C. reniformis* بمتوسط قطر 1.84 ميكرومتر، وأكبرها في *P. ficiformis* بمتوسط 2.57 ميكرومتر. تدعم هذه الدراسة استخدام الإسفنجات البحرية كمؤشرات حيوية فعالة لرصد تلوث الـ MPs في النظم الساحلية، كما توفّر قاعدة بيانات مرجعية قيمة للبحوث المستقبلية في هذا المجال[150].

في دراسة حديثة أجرتها حجي وآخرون[151]، تم تقييم وجود وتوزيع الـ MPs في الحمأة الناتجة عن محطتين لمعالجة مياه الصرف الصحي في مدينة أكادير، وهما محطة "أورير" التي تعالج مياه الصرف الحضرية، ومحطة "مزار" التي تستقبل مياه صرف حضرية وصناعية. تضمنت الدراسة تحليل العينات في مختلف مراحل المعالجة، من الترسيب الأولي إلى التجفيف والإنضاج، مع مراعاة التغيرات الموسمية. أظهرت النتائج أعلى تراكيز لـ MPs في الحمأة الخام، مع انخفاض تدريجي ملحوظ بعد المعالجة، خاصة في محطة أورير. كما كشفت البيانات عن تباين موسمي في التلوث، إذ بلغت الذروة في فصل الصيف بأورير، وفي الشتاء بمزار. كانت الألياف (Fibers) الشكل الأكثر شيوعًا بين الجسيمات، وتركزت بشكل رئيسي ضمن نطاق الحجم 100 – 500 ميكرومتر. وباستخدام التحليل الطيفي (ATR-FTIR)، تم التعرف على 11 نوعًا من البوليمرات، وأهمها البوليستر (Polyester)، البولي إيثيلين (PE)، والبولي بروبيلين (PP)، والبولي ستيرين (PS). وأظهرت الفحوصات المجهرية الإلكترونية (SEM/EDX) علامات تحلل على سطح الجسيمات ووجود عناصر غير

عضوية، ما يشير إلى احتمال تأثير "حصان طروادة"، حيث تنقل الجسيمات الملوثات الكيميائية الأخرى معها. وخلصت الدراسة إلى أن الحمأة يمكن أن تسهم في إطلاق ما بين 22 إلى 740 مليون جسيم ميكروبلاستيك يوميًا، مما يثير مخاوف كبيرة حول استخدام هذه الحمأة في المكبات أو الأراضي الزراعية. توصي الدراسة بضرورة مراجعة سياسات إدارة الحمأة للحد من التأثيرات البيئية والصحية المحتملة المرتبطة بها[151].

قدّمت دراسة أبلواه وآخرون[97] تقييمًا مشتركًا لتلوث الـ MPs في بلح البحر الصالح للأكل *Mytilus galloprovincialis* في كلٍّ من المغرب وتونس، بهدف تحليل الخصائص الفيزيائية والكيميائية لهذه الجسيمات وتقدير المخاطر الصحية المحتملة الناتجة عن استهلاك هذا الكائن البحري. كشفت الدراسة عن وجود جسيمات الـ MPs في نسب عالية من العينات، تراوحت بين 79% و100%، مع تسجيل أعلى تركيز في بلح البحر المغربي، بلغ 1.88 جسيم/غرام في الخياشيم و0.92 جسيم/غرام في الغدد الهضمية، مقارنةً بتونس التي سجلت 0.79 و 1.47 جسيم/غرام على التوالي. ولم تُظهر النتائج فروقًا ذات دلالة إحصائية بين أعضاء الجسم المختلفة داخل نفس البلد . كانت الألياف الزرقاء والسوداء هي الشكل الأكثر شيوعًا، وتراوحت أحجام الجسيمات في الغالب دون 1000 ميكرومتر .ومن خلال التحليل الطيفي، تم تحديد تسعة أنواع من البوليمرات، هيمن عليها البولي إيثيلين تيرفثالات (PET)، والبولي بروبيلين (PP)، والبولي إيثيلين (PE)، التي شكّلت أكثر من 87% من الجسيمات. كما أظهر تحليل المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) المقترن بتحليل الطاقة المشتتة (EDX) علامات تآكل ووجود ترسيبات غير عضوية على الجسيمات، مما يعكس تعرضها للتجوية البيئية. من الجانب الصحي، كشفت الدراسة أن الأطفال هم الأكثر تعرضًا نسبيًا للـ MPs من خلال استهلاك بلح البحر، حيث قدّر معدل التعرض السنوي بنحو 1262 جسيمًا في المغرب مقابل 78 جسيمًا في تونس .كما أظهر مؤشر خطر البوليمرات (Polymer Hazard Index, PHI) أن مستوى التلوث يحمل خطورة صحية مرتفعة[97].

قدمت دراسة الحَيّاني وآخرون[152] تقييمًا شاملًا لوجود الـ MPs في الحمأة الناتجة عن عمليات التهدئة (Lagooning sludge)، والتي تُستخدم كأسمدة عضوية في المغرب، مع دراسة تأثير كل من عمليات إزالة الماء والتسميد المشترك مع النفايات الخضراء على خصائص هذه الجسيمات. استخدمت الدراسة تقنيات متقدمة شملت التلوين الفلوري باستخدام صبغة Nile Red للكشف السريع عن الـ MPs، إلى جانب التحليل الطيفي الرافعي (Raman spectroscopy) لتحديد أنواع البوليمرات، والتحليل الحراري باستخدام Pyrolysis GC/MS للكشف عن المركبات الكيميائية المرتبطة بالبلاستيك. أظهرت النتائج وجود تركيزات عالية من الـ MPs، بمتوسط بلغ 11.9 ± 40.5 ألف جسيم/كغ من المادة الجافة في الحمأة الطازجة، وانخفض قليلًا إلى 9.7 ± 36 ألف جسيم/كغ بعد إزالة الماء. كما تبين أن عملية إزالة الماء تؤدي إلى فقدان الجسيمات صغيرة الحجم (أصغر من 500 ميكرومتر). فيما يتعلق بالتسميد المشترك مع النفايات الخضراء، تبين أن كمية ونوع الـ MPs اختلفت حسب نسب الحمأة المضافة، مع تسجيل تغيرات واضحة في الألوان والأحجام. أكثر أنواع البوليمرات شيوعًا شملت البولي بروبيلين (PP)، والبولي إيثيلين (PE)، والبولي أميد (PA)، والبوليستر (PES). أظهرت النتائج أن عملية التسميد التقليدي لم تقلل من كمية الـ MPs، مما يدل على أن الـ MPs لا تتحلل بيولوجيًا في ظل الظروف الحرارية المعتادة، ولكنها تؤثر في حجم الـ MPs وشكلها[152].

أجرى عشوخي وآخرون[153] دراسة ميدانية لرصد تلوث الـ MPs في خليج الحسيمة، الواقع ضمن البحر الأبيض المتوسط، والذي يتميز بطبيعته شبه المغلقة وتأثره بالنشاط البشري المكثف. هدفت الدراسة إلى تحليل توزيع وتركيب الـ MPs في ثلاثة مستويات بيئية، فوق المدية، بين المدية، وتحت المدية. استخدم الباحثون المجهر الرقمي لحساب عدد الجسيمات، وتقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء مع الانعكاس الكلي الممتص (ATR-FTIR) لتحديد أنواع البوليمرات. كشفت النتائج عن تركز أعلى في المياه (114 جزيئة/لتر) مقارنة بالرواسب (70 جزيئة/لتر). شكلت الألياف (Fibers) 90% من الجسيمات في المياه، بينما سيطرت الشظايا (Fragments)، والأغشية (Films) في الرواسب، حيث شكّلت الألياف 31% فقط منها. من الناحية الكيميائية، برز البولي بروبيلين (PP)، والبولي إيثيلين (PE)،كأكثر البوليمرات شيوعًا. تعكس النتائج التأثير الواضح للأنشطة البشرية الساحلية، خصوصًا الصيد والمخلفات الحضرية، في زيادة مستويات تلوث الـ MPs في هذا النظام البيئي الحساس[153].

تُظهر الدراسات المتعلقة بتلوث الـ MPs في المغرب تقدمًا مهمًا في فهم انتشار هذا الملوث وتأثيراته ضمن البيئات الساحلية والبحرية، مع اعتماد متزايد على تقنيات تحليلية متقدمة مثل مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM). بالمقارنة مع بعض الدول العربية، يمتلك المغرب قاعدة بحثية متنامية تغطي مناطق جغرافية متعددة، رغم أن الأبحاث لا تزال بحاجة إلى تعميق التقييمات التطبيقية والبيوكيميائية. في المقابل، تُعد المملكة العربية السعودية أكثر تقدمًا من حيث شمولية الدراسات التي تغطي بيئات متنوعة تشمل البحرية والساحلية والجوية ومياه الشرب، مع اعتماد تقنيات تحليلية متطورة مثل مطيافية Raman والتحليل الطيفي SEM-EDS، ما يمنحها موقعًا رياديًا إقليميًا في هذا المجال. أما تونس فتركز بشكل أكبر على الدراسات السمية والخلوية باستخدام مؤشرات حيوية، لكنها محدودة من حيث التنوع الجغرافي والموضوعي مقارنة بالمغرب. بينما تمتلك مصر قاعدة بيانات واسعة عبر مناطق متعددة لكنها تعاني من نقص في الدراسات التطبيقية والتقييمات البيوكيميائية، ما يقلل من شمولية فهم التأثيرات البيئية بالمقارنة مع المغرب. لبنان تواجه تحديات تمويلية وجغرافية تؤثر على جودة واستمرارية البحث، مما يضع المغرب في وضع أفضل نسبيًا من حيث التنوع والاستمرارية. قطر ما تزال في مراحلها الأولية في دراسة الـ MPs، مع تركيز محدود على التوزيع المكاني دون تقييمات سمّية أو بيئية معمقة، والجزائر تشهد نموًا في هذا المجال لكنها لم تصل بعد إلى مستوى المغرب من حيث استمرارية الأبحاث والتطور التقني. بناءً على ذلك، يمتلك المغرب إمكانات واضحة لتطوير دراساته لتشمل تقييمات أكثر شمولية وصحية، مع توصية بتعزيز التعاون الإقليمي وتوسيع الدراسات التطبيقية التي تسهم في صياغة سياسات بيئية فعالة تواكب تحديات تلوث الـ MPs في المنطقة.

4.2.8 المملكة الأردنية الهاشمية

تعد المملكة الأردنية الهاشمية من البلدان التي تواجه تحديات متزايدة في مجال إدارة الموارد المائية، نظرًا لمحدودية المياه وارتفاع الطلب عليها في القطاعات الزراعية والحضرية. مع تزايد الوعي العالمي بقضية تلوث الـ MPs وتأثيره البيئي والصحي، بدأت البحوث في الأردن تركز على تقييم وجود وانتشار هذه الـ MPs في البيئات المائية الأساسية مثل مياه الري ومياه الشرب. وفي ظل اعتماد الأردن الكبير على موارد مائية محدودة مثل قناة الملك عبدالله ومحطات معالجة المياه

الحضرية، بات من الضروري دراسة مدى تلوث هذه المصادر بالـ MPs لفهم أثره على جودة المياه والأنظمة البيئية المحيطة. بالرغم من قلة عدد الدراسات مقارنةً بدول أخرى في المنطقة، إلا أن الأبحاث الأردنية الحديثة أظهرت توجهًا نحو استخدام تقنيات تحليلية متقدمة مثل مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) والمجهر الفلوري لتوصيف الـ MPs، مما يفتح آفاقًا لفهم أعمق لمصدر التلوث وتوزيعه وطرق معالجته.

تناولت دراسة جريّس وآخرون[154] توزيع وكثافة الـ MPs في مياه قناة الملك عبدالله للري في الأردن، عبر تقييم ثلاث مناطق رئيسية على امتداد القناة شملت الشمال، والوسط، والجنوب. تم جمع عينات من ستة مواقع في كل منطقة، وتصنيف الجسيمات إلى ثلاث فئات حسب الحجم، والتي تراوحت بين 100 – 300 ميكرومتر، و300 – 500 ميكرومتر، وأكبر من 500 ميكرومتر. أظهرت النتائج وجود الـ MPs في جميع المواقع، بكثافات تراوحت بين 6,691 و12,907 جسيمًا/م^3، مع تزايد تدريجي من الشمال نحو الجنوب، مما يعكس ارتباط التلوث بازدياد التحضر والأنشطة الزراعية على امتداد القناة. أشارت التحاليل الطيفية (FTIR) إلى أن البوليستر (Polyester) كان البوليمر السائد، يليه البولي إيثيلين (PE)، خاصة في المناطق ذات النشاط الزراعي الكثيف. كما أوضح التحليل المورفولوجي تنوع مصادر الجسيمات بين الألياف النسيجية، وبقايا تغليف المواد الزراعية، وتآكل الإطارات. تؤكد هذه الدراسة أن التلوث بالـ MPs في نظم الري يتأثر بشدة بالأنشطة البشرية، وتحديدًا الزراعية، مما يستدعي تطوير استراتيجيات فعالة للحد من هذه المصادر بهدف حماية جودة المياه وتعزيز استدامة النظم الزراعية[154].

أجرت دراسة العمري وآخرون[155] تقييمًا لكفاءة محطة معالجة مياه زي (Zai Water Treatment Plant) في عمان، الأردن، في إزالة الـ MPs من مياه الشرب. شملت الدراسة جمع عينات من المياه الداخلة إلى المحطة ومن مخرجات كل وحدة من وحدات المعالجة خلال خمسة أشهر مختلفة بين عامي 2022 و2023. استخدم الباحثون غرابيل دقيقة بأحجام 100، و300، و500 ميكرومتر لتصنيف الـ MPs حسب الحجم، وتم تحليل العينات باستخدام مطيافية الأشعة تحت الحمراء الميكروسكوبية (Micro-FTIR) لتحديد أنواع البوليمرات، إضافة إلى المجهر الفلوري للكشف عن الأشكال المورفولوجية وتقدير الكمية. كشفت النتائج عن أن الـ MPs ذات الحجم 100ميكرومتر كانت الأكثر شيوعًا في المياه الخام. وتركزت البوليمرات السائدة في البوليستر (Polyester)، والبولي إيثيلين (PE)، والبولي بروبيلين (PP)، والبولي ستايرين (PS). تفاوتت كفاءة الإزالة بين وحدات المعالجة المختلفة، والتي شملت الترشيح ثنائي الوسائط، وحدات التجلط والترويق، ومعالجة الفحم المنشط، كما تأثرت الكفاءة بالتغيرات الموسمية والاختلاف في خواص الـ MPs الداخلة للمحطة. سُجّلت نسب الإزالة الكلية بين 29 % و91%. تؤكد هذه النتائج أن كفاءة محطة زي في إزالة الـ MPs متغيرة، وتعتمد بشكل كبير على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للـ MPs، وظروف التشغيل. ومع ذلك، تُظهر المحطة قدرة عالية على الإزالة في الظروف المثلى، مما يعزز من دورها في حماية الصحة العامة[155].

تشير الدراسات الأردنية الحديثة إلى تقدم ملحوظ في فهم تلوث الـ MPs، لا سيما في بيئات مياه الري ومياه الشرب، مع اعتماد تقنيات تحليلية متطورة مثل مطيافية الأشعة تحت الحمراء والمجهر الفلوري، مما يضع الأردن في موقع متقدم نسبيًا بين الدول العربية. مقارنة بالمملكة العربية السعودية التي تتمتع بإطار بحثي شامل ومتعدد البيئات وتقنيات تحليلية متقدمة، لا يزال الأردن بحاجة إلى توسيع نطاق أبحاثه لتشمل تقييمات بيئية وصحية أوسع. بالمقابل،

يظهر المغرب تفوقًا في عدد الدراسات والتركيز على البيئات الساحلية والبحرية، بينما يتفوق الأردن في جودة التحليل الكيميائي والفيزيائي للميكروبلاستيك. في تونس، يركز البحث على التأثيرات السمية والمؤشرات البيولوجية، وهو مجال يتطلب تطويرًا أكبر في الأردن، رغم تقدمه في توصيف الـ MPs. مصر تمتلك قاعدة بيانات واسعة تغطي بيئات متنوعة، ما يجعلها متقدمة من حيث الكم البحثي، بينما يتفوق الأردن في استخدام تقنيات حديثة لتحليل الـ MPs. مقارنة بلبنان وقطر، حيث تعاني الدراسات من محدودية التغطية والتمويل، يُظهر الأردن تطورًا أكبر في تنوع الطرق وكفاءة التحليل. أما الجزائر، فتشهد نموًا واضحًا في مجال البحث عن الـ MPs، ويبدو الأردن في وضع مشابه معها مع فرص لتعزيز جودة البحث. بناءً على ذلك، يُبرز الأردن تقدماً مهماً لكنه يحتاج إلى تعزيز البنية البحثية وزيادة التمويل لتوسيع الدراسات وتطوير تقنيات معالجة المياه. وتوصي هذه المقارنة باعتماد استراتيجية وطنية متكاملة تجمع بين البحث العلمي والتطبيق العملي والتوعية المجتمعية لحماية الموارد المائية والبيئة والصحة العامة من مخاطر الـ MPs.

4.2.9 الإمارات العربية المتحدة

تُعتبر دولة الإمارات العربية المتحدة من الدول ذات السواحل الممتدة على طول الخليج العربي والخليج العربي، حيث تمتلك سواحل استراتيجية متعددة في مدن مثل دبي وأبو ظبي والعين، مما يجعلها موقعًا هامًا لدراسة تلوث الـ MPs في البيئة البحرية الإقليمية. على الرغم من التحديات البيئية والصناعية، شهدت الإمارات اهتمامًا متزايدًا بالبحث العلمي حول تلوث الـ MPs، خصوصًا خلال السنوات الأخيرة. حتى الآن، تم نشر نحو 9 دراسات بحثية تركزت على انتشار وتأثير الـ MPs في بيئات بحرية ومائية مختلفة بالإمارات، بدءًا من عام 2019. ركزت هذه الدراسات بشكل رئيسي على تقييم تلوث الـ MPs في مواقع متنوعة تشمل الشواطئ، الرواسب البحرية، مياه البحيرات الصناعية، مصبات المحار، وأيضًا المنتجات الاستهلاكية، مثل مستحضرات التجميل واللحوم والأسطح المستخدمة في الطهي. يمكن تصنيف هذه الدراسات إلى فئتين رئيسيتين، حيث تتعلق الفئة الأولى بقياس انتشار الـ MPs وتوصيفه في الرواسب والمياه والأنظمة البيئية البحرية، فيما تركز الفئة الثانية على تحليل تركيب البوليمرات ومخاطر الـ MPs على الصحة والبيئة. استخدمت أغلب الدراسات تقنيات تحليلية متطورة منها مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR)، التحليل الطيفي بالأشعة السينية (XRF)، والتحليل الحراري التفريقي (DSC)، مما مكّن الباحثين من تحديد نوعية وحجم وتركيب جزيئات الـ MPs بدقة عالية. أظهرت النتائج هيمنة بوليمرات مثل البولي إيثيلين (PE)، والبولي بروبيلين (PP)، إلى جانب وجود جزيئات مطاطية دقيقة ناجمة عن تآكل الإطارات، مع تباين في تركيزات الـ MPs حسب المواقع والنشاطات البشرية المحيطة. تعود مصادر تلوث الـ MPs في الإمارات إلى نشاطات بشرية متعددة تشمل الصيد، البناء، الصناعات البحرية، والمخلفات الحضرية، إضافة إلى انتقال هذه الجسيمات عبر التيارات البحرية والرياح، ما يجعل معالجة هذه المشكلة بيئية وبحثية أولوية ضرورية لحماية البيئة البحرية وصحة الإنسان في المنطقة.

ناقشت دراسة أسلم وآخرون[156] تقييم تلوث الـ MPs في رواسب الشواطئ (Beach sediments) على طول الساحل في دبي، حيث لم تكن هناك دراسات سابقة موثقة لهذا الموضوع في المنطقة. شملت الدراسة جمع عينات من الرواسب عند خطوط الحطام (Wrack lines) في 16 شاطئًا مختلفًا، حيث تم جمع خمس عينات من كل شاطئ على

امتداد 100 متر باستخدام مربع بمساحة 0.5 × 0.5 متر. تم تسجيل عدد وألوان وأشكال جسيمات الـ MPs، كما تم تحديد نوع البوليمرات الخاصة بالألياف والخيوط الكبيرة باستخدام تقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR). بالإضافة إلى ذلك، تم تحليل 480 جسيمًا من الـ MPs من كل شاطئ للكشف عن المعادن الثقيلة باستخدام تحليل الفلوريسنس بالأشعة السينية (XRF). أظهرت النتائج أن متوسط وزن الـ MPs يبلغ 0.33 ملليغرام لكل غرام من الرواسب الجافة (ما يعادل 953 ملليغرام لكل متر مربع)، بينما بلغ متوسط عدد الجسيمات 59.71 جسيمًا لكل كيلوجرام من الرواسب الجافة (أو 165 جسيمًا لكل متر مربع). وكانت الجسيمات الزرقاء والألياف هي الأكثر شيوعًا، مع انتشار واسع للخيوط والألياف المصنوعة من البولي إيثيلين[156].

درس عطا المنان وآخرون[157] تلوث المعادن الثقيلة المرتبطة بحطام الـ MPs البحري على سواحل دبي. تم جمع 80 عينة من الرواسب من خطوط الحطام على 16 شاطئًا، واستُخرج منها 480 قطعة ميكروبلاستيك، وحُللت باستخدام تقنية الفلورة بالأشعة السينية (XRF) لتحديد التركيب المعدني. أكد التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) أن البوليمرات السائدة هي البولي إثيلين (PE)، والبولي بروبيلين (PP). تم الكشف عن 14 معدنًا ثقيلًا ضمن العينات، من بينها خمسة معادن تُصنف كملوثات أولوية حسب وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA)، وهي الكروم (Cr)، النيكل (Ni)، النحاس (Cu)، الزنك (Zn)، والرصاص (Pb). تعكس هذه النتائج قدرة الـ MPs على امتصاص وتراكم المعادن الثقيلة، مما يشكل تهديدًا بيئيًا على النظام البحري في دبي، ويستدعي وضع استراتيجيات فعالة للحد من تلوث الـ MPs والمعادن الثقيلة في المنطقة[157].

قدم حبيب وآخرون[158] دراسة تحليلية لمحتوى الجسيمات الدقيقة في 37 منتجًا تجميليًا من مقشرات الوجه والجسم المتوفرة في الأسواق الإماراتية، بهدف تحديد وجود الـ MPs وتركيبها الفيزيائي والكيميائي. أظهرت النتائج أن 11 منتجًا تحتوي على الـ MPs، بينما كانت الجسيمات في المنتجات الأخرى تتكون أساسًا من السليلوز الميكروكريستالي وقشور الجوز المسحوقة. أظهر التحليل الحراري التفريقي (DSC) أن نقاط تليين الـ MPs في المنتجات وصلت إلى 84 درجة مئوية، مع ملاحظة أن جسيمات الـ MPs في منتجين انصهرت عند درجة حرارة 100 درجة مئوية، مما أدى إلى تغير في خصائص طفوها. بالإضافة إلى ذلك، أدى التسخين عند 100 درجة مئوية بوجود هلام السيليكا إلى التسبب في احتجاز السيليكا وتحطم جزئي للـ MPs عند التبريد، مما يشير إلى آلية محتملة لتفتت الـ MPs ذي نقطة التليين المنخفضة بفعل الاحتكاك مع جسيمات صلبة وظروف التغير الحراري المتكررة[158].

درس الحمادي وفريقه[159] تلوث الـ MPs في أنظمة مصبات المحار على الشواطئ الشمالية لدولة الإمارات العربية المتحدة. تم تقييم الـ MPs في الرواسب والمحار من خمسة مواقع ساحلية من حيث الكمية، الشكل، الحجم، اللون والتركيب. بلغ متوسط تركيز الـ MPs في عينات الرواسب 95.5 ± 191.7 جسيم لكل كيلوجرام وزن جاف، وفي عينات المحار 93.8 ± 101.2 جسيم لكل كيلوجرام. وُجدت الـ MPs في جميع عينات الرواسب و51% من عينات المحار، ولم يُلاحظ وجود علاقة ارتباط بين كمية الـ MPs في الرواسب والمحار. كانت الألياف (Fibers) هي الشكل الغالب للميكروبلاستيك بنسبة 93%، واللون الأسود هو الأكثر شيوعًا بنسبة 53% في كلا النوعين من العينات. أما أكثر الأحجام تكرارًا فكانت بين 1.0 و2.0 ملم بنسبة 34%. تُعد هذه الدراسة الأولى من نوعها في المنطقة التي تحقق في وجود

الـ MPs في مصبات المحار، مما يبرز الحاجة إلى دراسة وإدارة مصادر هذه الملوثات نظراً لخطرها المحتمل على النظام البيئي البحري[159].

في سلسلة دراسات متكاملة، أجرى حبيب وفريقه[160، 161، 162] تقييمًا شاملًا لمصادر تلوث الـ MPs في دولة الإمارات العربية المتحدة، ركزت على ثلاثة محاور رئيسية، شملت الغذاء، والبيئة، ومنتجات العناية الشخصية. في المجال الغذائي، تم تحليل عينات من لحوم الدجاج والأسماك المباعة في الأسواق والمتاجر الكبرى في الشرق الأوسط، حيث أثبتت الدراسة أن مصدر التلوث هو تآكل ألواح التقطيع البلاستيكية (Polyethylene cutting boards). تراوحت تراكيز الـ MPs بين 0.03 و1.19 جزيئة/غرام في الدجاج، و0.014 إلى 2.6 جزيئة/غرام في الأسماك. وأظهرت الاختبارات أن غسل اللحوم يقلل من نسبة التلوث، دون القضاء عليه كليًا، في حين أظهرت اختبارات الشد والتآكل للألواح تقاربًا كبيرًا في معدلات التآكل بين مختلف الأنواع. أما في البيئة الحضرية، فقد تم رصد جزيئات المطاط الدقيقة (Micro-tire particles) الناتجة عن تآكل الإطارات في منطقة العين، أبوظبي، من خلال جمع عينات من غبار الطرق والتربة ومياه الجريان السطحي. بلغ متوسط وجود الجزيئات في غبار الطرق 40.6 ± 44.4 جزيئة/غرام، وتراوحت أحجامها حول 98.5 ± 106.9 ميكرومتر، مع تأكيد أن الاحتكاك الفيزيائي ودرجات الحرارة العالية هما المحركان الأساسيان لتفكك المواد المطاطية، وليس الجريان المائي كما يُعتقد تقليديًا. وفي قطاع منتجات العناية الشخصية، تم تحليل 163 منتجًا من مستحضرات غسل الوجه ومقشرات الجسم التي تُعد من أهم مصادر الـ MPs الأولية في البيئات المائية. غطت الدراسة الفترة بين 2018 و2020، وأظهرت انخفاضًا ملحوظًا في نسبة المنتجات التي تحتوي على الميكروبيدات البلاستيكية (Plastic Microbeads) خلال 2019 و2020، مقارنةً بعام 2018. كما أظهر استطلاع رأي للمستهلكين في 2020 زيادة في وعيهم تجاه المخاطر البيئية المرتبطة بالـ MPs. ومع ذلك، لا تزال بعض المنتجات القديمة تُباع في الأسواق، وبعض المنتجات المستوردة لا تلتزم بالتشريعات البيئية التي تحظر هذه الجزيئات، مما يؤكد ضرورة تعزيز الرقابة على سلاسل التوريد الدولية. تُبرز هذه الدراسات معًا رؤية بحثية متكاملة في فهم طبيعة ومصادر التلوث بالـ MPs في دولة الإمارات، بدءًا من المنتجات المنزلية اليومية، مرورًا بالبيئة الحضرية، وصولًا إلى المنتجات الشخصية، ما يشكّل أرضية علمية قوية لتطوير سياسات تنظيمية وتشريعية فعالة تحد من انتشار هذه الجسيمات وتعزز من حماية الصحة العامة والبيئة[160، 161، 162] .

تشير الدراسات الحديثة إلى تقدم ملحوظ في فهم تلوث الـ MPs في الإمارات العربية المتحدة، حيث ركزت الأبحاث على تقييم انتشار الـ MPs في البيئات الساحلية والبحرية، بالإضافة إلى دراسة تأثير المعادن الثقيلة المرتبطة بهذه الجسيمات، واستخدام تقنيات تحليلية متطورة مثل مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) وتحليل الفلوريسنس بالأشعة السينية (XRF). مقارنة بدول أخرى مثل المغرب، التي تميزت بعدد أكبر من الدراسات وتركيز على البيئات الساحلية والبحرية، تتميز الإمارات بعمق الدراسات التي تناولت مصادر التلوث المختلفة وتأثيراتها المحتملة على النظام البيئي، بالإضافة إلى تحليل الـ MPs في المنتجات الاستهلاكية والغذائية. في المملكة العربية السعودية، هناك إطار بحثي شامل يغطي بيئات متنوعة مع استخدام تقنيات تحليل متقدمة، بينما تتفوق الإمارات في التركيز على تلوث الـ MPs في مصبات المحار والجوانب الصناعية. بالمقابل، يبرز المغرب كدولة متقدمة في حجم الأبحاث وتنوع المواقع المدروسة.

تونس تركز على التأثيرات السمية والمؤشرات البيولوجية للميكروبلاستيك، وهو جانب لا يزال بحاجة إلى تطوير في الإمارات. أما الأردن، فتُظهر أبحاثه تقدمًا في تقييم تلوث المياه وتحليل الـ MPs باستخدام تقنيات حديثة، لكنه يحتاج إلى توسيع نطاق الدراسات لتشمل تأثيرات بيئية وصحية أوسع، خاصة بالمقارنة مع الإمارات والمغرب. في لبنان وقطر، تعاني الدراسات من محدودية في التغطية والتمويل، مما يجعل الإمارات أكثر تقدمًا من حيث تنوع وكفاءة التحليل. الجزائر تشهد نموًا في البحث عن الـ MPs، ويبدو أن الإمارات في وضع متقدم نسبياً معها، مع فرص لتعزيز التعاون البحثي. بناءً على هذه المقارنة، يُبرز الإمارات تقدمًا مهمًا في مجال أبحاث الـ MPs، مع ضرورة الاستمرار في تطوير البنية التحتية البحثية وتعزيز التعاون الإقليمي والدولي، إلى جانب رفع الوعي المجتمعي ووضع استراتيجيات بيئية شاملة للحد من تلوث الـ MPs وحماية البيئة البحرية والصحة العامة.

4.2.10 دولة الكويت

تُعد دولة الكويت من الدول الخليجية ذات الخط الساحلي القصير نسبيًا على الخليج العربي، لكنها شهدت في السنوات الأخيرة تناميًا ملحوظًا في الاهتمام البحثي بتلوث الـ MPs في البيئات البحرية والهوائية والغذائية. ورغم محدودية الدراسات مقارنة ببعض الدول العربية الأخرى، فإن الأبحاث الكويتية تميزت بدقة التحليل وتنوع البيئات المدروسة، بدءًا من الرواسب والمياه البحرية إلى الكائنات الحية والهواء الخارجي والداخلي، وحتى قوارير مياه الشرب. منذ عام 2020، أُجريت دراسات نوعية في الكويت (جدول 4.3)، ركزت على قياس تراكيز الـ MPs، وتحديد أنواع البوليمرات السائدة، وتحليل آثار العوامل البيئية مثل الجائحة والتخزين الحراري. استخدمت هذه الدراسات تقنيات متقدمة مثل مطيافية رامان، وATR-FTIR، XRF ، والتحليل الطيفي النووي. أظهرت النتائج أن أكثر البوليمرات شيوعًا هي البولي بروبيلين (PP)، والبولي إيثيلين (PE) ، والبوليستر، مع مستويات تلوث منخفضة نسبيًا في البيئة البحرية مقارنة بدول الجوار، ولكن بوجود مخاطر صحية محتملة في البيئات الهوائية الداخلية وقوارير المياه. تُشير النتائج إلى أن العوامل الهيدروديناميكية وتوزيع الأنشطة البشرية تلعب دورًا رئيسيًا في انتشار الـ MPs في الكويت، مما يستدعي جهودًا أكبر لتوحيد منهجيات البحث ورصد التأثيرات البيئية والصحية بشكل أدق.

جدول 4.3: ملخص الدراسات التي أُجريت في الكويت على الـ MPs

نوع العينة	الموقع الجغرافي	حجم الـ MPs	أشهر أنواع البوليمرات	سنة الدراسة	المراجع
رواسب شاطئية، مياه، كائنات بحرية (Beach sediment, water, marine organisms)	سواحل الكويت	< 5 مم	PE, PP, PS	2023	163
أسماك بحرية (Marine fish)	الخليج العربي الكويت	< 5 مم	PE, PP, PES	2023	164
مراجعة بيئية (Environmental review)	الخليج العربي	متغير حسب الدراسة	PET, PVC, Nylon, Polyester	2023	165
مياه بحرية (Marine water)	شمال غرب الخليج الكويت	< 5 مم	NR (تركيز على الانتشار الجغرافي)	2023	166
هواء خارجي (Outdoor air)	الكويت	≥ 2.5 ميكرومتر	NR	2023	167
هواء داخلي (Indoor air)	بيئات داخلية الكويت	3.2 – 27.1 جسيم/م^3	ألياف بلاستيكية: PET أو PP	2022	168
مياه معبأة في قوارير (Bottled water)	الكويت	تحليل غير مباشر لـ PET	PET (تحليل انتقال عنصر الأنتيمون)	2020	169

أجرى سعيد واخرون[163] تقييمًا شاملًا لحالة تلوّث البيئة البحرية في الكويت بالـ MPs، حيث جُمعت العينات من 44 موقعًا على امتداد السواحل الكويتية، وشملت رواسب الشواطئ، مياه البحر، وبعض الكائنات البحرية مثل الأسماك والمحار. أظهرت النتائج وجود تركيزات منخفضة نسبيًا من جسيمات الميكروبلاستيك، إذ تم رصد 37 جسيمًا فقط في 15 موقعًا من الرواسب كما كانت كميات الجسيمات في عينات المياه والكائنات البحرية محدودة. وقد استُخدمت تقنية التحليل الطيفي رامان (Raman) لتحديد البوليمرات، وكشف التحليل عن هيمنة ثلاثة أنواع رئيسية وهم البولي بروبيلين (PP)، والبولي إيثيلين (PE)، والبولي ستيرين (PS). وتُظهر هذه النتائج أن مستويات التلوّث في البيئة البحرية الكويتية أقل من نظيراتها في مناطق مجاورة كقطر وعُمان، مما يشير إلى تفاوت جغرافي في انتشار هذه الملوثات[163]. وفي سياق متصل، قدّم السالم وفريقه[164] دراسة نوعية لفحص وجود الـ MPs في محتوى الجهاز الهضمي لثمانية أنواع من الأسماك التجارية الشائعة في مياه الخليج العربي داخل المياه الكويتية. شملت هذه الأنواع مستويات غذائية مختلفة وتمثل تنوعًا بيئيًا في السلسلة الغذائية البحرية. استُخدمت تقنيتا الميكرو-رامان (Micro-Raman) والمطيافية بالأشعة تحت الحمراء بتقنية التداخل الكلي (ATR-FTIR) لتحديد نوع البوليمرات. أظهرت النتائج وجود الـ MPs على شكل شظايا (Fragments) داخل أحشاء أسماك مثل *Acanthopagrus latus*، و*Eleutheronema tetradactylum*، و*Lutjanus quinquelineatus* وبما أن هذه الأنواع تعيش في بيئات طينية وخليجية مغلقة، يُرجّح أن تكون الجسيمات ناتجة عن تحلل النفايات البلاستيكية في تلك المواطن، مما يؤدي إلى ابتلاعها إما بشكل مباشر أو من خلال التهام الحطام العضوي الملوث[164].

توسعت الدراسات الإقليمية لاحقًا لتشمل مراجعة شاملة أعدها سيف الدين[165] وفريقه حول وضع الـ MPs في بيئة الخليج العربي، والتي تُعد من المناطق البحرية الأقل دراسة حتى الآن، حيث وثقت هذه المراجعة وجود 16 دراسة

فقط تتناول الـ MPs في المنطقة. تؤكد المراجعة على انتشار الـ MPs كملوثات مستمرة (Persistent pollutants) ومتغلغلة في البيئة البحرية، ما أثار قلقًا بيئيًا وبيولوجيًا نظرًا لسميّتها وقدرتها على الانتقال عبر السلسلة الغذائية البحرية (Marine food web). كما أبرزت المراجعة أن قدرة هذه الجسيمات على امتصاص ملوثات أخرى، بالإضافة إلى قصور محطات معالجة مياه الصرف الصحي في إزالتها، يزيد من خطورتها البيئية. وتطرقت الدراسة إلى تقنيات جمع العينات وتحضيرها وتحليلها المستخدمة في المنطقة، موضحةً التفاوت الكبير في تراكيز الـ MPs بين الدراسات، حيث تراوحت الأعداد في مياه الكويت بين 12 جسيمًا في 40 نقطة جمع، بينما بلغت 0.71 جسيمًا/متر مكعب في قطر. أما في رواسب الشواطئ (Beach sediments)، فتم تسجيل 15 جسيمًا في 44 عينة بالكويت، مقابل 13 جسيمًا في 24 عينة بقطر، وبلغت التراكيز 2766 ± 3252 جسيمًا/متر مربع في بندر عباس بإيران. كما أظهرت العينات الحية (Biological samples) تباينًا مشابهًا، ففي حين تم رصد 3 جزيئات فقط في 87 عينة من أمعاء الكائنات البحرية في الكويت، سُجلت في إيران 828 جسيمًا في 58 عينة من الأسماك والروبيان، مع تراكيز مرتفعة جدًا في بعض الدراسات وصلت إلى 0.251 جسيم/غرام في العضلات و0.931 جسيم/غرام في الخياشيم. وأشار البحث إلى غياب اتفاق موحّد حول تقنيات الجمع (Standardized sampling protocols) في المنطقة، سواء من حيث حجم شبكة البلانكتون (Plankton net size) أو نوعية محاليل الطفو (Flotation solutions)، إضافة إلى اختلاف وحدات القياس، مما يصعّب المقارنات المباشرة. وبيّنت النتائج أن البوليمرات عالية الكثافة مثل البولي إيثيلين تيرفثالات (PET)، وكلوريد البولي فينيل (PVC)، النايلون (Nylon)، والبوليستر (Polyester) تميل إلى الاستقرار في الرواسب البحرية (Marine sediments)، وهي ظاهرة انتقال (Settling behavior) لم تُدرس بعمق بعد[156].

علاوة على ذلك، قدمت دراسة السالم وفريقه[166] تحليلًا لتأثير إجراءات الإغلاق المرتبطة بجائحة كوفيد-19 على توليد النفايات البلاستيكية وتوزيع الـ MPs في شمال غرب الخليج العربي، مع تركيز خاص على دولة الكويت . ركزت الدراسة على موقع ساحلي يتميز بنشاطات الترفيه والصيد، حيث تم رصد انتشار وجريان الجسيمات بعد إطلاقها في البيئة البحرية. أظهرت النتائج أن انتشار جسيمات الـ MPs يتأثر بشكل أكبر بالظروف الهيدروديناميكية (Hydrodynamic conditions)، مثل التيارات البحرية وحركات المياه، مقارنةً بتأثير عدد الجسيمات المطروحة. كما شهدت الفترة بين يناير وأبريل 2020 تضاعف مساحة انتشار الـ MPs وهو ما يُعزى بشكل رئيسي إلى العوامل الهيدروديناميكية الطبيعية (Natural hydrodynamic forces)، في حين لم يكن لإجراءات الإغلاق تأثير كبير على توزيع الجسيمات. وتُبرز هذه الدراسة أهمية فهم العوامل البيئية والأنشطة البشرية في انتشار الـ MPs، مما يساعد في تطوير استراتيجيات فعالة للحد من تلوث الـ MPs في منطقة الخليج العربي[166].

قدّم سيف الدين وآخرون[167] تقييمًا أوليًا للـ MPs الموزعة حسب الحجم في الهباء الجوي الداخلي (Indoor airborne MPs by size) في دولة الكويت، حيث تم جمع العينات باستخدام جهاز تأثير متدرج سداسي المراحل (Six-stage cascade impactor) لقياس تركيز الجزيئات في بيئات داخلية مختلفة. تراوحت تراكيز جسيمات الـ MPs في الهواء الداخلي بين 3.2 و27.1 جسيم/متر مكعب، مع تناقص خطي (Linear decrease) في التراكيز من الجزيئات الأكبر حجمًا إلى الأصغر (Larger to smaller size fractions). أظهرت النتائج تأثيرًا معنويًا

(Statistically significant effect) لموقع أخذ العينات على العدد الإجمالي للجسيمات والجزء القابل للاستنشاق (Inhalable fraction)، في حين لم يكن هناك تأثير واضح على الجزء القابل للتنفس (Respirable fraction)، أي الجسيمات الأقل من 2.5 ميكرومتر. كذلك، تبين أن نوع نظام تكييف الهواء يؤثر بشكل كبير على تركيز الـ MPs، حيث كانت التراكيز أعلى في الأماكن التي تستخدم وحدات التكييف المنفصلة (Split air conditioning units) مقارنةً بأنظمة التكييف المركزية (Central HVAC systems). أما وجود السجاد، فلم يُظهر تأثيرًا ملحوظًا على التراكيز. أشارت الدراسة إلى أن الألياف كانت الشكل السائد لجسيمات الـ MPs، مع وجود عدد قليل من الشظايا (Fragments) خصوصًا في الفئات الأصغر حجمًا. تُعد هذه الدراسة بمثابة خط الأساس لتقييم تلوث الهواء الداخلي بالـ MPs في الكويت، وتُبرز الحاجة إلى تطوير بروتوكولات قياسية لرصد الجسيمات الدقيقة جدًا (Ultrafine MPs) لما لها من تأثيرات صحية محتملة[167].

قدّم العلافي وآخرون[169] دراسة حول تأثير درجة الحرارة ومدة التخزين على ترسيب عنصر الأنتيمون (Sb) من قوارير المياه البلاستيكية المصنوعة من بولي إيثيلين تيريفثاليت (PET) إلى المياه المعبأة في دولة الكويت. شملت الدراسة ثلاث علامات تجارية مختلفة من قوارير المياه، حيث تم تخزين القوارير عند درجة حرارة 25°C لمدة ثلاثة أشهر لتقييم تأثير مدة التخزين، كما تم تعريض عينات أخرى لدرجات حرارة مختلفة 5°C-، و25°C، و50°C لمدة 24 ساعة لتقييم تأثير درجة الحرارة. كذلك، خضعت عينة إضافية للتخزين عند 50°C لمدة سبعة أيام لدراسة التأثير المشترك للحرارة والزمن. أظهرت النتائج أن درجة حرارة الغرفة (25°C) لم تؤثر بشكل ملحوظ على تركيز الأنتيمون في المياه، بينما الحرارة العالية أدت إلى زيادة ملحوظة في تركيز الأنتيمون المتسرب من البلاستيك إلى الماء، حيث بلغ التركيز 8.53 جزء في البليون (ppb) بعد 24 ساعة، وارتفع إلى 16.8 ppb بعد سبعة أيام عند درجة حرارة 50°C. يُذكر أن الحد الأقصى المسموح به من قبل منظمة الصحة العالمية لمستويات الأنتيمون في مياه الشرب هو 6 ppb، ما يعني أن القيم المسجلة في التجربة تجاوزت هذا الحد عند التعرض المطوّل للحرارة. خلصت الدراسة إلى أن تخزين قوارير المياه البلاستيكية في بيئات ذات درجات حرارة مرتفعة أو لفترات زمنية طويلة قد يؤدي إلى تسرب كميات غير آمنة من الأنتيمون إلى الماء، مما يشكّل مخاطر صحية محتملة للمستهلكين. وعليه، توصي الدراسة بضرورة تحديد شروط تخزين صارمة وآمنة لقوارير PET في الأسواق والمنازل، خاصة في الدول ذات المناخ الحار مثل الكويت[169] (جدول 4.3).

تُظهر دولة الكويت تطورًا لافتًا في أبحاث الـ MPs خلال السنوات الأخيرة، مع تركيز خاص على البيئات البحرية، الهوائية، والغذائية. مقارنة بالمغرب، الذي يتميز بتنوع مواقع الدراسة وتراكم كتّي كبير في الأبحاث الساحلية، تُبرز الكويت تنوعًا بيئيًا وتحليليًا على الرغم من محدودية المساحة الجغرافية. بينما تتمتع المملكة العربية السعودية بإطار بحثي واسع يغطي مناطق متعددة، تتفوق الكويت في استكشاف البيئات الهوائية الداخلية والخارجية، وهو مجال لا يزال غير مستكشف بشكل كافٍ في دول أخرى. في المقابل، يتفوق الأردن من حيث تحليل المياه العذبة واستخدام تقنيات دقيقة في توصيف البوليمرات، بينما تشترك تونس والكويت في التركيز على التأثيرات البيئية والنمذجة العددية. أما مصر، فتمتلك قاعدة بيانات واسعة، لكن الكويت تُقدم نموذجًا مهمًا في الجمع بين البحث البيئي والتحليل الصحي المباشر. لبنان وقطر لا تزالان تعانيان من محدودية الأبحاث، مما يجعل مستوى التقدم في الكويت ملحوظًا بالمقارنة. تُظهر الجزائر نموًا

مستمرًا في البحث البحري، في حين تؤكد الكويت قدرتها على الريادة في تحليل الهواء والمنتجات الاستهلاكية. بناءً على هذه المقارنة، تبرز الكويت كدولة واعدة في أبحاث الـ MPs، مع توصية بتوسيع نطاق الدراسات لتشمل تقويم الأثر الصحي والبيئي وتوحيد البروتوكولات البحثية.

4.2.11 سلطنة عمان

تُعتبر سلطنة عُمان من الدول المطلة على سواحل بحر عُمان والخليج العربي، وتمتاز بتنوع بيئاتها البحرية والحيوية التي تواجه تهديدًا متزايدًا من تلوث الـ MPs والنفايات البحرية. خلال السنوات الأخيرة، شهدت عُمان اهتمامًا متزايدًا بدراسة الـ MPs في البيئات البحرية مثل رواسب أشجار القرم، فضلاً عن دراسة تأثيرات محطات معالجة مياه الصرف الصحي على انتشار هذه الجسيمات البلاستيكية. استخدمت الدراسات الحديثة تقنيات تحليلية متقدمة مثل ATR-FTIR ونماذج النمذجة العددية لفهم توزيع ونوعية البوليمرات البلاستيكية، والتي تضمنت البولي إيثيلين (PE)، والبولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE)، والبولي بروبيلين (PP)، والبولي فينيل كلورايد (PVC). أظهرت النتائج وجود تفاوت في تراكيز الـ MPs بين المواقع البيئية المختلفة، مع تسجيل مستويات مرتفعة في بعض بحيرات أشجار القرم مقابل نسب أقل في المحميات الطبيعية، بالإضافة إلى استمرار إطلاق كميات ملحوظة من الـ MPs من محطات المعالجة إلى البيئة. تعكس هذه النتائج الحاجة الملحة لتطوير استراتيجيات متكاملة للمراقبة والمعالجة تهدف إلى الحد من تلوث الـ MPs في السلطنة، وتعزيز حماية مواردها البحرية الحساسة.

سلّطت دراسة الطارشي وفريقه[170] الضوء على التهديد المتزايد الناتج عن النفايات البحرية وتلوث الـ MPs في رواسب أشجار القرم على سواحل بحر عمان. شملت الدراسة عدة بحيرات قرمية، حيث تراوحت كثافة النفايات الكبيرة بين 0.83 و21.92 جسيم/م^2، مع تسجيل أعلى كثافة في بحيرة قريات (133 جسيم/م^2) وأدناها في محمية القرم الطبيعية (10 جسيم/م^2). شكّلت المواد البلاستيكية النسبة الأكبر من النفايات (73–96%)، فيما تراوحت تراكيز الـ MPs في الرواسب بين 6 و256 جسيم/كغم. سجلت بحيرة السوادى أعلى وفرة لـ MPs بواقع 5.32 ± 27.52 جسيم/كغم في حين كانت محمية القرم البحرية الأقل تلوثًا (0.60 ± 1.12 جسيم/كغم). كشفت الدراسة عن ثلاثة أنماط رئيسية للميكروبلاستيك هي الشظايا (Fragments)، والكريات (Beads)، والألياف (Fibers)، التي توزعت بنسبة 40.05% في المنطقة الأرضية، و30.97% في المنطقة البحرية، و28.98% في وسط الغابات القرمية. باستخدام التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء مع التداخل الكلي (ATR-FTIR)، تم التعرف على البوليمرات السائدة، وكانت البولي إيثيلين (PE) بنسبة 40% والبولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE) بنسبة 28%. توفر هذه الدراسة قاعدة بيانات أساسية تدعم جهود المراقبة المستقبلية ووضع استراتيجيات الإدارة البيئية في السلطنة والمنطقة[170].

قدّمت دراسة حديثة أعدها العامري وآخرون[171] تقييمًا شاملًا لتركيز وتحميل الـ MPs في ثلاث محطات رئيسية لمعالجة مياه الصرف الصحي في سلطنة عمان. اعتمدت هذه المحطات على تقنيات معالجة مختلفة شملت الغشاء الحيوي (Membrane Bioreactor, MBR)، المفاعل الحيوي المتسلسل (Sequencing Batch Reactor, SBR)، والمعالجة البيولوجية التقليدية (Conventional Activated Sludge, CAS).تم جمع عينات من مياه الدخل

(Influent)، ومياه المخرجات (Effluent)، والحمأة (Sludge)، ثم تمت معالجتها باستخدام سلسلة ترشيح تبدأ من 1ملم إلى 45 ميكرومتر، تلتها معالجة تأكسدية باستخدام كاشف فنتون (Fenton's reagent)، وفصل كثافيباستخدام محلول كلوريد الصوديوم (NaCl). لتحديد أنواع البوليمرات، استُخدم التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء بتحليل الانعكاس الكلي المضعف (ATR-FTIR)، وذلك على 10% من الجسيمات المستخلصة. أظهرت النتائج أن تركيزات الـ MPs في المخرجات تراوحت بين 0.93 و1.38 جسيم/لتر، مع نسب إزالة إجمالية بلغت ما بين 77.4 و82.5% حسب نوع المعالجة. كما أشارت التحاليل إلى أن الجسيمات المتبقية كانت صغيرة الحجم (< 425 ميكرومتر) وغالبًا على شكل ألياف. أما البوليمرات الأكثر شيوعًا فشملت البولي بروبيلين (PP)، والبولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE)، والبولي يوريثان (PU)، والبولي إيثيلين تيرفثالات (PET)، والبولي فينيل كلورايد (PVC). لتقييم المخاطر البيئية والصحية، استخدمت الدراسة كلًا من مؤشر تحميل التلوث (PLI) ومؤشر المخاطر (HI)، إضافة إلى منهجية "PROMETHEE" (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) لتصنيف المخاطر بناءً على عدة معايير[171].

تُبرز سلطنة عُمان مكانة متقدمة في أبحاث الـ MPs ضمن المنطقة، مع تركيز واضح على البيئة البحرية ومحطات معالجة مياه الصرف الصحي وتأثيرها على تلوث الـ MPs. مقارنة بدول الخليج الأخرى مثل الإمارات والسعودية التي تتمتع بأبحاث موسعة في البيئات الساحلية، تسلط الدراسات العمانية الضوء على تفاصيل دقيقة في بيئات محمية مثل بحيرات أشجار القرم، إضافة إلى تقييم الأداء البيئي لمحطات المعالجة. بالمقابل، تظل دول مثل قطر والإمارات في حاجة إلى تعميق البحث في تأثيرات الـ MPs على المحيطات الداخلية والأنهار. وتتفوق عمان على بعض الدول من حيث استخدام تقنيات التحليل الطيفي المتقدمة والنمذجة العددية لفهم ديناميكية انتشار الـ MPs. كما تشارك عمان مع دول أخرى في المنطقة، مثل الكويت، الاهتمام المتزايد بفهم مصادر وتوزيع الـ MPs، مع التركيز على أهمية تطوير استراتيجيات مراقبة فعالة. مع ذلك، تحتاج الدراسات في السلطنة إلى توسيع نطاقها لتشمل تقييمات أكثر شمولاً للتأثيرات الصحية والبيئية، إضافة إلى تبني معايير بحثية موحدة لتسهيل المقارنات الإقليمية والدولية. من خلال هذه الجهود، يمكن لعُمان أن تلعب دورًا رائدًا في مكافحة تلوث الـ MPs وتعزيز استدامة بيئتها البحرية.

4.2.12 جمهورية العراق

تُعد جمهورية العراق من الدول التي بدأت تشهد اهتمامًا متزايدًا بدراسة تلوث الـ MPs في بيئاتها المائية والبرية خلال السنوات الأخيرة، لا سيما في ضوء الأهمية البيئية والاقتصادية التي تحتلها الأنهار والمسطحات المائية مثل دجلة والفرات وأهوار الجنوب. على الرغم من التحديات البيئية والاجتماعية التي تواجه البلاد، فقد بدأت الدراسات العلمية في العراق تركز على تقييم تراكيز الـ MPs في مياه الأنهار، الرواسب، الغبار الجوي، ومحطات معالجة المياه، مع استخدام تقنيات حديثة مثل FTIR، SEM-EDS، وتحليل XRF لتوصيف أنواع البوليمرات وتأثيرها البيئي والصحي. تتميز هذه الدراسات بمحاولتها الربط بين التلوث البلاستيكي وتغيرات الخصائص الفيزيائية والكيميائية في البيئات المائية، إضافة إلى تقييم تأثير الـ MPs على الكائنات الحية المحلية. إلا أن الأبحاث العراقية لا تزال في مراحلها الأولى مقارنة بدول أخرى في المنطقة،

مع حاجة ملحة لتوسيع نطاق الدراسات وتوحيد البروتوكولات البحثية لتوفير قاعدة بيانات شاملة تدعم اتخاذ القرارات البيئية. في دراسة حديثة أجراها عبيد وآخرون[172]، تم توثيق وجود الـ MPs في هور الدلمج، أحد أهم المسطحات المائية الشروب في العراق، والمشهور بتنوعه البيولوجي وثروته السمكية. أظهرت التحاليل أن نسبة التلوث بهذه الجسيمات بلغت 2.6%، خاصة في المناطق الجنوبية والشرقية من الهور. وتم تحديد أنواع الجسيمات باستخدام مطياف الأشعة تحت الحمراء (FTIR)، حيث كانت جزيئات البولي إيثيلين (PE) الشفافة هي الأكثر شيوعًا.تراوحت تراكيز الجسيمات بين $10^3 \times 1.9$ و$10^3 \times 3.6$ جسيم/كم^2 خلال عامي 2019 و2020، مما يشير إلى تزايد التلوث بمرور الوقت، وبيّنت التجارب المعملية أن طحالب *Spirulina platensis*، وهي كائنات دقيقة هامة بيئيًا واقتصاديًا، تتأثر سلبًا بنموها وكمية الكلوروفيل عند تعرضها للـ MPs، وكان البولي فينيل كلورايد (PVC) الأكثر ضررًا بينها. لكن الملفت أن هذه الطحالب أظهرت قدرة على امتصاص الـ MPs من الماء، مما يجعلها مرشحًا واعدًا في تقنيات المعالجة البيولوجية للتخفيف من التلوث البلاستيكي[172].

قدّم Almola واخرون[173] دراسة ميدانية تناولت تلوث الغبار المتناثر في شوارع الجهة اليسرى من مدينة الموصل/العراق، من خلال فحص وجود جسيمات الـ MPs وتركيزات المعادن الثقيلة. جُمعت عشرون عينة من الغبار من مناطق سكنية وتجارية وصناعية، بثلاث مكررات لكل موقع، لدراسة توزيع الـ MPs وخصائصه، إضافة إلى تقييم المخاطر البيئية المرتبطة بتركيزات اثني عشر عنصراً من المعادن الثقيلة. أظهرت النتائج وجود الـ MPs بتراكيز تراوحت بين 244 و2760 جسيمًا لكل 15 غرام من الغبار، حيث كانت معظم الجسيمات شفافة وشكلها مجزأ، بأحجام تتراوح بين أقل من 10 وحتى 200 ميكرومتر كما رُصدت عبر المجهر التشريحي والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM). كشف تحليل FTIR أن البولي فينيل كلورايد (PVC) كان البوليمر السائد بنسبة تقارب 63%[173].

حددت دراسة الخليدي والحيادري[174] تراكيز جزيئات البولي ستايرين الدقيقة في مياه نهر الكوفة، العراق، باعتبارها من الملوثات الناشئة التي تثير القلق البيئي بشكل متزايد، لا سيما في البيئات المائية التي تُعد أحد أكبر مستودعات هذه الجزيئات. تم جمع عينات مياه ثلاثية من موقعين (أعلى وأسفل مجرى النهر) خلال شهر يناير 2022، وتم تحليلها باستخدام تقنيتي التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) والمجهر الإلكتروني الماسح المزوّد بتحليل الطاقة المشتتة (SEM-EDS). كما تم استخدام طريقة طيفية معدّلة لتحديد تراكيز البولي ستايرين. أظهرت النتائج أن متوسط تراكيز البولي ستايرين تراوح بين 20 و70 ميكروغرام/لتر في كلا الموقعين. وكشفت أطياف FTIR عن وجود روابط كيميائية من نوع C-H وC≡C، بينما أظهرت صور المجهر الإلكتروني ملامح شكلية لجزيئات الـ MPs، تتضمن تشققات وأنماط متعرجة على سطح الجزيئات، مما يدل على تأثير التجوية الميكانيكية والتعرض الطويل لأشعة الشمس. تُبرز هذه الدراسة وجودًا ملحوظًا للبولي ستايرين في المياه العذبة، مما يستدعي إجراء مزيد من الدراسات والرصد المستمر لهذا النوع من الملوثات[174].

قدّم كادوم واخرون[175] دراسة أولية تناولت تلوث الرواسب السطحية بجزيئات الـ MPs في نهر الفرات، وهي المرة الأولى التي يتم فيها توثيق وفرة وتوزيع وأنواع البوليمرات الدقيقة في هذا النهر. شملت الدراسة تحليل عينات الرواسب على امتداد النهر، وأظهرت النتائج وجود الـ MPs في جميع مواقع الدراسة، بتراكيز تراوحت بين 29.6 و120.0

جسيم/كغم من الوزن الجاف، بمتوسط قدره 86.7 جسيم/كغم. أظهرت الدراسة أن الألياف (Fibers) كانت الشكل الأكثر شيوعًا للميكروبلاستيك بنسبة 57.1%، تلتها الأغشية (Films) بنسبة 29.6%، ثم الشظايا (Fragments) بنسبة 13.1%. أما من حيث التركيب الكيميائي، فقد تم تحديد البوليمرات باستخدام تقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء FTIR، وكانت أكثرها شيوعًا البولي إيثيلين (44.1%)، يليه البولي إيثيلين تيرفثالات (35.0%)، ثم النايلون (20.2%). تشير النتائج إلى أن الرواسب في نهر الفرات ملوثة بجزيئات MPs، مما يشكّل مصدر قلق بيئي يستدعي اتخاذ إجراءات لإدارة هذا التلوث والحد من تأثيراته عبر برامج تأهيل بيئي تستهدف الأنهار العراقية[175].

قدّم سلطان وفريقه[176] دراسة هي الأولى من نوعها في العراق لرصد تلوث محطات معالجة مياه الشرب بالـ MPs في مدينة بغداد. تم في هذه الدراسة جمع عينات مياه بحجم لتر واحد (1L) لكل عينة من أربع محطات رئيسية تعتمد على مياه نهر دجلة، وهي محطة ، ومحطة الفتح المبين، ومحطة الدورة، ومحطة المدائن. تم تحديد أشكال الـ MPs باستخدام المجهر الفلوري (Fluorescence Microscopy) بعد تلوينها بصبغة النيل الأحمر (Nile Red Dye)، بينما جرى التعرف على أنواع المركبات البوليمرية باستخدام التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) أظهرت النتائج أن تراكيز الجسيمات في المياه الخام تراوحت بين 17 و62 جسيم/لتر، بينما انخفضت في مياه الشرب المعالجة إلى 9 – 40 جسيم/لتر، مما يشير إلى كفاءة جزئية للمعالجة لكنها غير كافية لإزالة التلوث بشكل تام. أظهرت التحاليل أن أكثر أنواع البوليمرات شيوعًا كانت النايلون (Nylon)، والبولي كربونات (Polycarbonate)، والبولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE)، والبولي ستايرين (PS)، والبولي أميد (Polyamide)، والبولي إيثيلين تيرفثالات (PET)، والبولي يوريثان (PU). أما من حيث الشكل المورفولوجي فقد كان الشكل الليفي هو الغالب في كل من المياه الخام والمياه المعالجة، إذ بلغت نسبته في محطة الفحامة 91.6% في المياه الطبيعية و66.6% في مياه الشرب. في المقابل، سجل الشكل الكروي النسبة الأعلى في المياه الخام لمحطة المدائن بنسبة 82.2% وقد خلصت الدراسة إلى أن محطات معالجة مياه الشرب في بغداد ملوثة بالـ MPs بدرجات متفاوتة، وهو ما يسلّط الضوء على الحاجة الماسّة إلى تطوير تقنيات المعالجة، وفرض رقابة بيئية مستمرة إلى جانب تعزيز الوعي البيئي المجتمعي للحد من هذه الملوثات الناشئة (Emerging pollutants)، التي قد تُشكّل خطرًا طويل الأمد على صحة الإنسان والأنظمة البيئية[176].

قدّم العزاوي وآخرون[177] دراسة تهدف إلى رصد وجود الـ MPs في مياه نهر دجلة في وسط العراق، مع التركيز على مناطق مدينة بغداد وسد الكوت. تضمنت الدراسة جمع أحد عشر عينة من المياه السطحية موزعة على امتداد النهر، بهدف تقييم التوزيع المكاني للجسيمات وتحديد العوامل البيئية المؤثرة في انتشارها. تمت معالجة العينات مخبريًا عبر عملية الهضم الكيميائي (Chemical digestion) باستخدام بيروكسيد الهيدروجين لإزالة المواد العضوية الطبيعية، تلتها عملية فصل كثافي (Density separation) لفصل الـ MPs عن المواد غير المرغوب فيها. بعد ذلك، خضعت العينات للتحليل باستخدام كل من المجهر الضوئي (Optical Microscopy) ومطياف الأشعة تحت الحمراء (FTIR) لتحديد الخصائص الشكلية والتركيبية للجسيمات. أظهرت النتائج وجود جزيئات بلاستيكية دقيقة في جميع العينات، تراوح عددها بين 27 و74 جسيم لكل عينة. وتبيّن أن الأنواع البوليمرية الأكثر شيوعًا كانت البولي بروبيلين (PP)، والبولي إيثيلين (PE)، والبولي ستايرين (PS)، والتي شكّلت مجتمعة نحو 66.92% من إجمالي الجزيئات المكتشفة. من حيث

الخصائص المورفولوجية سادت الألياف (Fibers) والقطع على بقية الأشكال، بينما كان اللون الأبيض هو اللون الأكثر تكرارًا بين الجسيمات في غالبية العينات. أشارت الدراسة إلى أن الظروف الهيدروديناميكية (Hydrodynamic conditions)، إضافة إلى مواقع المدن الحضرية والمنشآت الصناعية المجاورة، تؤثر بشكل مباشر في توزيع وتركيز الـ MPs على طول نهر دجلة. وقد سجلت المواقعS9 وS10 وS11 على معدلات تراكم، خصوصًا عند سد الكوت، ما يدل على أن السد قد يعمل كحوض احتجاز طبيعي لهذه الملوثات، بسبب انخفاض سرعة الجريان وتراكم الرواسب. تُعد هذه الدراسة من الإسهامات المهمة في تقييم التلوث البلاستيكي في الأنهار العراقية، وتسلط الضوء على ضرورة إدراج الـ MPs كأحد مؤشرات جودة المياه، مع أهمية وضع استراتيجيات مراقبة ومعالجة مستدامة تحد من تدفق هذه الملوثات إلى النظم البيئية المائية[177].

تُظهر الأبحاث العراقية حول الـ MPs تقدمًا ملحوظًا في فهم انتشار وتأثيرات هذه الملوثات في البيئات المائية والحضرية، وخاصة في نهر دجلة، ونهر الفرات، وأهوار الجنوب، بالإضافة إلى الغبار الجوي ومياه الشرب في المدن الكبرى مثل بغداد. وبالمقارنة مع دول مجاورة مثل الكويت وسلطنة عُمان، اللتين تبرزان بتنوع المواقع المدروسة ونوعية التحليل، يتركز البحث في العراق بشكل خاص على البيئات المائية والتأثيرات البيئية المباشرة، وهو ما يعكس طبيعة الموارد الطبيعية والتحديات المحلية التي تواجهها البلاد. مع ذلك، لا تزال هناك حاجة ماسة لتعزيز البحث العلمي والتقني في العراق، لا سيما في مجالات تقييم المخاطر الصحية المرتبطة بالـ MPs، ووضع استراتيجيات فعالة لإدارة هذه الملوثات. يُوصى بزيادة التعاون الإقليمي والدولي، وتطوير شبكات مراقبة مستدامة، وتبني تقنيات معالجة متقدمة للحد من انبعاثات الـ MPs في البيئة العراقية، بما يضمن حماية الموارد المائية والصحة العامة في المستقبل. وعند مقارنة مستوى الأبحاث، يتضح أن العراق لا يزال في مراحل مبكرة نسبيًا من دراسة تلوث الـ MPs، خاصةً بالمقارنة مع الكويت وعُمان. ففي حين تميزت الكويت بإجراء دراسات متنوعة تشمل الهواء الداخلي والخارجي والبيئات البحرية، وتركيز عُمان على النفايات البحرية ومحطات معالجة المياه، تمحورت الأبحاث العراقية حول تقييم التأثيرات البيئية في المسطحات المائية الكبرى مثل هور الدلمج ونهر الفرات، إضافة إلى مراقبة الملوثات في الغبار الجوي ومياه الشرب في بغداد. تُظهر الدراسات في العراق استخدامًا جيدًا لتقنيات التحليل الطيفي المتقدمة، ولكنها تفتقر إلى الدراسات الموسعة التي تشمل بيئات متعددة أو تقييمات صحية مباشرة كما هو الحال في بعض الدول الأخرى. ويبرز هذا الوضع الحاجة لتطوير برامج بحثية أكثر شمولاً وتكاملًا، مع تبني منهجيات موحدة لتقييم انتشار وتداعيات الـ MPs، ووضع استراتيجيات واضحة لإدارة هذه الملوثات الناشئة.

الفصل الخامس

الفصل الخامس: الدراسات والجهود البحثية لتلوث الجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) في الدول العربية

يغطي الفصل الخامس تحليل شامل لتلوث الجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) في الدول العربية، بدءًا من استعراض توزيع الدراسات المنشورة ونطاقها وأنواع العينات ومواقع جمعها، مرورًا بالبنية المعملية والتقنية للأجهزة المستخدمة في التحليل، وتوافر البيانات المتعلقة بتركيز هذه الجسيمات في البيئة العربية. كما يناقش الجهود الحالية لمعالجة التلوث، ويستعرض التحديات القائمة والتوجهات المستقبلية، قبل أن يقدم توصيات لتعزيز البحث العلمي وتحسين إدارة التلوث في المنطقة.

5.1 تحليل توزيع الدراسات المنشورة حول الـ MPs في الدول العربية

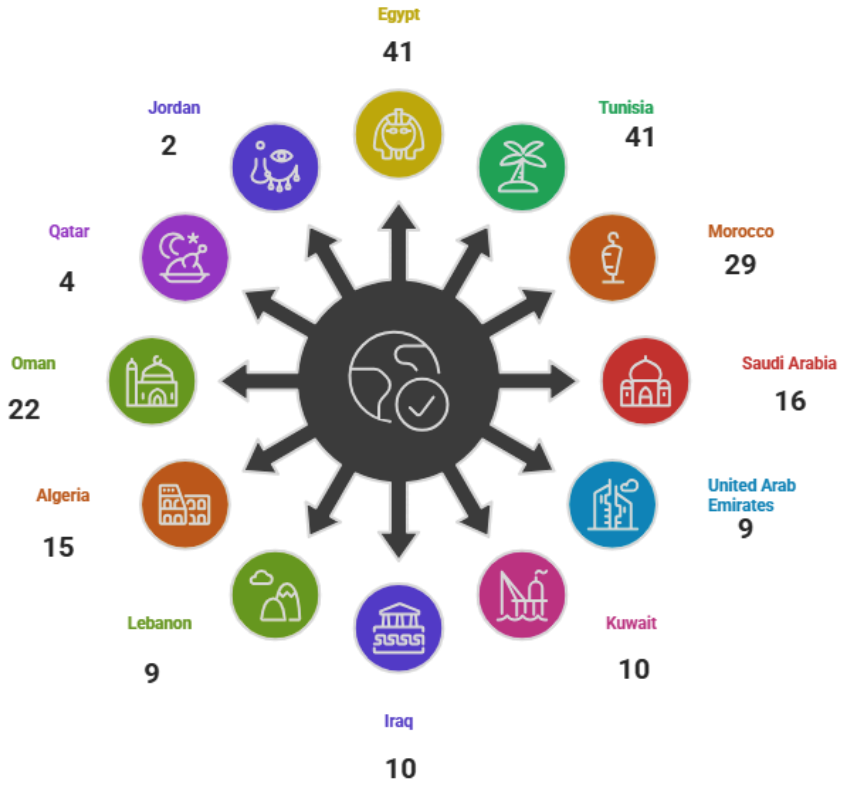
يُشكل التلوث البلاستيكي في المنطقة العربية تحدياً بيئياً متفاقماً يمكن وصفه بـ "الدلو المثقوب"، حيث تعاني منظومة إدارة النفايات من ثغرات متعددة تبدأ بمعدلات استهلاك مرتفعة للبلاستيك تتراوح بين 40 إلى 50 كيلوجراماً للفرد سنوياً، وتتفاقم المشكلة لكون أكثر من 50% من هذه النفايات عبارة عن مواد بلاستيكية ذات استخدام واحد. وفي ظل ضعف البنية التحتية الذي يجعل المنطقة نقطة ساخنة عالمياً لتسرب النفايات، فإن ما نسبته 20% إلى 26 % من النفايات يُدار بشكل سيء ولا يخضع للمعالجة السليمة. وتكتمل دائرة الهدر مع انخفاض معدلات إعادة التدوير إلى ما دون 10%، مما يؤدي في النهاية إلى نتيجة كارثية تتمثل في تسرب ما يقارب 6 كيلوجرامات من البلاستيك للفرد الواحد إلى البيئة البحرية، مما يستدعي تحولاً جذرياً نحو سد هذه الثغرات وتبني حلول أكثر استدامة (شكل 5.1).

شكل 5.1 نموذج الدلو المثقوب: مسارات وتسرب التلوث البلاستيكي في المنطقة العربية

تشير البيانات المستخلصة من مراجعة الأدبيات العلمية في الدول العربية إلى تفاوت ملحوظ في حجم وتنوع الأبحاث المنشورة حول التلوث بالـ MPs هذا التفاوت يعكس اختلافًا في الإمكانات البحثية، وتباينًا في البنية التحتية العلمية، وكذلك تباين الأولويات البيئية في كل دولة. تتصدّر مصر وتونس قائمة الدول العربية من حيث عدد الدراسات المنشورة، ويعكس هذا الاهتمام البحثي وعيًا متزايدًا بالتحديات البيئية المرتبطة بسواحل البحر الأبيض المتوسط، ووجود قاعدة علمية نشطة تركز على مكونات البيئة الساحلية كالرواسب والكائنات البحرية. تليها عمان و السعودية، مما يعكس حجم الاستثمار المؤسسي في البحث البيئي، خاصة في ظل الضغوط المتزايدة على البيئة البحرية في الخليج العربي نتيجة الأنشطة الصناعية والتحلية والصيد. تمتاز الدراسات في المملكة العربية السعودية بتنوعها من حيث نوع العينة والموقع الجغرافي والتقنيات التحليلية المستخدمة. تركّزت غالبية الدراسات المصرية على البيئة الساحلية والرسوبيات، مع اهتمام متزايد حديثًا بتأثير التلوث بالبلاستيك الدقيق على الكائنات البحرية والإنسان. أما المغرب، تناولت بشكل خاص التلوث في السواحل الأطلسية والمتوسطية. إلا أنه لا يزال بحاجة إلى التوسّع ليشمل مصادر التلوث البرية والأنشطة الحضرية

ذات الصلة. بينما تم نشر دراسات قليلة لكل من الكويت و الإمارات، تناولت مجموعة متنوعة من البيئات، بما في ذلك الهواء، المياه، والرواسب. وتميّزت بعض هذه الدراسات باستخدام تقنيات تحليلية متقدمة مثل XRF و FTIR. في حالة الكويت، تعكس الأبحاث اهتمامًا تدريجيًا بملف التلوث البحري، بينما في الإمارات، يظهر دور أكبر للأبحاث التطبيقية خاصة في منتجات الاستهلاك والتجميل. العراق لدية عدد جيد نسبيًا بالنظر إلى التحديات السياسية والاقتصادية، وقد غطّت الدراسات العراقية جوانب متنوعة مثل مياه الصرف والرواسب والغبار الهوائي، مما يشير إلى تنوّع في المصادر البيئية المدروسة. سجّلت لبنان والجزائر دراسات مما يعكس جهودًا أولية في هذا المجال. أما قطر، الأردن هناك حاجة ملحة لتعزيز البحث العلمي في هذا المجال، خاصة في ظل النمو الحضري والأنشطة البحرية المتزايدة في هذه الدول (شكل 5.2).

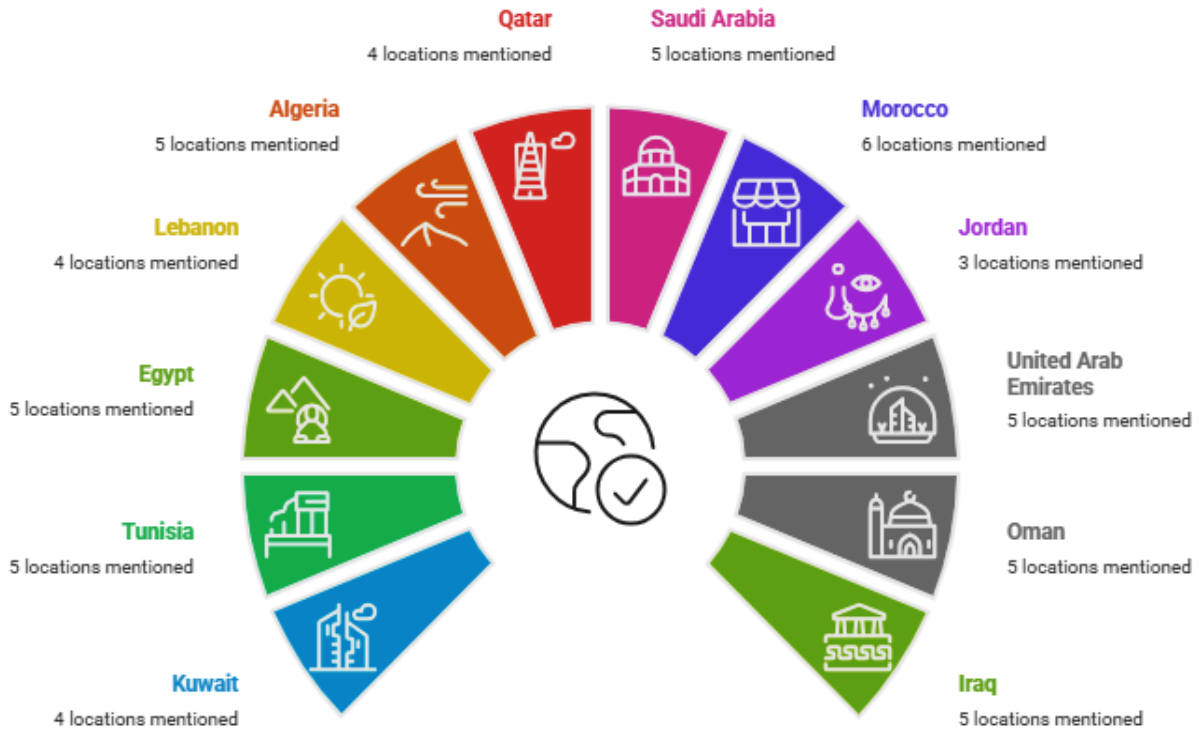
تُبرز هذه البيانات التفاوت الواضح في الاهتمام البحثي بمسألة التلوث بالـ MPs في العالم العربي، ما يستدعي تعزيز التعاون الإقليمي بين المؤسسات الأكاديمية والمراكز البيئية. كما أن هناك حاجة لتبني بروتوكولات قياسية للرصد والتحليل، وتوفير تمويل مستدام للأبحاث البيئية، بهدف بناء قاعدة بيانات متكاملة تُسهم في فهم أفضل لتأثيرات هذه الجسيمات على البيئة والصحة العامة.



شكل 5.2: ملخص بياني لعدد الدراسات التي تم نشرها عن الـ MPs في الدول العربية

5.2 نطاق الدراسات التي تمت على الـ MPs وأنواع العينات ومواقع جمعها في الدول العربية

تمثل البيانات المستخلصة من تحليل مواقع جمع العينات البيئية والبيولوجية لدراسات الـ MPs في 12 دولة عربية خريطة أولية لفهم مدى اتساع النطاق البحثي في المنطقة. يغطي هذا القسم مناقشة تفصيلية لمستوى التمثيل الجغرافي ونوعية البيئات المدروسة، ويستعرض أوجه القوة والقصور في البيانات البيئية المتاحة على مستوى كل نوع من أنواع العينات وهي مياه البحر، الرمال الساحلية، الرواسب البحرية، الأحياء البحرية (أسماك و رخويات)، مياه الصرف الصحي المعالجة، والطيور البحرية. تعد مياه البحر البيئة الأكثر تمثيلاً في الدراسات العربية المتعلقة بالـ MPs، إذ شملتها جميع الدول المدروسة دون استثناء. ويُعزى ذلك إلى سهولة الوصول إليها، وأهمية المسطحات المائية الساحلية في الأنشطة الاقتصادية والسكانية، وكذلك باعتبارها ناقلًا رئيسيًا للـ MPs عبر التيارات البحرية. غير أن التوزيع الجغرافي للمواقع يبيّن تركّز الدراسات في مناطق محددة؛ فعلى سبيل المثال، نجد أن الدراسات في الكويت تركزت على شمال غرب الخليج العربي، بينما في تونس اقتصرت على الخلجان الرئيسة كخليج قابس وخليج الحمامات، دون التوسع باتجاه السواحل الجنوبية أو الجزر الصغيرة. في مصر، تعددت المواقع بين البحر المتوسط والبحر الأحمر، ما يعكس وعيًا بيئيًا بضرورة شمول البيئات المتباينة. أما المغرب فقدّم نموذجًا يُحتذى به في تعدد المواقع بين البحر المتوسط والمحيط الأطلسي. في المقابل، تُلاحظ محدودية واضحة في لبنان والأردن، حيث اقتصرت مواقع جمع العينات على السواحل الشرقية أو قناة الملك عبد الله دون توسيع دائرة الرصد (شكل 5.3).



شكل 5.3 توزيع مواقع الدراسات المرتبطة بالميكروبلاستيك في الدول العربية

تشير بيانات الرمال الساحلية إلى أنها تُعد من البيئات التي تلقّت اهتمامًا جيدًا نسبيًا في الدراسات العربية، مع تفاوت في الكثافة الجغرافية. تظهر دول مثل المغرب والسعودية بتنوع مكاني لافت، حيث شملت المواقع مدنًا ومناطق سياحية وصناعية، مما يسمح بفهم التوزيع المكاني للـ MPs بدقة. أما في دول مثل لبنان والجزائر، فقد كانت المواقع أقل عددًا، رغم اتساع السواحل. تجدر الإشارة إلى أن الرمال تعد بيئة جيدة لرصد الـ MPs نظرًا لقدرتها على الاحتفاظ بها لفترات طويلة بفعل عمليات الترسيب. يُلاحظ أن الدول الخليجية مثل قطر والإمارات اختارت مواقع قريبة من الأنشطة الصناعية والموانئ، ما يفتح المجال لفحص العلاقة بين النشاط البشري وكثافة التلوث. إلا أن بعض الدول مثل العراق ركزت على الرمال النهرية والدلتاوية في الأهوار، وهو توجه علمي مهم لكنه لم يُكرر كثيرًا في الدول الأخرى. تُظهر بيانات الرواسب البحرية أن هذا الوسط نال اهتمامًا بحثيًا كبيرًا في غالبية الدول، باستثناء لبنان والأردن حيث ظلت التغطية محدودة. تُعتبر الرواسب من المؤشرات المهمة على التراكم الطويل الأجل للملوثات، خاصة في المناطق منخفضة الحركة المائية. وقد قامت دول مثل المغرب، الجزائر، والسعودية بدراسات متعددة تشمل الرواسب السطحية والعميقة، وهو ما يمثل خطوة متقدمة نحو فهم ديناميكيات التلوث في المياه الساحلية.

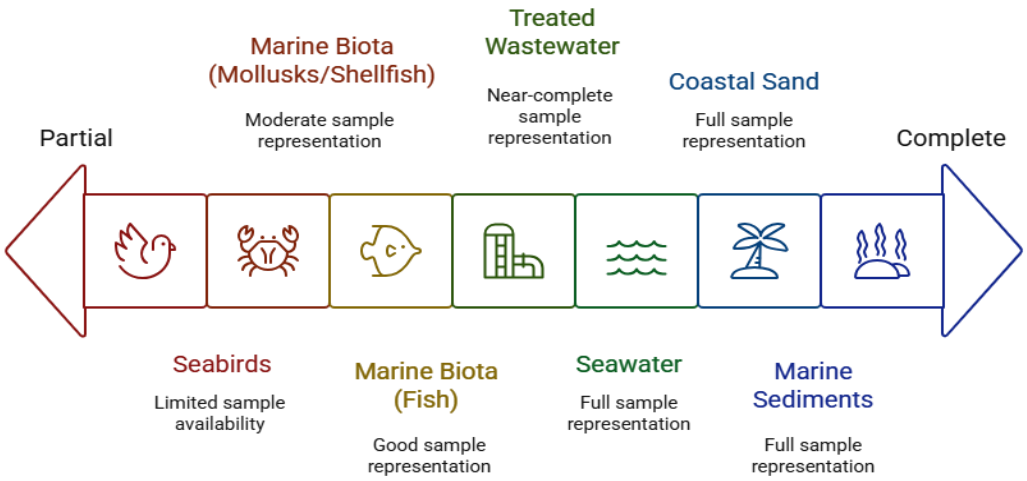
تميزت المغرب بتغطية شاملة من خلال عينات مأخوذة من خليج الحسيمة، الدار البيضاء، وسواحل المحيط الأطلسي، بينما ركزت قطر على محيط الموانئ والمنصات البحرية. في المقابل، اقتصرت معظم الدراسات في مصر وتونس على الساحل الشمالي والخلجان دون الغوص إلى أعماق الرصيف القاري. هذه المحدودية قد تؤدي إلى تقليل دقة التقديرات الكمية لمستويات التلوث في البيئات الرسوبية.

تشير البيانات إلى أن الأسماك والرخويات كعناصر من السلسلة الغذائية البحرية لم تُغطَّ بالشكل الكافي في معظم الدراسات. رغم أهميتهما كمؤشرات بيولوجية حيوية على انتقال وتراكم الـ MPs في الكائنات الحية، إلا أن تمثيلهما ظل ضعيفًا في دول مثل الجزائر، المغرب، الأردن، العراق .برزت السعودية، مصر، والإمارات كمثال إيجابي حيث شملت الدراسات تحاليل مفصلة لأنواع مختلفة من الأسماك التجارية والمحلية، مما يوفر قاعدة بيانات أولية جيدة لدراسات المخاطر الصحية.

أما الرخويات، فشملت الدراسات أنواعًا مثل بلح البحر والمحار، وغالبًا ما استخدمت ككائنات نموذجية لرصد التراكم الحيوي. ركزت تونس على نوع معين (Mytilus galloprovincialis)، بينما اهتمت سلطنة عمان بتوثيق انتشار الـ MPs في الرخويات البحرية في المحميات. هذا التفاوت في الأنواع المدروسة والمنهجيات يعوق المقارنة المكانية بين الدول. تكشف البيانات الخاصة بمياه الصرف الصحي المعالجة عن تباين كبير بين الدول في مدى الاهتمام بهذا الجانب، حيث تميزت دول الخليج مثل الإمارات، عمان، وقطر بوجود بنية تحتية متقدمة لمحطات المعالجة ورصد منهجي للملوثات، في حين أظهرت دول مثل لبنان، العراق، والجزائر مستويات أدنى من التغطية، وغالبًا ما تطرقت الدراسات إلى التصريف غير المنظم بدلاً من التحليل الدقيق لمخرجات المعالجة. تُعد المياه المعالجة مصدرًا محتملاً لإعادة إدخال الـ MPs إلى البيئة الطبيعية عند استخدامها في الري أو التصريف إلى البحر. وقد برزت محطة أنزا في المغرب كنموذج لدراسة مخرجات صناعية وحضرية مشتركة، مما يفتح المجال لربط التلوث المجهري بالمصدر مباشرةً. بينما تُعد الطيور البحرية من أضعف الفئات تمثيلاً (جدول 5.1)، حيث لم تشملها إلا خمس دول وبشكل أولي غير منهجي. هذا الغياب يعكس

ضعفًا عامًا في الدراسات البيولوجية الخاصة بمستويات السلسلة الغذائية العليا، رغم دور الطيور كمؤشرات بيئية هامة لانتقال الملوثات البلاستيكية عبر الشبكة الغذائية. تشير الدراسات الأولية في الإمارات وسلطنة عمان إلى إمكانية استخدام أنواع مثل القطرس والنورس كمؤشرات، لكن ما زالت هذه الدراسات محدودة ولا تشمل تحاليل كيميائية دقيقة أو تقييمات صحية. يمثل غياب هذا المكون فرصة بحثية كبيرة، خاصة في الدول ذات التنوع البيئي مثل المغرب ومصر.

تكشف البيانات أن الدراسات العربية في مجال الـ MPs قد بدأت تغطي طيفًا واسعًا من البيئات، لكنها لا تزال تعاني من نقص في التكامل الجغرافي والبيئي. ركزت غالبية الدراسات على البيئات الساحلية، مع إغفال للأنظمة النهرية والمياه الداخلية، باستثناء العراق والأردن. كما سُجل ضعف في تمثيل الكائنات الحية، لا سيما تلك التي تقع في المستويات الغذائية العليا، ما يقلل من قدرة الدراسات على تقديم تقييم دقيق للمخاطر البيئية والصحية. توصي هذه النتائج بضرورة تبني إستراتيجية إقليمية شاملة تتضمن منهجيات موحدة لجمع العينات، وتحليلها باستخدام تقنيات متقدمة، وتوسيع نطاق الدراسة ليشمل البيئة الداخلية والأنواع الحية المؤثرة بيئيًا واقتصاديًا. كما ينبغي تشجيع الدول التي لم تُذكر في هذه الجداول على الدخول الفاعل في المجال، لسد الفجوة البحثية العربية وتحقيق فهم أوسع لتأثيرات الـ MPs على النظم البيئية في المنطقة (شكل 5.4).



شكل 5.4 :طيف العينات البيئية المستخدمة في تقييم مستويات الميكروبلاستيك في النُّظم البحرية والساحلية"

جدول 5.1: نطاق دراسات رصد الـ MPs وأنواع العينات التي تم جمعها ومواقعها في الدول العربية

نوع العينة	الكويت	تونس	مصر	لبنان	الجزائر	قطر
مياه البحر	سواحل الكويت، شمال غرب الخليج	خليج تونس، خليج الحمامات، خليج قابس	البحر المتوسط (الإسكندرية، بورسعيد)، البحر الأحمر	المياه الساحلية في الحوض الشرقي للبحر الأبيض المتوسط	السواحل الشمالية (خليج عنابة، سواحل سكيكدة، الساحل الغربي)	سواحل الدوحة، موانئ صناعية، مناطق الأنشطة البحرية
الرمال الساحلية	سواحل الكويت	شواطئ تونس الشرقية والجنوبية	شواطئ الإسكندرية والساحل الشمالي	رواسب ساحلية على طول الساحل اللبناني	شواطئ ستيديا، سابليتس، ميرسات الحجاج، خليج عنابة	شواطئ جزيرة رأس ركان، السواحل الشرقية والغربية
الرواسب البحرية	رواسب شاطئية، شمال غرب الخليج	قاع البحر قرب السواحل	رواسب الساحل الشمالي والبحر الأحمر	رواسب ساحلية والرصيف القاري من مواقع متعددة	رواسب سطحية من عدة محطات على الساحل الشمالي	رواسب بحرية بالقرب من الموانئ والمنصات
أحياء بحرية (أسماك)	أسماك بحرية محلية في الخليج	أسماك مثل السردين (Sardina pilchardus)	أسماك مثل القاروص، المولية، البلطي	الأنشوفة الأوروبية (Engraulis encrasicolus)	NR	دراسات محدودة على الأسماك المحلية في الخليج
أحياء بحرية (محار/رخويات)	محار وبلح البحر في الخليج العربي	بلح البحر (Mytilus galloprovincialis)	بلح البحر والمحار (Mediterranean mussels)	المحار الشوكي (Spondylus spinosus)	NR	دراسات أولية على المحار
مياه صرف صحي معالجة	NR	محطات معالجة المياه بتونس الكبرى	محطات المعالجة في القاهرة الكبرى والإسكندرية	تصريف مياه الصرف غير المعالجة في مناطق ساحلية	محطات معالجة محدودة، وصرف غير منظم في بعض المناطق	محطات معالجة في قطر (الدوحة، الرويس)
طيور بحرية	NR	مناطق قريبة من خليج قابس	NR	NR	NR	NR

توجد بيانات غير متوفرة (NR: غير مذكور) لبعض الأنواع في بعض الدول، مما يشير إلى نقص في الدراسات أو عدم توفر بيانات دقيقة

جدول 5.1: نطاق دراسات رصد الـ MPs وأنواع العينات التي تم جمعها ومواقعها في الدول العربية

نوع العينة	السعودية	المغرب	الأردن	الإمارات	عمان	العراق
مياه البحر	سواحل البحر الأحمر (شرق السعودية)، الخليج العربي (السواحل الشرقية والغربية)	خليج الحسيمة (البحر الأبيض المتوسط)، المحيط الأطلسي قرب أنزا (أكادير)، ميناء الدار	قناة الملك عبد الله للري، مصادر المياه الريفية والساحلية	السواحل الإماراتية في الخليج (دبي، أبوظبي، الفجيرة)، موانئ جبل علي	سواحل بحر عمان والخليج العربي، بحيرات أشجار القرم، مناطق محمية بحرية مختلفة	أنهار دجلة والفرات، أهوار الجنوب، سد الكوت، مواقع نهرية
الرمال الساحلية	شواطئ البحر الأحمر، شواطئ الخليج العربي	طنجة، الصويرة، أغادير، خليج الحسيمة: فوق المدية، بين المدية، تحت المدية	شواطئ مجاورة لقناة الملك عبد الله، مناطق الزراعة الساحلية	شواطئ رأس الخور، الشواطئ الرملية في أبوظبي والشارقة	رواسب شواطئية ورملية في بحيرات أشجار القرم وسواحل بحر عمان والخليج العربي	رمال نهرية ومناطق دلتاوية في أهوار الجنوب
الرواسب البحرية	الرواسب البحرية في الخليج العربي وسواحل البحر الأحمر	خليج الدار البيضاء، الساحل الأطلسي المغربي، خليج الحسيمة (المناطق بين المدية)	رواسب بحرية ورملية في قناة الملك عبد الله والمناطق المحيطة	رواسب في قاع الخليج العربي الموانئ الصناعية وشواطئ دبي والفجيرة	رواسب أشجار القرم البحرية، رواسب محطات معالجة مياه الصرف الصحي،	رواسب نهرية في الفرات، دجلة، أهوار الجنوب،
أحياء بحرية (أسماك)	أسماك محلية في الخليج العربي والبحر الأحمر، دراسات بيئية وتحليلية	NR	NR	دراسات على أسماك محلية مثل الهامور، الشعري، القاروص من مياه الخليج	دراسات على أسماك محلية في خليج عمان وسواحل السلطنة، خاصة في المناطق المحمية	دراسات على أسماك نهرية وبحيرات الأهوار، مثل السمك البلطي

أحياء بحرية (محار/رخويات)	بلح البحر والمحار على سواحل الخليج والبحر الأحمر	NR	NR	دراسات أولية	دراسات على المحار وبلح البحر	دراسات أولية
مياه صرف صحي معالجة	محطات معالجة في المدن الساحلية (جدة، الدمام)، وصرف غير منظم	محطة أنزا لمعالجة مياه الصرف (أكادير): صناعية وحضرية، مع منفذ بحري مباشر	محطة معالجة مياه زي في عمان، مياه الشرب ومياه الري المعالجة	محطات معالجة متطورة ة المياه المعالجة والتصريف البحري	محطات معالجة مياه الصرف الصحي الرئيسية في السلطنة (مسقط، صحار)	محطات معالجة في بغداد والموصل
طيور بحرية	دراسات أولية على الطيور	NR	NR	دراسات أولية	دراسات أولية	NR

توجد بيانات غير متوفرة (NR: غير مذكور) لبعض الأنواع في بعض الدول، مما يشير إلى نقص في الدراسات أو عدم توفر بيانات دقيقة

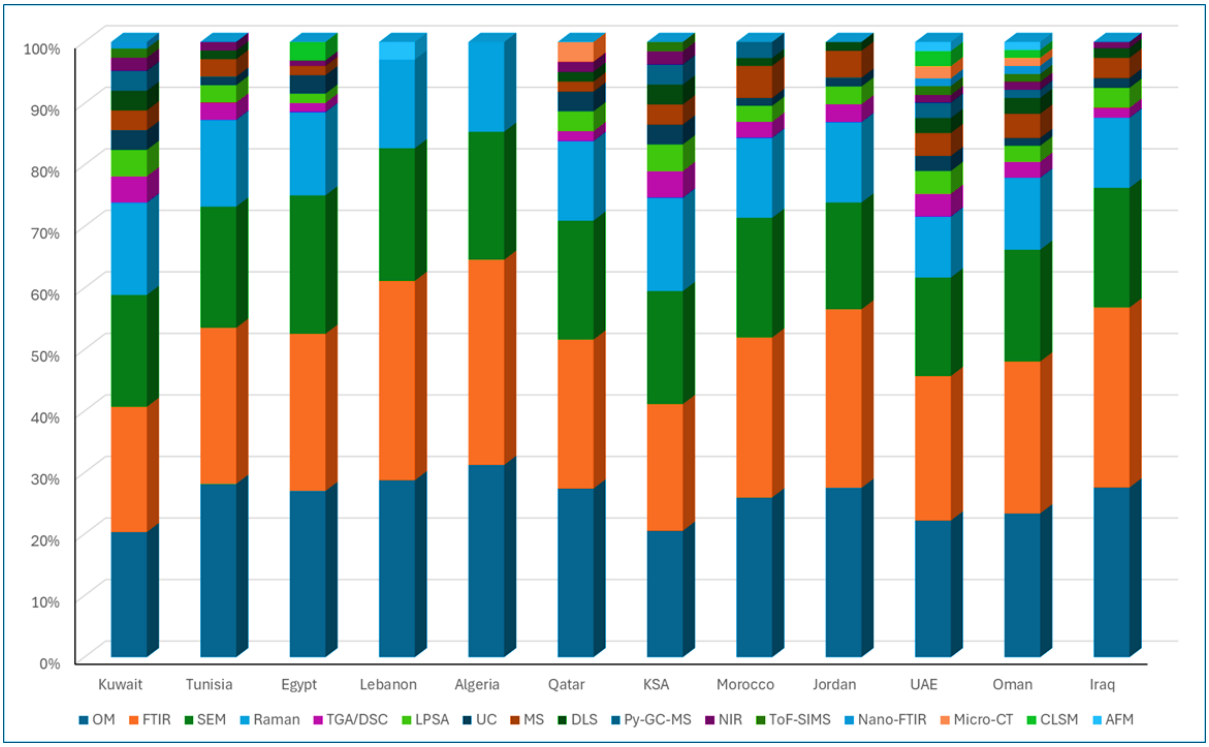
الفصل السادس

الفصل السادس: البنية التقنية والجهود الإقليمية لرصد التلوث بالـ MPs في المنطقة العربية

يستعرض الفصل السادس الإمكانات التقنية والجهود الإقليمية لرصد تلوث الجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) في المنطقة العربية. يبدأ القسم الأول بوصف البنية المعملية والتقنية للأجهزة المستخدمة في تحليل الـ MPs، متناولًا أهم التقنيات الحديثة. يناقش القسم الثاني مدى توفر البيانات حول تراكيز الـ MPs في البيئات العربية وتفاوتها بين الدول. أما القسم الثالث فيتناول أوجه التعاون الدولي في مجال البحث والتقنيات الخاصة برصد الملوثات البلاستيكية. ويختتم الفصل بالقسم الرابع الذي يعرض أبرز الجهود الحالية المبذولة لمعالجة التلوث بالـ MPs في المنطقة العربية، مؤكدًا أهمية التكامل بين البحث العلمي، والسياسات البيئية، والتعاون الإقليمي.

6.1 البنية المعملية والتقنية لأجهزة تحليل الـ MPs في الدول العربية

تشكل أجهزة التحليل والتشخيص المتقدمة العمود الفقري لأي دراسة دقيقة وشاملة في مجال الـ MPs، حيث تمكن الباحثين من التعرف على خصائص هذه الجسيمات الدقيقة، تركيبها الكيميائي، مورفولوجيتها، وحجمها بدقة عالية. يوضح الشكل 6.1 التفصيلي توافر هذه الأجهزة في الدول العربية المختلفة، ما يعكس مستوى التطور التقني والبحثي في كل دولة. على الرغم من تفاوت نسب التوفر، فإن وجود هذه الأجهزة، سواء بشكل مباشر أو من خلال التعاون الدولي، يشير إلى أن الباحثين في المنطقة يمتلكون القدرة العلمية والفنية على إجراء تحاليل متقدمة تتيح لهم دراسة الـ MPs بعمق، وهو أمر ضروري لفهم تأثير هذه الملوثات على البيئة وصحة الإنسان.



شكل 6.1: التقنيات المستخدمة لكشف الـ MPs في الدول العربية ونسبة اعتماد الدول العربية عليها في الدراسات

6.1.1 المجهر الضوئي (OM)

المجهر الضوئي (Optical Microscope, OM) هو الجهاز الأساسي والأكثر شيوعًا في تحليل جزيئات الـ MPs، حيث يستخدم الضوء المرئي لتكبير الجسيمات الصغيرة. يتميز هذا المجهر بسهولة الاستخدام، سرعة التحليل، وتكلفة منخفضة مقارنة بالأجهزة الأكثر تقدمًا. يمكن من خلاله دراسة الحجم، الشكل، والتوزيع للعينات بشكل أولي، مما يجعله مثاليًا للتحليل الكمي الأولي والجودة السطحية للميكروبلاستيك. بالنسبة لدقة التحليل، تتراوح بين 70-90%، وهي

مناسبة للعينات التي تحتوي على جسيمات متوسطة الحجم (عادة أكبر من 20 ميكرومتر). ومع ذلك، لا يتيح المجهر الضوئي تمييز التركيب الكيميائي للجسيمات، مما يجبر الباحثين عادةً على استخدامه كخطوة تمهيدية قبل اللجوء إلى تقنيات طيفية أو إلكترونية. بالنسبة لتوزيع استخدام الجهاز عبر الدول في الشكل 5.2، يظهر أن الدول العربية تتمتع بتوفر عالي جدًا لهذه التقنية، حيث تتصدر تونس والمغرب (100%)، تليهما السعوديةو الكويت والأردن (95%)، ثم عمان ومصر والإمارات (90%) فيما تقل النسب قليلاً في العراق وقطر (85%) ولبنان (80%) والجزائر (75%). هذا الانتشار الواسع يعكس سهولة الوصول للجهاز وأهميته كأداة تحليل أساسية في المختبرات البيئية. وجود هذه النسبة العالية في معظم الدول يدعم فكرة أن المجهر الضوئي يعتبر نقطة الانطلاق في أي دراسة متعلقة بالـ MPs، سواء في البحث أو المراقبة البيئية.

من الناحية المهنية، المجهر الضوئي هو الأداة الأولى لفحص وفصل جزيئات الـ MPs من العينات البيئية، لكنه محدود في دقة التعرف على نوع المادة البلاستيكية، حيث لا يمكنه التمييز بين أنواع البوليمرات المختلفة. لذلك، لا بد من مرافقة هذه التقنية بتحليل كيميائي أكثر تقدمًا مثل FTIR أو Raman لتعزيز دقة التحديد. التحديات التقنية للمجهر الضوئي تشمل حدود التكبير التي لا تسمح برصد الجسيمات النانوية أو صغيرة الحجم جدًا، كذلك قد تؤثر الشوائب أو الجزيئات العضوية على وضوح الصور. من جهة أخرى، تعتبر قوة المجهر الضوئي في كونه متاحًا وسهل التشغيل، مع تكاليف تشغيل منخفضة نسبيًا، ما يجعله خيارًا أساسيًا لمختبرات البيئة في الدول ذات الميزانيات المحدودة. بالتالي، على الرغم من محدودية قدراته التحليلية، فإن توافره الواسع واستخدامه العالي في معظم الدول العربية يجعله حجر الأساس في مراقبة الـ MPs، خاصةً في الفترات الأولى من جمع وتحليل العينات. الدول التي تمتلك معدلات عالية من التوفر قد تكون في وضع أفضل من حيث سرعة ودقة الدراسات الأولية.

6.1.2 مجهر المسح الإلكتروني (SEM)

مجهر المسح الإلكتروني (Scanning Electron Microscope, SEM) هو أداة تحليلية متقدمة تتيح رؤية تفصيلية عالية الدقة لسطح جزيئات الـ MPs. يستخدم الجهاز شعاعًا من الإلكترونات بدلاً من الضوء لرسم صورة مكبرة للغاية توضح المورفولوجيا الدقيقة للجسيمات، مما يسمح بفحص التفاصيل السطحية التي يصعب رؤيتها بالمجاهر الضوئية التقليدية. دقة الـ SEM عالية جدًا، حيث تصل تقريبًا إلى 90-99%، مما يمكن الباحثين من تحليل الأشكال والملمس بدقة نانوية، وهو أمر بالغ الأهمية لفهم خصائص الـ MPs وتأثيره البيئي. تعد دقة SEM ميزة قوية لتحديد أصناف الـ MPs على أساس تركيبها السطحي وشكلها، كما يساعد في التمييز بين المواد البلاستيكية والجسيمات العضوية أو المعدنية، مما يساهم في تقليل الأخطاء في تصنيف العينات. كذلك، يمكن استخدام SEM مع تقنيات إضافية مثل EDX لتحليل التركيب الكيميائي السطحي بشكل أكثر تفصيلًا. في الشكل 6.1، نلاحظ أن السعودية والكويت هما الأكثر استخدامًا لهذه التقنية (85%)، تليهما مصر والمغرب (75%) ثم عمان وتونس (70%) والإمارات (65%). في المقابل،اظهرت قطر ولبنان والأردن والعراق (60%) توافرًا أقل، بينما سجلت الجزائر اقل نسبة بين الدول (50%)، ما يعكس تفاوت القدرات التحليلية المتقدمة في المختبرات البيئية عبر المنطقة. يعود هذا الاختلاف إلى التكلفة العالية للجهاز، الحاجة إلى عمالة فنية

متخصصة، والصيانة المعقدة، مما قد يحد من إمكانية استخدام SEM في دول ذات ميزانيات محدودة. بالرغم من تكلفته العالية وتعقيد تشغيله، يظل SEM أداة لا غنى عنها في دراسة الـ MPs، خاصة للبحوث التي تتطلب فحصًا دقيقًا للبنية السطحية وتأثير التآكل أو التحلل البيئي. مقارنة بالمجهر الضوئي، يوفر SEM مستوى أعمق من التفاصيل ولا يعتمد على حجم الجسيم فقط، بل يمكنه استكشاف الجسيمات على نطاق نانوي، مما يعزز فهم انتشار الـ MPs وتأثيراته على البيئة.

مع ذلك، من المهم التنويه إلى أن SEM لا يقدم معلومات تركيبية بحتة عن نوع البوليمر، لذلك يفضل دمجه مع تقنيات طيفية مثل FTIR أو Raman. علاوة على ذلك، الاستعدادات المسبقة للعينات قد تؤثر على النتائج، مثل الحاجة لتغليف العينات بطبقة موصلة كهربائيًا، مما قد يغير بعض الخصائص السطحية.

6.1.3 التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء باستخدام تحويل فورييه (FTIR)

تقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء باستخدام تحويل فورييه (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) هي واحدة من أكثر الأدوات فعالية في تحديد التركيب الكيميائي للـ MPs. تعتمد هذه التقنية على قياس الامتصاص الطيفي للأشعة تحت الحمراء بواسطة الروابط الكيميائية في جزيئات البوليمر، مما ينتج عنه "بصمة" طيفية فريدة لكل نوع بوليمر. وتعد FTIR من التقنيات غير المدمرة للعينة، ما يسمح بدراسة الجسيمات الصغيرة دون الحاجة لتدميرها أو تغيير خصائصها. دقة FTIR في تصنيف وتحليل الـ MPs تقع في حدود 85 – 95%، ما يجعلها خيارًا مثاليًا للدراسات البيئية التي تتطلب تحديد نوعية الجسيمات بدقة عالية. تميز FTIR بقدرتها على التفريق بين أنواع متعددة من البوليمرات مثل البولي إيثيلين، البولي بروبيلين، والبولستيرين، مما يساهم في تقييم مصادر التلوث وأثره على الأنظمة البيئية المختلفة. من خلال الشكل 6.1، نجد أن الأردن والمغرب والسعودية والكويت والإمارات وعمان والعراق ولبنان وتونس تسجل نسبة استخدام مرتفعة جدًا لتفنية الـ FTIR تصل إلى 95-100%. بينما تظهر مصر الجزائر وقطر نسب أقل تتراوح بين 75 و80%، وهو ما يعكس الفروقات في مدى توفر التقنيات الحديثة وتدريب الكوادر على استخدامها. يرجع السبب الى انخفاض نسبة استخدام تقنية الـ FTIR في بعض الدول إلى الاعتماد على تقنيات التحليل الطيفي او تقنية اخرى.

تتميز تقنية الـ FTIR أيضًا في إمكانية دمجها مع المجهر الضوئي (Microspectroscopy) مما يتيح دراسة جسيمات الـ MPs دقيقة الحجم مباشرة، وهي ميزة مهمة للعينات البيئية المعقدة. هذه التقنية تمنح الباحثين قدرة تحليلية شاملة تساعد في فهم تراكم الـ MPs في بيئات مختلفة كالمياه، الرواسب، وحتى الأحياء البحرية. بالنسبة للدقة، FTIR تقدم توازنًا ممتازًا بين الدقة والعملية مقارنة بالتقنيات الأخرى مثل Raman التي تتطلب معدات أغلى وأحيانًا معقدة أكثر في التحليل. ومع ذلك، يجب الانتباه إلى أن FTIR قد تواجه صعوبات في تحليل الجسيمات ذات الحجم النانوي أو المركبة، حيث تتداخل الطيفيات أو تكون الإشارات ضعيفة، ما يستدعي استخدام تقنيات مكملة مثل Raman أو Py-GC-MS. في المجمل، FTIR تمثل الركيزة الأساسية لتحليل الـ MPs في معظم البلدان العربية المذكورة، خاصة مع توفرها النسبي وسهولة تشغيلها مقارنة بالأجهزة ذات التكلفة العالية. الدول التي تملك تجهيزات FTIR متقدمة قادرة على

تقديم دراسات أكثر دقة وشمولية تساعد في رسم خرائط دقيقة لتوزيع الـ MPs وأنواعه، مما يدعم جهود الرقابة البيئية ووضع السياسات العلمية الفعالة للحد من التلوث البلاستيكي.

6.1.4 تقنية الرامان (Raman Spectroscopy)

تقنية الرامان (Raman Spectroscopy) تعد واحدة من أبرز الطرق الطيفية المستخدمة لتحديد البنية الكيميائية للميكروبلاستيك. تعتمد هذه التقنية على قياس تشتت الضوء الموجه إلى العينة، والذي يتغير بتغير الاهتزازات الجزيئية في المركبات، مما ينتج طيفًا مميزًا لكل بوليمر. يتيح ذلك تصنيف أنواع الـ MPs بدقة عالية، حتى في العينات المركبة أو المتعددة المكونات . الدقة التقريبية لتقنية الرامان تتراوح بين 80 – 90%، وهي نسبة ممتازة تعطي نتائج دقيقة وموثوقة خاصة عند تحليل العينات الصغيرة جدا التي قد يصعب تحديدها بتقنيات أخرى مثل FTIR. ميزة أخرى مهمة للرامان هي قدرتها على تحليل الجسيمات النانوية وذات الأبعاد الصغيرة، حيث تقدم تحليلاً غير مدمر مع إمكانية الكشف عن البصمات الطيفية حتى في وجود تداخلات مع مواد أخرى. بالنظر إلى الشكل 6.1، نلاحظ أن نسبة استخدام الرامان في معظم الدول العربية متوسطة إلى منخفضة، حيث تتراوح بين 35% في الجزائر والعراق إلى 70% في السعودية والكويت. يظهر هذا التفاوت بشكل واضح، حيث أن الدول ذات القدرة التقنية الأعلى مثل السعودية والكويت تستخدم الرامان بشكل مكثف مقارنةً بالمغرب وتونس (50%) وعمان والأردن ومصر (45%) والإمارات وقطر ولبنان (40%) التي تسجل نسب أقل. ويرجع هذا الاختلاف أساسًا إلى تكلفة الجهاز العالية، والحاجة إلى تقنيات متقدمة لتفسير النتائج، بالإضافة إلى الحاجة لتدريب متخصصين في هذا المجال.

في مجال تحليل الـ MPs، الرامان توفر مميزات تقنية تفوقل الـ FTIR في بعض الجوانب، حيث يمكنها التفريق بين البوليمرات التي تمتلك أطياف الـ FTIR متشابهة، كما أنها أقل حساسية للرطوبة والعوامل البيئية الأخرى التي قد تؤثر على نتائج الـ FTIR مع ذلك، من عيوب الرامان أنها قد تتأثر بفلورة العينة مما قد يعيق تحليلها، خاصة في العينات البيئية التي تحتوي على مواد عضوية أو ملوثات. من الناحية التطبيقية، الدول التي تستخدم الرامان بشكل أكبر تميل إلى امتلاك بنية تحتية بحثية متقدمة، مثل السعودية والإمارات والكويت، حيث توظف هذه التقنية في أبحاث متقدمة لفهم تركيب الـ MPs وتحديد مصادره بدقة، وكذلك في تقييم تأثيراته البيئية على الأحياء البحرية. في المقابل، الدول ذات الاستخدام الأقل تعتمد بشكل أكبر على تقنيات أكثر بساطة وأقل تكلفة مثل المجهر الضوئي والـ FTIR، وهذا قد يحد من دقة الدراسات والقدرة على التعرف على الجسيمات المعقدة.

6.1.5 تحليل الجاذبية الحرارية والتحليل الحراري التفريقي (TGA/DSC)

تحليل الجاذبية الحرارية (Thermal Gravimetric Analysis, TGA) والتحليل الحراري التفريقي (Differential Scanning Calorimetry, DSC) هما تقنيتان مرتبطتان تُستخدمان لدراسة خصائص المواد البلاستيكية، بما في ذلك الـ MPs، من خلال قياس تغيرات الوزن وخصائص العينة عند تعرضها لتغيرات درجات الحرارة. تقدم تقنية TGA معلومات حول استقرار المادة الحراري، حيث يتم قياس فقدان الوزن عند ارتفاع درجة الحرارة، مما

يعكس عملية تحلل البوليمرات أو تفاعلها مع البيئة. أما DSC، فهي تركز على قياس التغيرات في الحرارة الممتصة أو المنبعثة أثناء الانتقالات الفيزيائية أو الكيميائية للمواد، مثل الانصهار، البلورة، أو التبلور. هذه المعطيات أساسية لفهم خصائص الـ MPs، مثل التغيرات الحرارية التي قد تؤثر على سلوكها في البيئات الطبيعية أو الصناعية. الدقة التقريبية لهذه التقنيات تتراوح بين 80 – 90%، ما يجعلها أدوات قوية لفهم الاستقرار الحراري والتركيب الطيفي للميكروبلاستيك، وهو أمر لا تغطيه معظم التقنيات الطيفية التقليدية. هذه الأدوات تقدم تحليلاً نوعيًا وكمياً شاملاً يسمح بتحديد درجة التحلل الحراري، والتغيرات البنيوية التي تحدث للبوليمرات تحت ظروف مختلفة، وهو أمر مهم لدراسة تدهور الـ MPs وتأثيره البيئي. من الشكل 6.1 الذي يعرض نسبة استخدام الأجهزة، يتضح أن استخدام TGA/DSC في الدول العربية متدني إلى حد كبير تصل الى 20% في السعودية والكويت كأعلى نسبة، تليها الإمارات بنسبة 15%، ثم عمان والأردن وتونس والمغرب بنسبة 10%، بينما سجلت مصر والعراق وقطر أقل نسبة استخدام للـ TGA/DSC (5%). في الجانب الاخر، لم يسجل اي استخدام في لبنان والجزائر. هذه النسبة المنخفضة تعكس تعقيد الجهاز، ارتفاع تكلفته، والحاجة إلى خبرات تقنية متخصصة لتشغيله وتحليل البيانات الناتجة عنه. مقارنة بالدول ذات التوفر العالي للأجهزة، الدول العربية تعاني من نقص في الإمكانيات التقنية المتقدمة مما يقلل من قدرة الباحثين على إجراء دراسات شاملة لتغيرات الـ MPs الحرارية. على الرغم من الفوائد العلمية الهامة التي تقدمها هذه التقنية، إلا أن محدودية توافرها واستخدامها في المنطقة قد تعوق الفهم العميق لسلوك الـ MPs في البيئات الطبيعية، خاصة فيما يتعلق بعملية التحلل والتحولات الحرارية التي تؤثر على قدرة الجسيمات على التفاعل مع ملوثات أخرى أو مع الأحياء البحرية. كما أن التطبيقات العملية لهذه التقنية تظل مقتصرة على مراكز بحثية متقدمة أو جامعات ذات موارد مالية وتقنية مرتفعة، مما يحد من انتشارها في أغلب الدول العربية. إضافةً لذلك، تعتمد نتائج TGA/DSC على إعداد العينات بشكل دقيق، وحساسية الأجهزة عالية للتغيرات البيئية، مما يتطلب إجراء تجارب متعددة لضمان صحة النتائج. هذا يتطلب استثمارات إضافية في التدريب والتطوير، بالإضافة إلى التوسع في البحث التطبيقي على الـ MPs، خاصةً في الدول ذات القدرات المحدودة.

6.1.6 مطيافية الامتصاص فوق البنفسجي والمرئي (UV-Vis)

مطيافية الامتصاص فوق البنفسجي والمرئي (UV-Vis Spectroscopy) هي تقنية تعتمد على قياس امتصاص المواد للأشعة فوق البنفسجية والضوء المرئي لتحديد الخصائص البصرية والجزيئية. في دراسة الـ MPs، تستخدم هذه التقنية بشكل رئيسي لتحديد التركيب الكيميائي الجزئي للبوليمرات بناءً على الطيف الامتصاصي الخاص بها. تعتبر تقنية UV-Vis أداة مساعدة مهمة، خاصةً في فهم تفاعلات الـ MPs مع الملوثات الأخرى أو تقييم تأثير العوامل البيئية على الـ MPs. تتميز تقنية مطيافية UV-Vis بدقة تقريبية تتراوح بين 60 – 75%، وهي دقة متوسطة مقارنةً بأجهزة مثل FTIR أو SEM. يعود ذلك إلى طبيعة التقنية التي تعتمد على الخصائص الامتصاصية للمواد، والتي قد تتداخل مع مواد أخرى في العينات البيئية المعقدة. لذلك، تعتبر تقنية UV-Vis أقل دقة في تحديد التركيب الكيميائي التفصيلي أو تصنيف أنواع البوليمرات الدقيقة، لكنها مفيدة في تحليل التركيب العام أو متابعة تغييرات تركيبية بسبب التحلل أو التلوث. تسجل الدول العربية نسبة استخدام منخفضة نسبيا لتقنية UV-Vis، مع أعلى استخدام في السعودية والكويت بنسبة 25%، تليها الإمارات وتونس بنسبة 15%، ثم مصر وقطر والمغرب والأردن وعمان بنسبة 10%، ثم العراق بأقل نسبة استخدام (5%).بينما

لم تسجل الدراسات اي استخدام لهذه التقنية في الجزائر ولبنان. هذا يشير إلى أن UV-Vis ليست الخيار الأول في تحليل الـ MPs في المنطقة، ربما بسبب محدودية قدرتها على التمييز بين أنواع البوليمرات المختلفة مقارنةً بتقنياتFTIR وRaman. في دول مثل لبنان والجزائر والعراق، نجد استخدامًا شبه معدوم لهذه التقنية، مما يعكس إمكانيات مختبرية أقل أو تفضيل لتقنيات أكثر دقة.

على الجانب الإيجابي، توفر UV-Vis طريقة تحليل سريعة وغير مكلفة نسبيًا، مع معدات سهلة الاستخدام مقارنةً بأجهزة التحليل الطيفي المعقدة. وهذا يجعلها خيارًا جيدًا للمختبرات التي تركز على الدراسات الأولية أو التي تحتاج إلى مراقبة التغيرات في العينات خلال الوقت، مثل دراسة تحلل الـ MPs أو تقييم تلوث المياه. مع ذلك، تبقى محدودية الدقة والتأثيرات المحتملة من المواد الملوثة المحيطة عوامل تحد من اعتماد UV-Vis كأداة تحليل رئيسية في الـ MPs. لذا، يُفضل دمج هذه التقنية مع أدوات أخرى مثل FTIR أو SEM لتعزيز الدقة والتحليل النوعي.

6.1.7 الطرد المركزي عالي السرعة (Ultracentrifuge)

جهاز الطرد المركزي عالي السرعة (Ultracentrifuge) هو أداة تستخدم لفصل الجسيمات الدقيقة جدًا بناءً على كثافتها، عن طريق تعريض العينات لقوى طرد مركزية عالية. في سياق دراسة الـ MPs، تُستخدم هذه التقنية بشكل رئيسي لفصل جسيمات البلاستيك الدقيقة جداً، بما في ذلك جسيمات النانو والميكرو، من العينات البيئية المعقدة مثل مياه البحر، الرواسب، أو مياه الصرف الصحي. قدرة الجهاز على تركيز هذه الجسيمات تسمح بدقة أكبر في التحليل اللاحق باستخدام تقنيات أخرى مثل FTIR أو SEM. تتميز هذه التقنية بدقة تتراوح بين 85 – 95% في فصل وتركيز الجسيمات الدقيقة، مما يجعلها أداة أساسية في تحضير العينات قبل التحليل التفصيلي. إلا أن استخدامها يتطلب معدات متقدمة وتدريب متخصص، ما قد يحد من انتشارها في بعض البلدان ذات الموارد المحدودة.

من خلال الرجوع للشكل 6.1، نجد أن نسبة استخدام الـ Ultracentrifuge منخفضة في الدول العربية، حيث لم تسجلان الجزائر ولبنان اي استخدام للتقنية (0%)، وسجلت العراق وتونس والأردن وعمان والمغرب نسبة استخدام منخفضة جدا قدرت بعدد 5%، ثم الإمارات ومصر وقطر بنسبة 10%، بينما سجلت السعودية اعلى نسبة استخدام للتقنية (15%). تتمتع بعض الدول مثل السعودية والإمارات ببنية تحتية مختبرية متقدمة واستثمارات أكبر في البحث العلمي. أما في دول مثل العراق وتونس، فتقل نسب الاستخدام إلى 5% أو أقل، مما يشير إلى قيود تقنية أو اقتصادية قد تؤثر على توفر هذه الأجهزة. في مجال دراسة الـ MPs، يوفر الـ Ultracentrifuge خطوة تحضيرية مهمة ترفع من جودة العينات وتحسن فرص الكشف عن جسيمات دقيقة جداً يصعب فصلها بالطرق التقليدية كالتصفية العادية. هذا مفيد بشكل خاص في البيئات البحرية المعقدة حيث تكون الجسيمات الميكروية مختلطة مع ملوثات عضوية وغير عضوية أخرى. لكن، يجب الانتباه إلى أن تكلفة التشغيل والصيانة العالية للجهاز، بالإضافة إلى الحاجة إلى كوادر مدربة، تجعل من استخدامه أقل انتشاراً في البلدان ذات الموارد المحدودة أو المختبرات الناشئة. لهذا السبب، غالبًا ما يُستخدم Ultracentrifuge في المختبرات المرجعية أو المراكز البحثية الكبرى في المنطقة. من الناحية العلمية، لا يمكن الاستغناء

عن الطرد المركزي عالي السرعة في أبحاث الـ MPs المتقدمة التي تتطلب فصل دقيق لجسيمات النانو والميكرو قبل التحليل الكيميائي والفيزيائي، ما يجعل الدول التي توفر هذا الجهاز في مواقع متقدمة في جودة وعمق أبحاث الـ MPs.

6.1.8 مطيافية الكتلة (MS)

تعتبر مطيافية الكتلة (Mass Spectrometry, MS) من التقنيات التحليلية الدقيقة للغاية، وتستخدم لقياس الكتلة الجزيئية للجسيمات وتحليل التركيب الكيميائي التفصيلي للمواد. في مجال دراسة الـ MPs، تُعد هذه التقنية أساسية لتحديد نوع البوليمر بدقة عالية وكذلك لتحديد وجود الملوثات الكيميائية المرتبطة بالـ MPs مثل المواد المضافة أو الملوثات البيئية المرتبطة بها. تتميز الـ MS بدقة تتراوح بين 90% و99%، ما يجعلها من أكثر الطرق الموثوقة في تأكيد الهوية الكيميائية للجسيمات. في الدول العربية، نجد أن نسبة استخدام MS تتفاوت بشكل ملحوظ. تتمتع المغرب بأعلى نسب الاستخدام (حوالي 20%)، تليهما السعودية والإمارات وعمان والأردن والكويت بنسبة 15% لكل منهم، ثم العراق وتونس بنسبة 10%، ومصر وقطر بنسبة 5%. بالمقابل، لم يبلغ عن استخدام تقنية الـ MS في كلا من لبنان والجزائر، كما سجلت قطر النسبة الاقل في استخدام التقنية (تصل إلى 5%)، مما يعكس الفجوة في توافر التقنيات الحديثة بين الدول.

استخدام الـ MS في تحليل الـ MPs يمنح الباحثين إمكانية فحص الجسيمات بدقة كيميائية عالية، وهو أمر حيوي لتقييم أثر هذه الجسيمات على البيئة والكائنات الحية. على سبيل المثال، يمكن الكشف عن تدهور البوليمرات وتحديد المركبات الناتجة عن التحلل، مما يوفر معلومات مهمة عن السمية المحتملة ومسار التحلل البيئي. ومع ذلك، فإن استخدام الـ MS يتطلب معدات معقدة وتكاليف تشغيل مرتفعة، بالإضافة إلى وجود فرق عمل مدربة على تشغيل الجهاز وتحليل البيانات الناتجة. هذه العوامل قد تحد من استخدامها في مختبرات الدول ذات الميزانيات المحدودة أو تلك التي لا تمتلك بنية تحتية متقدمة. في السياق الإقليمي، الدول التي لديها قدرة على تشغيل الـ MS بشكل أكبر، مثل السعودية والإمارات، غالبًا ما تكون قادرة على تقديم دراسات أكثر شمولاً وعمقًا حول الـ MPs، مما يعزز جودة الأبحاث والمخرجات العلمية في هذه الدول. على النقيض، ضعف توفر هذه التقنية في بعض الدول يعني وجود تحديات في الحصول على تحليلات دقيقة قد تؤثر على فهم مدى انتشار وتأثير الـ MPs. بشكل عام، الـ Mass Spectrometry تمثل أداة حيوية وأساسية في أبحاث الـ MPs لما توفره من دقة عالية في التحليل الكيميائي، وتُعد مؤشراً على تطور البنية البحثية في الدول التي تعتمد عليها بشكل كبير في هذا المجال

6.1.9 تقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR)

تقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء القريبة (Near-Infrared Spectroscopy, NIR) تعتمد على قياس امتصاص الأشعة تحت الحمراء في النطاق القريب، وهي تقنية مفيدة جداً لتحليل التركيب الكيميائي للبوليمرات بطريقة سريعة وغير مدمرة. تتميز هذه التقنية بقدرتها على توفير تحليل شبه فوري للمواد، مما يجعلها أداة فعالة في الكشف عن أنواع الـ MPs المختلفة بناءً على بصماتها الطيفية. من حيث الدقة، تتراوح نسبة الدقة التقريبية لـ NIR بين 70%

و85%، وهي كافية لتصنيف المواد البلاستيكية بدقة معقولة، لكنها أقل دقة مقارنة بتقنيات مثل FTIR أو Raman التي توفر تحليلات أكثر تفصيلاً على المستوى الجزيئي. يمكن اعتبار الـ NIR كأداة مساعدة مناسبة في الدراسات الأولية أو كمكمل لتقنيات أخرى. عند النظر إلى التوزيع الجغرافي لاستخدام الـ NIR في الدول العربية، نلاحظ أن نسب استخدامها منخفضة نسبياً، لا تتجاوز 10% في معظم الدول، حيث سجلت السعودية والكويت نسبة استخدام أعلى قليلاً مقارنة بالدول الأخرى (10%). هذا يعود جزئياً إلى توفر الأجهزة والكوادر الفنية المؤهلة، وكذلك إلى التكلفة المرتبطة بشراء وتشغيل الأجهزة. تعد الـ NIR مناسبة جداً في الحالات التي يتطلب فيها تحليل عدد كبير من العينات بسرعة، مثل مراقبة جودة المياه أو التربة في مواقع متعددة، حيث يمكن للمختبرات استخدامها لتصنيف الـ MPs قبل إجراء تحليلات أكثر تعقيداً باستخدامFTIR أو Raman. لكن أحد القيود التقنية لهذه الطريقة هو حساسيتها الأقل للجسيمات الصغيرة جداً أو المختلطة، وهو ما قد يؤثر على دقتها في بعض الحالات المعقدة.

6.1.10 تقنية تشتت الضوء الديناميكي (DLS)

تقنية تشتت الضوء الديناميكي (Dynamic Light Scattering, DLS) هي أداة متقدمة تُستخدم بشكل رئيسي لقياس حجم الجسيمات وتوزيعها في الوسط السائل عن طريق قياس تذبذب إشارة الضوء المنتشرة الناتجة عن حركة الجسيمات. تُعد هذه التقنية دقيقة جداً في تحليل الجسيمات الصغيرة، تصل دقتها إلى حوالي 85 – 95%، ما يجعلها مناسبة جداً لفحص حجم الـ MPs الميكروي والنانوي. تساعد هذه التقنية في فهم الخصائص الفيزيائية للجسيمات، مثل توزيع الحجم الذي يؤثر بشكل مباشر على سلوك الجسيمات في البيئة، مثل الانتشار، التراكم، والامتصاص من قبل الكائنات البحرية. كذلك، معرفة حجم الجسيمات الدقيقة يمكن أن تكون مهمة في تقييم المخاطر البيئية والصحية المرتبطة بالـ MPs. من ناحية التوفر الجغرافي واستخدام التقنية في الدول العربية، تشير البيانات إلى أن DLS يستخدم بنسبة منخفضة نسبياً، تتراوح نسبته بين 0% في مصر، ولبنان والجزائر، و5 – 15% في باقي الدول العربية. هذا الاستخدام المحدود يعود إلى كلفة الجهاز، ومتطلبات التدريب الفني العالي، بالإضافة إلى قلة الوعي بأهمية هذه التقنية مقارنةً بتقنيات التحليل الطيفي الأكثر انتشاراً مثل FTIR وSEM. على الرغم من دقتها العالية في قياس حجم الجسيمات، إلا أن DLSتواجه بعض التحديات في تحليل عينات الـ MPs البيئية التي تحتوي على مزيج من المواد والجسيمات بأحجام مختلفة وشكل غير منتظم. كما أن التقنية تعتمد على عينات في الحالة المعلقة بالسائل، مما قد يتطلب تحضيراً خاصاً للعينات لفصل الـ MPs عن المواد الأخرى. في السعودية والإمارات، حيث تتوفر تقنيات متقدمة ومختبرات مجهزة، يمكن الاعتماد على DLS كجزء من التحليل متعدد الأدوات لفهم حجم الـ MPs بشكل أفضل ودقيق. بالمقابل، في دول ذات استخدام أقل مثل العراق أو تونس، هناك فرصة كبيرة لتعزيز هذا الجانب من التحليل من خلال التدريب وزيادة التمويل.

6.1.11 جهاز تحليل حجم الجسيمات بالليزر (LPSA)

جهاز تحليل حجم الجسيمات بالليزر (Laser Particle Size Analyzer, LPSA) هو تقنية متقدمة تعتمد على قياس تشتت شعاع ليزر عند مروره عبر عينة تحتوي على جسيمات ميكروية أو نانوية. يوفر الجهاز توزيع حجم دقيق للجسيمات، ويستخدم بشكل واسع في دراسة الـ MPs لفهم تأثير حجم الجسيمات على السلوك البيئي والكيميائي لها. دقة هذا الجهاز تتراوح بين 85 – 95%، ما يجعله من الأدوات المهمة لتحليل الأحجام بشكل غير مباشر ولكن فعال .في سياق الـ MPs، يلعب حجم الجسيمات دوراً محورياً في فهم الانتشار والتوزيع داخل البيئة المائية، وتأثيرها على الكائنات الحية. استخدام LPSA يساعد في تحديد مدى تفتيت البلاستيك إلى جسيمات أصغر، وهو أمر ضروري لتقييم المخاطر البيئية والصحية. هذا الجهاز يسمح بمسح واسع وسريع لعينات كبيرة، ما يجعله مثالياً للبحوث الميدانية والتطبيقات الصناعية. بمراجعة بيانات توفر الأجهزة في الدول العربية، نجد أن السعودية والكويت تتصدران في استخدام هذا الجهاز بنسبة 20%، تليهما الإمارات (15%)، مع نسب استخدام أقل في باقي الدول تتراوح بين 0 – 10%. هذا يشير إلى أن الدول ذات القدرة الاقتصادية الأكبر تمتلك إمكانيات أفضل لتشغيل مثل هذه الأجهزة المتطورة. بالمقابل، الدول ذات الإمكانيات المحدودة قد تواجه تحديات في توفير هذه الأجهزة أو في تدريب الكوادر على استخدامها بفعالية.

على الرغم من دقته العالية، فإن LPSA يعاني من بعض القيود المتعلقة بطبيعة عينات الـ MPs، حيث أن الجسيمات ذات الشكل غير المنتظم قد تؤثر على دقة النتائج، خصوصاً إذا كانت العينات مختلطة مع جسيمات غير بلاستيكية أو مواد عضوية. كما أن تحضير العينات بشكل مناسب وإزالة الشوائب ضروري لتحسين موثوقية القياس. من الناحية التقنية، يوفر هذا الجهاز بيانات كمية دقيقة لحجم الجسيمات، ولكنه لا يعطي معلومات كيميائية أو نوعية حول تركيب البلاستيك، لذلك يُفضل دمجه مع تقنيات أخرى مثل FTIR أو Raman لضمان تحليل شامل للميكروبلاستيك.

6.1.12 تقنية التحليل الحراري والتفكك المدمجة مع الكروماتوغرافيا الغازية ومطياف الكتلة (Py-GC-MS)

تقنية التحليل الحراري والتفكك المدمجة مع الكروماتوغرافيا الغازية ومطياف الكتلة (Pyrolysis-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, Py-GC-MS) تعتبر من الأدوات الأكثر تطورًا ودقة في دراسة الـ MPs. تعتمد هذه التقنية على تفكيك جزيئات البلاستيك حراريًا إلى مركبات أصغر ثم فصلها وتحليلها عبر الكروماتوغرافيا الغازية، مع تحديد هذه المركبات بواسطة مطياف الكتلة. هذا يسمح بتحديد الأنواع الكيميائية للبوليمرات بدقة عالية جدًا، مع نسبة دقة تقريبية بين 90-98%. في دراسة الـ MPs، يعد الـ Py-GC-MS مثالياً لتحديد تركيب الـ MPs المعقد، خصوصًا عندما يكون هناك تداخل بين أنواع متعددة من البوليمرات أو في وجود ملوثات عضوية. يمكن لهذه التقنية أيضًا تحديد المواد المضافة والملوثات المرتبطة بجسيمات البلاستيك، ما يوفر فهمًا أعمق لتأثير الـ MPs البيئي والصحي. من خلال البيانات التي تم تحليلها من الدول العربية، يتبين أن السعودية والكويت يتصدران استخدام الـ Py-GC-MS بنسبة 15%، تليها المغرب والإمارات (10%)، ثم عمان (5%)، بينما لم يتم تسجيل الكشف عن الجسيمات الدقيقة في الدول الاخرى بستخدام هذه التقنية. هذا يشير إلى أن هذه التقنية تعتبر متطورة ومكلفة،

وتتطلب مختبرات مجهزة تجهيزًا عاليًا مع خبراء متخصصين، وهو ما يفسر محدودية انتشارها في الدول ذات الموارد المحدودة.

الدقة العالية لهذه التقنية تجعلها أداة رئيسية في البحث العلمي المتقدم، لكنها تحتاج إلى وقت تحضير وتحليل أطول مقارنة ببعض التقنيات الأخرى مثل FTIR أو .Raman بالإضافة إلى ذلك، تعتمد جودة النتائج بشكل كبير على إعداد العينة وخبرة المشغل، مما يضيف طبقة من التعقيد في الاستخدام. من الناحية النقدية، على الرغم من مزاياها الكبيرة، فإن الـ Py-GC-MS ليست مثالية للتحليل الكمي الشامل في الميدان، بسبب التعقيد والتكلفة والوقت المستغرق، مما يحد من استخدامها في الدراسات الواسعة النطاق أو عمليات الرصد الروتينية.

6.1.13 تقنية التصوير المجهري المحوسب بالأشعة السينية (Micro-CT)

تقنية التصوير المجهري المحوسب بالأشعة السينية (X-ray Micro-Computed Tomography, Micro-CT) تقدم أداة فريدة لتحليل الـ MPs من خلال توفير صور ثلاثية الأبعاد دقيقة لبنية وشكل الجسيمات البلاستيكية. تعتمد التقنية على تمرير أشعة إكس عبر العينة وقياس الامتصاص لتوليد صورة مجسمة تكشف عن التفاصيل الداخلية والخارجية للجسيمات دون الحاجة إلى تدمير العينة. نسبة الدقة التقريبية لهذه التقنية تتراوح بين 85-95%، مما يجعلها من الأدوات الدقيقة جدًا في دراسة مورفولوجيا الـ MPs. في سياق الـ MPs، تسمح الـ Micro-CT بفهم أعمق للتراكيب الداخلية، مثل الفراغات، التشققات، ودرجة الكثافة، التي يصعب رؤيتها بالطرق التقليدية مثل المجهر الضوئي أو المجهر الإلكتروني. هذا مهم جدًا لتقييم خصائص الجسيمات وتأثيراتها البيئية، خاصة في تحديد مدى تحلل البلاستيك وامتصاص الملوثات. بالنظر إلى استخدام هذه التقنية في الدول العربية، نلاحظ انتشارًا محدودًا نسبيًا حيث أن قطر تظهر أعلى نسبة استخدام بنسبة 10%، تليها الإمارات (8%) وعمان(5%). أما باقي الدول العربية، فتكاد تكون نسب استخدام هذه التقنية في الكشف عن الـ MPs منخفضة جدًا أو معدومة. ويرجع هذا إلى التكلفة العالية للمعدات، الحاجة إلى مختبرات متقدمة، والمهارات التقنية المتخصصة المطلوبة لتشغيل الأجهزة وتحليل البيانات. من الناحية العملية، Micro-CT توفر مزايا كبيرة للدراسات البحثية المتقدمة، لكنها ليست مثالية للتحاليل الميدانية أو الدراسات الواسعة بسبب تعقيد التجهيز والوقت اللازم للتحليل. كما أن حجم العينة التي يمكن فحصها محدود مقارنة ببعض تقنيات التحليل الأخرى. أما من ناحية الدقة، فإنها توفر معلومات دقيقة جدًا على المستوى البنيوي، لكنها لا توفر تحديدًا مباشرًا للتركيب الكيميائي للجسيمات، لذلك غالبًا ما يتم دمجها مع تقنيات طيفية أخرى مثل FTIR أو Raman لتعزيز التحليل الكيميائي.

6.1.14 تقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء وتقنية المجهر القريب من المجال (Nano–FTIR)

تقنية الـ Nano-FTIR Spectroscopy تمثل قفزة نوعية في مجال تحليل الـ MPs على المستوى النانوي، إذ تجمع بين تقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) وتقنية المجهر القريب من المجال (Near-field microscopy)، مما يمكن من فحص الجسيمات البلاستيكية بأبعاد نانوية بدقة تتراوح بين 90 – 98%. هذه الدقة العالية تجعل

Nano–FTIR أداة فعالة للكشف عن التركيب الكيميائي الدقيق للبوليمرات، وتحديد التغيرات الكيميائية التي تحدث نتيجة التعرض البيئي مثل التعرض للأشعة فوق البنفسجية والتآكل الميكانيكي. في سياق الـ MPs، تفيد هذه التقنية في دراسة الجسيمات التي لا يمكن رصدها أو تحليلها بدقة بتقنيات أخرى، خاصة الجسيمات التي تقل عن 100 نانومتر، والتي قد تمتلك تأثيرات بيولوجية وبيئية أعمق بسبب قدرتها على اختراق الأغشية الخلوية والتفاعل مع الكائنات الحية الدقيقة. لذلك، Nano–FTIR تمثل أداة بحثية متقدمة لفهم تأثيرات الـ MPs على النظم البيئية والإنسانية. مع ذلك، يظهر من الشكل 6.1 أن استخدام هذه التقنية في الدول العربية محدود جداً، حيث رصدت فقط في الإمارات وعمان والكويت بنسبة 5% لكل منهما، بينما غابت تمامًا عن باقي الدول العربية. هذه النسبة المتدنية تعكس التحديات المتعلقة بتكلفة الأجهزة العالية، الحاجة لتدريب متخصص، وصعوبة صيانة وتشغيل الأجهزة في بيئات ذات بنية تحتية بحثية أقل تطورًا. من الناحية المهنية، Nano–FTIR مناسبة للغاية للأبحاث العلمية المتقدمة داخل الجامعات ومراكز البحوث التي تركز على الملوثات الدقيقة، لكنها ليست ملائمة للاستخدام الروتيني أو الميداني نظرًا لتعقيدها وحساسيتها. لذا، تعزيز البنية التحتية التعليمية والبحثية في الدول العربية يعد شرطًا أساسيًا لزيادة الاستفادة من هذه التقنية التي توفر دقة عالية وفهمًا معمقًا لظاهرة الـ MPs.

6.1.15 تقنية المجهر البؤري اليزري الماسح (CLSM)

تقنية المجهر البؤري اليزري الماسح (Confocal Laser Scanning Microscopy, CLSM) تمثل أداة متقدمة في تصوير وتحليل الميكروبات والمواد البيولوجية، حيث توفر صورًا ثلاثية الأبعاد عالية الدقة مع إمكانية الحصول على معلومات كيميائية وبيئية للجسيمات المدروسة. الدقة التقريبية لهذه التقنية تتراوح بين 85 – 95%، وهي تعكس قدرتها على تقديم تفاصيل دقيقة عن المورفولوجيا والتركيب الكيميائي للميكروبلاستيك، خصوصًا عند دمجها مع تقنيات أخرى لتحليل التركيب الكيميائي. في سياق دراسة الـ MPs، CLSM تستخدم بشكل متزايد لفحص الجسيمات البلاستيكية في العينات البيئية، حيث يمكنها الكشف عن تراكم الـ MPs في الأنسجة الحيوانية والنباتية أو على الأسطح المختلفة، مما يسمح بفهم أعمق لكيفية تفاعل هذه الجسيمات مع الكائنات الحية. كما تساعد في دراسة العلاقة بين الـ MPs والكائنات الدقيقة مثل الطحالب والبكتيريا، من خلال تصوير التراكم الحيوي للبكتيريا على سطح الجسيمات البلاستيكية. بالنظر إلى نسب الاستخدام في الدول العربية، تظهر البيانات أن CLSM مستخدمة بنسبة محدودة جدًا، حيث تم رصد استخدامها فقط في مصر والإمارات بنسبة 10%، وعمان بنسبة 5%، مع غياب واضح في باقي الدول العربية. يعود ذلك إلى التكلفة العالية للجهاز وحاجته لخبرات فنية متخصصة لتشغيله وتحليل نتائجه، مما يجعل استخدامه مقصورًا غالبًا على المختبرات البحثية والجامعات الكبرى. بالرغم من محدودية انتشار CLSM في المنطقة، فإن فوائدها واضحة جدًا في الدراسات البيئية التي تتطلب فهمًا دقيقًا للتفاعلات بين الـ MPs والعوامل البيولوجية المختلفة. يمكن استخدام CLSMلدراسة تأثير الـ MPs على الكائنات البحرية والنهرية، وتقييم خطر هذه الجسيمات على السلسلة الغذائية.

الدقة العالية وسعة التحليل المكاني تجعل الـ CLSM تقنية متقدمة تستحق الاستثمار فيها، خاصة في مراكز البحث والجامعات التي تهدف إلى تطوير فهم شامل لتلوث الـ MPs وآثاره البيئية. لكن من الناحية العملية، يجب موازنة الفوائد مع التكلفة والتعقيد، ويجب العمل على بناء قدرات فنية وبنية تحتية مناسبة لدعم استخدامها المستدام

عندما نقارن CLSM مع تقنيات أخرى مثل المجهر الضوئي أو SEM، نجد أن الـ CLSM تقدم مزايا إضافية في التحليل ثلاثي الأبعاد والقدرة على رصد التوزيع الداخلي للجسيمات، وهي خصائص مهمة لفهم تأثير الـ MPs على المستوى الخلوي والبيئي. ولكن بالمقابل، فهي أقل استخدامًا في التحاليل الروتينية بسبب تعقيدها وحساسية العينات.

الدقة العالية لهذه التقنية تجعلها مثالية للبحوث المتقدمة في الجامعات ومراكز البحث التي تركز على التفاعلات البيئية والجسيمات الدقيقة، وتُمكن الباحثين من دراسة الظواهر التي لا يمكن للطرق التقليدية ملاحظتها. لهذا، فإن زيادة الاستثمار في مثل هذه الأجهزة والتدريب المتخصص يعد أمرًا ضروريًا لتعزيز فهم الـ MPs وتأثيره في المنطقة العربية، خصوصًا مع تزايد الوعي البيئي والحاجة لمراقبة تلوث البلاستيك بدقة عالية.

6.1.16 مطياف الكتلة الأيونية الثانوية لزمن الطيران (ToF-SIMS)

تقنية مطياف الكتلة الأيونية الثانوية لزمن الطيران(Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry, ToF-SIMS) هي تقنية تحليلية سطحية متقدمة تُستخدم لقياس تركيب المواد على مستوى السطح بدقة عالية جدًا، حيث تُطلق أيونات ثانوية من سطح العينة وتحللها طيفيًا لتحديد التركيب الكيميائي بدقة تصل إلى 90-99%. تتميز هذه التقنية بقدرتها على تقديم خرائط كيميائية مفصلة لبنية الجسيمات، مما يجعلها أداة قوية لدراسة المواد المعقدة مثل الـ MPs. في سياق دراسة الـ MPs، يسمح ToF-SIMS بتحليل التركيب الكيميائي السطحي للجسيمات، وهو أمر بالغ الأهمية لفهم التفاعلات بين الـ MPs والعوامل البيئية مثل التآكل، والتراكم الكيميائي، وتكوين الأغلفة الحيوية (Biofilms) التي تؤثر على سلوك وانتقال هذه الجسيمات في البيئة. بالإضافة إلى ذلك، توفر هذه التقنية تفاصيل دقيقة حول تغييرات التركيب السطحي التي قد تحدث بفعل التعرض لأشعة الشمس، الحرارة، أو الملوثات الكيميائية، مما يعزز فهم استقرار وتغيرات الـ MPs عبر الزمن. وفقًا للبيانات المتوفرة في الدول العربية، يظهر استخدام ToF-SIMS بنسبة ضئيلة جدًا، حيث تم رصد استخدام محدود في السعودية والكويت (7%)، والإمارات (6%)، وعمان (5%) فقط، بينما لا يوجد استخدام مسجل في باقي الدول العربية. تعود هذه النسبة المنخفضة إلى تكلفة الجهاز المرتفعة وتعقيد تشغيله، بالإضافة إلى حاجة الكوادر الفنية إلى تدريب عالي التخصص. علاوة على ذلك، تتطلب التحاليل باستخدام ToF-SIMS تجهيزًا دقيقًا للعينة وهو ما قد يمثل تحديًا في بعض المختبرات. بالمقارنة مع تقنيات التحليل الأخرى مثل FTIR أو Raman، يتميز ToF-SIMS بقدرته على التحليل السطحي الأكثر تفصيلًا مع حساسية أعلى للتغيرات الكيميائية الطفيفة، مما يتيح فحص التفاعلات المعقدة التي لا يمكن رصدها بطرق أخرى. لكنه في المقابل أقل استخدامًا في التحاليل الروتينية نظرًا للقيود التقنية والتكلفة. من ناحية الدقة، تتراوح بين 90-99%، مما يجعلها من أدق التقنيات لتحديد التركيب الكيميائي السطحي، وهو أمر بالغ الأهمية في تقييم تأثير الـ MPs على البيئة، خصوصًا في البيئات المائية والتربة حيث تحدث التفاعلات الكيميائية والبيولوجية المعقدة.

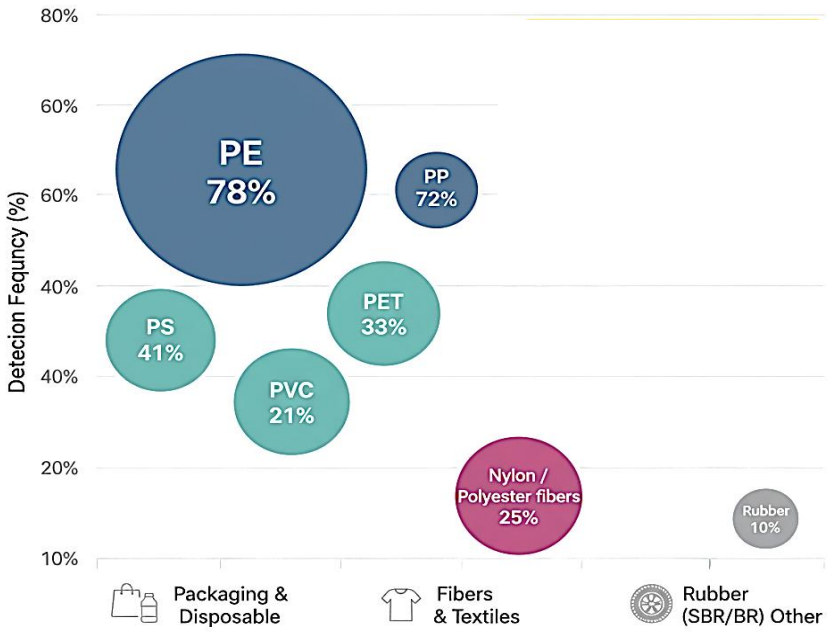
6.1.17 مجهر القوة الذرية (AFM)

تقنية مجهر القوة الذرية (Atomic Force Microscopy, AFM) هي واحدة من أكثر التقنيات دقة في دراسة الميكروبات والجسيمات الدقيقة على المستوى النانوي. تعمل هذه التقنية من خلال استخدام مجس دقيق جدًا لمسح سطح العينة، مما يسمح بالحصول على معلومات ثلاثية الأبعاد حول المورفولوجيا السطحية والخصائص الفيزيائية للجسيمات بدقة تصل إلى 90-99%. هذه الدقة العالية تجعل AFM أداة لا غنى عنها في دراسة الـ MPs، حيث يمكن من خلالها تحليل السطح بدقة نانوية، وهو أمر حاسم لفهم التغيرات التي تطرأ على الجسيمات بفعل عوامل بيئية مختلفة. في دراسة الـ MPs، تساعد AFM في التعرف على شكل وحجم الجسيمات، بالإضافة إلى قياس الخشونة السطحية والتغيرات البنيوية التي قد تحدث نتيجة التعرض للأشعة فوق البنفسجية، الأملاح، أو التآكل الميكانيكي. كذلك، تمكن التقنية الباحثين من تقييم التفاعلات بين الجسيمات والمواد البيولوجية، مثل تكوين الأغشية الحيوية، التي قد تؤثر على سمية الـ MPs ونقله في البيئة. من حيث الاستخدام في الدول العربية، تظهر البيانات أن AFM مستخدمة بنسبة قليلة جدًا، حيث تسجل نسب استخدام بين 5 و8% في الإمارات وعمان ولبنان، في حين لا توجد بيانات عن استخدامها في باقي الدول. هذه النسبة المنخفضة تعود إلى عدة عوامل، منها تكلفة الجهاز العالية، متطلبات التدريب المتخصص، بالإضافة إلى ضرورة وجود بيئة مختبرية مناسبة للحفاظ على استقرار الجهاز ودقته العالية. بالمقارنة مع تقنيات مثل SEM أو FTIR، توفرAFM ميزات فريدة مثل إمكانية قياس الخواص الفيزيائية السطحية بشكل مباشر دون الحاجة إلى تحضيرات معقدة للعينة. ومع ذلك، يظل استخدامها محدودًا في الدراسات الميدانية أو الروتينية بسبب تعقيد الجهاز والحاجة إلى خبرة فنية متقدمة. الدقة العالية لتقنية AFM، بالإضافة إلى قدرتها على تحليل الخصائص الفيزيائية والكيميائية للميكروبلاستيك على المستوى النانوي، تجعلها أداة قوية للبحوث المتقدمة التي تركز على تأثير الـ MPs على البيئة وصحة الإنسان. ومع ذلك، يتطلب زيادة انتشارها في المنطقة استثمارات في البنية التحتية البحثية وتدريب الكوادر، مما يساهم في تحسين جودة الأبحاث البيئية المتعلقة بالملوثات البلاستيكية. على الرغم من أن الأجهزة المدرجة في هذه الدراسة قد لا تكون متوفرة بشكل واسع أو متساوٍ في جميع الدول العربية، إلا أن ذكرها في الأبحاث العلمية يؤكد وجود قدرة فنية وعلمية تمكن الباحثين من الوصول إلى هذه التقنيات المتقدمة. سواء كان ذلك من خلال البنية التحتية المحلية في بعض المؤسسات المتقدمة، أو عبر التعاون الدولي وتبادل المعرفة والموارد، فإن توفر هذه الأجهزة على الأقل بشكل جزئي يعكس جاهزية المجتمع البحثي في المنطقة لمواجهة تحديات تحليل ودراسة الـ MPs بدقة عالية. هذا الأمر يشكل خطوة مهمة نحو تعزيز جودة الأبحاث البيئية وتطوير حلول مستدامة لمعالجة التلوث البلاستيكي في البيئات المختلفة.

6.2 توفر البيانات حول تركيز الـ MPs في البيئة العربية

يمثل الشكل 6.2 المرفق مجموعة شاملة من بيانات تركيزات الـ MPs في المياه عبر عدد من الدول العربية، موضحًا الأنواع المختلفة من الـ MPs وأقطارها ضمن العينات المجمعة. تعكس هذه البيانات جهدًا علميًا مهمًا في دراسة التلوث البلاستيكي البحري والنهري الذي يؤثر بشكل مباشر على البيئة والمجتمعات البشرية. هذا التحليل يتناول تفاصيل توفر البيانات، التوزيع الجغرافي لتركيزات الـ MPs، ويدخل في مناقشة علمية متعمقة لكل من هذه الجوانب. يمثل التلوث بالـ

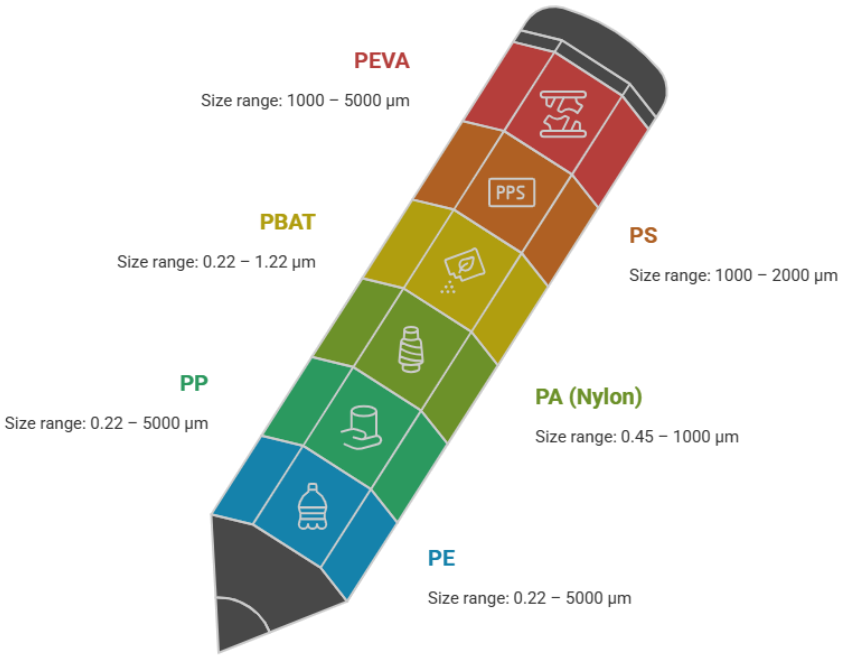
MPs في المياه، سواء كانت مياه بحرية أو نهرية، تحديًا بيئيًا عالميًا يؤثر بشكل مباشر على صحة النظم البيئية والكائنات الحية التي تعتمد عليها، بما في ذلك الإنسان. في الدول العربية، ازدادت الدراسات المتعلقة بهذا الموضوع في السنوات الأخيرة، وذلك في محاولة لفهم مدى انتشار هذا التلوث، أنواعه، وتأثيره المحتمل على البيئة المحلية والاقتصاديات البحرية. تتفاوت هذه التراكيز بشكل كبير حسب الموقع الجغرافي، نوع البوليمر، وأحجام الجسيمات. تُظهر البيانات وجود تنوع كبير في أنواع الـ MPs التي تم اكتشافها في المياه العربية. البوليمرات الشائعة مثل البولي إيثيلين (PE) و البولي بروبيلين (PP) تشكل النسبة الأكبر من الجسيمات الـ MPs في معظم المواقع، ويرجع ذلك إلى الاستخدام الواسع لهذه المواد في التعبئة والتغليف، وصناعة المنتجات البلاستيكية اليومية. كما سجلت أنواع أخرى مثل النايلون (PA)، والبولي ستيرين (PS)، والبولي فينيل كلورايد (PVC)، والتي تختلف في خصائصها الفيزيائية والكيميائية، وبالتالي في طريقة تفاعلها وانتشارها في البيئة.



شكل 6.2: نسب الكشف عن أنواع البوليمرات الشائعة في العينات البيئية

من حيث الأحجام، تراوحت أقطار الجسيمات بين أقل من 0.01 مم وحتى 4 مم (شكل 6.3).. هذا التفاوت في الحجم له دلالات كبيرة، حيث تلعب الجسيمات الأصغر دورًا أكثر تعقيدًا في البيئة بسبب قدرتها على النفاذ في النظم البيولوجية المختلفة، وتداخلها في عمليات التمثيل الغذائي للكائنات الحية. الجسيمات الأكبر قد تميل إلى الاستقرار في الرواسب أو التحرك أقل بفعل التيارات المائية، مما يجعلها تشكل خطرًا محليًا مكثفًا. تُظهر أنواع مثل البولي إيثيلين والبولي بروبيلين نطاق أقطار أكبر، وهو ما قد يعكس طبيعة استخداماتها المختلفة وتفتتها إلى أجزاء متعددة الأحجام

خلال عمليات التعرض للعوامل البيئية كالحرارة والضوء والاحتكاك. في المقابل، تظهر أنواع مثل النايلون و PVC بأقطار أصغر، مما يبرز أهمية التركيز على هذه الأنواع من حيث تحليل مخاطرها على المستوى الميكروبيولوجي والخلوي.

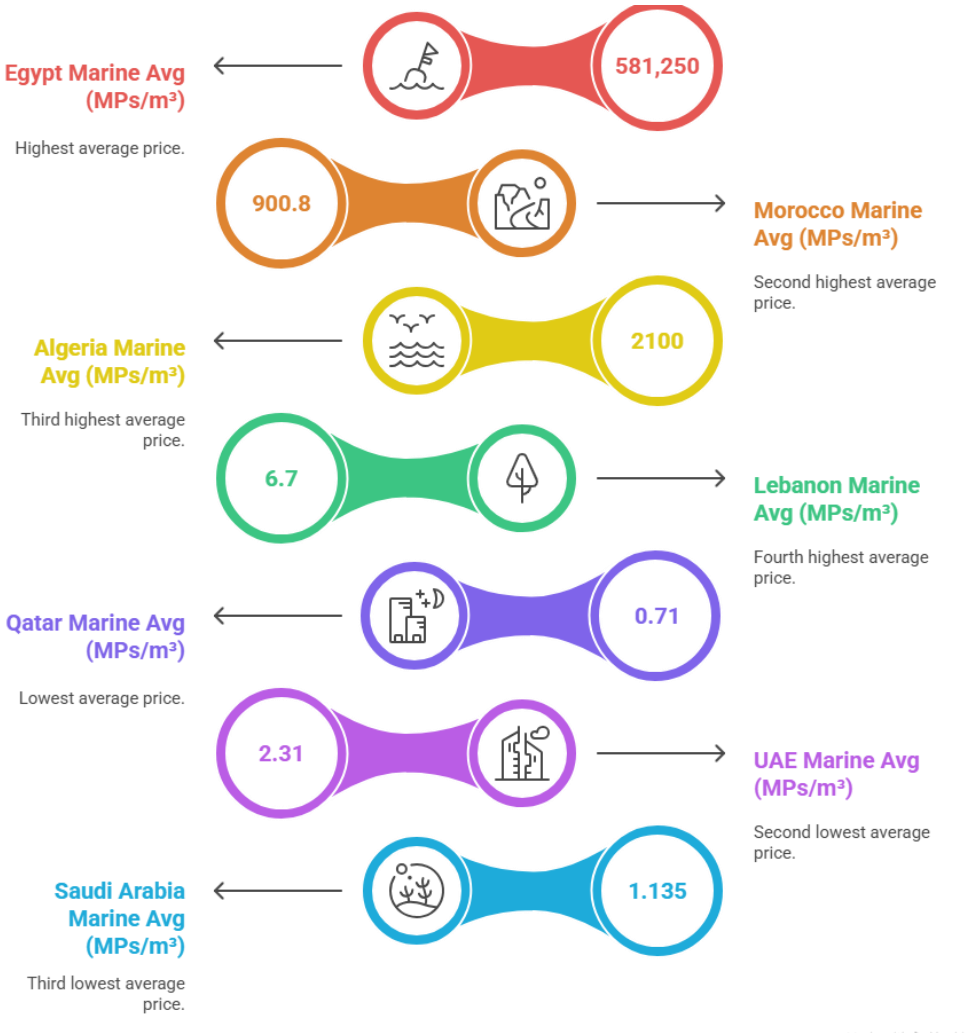


شكل 6.3: أحجام وأنواع البوليمرات المكتشفة في العينات

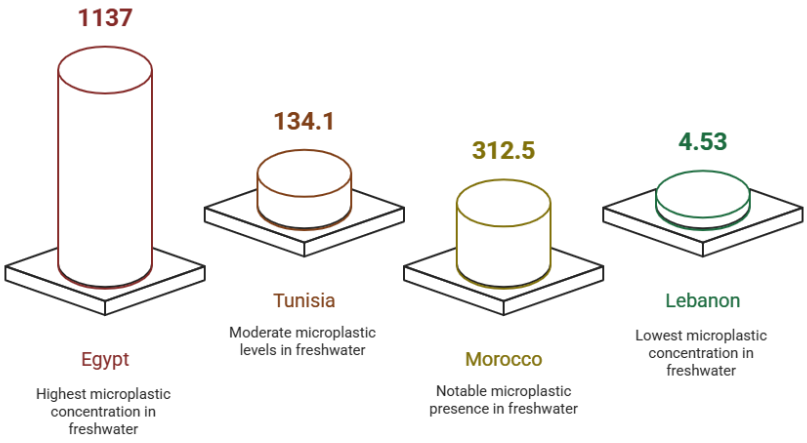
تختلف تراكيز الـ MPs في المياه بشكل ملحوظ بين الدول العربية، وهذا يعود إلى عدة عوامل تتعلق بالنشاط البشري، المناخ، الجغرافيا، ومستوى التطور الصناعي والاقتصادي. تُظهر البيانات الخاصة بتركيز MPs البحرية في عدد من الدول تفاوتًا واضحًا في مستويات التلوث البحري. تُعتبر مصر الأعلى من حيث متوسط تركيز MPs تليها المغرب و الجزائر ما يدل على وجود ملحوظ للجسيمات البلاستيكية الدقيقة في مياهها البحرية .أما لبنان، فيظهر مستويات معتدلة تصل إلى 6.7 جسيم لكل متر مكعب ، ويحتل المرتبة الرابعة بين الدول المذكورة. في المقابل، تُظهر الإمارات مستويات منخفضة بمعدل 2.31 جسيم لكل متر مكعب ، مما يشير إلى مياه بحرية أكثر نظافة نسبيًا. بينما السعودية تأتي بمعدل 1.13 جسيم لكل متر مكعب ، وهي أقل قليلاً من الإمارات، وتعد من بين الدول الأقل تلوثًا بالقليل من الجسيمات البلاستيكية الدقيقة. أما قطر، فتسجل أدنى معدل بواقع 0.71 جسيم لكل متر مكعب ، مما يشير إلى حد أدنى من التلوث البحري بالجسيمات البلاستيكية الدقيقة (شكل 6.4).

تُظهر البيانات الخاصة بتركيز الجسيمات البلاستيكية الدقيقة في المياه العذبة لدول مختارة تفاوتًا واضحًا في مستويات التلوث. تأتي مصر في المقدمة بأعلى تركيز للجسيمات البلاستيكية الدقيقة، حيث يصل إلى 1,137 جسيمًا لكل متر مكعب ، مما يعكس وجود تلوث كبير في المياه العذبة. تونس تأتي في المرتبة الثانية بمستويات معتدلة تصل إلى

134.1 جسيمًا لكل متر مكعب ، مما يشير إلى تلوث متوسط. المغرب يظهر وجودًا ملحوظًا للجسيمات البلاستيكية الدقيقة في المياه العذبة بمعدل 312.5 جسيمًا لكل متر مكعب ، ما يعكس تراكمًا واضحًا للمواد البلاستيكية. أما لبنان، فيسجل أدنى تركيز بمعدل 4.53 جسيمًا لكل متر مكعب ، مما يشير إلى نظافة نسبية للمياه العذبة مقارنة بالدول الأخرى (شكل 6.5).

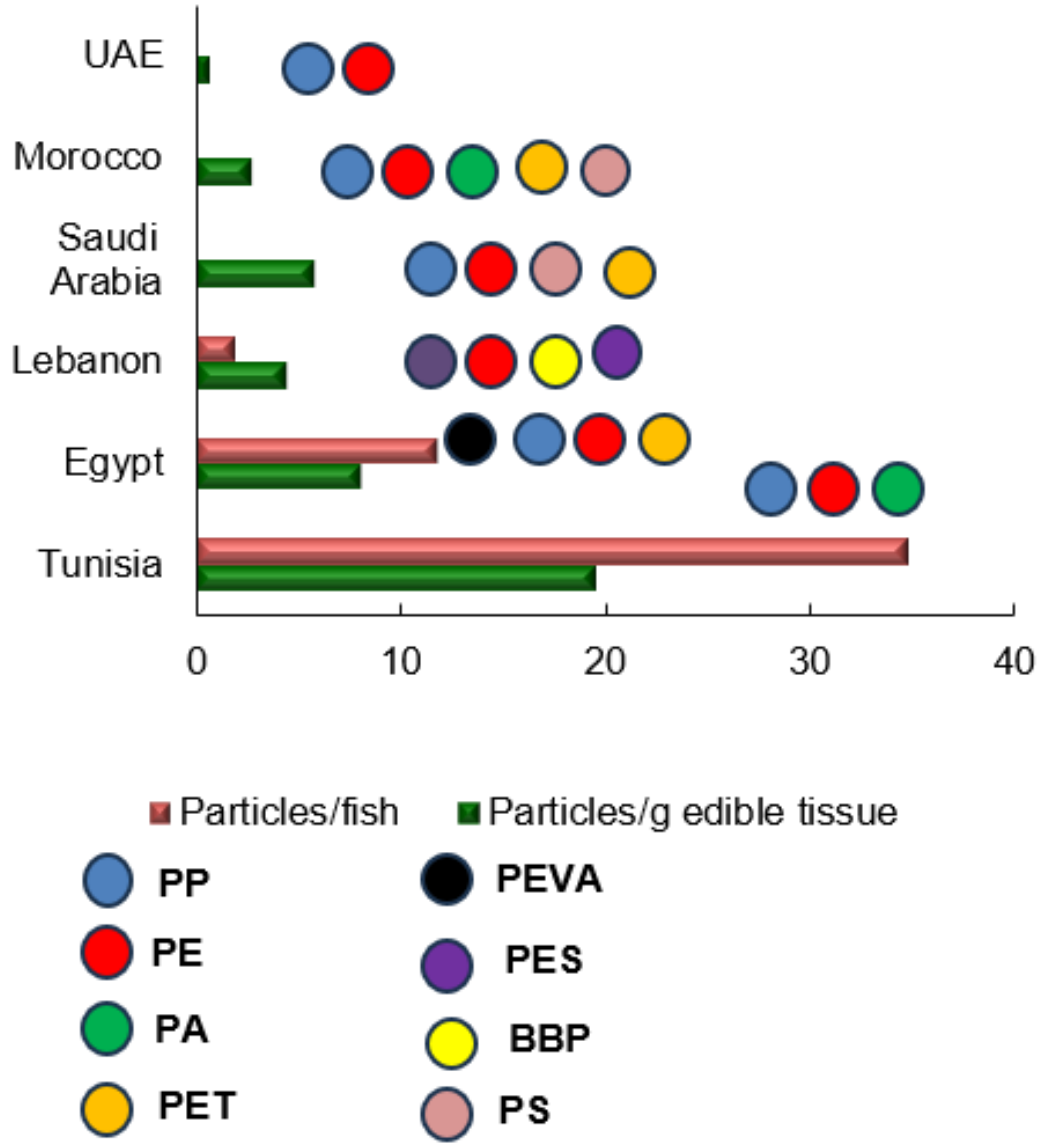


شكل 6.4: متوسط تراكيز MPS في عينات المياه المالحة في الدول العربية



شكل 6.5: متوسط تراكيز MPS لكل متر مكعب في عينات المياه العذبة في الدول العربية

يعرض الشكل 6.6 بيانات مستمدة من دراسات التوافر الحيوي للجسيمات البلاستيكية الدقيقة في الأسماك ضمن عدة دول عربية، وذلك عبر تقييم مستويين من التعرض :عدد الجسيمات المتراكمة في السمكة كاملة وعدد الجسيمات في النسيج الصالح للاستهلاك، باعتباره المكوّن الأكثر ارتباطًا بالتعرّض البشري المباشر. يوضّح التمثيل البياني أن معدلات الإتاحة الحيوية تختلف بشكل ملحوظ بين الدول، حيث تظهر تونس ومصر أعلى مستويات للتراكم، سواء على مستوى الجسم الكامل أو على مستوى النسيج الغذائي، في حين تُسجل الإمارات والمغرب مستويات أقل نسبيًا.كما يعرض الشكل طيفًا واسعًا من البوليمرات المكتشفة، مثل PP، PE، PA، PET، PEVA، PES، BBP، وPS، مما يشير إلى تعددية مصادر التلوث البلاستيكي وارتفاع احتمالات التعرض البيولوجي للأنواع السمكية. وتؤكد هذه النتائج ضرورة دمج تقييم التوافر الحيوي ضمن برامج مراقبة جودة البيئة البحرية، نظرًا لدورها المحوري في فهم انتقال الملوثات عبر السلسلة الغذائية وتأثيراتها المحتملة على صحة الإنسان والنظم البيئية.



شكل 6.6: متوسط التوافر الحيوي لل MPS في عينات السمك والماكولات البحرية العذبة في الدول العربية

6.3 التعاون الدولي

تُظهر نسب التعاون الدولي في أبحاث الـ MPs بين الدول العربية تنوعًا واضحًا يعكس التفاوت في مدى انخراط كل دولة في الشبكات البحثية العالمية. تأتي مصر في مقدمة الدول بنسبة تعاون تزيد عن 70%، مع شركاء رئيسيين مثل ألمانيا وإيطاليا، مما يشير إلى وجود بنية بحثية متقدمة وربط قوي مع مراكز بحثية أوروبية متطورة تدعم إجراء دراسات ذات جودة عالية ومتنوعة. تونس أيضًا تتمتع بنسبة تعاون مرتفعة تتجاوز 60%، مع شراكات مع فرنسا وألمانيا وبلجيكا، مما يؤكد على أهمية التكامل الإقليمي والدولي في تطوير هذا المجال العلمي. الدول الخليجية مثل الإمارات وقطر والسعودية تسجل نسب تعاون تتراوح بين 50% إلى 65%، مع شركاء دوليين متنوعين كالولايات المتحدة، ألمانيا، اليابان، ودول الخليج نفسها. هذا يشير إلى توجه استراتيجي نحو توسيع التعاون البحثي الدولي والاستفادة من الموارد التقنية والخبرات العلمية المتقدمة، خصوصًا في ظل الاهتمام المتزايد بقضايا البيئة البحرية والـ MPs. في المقابل، تظهر بعض الدول مثل العراق والكويت والجزائر نسب تعاون أقل، تتراوح بين 30% إلى 50%، مع شراكات غالبًا ما تكون محدودة جغرافيًا أو نوعيًا، حيث تقتصر على بعض الدول الأوروبية ودول الجوار. قد يعكس هذا الواقع تحديات متعددة مثل القيود السياسية، ضعف التمويل، أو محدودية البنية التحتية البحثية، ما يؤثر على قدرة هذه الدول في الانخراط بشكل أوسع في التعاون الدولي العلمي. يُعد تعزيز التعاون الدولي عاملًا محوريًا لتسريع تقدم البحث في مجال الـ MPs، حيث يوفر إمكانية تبادل المعرفة، التقنيات الحديثة، والبيانات المتخصصة التي قد تكون غير متاحة محليًا. لذا، فإن تعزيز الشراكات العلمية، خاصة للدول ذات النسب الأدنى من التعاون، يُعد ضرورة لاستثمار القدرات البحثية بشكل أفضل ومواجهة التحديات البيئية بشكل أكثر فاعلية (جدول 6.1).

جدول 6.3: نسب التعاون بين الدول العربية والدول الاخرى في أبحاث الـ MPs

الدولة	نسبة التعاون الدولي %	أبرز الشركاء الدوليين
السعودية	50	ألمانيا، الولايات المتحدة، دول الخليج
مصر	70	ألمانيا، إيطاليا
تونس	60	فرنسا، ألمانيا، بلجيكا
المغرب	55	فرنسا، إسبانيا، ألمانيا، بلجيكا
الجزائر	50-40	فرنسا، إيطاليا، دول البحر المتوسط
لبنان	50	فرنسا، إيطاليا، دول شرق أوسط
الإمارات	65	الولايات المتحدة، ألمانيا، اليابان، هولندا
الأردن	45	الولايات المتحدة، ألمانيا، جامعات أوروبية
عُمان	55-50	ألمانيا، فرنسا، الولايات المتحدة، دول الخليج
قطر	60	الولايات المتحدة، ألمانيا، بريطانيا
الكويت	40	الولايات المتحدة، ألمانيا، المملكة المتحدة
العراق	35-30	العراق، بعض التعاون مع دول الجوار ودول أوروبية محدودة (مثل ألمانيا، إيران، تركيا)

الفصل السابع

الفصل السابع: الاستراتيجيات البحثية والإدارية والسياسية لمواجهة التلوث بالـ MPs في المنطقة العربية

يستعرض الفصل السابع الجهود الإقليمية لمواجهة التلوث بالجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) في ثلاثة محاور رئيسية. يركّز على البحث والرصد البيئي للكشف عن مستويات التلوث في البيئات البحرية وبناء قواعد بيانات علمية داعمة للقرار. كما يناقش إدارة النفايات من خلال تطوير مرافق إعادة التدوير وتحسين أنظمة الجمع والفرز وتشجيع البدائل المستدامة. ويعرض محور تطوير السياسات مبادرات مثل حظر الميكروبيدات وتطبيق برامج المسؤولية الممتدة للمنتج. ويؤكد الفصل أهمية تكامل البحث والسياسات والمجتمع لتحقيق إدارة بيئية مستدامة في المنطقة العربية

تزايدت الجهود في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا خلال السنوات الأخيرة لمعالجة التلوث الناتج عن الجسيمات البلاستيكية الدقيقة، وذلك عبر محاور متعددة تشمل البحث العلمي، وأنظمة الرصد البيئي، وإدارة النفايات، وتطوير السياسات العامة. تأتي هذه الجهود استجابةً للتهديد المتزايد الذي تشكله الـ MPs على النظم البيئية والصحة العامة في المنطقة[178، 179].

7.1 البحث والرصد البيئي

تُعد الدراسات البحثية والبرامج الرصدية أدوات أساسية لفهم مصادر وانتشار وتأثيرات الـ MPs في المنطقة. فقد أظهرت دراسات ميدانية تحليلية في مناطق مثل البحر الأحمر والخليج العربي وجود تركيزات مرتفعة من هذه الجسيمات في المياه الساحلية وفي أنسجة الكائنات البحرية، ما يعكس التراكم الحيوي والتهديد على السلسلة الغذائية[180، 181]، تشمل الجهود البحثية الحالية تنفيذ برامج رصد بيئي على المستويات المحلية والإقليمية لرصد التغيرات الزمنية والمكانية في تلوث المياه بالجسيمات البلاستيكية الدقيقة، مما يسهم في بناء قواعد بيانات علمية ضرورية لدعم صانعي القرار.

7.2 إدارة النفايات

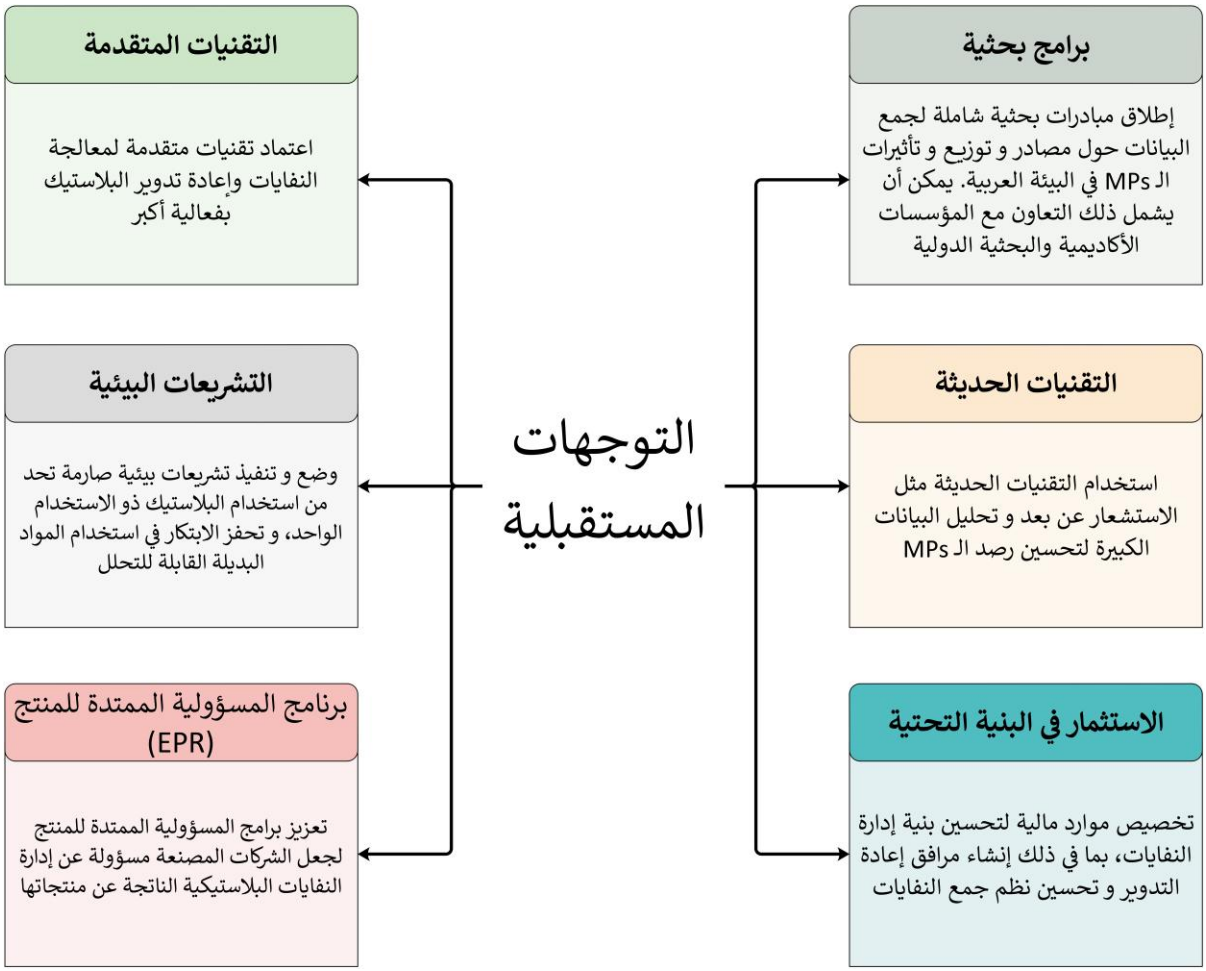
تمثل الإدارة غير الفعالة للنفايات أحد العوامل الرئيسية في انتشار التلوث البلاستيكي في البيئة. لذلك، تسعى عدة دول في المنطقة، مثل الإمارات العربية المتحدة والمملكة المغربية، إلى تحسين البنية التحتية لأنظمة إدارة النفايات من خلال:

- تطوير مرافق متقدمة لإعادة التدوير.
- تحسين نظم جمع وفرز النفايات.
- تشجيع إعادة استخدام المواد والحد من إنتاج النفايات البلاستيكية أحادية الاستخدام.

إضافة إلى ذلك، تُنفذ حملات لرفع وعي المجتمع بأهمية تقليل الاعتماد على البلاستيك التقليدي، وتشجيع استخدام بدائل مستدامة كالأكياس القماشية والزجاجيات القابلة لإعادة التعبئة.

7.3 تطوير السياسات

تبنت بعض الدول العربية سياسات لتقييد أو حظر استخدام بعض أنواع البلاستيك التي تسهم في توليد الجسيمات الدقيقة، مثل الميكروبيدات في مستحضرات التجميل. كما أطلقت مبادرات لتنفيذ برامج "المسؤولية الممتدة للمنتج " (EPR)، التي تفرض على المُصنعين مسؤولية إدارة منتجاتهم بعد انتهاء عمرها الافتراضي، بما يشمل جمعها وإعادة تدويرها (الشكل 7.1).



شكل 7.1: التنقيات المستقبلية للدول العربية في مكافحة انتشار الـ MPs

الفصل الثامن

الفصل الثامن: التحديات والتوجهات المستقبلية

يستعرض الفصل الثامن التحديات البحثية والتقنية المرتبطة برصد الجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) في الدول العربية، حيث تعاني بعض الدول من نقص البيانات وضعف القدرات المخبرية والتعاون العلمي. كما يوضح التوجهات المستقبلية لتعزيز الأبحاث، وتطوير التشريعات، وتحسين إدارة النفايات، وتوظيف التقنيات الحديثة. يناقش أهمية توحيد أساليب التحليل لضمان دقة المقارنات بين الدراسات الإقليمية. ويختتم بتوصيات تركز على دعم البحث العلمي، وتطوير المختبرات، وتفعيل التعاون الإقليمي والدولي، ما يسهم في وضع سياسات فعّالة للحد من التلوث البلاستيكي وحماية البيئة والصحة العامة

8.1 التحديات التقنية ونقص البيانات البحثية حول الـ MPs في بعض الدول العربية

تعاني عدة دول عربية مثل البحرين، السودان، سوريا، فلسطين، ليبيا، واليمن من نقص واضح في البيانات البحثية المتعلقة بتركيزات الـ MPs في البيئات البحرية والبرية. هذا النقص يعكس تحديات تقنية وعلمية متعددة، منها محدودية القدرات التحليلية والمخبرية المتخصصة في الكشف عن جزيئات الـ MPs ذات الأبعاد النانوية والميكرومترية، والتي تتطلب استخدام تقنيات متقدمة مثل التحليل الطيفي (FTIR) والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) وتقنيات الفصل الكيميائي. كما أن قلة الدراسات الميدانية المنظمة وعدم توفر بيانات موثوقة تعيق القدرة على تقييم توزيع الـ MPs وانتشاره في مختلف الوسائط البيئية مثل الرواسب، المياه السطحية، والغلاف الجوي. كذلك، ضعف التعاون البحثي الدولي يحد من تبادل الخبرات العلمية والتقنيات الحديثة التي تُستخدم في رصد وتوصيف الـ MPs. بناء منظومة بحثية متكاملة تشمل تطوير مختبرات مجهزة تجهيزًا حديثًا، وتدريب الكوادر الفنية، وتفعيل برامج التعاون العلمي مع المؤسسات الدولية المتخصصة، يعد من الخطوات الحيوية التي يمكن أن تسهم في سد هذه الفجوة المعرفية. ذلك سيُتيح جمع بيانات دقيقة، وتحليل الاتجاهات الزمنية والفراغية للميكروبلاستيك، مما يعزز من قدرة صناع القرار على وضع استراتيجيات بيئية فعالة للحد من التلوث البلاستيكي وتأثيراته السلبية على النظام البيئي والصحة العامة.

وعلى رغم التقدم في بعض المبادرات في العديد من الدول العربية، لا تزال المنطقة تواجه مجموعة من التحديات البنيوية والوظيفية، من أبرزها:

- نقص البيانات البيئية الدقيقة :العديد من الدول تفتقر إلى نظم موحدة وشاملة لرصد التلوث بالجسيمات البلاستيكية الدقيقة، ما يحد من القدرة على وضع خطط قائمة على الأدلة.
- ضعف الموارد المالية والتقنية :تؤثر محدودية الموارد في تنفيذ مشاريع البنية التحتية الحديثة أو شراء الأجهزة والمعدات اللازمة للرصد والمعالجة.
- الاعتماد الاقتصادي على صناعة البلاستيك :تشكل صناعة البلاستيك مصدر دخل رئيسي لبعض اقتصادات الدول، مما يعيق السياسات المقيدة للإنتاج والاستهلاك.
- انخفاض مستوى الوعي البيئي :لا يزال الوعي المجتمعي العام بالمخاطر البيئية والصحية للجسيمات البلاستيكية الدقيقة ضعيفًا، وهو ما ينعكس على سلوكيات المستهلكين.

8.2 التوجهات المستقبلية

لمواجهة التحديات المرتبطة بتلوث الجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) بشكل فعال، يُنصح بأن تعتمد دول المنطقة مجموعة من التوجهات الاستراتيجية المستقبلية، منها:

1. تعزيز الأبحاث العلمية التطبيقية:
   - التعاون مع مؤسسات أكاديمية وبحثية دولية لتوفير قاعدة معرفية قوية تدعم صياغة السياسات البيئية.
2. توظيف التقنيات الحديثة:

- استخدام الاستشعار عن بعد، والذكاء الاصطناعي، وتحليل البيانات الضخمة لتحسين رصد وتنبؤ مستويات التلوث.

3. تحسين البنية التحتية لإدارة النفايات:

- الاستثمار في أنظمة فرز، جمع، ومعالجة النفايات لضمان إدارة فعالة ومستدامة للنفايات البلاستيكية.

4. إدخال التشريعات البيئية الحازمة:

- تقليل استخدام البلاستيك أحادي الاستخدام وتشجيع الابتكار في تصميم مواد بديلة قابلة للتحلل أو التدوير.

5. تعزيز برامج المسؤولية الممتدة للمنتج:(EPR)

- ضمان مشاركة القطاع الصناعي في معالجة النفايات الناتجة عن منتجاته بشكل مسؤول.

6. توسيع حملات التوعية والتعليم البيئي:

- إدراج مفاهيم حماية البيئة في المناهج الدراسية، واستغلال المنصات الإعلامية، والتعاون مع منظمات المجتمع المدني.

7. إشراك المنظمات غير الحكومية:

- دعم مبادرات التوعية المجتمعية وتنظيم حملات تنظيف الشواطئ والمناطق المتضررة من التلوث.

8.3 توحيد أساليب التحليل

تلعب طرق التحليل دورًا محوريًا في ضمان دقة وموثوقية النتائج المتعلقة بتركيزات الجسيمات البلاستيكية الدقيقة .(MPs)تشمل التقنيات المستخدمة في هذه الدراسات المجهر الضوئي، التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء(FTIR) ، التحليل الطيفي بالرنين المغناطيسي النووي(NMR) ، المجهر الإلكتروني الماسح(SEM) ، وتقنيات الطيف الكتلي، حيث تختلف هذه التقنيات في حساسية ودقة القياس.

قد يؤدي اختلاف حساسية الأجهزة أو البروتوكولات المتبعة في أخذ العينات إلى تفاوت في أقطار الجسيمات التي يتم تحليلها بين الدول. على سبيل المثال، تقوم بعض الدول بتحليل الجسيمات الصغيرة جدًا حتى 0.01 مم، بينما تكتفي دول أخرى بالجسيمات الأكبر، مما ينعكس على أعداد الجسيمات المكتشفة وتركيزاتها.

لذلك، يُعد وضع بروتوكولات إقليمية موحدة لأخذ العينات وتحليلها خطوة أساسية لتعزيز القدرة على المقارنة بين الدول وزيادة موثوقية البيانات العلمية، بما يتيح صياغة سياسات بيئية أكثر دقة وفاعلية.

8.4 توصيات مستقبلية لتعزيز البحث وإدارة التلوث

لتحقيق فهم أدق لانتشار الجسيمات البلاستيكية الدقيقة (MPs) في المياه العربية، ينبغي تكثيف الجهود البحثية، خصوصًا في الدول التي تعاني من نقص البيانات. يشمل ذلك توفير الدعم المالي، تجهيز مختبرات متطورة، تدريب الباحثين على استخدام أحدث التقنيات، وتعزيز التعاون الإقليمي والدولي لتبادل الخبرات والبيانات.

كما يُنصح بوضع بروتوكولات موحدة لأخذ العينات وتحليلها، لضمان الحصول على نتائج دقيقة وقابلة للمقارنة بين الدراسات المختلفة. ويجب توجيه مزيد من الأبحاث لدراسة التأثيرات البيئية والصحية لهذه الجسيمات، لا سيما في المناطق ذات التراكيز العالية، بهدف اتخاذ إجراءات فعّالة للحد من انتشار الملوثات البلاستيكية.

ينبغي أن تصاحب هذه الجهود تطوير سياسات بيئية صارمة تهدف إلى تقليل استخدام البلاستيك، تعزيز إعادة التدوير، وتحسين إدارة النفايات، إلى جانب حملات توعية للمجتمعات حول مخاطر البلاستيك والتلوث. تُعد بيانات تركيزات الجسيمات البلاستيكية الدقيقة خطوة مهمة لفهم طبيعة ومدى انتشار التلوث البلاستيكي في البيئة المائية، مع وجود تفاوت واضح في التوزيع الجغرافي والتنوع النوعي.

ورغم التحديات المرتبطة بالحصول على بيانات دقيقة وشاملة، تظهر هذه الجهود ارتفاعًا في مستوى الوعي العلمي والبيئي، مما يوفر قاعدة قوية لتعزيز البحوث المستقبلية وتطوير سياسات بيئية فعّالة. إن توحيد المنهجيات، دعم البحث العلمي، وتوسيع التعاون الإقليمي يسهم بشكل كبير في حماية البيئة البحرية وصحة الإنسان في المنطقة العربية من أخطار الجسيمات البلاستيكية الدقيقة المتزايدة.

المـراجـــع

1. Desidery, L., & Lanotte, M. (2022). Polymers and plastics: Types, properties, and manufacturing. In *Plastic waste for sustainable asphalt roads* (pp. 3-28). Woodhead Publishing.
2. Paço, A., Duarte, K., da Costa, J. P., Santos, P. S., Pereira, R., Pereira, M. E., ... & Rocha-Santos, T. A. (2017). Biodegradation of polyethylene microplastics by the marine fungus Zalerion maritimum. *Science of the Total Environment*, *586*, 10-15.
3. Law, K. L. (2017). Plastics in the marine environment. *Annual review of marine science*, *9*(1), 205-229.
4. Horton, A. A., Svendsen, C., Williams, R. J., Spurgeon, D. J., & Lahive, E. (2017). Large microplastic particles in sediments of tributaries of the River Thames, UK–Abundance, sources and methods for effective quantification. *Marine pollution bulletin*, *114*(1), 218-226.
5. Coyle, R., Hardiman, G., & O'Driscoll, K. (2020). Microplastics in the marine environment: A review of their sources, distribution processes, uptake and exchange in ecosystems. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *2*, 100010.
6. Sun, J., Peng, Z., Zhu, Z. R., Fu, W., Dai, X., & Ni, B. J. (2022). The atmospheric microplastics deposition contributes to microplastic pollution in urban waters. *Water Research*, *225*, 119116.
7. Dey, S., Guha, T., Barman, F., Natarajan, L., Kundu, R., Mukherjee, A., & Paul, S. (2023). Surface functionalization and size of polystyrene microplastics concomitantly regulate growth, photosynthesis and anti-oxidant status of Cicer arietinum L. *Plant Physiology and Biochemistry*, *194*, 41-51.
8. Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., & Uricchio, V. F. (2020). A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *International journal of environmental research and public health*, *17*(4), 1212.
9. Li, J., Green, C., Reynolds, A., Shi, H., & Rotchell, J. M. (2018). Microplastics in mussels sampled from coastal waters and supermarkets in the United Kingdom. *Environmental pollution*, *241*, 35-44.
10. Rad, M. M., Moghimi, H., & Azin, E. (2022). Biodegradation of thermo-oxidative pretreated low-density polyethylene (LDPE) and polyvinyl chloride (PVC) microplastics by Achromobacter denitrificans Ebl13. *Marine Pollution Bulletin*, *181*, 113830.
11. Filho, W. L., Barbir, J., Abubakar, I. R., Paço, A., Stasiskiene, Z., Hornbogen, M., ... & Klõga, M. (2022). Consumer attitudes and concerns with bioplastics use: An international study. *PLoS One*, *17*(4), e0266918.
12. Kamilah, H., Al-Gheethi, A., Yang, T. A., & Sudesh, K. (2018). The use of palm oil-based waste cooking oil to enhance the production of polyhydroxybutyrate [P (3HB)] by Cupriavidus necator H16 strain. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *43*(7), 3453-3463.
13. Tareen, A., Saeed, S., Iqbal, A., Batool, R., & Jamil, N. (2022). Biodeterioration of microplastics: A promising step towards plastics waste management. *Polymers*, *14*(11), 2275.
14. Solanki, S., Sinha, S., & Singh, R. (2022). Myco-degradation of microplastics: an account of identified pathways and analytical methods for their determination. *Biodegradation*, *33*(6), 529-556.
15. Wu, Z., Shao, X., & Wang, Q. (2025). Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in the Environment: Dissemination, Ecological Risks, and Remediation Approaches. *Microorganisms*, *13*(8), 1763.
16. Wani, A. K., Akhtar, N., Sher, F., Navarrete, A. A., & Américo-Pinheiro, J. H. P. (2022). Microbial adaptation to different environmental conditions: molecular perspective of evolved genetic and cellular systems. *Archives of Microbiology*, *204*(2), 144.
17. Lu, X. M., Jiang, X. Q., & Liu, X. P. (2022). Response process and adaptation mechanism of estuarine benthic microbiota to polyvinyl chloride microplastics with and without phthalates. *Science of The Total Environment*, *806*, 150693.
18. Westhoff, S., Kloosterman, A. M., van Hoesel, S. F., van Wezel, G. P., & Rozen, D. E. (2021). Competition sensing changes antibiotic production in streptomyces. *MBio*, *12*(1), 10-1128.
19. Mohan, N., & Usha, R. (2018). Bio-augmentation-effective method of treating plastic waste-a field study. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, *12*(3), 1641-1647.
20. Falkenstein, P., Gräsing, D., Bielytskyi, P., Zimmermann, W., Matysik, J., Wei, R., & Song, C. (2020). UV pretreatment impairs the enzymatic degradation of polyethylene terephthalate. *Frontiers in Microbiology*, *11*, 689.
21. Jiang, Y., Yang, F., Kazmi, S. S. U. H., Zhao, Y., Chen, M., & Wang, J. (2022). A review of microplastic pollution in seawater, sediments and organisms of the Chinese coastal and marginal seas. *Chemosphere*, *286*, 131677.

22. Lam, C. S., Ramanathan, S., Carbery, M., Gray, K., Vanka, K. S., Maurin, C., ... & Palanisami, T. (2018). A comprehensive analysis of plastics and microplastic legislation worldwide. *Water, Air, & Soil Pollution*, *229*(11), 345.
23. Rochman, C. M. (2013). Plastics and priority pollutants: a multiple stressor in aquatic habitats.
24. Yu, H., Zhang, Y., Tan, W., & Zhang, Z. (2022). Microplastics as an emerging environmental pollutant in agricultural soils: effects on ecosystems and human health. *Frontiers in Environmental Science*, *10*, 855292.
25. Yao, X., Luo, X. S., Fan, J., Zhang, T., Li, H., & Wei, Y. (2022). Ecological and human health risks of atmospheric microplastics (MPs): a review. *Environmental Science: Atmospheres*, *2*(5), 921-942.
26. Meegoda, J. N., & Hettiarachchi, M. C. (2023). A path to a reduction in micro and nanoplastics pollution. *International journal of environmental research and public health*, *20*(8), 5555.
27. Haave, M., & Henriksen, T. (2022). Sources and fate of microplastics in Urban Systems. In *Handbook of Microplastics in the Environment* (pp. 849-875). Cham: Springer International Publishing.
28. Dey, S., Veerendra, G. T. N., Babu, P. A., Manoj, A. P., & Nagarjuna, K. (2024). Degradation of plastics waste and its effects on biological ecosystems: A scientific analysis and comprehensive review. *Biomedical Materials & Devices*, *2*(1), 70-112.
29. Kumar, R., Sharma, P., Verma, A., Jha, P. K., Singh, P., Gupta, P. K., ... & Prasad, P. V. (2021). Effect of physical characteristics and hydrodynamic conditions on transport and deposition of microplastics in riverine ecosystem. *Water*, *13*(19), 2710.
30. Wei, L., Yue, Q., Chen, G., & Wang, J. (2023). Microplastics in rainwater/stormwater environments: Influencing factors, sources, transport, fate, and removal techniques. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *165*, 117147.
31. Sathyamohan, G., Sewwandi, M., Ambade, B., & Vithanage, M. (2023). Sources and circulation of microplastics in the aerosphere–atmospheric transport of microplastics. *Microplastics in the Ecosphere: Air, Water, Soil, and Food*, 125-146.
32. Chen, Y., Niu, J., Xu, D., Zhang, M., Sun, K., & Gao, B. (2023). Wet deposition of globally transportable microplastics (< 25 μm) hovering over the megacity of Beijing. *Environmental Science & Technology*, *57*(30), 11152-11162.
33. Habib, R. Z., Thiemann, T., & Al Kendi, R. (2020). Microplastics and wastewater treatment plants—a review. *Journal of Water Resource and Protection*, *12*(01), 1.
34. Milojevic, N., & Cydzik-Kwiatkowska, A. (2021). Agricultural use of sewage sludge as a threat of microplastic (Mp) spread in the environment and the role of governance. *Energies*, *14*(19), 6293.
35. Frost, H. A. R. R. I. S. O. N., Bond, T. H. O. M. A. S., Sizmur, T., & Felipe-Sotelo, M. O. N. I. C. A. (2022). A review of microplastic fibres: generation, transport, and vectors for metal (loid) s in terrestrial environments. *Environmental science: processes & impacts*, *24*(4), 504-524.
36. Robert, D., Alle, P. H., Keller, N., Dzuila, M. A., & Garcia-Muñoz, P. (2023). Challenges and opportunities for microplastic and nanoplastic removal from industrial wastewater. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, 425-446.
37. Murashov, V., Geraci, C. L., Schulte, P. A., & Howard, J. (2021). Nano-and microplastics in the workplace. *Journal of occupational and environmental hygiene*, *18*(10-11), 489-494.
38. Hira, A., Pacini, H., Attafuah-Wadee, K., Vivas-Eugui, D., Saltzberg, M., & Yeoh, T. N. (2022). Plastic waste mitigation strategies: A review of lessons from developing countries. *Journal of Developing Societies*, *38*(3), 336-359.
39. Boots, B., Russell, C. W., & Green, D. S. (2019). Effects of microplastics in soil ecosystems: above and below ground. *Environmental science & technology*, *53*(19), 11496-11506.
40. Zhu, D., Chen, Q. L., An, X. L., Yang, X. R., Christie, P., Ke, X., ... & Zhu, Y. G. (2018). Exposure of soil collembolans to microplastics perturbs their gut microbiota and alters their isotopic composition. *Soil Biology and Biochemistry*, *116*, 302-310.
41. Egbeocha, C. O., Malek, S., Emenike, C. U., & Milow, P. (2018). Feasting on microplastics: ingestion by and effects on marine organisms. *Aquatic Biology*, *27*, 93-106.
42. Bhan, C., Kumar, N., & Elangovan, V. (2025). Microplastics pollution in the rivers, its source, and impact on aquatic life: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *22*(3), 1937-1952.

43. Charlton-Howard, H. S., Bond, A. L., Rivers-Auty, J., & Lavers, J. L. (2023). 'Plasticosis': Characterising macro-and microplastic-associated fibrosis in seabird tissues. *Journal of Hazardous Materials*, *450*, 131090.
44. Liu, Y., Cui, W., Li, W., Xu, S., Sun, Y., Xu, G., & Wang, F. (2023). Effects of microplastics on cadmium accumulation by rice and arbuscular mycorrhizal fungal communities in cadmium-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, *442*, 130102.
45. Li, K., Zhang, M., Jia, W., Xu, L., & Huang, Y. (2023). Deciphering the effects of LDPE microplastic films on diversity, composition and co-occurrence network of soil fungal community. *Applied Soil Ecology*, *182*, 104716.
46. Khoironi, A., Anggoro, S., & Sudarno, . (2019). Evaluation of the interaction among microalgae Spirulina sp, plastics polyethylene terephthalate and polypropylene in freshwater environment. *Journal of Ecological Engineering*, *20*(6), 161-173.
47. Ziajahromi, S., Neale, P. A., Rintoul, L., & Leusch, F. D. (2017). Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: development of a new approach to sample wastewater-based microplastics. *Water research*, *112*, 93-99.
48. Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: a micro issue?. *Environmental science & technology*, *51*(12), 6634-6647.
49. Cui, R., Kim, S. W., & An, Y. J. (2017). Polystyrene nanoplastics inhibit reproduction and induce abnormal embryonic development in the freshwater crustacean Daphnia galeata. *Scientific reports*, *7*(1), 12095.
50. Gkoutselis, G., Rohrbach, S., Harjes, J., Obst, M., Brachmann, A., Horn, M. A., & Rambold, G. (2021). Microplastics accumulate fungal pathogens in terrestrial ecosystems. *Scientific Reports*, *11*(1), 13214.
51. Wang, J., Huang, M., Wang, Q., Sun, Y., Zhao, Y., & Huang, Y. (2020). LDPE microplastics significantly alter the temporal turnover of soil microbial communities. *Science of the Total Environment*, *726*, 138682.
52. Wang, S., Xue, N., Li, W., Zhang, D., Pan, X., & Luo, Y. (2020). Selectively enrichment of antibiotics and ARGs by microplastics in river, estuary and marine waters. *Science of the Total Environment*, *708*, 134594.
53. González-Pleiter, M., Velázquez, D., Casero, M. C., Tytgat, B., Verleyen, E., Leganés, F., ... & Fernandez-Pinas, F. (2021). Microbial colonizers of microplastics in an Arctic freshwater lake. *Science of the Total Environment*, *795*, 148640.
54. Curpan, A., Strungaru, Ș., Săvucă, A., Ilie, O., Ciobîcă, A., Timofte, D., ... & Nicoară, M. (2020). A current perspective on the relevance of nano and microplastics in the neurodevelopmental disorders: further relevance for metabolic, gastrointestinal, oxidative stress-related and zebrafish studies. *Bull. Integr. Psychiatry*, *86*, 19-23.
55. Lee, Y., Sung, M., Sung, S. E., Choi, J. H., Kang, K. K., Park, J. W., ... & Lee, S. (2025). The histopathological and functional consequences of microplastic exposure. *Discover Applied Sciences*, *7*(1), 72.
56. Fabiano, N., Luu, B., Puder, D., & Marx, W. (2025). Microplastics and mental health: The role of ultra-processed foods. *Brain Medicine*, *1*(3), 31-33.
57. Gecegelen, E., Ucdal, M., & Dogu, B. B. (2025). A novel risk factor for dementia: chronic microplastic exposure. *Frontiers in Neurology*, *16*, 1581109.
58. Al-Shami, A. S., Abd Elkader, H. T. A. E., Moussa, N., Essawy, A. E., & Haroun, M. (2025). Early-life bisphenol A exposure causes neuronal pyroptosis in juvenile and adult male rats through the NF-κB/IL-1β/NLRP3/caspase-1 signaling pathway: Exploration of age and dose as effective covariates using an in vivo and in silico modeling approach. *Molecular and Cellular Biochemistry*, *480*(4), 2301-2330.
59. Bjørklund, G., Mkhitaryan, M., Sahakyan, E., Fereshetyan, K., Meguid, N. A., Hemimi, M., ... & Yenkoyan, K. (2024). Linking environmental chemicals to neuroinflammation and autism spectrum disorder: mechanisms and implications for prevention. *Molecular Neurobiology*, *61*(9), 6328-6340. Zhou
60. Ghosh, A., & Gorain, B. (2025). Mechanistic insight of neurodegeneration due to micro/nano-plastic-induced gut dysbiosis. *Archives of Toxicology*, *99*(1), 83-101.
61. Radbakhsh, S., & Norouzzadeh, R. (2025). Microplastic Neurotoxicity: Pathways, Mechanisms, and Implications for Neurodegenerative Disease. *Personalized Medicine Journal*, *10*(37), 31-38.
62. Dong, L., Li, X., Zhang, Y., Liu, B., Zhang, X., & Yang, L. (2025). Urinary microplastic contaminants in primary school children: Associations with behavioral development. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *295*, 118097.

63. Moiniafshari, K., Zanut, A., Tapparo, A., Pastore, P., Bogialli, S., & Monikh, F. A. (2025). A perspective on the potential impact of microplastics and nanoplastics on the human central nervous system. *Environmental Science: Nano*, *12*(3), 1809-1820.
64. Xia, G., Wan, T., Chen, Z., Liu, C., & Li, R. (2025). Developmental Toxicity of Micro (Nano) Plastics (MNPs) Exposure in Mammals: A Mini-Review. *Toxics*, *13*(3), 224.
65. Jurek, J. M. (2024). The Impact of Microplastic Exposure on Neurological Disorders-Implications for Psychiatric Health. *Clinical Neuroscience & Neurological Research International Journal*, *5*(1), 1-4.
66. Lee, C. W., Hsu, L. F., Wu, I. L., Wang, Y. L., Chen, W. C., Liu, Y. J., ... & Huang, C. C. Y. (2022). Exposure to polystyrene microplastics impairs hippocampus-dependent learning and memory in mice. *J. Hazard. Mater*, *430*(128431), 10-1016.
67. Wang, S., Han, Q., Wei, Z., Wang, Y., Xie, J., & Chen, M. (2022). Polystyrene microplastics affect learning and memory in mice by inducing oxidative stress and decreasing the level of acetylcholine. *Food and Chemical Toxicology*, *162*, 112904.
68. Zaheer, J., Kim, H., Ko, I. O., Jo, E. K., Choi, E. J., Lee, H. J., ... & Kim, J. S. (2022). Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder. *Environment international*, *161*, 107121.
69. Nihart, A. J., Garcia, M. A., El Hayek, E., Liu, R., Olewine, M., Kingston, J. D., ... & Campen, M. J. (2025). Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. *Nature medicine*, *31*(4), 1114-1119.
70. Nasser, S. A. E. H., Ragab, M., Nashaat, N., Hassan, R., & Meguid, N. A. (2022). ENVIRONMENTAL EITIOLOGY OF AUTISM AND SUBSEQUENT INTERVENTIONAL MANAGEMENT. *Journal of Environmental Science*, *51*(10), 1-31.
71. Liu, M., Lu, S., Song, Y., Lei, L., Hu, J., Lv, W., ... & He, D. (2018). Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China. *Environmental pollution*, *242*, 855-862.
72. Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F., & Quinn, B. (2016). Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment. *Environmental science & technology*, *50*(11), 5800-5808.
73. Li, Q., Wu, J., Zhao, X., Gu, X., & Ji, R. (2019). Separation and identification of microplastics from soil and sewage sludge. *Environmental Pollution*, *254*, 113076.
74. Alvim, C. B., Mendoza-Roca, J. A., & Bes-Piá, A. (2020). Wastewater treatment plant as microplastics release source–quantification and identification techniques. *Journal of Environmental Management*, *255*, 109739.
75. Ziajahromi, S., Neale, P. A., Rintoul, L., & Leusch, F. D. (2017). Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: development of a new approach to sample wastewater-based microplastics. *Water research*, *112*, 93-99.
76. Mason, S. A., Garneau, D., Sutton, R., Chu, Y., Ehmann, K., Barnes, J., ... & Rogers, D. L. (2016). Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant effluent. *Environmental pollution*, *218*, 1045-1054.
77. Li, X., Chen, L., Mei, Q., Dong, B., Dai, X., Ding, G., & Zeng, E. Y. (2018). Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China. *Water research*, *142*, 75-85.
78. Ding, J., Jiang, F., Li, J., Wang, Z., Sun, C., Wang, Z., ... & He, C. (2019). Microplastics in the coral reef systems from Xisha Islands of South China Sea. *Environmental Science & Technology*, *53*(14), 8036-8046.
79. Eriksen, M., Mason, S., Wilson, S., Box, C., Zellers, A., Edwards, W., ... & Amato, S. (2013). Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes. *Marine pollution bulletin*, *77*(1-2), 177-182.
80. Ding, L., Zhang, S., Wang, X., Yang, X., Zhang, C., Qi, Y., & Guo, X. (2020). The occurrence and distribution characteristics of microplastics in the agricultural soils of Shaanxi Province, in north-western China. *Science of the Total Environment*, *720*, 137525.
81. Li, W., Wufuer, R., Duo, J., Wang, S., Luo, Y., Zhang, D., & Pan, X. (2020). Microplastics in agricultural soils: Extraction and characterization after different periods of polythene film mulching in an arid region. *Science of the Total Environment*, *749*, 141420.
82. Bandini, F., Hchaichi, I., Zitouni, N., Missawi, O., Cocconcelli, P. S., Puglisi, E., & Banni, M. (2021). Bacterial community profiling of floating plastics from South Mediterranean sites: First evidence of effects on mussels as possible vehicles of transmission. *Journal of Hazardous Materials*, *411*, 125079.

83. Boughattas, I., Hattab, S., Zitouni, N., Mkhinini, M., Missawi, O., Bousserrhine, N., & Banni, M. (2021). Assessing the presence of microplastic particles in Tunisian agriculture soils and their potential toxicity effects using Eisenia andrei as bioindicator. *Science of the Total Environment*, *796*, 148959.
84. Abidli, S., Toumi, H., Lahbib, Y., & Trigui El Menif, N. (2017). The first evaluation of microplastics in sediments from the complex lagoon-channel of Bizerte (Northern Tunisia). *Water, Air, & Soil Pollution*, *228*(7), 262.
85. Abidli, S., Lahbib, Y., & El Menif, N. T. (2019). Microplastics in commercial molluscs from the lagoon of Bizerte (Northern Tunisia). *Marine pollution bulletin*, *142*, 243-252.
86. Chouchene, K., da Costa, J. P., Wali, A., Girão, A. V., Hentati, O., Duarte, A. C., ... & Ksibi, M. (2019). Microplastic pollution in the sediments of Sidi Mansour Harbor in Southeast Tunisia. *Marine Pollution Bulletin*, *146*, 92-99.
87. Zitouni, N., Bousserrhine, N., Belbekhouche, S., Missawi, O., Alphonse, V., Boughatass, I., & Banni, M. (2020). First report on the presence of small microplastics (≤ 3 µm) in tissue of the commercial fish Serranus scriba (Linnaeus. 1758) from Tunisian coasts and associated cellular alterations. *Environmental Pollution*, *263*, 114576.
88. Abidli, S., Akkari, N., Lahbib, Y., & El Menif, N. T. (2021). First evaluation of microplastics in two commercial fish species from the lagoons of Bizerte and Ghar El Melh (Northern Tunisia). *Regional Studies in Marine Science*, *41*, 101581.
89. Missawi, O., Bousserrhine, N., Belbekhouche, S., Zitouni, N., Alphonse, V., Boughattas, I., & Banni, M. (2020). Abundance and distribution of small microplastics (≤ 3 µm) in sediments and seaworms from the Southern Mediterranean coasts and characterisation of their potential harmful effects. *Environmental Pollution*, *263*, 114634.
90. Wakkaf, T., El Zrelli, R., Kedzierski, M., Balti, R., Shaiek, M., Mansour, L., ... & Rabaoui, L. (2020). Microplastics in edible mussels from a southern Mediterranean lagoon: Preliminary results on seawater-mussel transfer and implications for environmental protection and seafood safety. *Marine Pollution Bulletin*, *158*, 111355.
91. Wakkaf, T., El Zrelli, R., Kedzierski, M., Balti, R., Shaiek, M., Mansour, L., ... & Rabaoui, L. (2020). Characterization of microplastics in the surface waters of an urban lagoon (Bizerte lagoon, Southern Mediterranean Sea): Composition, density, distribution, and influence of environmental factors. *Marine Pollution Bulletin*, *160*, 111625.
92. Missawi, O., Bousserrhine, N., Zitouni, N., Maisano, M., Boughattas, I., De Marco, G., ... & Banni, M. (2021). Uptake, accumulation and associated cellular alterations of environmental samples of microplastics in the seaworm Hediste diversicolor. *Journal of Hazardous Materials*, *406*, 124287.
93. Chouchene, K., Nacci, T., Modugno, F., Castelvetro, V., & Ksibi, M. (2022). Soil contamination by microplastics in relation to local agricultural development as revealed by FTIR, ICP-MS and pyrolysis-GC/MS. *Environmental Pollution*, *303*, 119016.
94. Zitouni, N., Cappello, T., Missawi, O., Boughattas, I., De Marco, G., Belbekhouche, S., ... & Banni, M. (2022). Metabolomic disorders unveil hepatotoxicity of environmental microplastics in wild fish Serranus scriba (Linnaeus 1758). *Science of the Total Environment*, *838*, 155872.
95. Jaouani, R., Mouneyrac, C., Châtel, A., Amiard, F., Dellali, M., Beyrem, H., ... & Lagarde, F. (2022). Seasonal and spatial distribution of microplastics in sediments by FTIR imaging throughout a continuum lake-lagoon-beach from the Tunisian coast. *Science of the Total Environment*, *838*, 156519.
96. Wakkaf, T., El Zrelli, R., Yacoubi, L., Kedzierski, M., Lin, Y. J., Mansour, L., ... & Rabaoui, L. (2022). Seasonal patterns of microplastics in surface sediments of a Mediterranean lagoon heavily impacted by human activities (Bizerte lagoon, Northern Tunisia). *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(51), 76919-76936.
97. Abelouah, M. R., Romdhani, I., Ben-Haddad, M., Hajji, S., De-la-Torre, G. E., Gaaied, S., ... & Ait Alla, A. (2023). Binational survey using Mytilus galloprovincialis as a bioindicator of microplastic pollution: Insights into chemical analysis and potential risk on humans. *Science of the Total Environment*, *870*, 161894.
98. Essoufi, C., Santini, S., Sforzi, L., Martellini, T., Chelazzi, D., Ayari, R., ... & Hamdi, N. (2024). First evidence of microplastics and their characterization in yellow-legged gull (Larus michahellis michahellis, Naumann, 1840) pellets collected from the Sfax salina, southeastern Tunisia. *Marine Pollution Bulletin*, *205*, 116628.

99. Allouche, M., Ishak, S., Ali, M. B., Hedfi, A., Almalki, M., Karachle, P. K., ... & Boufahja, F. (2022). Molecular interactions of polyvinyl chloride microplastics and beta-blockers (Diltiazem and Bisoprolol) and their effects on marine meiofauna: Combined in vivo and modeling study. *Journal of hazardous materials*, *431*, 128609.
100. Abelouah, M. R., Ben-Haddad, M., Hajji, S., De-la-Torre, G. E., Aziz, T., Abou Oualid, J., ... & Ait Alla, A. (2022). Floating microplastics pollution in the Central Atlantic Ocean of Morocco: Insights into the occurrence, characterization, and fate. *Marine Pollution Bulletin*, *182*, 113969.
101. Abdelkader, N., Ismail, S. B., & Zakhama-Sraieb, R. (2023). Macro-, meso-and microplastic debris in three sandy beaches of north-eastern Tunisian coasts. *Regional Studies in Marine Science*, *67*, 103229.
102. Hassine, I. B., Abidli, S., Lahbib, Y., & El Menif, N. T. (2025). First characterization and spatial distribution of microplastics in Sardina pilchardus fish gathered along the northern Tunisian coast. *Ecohydrology & Hydrobiology*, *25*(2), 414-421.
103. Chebbi, L., Boughattas, I., Helaoui, S., Mkhinini, M., Jabnouni, H., Fadhl, E. B., ... & Bousserrhine, N. (2024). Environmental microplastic interact with heavy metal in polluted soil from mine site in the North of Tunisia: Effects on heavy metal accumulation, growth, photosynthetic activities, and biochemical responses of alfalfa plants (Medicago saliva L.). *Chemosphere*, *362*, 142521.
104. Khan, F. R., Shashoua, Y., Crawford, A., Drury, A., Sheppard, K., Stewart, K., & Sculthorp, T. (2020). 'The plastic nile': First evidence of microplastic contamination in fish from the nile river (Cairo, Egypt). *Toxics*, *8*(2), 22.
105. Sayed, A. E. D. H., Hamed, M., Badrey, A. E., Ismail, R. F., Osman, Y. A., Osman, A. G., & Soliman, H. A. (2021). Microplastic distribution, abundance, and composition in the sediments, water, and fishes of the Red and Mediterranean seas, Egypt. *Marine pollution bulletin*, *173*, 112966.
106. Ghani, S. A. A., El-Sayed, A. A., Ibrahim, M. I., Ghobashy, M. M., Shreadah, M. A., & Shabaka, S. (2022). Characterization and distribution of plastic particles along Alexandria beaches, Mediterranean Coast of Egypt, using microscopy and thermal analysis techniques. *Science of the Total Environment*, *834*, 155363.
107. Shabaka, S., Moawad, M. N., Ibrahim, M. I., El-Sayed, A. A., Ghobashy, M. M., Hamouda, A. Z., ... & Youssef, N. A. E. (2022). Prevalence and risk assessment of microplastics in the Nile Delta estuaries:"The Plastic Nile" revisited. *Science of The Total Environment*, *852*, 158446.
108. El-Sayed, A. A., Ibrahim, M. I., Shabaka, S., Ghobashy, M. M., Shreadah, M. A., & Ghani, S. A. A. (2022). Microplastics contamination in commercial fish from Alexandria City, the Mediterranean Coast of Egypt. *Environmental Pollution*, *313*, 120044.
109. Shabaka, S. H., Marey, R. S., Ghobashy, M., Abushady, A. M., Ismail, G. A., & Khairy, H. M. (2020). Thermal analysis and enhanced visual technique for assessment of microplastics in fish from an Urban Harbor, Mediterranean Coast of Egypt. *Marine Pollution Bulletin*, *159*, 111465.
110. Hamdy, N., Osman, A. M., Awad, H., & Shaaban, N. A. (2024). Monitoring of Microplastics in the Marine Environment and Their Ecological Risks; the Coastline of Alexandria, Egypt as a Case study. *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, *28*(4).
111. Abd-Elkader, A., El Sayed, A. E., Mahdy, A., & Shabaka, S. (2023). Microplastics in marine invertebrates from the Red Sea Coast of Egypt: Abundance, composition, and risks. *Marine Pollution Bulletin*, *197*, 115760.
112. Ghani, S. A. A., Shobier, A. H., El-Sayed, A. A., Shreadah, M. A., & Shabaka, S. (2023). Quantifying microplastics pollution in the Red Sea and Gulfs of Suez and Aqaba: insights from chemical analysis and pollution load assessment. *Science of the Total Environment*, *901*, 166031.
113. Hamed, M., Martyniuk, C. J., Lee, J. S., Shi, H., & Sayed, A. E. D. H. (2023). Distribution, abundance, and composition of microplastics in market fishes from the Red and Mediterranean seas in Egypt. *Journal of Sea Research*, *194*, 102407.
114. Hassan, Y. A., Badrey, A. E., Osman, A. G., & Mahdy, A. (2023). Occurrence and distribution of meso- and macroplastics in the water, sediment, and fauna of the Nile River, Egypt. *Environmental monitoring and assessment*, *195*(9), 1130.
115. Said, R. M., Nassar, S. E., & Mohamed, A. A. (2022). Assessment of microplastic and trace element pollution in the southeastern Mediterranean coasts, Egypt, using shellfish Arca noae as a bioindicator. *Marine Pollution Bulletin*, *177*, 113493.
116. Brümmer, F., Schnepf, U., Resch, J., Jemmali, R., Abdi, R., Kamel, H. M., ... & Müller, R. W. (2022). In situ laboratory for plastic degradation in the Red Sea. *Scientific reports*, *12*(1), 11956.

117. Khdre, A. M., Ramadan, S. A., Ashry, A., & Alaraby, M. (2023). Chironomus sp. as a bioindicator for assessing microplastic contamination and the heavy metals associated with it in the sediment of wastewater in Sohag Governorate, Egypt. *Water, Air, & Soil Pollution*, *234*(3), 161.
118. Khedre, A. M., Ramadan, S. A., Ashry, A., & Alaraby, M. (2024). Can water mites' parasitism influence the number of microplastics ingested by aquatic insects?. *Applied Water Science*, *14*(6), 134.
119. Sawan, R., Doyen, P., Viudes, F., Amara, R., & Mahfouz, C. (2024). Microplastic inputs to the Mediterranean Sea during wet and dry seasons: The case of two Lebanese coastal outlets. *Marine Pollution Bulletin*, *198*, 115781.
120. Nakat, Z., Dgheim, N., Ballout, J., & Bou-Mitri, C. (2023). Occurrence and exposure to microplastics in salt for human consumption, present on the Lebanese market. *Food Control*, *145*, 109414.
121. Celine, M., Sharif, J., Maria, K., El Rahman, H. A., Myriam, L., Myriam, G., ... & Milad, F. (2023). First assessment of microplastics in offshore sediments along the Lebanese coast, South-Eastern Mediterranean. *Marine Pollution Bulletin*, *186*, 114422.
122. Kazour, M., Jemaa, S., Issa, C., Khalaf, G., & Amara, R. (2019). Microplastics pollution along the Lebanese coast (Eastern Mediterranean Basin): Occurrence in surface water, sediments and biota samples. *Science of the Total Environment*, *696*, 133933.
123. Tata, T., Belabed, B. E., Bououdina, M., & Bellucci, S. (2020). Occurrence and characterization of surface sediment microplastics and litter from North African coasts of Mediterranean Sea: Preliminary research and first evidence. *Science of the total environment*, *713*, 136664.
124. Bentaallah, M. E. A., Baghdadi, D., Gündoğdu, S., Megharbi, A., Taibi, N. E., & Büyükdeveci, F. (2024). Assessment of microplastic abundance and impact on recreational beaches along the western Algerian coastline. *Marine Pollution Bulletin*, *199*, 116007.
125. Grini, H., Metallaoui, S., González-Fernández, D., & Bensouilah, M. (2022). First evidence of plastic pollution in beach sediments of the Skikda coast (northeast of Algeria). *Marine Pollution Bulletin*, *181*, 113831.
126. Taïbi, N. E., Bentaallah, M. E. A., Alomar, C., Compa, M., & Deudero, S. (2021). Micro-and macro-plastics in beach sediment of the Algerian western coast: First data on distribution, characterization, and source. *Marine Pollution Bulletin*, *165*, 112168.
127. Abayomi, O. A., Range, P., Al-Ghouti, M. A., Obbard, J. P., Almeer, S. H., & Ben-Hamadou, R. (2017). Microplastics in coastal environments of the Arabian Gulf. *Marine pollution bulletin*, *124*(1), 181-188.
128. Castillo, A. B., Al-Maslamani, I., & Obbard, J. P. (2016). Prevalence of microplastics in the marine waters of Qatar. *Marine pollution bulletin*, *111*(1-2), 260-267.
129. Veerasingam, S., Vethamony, P., Aboobacker, V. M., Giraldes, A. E., Dib, S., & Al-Khayat, J. A. (2021). Factors influencing the vertical distribution of microplastics in the beach sediments around the Ras Rakan Island, Qatar. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(26), 34259-34268.
130. Ruiz-Compean, P., Ellis, J., Cúrdia, J., Payumo, R., Langner, U., Jones, B., & Carvalho, S. (2017). Baseline evaluation of sediment contamination in the shallow coastal areas of Saudi Arabian Red Sea. *Marine pollution bulletin*, *123*(1-2), 205-218.
131. Baalkhuyur, F. M., Dohaish, E. J. A. B., Elhalwagy, M. E., Alikunhi, N. M., AlSuwailem, A. M., Røstad, A., ... & Duarte, C. M. (2018). Microplastic in the gastrointestinal tract of fishes along the Saudi Arabian Red Sea coast. *Marine pollution bulletin*, *131*, 407-415.
132. Baalkhuyur, F. M., Qurban, M. A., Panickan, P., & Duarte, C. M. (2020). Microplastics in fishes of commercial and ecological importance from the Western Arabian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, *152*, 110920.
133. Dhavamani, J., Beck, A. J., Gledhill, M., El-Shahawi, M. S., Orif, M. I., Ismail, I. M., & Achterberg, E. P. (2022). Phthalate esters and plastic debris abundance in the Red Sea and Sharm Obhur and their ecological risk level. *Environmental Pollution*, *315*, 120447.
134. Khattab, Y., Mohammadein, A., Al Malki, J. S., Hussien, N. A., & Tantawy, E. M. (2022). Preliminary screening of microplastic contamination in different marine fish species of Taif market, Saudi Arabia. *Open Life Sciences*, *17*(1), 333-343.
135. Alanazi, M. Q., Virk, P., Alterary, S. S., Awad, M., Ahmad, Z., Albadri, A. M., ... & Al-Qahtani, E. A. (2023). Effect of potential microplastics in sewage effluent on Nile Tilapia and photocatalytic remediation with zinc oxide nanoparticles. *Environmental Pollution*, *332*, 121946.
136. Picó, Y., Alvarez-Ruiz, R., Alfarhan, A. H., El-Sheikh, M. A., Alshahrani, H. O., & Barceló, D. (2020). Pharmaceuticals, pesticides, personal care products and microplastics contamination assessment of Al-

Hassa irrigation network (Saudi Arabia) and its shallow lakes. *Science of the Total Environment*, *701*, 135021.

137. Martynova, A., Genchi, L., Laptenok, S. P., Cusack, M., Stenchikov, G. L., Liberale, C., & Duarte, C. M. (2024). Atmospheric microfibrous deposition over the Eastern Red Sea coast. *Science of The Total Environment*, *907*, 167902.
138. Arossa, S., Martin, C., Rossbach, S., & Duarte, C. M. (2019). Microplastic removal by Red Sea giant clam (Tridacna maxima). *Environmental pollution*, *252*, 1257-1266.
139. Picó, Y., Soursou, V., Alfarhan, A. H., El-Sheikh, M. A., & Barceló, D. (2021). First evidence of microplastics occurrence in mixed surface and treated wastewater from two major Saudi Arabian cities and assessment of their ecological risk. *Journal of Hazardous Materials*, *416*, 125747.
140. Almaiman, L., Aljomah, A., Bineid, M., Aljeldah, F. M., Aldawsari, F., Liebmann, B., ... & Alarfaj, R. (2021). The occurrence and dietary intake related to the presence of microplastics in drinking water in Saudi Arabia. *Environmental Monitoring and Assessment*, *193*(7), 390.
141. Velez, N., Zardi, G. I., Savio, R. L., McQuaid, C. D., Valbusa, U., Sabour, B., & Nicastro, K. R. (2019). A baseline assessment of beach macrolitter and microplastics along northeastern Atlantic shores. *Marine Pollution Bulletin*, *149*, 110649.
142. Mghili, B., Analla, M., & Aksissou, M. (2022). Face masks related to COVID-19 in the beaches of the Moroccan Mediterranean: an emerging source of plastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*, *174*, 113181.
143. Abelouah, M. R., Ben-Haddad, M., Rangel-Buitrago, N., Hajji, S., El Alem, N., & Ait Alla, A. (2022). Microplastics pollution along the central Atlantic coastline of Morocco. *Marine pollution bulletin*, *174*, 113190.
144. Ben-Haddad, M., Abelouah, M. R., Hajji, S., De-la-Torre, G. E., Abou Oualid, H., Rangel-Buitrago, N., & Ait Alla, A. (2022). The wedge clam Donax trunculus L., 1758 as a bioindicator of microplastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*, *178*, 113607.
145. Maaghloud, H., Houssa, R., Bellali, F., El Bouqdaoui, K., Ouansafi, S., Loulad, S., & Fahde, A. (2021). Microplastic ingestion by Atlantic horse mackerel (Trachurus trachurus) in the North and central Moroccan Atlantic coast between Larache (35° 30′ N) and Boujdour (26° 30′ N). *Environmental Pollution*, *288*, 117781.
146. Mghili, B., Ben-Haddad, M., Zerrad, O., Rangel-Buitrago, N., & Aksissou, M. (2024). Tackling marine plastic pollution in Morocco: a review of current research, regulatory measures, and future challenges. *Regional Studies in Marine Science*, *69*, 103286.
147. Maaghloud, H., Houssa, R., Ouansafi, S., Bellali, F., El Bouqdaoui, K., Charouki, N., & Fahde, A. (2020). Ingestion of microplastics by pelagic fish from the Moroccan Central Atlantic coast. *Environmental Pollution*, *261*, 114194.
148. Ben-Haddad, M., Abelouah, M. R., Hajji, S., Rangel-Buitrago, N., Hamadi, F., & Ait Alla, A. (2022). Microplastics pollution in sediments of Moroccan urban beaches: the Taghazout coast as a case study. *Marine Pollution Bulletin*, *180*, 113765.
149. Azaaouaj, S., Nachite, D., Anfuso, G., & Er-Ramy, N. (2024). Abundance and distribution of microplastics on sandy beaches of the eastern Moroccan Mediterranean coast. *Marine Pollution Bulletin*, *200*, 116144.
150. Krikech, I., Conti, G. O., Pulvirenti, E., Rapisarda, P., Castrogiovanni, M., Maisano, M., ... & Ezziyyani, M. (2023). Microplastics (≤ 10 μm) bioaccumulation in marine sponges along the Moroccan Mediterranean coast: Insights into species-specific distribution and potential bioindication. *Environmental Research*, *235*, 116608.
151. Hajji, S., Ben-Haddad, M., Abelouah, M. R., De-la-Torre, G. E., & Ait Alla, A. (2023). Sludge drying and dewatering processes influence the abundance and characteristics of microplastics in wastewater treatment plants. *Chemosphere*, *339*, 139743.
152. El Hayany, B., El Fels, L., Quénéa, K., Dignac, M. F., Rumpel, C., Gupta, V. K., & Hafidi, M. (2020). Microplastics from lagooning sludge to composts as revealed by fluorescent staining-image analysis, Raman spectroscopy and pyrolysis-GC/MS. *Journal of Environmental Management*, *275*, 111249.
153. Achoukhi, I., El Hammoudani, Y., Dimane, F., Haboubi, K., Bourjila, A., Haboubi, C., ... & Faiz, H. (2023). Investigating microplastics in the mediterranean coastal areas–case study of Al-Hoceima Bay, Morocco. *Journal of Ecological Engineering*, *24*(5).

154. Jiries, A., Al-Omari, A., Fraihat, S., & Al Hamra, M. (2024). Abundance and distribution of microplastics in irrigation canal water in Jordan. *Desalination and Water Treatment*, *318*, 100409.
155. Al Omari, A., Fraihat, S., Jiries, A., & Al Hamra, M. (2024). Micro plastics removal by Zai water treatment plant, Amman Jordan. *Journal of Water Process Engineering*, *64*, 105602.
156. Aslam, H., Ali, T., Mortula, M. M., & Attaelmanan, A. G. (2020). Evaluation of microplastics in beach sediments along the coast of Dubai, UAE. *Marine Pollution Bulletin*, *150*, 110739.
157. Attaelmanan, A. G., Aslam, H., Ali, T., & Dronjak, L. (2023). Mapping of heavy metal contamination associated with microplastics marine debris-A case study: Dubai, UAE. *Science of The Total Environment*, *891*, 164370.
158. Habib, R. Z., Abdoon, M. M. S., Al Meqbaali, R. M., Ghebremedhin, F., Elkashlan, M., Kittaneh, W. F., ... & Al Kindi, R. (2020). Analysis of microbeads in cosmetic products in the United Arab Emirates. *Environmental Pollution*, *258*, 113831.
159. Al Hammadi, M., Knuteson, S., Kanan, S., & Samara, F. (2022). Microplastic pollution in oyster bed ecosystems: An assessment of the northern shores of the United Arab Emirates. *Environmental Advances*, *8*, 100214.
160. Habib, R. Z., Al Kendi, R., Ghebremedhin, F., Elkashlan, M., Iftikhar, S. H., Poulose, V., ... & Thiemann, T. (2022). Tire and rubber particles in the environment—A case study from a hot arid region. *Frontiers in Environmental Science*, *10*, 1009802.
161. Habib, R. Z., Kindi, R. A., Salem, F. A., Kittaneh, W. F., Poulose, V., Iftikhar, S. H., ... & Thiemann, T. (2022). Microplastic contamination of chicken meat and fish through plastic cutting boards. *International journal of environmental research and public health*, *19*(20), 13442.
162. Habib, R. Z., Aldhanhani, J. A., Ali, A. H., Ghebremedhin, F., Elkashlan, M., Mesfun, M., ... & Thiemann, T. (2022). Trends of microplastic abundance in personal care products in the United Arab Emirates over the period of 3 years (2018–2020). *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(59), 89614-89624.
163. Saeed, T., Al-Jandal, N., Al-Mutairi, A., & Taqi, H. (2020). Microplastics in Kuwait marine environment: Results of first survey. *Marine pollution bulletin*, *152*, 110880.
164. Al-Salem, S. M., Uddin, S., & Lyons, B. (2020). Evidence of microplastics (MP) in gut content of major consumed marine fish species in the State of Kuwait (of the Arabian/Persian Gulf). *Marine pollution bulletin*, *154*, 111052.
165. Uddin, S., Fowler, S. W., & Saeed, T. (2020). Microplastic particles in the Persian/Arabian Gulf–a review on sampling and identification. *Marine pollution bulletin*, *154*, 111100.
166. Al-Salem, S. M., Alosairi, Y., & Constantinou, A. (2022). Effect of COVID-19 lockdown measures on the plastic waste generation trends and distribution of microplastics in the Northwestern Arabian/Persian Gulf. *Ocean & Coastal Management*, *216*, 105979.
167. Uddin, S., Fowler, S. W., Habibi, N., Sajid, S., Dupont, S., & Behbehani, M. (2022). A preliminary assessment of size-fractionated microplastics in indoor aerosol—Kuwait's baseline. *Toxics*, *10*(2), 71.
168. Uddin, S., Habibi, N., Fowler, S. W., Behbehani, M., Gevao, B., Faizuddin, M., & Gorgun, A. U. (2023). Aerosols as vectors for contaminants: a perspective based on outdoor aerosol data from Kuwait. *Atmosphere*, *14*(3), 470.
169. Allafi, A. R. (2020). The effect of temperature and storage time on the migration of antimony from polyethylene terephthalate (PET) into commercial bottled water in Kuwait. *Acta Bio Medica: Atenei Parmensis*, *91*(4), e2020105.
170. Al-Tarshi, M., Dobretsov, S., & Gallardo, W. (2024). Marine litter and microplastic pollution in mangrove sediments in the Sea of Oman. *Marine Pollution Bulletin*, *201*, 116132.
171. Al-Amri, A., Yavari, Z., Nikoo, M. R., & Karimi, M. (2024). Microplastics removal efficiency and risk analysis of wastewater treatment plants in Oman. *Chemosphere*, *359*, 142206.
172. Abed, S. A., Alasady, R. K. A., & Jazie, A. A. (2021). Microplastics effect on the physicochemical parameters and interaction with spirulina platensis microalgae in Al-Dalmaj Marsh, Iraq. *Materials Today: Proceedings*, *42*, 2251-2258.
173. Almola, M. A., Al-Ahmady, K. K., & Mhemid, R. K. S. (2024). An investigation of microplastic occurrence and heavy metals concentrations in street dust on the left side of Mosul City, Iraq. *Journal of Ecological Engineering*, *25*(9).
174. Al-Khalidy, H. I., & Al-Haidarey, M. J. S. (2024). Determination of polystyrene concentrations in Kufa River/Iraq. In *BIO Web of Conferences* (Vol. 108, p. 04008). EDP Sciences.

175. Kadhum, S. A., Abed, S. A., Ewaid, S. H., Al-Ansari, N., & Naji, A. (2020, November). Microplastic contamination of surface sediment of Euphrates River, Iraq: a preliminary study. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1664, No. 1, p. 012139). IOP Publishing.
176. H Sultan, H., Abdul Wahab Shaker Al-Aadhami, M., & Nihad Baqer, N. (2023). Detection of microplastics in drinking water treatment plants in Baghdad City/Iraq. *Pollution*, *9*(4), 1838-1849.
177. Al-Azzawi, A. S., Al-Kindi, G. Y., & Al Rifaie, J. K. (2024, August). Occurrence of micro-plastics in tigris river water in middle of Iraq. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1374, No. 1, p. 012060). IOP Publishing.
178. Pu, S., Bushnaq, H., Munro, C., Gibert, Y., Sharma, R., Mishra, V., & Dumée, L. F. (2024). Perspectives on transport pathways of microplastics across the Middle East and North Africa (MENA) region. *npj Clean Water*, *7*(1), 114.
179. Malli, A., Shehayeb, A., & Yehya, A. (2023). Occurrence and risks of microplastics in the ecosystems of the Middle East and North Africa (MENA). *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(24), 64800-64826.
180. Abayomi, O. A., Range, P., Al-Ghouti, M. A., Obbard, J. P., Almeer, S. H., & Ben-Hamadou, R. (2017). Microplastics in coastal environments of the Arabian Gulf. *Marine pollution bulletin*, *124*(1), 181-188.
181. Al-Sid-Cheikh, M., Rowland, S. J., Kaegi, R., Henry, T. B., Cormier, M. A., & Thompson, R. C. (2020). Synthesis of 14C-labelled polystyrene nanoplastics for environmental studies. *Communications materials*, *1*(1), 97.