# رصد وتقييم التلوث البيئي بمركبات البير و البولي فلوروألكيل في المنطقة العربية : التحديات و القيود و الفرص المستقبلية

# MONITORING AND ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL POLLUTION BY PER- AND POLYFLUOROALKYL SUBSTANCES (PFAS) IN THE ARAB REGION : CHALLENGES, LIMITATIONS, AND FUTURE OPPORTUNITIES

## تقرير رقم (١) – سبتمبر 2025م


صادر عن

الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة

أحد شبكات المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا

Emerging Pollutant Network (EPN-ASTF)


Emerging Pollutants Network


الشارقة – الإمارات العربية المتحدة

Sharjah – United Arab Emirates

# رصد وتقييم التلوث البيئي بمركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS)في المنطقة العربية: التحديات والقيود والفرص المستقبلية

MONITORING AND ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL POLLUTION BY PER- AND POLY-FLUOROALKYL SUBSTANCES (PFAS) IN THE ARAB REGION: CHALLENGES, LIMITATIONS, AND FUTURE OPPORTUNITIES

**تقرير رقم 1**

**صادر عن الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة**

**أحد شبكات المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا**

**Emerging Pollutant Network (EPN-ASTF)**

**الشارقة، الامارات العربية المتحدة**

**Sharjah, United Arab Emirates**

**سبتمبر 2025م**

**الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة،**

سلسلة التقارير الفنية، **العدد 1**، سبتمبر 2025

حقوق الطبع والنشر EPN.ASTF © ، 2025

هذا الكتاب محمي بموجب مرسوم القانون الاتحادي رقم (38) لسنة 2021 بشأن حقوق المؤلفين والحقوق المجاورة. لا يجوز إعادة إنتاج أي جزء من هذا التقرير أو تخزينه أو نقله بأي شكل من الأشكال أو بأي وسيلة، سواء كانت إلكترونية أو غير ذلك، دون الحصول على إذن كتابي محدد من مالك حقوق الطبع والنشر.

**الرقم المعياري الدولي للكتاب E-Book (*ISBN*) 9789948686811**

**تم تصنيف وتحديد الفئة العمرية التي تلائم محتوى الكتب وفقا لنظام التصنيف العمري (E) الصادر عن المجلس الإمارات للإعلام " وذلك للحصول على موافقة التداول**

**الاستفسارات والنسخ الإضافية:**

الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة-المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا.

المدينة الجامعية بالشارقة

الشارقة، الإمارات العربية المتحدة

**هاتف** + 971 50 4622626

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

**يجب الاستشهاد بهذا التقرير كما يلي:**

EPN (2025) رصد وتقييم التلوث البيئي بمركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في المنطقة العربية: التحديات والقيود والفرص المستقبلية ، تقرير رقم 1 (آب 2025) . الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة-المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا، الشارقة - الإمارات العربية المتحدة.*ISBN*

**Cited as**

**EPN** (2025). Monitoring and assessment of environmental pollution by per- and poly-fluoroalkyl substances (pfas) in the Arab region: challenges, limitations, and future opportunities (report no. 1, August 2025). Emerging Pollutant Network (EPN) – Arab Science and Technology Foundation (ASTF), Sharjah, United Arab Emirates. ISBN:

**إخلاء المسؤولية:**

تم إعداد هذا التقرير لغرض نشر المعلومات المتعلقة بالملوِّثات البيئية من مركَّبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة العربيَّة. لا 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. ولا 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، 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 مركبات البير- والبولي فلوروألكيل (PFAS) .

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

**التمويل والرعاية**

- المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا-الامارات
- مؤسسة الفنار للاعلام -لندن المملكة المتحدة

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

"

# "فَأَمَّا الزَّبَدُ فَيَذْهَبُ جُفَاءً وَأَمَّا مَا يَنْفَعُ النَّاسَ فَيَمْكُثُ فِي الْأَرْضِ"

**صدق الله العظيم-الآية 17 من سورة الرعد**

## المؤلفون الرئيسيون :


**د. عادل الغيثي** المركز الأسترالي لتقييم ومعالجة التلوث البيئي-استراليا
الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية - الشارقة الامارات العربية المتحدة.

**د. قيس المقطري** جامعة بوترا الماليزية-ماليزيا
الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية - الشارقة الامارات العربية المتحدة.

**د. إيفاق علي نعمان** جامعة سيدني-أستراليا -جامعة تعز اليمن
الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية - الشارقة الامارات العربية المتحدة.


## المؤلفون المشاركون :


**أ.د. رنا ابراهيم الدليمي** كلية التربية، جامعة سامراء، العراق
الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية - الشارقة الامارات العربية المتحدة.

**أ.د. سرحان راشد سرحان** جامعة واسط، كلية طب الأسنان – العراق

**أ.د. سمر أحمد أحمد عامر** كلية الطب، جامعة الزقازيق-مصر

**أ.د. علي عبد الحمزة الفنهراوي** كلية العلوم، جامعة المثنى – العراق

**أ.د. فاطمة علي أحمد** مركز بحوث الصحراء، وزارة الزراعة واستصلاح الأراضي – مصر

**أ.د. فريد عبد الرحيم بدرية** قسم العقاقير، كلية الصيدلة، جامعة المنصورة – مصر

**أ.د. محمد عثمان عبد المنعم** كلية العلوم، جامعة بنها، مصر.
الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية - الشارقة الامارات العربية المتحدة.

**أ.د. وائل أحمد إسماعيل المسلماني** مركز الدراسات البيئية والحيوية، جامعة الخليج العربي – البحرين

**أ.د. يوسف عبدالعزيز الحسانين** كلية الاقتصاد المنزلي جامعة المنوفية، مصر
الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية - الشارقة الامارات العربية المتحدة.

**د. حذيفة الأشقر** الجامعة العربية الأمريكية، جنين، فلسطين

**د. زكريا نافع محمود شهاب** جامعة الموصل، وزارة التعليم العالي والبحث العلمي – العراق

**د. صادق الخضر** جامعة تيناجا ناسيونال – (UNITEN) ماليزيا

**د. محمد السحاري** الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية - الشارقة الامارات العربية المتحدة

**د. عاصم عبدالقوي السفياني** كلية الهندسة الكيميائية – Xiamen University – الصين

**د. فؤاد قاسم محمد** جامعة الموصل – العراق

**د. فواز محمد البداي** جامعة ذمار – اليمن

**د. محمد علي حسان** المعهد القومي لعلوم البحار والمصايد، الإسكندرية – مصر

**د. محمود عبد الكريم عبدالحفيظ** قسم الجيولوجيا، كلية العلوم، جامعة الأزهر بأسيوط – مصر

**د. مخلد عامر حسين السامرائي** مركز البحوث البيئية، الجامعة التكنولوجية – العراق

**د. مروة العزازي** قسم الكيمياء وعلوم الأرض، كلية الآداب والعلوم، جامعة قطر

**د. معتز العلاوي** جامعة مؤتة – الأردن

**أ. يونس الرباصي** جامعة تعز – اليمن

**زكريا محمود صلاح** الهيئة العليا للعلوم والتكنولوجيا والابتكار-اليمن


## مراجعة لغوية وتدقيق :


**د. مرية الشوياخ** جامعة محمد الخامس، كلية الآداب والعلوم الإنسانية- المغرب

## المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا (ASTF)

تأسست المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا (Arab Science and Technology Foundation - ASTF) في عام 2000 كمؤسسة إقليمية مستقلة وغير ربحية، ويقع مقرها في إمارة الشارقة، دولة 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 العلمية والتكنولوجية العربية من خلال تمكين المجتمعات العلمية وربط البحث العلمي بالتنمية الاقتصادية والاجتماعية المستدامة.

**الرسالة:**

تعزيز قدرات العلماء والباحثين والمبتكرين العرب داخل وخارج الوطن العربي، وتحفيز الابتكار وريادة الأعمال في العلوم والتكنولوجيا من أجل مواجهة التحديات التنموية وتحقيق التقدم العلمي والاقتصادي للمنطقة.

**مجالات الأنشطة:**

- دعم وتمويل الأبحاث العلمية التطبيقية ذات الأولوية التنموية.
- بناء شراكات بين الجامعات ومراكز البحث والمؤسسات الصناعية.
- رعاية الابتكار وريادة الأعمال التقنية.
- تدريب الكفاءات الشابة على مهارات الابتكار والتفكير 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 والشتات.
- حاضنات الابتكار الجامعي :دعم إنشاء حاضنات داخل الجامعات العربية لتعزيز ثقافة ريادة الأعمال.

الموقع الإلكتروني الرسمي:

https://www.astf.net

## الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة (EPN)

الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة (EPN) هي مبادرة أطلقتها المنظمة العربية للعلوم والتكنولوجيا (ASTF)، وتهدف إلى دعم وتعزيز الوعي البيئي لدى الأطفال واليافعين في الوطن العربي، من خلال تأسيس ودعم نوادٍ بيئية مدرسية ومجتمعية تعمل على نشر المعرفة البيئية، وتحفيز السلوكيات المستدامة. تركز الشبكة على تمكين الأجيال الصاعدة من فهم التحديات البيئية المحيطة بهم، والمشاركة الفعالة في إيجاد حلول لها، وذلك عبر أنشطة علمية، تطبيقية، وإبداعية، تتناول موضوعات مثل :إدارة النفايات، المياه، الطاقة، التغير المناخي، التنوع البيولوجي وغيرها.

**الرؤية**

تسعى الشبكة أن تكون بيت خبرة يضم تقنيين وخبراء ذوي مهارات عالية في وضع الحلول المستدامة للتصدي للملوثات البيئية الناشئة.

**الرسالة**

تلتزم الشبكة بدعم الجهود العلمية والمهنية في التصدي للملوثات البيئية الناشئة، وتقديم حلول مستدامة لمعالجتها في المنطقة العربية، وذلك عبر فريق من الخبراء المتخصصين في مختلف أنواع هذه الملوثات.

**أهداف الشبكة:**

- بناء وعي بيئي لدى الطلبة والمعلمين في المدارس العربية.
- دعم مبادرات ومشاريع بيئية يقودها الشباب.
- تشجيع تبادل الخبرات والتجارب البيئية بين النوادي في مختلف الدول.
- دعم تحقيق أهداف التنمية المستدامة (SDGs) في المنطقة العربية.

**مميزات الشبكة:**

- منصة إلكترونية تعليمية وتفاعلية باللغة العربية.
- محتوى مبسط وغني حول المفاهيم البيئية المعاصرة.
- أدلة تدريبية وأنشطة مدرسية قابلة للتطبيق.
- مسابقات ومبادرات على مستوى عربي لتعزيز التنافس الإيجابي والإبداع البيئي.

تسعى الشبكة إلى بناء جيل من القادة البيئيين، قادر على إحداث تغيير إيجابي في مجتمعه، والعمل من أجل بيئة عربية أكثر استدامة.

**لمزيد من المعلومات:**

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

## كلمة رئيس المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا

تقديم التقرير الفني الأول 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 الأول 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.

لقد 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 من 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 PFAS 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 الأول التزام المؤسسة الراسخ بتمكين العلماء العرب، وتعزيز حضورهم في المحافل العلمية العالمية، فضلاً عن دعمهم المستمر للارتقاء بالبحث العلمي البيئي. كما يجسد 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 عبدالعزيز النجار**

**رئيس المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا**

## كلمة رئيس الشبكة العربية للتصدّي للملوّثات البيئيّة

**أعضاءُ الشبكةِ الكرام، شركاؤنا الأعزّاء، قراؤنا المحترمون،**

في ظلِّ التحدياتِ البيئيّةِ المتزايدةِ التي تشهدها منطقتنا العربية، تبرز الحاجةُ الملحّةُ إلى تكاتفِ الجهودِ وتوحيدِ الرؤى لحمايةِ بيئتنا وضمانِ مستقبلٍ صحيٍّ وآمنٍ للأجيال القادمة. يُسعدني أن أقدمَ لكم هذا التقرير الفني، الذي يعكسُ التزامَ الشبكة العربية للتصدّي للملوّثات البيئيّة الناشئة (EPN) بدورها الريادي في التصدي للتحديات البيئيّة، خاصةً فيما يتعلق بملوّثات مثل الـ PFAS، وهي من المواد الكيميائية التي تُشكّل تهديدًا كبيرًا للبيئة وصحة الإنسان.

تتواجد مركّبات PFAS في العديد من المنتجات الاستهلاكيّة والصناعية، ومع مرور الوقت، يمكن أن تتراكمَ في البيئةِ وفي أجسامِ الكائنات الحية، مما يؤدي إلى آثارٍ صحّيّةٍ خطيرة، ومن خلال هذا التقرير، نسعى إلى تسليطِ الضوءِ على مخاطرِ هذه الملوّثات، وتقديم توصياتٍ علميّةٍ وعمليةٍ للتصدّي لها.

**منذ تأسيسها، عملت الشبكة العربية للتصدّي للملوّثات البيئيّة الناشئة على:**

- تقديم الدعم الفني والتدريب: نظمنا ورش عملٍ ودوراتٍ تدريبيّةٍ لتعزيز قدرات الجهات المعنيّة في مجال رصد الملوّثات وإدارتها.
- إصدار التقارير والدراسات: قمنا بإعداد تقاريرَ تقنيةٍ تستعرض الوضع البيئي الحالي وتقدّم حلولًا مستدامةً للتحديات المطروحة.
- تعزيز التعاون الإقليمي والدولي: أقمنا شراكاتٍ مع منظماتٍ دوليّةٍ وإقليميّةٍ لتبادل المعرفة والخبرات، وضمان تبنّي أفضل الممارسات في مجال حماية البيئة.

إنّ التصدي للتحديات البيئيّة يتطلّبُ مشاركةَ الجميع. أدعوكم، كأفرادٍ ومؤسّساتٍ، إلى:

- الاطلاع على محتوى هذا التقرير: فَهمُ التحدياتِ والفرصِ المتاحة يساعدُ في تحديدِ الخطواتِ القادمة.
- المشاركة في المبادرات والأنشطة: سواء من خلال التطوّع أو تقديم الدعم الفني أو المالي، فكلّ مساهمةٍ تُعد خطوة نحو التغيير.
- نشر الوعي: مشاركةُ المعلومات مع المجتمع تُعزّز من تأثير جهودنا المشتركة.

نحن في الشبكة العربية للتصدّي للملوّثات البيئيّة الناشئة نؤمن بأنّ التحديات البيئيّة تمثل فرصا حقيقة للنموّ والتطوّر، وسوف نواصل العمل بلا كللٍ لتحقيق أهدافنا، مستندين إلى قيم التعاون والشفافيّة والابتكار.

ختامًا، أشكرُ كلَّ من ساهم في إعداد هذا التقرير، وكلَّ من دعم جهود الشبكة. معًا، يمكننا بناء مستقبلٍ أكثر استدامةً وصحّةً لأبنائنا وبيئتنا.

**د. عادل الغيثي**

**استاذ مشارك**

**رئيس الشبكة العربية للتصدي للملوّثات البيئية**

# الهيئة الإدارية للشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة

## ملخص

تُشكّل مركبات البير-والبولي فلوروألكيل (PFAS) تحديًا بيئيًا وصحيًا عالميًا، نظرًا لما تتميز به من خصائص كيميائية تجعلها شديدة الثبات في البيئة ومقاومة لعمليات التحلل الحيوي أو الكيميائي. تُستخدم هذه المركبات في العديد من المنتجات الصناعية والاستهلاكية، مثل أدوات الطهي غير اللاصقة، وعبوات الأغذية، والدهانات، والأقمشة المقاومة للبقع والماء، بالإضافة إلى رغوات مكافحة الحرائق.

يشير التقرير الحالي، المُعدّ من قبل الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة (EPN)، إلى أن التحدي الذي تطرحه هذه المركبات في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا يتفاقم نتيجة لعدة عوامل، من بينها ضعف البنية التحتية التحليلية، قلة الدراسات الميدانية، وعدم وجود إطار تنظيمي واضح وفعّال في معظم الدول العربية.

كشفت مراجعة الأدبيات عن وجود 12 دراسة علمية فقط نُشرت حول مركبات PFAS في المنطقة العربية، وهي أرقام ضئيلة للغاية مقارنةً بالمستوى الدولي. شملت هذه الدراسات دول البحرين، السعودية، مصر، تونس، الأردن، الجزائر، ولبنان، وتنوعت بين قياس تراكيز PFAS في المياه أو الأنسجة الحيوية مثل حليب الأمهات، وتقييم المخاطر الصحية المترتبة. تعتمد غالبية هذه الدراسات على مختبرات تحليل خارجية في دول مثل الولايات المتحدة والسويد وألمانيا، وهو ما يكشف عن الحاجة الملحة لبناء قدرات محلية لتحليل هذه المركبات باستخدام تقنيات متقدمة مثلLC-MS/MS و Non-targeted Analysis .

من خلال مراجعة السياسات الدولية، يتضح أن هناك تفاوتًا واسعًا في الاستجابة التنظيمية والتقنية للتعامل مع PFAS .ففي الولايات المتحدة والاتحاد الأوروبي، تم وضع حدود تنظيمية صارمة لبعض مركبات PFAS ، مع اعتماد استراتيجيات طويلة الأمد للرصد والمعالجة. أما في دول مثل أستراليا واليابان، فتم التركيز على تطوير تقنيات المعالجة والتنظيف البيئي، بينما لا تزال الصين وكندا في طور تطوير قدراتها التحليلية والتنظيمية تدريجيًا.

على النقيض، يواجه العالم العربي تحديات كبيرة تشمل نقص التمويل المخصص للأبحاث البيئية، ضعف التنسيق بين الجهات التنظيمية، وعدم وجود قاعدة بيانات إقليمية لرصد تركيزات PFAS في البيئة والغذاء والأنسجة البشرية. يقترح التقرير عدة توصيات محورية للنهوض بملف PFAS في المنطقة، تشمل:

- إنشاء مختبرات تحليل وطنية وإقليمية متخصصة.
- تطوير بروتوكولات قياسية لتحليل وتقييم مخاطر PFAS.
- تبني سياسات وتشريعات بيئية واضحة تحد من التعرض لهذه المركبات.
- إطلاق حملات توعية بيئية وصحية تستهدف الجمهور وصنّاع القرار.
- تعزيز التعاون الإقليمي والدولي لتبادل الخبرات وبناء القدرات.

كما يوصي التقرير بالانضمام إلى المبادرات الدولية لتطوير طرق تحليل معتمدة وموحّدة عالميًا للكشف عن PFASفي الأغذية والبيئة. يشدد التقرير على أن مواجهة تحدي PFAS يتطلب نهجًا متعدد التخصصات يشمل الصحة العامة، البيئة، التشريعات، التكنولوجيا، والتعاون الدولي. كما يُعد هذا التقرير خطوة أولى مهمة نحو فهم واقع التلوث بـ PFASفي المنطقة، ووضع الأساس لسياسات فعالة تضمن حماية صحة الإنسان والبيئة على المدى الطويل.

## Executive Summary

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) have emerged as a major class of persistent environmental pollutants, raising serious global concern due to their extreme chemical stability, bioaccumulation potential, and adverse health effects. Their widespread application in industrial and consumer products—including non-stick cookware, food packaging, water- and stain-repellent textiles, and firefighting foams—has resulted in pervasive environmental contamination across various ecosystems.

This technical report, developed by the Arab Network for Emerging Pollutants (EPN), presents a critical appraisal of the current PFAS landscape in the Middle East and North Africa (MENA) region. The findings reveal significant knowledge and policy gaps, primarily driven by limited analytical infrastructure, a scarcity of region-specific scientific studies, and the absence of comprehensive regulatory frameworks in most Arab countries.

To date, only 12 peer-reviewed studies addressing PFAS contamination have been identified across eight Arab nations—namely Bahrain, Saudi Arabia, Egypt, Tunisia, Jordan, Algeria, Lebanon, and Sudan. These studies span various environmental and biological matrices, such as water, soil, sediment, dust, breast milk, and aquatic organisms. However, the heavy reliance on foreign laboratories for sample analysis (e.g., in the United States, Sweden, and Germany) highlights the pressing need to establish regional analytical capacity utilizing advanced techniques such as liquid chromatography–mass spectrometry (LC-MS/MS) and high-resolution, non-targeted screening.

Comparative analysis with international regulatory frameworks demonstrates substantial variation in PFAS management approaches. While the United States and the European Union have implemented enforceable limits and long-term monitoring programs, other countries such as Australia and Japan have prioritized remediation technologies. Meanwhile, China and Canada are gradually expanding their regulatory and analytical systems. In contrast, the MENA region suffers from systemic challenges, including insufficient research funding, fragmented institutional oversight, and a lack of centralized PFAS monitoring databases. The report offers a set of strategic recommendations aimed at strengthening PFAS governance in the Arab region:

- Establishing national and regional reference laboratories equipped for PFAS detection and quantification.

- Developing standardized analytical protocols and health risk assessment frameworks tailored to regional environmental conditions.
- Introducing binding environmental policies to limit PFAS emissions and uses.
- Launching public awareness and stakeholder engagement campaigns to promote risk-informed decision-making.
- Encouraging cross-border cooperation and integration into global initiatives for PFAS control, including the adoption of internationally harmonized testing methods.

This report underscores the urgent need for a coordinated, interdisciplinary approach—spanning environmental science, toxicology, public health, regulatory policy, and international collaboration—to mitigate PFAS exposure and protect environmental and human health in the Arab region. It serves as a foundational step toward informed policy development and scientific advancement in the field of emerging contaminants.

## قائمة الاختصارات

| | |
|---|---|
| 6:2 FTS | سلفونات فلوورتيل ألكيل |
| ADONA | بديل لمركبات PFOA |
| ASTF | المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا |
| CSM | مركز المواد المستدامة |
| EPA | وكالة حماية البيئة |
| EPN | الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة |
| F-53B | مركب بديل صيني لـ PFOS |
| FTOH | فلوورتيل الكحول |
| GCC | مجلس التعاون الخليجي |
| GenX | بديل حديث لـ PFOA |
| IAEA | الوكالة الدولية للطاقة الذرية |
| IMR | معهد أبحاث البحار |
| LABERCA | المختبر الفرنسي لملوثات الأغذية |
| LC-MS/MS | كروماتوغرافيا سائلة مزدوجة بمطياف الكتلة |
| MCLs | المستويات القصوى للملوثات |
| MENA | الشرق الأوسط وشمال إفريقيا |
| NGI | المعهد النرويجي للجيوتقنية |
| NIP | خطة التنفيذ الوطنية |
| NMBU | الجامعة النرويجية للعلوم الحياتية |
| NTA | التحليل غير الموجّه |
| OCPs | المبيدات العضوية الكلورينية |
| OECD | منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية |
| Örebro | جامعة أوريبرو |
| PAHs | الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات |
| PCBs | ثنائيات الفينيل متعددة الكلور |
| PFAS | مركبات البير-والبولي فلوروألكيل |
| PFBA | حمض بيرفلوروبوتانيك |
| PFBS | حمض بيرفلوروبوتان سلفونيك |
| PFDA | حمض بيرفلوروديكانيك |
| PFDcA | حمض بيرفلورودوديكانويك |
| PFDS | حمض بيرفلوروديكين سلفونيك |
| PFHxA | حمض بيرفلورهكسانويك |
| PFHxS | حمض بيرفلورهكسان سلفونيك |
| PFNA | حمض بيرفلورونونانيك |
| PFOA | حمض بيرفلوروأوكتانيك |
| PFOS | حمض بيرفلوروأوكتان سلفونيك |
| PFPeA | حمض بيرفلوروبنتانيك |
| PFSA | أحماض السلفونيك البيرفلورية |
| PFUnDA | حمض بيرفلورأوندكانيك |
| POPs | الملوّثات العضوية الثابتة |
| QA/QC | ضمان وضبط الجودة |
| REACH | نظام تسجيل وتقييم وترخيص وتقييد المواد الكيميائية |
| SC | اتفاقية ستوكهولم |
| SGQs | معايير جودة الرواسب |
| UHPSFC | كروماتوغرافيا مائع فوق الحرج فائق الأداء |
| VU | جامعة فريه في أمستردام |

# المحتوى


| | | الصفحة |
|---|---|---|
| | ملخص | 10 |
| | Executive Summary | 11 |
| | قائمة الاختصارات | 13 |
| | **الفصل الأول** | |
| | **الإطار العام للتقرير** | |
| 1.1 | تمهيد | 19 |
| 1.2 | المقدمة | 19 |
| 1.3 | الهدف من التقرير | 19 |
| 1.4 | نطاق عمل التقرير | 20 |
| 1.5 | منهجية التقرير | 20 |
| | **الفصل الثاني** | |
| | **نظرة شاملة عن مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS)** | |
| 2.1 | ماهية مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) | 22 |
| 2.2 | الخلفية التاريخية لمركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) | 23 |
| 2.3 | إستخدام مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) | 26 |
| 2.4 | الخصائص الكيميائية والفيزيائية لمركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) | 26 |
| 2.5 | مصادر مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة | 29 |
| 2.6 | المخاطر الصحية والبيئية لمركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) | 30 |
| 2.7 | مسارات انتقال مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) إلى الإنسان | 32 |
| | **الفصل الثالث** | |
| | **مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة العربية: القيود والتحديات والفرص** | |
| 3.1 | التقييم والمراقبة البيئية لمركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة العربية: القيود والتحديات والفرص | 35 |
| 3.2 | الوضع الحالي لأبحاث مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة العربية | 39 |
| 3.3 | تحليل ميتا لأبحاث مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة العربية | 41 |
| 3.4 | المراجعة الأدبية لأبحاث مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة العربية | 43 |
| 3.4.1 | مملكة البحرين | 43 |
| 3.4.2 | المملكة العربية السعودية | 43 |
| 3.4.3 | جمهورية مصر العربية | 44 |
| 3.4.4 | الجمهورية التونسية | 45 |
| 3.4.5 | المملكة الأردنية الهاشمية | 45 |
| 3.4.6 | الجمهورية الجزائرية | 46 |
| 3.4.7 | دولة الكويت | 46 |
| 3.4.8 | الجمهورية اللبنانية | 46 |
| 3.4.9 | جمهورية السودان | 47 |
| | **الفصل الرابع** | |
| | **طرق تحليل العينات والكشف عن مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة العربية** | |
| 4.1 | طرق الكشف المعتمدة دوليا | 49 |
| 4.1.1 | التحليل الموجّه (Targeted Analysis) | 49 |
| 4.1.2 | التحليل غير الموجّه (Non-Targeted Analysis - NTA) | 49 |
| 4.1.3 | المعايير المرجعية والتقنيات الداعمة | 49 |
| 4.1.4 | الطرق التنظيمية المعتمدة | 49 |
| 4.2 | الطرق المستخدمة في تحليل مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة العربية | 49 |
| 4.2.1 | عينات الرواسب البحرية | 49 |
| 4.2.2 | تحليل مركبات PFAS في عينات مياه الصرف والمياه السطحية | 52 |

| | | |
|---|---|---|
| 4.2.3 | تحليل مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في عينات النباتات | 53 |
| 4.2.4 | تحليل مركبات مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في الكائنات البحرية | 52 |
| 4.2.5 | طرق تحليل PFAS في عينات حليب الأم والمواد الغذائية | 56 |
| 4.2.6 | تحليل مركبات PFAS في عينات مصل الدم البشري | 57 |
| 4.2.7 | عينات الغبار الداخلي ومواد تغليف الأغذية | 57 |
| 4.3 | التباين المنهجي في تحليل مركبات PFAS في العينات البيئية المختلفة | 62 |

**الفصل الخامس**
**البنية التحتية لأبحاث مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في الدول العربية**

| | | |
|---|---|---|
| 5.1 | تحليل وصفي للبنية التحليلية لأبحاث مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في الدول العربية | 65 |
| 5.2 | تحليل البنية التحتية البحثية لتحليل مركبات PFAS في الدول العربية | 67 |

**الفصل السادس**
**دور الشبكة العربية في مواجهة التلوث بـمركبات PFAS والتحديات في المنطقة العربية**

| | | |
|---|---|---|
| 6.1 | دور الشبكة العربية في التصدي للPFAS | 71 |
| 6.1.1 | بناء قاعدة بيانات إقليمية | 71 |
| 6.1.2 | تطوير وتوحيد بروتوكولات القياس | 71 |
| 6.1.3 | تعزيز التعاون الإقليمي والدولي | 71 |
| 6.1.4 | رفع مستوى الوعي والتثقيف | 71 |
| 6.1.5 | دعم السياسات والتشريعات البيئية | 72 |
| 6.1.6 | تشجيع البحث والابتكار | 72 |
| 6.1.7 | مراقبة وتقييم التأثيرات البيئية والصحية | 72 |
| 6.1.8 | تطوير برامج إدارة مستدامة للمياه | 73 |
| 6.1.9 | إصدار تقارير تقنية دورية حول مركبات (PFAS) | 73 |
| 6.1.10 | تقييم دوري لمركبات PFAS في مياه الشرب | 74 |
| 6.2 | تحديات دراسات مركبات PFAS في المنطقة العربية | 74 |
| 6.3 | فجوات البحث في تحليل مركبات PFAS في المنطقة العربية | 75 |

**الفصل السابع**
**الاستنتاجات والتوصيات** 76

**خاتمة** 78

**المراجع** 79

## قائمة الجداول


الصفحة

| | | |
|---|---|---|
| جدول 2.1 | التركيب الكيميائي لبعض الأحماض الكربوكسيلية الفلورية (PFCAs) | 27 |
| جدول 2.2 | التركيب الكيميائي لبعض الأحماض السلفونية الفلورية (PFSAs) | 28 |
| جدول 2.3 | برنامج pkCSM لتحليل الخصائص السمية الديناميكية والدوائية لمركبات PFOS و PFOA | 32 |
| جدول 3.1 | الإجراءات العالمية لمواجهة تلوث مركباتPFAS | 38 |
| جدول 3.2 | الدراسات التي أجريت في المنطقة العربية عن اكتشاف وتحديد وتركيزات مركبات الـ PFAS | 40 |
| جدول 4.1 | مقارنة بين طرق تحليل مركبات PFAS في عينات الرواسب البحرية | 50 |
| جدول 4.2 | مقارنة بين منهجيات تحليل مركبات PFAS في أنواع مختلفة من عينات المياه | 52 |
| جدول 4.3 | مقارنة بين منهجيات تحليل مركبات PFAS في أنسجة الكائنات البحرية | 56 |
| جدول 4.4 | مقارنة بين منهجيات تحليل مركبات PFAS في حليب الأم والمواد الغذائية | 58 |
| جدول 5.1 | تحليل وصفي لمساهمة الدول العربية في دراسات :PFAS جمع العينات، التحليل، والتعاون الدولي | 66 |
| جدول 5.2 | الأجهزة والتقنيات المستخدمة لتحليل PFAS في الدول العربية | 69 |


## قائمة الاشكال


الصفحة

| | | |
|---|---|---|
| شكل 2.1 | المخطط الزمني لتاريخ مركبات مركبات البير-والبولي فلوروألكيل (PFAS) بدءاً من مرحلة التأسيس عام 1886 وحتي المرحلة الحديثة | 23 |
| شكل 2.2 | توضح مصادر مركبات البير-والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة | 30 |
| شكل 2.3 | المخاطر الصحية المرتبطة بالـPFAS | 31 |
| شكل 2.4 | يوضح مسارات و طرق انتقال PFAS الى الانسان | 33 |
| شكل 3.1 | الاتجاهات التنظيمية العالمية لمركبات البولي فلوروألكيل (PFAS) عبر الأقاليم والدول | 33 |
| شكل 3.1 | مخطط الغابة (Forest Plot) لتحليل ميتا يوضح حجم التأثير وتوزيع الدراسات حول الكشف عن مركبات PFASفي الدول العربية بين عامي 2015 و2023. | 41 |
| شكل 3.2 | مخطط القمع (Funnel Plot) لتحليل ميتا يكشف عن وجود تحيّز محتمل في النشر في الدراسات العربية المتعلقة بمركبات PFAS . | 42 |

# الفصل الأول

## الفصل الأول: الإطار العام للتقرير

يتناول هذا الفصل الخلفية العامة للتقرير، موضحًا السياق البيئي العربي وما يواجهه من تحديات متزايدة نتيجة الملوثات الناشئة، خاصة مركبات PFAS المعروفة بكونها "المواد الكيميائية الأبدية". يبدأ الفصل بتمهيد يبين خطورة هذه المركبات وصعوبة تحللها في البيئة، ثم يستعرض أهمية إعداد تقرير متخصص يسلط الضوء على واقعها في المنطقة العربية. يوضح أهداف التقرير المتمثلة في رفع الوعي، توفير قاعدة معرفية أولية، وتقديم توصيات لصناع القرار. كما يحدد نطاق العمل الذي يشمل مراجعة الأدبيات العربية والدولية وتحليل الوضع البحثي والتنظيمي.

### 1.1 التمهيد

تُواجه المنطقة العربية تحديات بيئية متزايدة نتيجة الانتشار المتنامي للملوثات البيئية الناشئة، ومنها مركبات البير- والبولي فلوروألكيل (PFAS) ، التي باتت تُعرف عالميًا بـ"المواد الكيميائية الأبدية" بسبب ثباتها العالي في البيئة وصعوبة تحللها. وفي ضوء هذا الواقع، تعمل الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة (EPN) ، وهي منظمة غير حكومية، على تعزيز التعاون الإقليمي بين الدول العربية لمواجهة هذه التحديات، ورفع الوعي البيئي، ودعم جهود البحث العلمي وتقديم الحلول المستندة إلى الأدلة. وفي هذا الإطار، برزت الحاجة إلى إعداد تقرير تقني يُسلط الضوء على PFAS كأحد أخطر هذه الملوثات.

### 1.2 المقدمة

مركبات البير- والبولي فلوروألكيل (PFAS) هي مجموعة واسعة من المواد الكيميائية الاصطناعية التي تحتوي على روابط قوية بين الكربون والفلور، ما يمنحها خصائص فريدة مثل مقاومة الماء، والزيوت، والحرارة، وقد أدى ذلك إلى استخدامها المكثف في العديد من التطبيقات الصناعية والاستهلاكية. إلا أن هذه الخصائص نفسها تجعلها مقاومة لعمليات التحلل البيولوجي، مما يؤدي إلى تراكمها في البيئة والمياه الجوفية، ودخولها إلى السلسلة الغذائية. ويشكل استمرار استخدامها وانتشارها تحديًا كبيرًا على البيئة والصحة العامة، خاصة في ظل محدودية الدراسات المتعلقة بانتشارها وتأثيراتها في المنطقة العربية.

### 1.3 الهدف من التقرير

تُعد مركبات البير- والبولي فلوروألكيل (PFAS) بما في ذلك مركبات الأحماض السلفونية الفلورية Perfluorosulfonic Acids, (PFSAs) من أبرز الملوثات البيئية الناشئة التي تشكل تهديدًا عالميًا متزايدًا، نظرًا لخصائصها الفيزيائية والكيميائية الفريدة التي تمنحها استقرارًا طويل الأمد في البيئة، وقدرة على التراكم الحيوي في الكائنات الحية. ما يجعل التعامل معها أكثر تعقيدًا هو تجاوزها للحدود الجغرافية والسياسية، الأمر الذي يستلزم استجابة دولية وتعاونًا إقليميًا منسقًا، لا سيما في مناطق مثل الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، التي تواجه تحديات متعددة في مجالات الرصد، والتشريع، والإدارة البيئية لهذه المركبات.

يهدف هذا التقرير إلى بلورة رؤية تقنية وعلمية لمعالجة التلوث البيئي الناجم عن PFAS في المنطقة، وذلك من خلال المحاور التالية:

أ. تقديم خلفية معرفية متكاملة حول مركبات PFAS ، بما في ذلك خصائصها الكيميائية والفيزيائية، استخداماتها الصناعية، ومسارات انتشارها في البيئة.

ب. تحليل التأثيرات الصحية والبيئية المرتبطة بها، استنادًا إلى ما توفر من دراسات وأدبيات علمية محلية وعالمية.

ت. تقييم مدى انتشار هذه المركبات في عدد من الدول العربية، من خلال مراجعة البيانات المتوفرة وجهود الرصد والتحليل المنفذة.

ث. اقتراح حزمة من السياسات والاستراتيجيات البيئية القابلة للتطبيق، بما يشمل تعزيز أنظمة الرصد والتحليل، ودعم الأطر التشريعية والتنظيمية ذات الصلة.

ج. تشديد الرقابة على تصريف المياه العادمة الناتجة عن المنشآت الصناعية التي تستخدم مركبات PFAS ، في ضوء ما أظهرته بعض الدراسات من وجود هذه المركبات في التربة ومياه الأنهار بعدد من الدول العربية. كما يُوصى بإجراء حصر شامل لأكثر مركبات PFAS انتشارًا في المنطقة، مع تحديد مصادرها ومواقع رصدها بناءً على الأدلة والبيانات المتوفرة.

### 1.4 نطاق عمل التقرير

يركز التقرير بشكل حصري على تقييم التلوث البيئي الناجم عن مركبات PFAS في الدول العربية الواقعة ضمن منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا. ويشمل ذلك تحليل السياق المحلي لكل دولة من حيث مدى الانتشار، وتوافر البيانات، والتشريعات ذات الصلة، بهدف تقديم توصيات مخصصة وواقعية تتناسب مع التحديات والفرص المتاحة في المنطقة.

### 1.5 منهجية التقرير

تم إعداد هذا التقرير وفق منهجية علمية تجمع بين المنهج الوصفي والتحليلي. اعتمد المنهج الوصفي على مراجعة الأدبيات العلمية والدراسات والتقارير الدولية والإقليمية ذات الصلة، بينما ركز المنهج التحليلي على تفسير البيانات المتاحة واستقراء النتائج من أجل تطوير رؤية استراتيجية شاملة. وقد شمل العمل تحليل السياسات البيئية، ومقارنة التجارب الدولية، واقتراح حلول عملية قابلة للتنفيذ ضمن السياق العربي.

# الفصل الثاني

## الفصل الثاني: نظرة شاملة عن مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS)

يستعرض هذا الفصل الخلفية التاريخية لهذه المركبات منذ اكتشافها في أواخر القرن التاسع عشر وتوسع استخدامها خلال القرن العشرين في المجالات العسكرية والصناعية. كما يناقش التطبيقات الشائعة لها. يخصص الفصل جزءًا لشرح خصائصها الفيزيائية والكيميائية التي تجعلها صعبة التحلل وعالية التراكم في الكائنات الحية. ثم يوضح مصادر انتشارها في البيئة بدءًا من التصنيع والاستخدام حتى النفايات. وينتهي بعرض المخاطر الصحية والبيئية المؤكدة مثل اضطرابات الهرمونات، السرطان، وتأثيراتها على المياه الجوفية والنظم البيئية.

### 2.1 ماهية مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS)

تُعرف مركبات البير- والبولي فلوروألكيل (PFAS) بأنها مجموعة كبيرة من المواد الكيميائية الاصطناعية الأليفاتية عالية الفلور، والتي لا تتواجد بصورة طبيعية في البيئة وإنما تُنتج صناعيًا [1,2]. تتميز هذه المركبات بثبات كيميائي وحراري استثنائي نتيجة لوجود روابط قوية بين ذرات الكربون والفلور (C–F) والتي تُقدّر طاقتها المتصلة بـ 485 كيلوجول/مول، إضافة إلى روابط الكربون-كربون (C–C) التي تصل طاقتها إلى 346 كيلوجول/مول. هذا الثبات الكيميائي والحراري يمنح مركبات PFAS قدرة على تحمل درجات حرارة تصل إلى 1000 درجة مئوية دون تتحلل أو تغيير في تركيبها الكيميائي [3] مما يجعلها مصنفة ضمن الملوثات العضوية الثابتة (Persistent Organic Pollutants – POPs) [4] . وتُعد هذه المركبات كارهة للماء وكارهة للدهون، كما تتمتع بخصائص منخفضة للشد السطحي، وهي عوامل تجعلها مثالية في العديد من التطبيقات الصناعية[5] .

تتميز مركبات PFAS بتركيبها الجزيئي القائم على روابط الكربون-الفلور، وهي من أقوى الروابط في الكيمياء العضوية، مما يُكسبها قدرة كبيرة على مقاومة التفكك البيولوجي والحراري [6] ، وقد أدى ذلك إلى استخدامها الواسع في مجموعة متنوعة من المنتجات مثل المنسوجات المقاومة للماء، مواد تغليف الأغذية، شمع التزلج، وطفايات الحريق. غير أن هذا الاستخدام الواسع رافقه مخاوف بيئية وصحية متزايدة نتيجة لصعوبة تفككها وتراكمها في البيئة والكائنات الحية، ما أكسبها لقب "المواد الكيميائية الدائمة" [7].

في عام 2011، قدّم باك وزملاؤه[8] تعريفًا أوليًا لمركبات PFAS على أنها مركبات تحتوي على مجموعتين أو أكثر من مجموعات $CF_2$ المشبعة والمرتبطة ببعضها البعض. لاحقًا، تبنت منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD) تعريفًا علميًا أكثر دقة واعتمادًا ففي وثيقة نُشرت عام 2018، عرّفت OECD [9] مركبات PFAS بأنها مواد تحتوي على "ذرة كربون واحدة على الأقل مفلورة بالكامل"، أي أن جميع روابط الهيدروجين حول ذرة الكربون قد تم استبدالها بالفلور، مكونةً مجموعة بيرفلورو ألكيل ($C_nF_{2n+1}$–) . وبسبب قيود الموارد، ركّزت القائمة الأولية للـ OECD على المركبات التي تحتوي على ثلاث ذرات كربون أو أكثر، ما أسفر عن حصر 4730 مركبًا ضمن هذه الفئة.

في عام 2021، حدّثت OECD[10] هذا التعريف، موضحة أن مركبات PFAS تُعرّف بأنها "مواد مفلورة تحتوي على ذرة واحدة على الأقل من الميثيل أو الميثيلين المفلورة بالكامل $CF_3$–أو–$CF_2$– ، دون وجود ذرات H أو Cl أو Br أو I"، مما أدى إلى توسيع نطاق التعريف (OECD, 2021) .وقد حظي هذا التحديث بتأييد دولي من قبل العلماء والجهات التنظيمية وخبراء الصناعة، ليُعد الآن أكثر التعريفات قبولًا وموثوقية[11] .وبناءً على هذا التعريف الموسع، تشير قواعد البيانات العلمية الحديثة إلى تزايد كبير في عدد مركبات PFAS المعروفة، حيث تم إدراج أكثر من 7 ملايين مركب في قاعدة بيانات PubChem[12] وفي الوقت ذاته، أدرجت وكالة حماية البيئة الأمريكية (USEPA) [13] حوالي 14,755 مركبًا ضمن لوحة معلوماتها الكيميائية CompTox ، بينما تُغطي OECD أكثر من 6 ملايين مركب بموجب تعريفها الموسع [14] ووفقًا لتقديرات حديثة، فإن عدد مركبات PFAS قد يتجاوز 10,000 مركب فردي[15] ، بينما تشير بعض المصادر إلى وجود ما يصل إلى 21 مليون مركب من المركبات المفلورة، من ضمنها أكثر من 400,000 مركب معروف من مركبات الفلور العضوية[16] .

## 2.2 الخلفية التاريخية لمركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS)

تعود أصول مركبات PFAS إلى أواخر القرن التاسع عشر، حيث تم لأول مرة إنتاج رباعي فلوريد الكربون ($CF_4$) في عام 1886، والذي يُعد أبسط مركب فلوري عضوي، ويعتبر اللبنة الأولى في علم الكيمياء الفلورية. ثم، في ثلاثينيات القرن العشرين، بدأ التوجه الصناعي نحو تطوير مركبات أكثر تعقيدًا ضمن هذه العائلة. وفي عام 1934، تم تسجيل أول براءة اختراع لبوليمر فلوروبوليمر، مما فتح باب لاستخدام الفلور في تطبيقات صناعية متقدمة. بحلول عام 1938، تم بالصدفة اكتشاف مركب بولي ترافلوروإيثيلين – (PTFE) المعروف تجاريًا باسم تيفلون – (Teflon) على يد الكيميائي روي بلنكت في مختبرات DuPont، حيث كان يُجري تجارب على غازات التبريد. لاحقًا، استُخدم هذا البوليمر عالي المقاومة في مشروع "مانهاتن" الشهير، ضمن عمليات فصل نظائر سادس فلوريد اليورانيوم($UF_6$) ، بفضل خصائصه الاستثنائية في مقاومة التآكل والحرارة والعزل الكيميائي[17] (الشكل 2.1) .

شكل 2.1

المخطط الزمني لتاريخ مركبات البير-والبولي فلوروألكيل (PFAS) بدءاً من مرحلة التأسيس عام 1886 وحتى المرحلة الحديثة

ومع بداية الأربعينيات، طوّرت شركات أمريكية كبرى مثل شركة DuPont وشركة M3 مركبات PFAS ذات مجموعات وظيفية. في البداية، تم استخدامها في صناعة أواني الطهي غير اللاصقة، ومعالجة الأقمشة، وإنتاج المواد المقاومة للحريق. وسرعان ما إكتسبت هذه المركبات شعبية واسعة نظرًا لخصائصها الفريدة، ما جعلها مثالية لمجموعة واسعة من التطبيقات الصناعية والاستهلاكية [18]. بحلول الخمسينيات والستينيات من القرن الماضي، توسّع استخدام PFAS بشكل ملحوظ، حيث أُدمجت في العديد من المنتجات الاستهلاكية، بما في ذلك المنسوجات والسجاد ومواد تغليف الأغذية، بالإضافة إلى استخدامها في رغاوي مكافحة الحرائق ومعدات الوقاية الشخصية، نظرًا لخصائصها الطاردة للماء ومقاومة البقع[19].

وعلى الرغم من ظهور تقارير في الستينيات والسبعينيات تشير إلى وجود PFAS في البيئة والأنسجة البشرية [20]. كما أظهرت الدراسات المبكرة مخاطر صحية محتملة مرتبطة بالتعرض للـ PFAS ، بما في ذلك السمية المناعية والسرطان، إلا أن المخاطر الصحية المحتملة لم تكن معروفة على نطاق واسع في ذلك الوقت. لذلك فقد روجت الصناعة الكيميائية لـ PFAS باعتبارها مواد آمنة وفعالة، ما ساهم في انتشار استخدامها على نطاق واسع، وواصلت الشركات المصنعة توسيع استخدام هذه المركبات، مما أدى إلى زيادة ملحوظة في انبعاثاتها البيئية .في السبعينيات والثمانينيات، تزايدت المخاوف بشأن استمرارية PFAS في البيئة وتأثيراتها الصحية. وقد كشفت الدراسات خلال هذه الفترة أن هذه المواد شديدة المقاومة للتحلل مما يؤدي الى تراكمها في البيئة والأنسجة البشرية. وعلى الرغم من أن الشركات المصنعة في العام 1970 كانت على دراية بسُميّة PFAS عن طريق الاستنشاق والابتلاع، إلا أنها امتنعت عن الكشف عن هذه المعلومات واستمرت الصناعة في الترويج لاستخدام PFAS مع قمع نتائج الأبحاث غير المواتية [18]. بسبب نقص الشفافية هذا، تأخر الوعي العام والإجراءات التنظيمية، مما سمح لمركبات PFAS بالاستمرار في التراكم في البيئة وفي أجسام البشر .

في تسعينيات القرن الماضي وبداية الألفية الثالثة، بدأت المخاوف الصحية العامة بشأن مركبات PFAS تتصاعد. ففي عام 2001، كشف أول تقرير عالمي عن انتشار واسع لمركبات PFAS في البيئة والأنسجة الحيوانية، حيث وُجدت PFOS في الأسماك والطيور والثدييات البحرية. وبيّن التقرير أن مستويات PFOS في الحيوانات ترتبط ارتباطًا طرديًا بالكثافة السكانية والأنشطة الصناعية، حيث كانت الحيوانات في المناطق الصناعية تحتوي على مستويات أعلى مقارنةً بتلك التي تعيش في المناطق البحرية النائية [21]. وقد أدى هذا التقرير إلى زيادة الوعي العام، مما دفع الجهات التنظيمية إلى اتخاذ إجراءات صارمة. ففي عام 2003، قررت شركة (M3) التوقف تدريجيًا عن إنتاج المنتجات المرتبطة بـ PFOS ، واستبدلتها بسلفونات البيرفلوروبيوتان (PFBS) ومركبات البيرفلوروكربون ذات السلسلة الأقصر [22]. وفي عام 2005، أطلقت وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) مبادرةً للتخلص التدريجي لحمض PFOA، إلى جانب سلائفه ونظائره [23]. ومع ذلك، كانت عملية التخلص التدريجي بطيئة، وظهرت بدائل أخرى لمركبات PFAS، والتي اتضح لاحقًا أن لها أيضًا آثارًا صحية ضارة .

في عام 2006، أقرّ البرلمان الأوروبي ومجلس الاتحاد الأوروبي بأن مادة السلفونات المشبعة بالفلور أوكتين تستوفي معايير التصنيف كمادة كيميائية شديدة الثبات والتراكم البيولوجي وذات سمية عالية [24]. وفي خطوة لاحقة، وتحديدًا في إطار لائحة تسجيل المواد الكيميائية وتقييمها وترخيصها وتقييدها (REACH) ، أكد الاتحاد الأوروبي أن تصنيع أو استخدام أو طرح حمض PFOA وأملاحه والمواد المرتبطة به في السوق يشكل خطرًا غير مقبول على صحة

الإنسان والبيئة [25]. وفي عام 2009، أُدرجت PFOS كملوث عضوي ثابت جديد من قِبل الهيئة الإدارية العليا لاتفاقية ستوكهولم للملوثات العضوية الثابتة في مؤتمر الأطراف (COP) , بينما صنفت وكالة حماية البيئة الأمريكية PFOA على أنه "مادة مسرطنة محتملة"، وقُيّد استخدامه [22].

في العقد الثاني من القرن الحادي والعشرين، تصاعدت الجهود العالمية لمعالجة تلوث الPFAS. وقد لعبت عدة دول، بما في ذلك النرويج وألمانيا والسويد، أدوارًا محورية في تطوير هذه اللوائح. بادرت النرويج وألمانيا بإضافة الـ PFOA إلى لائحة REACH، بينما تقدمت السويد وألمانيا في عام 2017 بطلب للاتحاد الأوروبي للنظر في إدراج مركب آخر من مركبات PFAS ، وهو PFHxS ، ضمن قائمة المواد المثيرة للقلق الشديد [26]. علاوةً على ذلك، بدأت ألمانيا في عام 2018 بطرح قيودٍ مقترحة على استخدام PFHxA. علاوة على ذلك، نفّذ الاتحاد الأوروبي عام 2018 بنود اتفاقية ستوكهولم، والتي فرضت قيودًا صارمة على استخدام مركبات PFOS و PFOA [27]. وفي خطوة مماثلة، أقرّ الكونغرس الأمريكي في عام 2020 قانون PFAS ، ملزما وكالة حماية البيئة الأمريكية بوضع حدود قانونية وقابلة للتنفيذ لمستويات PFAS في مياه الشرب.

وفي عام 2019، وافقت لجنة الدولة العضو على التصنيف الذي اقترحه الهولنديون لتحديد مركبات حمض ثنائي أكسيد سداسي فلورو البروبيلين (HFPO-DA)، المعروفة أيضًا باسم GenX، كمواد مثيرة للقلق الشديد. ونظرًا للمخاوف المتزايدة بشأن التراكم البيولوجي والاستمرارية البيئية لمركبات الـ PFAS قصيرة السلسلة، نشرت المفوضية الأوروبية في 2020م الاستراتيجية الأوروبية للمواد الكيميائية. تهدف هذه الاستراتيجية إلى وضع إطارٍ لحظر جميع مركبات PFAS باستثناء الحالات التي تكون فيها غير قابلة للاستبدال أو تعتبر ضرورية للمجتمع [25]. ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن هذه اللوائح لم تُطبق بالكامل حتى الآن .

من عام 2020 إلى عام 2025، كثّفت وكالة حماية البيئة الأمريكية جهودها لمعالجة تلوث مركبات PFAS من خلال سلسلة من المبادرات التنظيمية والرقابية. كجزء من هذه الجهود، كلفت الوكالة مرافق المياه العامة المختصة بإجراء اختبارات على 29 مركبًا من مركبات PFAS في مياه الشرب، مع جمع البيانات خلال الفترة من 2023 إلى 2025 لتقييم الحاجة إلى مزيد من اللوائح التي تهدف إلى حماية الصحة العامة [28].

في عام 2024، أصدرت وكالة حماية البيئة أول لائحة وطنية أساسية لمياه الشرب، استهدفت ستة مركبات من PFAS، مسجلةً بذلك إنجازًا بارزًا في تنظيم هذه المواد في مياه الشرب [29]. تضمنت هذه اللائحة وضع حدود قصوى لمستويات الملوثات (MCLs)، إلى جانب متطلبات مراقبة مركبات محددة مثل PFOA و PFOS، المعروفين بخصائصهما المسرطنة [30]. بالإضافة إلى ذلك، اتخذت الوكالة خطوات استباقية لمنع التلوث المستقبلي من خلال اقتراح إزالة 12 نوعًا من PFAS من قائمة المكونات الخاملة المعتمدة في المبيدات الحشرية [31]. كما أطلقت مبادرات لتعزيز الشفافية من خلال إلغاء الإعفاءات التي كانت تسمح للشركات بتجنب الإبلاغ عن انبعاثاتها منPFAS، مما يسهم في تحسين مراقبة التلوث [32]. علاوة على ذلك، تستعد وكالة حماية البيئة لتطبيق التزامات قانونية لتنظيف التلوث الناجم عن PFOA وPFOS بموجب برنامج Superfund الفيدرالي، الذي يُلزم الشركات المسؤولة عن التلوث بتحمل مسؤولية تنظيف المواقع الملوثة [33]. وتأتي هذه الإجراءات في إطار استراتيجية أوسع تهدف إلى منع دخول PFAS إلى البيئة، والتخفيف من آثارها السلبية على صحة الإنسان والنظم البيئية [34]. يعكس هذا النهج الشامل تحولًا تنظيميًا كبيرًا يهدف إلى معالجة الانتشار

الواسع والمستمر لتلوث PFAS. ومع أن هذه الجهود تعكس التزامًا متزايدًا بمكافحة التلوث، إلا أن استمرار وجود PFAS في البيئة، إلى جانب استخدامها المستمر في العديد من المنتجات الصناعية والاستهلاكية، لا يزال يشكل تحديًا بيئيًا وصحيًا كبيرًا.

### 2.3 إستخدام مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS)

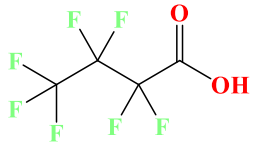
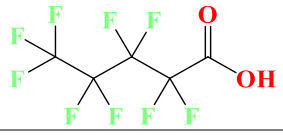
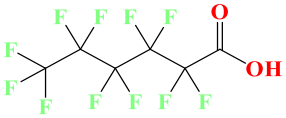
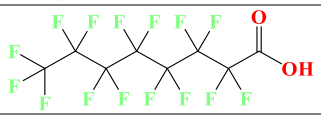
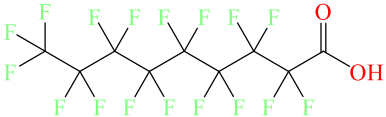
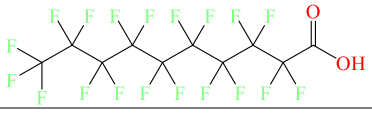
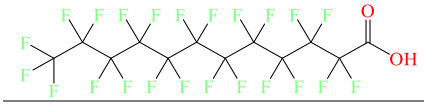
تتميز مركبات PFAS بخصائص فيزو كيميائية فريدة تُؤهلها للاستخدام الواسع في مختلف القطاعات الصناعية والخدمية والزراعية وغيرها. فعلى سبيل المثال فيما يخص القطاع الصناعي: فهي تدخل في مجال صناعة الأغذية من حيث انتاج الورق المستخدم في اغلفة وعلب واطباق واوعية اعداد وجبات الطعام السريعة والاطعمة المستخدمة في الميكروويف بسبب كونها كارهة للزيوت والشحوم (طاردة) [17]، فضلاً عن استخدامها في طلاء اواني الطهي من النوع (غير اللاصق) بسبب استقرارها الحراري [35]. وتدخل في مجال الصناعة النسيجية من حيث انتاج ملابس عمل خاصة لذوي المهن والتي تتميز بمقاومتها لظروف العمل من اجل تحقيق المتطلبات الوقائية لهم بسبب مقاومتها للماء والزيت والبقع، فضلاً عن إنتاج مواد الطلاء المستخدمة في صناعة السجاد والاثاث بسبب استقرارها الكيميائي والحراري [36]. وتدخل في صناعة السيراميك من حيث استخدامها في تحضير السوائل الفوق حرجة والتي تُستخدم في إنتاج مسحوق السيراميك بسبب استقرارها الحراري [17]. وتدخل في مجال صناعة منتجات العناية الشخصية مثل الواقي الشمسي والشعر والوجه والجسم بسبب استقرارها الكيميائي وخصائصها في الشد السطحي والاستحلاب [37,36]. وتدخل في مجال صناعة مواد مكافحة الحريق من حيث إنتاج الرغوات المائية بسبب استقرارها الكيميائي وقلة خاصية الشد السطحي لها والتي تساعدها في السيطرة على إخماد الحرائق [7,17]. وتدخل في مجال الصناعة التعدينية للنفط والغاز من حيث تحسين عملية استرداد النفط بسبب ما تتمتع به من خواص الشد السطحي[5] كما تدخل في مجال الصناعة الإلكترونية من حيث استخدامها في إنتاج مواد قليلة الرغوة وغير مسببة للتأكل أثناء عمليات اللحام بسبب قلة خاصية الشد السطحي لها. بالإضافة الى استخدامها في طلاء الأسطح والأغلفة بسبب كونها كارهة للماء والزيوت (طارده). وتدخل في عمليات طلاء المعادن باستخدام تقنية الطلاء الكهربائي أو العادي من حيث تحسينها لمواصفات السطوح المراد طلائها بسبب ما تتمتع به من خصائص الشد السطحي، فضلاً عن معالجة المعادن مثل عمليات التنظيف والنقش وغيرها بسبب استقرارها الكيميائي في تثبيط الأبخرة ومنع التآكل وقلة خاصية الشد السطحي لها[3]. أما فيما يخص القطاع الزراعي، فهي تدخل في مجال إنتاج المبيدات الحشرية وطلاء حبيبات الأسمدة لتحسين أداء الأسمدة في تحرير العناصر الغذائية الى التربة وهذا يعود إلى ما تتمتع به من خصائص الشد السطحي [17].

### 2.4 الخصائص الكيميائية والفيزيائية لمركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS)

تُظهر مركبات الأحماض الكربوكسيلية الفلورية (Perfluorocarboxylic Acids, PFCAs) تدرجًا واضحًا في الخصائص الفيزيائية والكيميائية وفقًا لطول السلسلة الفلورية، والتي يتم التعبير عنها بعدد وحدات $-CF_2-$ والمشار إليه بـ(n) (جدول 2.1) . كلما زادت قيمة n ، زادت الكتلة الجزيئية والثبات الكيميائي، وارتفعت القدرة على مقاومة التحلل البيئي. فعلى سبيل المثال، يُعد PFOA (n = 6) من أكثر هذه المركبات دراسة، ويمثل حالة وسطى بين المركبات القصيرة مثل PFBA والمركبات الأطول مثل PFDA و PFDcA . تشير الأبحاث إلى أن المركبات ذات السلاسل الأطول ($n \geq 7$) تُظهر خصائص

أقوى من حيث الذوبان في الدهون (lipophilicity) ، والتراكم الحيوي (bioaccumulation) ، والثبات البيئي (persistence) .ولهذه الأسباب، تم إدراج بعض مركبات PFCAs ، مثل PFOA و PFDA، ضمن قائمة الملوثات العضوية الثابتة (POPs) بموجب اتفاقية ستوكهولم.

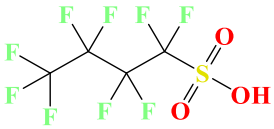
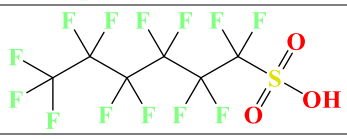
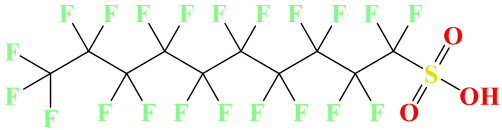
**جدول 2.1:** التركيب الكيميائي لبعض الأحماض الكربوكسيلية الفلورية (PFCAs)

| التركيب البنيوي (Structural Formula) | الكتلة الجزيئية (g/mol) | ذرات الكربون (n) | الاسم النظامي (IUPAC Name) | الصيغة الكيميائية (Formula) | الاسم الشائع (Common Name) |
|---|---|---|---|---|---|
|  | — | 2 | Perfluorobutanoic acid | $CF_3–CF_2–COOH$ | **PFBA** |
|  | 264.05 | 3 | Perfluoropentanoic acid | $CF_3–(CF_2)_3–COOH$ | **PFPeA** |
|  | 314.05 | 4 | Perfluorohexanoic acid | $CF_3–(CF_2)_4–COOH$ | **PFHxA** |
|  | 414.07 | 6 | Perfluorooctanoic acid | $CF_3–(CF_2)_6–COOH$ | **PFOA** |
|  | 464.08 | 7 | Perfluorononanoic acid | $CF_3–(CF_2)_7–COOH$ | **PFNA** |
|  | 514.09 | 8 | Perfluorodecanoic acid | $CF_3–(CF_2)_8–COOH$ | **PFDA** |
| | 564.09 | 9 | Perfluoroundecanoic acid | $CF_3–(CF_2)_9–COOH$ | **PFUnDA** |
|  | 614.10 | 10 | Perfluorododecanoic acid | $CF_3–(CF_2)_{10}–COOH$ | **PFDcA** |

من جهة أخرى، تمثل مركبات الأحماض السلفونية الفلورية (Perfluorosulfonic Acids, PFSAs) مثل PFOS و PFHxS مجموعة أخرى من PFAS تختلف عن PFCAs من حيث المجموعة الوظيفية الطرفية، حيث تحتوي على جذر سلفوني ($–SO_3H$) بدلاً من الكربوكسيل ($–COOH$) (جدول 2.2). تمنح هذه المجموعة المركب خصائص مميزة تشمل درجة حموضة أعلى وقدرة أكبر على الارتباط بالبروتينات، مثل الألبومين في بلازما الدم، ما يسهم في إطالة فترة بقائه في الجسم. يُلاحظ أن PFOS ($n = 7$) يعادل PFOA في طول السلسلة الكربونية، لكنه يتمتع بقدرة أعلى على

التراكم الحيوي والارتباط بالبروتينات، بينما تُظهر المركبات الأقصر مثل PFBS (n = 3) خصائص ثبات بيئي وتراكم حيوي أقل، ولهذا تُقترح أحيانًا كبدائل "أقل ضررًا"، رغم أن آثارها البيئية لا تزال قيد الدراسة.

**جدول 2.2:** التركيب الكيميائي لبعض الأحماض السلفونية الفلورية (PFSAs)

| الاسم الشائع (Common Name) | الصيغة الكيميائية (Formula) | الاسم النظامي (IUPAC Name) | ذرات الكربون (n) | الكتلة الجزيئية (g/mol) | التركيب البنيوي (Structural Formula) |
|---|---|---|---|---|---|
| **PFBS** | $CF_3–(CF_2)_3–SO_3H$ | Perfluorobutane sulfonic acid | 3 | 300.09 |  |
| **PFHxS** | $CF_3–(CF_2)_5–SO_3H$ | Perfluorohexane sulfonic acid | 5 | 400.11 |  |
| **PFOS** | $CF_3–(CF_2)_7–SO_3H$ | Perfluorooctane sulfonic acid | 7 | 500.13 | |
| **PFDS** | $CF_3–(CF_2)_9–SO_3H$ | Perfluorodecane sulfonic acid | 9 | 600.14 |  |

تشير العديد من الدراسات إلى علاقة طردية بين طول السلسلة الكربونية وزيادة زمن المكوث في البيئة ، وزيادة التراكم في الأنسجة، وارتفاع السمية على الكبد والهرمونات والغدد الصماء. وبناءً عليه، تُعد PFAS ذات السلاسل الطويلة مثل PFOS و PFDA من المواد الكيميائية ذات الأولوية في السياسات البيئية. تتصف PFAS بثبات بيئي مرتفع نتيجة لتركيبها الكيميائي الغني بروابط C–F القوية، ما يجعلها مقاومة للتحلل البيولوجي والكيميائي. هذا الثبات يُمكنها من البقاء في التربة، الهواء، والمياه لفترات طويلة، بل والانتقال لمسافات بعيدة .[38,39] في البيئات المائية، ترتبط PFAS بالجسيمات النانوية والمواد الدبالية والطين، مما يعزز من ثباتها وانتقالها إلى المياه الجوفية [40] .وبسبب استخدام PFAS الواسع النطاق، يزداد انتشارها باستمرار في البيئة، في ظل صعوبة المعالجة الحالية، التي تتطلب درجات حرارة عالية أو تقنيات متقدمة لتفكيكها الكامل [41] . في البيئات البحرية، تُظهر هذه المركبات قابلية عالية للتراكم في الرواسب والكائنات البحرية، وقد تنتقل عبر السلسلة الغذائية لتصل إلى الإنسان. وتفرض خصائصها الكيميائية والبيئية تحديات كبيرة أمام جهود إدارة مركبات PFAS ، مما يستدعي تطوير بدائل أكثر أمانًا وتقنيات معالجة فعّالة.

شهدت العقود الأخيرة تحولًا تدريجيًا في تنظيم استخدام مركبات PFAS التقليدية، لا سيما حمض البيرفلوروأوكتان سلفونيك (PFOS) وحمض البيرفلوروأوكتانويك (PFOA) ، نتيجة للقلق المتزايد بشأن ثباتها البيئي وسميتها المزمنة. وقد أدى هذا الحظر إلى تطوير واعتماد مجموعة من البدائل الكيميائية المعروفة باسم الأنواع المستحدثة من مركبات PFAS . تتضمن هذه المركبات الجديدة أصنافًا متعددة مثل: PFESA, PFECAs, PFBS, PFBA, FTSA, F53B، ومركبات GenX ومنها HFPO-DAوملحه الأمونيومي، وتُستخدم في تطبيقات صناعية تشمل: الطلاء الكهربائي، تصنيع البوليمرات الفلورية، إنتاج رغوات مكافحة الحرائق.

تم تصميم هذه المركبات بهياكل جزيئية معدّلة (مثل سلاسل كربونية أقصر، روابط إيثرية، واستبدال الفلور بعناصر أخرى) بهدف تقليل الاستمرارية والسمية. ومع ذلك، تُظهر دراسات متزايدة أن بعض هذه البدائل – وخصوصًا PFBS و – GenX تحتفظ بخصائص الثبات البيئي والتنقل في الأوساط المائية والتراكم الحيوي، مع احتمالات سمية مثيرة للقلق [42].وقد صنّفت وكالة حماية البيئة الأمريكية (USEPA) مركبات GenX كمركبات عالية الخطورة، وحددت لها جرعة مرجعية مزمنة تبلغ $3 \times 10^{-6}$ ملغ/كغ/يوم [43]، بينما أدرجتها هولندا ضمن قائمة المواد ذات القلق العالي بسبب سميتها وبقائها في البيئة.

تم الإبلاغ عن وجود هذه المركبات في: مياه الصرف الصناعي، حمأة محطات المعالجة، الأنهار والمسطحات السطحية، وقد لوحظ ذلك في عدة دول من بينها الولايات المتحدة، الاتحاد الأوروبي، الصين، وأستراليا، حيث سجلت بعض المواقع تراكيز مرتفعة تتطلب تدخلًا تنظيميًا عاجلًا [44,45] من الجدير بالذكر أن منذ عام 2009، تم تسجيل أكثر من 450 مركبًا جديدًا ضمن فئة PFAS ، ويُعتقد أن عددًا منها يعمل كسوابق كيميائية (Precursors) قد تتحول إلى PFOS أو PFOA في ظل ظروف بيئية معينة[42] .

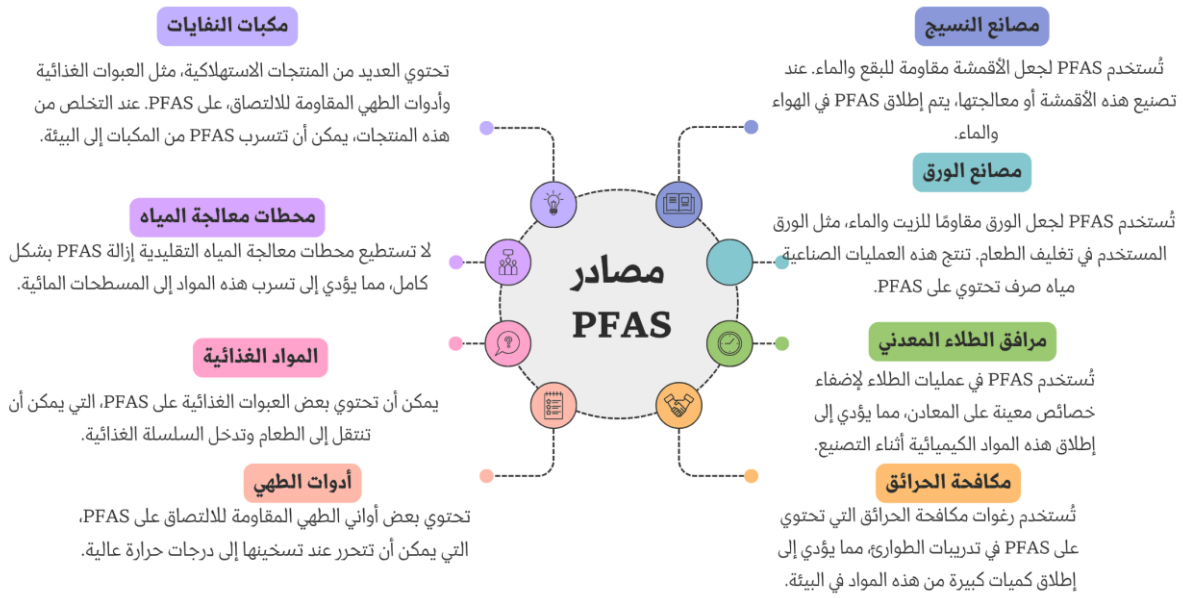
**2.5 مصادر مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة**

تُعد مياه الصرف الصناعي من أبرز مصادر التلوث بهذه المركبات، سواء بشكل مباشر من المصانع التي تنتجها أو بشكل غير مباشر عند استخدامها في تصنيع مركبات أخرى[3,7] ، وتُشكل أيضاً محطات معالجة المياه العادمة التقليدية مصدرًا إضافيًا لهذا التلوث، لكونها تفتقر إلى القدرة على إزالة مركبات PFAS بكفاءة بسبب مقاومتها العالية للمعالجة البيولوجية، مما يؤدي إلى تسربها إلى المسطحات المائية والتربة عبر المياه المعالجة والحمأة الناتجة عنها، التي تُستخدم أحيانًا لتسميد التربة الزراعية، الأمر الذي يُساهم في انتقالها إلى المياه الجوفية [3,46] ومن الممارسات الأخرى المسببة للتلوث تصريف المياه الملوثة بمركبات PFAS في مكبات النفايات، حيث يؤدي ترشيح هذه المواد بمرور الوقت إلى تلوث التربة والمياه الجوفية المحيطة [3,7] .أما في الهواء، فإن الحرق غير النظامي للحمأة الصناعية المحتوية على PFAS يؤدي إلى إطلاق هذه المركبات في الغلاف الجوي مع الانبعاثات الغازية، لتشكل تهديدًا بيئيًا واسع النطاق، لا سيما في فصل الشتاء حيث تزداد احتمالات انتقالها بفعل الأمطار إلى التربة والمياه[3].

تُشير الأدبيات إلى أن منشآت التصنيع تُعد من المصادر الأساسية لانبعاث PFAS، حيث تُستخدم في مصانع النسيج لمنح الأقمشة مقاومة للبقع والماء، وفي مصانع الورق لإنتاج أوراق مقاومة للزيت والرطوبة، وهو ما يُفضي إلى إطلاق هذه المواد في الهواء ومياه الصرف الصناعي [9,47] كما تُستخدم PFAS في مرافق الطلاء المعدني لتحسين خصائص المعادن السطحية، مما ينتج عنه انبعاثات هوائية ومائية ضارة [48] وتُعد رغوات مكافحة الحرائق من أخطر المصادر، إذ يؤدي استخدامها المكثف في المطارات والمنشآت الصناعية إلى تسرب مباشر لمركبات PFAS إلى التربة والمياه الجوفية [49,50]

وتشكل مكبات النفايات مصدرًا طويل الأمد لتسرب PFAS من المنتجات الاستهلاكية مثل أدوات الطهي غير اللاصقة وعبوات تغليف الطعام، حيث تُسهم مياه الرشح في نقل هذه المركبات إلى التربة والمياه الجوفية [9,51] . أما محطات معالجة مياه الصرف الصحي، فأنها غالبًا ما تكون غير مجهزة لمعالجة PFAS بفعالية، ما يؤدي إلى تصريفها إلى

الأنهار والبحيرات وتراكمها في السلاسل الغذائية [48,52] إضافة إلى ذلك، تُعد المنتجات الغذائية والأدوات المنزلية مصدرًا مباشرًا للتعرض البشري، حيث تحتوي بعض عبوات الطعام وأواني الطهي على مركبات PFAS التي قد تنتقل إلى الطعام عند التعرض للحرارة [53,54] إن تعدد مصادر التلوث وانتشار مركبات PFAS في مختلف الأوساط البيئية (ماء، تربة، هواء) يعزز تعقيد إدارتها والحد من آثارها، ويؤكد الحاجة إلى استراتيجيات متكاملة للرقابة والمعالجة والبدائل المستدامة (شكل 2.2).



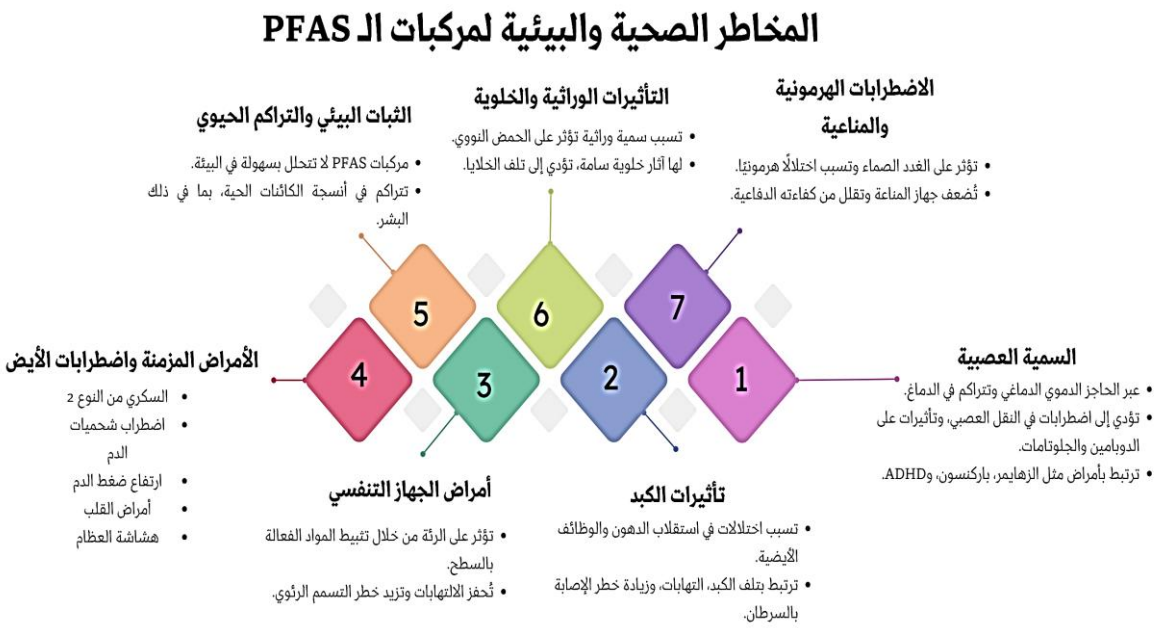

**شكل 2.2:** توضح مصادر مركبات البير-والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة

### 2.6 المخاطر الصحية والبيئية لمركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS)

على الرغم من الاستخدامات الصناعية والخدمية المتعددة لمركبات البير-والبولي فلوروألكيل (PFAS) ، إلا أن هذه المركبات تخضع حاليًا لتدقيق علمي وتنظيمي مكثف نظرًا لما تتمتع به من ثبات كيميائي عالٍ، وقدرة كبيرة على التراكم الحيوي في أنسجة الكائنات الحية، إلى جانب ارتباطها المباشر بعدد من المخاطر الصحية الجسيمة. فقد أثبتت الأدلة المتزايدة أن التعرض لمركبات PFAS يرتبط بآثار سامة متعددة، من بينها زيادة مخاطر الإصابة بالسرطان، السُمية الخلوية والوراثية، اضطرابات الغدد الصماء، تثبيط الجهاز المناعي، إضافة إلى التداخل مع العمليات الأيضية والتأثير المحتمل على مستقبلات فيتامين (د) [55]. ويحظى تأثير PFAS على الجهاز العصبي باهتمام خاص، حيث تبرز كمصدر قلق بالغ نظرًا لقدرتها على اختراق الحاجز الدموي الدماغي والتراكم داخل أنسجة الدماغ، ما يؤدي إلى اضطرابات في عمليات النقل العصبي ووظائف الخلايا العصبية. وقد رُبط هذا التعرض بخلل في نظامَي الدوبامين والجلوتامات، وهما عنصران رئيسيان في تنظيم الوظائف الدماغية الطبيعية، ولهما علاقة مباشرة بالأمراض العصبية التنكسية مثل داء باركنسون ومرض ألزهايمر [56] . وتشير دراسات أخرى إلى أن التعرض لمركبات PFAS في مراحل النمو المبكرة – خاصة خلال الحمل – يمكن

أن يخترق الحاجز المشيمي ويؤثر سلبًا على النمو العصبي للجنين، مما يزيد من احتمالية الإصابة باضطرابات النمو العصبي مثل اضطراب فرط الحركة ونقص الانتباه (ADHD) [57,58]. ولا يقتصر التأثير السمي لمركبات PFAS على الجهاز العصبي فحسب، بل يتعداه ليشمل الكبد، بوصفه العضو الرئيس المسؤول عن عمليات التمثيل الغذائي وإزالة السموم. وقد أوضحت دراسات وبائية وجود ارتباط بين التعرض لمركبات PFAS وزيادة مخاطر تلف الكبد، الإصابة بأمراض الكبد الدهنية، تأخر النمو، واضطرابات أيضية معقدة [59] وتعمل هذه المركبات عبر عدة آليات بيولوجية تشمل اختلال تنظيم استقلاب الدهون، التأثير على ناقلات البروتين، وتعزيز الإجهاد التأكسدي والالتهابات[60,61]

كما أظهرت بيانات حديثة أن التعرض لمركبات PFAS ، وخاصة PFOS وPFOA، يُشكل تهديدًا لصحة الرئة، إذ تبين أنها تؤثر على وظائف المواد الفعالة بالسطح الرئوي، وتُحفز استجابات التهابية في الخلايا الظهارية للشعب الهوائية، مما يُثير القلق بشأن زيادة احتمالية حدوث التهابات في مجرى التنفس والتعرض للتسمم الرئوي [62] وتتضح خطورة PFAS أيضًا من خلال علاقتها باضطرابات التمثيل الغذائي، خاصة داء السكري من النوع الثاني، وقد تم توثيق هذه العلاقة في الفئات العمرية الأصغر سنًا، مما يشير إلى قابلية عالية للتأثر لدى صغار السن [63] كذلك، رُبطت هذه المركبات بزيادة مخاطر الإصابة بالأمراض المزمنة، مثل اضطراب مستويات الدهون في الدم، ارتفاع ضغط الدم، أمراض القلب الإقفارية، وأمراض العظام كالتحلل العظمي [64] (شكل 2.3)




**شكل 2.3 :** المخاطر الصحية المرتبطة بالـPFAS

أُجريت دراسات عديدة على مركبات PFAS باستخدام نماذج حيوانية مثل الفئران والجرذان، بهدف تقييم سميتها واستنباط آليات التأثير البيولوجي على أعضاء الجسم المختلفة. وقد أظهرت هذه النماذج الحيوانية، خصوصًا القوارض، تقاربًا في نمط التأثيرات السمية مع الإنسان، مما يسهّل استكشاف التأثيرات الجزيئية والدوائية المحتملة لهذه المركبات [65,66] ومع أن الدراسة الفردية لجميع مركبات PFAS المعروفة، تُعد غير ممكنة بسبب عددها الهائل، فإن

الاتجاه الحديث يعتمد على النمذجة الحاسوبية لتخمين سميتها المحتملة.[67] وفقًا لدراسة تجريبية، بلغت الجرعة المميتة الوسطية ($LD_{50}$) لمركب PFOS في الفئران 579 ملغم/كغم من وزن الجسم عبر الطريق الفموي[68] ، مما يصنّفه كمركب متوسط السمية ضمن الفئة الرابعة حسب تصنيف السميات[69] وأكدت دراسة أخرى باستخدام الجرذان أن $LD_{50}$ تراوحت بين 250 و500 ملغم/كغم[70]، وهي نتائج متباينة تُعزى إلى اختلاف الأنواع الحيوانية والظروف التجريبية . بالاعتماد على البرمجية التنبؤية ProTox 3.0، جرى تحليل السمية الحاسوبية لأكثر مركبين شيوعًا في فئة PFAS ، وهما: PFOA و PFOS وأظهرت النتائج القيم التالية $LD_{50}$: لPFOA 518 ملغم/كغم $LD_{50}$لPFOS 1190 ملغم/كغم وقد بيّن البرنامج أيضًا تصنيفات السمية وفقًا لأهداف بيولوجية محتملة، منها: PFOA تأثير مسرطن (احتمالية 0.63)، سمية كلوية (0.51)، تعطيل الحاجز الدموي الدماغي (0.97)، تنشيط p53 (0.77) ، ارتباط بمستقبلات PXR (0.55) PFOS سمية كبدية (0.69)، كلوية (0.87)، تنفسية (0.98)، مناعية (0.96)، بيئية (0.73)، بالإضافة إلى تأثيرات على إنزيم الأروماتيز ومستقبلات الإستروجين (1.0) . كما جرى اعتماد برنامج pkCSM لتحليل الخصائص السمية الديناميكية والدوائية، وأظهر النتائج الموضحة في الجدول 2.3 أدناه .

**جدول 2.3** برنامج pkCSM لتحليل الخصائص السمية الديناميكية والدوائية لمركبات PFOS و PFOA

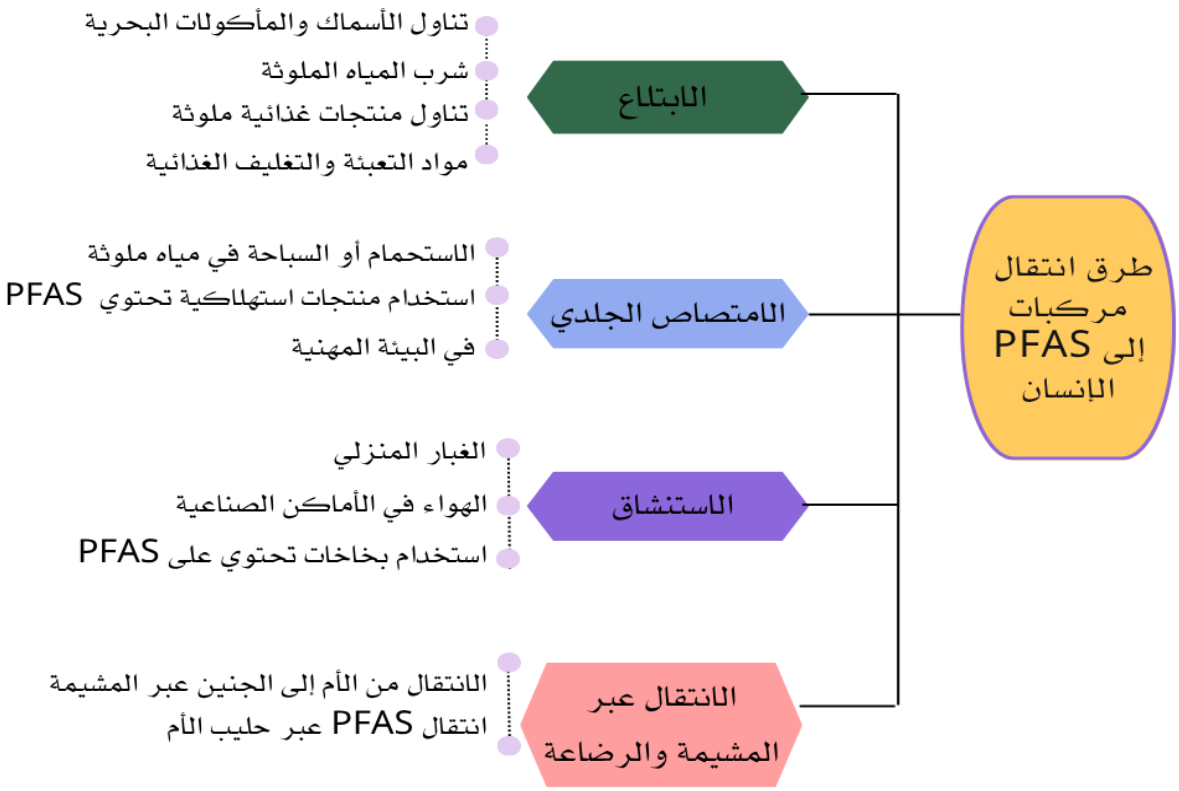
| الخاصية | PFOS | PFOA |
|---|---|---|
| اختبار Ames تحور جيني | غير موجب | غير موجب |
| الجرعة اليومية القصوى المتحمّلة | -0.035 (log mg/kg/day) | -0.069 (log mg/kg/day) |
| $LD_{50}$ فموية (مول/كغم) | 3.438 | 4.336 |
| LOAELمزمن (log mg/kg/day) | -0.454 | -0.486 |
| سمية كبد | موجب | موجب |
| سمية *T. Pyriformis* | 0.284 µg/L | 0.537 µg/L |
| سمية سمكة المينو (log mM) | 1.634 | 2.081 |

### 2.7 مسارات انتقال مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) إلى الإنسان

أظهرت الدراسات ان PFAS تنتقل إلى الإنسان عبر عدة مسارات رئيسية، تختلف بحسب طبيعة المصدر البيئي ومدى التعرض (شكل 2.4). يُعتبر الغذاء ومياه الشرب من أكثر الوسائط شيوعًا في التعرض البشري. حيث أن استهلاك الأسماك والمأكولات البحرية يُمثل مسارًا مهمًا لتراكم PFAS في جسم الإنسان، نظرًا لقدرة هذه المركبات على التراكم الحيوي في الأنسجة، لا سيما في الكبد والدم [52,71] . كما لوحظ وجود تراكيز مرتفعة من PFAS في منتجات غذائية أخرى مثل اللحوم ومنتجات الألبان والخضروات، خاصةً عند ري المحاصيل أو تغذية الحيوانات بمصادر ملوثة [72] . من جهة أخرى، تُعد مياه الشرب الملوثة مصدرًا رئيسيًا للتعرض، خصوصًا في المناطق القريبة من منشآت تصنيع PFAS ، أو مواقع استخدام رغوة مكافحة الحرائق (AFFF) ، أو مدافن النفايات [73] وقد وثقت دراسات وجود تركيزات مقلقة من PFAS في مياه الشرب في العديد من الدول، ما دفع إلى تطوير حدود معيارية جديدة لهذه المركبات [49] . أما فيما يخص البيئة المنزلية، فقد تبين أن الغبار المنزلي يلعب دورًا غير مباشر لكنه مهم، خاصة نتيجة الانبعاثات من الأقمشة المقاومة للماء، السجاد، أواني

الطهي غير اللاصقة، ومواد تغليف الأغذية، مما يزيد من احتمالية الاستنشاق أو الابتلاع العرضي، لا سيما لدى الأطفال [53,74].

وتُعد البيئة المهنية مصدرًا إضافيًا للتعرض، خاصة لدى العاملين في الصناعات الكيميائية، الإطفاء، أو التطبيقات التي تشمل استخدام منتجات تحتوي على PFAS ، حيث يمكن أن يحدث امتصاص عبر الجلد أو الاستنشاق لفترات طويلة[75] كما أن هناك أدلة متزايدة تشير إلى انتقال PFAS من الأم إلى الجنين عبر المشيمة، ومن ثم إلى الرضيع عبر حليب الثدي، مما يشير إلى تعرض مبكر قد يؤثر على النمو والمناعة[54,76]




**شكل 2.4 :** يوضح مسارات و طرق انتقال PFAS الى الإنسان

## الفصل الثالث: مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة العربية: القيود والتحديات والفرص

يركز هذا الفصل على الوضع العربي فيما يتعلق بمركباتPFAS ، يناقش التحديات التي تواجه البحث مثل غياب التشريعات الواضحة، ضعف القدرات المخبرية، واعتماد الباحثين على مختبرات أجنبية لتحليل العينات. كما يستعرض الفرص المتاحة مثل إمكانية إنشاء قواعد بيانات إقليمية، تطوير بروتوكولات موحدة، وبناء شراكات بين الجامعات ومراكز البحث. يشير الفصل إلى غياب التمويل الكافي للأبحاث البيئية في معظم الدول العربية، ما يؤدي إلى فجوات معرفية كبيرة مقارنة بالمستوى الدولي.

### 3.1 التقييم والمراقبة البيئية لمركبات PFAS في البيئة العربية: القيود والتحديات والفرص

تُعد المنطقة العربية منطقة جيوسياسية تضم مجموعة متنوعة من الدول التي تمتد عبر قارتي آسيا وإفريقيا. تُعرف هذه الدول بكونها من أكثر المناطق جفافًا والأقل توافرًا للمياه العذبة للفرد في العالم، رغم تحقيقها نمواً اقتصادياً واجتماعياً سريعاً منذ الثورة النفطية في السبعينيات[77] . ولقد ساهمت الأنشطة الصناعية مثل تحلية المياه وتوليد الطاقة والصناعات البتروكيماوية في تحسين مستويات المعيشة بسكان المنطقة العربية [78]ومع ذلك، أدت هذه الأنشطة إلى إنتاج كميات كبيرة من النفايات التي تضر بالبيئة، خاصةً مع الاستخدام المفرط لمواد مثل PFAS في الأنشطة الصناعية والزراعية، حيث تُستخدم مركبات PFAS في العديد من التطبيقات المختلفة مثل رغوة مكافحة الحرائق، ومواد التشحيم، أدوات المطبخ غير اللاصقة ، والورق والسجاد، بالإضافة إلى مواد التلميع والمستحلبات [79]

تركز الحكومات في العديد من الدول العربية على دعم أبحاث مصادر المياه لمواجهة تحديات ندرة المياه والممارسات الشائعة لإعادة استخدام مياه الصرف في الزراعة، إلا أن مياه الصرف المعالجة وغير المعالجة تُعد أحد المصادر الرئيسية لـ PFAS في البيئة [80]. وبينما تناولت عدة دراسات منذ عام 2005 م وجود المبيدات العضوية الكلورينية (OCPs) وثنائيات الفينيل متعددة الكلور (PCBs) والهيدروكربونات العطرية عديدة الحلقات (PAHs) في البيئة [81-83]، فإن الدراسات التي ركزت على تلوث البيئة بـ PFAS كانت قليلة، إذ نُشر أول تقرير عن PFAS في عام 2015م. وأظهرت دراسة حديثة في المملكة العربية السعودية أجراها بنجابي واخرون[84] دور PFAS في هشاشة العظام، حيث زاد وجود PFAS في المصل من احتمالية الإصابة به بمقدار يتراوح بين 2.3 إلى 96 مرة نتيجة تأثيره السلبي على أيض العظام . كما تم الكشف عن وجود PFAS في حليب الثدي لدى النساء اللاتي يستخدمن منتجات العناية الشخصية مثل العطور ومزيلات العرق ومنتجات الشعر ومستحضرات العناية بالبشرة في لبنان والأردن، على الرغم من أن آلية انتقالها إلى الرضع لا تزال غير واضحة [79,85]. وعلى الجانب الاخر، تتميز مركبات PFAS بالتراكم الحيوي في الانسجه البيولوجية، حيث يبلغ نصف عمر حامض البيرفلوروأوكتان سلفونيك (PFOS) في الإنسان 5.4 سنة، بينما يبلغ نصف عمر حامض البيرفلوروكتانويك (PFOA) 3.8 سنة [86]

على الرغم من التقدم الدولي في تطوير الأطر التنظيمية لرصد وإدارة مركبات البولي فلوروألكيل (PFAS) ، لا تزال معظم الدول العربية تفتقر إلى أنظمة مراقبة وتشريعات فعّالة تُعنى بتواجد هذه المركبات في مختلف البيئات (التربة، المياه، الهواء). وقد أشار شعيب وفريقه [87] إلى أن بعض الأنظمة في مصر، على سبيل المثال، تسمح باستيراد منتجات تحتوي على PFOS بتركيزات لا تتجاوز 1 ميكروغرام/متر² في المواد المطلية، أو 0.1% من محتوى المنتج، ما يعكس غياب ضوابط محلية صارمة أسوة بالمعايير الدولية. في المقابل، اعتمدت دولة الكويت خطة التنفيذ الوطنية (NIP) ضمن التزاماتها باتفاقية ستوكهولم لتقليل الملوثات العضوية الثابتة، بما يشمل PFOS ، إلا أن الخطة لا تُخصص معالجة تنظيمية شاملة لمجموعة مركبات PFAS ككل. ويُعزى هذا القصور إلى عدد من العوامل الهيكلية، من أبرزها نقص المعدات التحليلية المتقدمة، محدودية الكفاءات الوطنية المؤهلة، وضعف القدرات المؤسسية في الكشف عند التراكيز المنخفضة.[88]

في السياق المصري، تُعد التشريعات البيئية المنظمة للمواد الكيميائية الخطرة ركيزة أساسية للسياسة البيئية، لا سيما القانون رقم 4 لسنة 1994 وتعديلاته بموجب القانون رقم 9 لسنة 2009، والذي يشترط الحصول على تراخيص

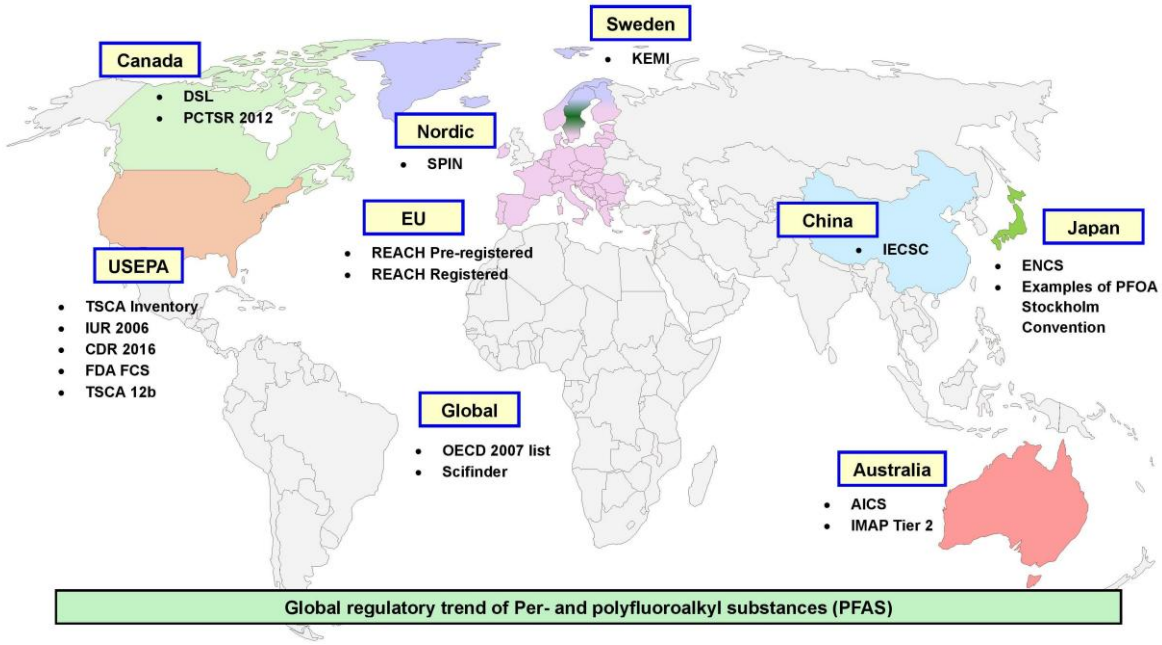
مسبقة للتعامل مع المواد الخطرة، وتدعمه حزمة من القرارات التنفيذية مثل القرار 338 لسنة 1995 وتعديلاته اللاحقة. ومع ذلك، لم يصدر حتى الآن قانون وطني محدد ينظم مركبات PFAS ، رغم خضوع هذه المواد لأحكام الاتفاقيات البيئية الدولية، خاصة اتفاقية ستوكهولم، التي انضمت إليها مصر عام 2004، وتم بموجبها حظر PFOS اعتبارًا من 2010[118,119].

تزداد أهمية تقنين وتنظيم مركبات PFAS في الدول في ظل تزايد صرامة المعايير الدولية الخاصة بمياه الشرب . فقد اقترحت وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) حدودًا تنفيذية صارمة تبلغ 4 أجزاء لكل تريليون (ng/L) لكل من مركبي PFOA و PFOS في مياه الشرب، كما حدد التوجيه الأوروبي (EU Drinking Water Directive) حدًا أقصى قدره 0.1 ميكروغرام/لتر لمجموع 20 مركبًا من PFAS . وفي السياق ذاته، اعتمدت دول شرق آسيا مثل اليابان، الصين، وكوريا الجنوبية سياسات متقدمة في هذا المجال، حيث أدرجت PFOS ضمن الفئة الأولى من المواد المحظورة وحددت معايير جودة مياه تتراوح بين 50 و 100 نانوغرام/لتر، مع حظر تصنيعه واستخدامه في تطبيقات عديدة. كما أوصت منظمة الصحة العالمية (WHO) في إصدارها الأخير عام 2022، بخفض الحدود الاسترشادية لمركبات PFOS و PFOA في مياه الشرب إلى أقل من 0.02 ميكروغرام/لتر، مما يعكس التحول العالمي نحو نهج وقائي أكثر صرامة في التعامل مع هذه الملوثات الخطرة[89] . وتتطلب هذه التطورات التنظيمية من الدول العربية مواءمة سياساتها البيئية مع المستويات والمعايير الدولية، خاصة في ظل ما أشار إليه تقرير برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP) الصادر عام 2023، والذي خلص إلى أن منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا تُعد من أكثر المناطق تأثرًا بغياب أنظمة فعالة لرصد مركبات PFAS والتعامل معها بشكل ممنهج [90]

وبالإضافة إلى تحديات التشريع، يبقى توثيق التلوث البيئي بمركبات PFAS ، لا سيما في المياه الجوفية، لا يزال محدودًا إلى حد كبير في المنطقة العربية. ففي حين وثّقت دول مثل فيتنام وماليزيا وتايلاند انتشارًا واسعًا لتلوث PFAS في مواردها المائية، لا تزال المبادرات العربية مقتصرة على بعض ورش العمل التدريبية المحدودة، دون وجود استراتيجيات متكاملة للرصد والرقابة. ويُعد ذلك مقلقًا بشكل خاص في ظل تزايد الاعتماد على المياه الجوفية غير المعالجة في المناطق الحضرية والتي تعاني من ضغوط مناخية وشحّ في الموارد المائية.

يوضح الشكل 3.1 الاتجاهات التنظيمية العالمية لمركبات البولي فلوروألكيل(PFAS) ، ويكشف عن تفاوت كبير بين الدول في مستوى التشريعات وآليات الرقابة على هذه المواد ذات الأثر البيئي والصحي الضار. تُظهر الدول الصناعية الكبرى مثل الولايات المتحدة، وكندا، والاتحاد الأوروبي، وأستراليا وجود أطر تنظيمية متقدمة تشمل قواعد بيانات متخصصة وأنظمة ترخيص وتقييم للمواد الكيميائية، مثل TSCA وREACH وCRD وAICS، وهو ما يعكس استجابة تشريعية قوية لمخاطر PFAS . في المقابل، تمتلك دول أخرى مثل الصين واليابان أنظمة تنظيمية أقل شمولًا أو لا تزال في مراحل التطوير، بينما تفتقر العديد من دول الجنوب العالمي إلى تنظيمات واضحة وفعالة، ما يشير إلى فجوة واضحة في العدالة البيئية. كما تبرز أدوات إقليمية ودولية مثل قاعدة SPIN الاسكندنافية وقائمة منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD) كمحاولات لتعزيز الشفافية وتوحيد الجهود الرقابية. ومع الاعتراف المتزايد بسمية مركبات PFASوثباتها البيئي، فإن هذه التنظيمات تمثل أداة مركزية للحد من التعرض لها وحماية الصحة العامة. ومع ذلك، فإن

غياب التنسيق الدولي الكامل وضعف القدرات المؤسسية في بعض الدول يفرض تحديات كبيرة، ويؤكد الحاجة إلى سياسات موحدة وملزمة قائمة على الأدلة العلمية، وفقًا لما ورد في الأدبيات الحديثة[91]




**شكل 3.1** الاتجاهات التنظيمية العالمية لمركبات البولي فلوروألكيل (PFAS) عبر الأقاليم والدول[91]

تُعد الولايات المتحدة الأمريكية من أكثر الدول تقدمًا في التعامل مع PFAS ، حيث وضعت وكالة حماية البيئة (EPA) خارطة طريق وطنية تتضمن حدودًا تنظيمية واضحة، وبرامج مراقبة على مستوى الولايات، وخططًا طويلة الأجل لإزالة هذه المركبات من مياه الشرب والبيئة. بالمثل، اعتمد الاتحاد الأوروبي نهجًا تشريعيًا قويًا، خصوصًا بعد إدراج PFAS ضمن اتفاقية ستوكهولم للملوثات العضوية الثابتة، مما منح القضية زخمًا دوليًا. أما في دول مثل السويد وكندا وألمانيا، فقد أولت اهتمامًا خاصًا بالعلاقة بين التعرض الغذائي ومخاطر الصحة العامة، مع اعتماد تحذيرات استهلاكية وتنظيم الأغذية، إلى جانب جهود تقنية في معالجة المياه. وفي آسيا، تُبرز الصين واليابان نماذج استثمارية في تطوير القدرات التحليلية، والبحث عن حلول معالجة منخفضة التكلفة مثل استخدام الفحم المنشط (جدول 3.1).

**جدول 3.1**: الإجراءات العالمية لمواجهة تلوث مركباتPFAS

| البلد / المنطقة | الحلول والإجراءات المتخذة | ملاحظات إضافية |
|---|---|---|
| **الولايات المتحدة** | -وضع حدود تنظيمية صارمة (4 ng/L) لـ PFOS وPFOA<br>-إعداد خارطة طريق وطنية لPFAS<br>-تنفيذ برامج مراقبة على مستوى الولايات | تُعد من الدول الأكثر تقدمًا عالميًا في تنظيمPFAS |
| **الاتحاد الأوروبي** | -حظر بعض مركبات PFAS مثل PFOS وPFHxS<br>-ضم PFAS لاتفاقية ستوكهولم كملوثات دائمة | تنظيم متدرج حسب الدولة |
| **أستراليا** | -رصد بيئي مكثف قرب مواقع الدفاع والمدافن<br>- تنفيذ برامج تنظيف لمواقع AFFF السابقة | تركيز على المعسكرات العسكرية القديمة |
| **الصين** | -تطوير قدرات التحليل المختبري<br>-مراقبة التلوث قرب المصانع والمزارع | تم رصد تركيزات عالية، ويجري التدخل تدريجيًا |
| **كندا** | -مراقبة مصادر مياه الشرب<br>-إعداد مبادئ توجيهية للتعرض المزمن | برنامج اتحادي لمياه الشرب |
| **السويد** | -مراقبة PFAS في المياه والأسماك<br>-تنبيهات غذائية لتقليل استهلاك بعض الأسماك المحلية | دمج المخاطر الصحية بالغذائية |
| **ألمانيا** | -تجارب باستخدام الأغشية الجديدة والتقنيات المتقدمة لمعالجة المياه<br>-تحكم بالتصريف الصناعي | تركيز على معالجة المياه الصناعية |
| **اليابان** | -تطوير تقنيات امتصاص جديدة مثلbiochar ، الفحم المنشط<br>-تمويل الأبحاث البيئية | استثمار تقني في المعالجة |

### 3.2 الوضع الحالي لأبحاث مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة العربية

رغم التقدم العالمي في تقنين ورصد مركبات PFAS ، لا يزال الوضع في المنطقة العربية متأخرًا على عدة مستويات. فعلى صعيد الالتزامات الدولية، تُعد 16 دولة من أصل 22 دولة عربية أطرافًا في اتفاقية ستوكهولم بشأن الملوثات العضوية الثابتة (POPs)، والتي تُعد الإطار الدولي الأهم للتحكم في استخدام وانتشار المركبات ذات السمية العالية. وقد شاركت بعض الدول، مثل تونس، في مبادرات دولية لتعزيز قدراتها الفنية، من بينها "الخطة العالمية لمراقبة الملوثات"، التي تهدف إلى تدريب الفنيين على أخذ العينات وتحليلها وإنشاء قواعد بيانات[88]

ومع ذلك، لا تزال مركبات PFAS خارج قائمة الملوثات العضوية المصنفة رسميًا ضمن اتفاقية ستوكهولم (حتى عام 2024)، كما لا توجد في معظم الدول العربية أنظمة تنظيمية أو تشريعية مخصصة لها. وأظهرت مراجعة حديثة للدراسات المنشورة في دول مجلس التعاون الخليجي (GCC) وجود سبع دراسات فقط موثقة في قاعدة بيانات PubMed [99] في مراجعة أوسع شملت جميع الدول العربية، تم العثور على 12 دراسة فقط منشورة في مجلات علمية حتى تاريخ إعداد هذا التقرير، وتوزعت على النحو التالي: السعودية (4)، الأردن (2)، مصر (1)، تونس (1)، البحرين (1)، الجزائر (1)، لبنان (1)، والسودان (1). تناولت هذه الدراسات تركيزات PFAS في وسائط بيئية متنوعة، شملت: المياه، الرواسب، الساحل، التربة، الحليب، الأسماك، الغبار، ومصل الدم (جدول 3.2)

يُشار إلى أن أولى الدراسات العربية حول PFAS أُجريت في الأردن ومصر عام 2013، ونُشرت نتائجها لاحقًا في عامي 2015 و2016 [85,87] وتعكس هذه الأرقام محدودية البحث العلمي العربي في هذا المجال مقارنةً بالاتجاهات الدولية، وتُبرز الحاجة الملحة إلى تعزيز القدرات البحثية والتحليل البيئي في المنطقة.

وفي دراسة تحليلية أُدرجت ضمن تقرير صادر عن منظمة IPEN [100] تم الكشف عن مستويات مقلقة من تلوث مركبات PFAS في مواد تغليف الأغذية الورقية والنباتية ذات الاستخدام الواحد في ست دول من منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، وهي: تونس، مصر، الأردن، الكويت، المغرب، وقد شملت الدراسة تحليل 44 عينة تغليف غذائي باستخدام التحليل الطيفي الكتلي، حيث أظهرت النتائج أن 59% من العينات كانت إيجابية للكشف عن الفلور العضوي القابل للاستخلاص (EOF) أو مركبات PFAS المستهدفة. تراوحت تراكيز EOF في العينات الإيجابية بين 353 و10,374 جزء في المليون، بينما تراوحت تراكيز مركبات PFAS المستهدفة بين 1,847 و 7,182 جزء في البليون .وقد أظهرت النتائج أن أقل من 2% فقط من إجمالي EOF يُمكن نسبه إلى مركبات PFAS المعروفة، مما يشير إلى عبء تلوث ناتج عن مركبات غير معرّفة مخبريًا. والأهم من ذلك، أن نحو 52% من العينات تجاوزت الحدود التنظيمية الأوروبية المقترحة، لا سيما عينات أكياس البوشار وأغلفة الأطعمة النباتية المصنفة بأنها "قابلة للتحلل." كما أظهرت الدراسة تباينًا كبيرًا في الممارسات التصنيعية بين الدول، حيث تم رصد مؤشرات على المعالجة الكيميائية المتعمدة باستخدام PFAS في بعض أغلفة مطاعم عالمية بالأردن، بينما خلت عينات مماثلة من هذه المواد في المغرب، ما قد يعكس اختلافًا في السياسات التنظيمية أو في سلاسل التوريد.

**جدول 3.2** الدراسات التي أجريت في المنطقة العربية عن اكتشاف وتحديد وتركيزات مركبات الـ PFAS

| الدولة | نوع العينة | عدد المواد الكيميائية المدروسة | سنة الدراسة | أكثر مركبات **PFAS** شيوعاً | التركيزات | المراجع |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **مملكة البحرين** | رواسب | 13 | 2017 | PFDcA، PFOS، PFSA، PFCA | 0.05> إلى 1.37 نانوغرام/غرام (جاف) | 78 |
| **المملكة العربية السعودية** | مصل الدم | 17 | NR* | PFUnDA، PFPeA، PFNA، PFOS، PFHxS، PFBA، PFOA | 0.55 نانوغرام/مل إلى 5.08 نانوغرام/مل | 84 |
| | خضروات، رواسب ومياه السطحية | 21 | 2019 | PFOS وPFOA | 3.2 نانوغرام/غرام إلى 88 نانوغرام/لتر | 80 |
| | رواسب وأسماك صالحة للأكل | 16 | 2018 | PFOS | 0.57و2.6 في الرواسب، 3.89–7.63 نانوغرام/غرام في عضلات الأسماك، 17.9–58.5 نانوغرام/غرام في كبد الأسماك | 94 |
| | عينات مياه بحرية | 12 | 2015 | 6:2 FTS، PFOS، PFOA | 96–117 نانوغرام/لتر | 95 |
| **جمهورية مصر العربية** | الغبار الداخلي ومواد تعبئة وتغليف الطعام | 10 | 2013 | PFAS، PFOS، PFOA، FTOH | 1.3و69 نانوغرام/غرام | 87 |
| **الجمهورية التونسية** | عينات هواء | 8 | 2017 | PFOA، PFOS | 118.0–299.5 بيكوغرامPUF/ | 88 |
| | رخويات بحرية، قشريات وأسماك | 21 | 2018 | PFDoDA، PFTrDA، PFOS | 0.461–9.12 نانوغرام/غرام | 96 |
| **المملكة الأردنية الهاشمية** | مياه نهر الزرقا والنباتات | 20 | NR | PFPeA، PFOA، PFDA | 16إلى 27 نانوغرام/لتر في المياه، 340–970 بيكوغرام/غرام في التربة (جاف) | 93 |
| | حليب الثدي للنساء المرضعات وحليب البقر الطازج | 2 | 2013 | PFOAوPFOS | 10إلى 178 نانوغرام/لتر و10 إلى 160 نانوغرام/لتر | 85 |
| **الجمهورية الجزائرية** | لحوم حمراء وبيضاء، حليب وبيض | 34 | 2019 | PFOAوPFBA | 0.75–4.42 نانوغرام/غرام | 97 |
| **الجمهورية البنانية** | حليب الام | غير مذكور | 2015–2016 | PFOS، PFOA | 12–247 نانوغرام/لتر | 79 |
| **جمهورية السودان** | عينات سمك | 4 | 2021 | PFNA, PFDA, PFUnDA, PFOS | 4.0 - 331 ميكروجرام/كيلو جرام وزن رطب | 103 |

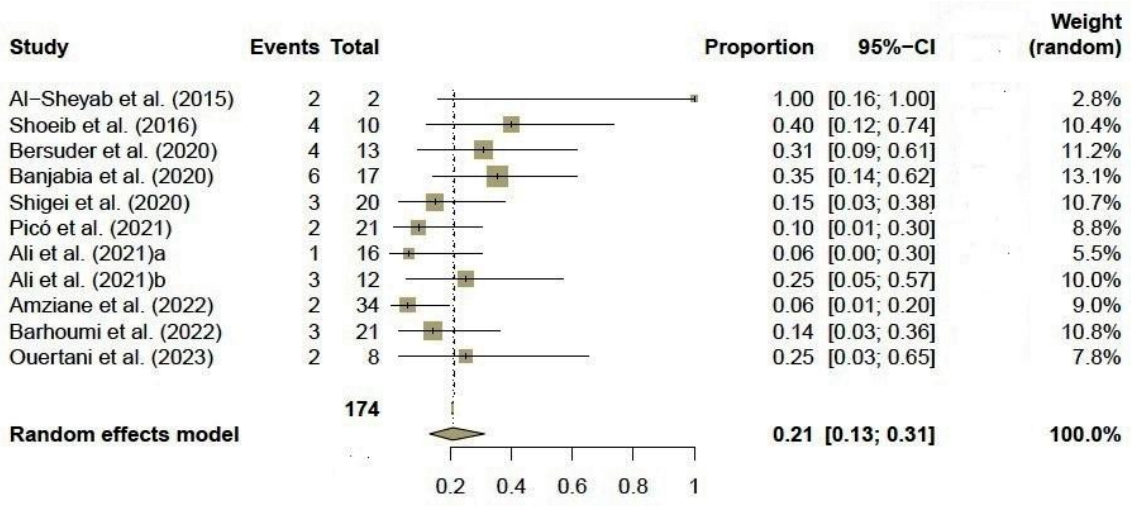
*NR غير مذكور

### 3.3 تحليل ميتا لأبحاث مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة العربية

تم إجراء تحليل ميتا (Meta-analysis) للدراسات المنشورة في الدول العربية بشأن الكشف عن مركبات PFAS وتحديد تراكيزها، باستخدام نموذج التأثير العشوائي (Random Effects Model) ، بهدف تقدير حجم التأثير الكلي وتحديد مستوى التغاير بين الدراسات، إضافة إلى تقييم احتمالية وجود تحيّز في النشر. شمل التحليل إحدى عشرة دراسة منشورة خلال الفترة من 2015 إلى 2023، اعتمادًا على توافر البيانات الكاملة في جدول مخصص (على الرغم من ان اجمالي العينة الخاضعة للتحليل كانت قليلة وقد تؤثر على دقة التحليل) . أجري التحليل باستخدام برنامجي: Metaanalysisonline و rBiostatistics.com[115] . مع التركيز على عدد مركبات PFAS المكتشفة ضمن المركبات الكيميائية المدروسة في كل دراسة. وقد تم اعتماد الأدوات الإحصائية الآتية:

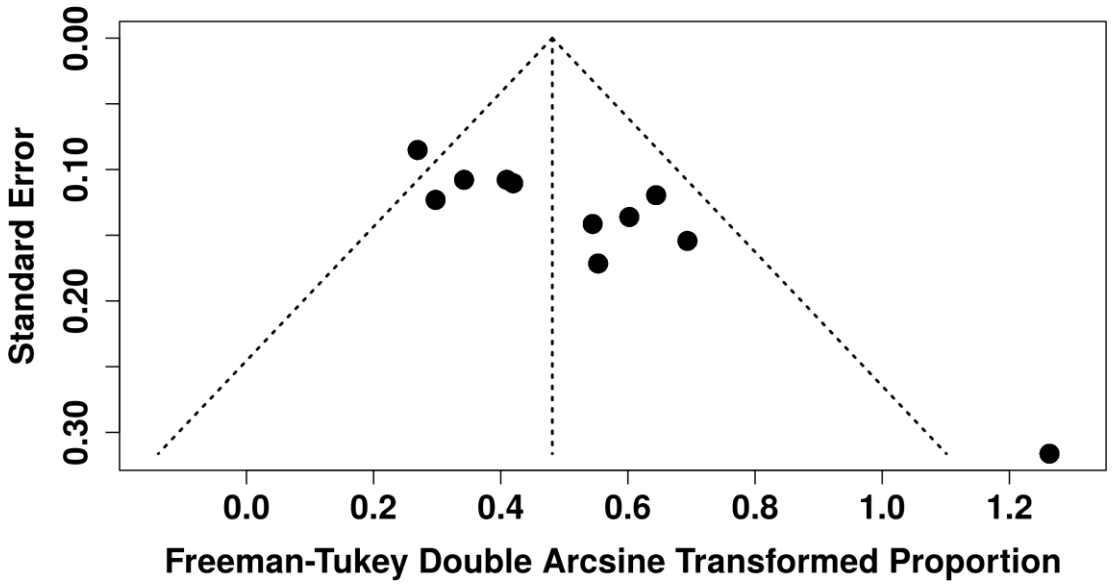
- مخطط الغابة (Forest plot) لتحديد حجم التأثير الكلي وفاصل الثقة.
- اختبار كيو كوكران (Cochran's Q test) لقياس التغاير بين الدراسات.($P < 0.1$)
- اختبار مربع آي ($I^2$ test) لتقدير النسبة المئوية للتباين الحقيقي بين الدراسات[116,117] م
- خطط القمع (Funnel plot) للكشف عن تحيّز النشر.
- اختبار إيغر (Egger's test) لتحديد دلالة التحيّز[101,102] ($P < 0.05$) .

أظهر مخطط الغابة (الشكل 3.1) أن حجم التأثير المشترك للكشف عن PFAS في الدراسات العربية بلغ 0.21 ضمن مستوى الثقة 95 % تراوح بين 0.13 و 0.31، ما يشير إلى نسبة متوسطة من الحدوث. وقد يمتد فاصل التقدير إلى 0.52، وهو ما يعكس وجود فجوة بحثية تُحتّم إجراء المزيد من الدراسات الميدانية. كما لوحظ أن نسبة التغاير بين الدراسات كانت ($I^2 = 53\%$)، بدلالة إحصائية ($Q = 21.06, P = 0.021$) ، مما يعكس تباينًا حقيقيًا قد يُعزى إلى اختلاف تصميم الدراسات، البيئات المختارة، أو أساليب التحليل الكيميائي.




**شكل 3.1** مخطط الغابة (Forest Plot) لتحليل ميتا يوضح حجم التأثير وتوزيع الدراسات حول الكشف عن مركبات PFAS في الدول العربية بين عامي 2015 و2023.

أما مخطط القمع (الشكل 3.2)، فقد كشف عن احتمالية وجود تحيّز في النشر، حيث سُجل خروج دراستين خارج حدود القمع، وتم تأكيد ذلك إحصائيًا من خلال اختبار إيغر 95% CI = 2.56–6.28، T = 4.663، P = 0.001. تعني هذه النتائج أن هناك دراسات لم تُنشر ربما لكون نتائجها غير دالة إحصائيًا أو سلبية، وهو ما يثير الحاجة لتحسين ممارسات النشر في مجال الملوثات الناشئة.




**شكل 3.2** مخطط القمع (Funnel Plot) لتحليل ميتا يكشف عن وجود تحيّز محتمل في النشر في الدراسات العربية المتعلقة بمركبات PFAS.

### 3.4 المراجعة الأدبية لأبحاث مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة العربية

#### 3.4.1 مملكة البحرين

شهدت مملكة البحرين في السنوات الأخيرة نشاطًا متزايدًا في استصلاح الأراضي والتصنيع، شمل توليد الطاقة، وتطوير الصناعات البتروكيماوية، وتحلية المياه. وكشفت الدراسات التي أُجريت بين عامي 2000 و2015 أن هذه الأنشطة الساحلية اقترنت بتصريف المخلفات إلى المواطن البيئية الساحلية، مما أسهم في ارتفاع مستويات الملوثات مثل : المبيدات العضوية الكلورينية (OCPs) وثنائيات الفينيل متعددة الكلور (PCBs) والهيدروكربونات العطرية متعدد الحلقات(PAHs) ، وهو ما أثر سلبًا على التنوع البيولوجي في المنطقة.[82,104]

في عام 2017، قام بيرسودر وآخرون [78] بإجراء أول مسح أساسي لتلوث الرواسب بمركبات PFAS في 14 موقعًا ساحليًا. وقد كشفت الدراسة عن وجود 13 مركبًا مختلفا من مركبات PFAS بتراكيز تراوحت بين اقل من 0.05 و1.37 نانوغرام/غرام (وزن جاف) في العينات المجمعة، كان من بينها 8 مركبات تنتمي إلى الأحماض الكربوكسيلية الفلورية (PFCAs)، و 4 مركبات تنتمي إلى السلفونات الفلورية (PFSA)، ومركب واحد ينتمي إلى سلفواميد الأوكتان الفلورية (PFOS). وعلى الرغم من ذلك، تم اكتشاف PFOS بشكل متكرر في 42.85% من إجمالي العينات، حيث تراوحت تركيزاته من 0.21 إلى 0.969 نانوغرام/غرام (وزن جاف). وعلى الرغم من أن الدراسة خلصت إلى أن مستويات الملوثات الكيميائية عمومًا منخفضة ولا تشكل خطرًا سامًا محتملاً، إلا أنه لم تكن هناك معايير لجودة الرواسب (SGQs) لتنظيم مركبات PFAS في منطقة الخليج وقت إجراء الدراسة. ويُذكر أن PFOS مدرج ضمن قائمة الملوثات العضوية المستمرة (POPs) بموجب اتفاقية ستوكهولم منذ عام 2009، بينما تم إدراج PFOA في الاتفاقية منذ عام 2020 لكونه من المواد شديدة الثبات والتراكم البيولوجي والسمية.

#### 3.4.2 المملكة العربية السعودية

قام بانجابيا وآخرون[84] بدراسة تركيزات مركبات PFAS في 2008 عينة مصل تم الحصول عليها من مدينة جدة. شملت الدراسة تحليل 17 مركبًا من مركبات PFAS ، من بينها PFOS، وحمض بيرفلورونونانيك (PFNA)، وحمض بيرفلوروبنتانيك (PFPeA)، وحمض بيرفلورأوندكانيك (PFUnDA)، وحمض بيرفلوروأوكتانيك (PFOA)، وحمض بيرفلوروبوتانيك (PFBA)، وحمض بيرفلوروهيكسان سلفونيك (PFHxS). وكشفت الدراسة عن وجود مركبات PFAS في 80% من العينات التي تم تحليلها، حيث تراوحت التركيزات من 0.55 نانوغرام/مل لـ PFNA إلى 5.08 نانوغرام/مل لـ PFOS، وتُعتبر هذه التركيزات مرتفعة نسبيا. ومع ذلك، أشار كوو وآخرون[105] إلى أن مستويات PFOS في المصل تُقدر عالميًا بـ 6.17 نانوغرام/مل للنساء الحوامل و4.85 نانوغرام/مل للأطفال، وهو ما يثير القلق، نظرًا لكون معامل الخطر التراكمي (HQ) يتجاوز الواحد.

كما حدد بيكو وآخرون [80] 21 مركبًا من مركبات PFAS في عينات متنوعة شملت خضروات، ورواسب، ومياه السطح، تم الحصول عليها من منطقة صناعية في الرياض. أجريت عملية الجمع في عام 2019م، وكانت منطقة الدراسة تضم محطة معالجة مياه الصرف وبركة صناعية. بلغ متوسط تركيزات PFAS في عينات المياه 29.7 نانوغرام/لتر مع أعلى قيمة بلغت 88 نانوغرام/لتر لـ PFOS، في حين بلغت تركيزات PFAS 5.66 نانوغرام/غرام في الرواسب و3.2 نانوغرام/غرام في عينات الخضروات. وكانت مركبات PFOA وPFOS الأكثر شيوعًا في العينات. ورغم أن تركيزات PFAS كانت منخفضة

مقارنة بمعايير جودة البيئة في أوروبا[106] إلا أنها كانت أعلى مما ورد في تقرير آخر، [107] وقد يعزى ذلك إلى غياب اللوائح الوطنية الخاصة بمركبات PFAS في المملكة العربية السعودية.

ركزت دراسة أخرى قام بها علي واخرين[94] على تحديد تركيزات 16 مركبًا من مركبات PFAS في الرواسب والأسماك الصالحة للأكل، التي تم الحصول عليها من البحر الأحمر في جدة. تتلقى منطقة الدراسة مياه صرف من أكثر من 450 مصنعًا في مجالات التكرير، والصناعات البتروكيماوية، والمواد الكيميائية والأدوية، والصناعات الورقية والتعبئة، بالإضافة إلى المخلفات الناتجة عن محطات معالجة مياه الصرف والمياه العادمة غير المعالجة من المناطق الساحلية. كشفت الدراسة أن تركيزات PFAS تراوحت بين 0.57 و2.6 نانوغرام/غرام (وزن جاف) في الرواسب، وبين 3.89 و7.63 نانوغرام/غرام (وزن جاف) في عضلات الأسماك، وبين 17.9 و58.5 نانوغرام/غرام (وزن جاف) في كبد الأسماك. ومن بين 16 مركبًا، كان PFOS الأكثر شيوعًا في الرواسب (42%) وأنسجة الأسماك (99%). كما لوحظ أن تركيزات PFAS كانت أعلى في كبد الأسماك مقارنة بالأنسجة الدهنية، ربما بسبب قدرة مركبات PFAS على الترابط بشكل أكبر مع بروتينات المصل وبروتينات الكلى والكبد مقارنة بالأنسجة الدهنية [108]

قام علي وآخرون[95] بتحليل 28 عينة من مياه البحر تم الحصول عليها من المواقع الرئيسية التي تهيمن عليها مخلفات الصرف في مياه البحر الأحمر. هدفت الدراسة إلى تحديد تركيزات 12 مركبًا من مركبات PFAS شملت PFBA، PFHxA، PFHpA، PFOA، PFNA، PFDA، PFUnDA، PFDoDA، PFBS، PFHxS، PFOS، FTS وFOSA. يُعرف البحر الأحمر بتنوعه البيولوجي؛ حيث يستضيف أكثر من 200 نوع من الشعاب المرجانية ويقطنه الآلاف من الأسماك، الأعشاب البحرية، واللافقاريات. ويُعتبر النقل البحري، والمياه العادمة غير المعالجة، والمخلفات الثانوية من محطات معالجة مياه الصرف البلدية، والأنشطة الصناعية مثل التعليب، وحفظ الأغذية، ومصافي النفط، بالإضافة إلى البحيرات الساحلية، المصادر الرئيسية لتلوث البحر الأحمر. تم الكشف عن 11 من أصل 12 مركبًا (91.66%)، وكانت المجموعات الرئيسية لمركبات PFAS تشمل FTS 6:2 (117 نانوغرام/لتر)، و PFOS (98.1 نانوغرام/لتر)، و PFOA ( 96 نانوغرام/لتر). وقد يكون سبب انتشار هذه المركبات في منطقة الدراسة بسبب عدم كفاية محطات معالجة الصرف لتغطية مدينة جدة [109,110]

### 3.4.3 جمهورية مصر العربية

كانت الدراسات حول مركبات PFAS في مصر من أوائل التقارير في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا. حيث قام شعيب واخرون[87] بدراسة مجموعة من مركبات PFAS تشمل PFAS ، FTOH، FOSA، FOSE، MeFOSE، PFSA، PFOS، PFCA، PAP ، PFOA في غبار الأماكن الداخلية المُجمّع من السيارات، المنازل وأماكن العمل، إضافة إلى مواد تعبئة وتغليف الأغذية (مواد ورقية وكرتونية) في عام 2013. وقد كشفت الدراسة عن وجود مركبات PFAS في عينات الغبار بتراكيز تراوحت بين 1.3 و69 نانوغرام/غرام. وكانت مركبات PFOS و PFOA هي المهيمنة في العينات. كما تم تحديد مركب FTOH في الغبار المجمّع من أماكن العمل والسيارات، حيث تم الإبلاغ عن مركبات FTAs لأول مرة في البيئات الداخلية. وفيما يخص مواد تعبئة وتغليف الأغذية، ظهر مركب PFOA في 79% من العينات بتركيز يبلغ 2.40 نانوغرام/غرام، بينما ظهر مركب PFOS في 58% من العينات بتركيز 0.29 نانوغرام/غرام . وتجدر الإشارة إلى أن تراكيز

PFAS في غبار المنازل المُبلغ عنها في هذه الدراسة أقل بكثير من تلك المُسجلة في أستراليا (988 نانوغرام/غرام) وكندا (3425 نانوغرام/غرام) [111,112]

### 3.4.4 الجمهورية التونسية

في تونس، قام أورتاني وآخرون[88] بدراسة تراكيز مركبات PFAS في عينات الهواء المجمعة من منطقة صناعية على مدار عامين (2017-2018). شملت المركبات التي تم التحقيق فيها مركبات مثل حمض بيرفلورو هكسان سلفونيك (PFHxS)، وPFOS و PFOA، وثلاثة سلفونااميدات بيرفلورو أوكتان (FOSA, NMeFOSA وNEtFOSA) واثنين من إيثانول بيرفلورو أوكتان سلفونااميدو (NMeFOSE وNEtFOSE). وأظهرت الدراسة وجود مركب PFOS بتركيز 148.7 بيكوغرام في عام 2017 و118 بيكوغرام في عام 2018، بينما بلغ تركيز مركب PFOA 299.5 بيكوغرام في عام 2017 و198 بيكوغرام في عام 2018؛ مما يدل على هيمنة هذين المركبين. وعلى النقيض من ذلك، تم الكشف عن مركبات PFAS بتراكيز بلغت 300 بيكوغرام في عام 2017 و198 بيكوغرام في عام 2018 . وتُعتبر تراكيز PFAS في هذه الدراسة أعلى من تلك المُبلغ عنها في أفريقيا (207 بيكوغرام) ، بينما كان تركيز PFOS أقل مقارنةً ببعض التقارير الإفريقية التي وصلت إلى 36,000 بيكوغرام كما هو الحال في زامبيا[113]

أما دراسة برهومي وآخرون[96] فقد فحصت وجود 21 مركبًا من مركبات PFAS في الرخويات البحرية، القشريات والأسماك في تونس خلال الفترة من مارس إلى مايو 2018. وقد تم اختيار منطقة الدراسة نظرًا لتعرضها للعديد من الأنشطة البشرية مثل الأنشطة الزراعية والصناعية والتحضر. ومن بين 21 مركبًا تم اختبارها، تم الكشف عن 12 مركبًا بتراكيز تراوحت بين 0.202 نانوغرام/غرام (وزن جاف) و2.89 نانوغرام/غرام (وزن جاف). وأظهر توزيع مركبات PFAS اختلافًا بين العينات بناءً على محتوى البروتين، والأيض، وسلوك التغذية، والمستوى الغذائي. حيث تم الكشف عن مركب PFOSفي جميع العينات بتراكيز تتراوح بين 0.585 و 0.023 نانوغرام/غرام (وزن جاف)، بينما تم الكشف عن مركب PFTrDAفي 96% من العينات بتراكيز بين 0.461 و 0.039 نانوغرام/غرام (وزن جاف)، وعن مركب PFDoDA في 89% من العينات الإجمالية. وكان المتوسط العام لتركيزات PFAS في عينات الأسماك حوالي 0.562 نانوغرام/غرام، بينما بلغ في عينات القشريات 9.12 نانوغرام/غرام، وفي عينات الرخويات 2.3 نانوغرام/غرام.

### 3.4.5 المملكة الاردنية الهاشمية

قامت دراسة لشيغي وآخرين[93] بتحليل 20 مركباً من مركبات PFAS في عينات من النفايات و مياه نهر الزرقا والنباتات. يُعد نهر الزرقا ملتقى لـ 85% من النفايات الصناعية في الأردن، بالإضافة إلى المخلفات الناتجة من محطات معالجة مياه الصرف الصحي وكذلك الجريان السطحي من المناطق الزراعية. كشفت الدراسة عن تراكيز تتراوح بين 14 و 24 نانوغرام/لتر في النفايات، مما يعكس كفاءة منخفضة في إزالة PFAS خلال عمليات معالجة مياه الصرف. ومن بين المركبات، كانت نسبة PFCAs تتراوح بين 84–85%، وخاصة PFPeA (40–43%) و PFOA (26%)، بينما بلغت نسب PFDA 10–11% وفي مناطق غير ملوثة، كانت التراكيز أقل (4.7–5.4 نانوغرام/لتر). كما بلغ تركيز PFAS في مياه النهر 16–27 نانوغرام/لتر، وفي التربة تراوحت التراكيز بين 340 و970 بيكوغرام/غرام (وزن جاف). دراسة أخرى قام بها

الشايب وفريقه[85] والتي تم فيها تحليل 97 عينة حليب في شمال الأردن عام 2013؛ حيث تم جمع 72 عينة من حليب الأم للنساء المرضعات و25 عينة من حليب الأبقار الطازج. وأسفرت النتائج عن تراكيز PFOS تراوحت بين 10 و178 نانوغرام/لتر، في حين تنوعت تراكيز PFOA بين 24 و 1120 نانوغرام/لتر في حليب الإنسان، وبين 10 و160 نانوغرام/لتر في حليب الأبقار.

### 3.4.6 الجمهورية الجزائرية

في دراسة حديثة لأمزياز وآخرين[97]، تم الكشف عن وجود مركبات PFAS في مجموعة متنوعة من الأغذية تشمل اللحوم الحمراء والبيضاء، وحليب الثدي، والبيض. كان من بين المركبات الأكثر شيوعاً PFBA وPFOA، حيث تم الكشف عنهما في 96.96% و90.0% من العينات على التوالي. كما تم تحديد مركب PFPA بتراكيز بلغت 24.40 نانوغرام/كجم في حليب الأم، و 23.81 نانوغرام/كجم في بيض الدجاج، و142.17 نانوغرام/كجم في الأسماك، و20.83 نانوغرام/كجم في لحوم الدواجن، و19.94 نانوغرام/كجم في اللحوم الحمراء. وعلى النقيض من ذلك، جاءت تراكيز PFOA عند 31.05 نانوغرام/كجم في حليب الأم، و24.21 نانوغرام/كجم في بيض الدجاج، و45.91 نانوغرام/كجم في الأسماك، و22.79 نانوغرام/كجم في لحوم الدواجن، و27.59 نانوغرام/كجم في اللحوم الحمراء. وكانت أعلى التراكيز مسجلة لمركب PFBA حيث بلغت 255.90 نانوغرام/كجم في حليب الأم، و217.45 نانوغرام/كجم في بيض الدجاج، و410.21 نانوغرام/كجم في الأسماك، و237.18 نانوغرام/كجم في لحوم الدواجن، و281.85 نانوغرام/كجم في اللحوم الحمراء. كما كُشف عن PFOS في الأسماك بتركيز 751.58 نانوغرام/كجم وفي اللحوم الحمراء بتركيز 20.54 نانوغرام/كجم.

### 3.4.7 دولة الكويت

وفقاً للشّمّري [114] ، لا يزال هناك افتقار لوجود إجراءات معتمدة لتحليل مركبات PFAS في الكويت، كما لم تُسجل بعد عمليات رصد منهجية. وعلى الرغم من ذلك، قامت الكويت في السنوات الأخيرة بحظر استخدام مركب PFOS في رغوة مكافحة الحرائق، على الرغم من استخدامها بأكثر من 30 سنة في أكثر من 700 خزان، وكذلك في حرائق آبار النفط، والمصافي، وصناعات الطلاء بالكروم على نطاق واسع. كما أن الاستخدام المفرط لمركب PFOS في الماضي كعامل مقاوم للبقع في الأثاث والمفروشات المنزلية والملابس والنسيج، ومع انتهاء عمر هذه المنتجات وإلقائها في مدافن النفايات، يشير ذلك إلى احتمال وجود مصادر متعددة لمركبات PFAS في الكويت.

### 3.4.8 الجمهورية اللبنانية

حلل حسان واخرون[79] 57 عينة حليب أم من الأمهات المرضعات في لبنان خلال الفترة من 2015 إلى 2016 بهدف الكشف عن مركبات PFOS و PFOA . وأظهرت النتائج أن مركب PFOS تم تحديده بتراكيز تتراوح بين 12 و 86 نانوغرام/لتر في 85.7% من العينات، بينما تراوحت تراكيز PFOA بين 120 و247 نانوغرام/لتر في 82.5% من العينات. وتشير هذه النتائج إلى أن تراكيز PFOA تفوق المسموح به بمقدار 4.1 مرة الحدود القياسية المعتمدة من قبل الهيئة الأوروبية لسلامة الأغذية (EFSA)، في حين كانت تراكيز PFOS ضمن الحدود المسموح بها (73 نانوغرام/لتر). وأظهرت الدراسة أيضاً ارتباط مستويات PFOA بتناول الأطعمة مثل الخبز، واللحوم، والدجاج، والمعكرونة بمعدل مرتين أو أكثر

في الأسبوع، مما يشير إلى أن المصادر الغذائية قد تكون منبعاً لـ .PFOA وبالمقارنة مع دراسة مشابهة أجريت في الأردن [85] كانت تراكيز PFOS في لبنان أقل (86 نانوغرام/لتر في الأردن مقابل 86 نانوغرام/لتر أو أقل في لبنان)، في حين أن تراكيز PFOAكانت أعلى بكثير في الأردن حيث وصلت إلى 1120 نانوغرام/لتر مقارنة بـ 247 نانوغرام/لتر في لبنان. لم يقدم تفسير واضح محدد للفروق المسجلة بين الدراستين، وقد يعكس ذلك اختلافاً في مستويات التلوث البيئي أو تراكيز PFAS في الأغذية بين البلدين.

### 3.4.9 جمهورية السودان

تُعد الدراسة التي قام بها كيركيلي وآخرون[103] من أوائل الدراسات التي تناولت تقييم تلوث مركبات البولي والفلورو ألكيل في البيئات المائية في السودان، حيث تم إجراء تحليل مستهدف وغير مستهدف لمجموعة من مركبات PFAS في أنسجة كبد الأسماك المجمعة من مواقع مختلفة على طول نهر النيل، باستخدام تقنيات الفصل الكروماتوغرافي السائل فائق الأداء (UHPLC) ومطياف الكتلة عالي الدقة (HRMS) . شملت المركبات المستهدفة في التحليل PFOS, PFNA, PFDA, PFUnDA . وقد تركزت العينات الملوثة بشكل أساسي في المنطقة الواقعة أسفل سد جبل أولياء ، حيث بلغت تركيزات PFAS أعلى مستوياتها، وسُجل أعلى تراكم في كبد أسماك الكارب الشائعة (Common Carp)، حيث وصل تركيز PFOSإلى 36 ± 331 ميكروغرام/كغ وزن رطب ، في حين بلغ PFNA 4 ±143 ميكروغرام/كغ وزن رطب و PFDA 12 ±137 ميكروغرام/كغ وزن رطب . وكانت القيمة الإجمالية لمجموعة المركبات الأربعة 37 ± 611 ميكروغرام/كغ وزن رطب ، مما يشير إلى وجود بؤرة تلوث محلية عند موقع السد. في المقابل، أظهرت الأسماك المجمعة من مناطق أخرى مثل مغران الحصاحيصا وسوق ليبيا مستويات غير قابلة للكشف من مركبات PFAS ، مما يشير إلى تباين جغرافي واضح في مستوى التلوث. كذلك، لوحظت اختلافات بين الأنواع السمكية، حيث أظهرت أسماك الكارب قابلية أعلى لتراكم PFAS مقارنةً بـ أسماك القرموط الإفريقي (African Catfish) والبلطي النيلي (Nile Tilapia)، والتي سجلت تركيزات أقل أو غير قابلة للكشف، مما قد يُعزى إلى اختلافات في الأنظمة الغذائية أو المسارات الأيضية. وأشارت الدراسة إلى أن تركيز PFOS في بعض العينات تجاوز المعيار الأوروبي للجودة البيئية في الأحياء (EQS) البالغ 9.1 ميكروغرام/كغ وزن رطب وهو ما يُثير القلق بشأن السلامة البيئية والغذائية في المنطقة. توصي الدراسة بضرورة تنفيذ برامج رصد دورية تشمل مكونات بيئية متعددة مثل المياه، الرواسب، وأنسجة عضلات الأسماك، وذلك لتكوين صورة أشمل عن ديناميكية تلوث PFAS في النظام البيئي لنهر النيل، نظرا لندرة الدراسات الإقليمية في إفريقيا.

# الفصل الرابع

## الفصل الرابع: طرق تحليل العينات والكشف عن مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة العربية

يقدم هذا الفصل مراجعة تفصيلية للطرق المعتمدة دوليًا في الكشف عن PFAS كما يستعرض المعايير المرجعية التنظيمية التي وضعتها هيئات مثل الاتحاد الأوروبي ووكالة حماية البيئة الأمريكية. بعد ذلك ينتقل إلى استعراض الطرق التي اعتمدتها الدراسات العربية في تحليل عينات متنوعة: الرواسب البحرية، المياه السطحية والصرف الصحي، النباتات، الكائنات البحرية، حليب الأمهات، مصل الدم، وحتى الغبار ومواد التغليف.

### 4.1 طرق الكشف المعتمدة دوليا

تعتبر مركبات PFAS من الملوثات الناشئة ذات الثبات البيئي العالي والانتشار الواسع، مما يستدعي تطوير منهجيات تحليل دقيقة لرصدها في مختلف البيئات. وتعتمد المنهجيات التحليلية الحالية على مدخلين رئيسيين:

#### 4.1.1 التحليل الموجّه (Targeted Analysis)

يرتكز هذا النوع من التحليل على الكشف الكمي الدقيق لمركبات PFAS المحددة مسبقًا باستخدام تقنيات الكروماتوغرافيا السائلة المقترنة بمطياف الكتلة الثلاثي (LC-MS/MS) ، ويُستخدم على نطاق واسع في المختبرات التنظيمية، مثل: إدارة الغذاء والدواء الأمريكية (FDA) ، التي تعتمد تحليل 20 مركبًا. وزارة الزراعة الأمريكية (USDA) ، التي تقيس 16 مركبًا باستخدام معايير داخلية وتحقيقات ضمنية. تتميز هذه التقنية بـ: حدود كشف منخفضة (Low Detection Limits)، دقة تكرارية عالية و اعتمادها من قبل منظمات مرجعية مثل AOAC international .ومع ذلك، فإن التحليل الموجّه يُعد محدودًا في نطاقه، حيث لا يغطي سوى جزء صغير من آلاف مركبات PFAS الموجودة في البيئة، ما يجعل الحاجة ماسة لأساليب أكثر شمولًا.

#### 4.1.2 التحليل غير الموجّه (Non-Targeted Analysis - NTA)

يُعتبر التحليل غير الموجّه أداة فعالة للكشف عن مركبات PFAS غير المعروفة أو النادرة، وذلك باستخدام تقنيات التحليل الطيفي عالي الدقة (HRMS) ، مثل : UHPLC-HRMS - (QTOF) يسمح هذا النهج، باكتشاف مركبات مثل Cl-PFSAs و Cl-PFCAs، والتي يصعب الكشف عنها بالطرق الموجهة. كما تُستخدم برمجيات متقدمة مثل Match-Fluoro لتحليل البيانات الجزيئية وتوليد خرائط تلوث دقيقة.

#### 4.1.3 المعايير المرجعية والتقنيات الداعمة

أصدرت منظمة AOAC International مواصفات الأداء التحليلي الموحد SMPR® 2023.003، التي تُعد مرجعًا دوليًا في تطوير طرق التحليل الرسمية، وخاصة في الأغذية والمنتجات الزراعية. وتشمل هذه المواصفات عناصر مثل: حدود التحديد (LOD/LOQ)، استرجاع المركب التكرار والدقة إيجابية النظام بالإضافة إلى ذلك، يُستخدم اختبار Total Assay لتحديد إجمالي السلائف غير المعروفة عن طريق تحويلها إلى مركبات PFCA قابلة للقياس، مما يُعزز من شمولية التحليل عند غياب المعايير المرجعية.

#### 4.1.4 الطرق التنظيمية المعتمدة

لأغراض الرصد البيئي والتنظيمي، تعتمد الجهات الدولية طرقًا معيارية معتمدة تشمل: EPA 537.1 و EPA 533 لتحليل PFAS في مياه الشرب و ISO 21675 لتحليل PFAS باستخدام UHPLC-MS/MS وتُعد هذه الطرق أدوات أساسية لتمكين الهيئات الرقابية من تقييم المخاطر والامتثال للمعايير البيئية الصارمة.

### 4.2 الطرق المستخدمة في تحليل مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في البيئة العربية

#### 4.2.1 عينات الرواسب البحرية Marine Sediment Samples

تم استخدام عدة طرق لاستخلاص وتحديد مركبات PFAS في الرواسب البحرية، وتباينت هذه الطرق من حيث نوع الاستخلاص، مرحلة التنقية، الأجهزة المستخدمة، وخصائص المعايرة. إلا أن جميعها تبدأ عملية التحليل بتجفيف العينات وطحنها جيدًا قبل المعالجة التحليلية، يليها استخدام معايير داخلية موسومة بالنظائر لتعويض الفقد وتحقيق دقة التقدير الكمي (جدول 4.1).

**جدول 4.1:** مقارنة بين طرق تحليل مركبات PFAS في عينات الرواسب البحرية

| المرجع Reference | المذيبات المستخدمة Solvents Used | العمود الكروماتوغرافي Column | الجهاز التحليلي Instrument | طريقة التنقية Clean-up Method | طريقة الاستخلاص Extraction Method |
|---|---|---|---|---|---|
| 78 | Methanol, Acetonitrile, Ammonium Acetate, Glacial Acetic Acid | BEH C18 (50x2.1mm, 1.7 µm) | Waters Acquity UPLC + Xevo TQ-MS | ENVI-Carb, Glacial Acetic Acid | Two-step ultrasonic extraction with acetonitrile and methanol |
| 94 | Methanol, Air Evaporation | Zorbax Eclipse Plus C18 (2.1x100 mm, 1.8 µm) | Agilent 1200 HPLC + Agilent 6460 Triple Quad | ENVI-Carb, vortex + centrifuge | Ultrasonic extraction with methanol |
| 93 | Acetonitrile, Methanol, Ammonium Acetate | BEH C18 (50x2.1mm, 1.7 µm) + XBridge Guard | Waters ACQUITY UPLC + TQD Triple Quad | CHROMABOND HR-XAW + ENVI-Carb | Ultrasonic extraction with acetonitrile |
| 80 | Methanol, Water, McIlvaine buffer with EDTA | Not specified | Agilent 1260 UHPLC + Agilent 6410 Triple Quad | STRATAX polymeric SPE cartridges | Ultrasound-assisted extraction with methanol, distilled water, McIlvaine–EDTA buffer |

في دراسة بيرسودر وآخرين[78]، استُخدمت طريقة دقيقة لتحليل مركبات PFAS في عينات الرواسب البحرية، تبدأ بإضافة معايير داخلية مثل $^{13}C_8$-PFOA و$^{13}C_8$-PFOS، تليها عملية استخلاص ثنائي المراحل باستخدام الأسيتونتريل والميثانول. بعد ذلك، يُنقى المستخلص باستخدام الكربون الغرافيتي المنشّط (ENVI-Carb) ، وتُخفف العينات بمحلول خلات الأمونيوم قبل إجراء التحليل. يُجرى الفصل الكروماتوغرافي باستخدام جهاز UPLC ، والكشف الطيفي عبر مطياف الكتلة الثلاثي الترادف (Xevo TQ-MS) بنمط التأين السلبي. وتميّزت الطريقة باستخدام معايير حقن إضافية لمراقبة كفاءة الجهاز .

في دراسة شيغي وآخرين[93]، استُخدمت طريقة تحليل دقيقة لمركبات PFAS في عينات التربة أو الرواسب، تبدأ بنقع 5 غرامات من العينة في الميثانول مع إضافة المعايير الداخلية، تليها عملية رجّ باستخدام خلاط ، ثم جهاز طرد مركزي ويُعاد الاستخلاص لتحسين الكفاءة. بعد ذلك، يتم تنقية المستخلص باستخدام الكربون الغرافيتي المنشّط (ENVI-Carb) مع حمض الأسيتيك الجليدي . يُجرى الفصل الكروماتوغرافي باستخدام جهاز UPLC مزوّد بعمود BEH C18، والكشف الطيفي يتم عبر مطياف الكتلة الثلاثي الترادف (QqQ: TSQ QUANTIVA) بنمط التأين السلبي. وشملت الطريقة أيضاً حساب حدود الكشف (LOD) وحدود التحديد (LOQ) بالاعتماد على عينات فارغة مع تنفيذ سلسلة متكاملة من خطوات التنقية.

من جهة أخرى، اعتمدت الدراسة التي قدمها بيكو وآخرون[80] على استخدام طريقة تحليل موحّدة لمركبات PFAS في أنواع متعددة من العينات (ماء، تربة، رواسب، نباتات)، تبدأ بعملية استخلاص بمساعدة الموجات فوق الصوتية باستخدام مزيج بنسبة 1:1:1 من الميثانول الماء المقطر ومحلول ماكيلفاين–إي دي تي إيه (EDTA) .تلي ذلك مرحلة تنقية موحّدة باستخدام خراطيش ستراتا-إكس (STRATA-X SPE) لجميع أنواع المصفوفات. يُجرى الفصل

الكروماتوغرافي والتحليل الطيفي باستخدام نظام الكروماتوغرافيا السائلة المقترنة بمطياف الكتلة الثلاثي الترادف-LC) (MS/MS: Agilent 6410، بنمط التأين السلبي. وتمتاز هذه الطريقة ببروتوكول موحّد يعزز من اتساق النتائج عبر مختلف أنواع العينات.

في دراسة علي وآخرين[94]، طُبّق بروتوكول دقيق لاستخلاص مركبات PFAS من الرواسب والأنسجة الحيوانية، حيث تمّ الاستخلاص باستخدام الميثانول تليه مرحلة تنقية باستخدام الكربون الغرافيتي المنشّط (ENVI-Carb) . بعد ذلك، يُركّز المستخلص عبر التبخير تحت تدفق النيتروجين .يُجرى الفصل الكروماتوغرافي باستخدام جهاز كروماتوغرافيا سائلة عالي الأداء (HPLC) ، متصل بجهاز مطياف الكتلة الثلاثي الترادف بنمط التأين السلبي. كما تم اعتماد المعايرة باستخدام عينات مدعّمة ، ما يعزز من دقة التقدير الكمي.

تُظهر المقارنة بين هذه الدراسات اتفاقًا واضحًا في اعتماد الكربون الغرافيتي المنشّط (ENVI-Carb) كأداة رئيسية لتنقية المستخلصات، مع وجود اختلافات طفيفة في المذيبات المستخدمة، مثل حمض الأسيتيك الجليدي مما يشير إلى إمكانية تحسين الأداء الكيميائي لمرحلة التنقية. كما أن الدمج بين الكربون المنشّط (ENVI-Carb) وتقنيات الاستخلاص الطوري الصلب (SPE) مثل ستراتا-إكس STRATA-X أو Oasis HLB يعكس كفاءة عالية في إزالة المركبات المتداخلة وزيادة معدلات الاسترداد . أما فيما يخص الأجهزة التحليلية، فقد اتفقت جميع الدراسات على استخدام أنظمة الكروماتوغرافيا السائلة عالية الأداء المقترنة بمطياف الكتلة الثلاثي الترادف (LC-MS/MS) ، و أجهزة Agilent 6410 & 6460، بالإضافة إلى جهاز زيفو تي كيو-إم إس (Xevo TQ-MS) . كما تم استخدام أعمدة كروماتوغرافية من نوع BEH C18 أو زورباكس إكليبس بلس (Zorbax Eclipse Plus) ، بأحجام جسيمات نانوية تتراوح بين 1.7–1.8 ميكرومتر، ما يضمن دقة عالية في الفصل الكروماتوغرافي، خاصة في التمييز بين الأيزومرات الخطية والمتفرعة لمركبات PFAS .وتُعد هذه الأعمدة، عند اقترانها بأنظمة الكروماتوغرافيا السائلة فائق الأداء UHPLC مثالية لتحقيق زمن احتجاز ثابت وفصل حاد للمركبات المعقدة.

فيما يتعلق بمذيبات الاستخلاص، كان الميثانول والأسيتونتريل الأكثر استخدامًا عبر الدراسات المختلفة، نظرًا لقدراتهما على استخلاص المركبات الفلورية من المصفوفات البيئية المعقدة. إلا أن البروتوكول الذي استخدمه بيكو واخرون[80] تميز باستخدامه لمحلول منظم مكوّن من خلات الأمونيوم و EDTA والذي يوفّر وسطًا أيونيًا يحاكي تفاعلات PFAS داخل المصفوفات، مما يعزز قدرة الاستخلاص للمركبات المرتبطة بالمواد العضوية أو المعادن في الرواسب.

بناءً على هذا التقييم، يمكن ملاحظة أن بروتوكول بيكو وآخرين [80] يجمع بين خطوات استخلاص مدروسة، وتنقية مزدوجة باستخدام خراطيش ستراتا-إكس (STRATA-X SPE) ، بالإضافة إلى تحليل دقيق باستخدام أنظمة كروماتوغرافيا سائلة فائقة الأداء مقترنة بمطياف كتلة ثلاثي الترادف (UHPLC-QqQ)، كما يتميز البروتوكول بتوثيق شامل لإجراءات ضمان الجودة بما في ذلك استخدام عينات فارغة وعينات مرجعية معتمدة مما يعزز موثوقية النتائج. في المقابل، يُعد بروتوكول بيرسودر وآخرين[78] خيارًا عالي الكفاءة أيضًا، حيث يتميز بتنظيم دقيق لمراحل التحضير، ودمج معايير داخلية ومعايير حقن لمراقبة أداء الجهاز. ويحقق هذا البروتوكول نتائج موثوقة خصوصًا فيما يتعلق بدقة المعايرة ونسب الاسترداد. أما البروتوكول الذي قدمه علي وزملائه [94] فرغم اعتماده على أجهزة تحليل متقدمة (HPLC-MS/MS) واستخدام ENVI-Carb في مرحلة التنقية، إلا أنه يفتقر إلى بعض عناصر التكامل، مثل التوثيق التفصيلي لمراحل الضبط والتحقق ومقارنة LOD/LOQ ، مما قد يحد من إمكانية تكراره أو مقارنته بنتائج أخرى. بصورة عامة، تؤكد هذه المقارنة

أن تحليل مركبات PFAS في الرواسب يتطلب بروتوكولات متعددة المراحل، تتضمن استخلاصًا عالي الكفاءة، وتنقية كيميائية مركّبة، وتحليلًا دقيقًا باستخدام أجهزة متقدمة. ويُعد الالتزام بإجراءات ضمان الجودة عنصرًا حاسمًا لتعزيز موثوقية النتائج وقابليتها للمقارنة بين المواقع والدراسات المختلفة.

### 4.2.2 تحليل مركبات PFAS في عينات مياه الصرف والمياه السطحية Wastewater and Surface Water

في جميع البروتوكولات المستخدمة في تحليل مركبات PFAS في عينات مياه الصرف والمياه السطحية ، تبدأ العملية بمرحلة ترشيح أولية لإزالة الشوائب والجسيمات العالقة، وهي خطوة محورية لضمان نقاء العينة قبل الاستخلاص. وقد تم تنفيذ هذه الخطوة باستخدام مرشحات من ألياف زجاجية تختلف في الحجم والمسامية حسب نوع العينة. فعلى سبيل المثال، استخدمت دراسة شيغي وآخرين[93] مرشحات بقطر 47 مم ومسامية 0.7 ميكرومتر لتحضير عينات مياه الصرف ، بينما اعتمدت دراسة بيكو وآخرين[94] مرشحات أكبر بقطر 90 مم لمعالجة المياه السطحية. وتُضاف بعد مرحلة الترشيح المعايير الداخلية الموسومة بالنظائر المستقرة مثل $^{13}C_4$-PFOA و$^{13}C_4$-PFOS، والتي تُستخدم لتعويض الفقد المحتمل خلال خطوات الاستخلاص والتحليل، ولضمان دقة التقديرات الكمية (جدول 4.2).

**جدول 4.2** مقارنة بين منهجيات تحليل مركبات PFAS في أنواع مختلفة من عينات المياه

| نوع العينة Sample Type | نوع الاستخلاص Extraction Method | نوع الفلترة Filtration Type | الأجهزة المستخدمة Instruments Used | LOD/LOQ | المرجع Reference |
|---|---|---|---|---|---|
| **مياه صرف، مياه سطحية** | SPE باستخدام Oasis WAX | Glass Microfibre Filters (0.7 µm) | DIONEX UltiMate 3000 + TSQ QUANTIVA MS/MS | LOD: 0.05–0.1 ng/L | 93 |
| **مياه سطحية، رواسب، تربة، نباتات** | SPE باستخدام STRATAX | Glass Microfibre Filters (90 mm Ø) | Agilent 1260 UHPLC + Agilent 6410 QqQ MS | LOD not specified | 80 |
| **مياه بحر** | SPE باستخدام Oasis HLB | Glass Microfibre Filters (GF/C) | Agilent 1200 LC + Agilent 6460 QqQ MS | PFOS LOD=0.064 ng/mL, LOQ=0.36 ng/L | 95 |

تمثّل تقنية الاستخلاص الطوري الصلب الركيزة الأساسية لاستخلاص مركبات PFAS في هذه العينات، إلا أن نوع الخرطوشة المستخدمة يختلف تبعًا لطبيعة العينة وتعقيد مصفوفتها. فعلى سبيل المثال، استخدمت دراسة شيغي وآخرين[93] خراطيش Oasis WAX ، والتي تعتمد على التبادل الأيوني الضعيف مما يجعلها مثالية لاستخلاص المركبات المشحونة سالبًا من عينات مياه الصرف خاصةً عند ضبط الرقم الهيدروجيني (pH) إلى حوالي 4 pH. في المقابل، إعتمدت دراسة بيكو واخرون[94] على خراطيش Oasis HLB ، وهي متعددة الاستخدامات وتُعد مناسبة للتعامل مع مصفوفات ذات ملوحة عالية مثل المياه البحرية، حيث تسهم في تقليل التداخلات التي قد تؤثر سلبًا على كفاءة التأين والاستجابة الطيفية في أجهزة LC-MS/MS . في خطوة التنقية لجأت بعض الدراسات إلى إدراج وحدة إنفي-كارب (ENVI-Carb Cartridge) من شركة سوبلكو (Supelco) كمكوّن إضافي لإزالة المركبات العضوية غير القطبية، مما يعزز نقاء المستخلص النهائي قبل التحليل. في المقابل، اعتمدت دراسات أخرى على تنظيف الخراطيش باستخدام مزيج

من الميثانول وهيدروكسيد الأمونيوم، وهي خطوة تهدف إلى تحرير مركبات PFAS من مواقع الارتباط داخل الوسط الصلب، دون التأثير سلبًا على معدل الاسترداد أو سلامة المركبات المستهدفة.

من حيث الأجهزة، اتفقت الدراسات محل المقارنة على استخدام أنظمة تحليل طيفي عالية الأداء من نوع LC-MS/MS . واعتمدت جميعها أعمدة كروماتوغرافية من نوع C18 مثل BEH C18 و Zorbax Eclipse Plus، وطبقت نمط التأين السلبي (-ESI) مع برامج تدرج كروماتوغرافي تبدأ بنسب منخفضة من الميثانول (10–15%) وتصل تدريجيًا إلى حدود 95–99.%

أظهرت النتائج التقييمية أن حساسية المنهجيات التحليلية كانت متفاوتة، حيث تراوحت حدود الكشف لعينات المياه بين 0.05 إلى 0.1 نانوغرام/لتر وهي قيم تعكس كفاءة جيدة في الكشف عن التراكيز الضئيلة لمركبات PFAS . وقد تم دعم هذه القيم من خلال استخدام عينات فارغة مائية، إلى جانب تحليل عينات مدعّمة بمركبات PFAS، مما أتاح حساب نسب الاسترداد التي تراوحت بين 60% إلى 80% في معظم الدراسات، وهي نسب مقبولة ضمن المعايير المعتمدة للتحقق من كفاءة الطرق التحليلية.

ويبدو أن الدراسة التي أُجريت في السعودية بواسطة علي وآخرون[95] تقدم نموذجًا ملائمًا للتكيّف المنهجي مع المصفوفات المالحة حيث تم استخدام أعمدة تأخير داخل نظام الكروماتوغرافيا السائلة – مطياف الكتلة (LC-MS) لتقليل تداخل المركبات الخلفية كما تم تضمين عينات بلانك مراقبة لكل دفعة تحليلية لضمان ضبط الجودة. ومع ذلك، تفتقر الدراسة إلى بيانات تفصيلية حول نسب الاسترداد ودقة المنهجية ، مقارنةً بدراسة بيكو وآخرين[80] التي وثقت بإحكام إجراءات ضمان الجودة والتحقق المنهجي.

من جهة أخرى، تميزت دراسة شيغي وآخرين[93] بحساسية تحليلية عالية ، حيث سجلت حدّ كشف منخفضًا بلغ 0.05 نانوغرام/لتر مما يعكس قدرة عالية على رصد التراكيز الضئيلة لمركبات PFAS. وقد دعمت الدراسة بروتوكولها بإجراءات دقيقة شملت ضبط الرقم الهيدروجيني للعينة، ومعايرة الأنظمة التحليلية ، واستخدام مواد مرجعية معتمدة . أما دراسة بيكو وآخرين [80]، فتميّزت بشموليتها في تغطية أنواع متعددة من المصفوفات، بما في ذلك المياه، التربة، والنباتات، لكنها لم تقدّم بيانات رقمية تفصيلية عن حساسية الأجهزة مما يحد من تقييم أداء المنهج التحليلي.

يشير هذا التباين في الأداء التحليلي إلى أن أفضل أداء تحليلي تحقّق في الدراسات التي دمجت بين خطوات تحضير دقيقة، ونظام كروماتوغرافي عالي الحساسية، ومراقبة جودة متقدمة تشمل المعايرة متعددة النقاط والمواد المرجعية. لذا، توصي هذه المراجعة بضرورة مواءمة البروتوكولات التحليلية مع الخصائص البيئية للعينة، بما يضمن الحد من التداخلات وتحقيق دقة عالية واسترداد مرتفع للمركبات المستهدفة، خاصة في دراسات الرصد طويلة المدى لمركبات PFAS في البيئات المائية المعقدة.

### 4.2.3 تحليل مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في عينات النباتات

تُعد النباتات من المصفوفات البيئية المحورية في تتبّع انتقال وتراكم مركبات PFAS ، لا سيّما عند دراسة سلاسل الغذاء أو تقييم التعرّض البشري غير المباشر . وكشفت المراجعة المنهجية أن عدد الدراسات التي تناولت تحليل PFAS في النباتات ضمن البيئة العربية لا يزال محدودًا، حيث اقتصر على دراستين رئيسيتين فقط: الأولى نُفذت في الأردن[93]، والثانية في السعودية[80]. ورغم هذا العدد المحدود، تُظهر المقارنة بين الطريقتين تباينات ملحوظة في مراحل التحضير ونوع

المذيبات المستخدمة والتقنيات التحليلية المعتمدة ما يعكس الحاجة إلى مزيد من التوحيد المنهجي وتوسيع قاعدة البيانات البيئية في هذا المجال. تبدأ الدراستان بمرحلة تحضير العينة التي تشمل التجفيف ثم الطحن، وذلك لتحسين تجانس العينة وضمان توزيع متساوٍ للمركبات داخلها. ومع ذلك، استخدمت دراسة شيغي وآخرين [93] طريقة التجفيف بالتجميد لمدة 72 ساعة، في حين اعتمدت دراسة بيكو وآخرين [80] على تقنية الليوفيليز (Lyophilization) ، دون الإشارة إلى مدة زمنية محددة. تتفق الدراستان في استخدام طريقة الاستخلاص بمساعدة الموجات فوق الصوتية وهو خيار فعّال لتعزيز انتقال المركبات من الطور الصلب إلى المذيب مما يُحسن كفاءة الاستخلاص ويقلل من فقد المركبات المستهدفة.

أما على مستوى المذيبات فقد تميّزت الدراسة التي تمت في الأردن [93] باستخدام خليط ثلاثي يتكوّن من الميثانول، الماء، ومحلول بافر ماكيلفاين–إي دي تي إيه بنسبة 1:1:1، وهو وسط متزن قادر على استخلاص المركبات الأيونية والمستقرة على حد سواء. في المقابل، استخدمت الدراسة السعودية [80] خليطًا أبسط مكوّنًا من الميثانول وهيدروكسيد الصوديوم مذاب في مزيج ماء/ميثانول بنسبة 80:20، وهو مذيب فعّال في تحلّل الروابط البروتينية إلا أن غياب التوازن الأيوني فيه قد يؤدي إلى انخفاض كفاءة الاستخلاص لبعض المركبات الأكثر استقرارًا كيميائيًا.

في خطوة التنقية تختلف الدراستان في اختيار نوع عمود الاستخلاص الطوري الصلب فقد استخدمت دراسة شيغي وآخرين [93] خراطيش أواسيس دبليو إيه إكس (Oasis WAX) ، التي تعتمد على آلية التبادل الأيوني الضعيف وهي مناسبة لاستخلاص المركبات الأنيونية بعد ضبط الأس الهيدروجيني للعينة (pH) إلى حوالي 4، مما يعزز من ارتباط المركبات المشحونة سالبًا بالمادة الصلبة. في المقابل، استخدمت دراسة بيكو وآخرين [80] خراطيش ستراتا-إكس (STRATA-X)، وهي خراطيش بوليمرية معكوسة الطور توفر أداءً جيدًا في استخلاص المركبات غير المتأينة والمستقرة وتتميّز بتعدد استخداماتها في مصفوفات نباتية معقدة.

أما فيما يخص الجهاز التحليلي فقد استخدمت كلتا الدراستين أنظمة كروماتوغرافيا سائلة مقترنة بمطياف الكتلة الثلاثي الترادف (LC-MS/MS) ، مع اختلاف في الشركة المصنعة. حيث استخدمت الدراسة السعودية جهاز ثيرمو تي إس كيو كوانتيفا (Thermo Scientific TSQ QUANTIVA) ، في حين استخدمت الدراسة الأردنية جهاز أجيلنت 6410 كيو كيو كيو (Agilent 6410 QqQ) .وتعتمد كلتا المنهجيتين على نمط التأين السالب وهو الخيار الأكثر شيوعًا وفعالية في تحليل مركبات PFAS نظرًا لطبيعتها الأنيونية.

من حيث الجودة التحليلية قدّمت دراسة شيغي وآخرين[93] تفاصيل دقيقة حول حدود الكشف حيث تراوحت بين 0.05–0.1 نانوغرام/لتر في عينات المياه، و0.05–0.1 بيكوغرام/غرام في العينات الصلبة مثل التربة أو النباتات. أما دراسة بيكو وآخرين[80] فلم تُفصّل قيم LOD أو LOQ بشكل رقمي، إلا أنها دعمت نتائجها من خلال إجراءات صارمة لمراقبة وضمان الجودة شملت استخدام عينات بلانك ومواد مرجعية معتمدة ما يعزز موثوقية البيانات بالرغم من غياب الأرقام الدقيقة للحساسية.

يُشير التحليل المقارن إلى أن دراسة شيغي وآخرين [93] تُعد أكثر دقة من الناحية الكمية، نظرًا لتقديمها بيانات دقيقة لحدود الكشف والتحديد (LOD/LOQ) ، وتطبيقها لإجراءات تنظيف متعددة تشمل وحدة ENVI-Carb إضافة إلى استخدام محلول حمض الهيدروكلوريك لضبط التوازن الأيوني في العينة. في المقابل، تميّزت دراسة بيكو وآخرين[80] باستخدام محلول معقّد ومنظم كيميائيًا مثل بافر ماكيلفاين EDTA ما يعكس وعيًا متقدمًا بطبيعة التداخلات النباتية

المحتملة. لذلك، يمكن الاستنتاج أن أفضل منهجية لتحليل PFAS في النباتات تعتمد على دمج العناصر، بما في ذلك استخدام مذيبات متوازنة كيميائيًا ومعقّدة مثل McIlvaine–EDTA وتطبيق تنقية مزدوجة باستخدام خراطيش WAX وENVI-Carb . والاعتماد على أنظمة LC-MS/MS عالية الدقة (LC-MS/MS) بنمط التأين السالب، مع ضبط دقيق للرقم الهيدروجيني وتنفيذ خطوات مراقبة جودة صارمة . من شأن هذا التوجه المتكامل أن يعزز من حساسية الكشف ويقلل من نسب الخطأ، ويضمن دقة تقييم مصير وانتقال مركبات PFAS في النباتات ضمن البيئات الملوثة.

### 4.2.4 تحليل مركبات مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في الكائنات البحرية (Marine Organisms)

تُعد أنسجة الكائنات البحرية، مثل الأسماك والرخويات، من المصفوفات الحيوية المهمة في رصد تراكم مركبات PFAS عبر السلسلة الغذائية . وتُظهر المقارنة بين الطريقتين المستخدمتين في كل من دراسة برهومي وآخرين[96] ودراسة علي وآخرين[95] تباينًا منهجيًا الذي يعكس اختلاف الخلفية البيئية ومواصفات العينة المستهدفة . ويُعزى هذا التباين إلى تنوّع الخصائص البيئية البحرية في كل دراسة، بالإضافة إلى اختلاف طبيعة الأنسجة التي خضعت للتحليل، مما أدى إلى اعتماد بروتوكولات مختلفة في خطوات التحضير والاستخلاص والتنقية.

تبدأ دراسة علي وآخرين[95] بتحضير العينات البيولوجية من الكائنات البحرية عبر التجفيف بالتجميد والطحن الكامل للحصول على عينة متجانسة. تُدعَّم العينات بـ 12 معيارًا داخليًا موسومًا بنظائر مستقرة (13C-labelled^) ، مما يسمح بتصحيح الفقد وتحسين الدقة الكمية. يُستخدم الميثانول كمذيب أساسي في خطوة الاستخلاص، والتي تشمل الخلط والرج في حمام صوتي ثم الطرد المركزي. بعد ذلك، يُجفف الراشح تحت هواء ساخن قبل إعادة تشكيله وتحليله باستخدام نظام كروماتوغرافيا سائلة مقترن بمطياف الكتلة الثلاثي الترادف (LC-MS/MS: Agilent 6460) . وقد تميّزت هذه المنهجية بإدراج خطوة تنقية باستخدام كربون ENVI-Carb ، مما ساهم في تحسين نقاء المستخلص وتقليل التداخلات المصفوفية وبلغت نسب الاسترداد ما بين 91.7% و 110%، مما يعكس فعالية واستقرار البروتوكول التحليلي.

في المقابل، ركّزت دراسة برهومي وآخرين[96] على استخدام الأسيتونتريل كمذيب أساسي في عملية الاستخلاص بالموجات فوق الصوتية ما يوفّر فعالية جيدة في تحرير مركبات PFAS من الأنسجة الحيوانية. وقد تميّز البروتوكول التحليلي بتطبيق تنقية مزدوجة باستخدام خراطيش كرومابوند إتش آر-إكس إيه دبليو (CHROMABOND HR-XAW) وكربون إنفي-كارب(ENVI-Carb) ، وهي خطوة تعكس مستوى متقدّمًا من التحكم في إزالة الشوائب خصوصًا في ظل الخلفية البيئية المعقدة للعينات البحرية في حوض البحر الأبيض المتوسط. إستخدمت الدراسة جهاز LC-MS/MS من نوع ووترز تي كيو دي (Waters TQD Triple Quadrupole MS) مزوّدًا بعمودين كروماتوغرافيين: بي إي إتش C18 (BEH C18) وإكس بريدج (XBridge C18) C18 ، بالإضافة إلى خلية حماية لمنع التلوث الخلفي. كما طُبّقت إجراءات صارمة لضمان الجودة شملت تحليل عينات بلانك ، عينات مدعّمة ومعايير مرجعية معتمدة مثل العيّنة القياسية IAEA-432، وهي صادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) ، والتي تُستخدم للتحقق من دقة التحليل وضمان موثوقية النتائج عند قياس ملوثات بيئية في أنسجة الكائنات البحرية .

من حيث الأداء التحليلي تُظهر دراسة برهومي وآخرين[96] نطاقًا واسعًا من التراكيز التحليلية 20 – 0.16 بيكوغرام/ميكروليتر ، مع نسب استرداد من المواد المرجعية المعتمدة تتراوح بين 64% و108%، مما يعكس حساسية

وموثوقية جيدة للطريقة المستخدمة. كما شملت الدراسة تقييمًا دقيقًا للخطأ المعياري النسبي داخل اليوم (Intra-day) وبين الأيام (Inter-day) ، وهو ما يعزز مصداقية النتائج في البيئات البحرية المعقدة ذات الخلفية المتغيرة. ويتضح من المقارنة أن الطريقة المستخدمة في دراسة برهومي وآخرين تتفوق من حيث دقة ضبط الجودة بفضل استخدام مستويات متعددة من المعايرة وتحليل المعايير المرجعية الدولية مما يجعلها مناسبة للدراسات البيئية المتقدمة والتقييمات طويلة المدى. أما بروتوكول علي وآخرين[95] ، فرغم بساطته النسبية من حيث نوع المذيبات وخطوات العمل، فقد أثبت فعاليته من خلال نسب استرداد ممتازة (91.7%–110%)، ما يجعله مناسبًا للدراسات الاستقصائية السريعة أو البيئات ذات التداخل المنخفض (جدول 4.3).

**جدول 4.3** مقارنة بين منهجيات تحليل مركبات PFAS في أنسجة الكائنات البحرية

| المرجع Reference | LOD/LOQ | العمود الكروماتوغرافي Chromatographic Column | نظام LC-MS المستخدم | التنقية Clean-up | مذيب الاستخلاص Extraction Solvent | تقنية تحضير العينة Sample Prep Technique | نوع العينة Sample Type |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 95 | Not specified numerically | Zorbax Eclipse Plus C18 RRHD (2.1×100 mm, 1.8 µm) | Agilent 1200 HPLC + 6460 QqQ-MS | ENVI-Carb (Supelco) | Methanol (MeOH) | Freeze-drying, grinding, ultrasonic extraction | Fish tissues (muscle and liver) |
| 96 | LOD/LOQ calculated via blanks and S/N ratios | ACQUITY BEH C18 + XBridge C18 Guard Column | Waters ACQUITY UPLC + TQD Triple Quad MS | CHROMABOND HR-XAW + ENVI-Carb | Acetonitrile ($CH_3CN$) | Weighing dry tissue, ultrasonic extraction | Marine biota (various species) |

بناءً على ما سبق، يوصي هذا التقرير بمواءمة البروتوكول التحليلي مع طبيعة النظام البيئي قيد الدراسة ومستوى الدقة المطلوب وحجم الموارد والإمكانات المتاحة كما يؤكد على أهمية تضمين خطوات للتحكم في التلوث الخلفي واستخدام معايير مرجعية معتمدة والتحقق من نسب الاسترداد، وذلك لضمان موثوقية عالية في رصد مركبات PFAS في الأنسجة الحيوية للكائنات البحرية.

### 4.2.5 طرق تحليل PFAS في عينات حليب الأم والمواد الغذائية Breast Milk and Food Samples

تُعد مصفوفة حليب الأم والمواد الغذائية ذات أهمية خاصة في سياق تقييم التعرّض البشري لمركبات PFAS ، نظرًا لما تنطوي عليه من آثار صحية مباشرة، خاصة لدى الفئات الحساسة مثل الرضّع والنساء الحوامل. وتُظهر المراجعة المنهجية لثلاث دراسات رئيسية—أمزين وآخرين[97]، حسن وآخرين [79]والشياب وآخرين[85] تباينًا ملحوظًا في البروتوكولات التحليلية رغم اتفاقها في الأهداف العامة المرتبطة بتقدير مستويات PFAS وتقييم المخاطر الصحية. فيما يخص خطوات التحضير الأولية تميل معظم البروتوكولات المعتمدة في تحليل PFAS ضمن مصفوفات حليب الأم والمواد الغذائية إلى استخدام التجفيف بالتجميد والطحن لتجانس العينة، وهي خطوات تُسهم في إزالة الرطوبة، وتحسين استقرار المركبات، لا سيما القابلة للتطاير. ففي دراسة أمزين وآخرين[97]، استخدم التجفيف لأكثر من 36 ساعة، متبوعًا بطحن يدوي دقيق وهو ما يُعد مثاليًا لضمان توزيع متجانس للمركبات المستهدفة واستقرارها التحليلي. في المقابل،

اعتمدت دراسة حسن وآخرين[79] طريقة تحضير أبسط، تمثلت في التخفيف المباشر لعينة حليب الأم باستخدام محلول فوسفات منظم متبوعًا بمعالجة صوتية لمدة ساعة وتُعد هذه الطريقة مناسبة للعينة السائلة، وتُقلل من فقد المركبات خلال النقل والمعالجة . أما الدراسة التي أجراها الشياب وآخرون[85] ، فقد اعتمدت على بروتوكول مُعدّل عن كادر وآخرون[98]، باستخدام الأسيتون كمذيب أولي، متبوعا بحمض الفورميك ثم تبخير تحت تدفّق النيتروجين وتمثل هذه الطريقة نهجًا بسيطًا نسبيًا لكنه فعّال، خصوصًا في معالجة عينات الحليب ذات المحتوى الدهني العالي [85].

بالنسبة لأنظمة الاستخلاص والتنقية استخدمت جميع الدراسات تقنية الاستخلاص الطوري الصلب إلا أن نوعية الخراطيش اختلفت تبعًا لطبيعة العينة ومدى تعقيدها. ففي دراسة أمزين وآخرين[97]، تم اعتماد منهج مزدوج للتنقية باستخدام خراطيش أواسيس دبليو إيه إكس (Oasis WAX) وكربون إنفي-كارب (ENVI-Carb) ، مما يمنح البروتوكول قدرة معزّزة على إزالة الشوائب العضوية واللاقطبية، خصوصًا في مصفوفة معقدة مثل حليب الأم. في المقابل، اعتمدت دراسة حسن وآخرين[79] على استخدام خراطيش Oasis WAX فقط، وهي فعالة لاستخلاص المركبات الأنيونية في العينات المائية، لكنها أقل كفاءة في إزالة الدهون دون خطوات إضافية. أما الدراسة المقدمة من الشايب واخرين[85] ، فقد استخدمت خراطيش (Oasis HLB)، التي توفر توازنًا جيدًا بين الكفاءة والبساطة، لكنها تفتقر إلى آلية التبادل الأيوني، ما قد يحد من فعاليتها مع المركبات المشحونة. ويُعد استخدام كربون ENVI-Carb خطوةً متقدّمة في سياق التنقية حيث يُضيف طبقة فعّالة إضافية لإزالة المركّبات العضوية المتداخلة لا سيّما في المصفوفات المعقّدة مثل الأغذية الغنيّة بالدهون أو حليب الأم. مما يُسهم في تحسين نقاء المستخلص النهائي ورفع جودة النتائج وتقليل التأثيرات المصفوفية أثناء التحليل الطيفي.

من الناحية التقنية استخدمت جميع الدراسات أنظمة مطياف الكتلة ثلاثي الترادف المقترنة بالكروماتوغرافيا السائلة (LC-MS/MS) ، إلا أن الطرازات والأداء التحليلي تفاوتت بحسب كل دراسة. ففي دراسة أمزين وآخرين[97]، تم استخدام جهاز Waters Xevo TQS المقترن بنظام UHPSFC والذي يعتمد على الفصل باستخدام مائع فوق الحرج ويُعد من الأنظمة المتقدمة ذات الحساسية العالية والكفاءة في تقليل زمن التحليل . في المقابل، استخدمت دراسة حسن وآخرين نظامًا أقدم نسبيًا يتكوّن من جهاز Waters 2695 HPLC مع كاشف Quattro micro API، وهو نظام موثوق ومناسب للتطبيقات الأساسية، رغم محدوديته في دقة الفصل مقارنةً بالأنظمة الأحدث [79]. أما دراسة الشياب وآخرين[85]، فقد استخدمت جهاز Agilent 1200 HPLC مع كاشف AB Sciex API 3200، وهو من الأجهزة الشائعة ويتميّز بسهولة الاستخدام، ما يجعله خيارًا عمليًا في المختبرات التي تسعى لتحقيق توازن بين الأداء والدقة التشغيلية (جدول 4.4).

من حيث الحساسية التحليلية سجّلت دراسة حسن وآخرين[79] حدود كشف جيدة جدًا بلغت نحو ~10 بيكوغرام/مل ، وحقّقت نسب استرداد عالية تراوحت بين 75% و100% لمعظم المركبات، باستثناء مركب LPFBS الذي أظهر انحرافًا عن النطاق العام. كما دعمت الدراسة نتائجها بمنحنيات معايرة خطية ذات معامل ارتباط مرتفع تجاوز $R^2 > 0.99$، مما يدل على موثوقية عالية للنتائج الكمية. في المقابل، لم تُفصّل دراسة أمزين وآخرين[97] قيم LOD/LOQ بشكل مباشر، إلا أن اعتمادها على أسلوب المعايرة بالإزاحة النظيرية واستخدام مواد مرجعية معتمدة مثل IAEA-432 يشير إلى دقة تحليلية عالية، حتى في غياب البيانات الرقمية التفصيلية

**جدول 4.4** مقارنة منهجية لتحليل مركبات PFAS في حليب الأم والمواد الغذائية

| المرجع Reference | LOD/LOQ | الكروماتوغرافيا Chromatography | الأجهزة التحليلية Instrumentation | نوع SPE Type | المعايير الداخلية Internal Standards | تحضير العينة Sample Prep | نوع العينة Sample Type |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 97 | Not specified directly | CO2/methanol, Torus & BEH C18 columns, ABPR at 2000 PSI | UHPSFC-MS/MS (Waters Acquity UPC² + Xevo TQS) | Oasis WAX + ENVI-Carb | 13C8-PFOS + others, Isotope dilution method | Freeze-drying >36h, grinding, 2-stage SPE (WAX + ENVI-Carb) | Food matrices & human milk |
| 79 | LOD = 10 pg/mL, LOQ based on SD of blank | Xterra MS C18, gradient MeOH/ammonium acetate | HPLC-MS/MS (Waters 2695 + Quattro micro API) | Oasis WAX | 13C4-PFOS, 13C4-PFOA | 1:1 PBS dilution, formic acid sonication, SPE with Oasis WAX | Human breast milk |
| 85 | LOQ = 10 ng/L, LOD not stated | Agilent C18, formic acid/ammonium formate gradient | HPLC-MS/MS (Agilent 1200 + API 3200 AB Sciex) | Oasis HLB | PFDA, PFDS (non-labelled) | 3 mL + acetone, formic acid, single SPE with Oasis HLB | Cow milk |

أما دراسة الشياب وآخرين[85] ، فقد حدّدت حد التحديد الكمي بـ 10 نانوغرام/لتر وحققت نسب استرداد جيدة تراوحت بين 93% و 98 %. ورغم ذلك، استخدمت الدراسة معايير داخلية غير موسومة بالنظائر مثل PFDA وPFDS، نتيجة لقيود الاستيراد، وهو ما قد يحدّ نسبيًا من دقة التصحيح الكمي.

بشكل عام، تُظهر هذه المراجعة أن البروتوكولات التي اعتمدت على خطوات تنقية مزدوجة باستخدام خراطيش Oasis WAX و ENVI-Carb ، إلى جانب المعايرة بالنظائر المستقرة واستخدام أجهزة تحليلية فائقة الأداء LC-MS/MS، كانت الأكثر دقة وحساسية في تحليل مركبات PFAS في المصفوفات الغذائية والحيوية مثل حليب الأم. ومع ذلك، فإن البروتوكولات المبسطة كما في الدراسة الأردنية تظل خيارًا عمليًا في الدول ذات الموارد المحدودة، بشرط اعتماد إجراءات دقيقة لمراقبة الجودة وضمان تقليل تداخل المركبات لذا يجب اختيار منهج الاستخلاص والتنقية بما يتلاءم مع طبيعة المصفوفة الغذائية أو الحيوية، سواء كانت حليبًا عالي الدهون، أو أغذية نباتية أو حيوانية. كما يُفضّل استخدام معايير موسومة النظائر (13C-labelled Standards^) لتحقيق دقة كمية عالية، والاستعانة بخراطيش متعددة للتنقية عند التعامل مع مصفوفات معقّدة. ويُعد إدراج عينات مرجعية معتمدة ومعايير تحليلية موثوقة شرطًا أساسيًا لضمان مصداقية النتائج، خاصة في الدراسات الموجهة لتقييم المخاطر الصحية الناتجة عن التعرّض المزمن لمركبات PFAS .

### 4.2.6 تحليل مركبات PFAS في عينات مصل الدم البشري Human Serum Samples

يُعد تحليل عينات مصل الدم البشري أحد أكثر التطبيقات حساسية في تتبّع مركبات PFAS ، لما له من أهمية مباشرة في تقييم التعرّض البشري والمخاطر الصحية الناتجة عنه. وقد استعرضت هذه المراجعة المنهجية إحدى الدراسات العربية المنشورة التي تناولت هذا النوع من العينات، وهي دراسة بنجاني وفريقه [84] في السعودية، التي قدّمت نموذجًا تحليليًا متقدمًا من حيث تصميم البروتوكول وتأكيد الجودة. تبدأ خطوات التحضير في هذه الدراسة بجمع عينات المصل في أنابيب بلاستيكية خالية من الفلور لتفادي التلوث الناتج عن البوليمرات الفلورية مثل PTFE، وهي خطوة تُظهر وعيًا دقيقًا بمسببات التلوث المحتملة من المركبات الفلورية. يتم تخزين العينات عند 20°C- ، ثم تُذاب تدريجيًا قبل المعالجة، وتُحصّن باستخدام معايير داخلية موسومة بالنظائر المستقرة $^{13}C_8$-PFOA و $C_8$-PFOS13^، مما يتيح تعويضًا دقيقًا لأي فقد خلال الخطوات التالية. تم التحليل الكروماتوغرافي والطيف الكتلي باستخدام جهاز UPLC من نوع ACQUITY Class I (Waters, USA) متصل بجهاز MS/MS من نوع AB SCIEX 5500 QTRAP، استخدمت الدراسة عمودًا كروماتوغرافيًا من نوع BEH C18 (50×2.1 مم، 1.7 ميكرومتر) مع برنامج فصل تدرّجي مدروس، باستخدام الميثانول ومحلول خلات الأمونيوم كمكوّنات للطور المتحرّك. كما تم ضبط ظروف مصدر التأين بعناية، من حيث درجات الحرارة، فولتية الرش، وضغط الغازات، لضمان ثبات الإشارة وكفاءة الانتقال الأيوني. في جانب التحقق والتحكم في الجودة (QA/QC) ، شملت الدراسة استخدام عينات بلانك بمعدل عينة لكل عشر عينات، بالإضافة إلى تحليل مادة مرجعية معتمدة SRM-1958، وتمرير عينات مدعّمة بتركيزات معروفة عبر نفس البروتوكول. أظهرت نتائج الاسترداد نسبًا تراوحت بين 91.7% و 110%، بينما كانت انحرافات النتائج بين التكرارات (RSD%) أقل من 5.6%، وهي مؤشرات قوية على الثبات التحليلي والدقة .هذه المنهجية اعتمدت على المعايرة بالإزاحة النظيرية مع استخدام 12 نقطة معايرة تغطي نطاقًا واسعًا من التراكيز (0.02–100 ng/mL) ، ما يعكس قدرة عالية على رصد حتى أدق التراكيز في العينات البيولوجية. ومع ذلك، لم تُبلغ الدراسة عن حدود التحديد الكمي (LOQ) لكل مركّب بشكل منفصل، وهو ما يُعد فجوة معلوماتية محدودة. بشكل عام، تُمثّل هذه الدراسة أحد الأمثلة على دمج المتطلبات التقنية العالية في دراسة عربية لتحليل PFAS في مصل الدم، وتُظهر إمكانية إجراء تحاليل موثوقة ودقيقة عند توفر الأجهزة المتقدمة والبروتوكولات الصارمة لضمان الجودة. كما تفتح المجال لتوسيع التطبيقات في تقييم التعرض السكاني وربط النتائج بالمخاطر الصحية.

### 4.2.7 عينات الغبار الداخلي ومواد تغليف الأغذية (Indoor Dust and Food Packaging Materials)

يُعد تحليل مركبات PFAS في عينات الغبار الداخلي ومواد تغليف الأغذية من المجالات المتقدّمة نسبيًا، نظرًا لما تتسم به هذه المصفوفات من حساسية وتعقيد في التركيبين الفيزيائي والكيميائي. وتكتسب هذه العينات أهمية خاصة في تقييم التعرّض غير الغذائي وغير المباشر، سواء عبر الاستنشاق أو الملامسة أو الانتقال من خلال المواد الملامسة للأغذية. في الدراسة الوحيدة التي تم استعراضها ضمن هذه المراجعة، والتي أجريت من قبل شعيب وفريقه [87] وسلسلة دراسات تابعة لهم، تم تطوير بروتوكول مزدوج للتعامل مع كلا النوعين من العينات، مع فصل واضح بين خطوات التحضير والاستخلاص لكل مصفوفة، بما يضمن الحفاظ على موثوقية الإجراءات التحليلية شمل البروتوكول الخاص بعينات الغبار الداخلي خطوة الاستخلاص بمساعدة الموجات فوق الصوتية باستخدام مذيبات عضوية مثل الأسيتونتريل أو الميثانول، تليها عملية ترشيح دقيقة، ثم تنقية باستخدام خراطيش SPE من نوع Oasis WAX .أما عينات مواد تغليف

الأغذية، فخضعت لاستخلاص مذيبي محكوم بدرجة حرارة، تلاه تنظيف باستخدام ENVI-Carb لضمان إزالة البوليمرات والمواد اللاصقة التي قد تتداخل مع التحليل الطيفي. وقد استعانت الدراسة بأجهزة LC-MS/MS بنمط التأين السالب (–ESI) ، مع تطبيق المعايرة باستخدام معايير داخلية موسومة بالنظائر (13C-labelled Standards^) ، وتحليل عينات بلانك ومواد مرجعية لضمان دقة النتائج.

بالنسبة لعينات الغبار الداخلي فقد جُمعت من بيئات سكنية وخضعت بعد ذلك لمرحلة غربلة دقيقة باستخدام مناخل ذات فتحات صغيرة، بهدف تقليل الحجم الحبيبي وتحسين كفاءة الاستخلاص . أما عينات مواد تغليف الأغذية فقد تم تحليلها كما هي، دون غسل أو معالجة أولية وذلك للحفاظ على التمثيل الواقعي للمركبات القابلة للانتقال من المادة إلى الغذاء. وقد تم دعم جميع العينات بـ 20 ميكرولتر من محلول المعايير الداخلية الموسومة بالنظائر المستقرة مثل $^{13}C_4$-PFOA و$^{13}C_4$-PFOS، وهي خطوة أساسية لضبط تكرارية التحليل وضمان استرداد مضبوط عبر مختلف مراحل الاستخلاص والتنقية والتحليل.

أما فيما يخص خطوات الاستخلاص فقد شملت إستخدام مذيبات عضوية متنوّعة تم اختيارها بناءً على طبيعة كل مصفوفة. ففي حالة عينات الغبار الداخلي تم استخدام الميثانول أو الأسيتون كمذيبات فعّالة في استخلاص مركبات PFAS المرتبطة بالجزيئات الدقيقة. في المقابل، لجأت بعض بروتوكولات تحليل مواد تغليف الأغذية إلى استخدام الهكسان (n-Hexane) ، نظرًا لفعاليته في إذابة المركبات الشمعية والبوليمرية التي تُشكّل جزءًا من بنية مواد التغليف. تمت عملية الاستخلاص عبر رجّ العينات باستخدام خلاط ميكانيكي لفترة لا تقل عن 30 دقيقة لضمان التلامس الكافي بين العينة والمذيب، تلاها طرد مركزي لفصل الطبقة العضوية المحتوية على المركبات المستهدفة، تمهيدًا لمرحلة التنقية والتحليل. للتحكم بالتداخلات، جرى تمرير المستخلصات على أعمدة ENVI-Carb التي تحتوي على كربون غرافيتي مفعل، وهي خطوة فعالة في إزالة المركبات العضوية غير المستهدفة. بعد مرحلة الاستخلاص والتنقية، جُهّزت العينات للتحليل باستخدام نوعين من أنظمة الفصل والتحليل الطيفي تبعًا لطبيعة المركبات المستهدفة شملت كروماتوغرافيا الغاز مع مطياف الكتلة بالتأين الكيميائي الإيجابي (GC–PCI–MS) وقد خُصص هذا النظام لتحليل مركبات مثل (Fluorotelomer Alcohols)، و FOSEsو FOSAs نظرًا لتطايرها وقابليتها للتحليل بكفاءة عالية في الطور الغازي، باستخدام نمط التأين الكيميائي الإيجابي لتعزيز الاستجابة. و كروماتوغرافيا السائل المقترنة بمطياف الكتلة الثلاثي الترادف (LC-MS/MS) وقد استُخدم هذا النظام لتحليل مركبات PFCAsو PFSAsو PAPs مع تطبيق نمط التأين الكهربي السالب (–ESI)والذي يُعد الأكثر ملاءمة لطبيعة هذه المركبات الأنيونية.

ولتقييم الخلفية التحليلية وحدود التلوث المحتملة ، تم تضمين عينات بلانك منهجية محضّرة من كبريتات الصوديوم الجافة أو أنابيب فارغة مملوءة بالمذيب بهدف مراقبة التلوث العرضي خلال مراحل التحضير والاستخلاص. أُبلغ في الدراسة عن حدود كشف (LOD) تراوحت بين 0.03 إلى 0.22 بيكوغرام للمركبات المحلّلة بواسطة كروماتوغرافيا الغاز (GC–PCI–MS) ، وهي قيم تعكس حساسية عالية في الكشف عن المركبات شبه المتطايرة مثل FTOHs وFOSAs . أما بالنسبة لتحليل المركبات بواسطة LC-MS/MS، فقد سُجّلت حدود كشف أعلى نسبيًا، تراوحت بين 3.9 إلى 30 بيكوغرام، نظرًا لطبيعة المركبات المستهدفة مثل PFCAs و PFSAs وتداخل المصفوفة. من حيث كفاءة الاستخلاص، فقد سُجلت نسب استرداد متباينة، إذ بلغت نحو 55% لبعض مركبات FTOH، وتجاوزت 90% لبعض مركبات PFHxS وتعكس هذه التباينات التحديات التحليلية الكبيرة المرتبطة بالتعامل مع مصفوفات غير متجانسة مثل

العبوات البلاستيكية أو الأغلفة الغذائية متعددة الطبقات التي تحتوي على مواد لاصقة، بوليمرات، ومكونات وظيفية أخرى قد تعيق الفصل والتحليل الكمي.

تُعد هذه الدراسة من أوائل الجهود البحثية العربية التي تناولت الملوثات الكيميائية ذات المصدر المنزلي والمخاطر الصحية المحتملة المرتبطة بمواد تغليف الأغذية، ما يفتح آفاقًا جديدة في مجال تقييم التعرّض غير المباشر لمركبات PFAS داخل البيئات الداخلية. ويُبرز اعتمادها على تقنيتين تحليليتين منفصلتين – كروماتوغرافيا الغاز –(GC MS) والكروماتوغرافيا السائلة المقترنة بمطياف الكتلة (LC-MS/MS) مرونة منهجية في التعامل مع طيف واسع من المركبات، وإن كانت تتطلّب تجهيزات فنية متقدّمة وكفاءات بشرية مدرّبة، ما يشكّل تحديًا لوجستيًا وعملياً في بعض السياقات. تمثّل هذه الدراسة نموذجًا دقيقًا لتحليل PFAS في المصفوفات غير التقليدية، مثل الغبار الداخلي ومواد التغليف، وهي مصفوفات تتطلب نهجًا خاصًا نظرًا لتفاوت خصائصها الفيزيائية والكيميائية. وقد تميّزت الدراسة بالفصل التحضيري بين نوعَي العينات (غبار/تغليف)، في دلالة على وعي منهجي بأهمية تكييف البروتوكول مع طبيعة كل عينة.

من أبرز عناصر القوة في هذا العمل اعتماد نظام تحليلي مزدوج ؛ حيث استُخدمت تقنية GC–PCI–MS لتحليل المركبات الطيارة مثل FTOHs ، محققةً حدود كشف منخفضة جدًا، في حين قدّمت LC-MS/MSأداءً مستقرًا وموثوقًا في تحليل المركبات التقليدية مثل PFCAs و PFSAs باستخدام نمط التأين الكهربي السالب أما من حيث خطوات التنقية، فقد برز استخدام كربون ENVI-Carb كخيار فعّال لإزالة المكونات العضوية المعقدة، خصوصًا في عينات مواد التغليف متعددة الطبقات. ومع ذلك، أظهرت البيانات تباينًا ملحوظًا في نسب الاسترداد، ما يعكس استمرار التحديات المتعلقة بكفاءة الاستخلاص والتنقية لبعض المركبات. وتجدر الإشادة بالدراسة لاعتمادها عينات بلانك منهجية، وتحليل عينات مدعّمة، إلى جانب الإبلاغ الدقيق عن حدود الكشف الكمية (LODs)، مما يعزّز من مصداقية النتائج ويُظهر مستوى عالٍ من الانضباط والتحكّم في جودة الأداء المعملي.

### 4.3 التباين المنهجي في تحليل مركبات PFAS في العينات البيئية المختلفة

نظرًا للدقة العالية المطلوبة في الكشف عن مركبات PFAS ضمن العينات البيئية المختلفة، فقد تم تطوير مجموعة واسعة من البروتوكولات التحليلية ، تختلف باختلاف نوع المصفوفة البيئية مثل :المياه التربة والنباتات والكائنات البحرية والأغذية وحليب الأم والغبار الداخلي ومواد تغليف الأغذية. وتُعد المياه أكثر المصفوفات شيوعًا في الدراسات، حيث تبدأ البروتوكولات التحليلية عادةً بترشيح العينات باستخدام مرشحات ألياف زجاجية يليها تطبيق تقنية الاستخلاص الطوري الصلب لتركيز المركبات وتنقيتها. وقد تفاوتت أنواع الخراطيش المستخدمة تبعًا لنوع المياه فقد استخدمت خراطيش Oasis WAX بفعالية في تحليل مياه الصرف الصحي بعد ضبط الأس الهيدروجيني (pH) إلى ~4. أما مياه البحر فقد عولجت باستخدام خراطيش Oasis HLB نظرا لمقاومتها لتأثير الملوحة العالية. كما استخدمت خراطيش STRATAX والتي أظهرت مرونة في التعامل مع مصفوفات متعددة مثل المياه، التربة، والنباتات.

في جانب الأجهزة، اعتمدت معظم الدراسات على أنظمة كروماتوغرافيا سائلة عالية الأداء HPLC أو UHPLC مقترنة بمطياف الكتلة الثلاثي الترادف LC-MS/MS، مع استخدام نمط التأين الكهربي السالب تراوحت حدود الكشف بين 0.1–0.05 نانوغرام/لتر ، وهي دلالة على حساسية تحليلية مرتفعة. وقد أظهرت الدراسات التي اعتمدت على المعايرة باستخدام معايير داخلية موسومة بالنظائر المستقرة مثل $^{13}C_4$-PFOA و $^{13}C_4$-PFOS)، كما طبقت ضوابط الجودة المنهجية مثل عينات بلانك وعينات مدعّمة تفوقًا واضحًا من حيث الدقة والتكرارية

أظهرت البروتوكولات التحليلية للرواسب اعتمادًا كبيرًا على الاستخلاص بمساعدة الموجات فوق الصوتية وهي تقنية فعالة لاستخلاص مركبات PFAS من الطور الصلب إلى السائل. وقد تم استخدام مذيبات عضوية مثل الميثانول والأسيتونتريل ضمن مرحلة الاستخلاص، لما لها من قدرة عالية على إذابة المركبات الفلورية المستقرة. في خطوة التنقية اعتمدت الدراسات على نظام تنقية مزدوج يتكوّن من وحدة كربون ENVI-Carb وخراطيش SPE مثل Oasis WAX أو CHROMABOND HR-XAW. أما في التحليل النهائي، فقد تم تطبيق التحليل الكروماتوغرافي الطيفي باستخدام أنظمة الكروماتوغرافيا السائلة عالية الأداء المقترنة بمطياف الكتلة الثلاثي الترادف (LC-MS/MS). أما من حيث مراقبة الجودة وضبط الأداء (QA/QC)، تضمّنت البروتوكولات ما يلي :عينات بلانك منهجية معايير داخلية موسومة بالنظائر مواد مرجعية معتمدة مثل IAEA-432 الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية وساهمت هذه العناصر مجتمعة في تعزيز موثوقية النتائج التحليلية وخاصة في المصفوفات المعقدة مثل الرواسب البحرية.

أظهرت الدراسات اختلافًا ملحوظًا في طرق معالجة عينات النباتات والتربة تبعًا لطبيعة المصفوفة وخصائصها الفيزيائية والكيميائية. فقد اعتمدت بعض الدراسات على خطوات تحضير فيزيولوجية مثل التجفيف بالتجميد والطحن الدقيق بهدف تحسين التجانس وتوزيع المركبات داخل العينة. تبع ذلك تطبيق استخلاص متعدد المذيبات باستخدام خليط مكوّن من: محلول بافر ماكيلفاين–إي دي تي إيه (EDTA) ، الميثانول والماء المقطر بنسبة 1:1:1؛ حيث يوفّر هذا الخليط وسطًا متزنًا لاستخلاص المركبات الأيونية والمستقرة على حد سواء. في المقابل، لجأت دراسات أخرى إلى الاستخلاص بمساعدة الموجات فوق الصوتية باستخدام مذيبات عضوية خالصة مثل الميثانول فقط، وهي طريقة أكثر بساطة، لكنها قد تكون أقل كفاءة في بعض المصفوفات النباتية المعقدة. من حيث الأداء التحليلي، سُجلت نسب استرداد تراوحت بين 46% إلى 250%، ما يعكس تأثير نوع العينة النباتية، ومحتواها المائي ودرجة امتصاصها للمركبات على كفاءة الاستخلاص. وقد أبرزت هذه الدراسات أهمية إضافة خطوات تنقية إضافية خاصة باستخدام كربون ENVI-Carb, - ،

الذي أثبت فعاليته في إزالة المركبات العضوية غير القطبية وتقليل التداخلات الطيفية ما يُحسن من نقاء المستخلص النهائي ويُعزز دقة التحليل.

مثّلت أنسجة الأسماك والرخويات مصفوفة بيئية معقّدة تتطلب بروتوكولات مركبة لضمان استخلاص دقيق وتحليل موثوق. وقد تم تطبيق مراحل مزدوجة من التنقية باستخدام: خراطيش HR-XAW وكربون ENVI-Carb ما ساهم في إزالة الشوائب المتداخلة ورفع نقاء المستخلص النهائي.

تم إجراء التحليل الكروماتوغرافي باستخدام أنظمة عالية الحساسية مثل: جهازUPLC with TQD MS وجهاز Agilent 1200 HPLC coupled 6460 MS وهي أجهزة توفر أداءً طيفيًا عالي الحساسية عند استخدام نمط التأين الكهربي السالب من حيث ضبط الجودة أظهرت الدراسات التزامًا صارمًا عبر: استخدام مواد مرجعية معتمدة وتطبيق تحاليل مكررة على عينات مدعّمة بأكثر من تركيز وقد تراوحت نسب الاسترداد بين 64% و 108%، ما يعكس فعالية البروتوكولات في التكيّف مع هذه المصفوفات المعقدة. بناءً على نتائج التقييم المقارن للبروتوكولات التحليلية لمركبات PFASفي المصفوفات البيئية والبيولوجية، تُقترح التوصيات التالية لتحسين جودة التحليل في المختبرات العربية:

1. توحيد بروتوكولات الاستخلاص الطوري الصلب وفقًا لطبيعة العينة، مع اختيار نوع الخرطوشة المناسب، مثل:
   - Oasis WAX لمياه الصرف والعينات المشحونة سالبًا
   - Oasis HLB للمياه المالحة والبيئات المعقدة
   - STRATAX أو HR-XAW للأنسجة والنباتات

   وذلك لضمان فعالية الفصل وتقليل التداخلات.
2. استخدام معايير داخلية موسومة بالنظائر المستقرة (Isotope-Labeled Internal Standards) مثل:
   - ^13$C_8$-PFOA
   - ^13$C_8$-PFOS

   والتي تتيح تصحيح الفقد خلال مراحل التحليل، وتُعزز من الدقة الكمية
3. الاعتماد على أنظمة التحليل الطيفي عالية الحساسية مثل:
   - LC-MS/MS باستخدام أعمدة كروماتوغرافية C18 عالية الكفاءة مثل BEH C18 أو Zorbax Eclipse Plus C18، لضمان دقة الفصل وتحديد الأيزومرات.
4. تضمين أدوات مراقبة الجودة التحليلية بشكل إلزامي في كل دفعة تحليل، وتشمل:
   - عينات بلانك منهجية (Procedural Blanks)
   - عينات مدعّمة (Spiked Samples)
   - مواد مرجعية معتمدة CRMs مثل SRM 1958أو IAEA 432
5. توسيع نطاق تقييم الأداء التحليلي ليشمل:
   - تأثير المصفوفة (Matrix Effects)
   - توثيق نسب الاسترداد (Recovery Percentages)
   - تحديد حدود الكشف (LOD) وحدود التقدير(LOQ) لكل نوع من المصفوفات البيئية والبيولوجية.

# الفصل الخامس

## الفصل الخامس: البنية التحتية لأبحاث مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في الدول العربية

يحلل هذا الفصل القدرات البحثية المتاحة في المنطقة العربية لرصدPFAS ، مسلطًا الضوء على الأجهزة والتقنيات الموجودة في المختبرات الوطنية، ومدى قدرتها على مجاراة المعايير الدولية. يبرز الفصل كذلك مشكلة نقص الكوادر المدربة في مجال التحليل المتخصص، إضافة إلى غياب برامج طويلة الأمد لبناء القدرات. ويقترح أن الاستثمار في بنية تحتية إقليمية مشتركة سيكون أكثر جدوى من إنشاء قدرات متناثرة وضعيفة في كل دولة على حدة.

**5.1 تحليل وصفي للبنية التحليلية لأبحاث مركبات البير والبولي فلوروألكيل (PFAS) في الدول العربية**

استنادًا إلى البيانات المجمعة من الدراسة المنشورة حول مركبات PFAS في الدول العربية، (جدول 5.1) يظهر أن تنفيذ التحاليل الكيميائية لهذه المركبات تم في أغلب الحالات خارج الدول التي جُمعت فيها العينات. وبحسب الجدول التحليلي، بلغت نسبة الدراسات التي أُجري فيها التحليل في مختبرات دولية نحو 85.7%، بينما نُفذت النسبة المتبقية داخل المؤسسات الوطنية في عدد محدود من الدول. هذا الاتجاه يعكس نمطًا من التعاون العلمي الدولي المتكرر، والذي يمكن فهمه ضمن سياق تبادل الخبرات واستخدام البنية التحتية المتخصصة المتوفرة عالميًا.

في البحرين، مثلًا، تناولت إحدى الدراسات تحليل رسوبيات بحرية، حيث جرى جمع العينات محليًا؛ في حين أُجريت التحاليل الكيميائية في مختبرات المملكة المتحدة. وساهم الباحثون المحليون في الإشراف والمراجعة، وهو ما يعكس تكامل الأدوار في إطار شراكة علمية مشتركة. سجلت السعودية حضورًا لافتًا من حيث عدد الدراسات، شملت مواقع مثل جدة، الرياض، والجبيل. في هذه الدراسات، جرى جمع وتحضير العينات في المملكة، بينما أُجريت التحاليل في مختبرات دولية في النرويج، أمريكا، أو إسبانيا. هذا النمط يعكس استفادة من الإمكانيات التقنية المتوفرة في تلك الدول، ويشير إلى توجه متزايد نحو التعاون العلمي في مجالات التحليل الطيفي المتقدم. أما في الأردن، فقد نُفذت دراسة لحليب الأم داخل جامعة العلوم والتكنولوجيا، باستخدام تقنيات LC-MS/MS ، مما يُعدّ نموذجًا ناجحًا لتوظيف الإمكانات المحلية في تنفيذ التحليل. وشملت المساهمة أيضًا جمع العينات، تحليل البيانات، وكتابة النتائج، في تجربة تُظهر تكاملًا بحثيًا محليًا شاملاً. لبنان أيضًا أظهر حالة مشابهة، حيث أُجريت دراسة حول PFOS و PFOA في حليب الأم داخل مختبرات لبنانية LAU و AUB ، بالتعاون مع جهة قطرية في الجانب الإشرافي والتمويلي.

في الجزائر، جُمعت عينات من الغذاء وحليب الأم، وتم تطوير الطريقة التحليلية وتنفيذها في مختبر فرنسي متخصص. وقد شارك الباحثون من كلا الجانبين في الجوانب التطبيقية والكتابية. ويُبرز هذا المثال الاستخدام المتكامل للموارد العلمية بين الطرفين. شاركت تونس في دراستين، ركزت الأولى على الهواء الخارجي والثانية على عينات بحرية. في كلتا الحالتين، تم جمع العينات وتخزينها في تونس، بينما جرى التحليل في مختبرات أوروبية (هولندا، السويد، موناكو). تعكس هذه الدراسات انخراطًا في سلسلة البحث، من خلال التعاون على المستويين الميداني والتحليلي

مصر شاركت في دراسة ركزت على الغبار الداخلي ومواد تغليف الأغذية، وقد جرى التحليل في كندا، في حين تولى الفريق المصري مهام الجمع والتحضير والمساهمة في التفسير العلمي. في الكويت، اقتصرت الدراسة على إعداد جرد لمصادر PFOS دون تنفيذ تحاليل مخبرية، وأشار الباحثون إلى أن القدرات المخبرية لتحليل PFAS لا تزال قيد التطوير. وفي الإمارات، تناولت إحدى الدراسات تحليلًا سياساتيًا ومراجعة علمية دون جمع عينات أو تنفيذ تحاليل، ما يعكس اهتمامًا علميًا بالبعد التنظيمي والبيئي للمسألة. عمومًا، تظهر هذه البيانات أن معظم الدراسات اعتمدت على التعاون الدولي في جانب التحليل الكيميائي، بينما تولت الجهات المحلية مهام متنوعة تشمل جمع العينات، التخطيط الميداني، المراجعة، والإشراف. أما التحاليل التي تمت داخل المنطقة فقد تركزت في مؤسستين أكاديميتين: جامعة العلوم والتكنولوجيا الأردنية، والجامعة اللبنانية الأمريكية، وهو ما يمكن اعتباره قاعدة يُبنى عليها مستقبلاً لتوسيع القدرات التحليلية الذاتية. من خلال هذه النظرة، تتضح ملامح منظومة بحثية ناشئة، تستند حاليًا إلى شراكات استراتيجية لتجاوز التحديات الفنية المرتبطة بتحليل ملوثات معقدة مثلPFAS ، بينما تشير بعض النماذج الإقليمية إلى إمكانية تحقيق الاكتفاء العلمي على مستوى التصميم والتنفيذ داخل بعض الدول.

**جدول 5.1** تحليل وصفي لمساهمة الدول العربية في دراسات :PFAS جمع العينات، التحليل، والتعاون الدولي

| الدولة التي أُجريت فيها البحث | نسبة المساهمة المحلية | نسبة المساهمة الدولية | طبيعة المساهمة المحلية | طبيعة المساهمة الدولية | مصدر عينات PFAS | مكان تحليل PFAS |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **الأردن (شمال الأردن)** | 100% (الأردن) | 0% | جمع وتحليل عينات من حليب الأم وحليب الأبقار، تحليل إحصائي، كتابة، تمويل | لا توجد | حليب أم وحليب بقر – شمال الأردن | جامعة العلوم والتكنولوجيا – الأردن |
| **الأردن (نهر الزرقاء)** | 40% (الأردن) | 60% (السويد) | جمع عينات مياه وتربة ونباتات من أراضٍ مروية بمياه صرف | تحليل 20 مركب من مركبات PFAS في جامعة SLU – السويد | مياه صرف، نهر، تربة، نباتات – 2019 | SLU – السويد |
| **البحرين** | 15% (البحرين) | 85% المملكة ) (المتحدة | مراجعة تحريرية وإشراف إداري | جمع وتحليل العينات، كتابة المسودة، تصميم الدراسة، تمويل – المملكة المتحدة | رسوبيات بحرية – 2017 و2019 | مختبرات Cefas – المملكة المتحدة |
| **الجزائر** | 40% (الجزائر) | 60% (فرنسا) | جمع وتحضير عينات الغذاء وحليب الأم من الأسواق الجزائرية | تطوير وتحسين الطريقة التحليلية، التحليل الكيميائي، الكتابة، والتمويل – فرنسا (LABERCA) | غذاء وحليب أم – الجزائر – 2019 | فرنسا – LABERCA |
| **السعودية (الرياض والجبيل)** | 30% (السعودية) | 70% (إسبانيا) | إدارة المشروع ميدانيًا، مراجعة وإشراف محلي | التحليل الكيميائي، تصميم الدراسة، كتابة، تمويل – إسبانيا | ماء، تربة، نباتات – الرياض والجبيل – 2020 | جامعة فالنسيا – إسبانيا |
| **السعودية (جدة – البحر الأحمر)** | 35% (السعودية) | 65% النرويج، ) (أمريكا | تخطيط وجمع العينات من البحر الأحمر، مراجعة علمية | تصميم، تحليل، كتابة، تمويل – النرويج، أمريكا | رسوبيات وأسماك – جدة – 2020 | النرويج (IMR, NGI) + CSM – الولايات المتحدة |
| **السعودية (جدة – البحر الأحمر)** | 40% (السعودية) | 60% النرويج، ) (أمريكا | جمع وتحضير عينات مياه البحر، تحديد مواقع جمع العينات ميدانيًا | تطوير الطريقة، التحليل الكيميائي، كتابة، تمويل – النرويج | مياه البحر الساحلية – جدة – 2018 | النرويج – NMBU |
| **السعودية (جدة)** | 50% (السعودية) | 50% الولايات ) (المتحدة | جمع عينات دم، فحوصات سريرية، والحصول على الموافقات الأخلاقية | تحليل PFAS في مصل الدم – نيويورك، إشراف وكتابة | مصل دم – 2017–2018 | Wadsworth Center – الولايات المتحدة (نيويورك) |
| **تونس (تونس الكبرى)** | 60% (تونس) | 40% السويد، ) (هولندا | تركيب وتشغيل معدات PAS، تخزين وتحضير العينات | تحليل PFAS في الهواء – VU (هولندا) وÖrebro (السويد) | هواء خارجي – 2017–2018 | Örebro (هولندا) و VU (السويد) |
| **تونس (خليج تونس)** | 10% (تونس) | 90% موناكو، ) (ألمانيا | مراجعة تحريرية للمحتوى العلمي | تصميم الدراسة، جمع وتحليل العينات، كتابة كاملة، إشراف علمي وتمويل جزئي – IAEA، GEOMAR | أسماك بحرية – خليج تونس – 2020 | موناكو – IAEA |
| **لبنان** | (لبنان) 85% | (قطر) 15% | جمع وتحليل عينات الحليب، تصميم الدراسة، كتابة وتنفيذ كافة مراحل الدراسة | إشراف وتمويل جزئي – قطر | حليب أم – من مختلف مناطق لبنان (2015–2016) | الجامعة اللبنانية الأمريكية + الجامعة الأمريكية في بيروت |
| **مصر (القاهرة)** | (مصر) 50% | 50% كندا/المملكة ) (المتحدة | جمع وتحضير غبار وتغليف غذائي | تحليل PFAS – كندا، إشراف وكتابة | غبار داخلي وتغليف غذائي – 2013 | كندا |

### 5.2 تحليل البنية التحتية البحثية لتحليل مركبات PFAS في الدول العربية

استنادًا إلى البيانات المستخلصة من الدراسات المنشورة حول تحليل مركبات PFAS في المنطقة العربية، يتبيّن أن القدرات البحثية لا تزال محدودة وفي طور التكوين، مع تفاوت كبير بين الدول في توفر الإمكانات التقنية والتحليلية، إضافة إلى القدرة على الربط بنتائج تحليل المركبات ومؤشرات المخاطر الصحية والبيئية. أحد أبرز مؤشرات تقييم الجاهزية هو توفر تقنية LC-MS/MS محليًا، وهي الأداة التحليلية الأساسية في هذا النوع من الدراسات.

من بين جميع الحالات المدروسة، برزت كلّ من الأردن ولبنان كمثالين على امتلاك فعّال لأجهزة LC-MS/MS داخل مؤسساتهما الأكاديمية، مما يعكس قدرة محلية مستقلة على إجراء التحاليل دون الاعتماد على مختبرات أجنبية. لكن من المهم التنويه إلى أن توفّر هذه الأجهزة في بعض الدول الأخرى لا يعني بالضرورة وجود قدرة تحليلية فعّالة لمركبات PFAS .

تشير المعطيات المتوفرة إلى أن بعض الدول، مثل السعودية ومصر وتونس، قد تتوفر بها هذه الأجهزة داخل بعض الجامعات أو المراكز البيئية، إلا أن غياب الكفاءات التخصصية، إلى جانب افتقار العديد من المختبرات إلى بروتوكولات تحليل معتمدة لمركبات شديدة التعقيد مثل PFAS ، يشكّل تحديًا كبيرًا. وتُضاف إلى هذه الصعوبات ندرة المواد المرجعية، ومحدودية الوصول إلى أنظمة متقدمة لضمان الجودة (QA/QC) ، مما يجعل الاعتماد على القدرات المحلية أمرًا بالغ الصعوبة، ويضطر العديد من الباحثين إلى إرسال العينات إلى مختبرات خارجية لإجراء التحاليل اللازمة (جدول 5.2) .

في المقابل، أغلب الدراسات الأخرى في الدول العربية نُفذت تحليليًا خارج حدودها، في مختبرات متقدمة مثل LABERCA في فرنسا، NMBU في النرويج، Wadsworth Center في الولايات المتحدة، و IAEA في موناكو . يوضح هذا التوجه وجود فجوة واضحة في البنية التحليلية المحلية، سواء على مستوى التجهيزات أو الكوادر المؤهلة لتشغيلها. حتى في دول مثل السعودية التي شاركت بفعالية في جمع العينات، أُرسلت معظم العينات للتحليل في الخارج.

من حيث مصادر تمويل التحليل، يُعد التمويل المحلي مؤشرًا مهمًا على اعتراف الدولة بأهمية تحليل PFAS . في هذا السياق، موّلت كل من الأردن ولبنان دراساتهما عبر موارد محلية أو دعم خارجي جزئي، بينما اعتمدت دول مثل الجزائر، تونس، البحرين، والسعودية على شراكات دولية لتغطية تكاليف التحليل. التمويل المحلي يُعد مؤشرًا مهمًا على اعتراف الدول بأهمية تحليل PFAS وإدراجه ضمن أجنداتها البيئية والصحية. أما على صعيد الجهات المنفذة للتحليل، فنادرًا ما أُجري التحليل داخل مؤسسات وطنية. معظم العينات أُرسلت لمختبرات خارجية، ما يضعف من فرص بناء قدرات تحليلية محلية أو تراكم الخبرة لدى الفرق الوطنية. الاستثناءات تبقى الأردن ولبنان، حيث أُجري التحليل داخل الجامعات، مما يعزز من استقلالية القرار العلمي.

إحدى أبرز النقاط تتعلق بمدى استخدام نتائج التحليل في تقييم المخاطر الصحية. فقد أظهرت خمس دراسات فقط (في الأردن، لبنان، مصر، السعودية، وتونس -الأسماك) ربطًا مباشرًا بين التركيزات المكتشفة للمركبات وتقييم المخاطر الصحية أو البيئية. على سبيل المثال، استخدمت الدراسة السعودية على مياه البحر الأحمر مؤشرات مثل الجرعة اليومية المقدّرة (Estimated Daily Intake - EDI) وحدود السمية المرجعية (Tolerable Daily Intake - TDI) لتقييم المخاطر المحتملة على المستهلكين. كذلك، قيّمت الدراسة المصرية خطر التعرض المنزلي لمركبات PFAS من خلال الغبار ومواد تغليف الأغذية. في المقابل، ورغم أن دراسات مثل البحرين وتونس (الهواء) والجزائر أظهرت دقة

تحليلية عالية، إلا أنها لم تستثمر نتائجها في تقييم المخاطر أو تقديم توصيات تنظيمية، مما يضعف أثرها التطبيقي على السياسات العامة.

أظهرت بعض الدراسات، مثل تلك المنجزة في البحرين، مؤشرات على وجود تأثيرات بيئية عامة دون إجراء تحليل كمي فعلي للمخاطر، ولذا تم تصنيفها على أنها دراسات "بيئية فقط". ويُعدّ مدى ارتباط الدراسة بمشروع وطني منظم أحد مؤشرات قوة البنية البحثية؛ ففي حين قدم الأردن ولبنان نماذج واضحة لمشاريع ممولة ومدعومة على المستوى الوطني، جاءت معظم الدراسات الأخرى في إطار مشاريع دولية أو مبادرات فردية لأغراض النشر الأكاديمي، ما يُضعف من قابليتها للتحول إلى سياسات عملية.

وبالاستناد إلى مراجعة الجداول، يتضح وجود حاجة ملحّة إلى إنشاء مختبرات تحليلية وطنية متخصصة في تحليل مركبات .PFAS فغياب هذه البنية التحتية يُجبر الدول على الاعتماد على شراكات خارجية غالبًا ما تكون مكلفة وغير مستدامة. كما يؤدي هذا النقص إلى إضعاف قدرة الدول على الاستجابة السريعة لأي تلوث بيئي محتمل، ويُبطئ من إدراج مركبات PFAS ضمن برامج المراقبة البيئية الدورية.

ويُبرز هذا التحليل أن التحديات التي تواجه البنية التحتية لتحليل PFAS في الدول العربية لا تقتصر على توفر الأجهزة، بل تشمل أيضًا نقص الكفاءات الفنية والبروتوكولات المعتمدة. ومع ذلك، فإن التجارب الناجحة في كل من الأردن ولبنان يمكن أن تُشكّل نواة لمبادرات إقليمية أوسع. وعليه، يُوصى بتبنّي سياسات دعم واضحة تهدف إلى بناء قدرات تحليلية وطنية مستقلة، وربط النتائج البحثية مباشرةً بتقييمات صحية وبيئية قابلة للتطبيق.

**جدول 5.2** الأجهزة والتقنيات المستخدمة لتحليل PFAS في الدول العربية

| الدولة | نوع العينة | الجهاز المستخدم | نوع العمود | LOD/LOQ | توفر التقنية محليًا | مكان تمويل | الجهة المنفذة | مشروع وطني | تقييم المخاطر الصحية | تقييم بيئي |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **الأردن** | حليب الأم وحليب البقر | Agilent 1200 HPLC + API 3200 Triple Quad (AB Sciex) | NR | NR | نعم | محلي | جامعة العلوم والتكنولوجيا الأردنية | نعم | نعم | نعم |
| | مياه، تربة، نباتات | TSQ QUANTIVA MS/MS + DIONEX UltiMate 3000 UPLC | NR | NR | نعم | مشترك | السويد – SLU | نعم | نعم | نعم |
| **لبنان** | حليب الأم | Waters Micromass Quattro micro API LC-MS/MS | Xterra MS C18 (2.1 × 100 mm, 3.5 µm) | LOD: <10 pg/mL, LOQ: ~30 pg/mL | نعم | محلي + دعم خارجي | LAU + AUB – لبنان | نعم | نعم | لا |
| **تونس** | أسماك بحرية | Waters ACQUITY UPLC + TQD Triple Quad MS | NR | NR | لا | دولي (فرنسا) | موناكو – IAEA | لا | لا | نعم |
| | هواء خارجي | غير مذكور – LC-MS/MS فقط | NR | NR | لا | دولي (السويد/هولندا) | VU/Örebro – أوروبا | لا | لا | نعم |
| **الجزائر** | أغذية وحليب أم | Waters ACQUITY UPC2 + Xevo TQS MS/MS | Torus Diol 130 Å, 1.7 µm, 3.0×100 mm | LOD ~0.074–0.064 ng/mL, LOQ ~0.11–0.36 ng/L | لا | دولي (فرنسا) | LABERCA – فرنسا | نعم | لا | نعم |
| **السعودية** | مياه بحر | Agilent 6460 Triple Quad MS (AJS-ESI) | Zorbax Eclipse Plus C18 RRHD, | PFOS LOD=0.064 LOQ=0.36 ng/L | لا | دولي (النرويج) | NMBU – النرويج | لا | نعم | نعم |
| | تربة ونباتات | TSQ QUANTIVA MS/MS (Thermo) + DIONEX UltiMate 3000 | NR | NR | لا | دولي (إسبانيا) | جامعة فالنسيا – إسبانيا | لا | نعم | نعم |
| | مصل دم بشري | غير مذكور – تم التحليل في Wadsworth Center (USA) | NR | NR | لا | دولي (أمريكا) | Wadsworth Center – أمريكا | لا | لا | لا |
| **مصر** | غبار داخلي وتغليف غذائي | غير مذكور – تم التحليل في كندا | NR | NR | لا | دولي (كندا) | كندا (جهة غير محددة) | غير مذكور | نعم | لا |
| **البحرين** | رسوبيات بحرية | غير مذكور – التحليل في مختبرات Cefas (UK) | NR | NR | لا | دولي (المملكة المتحدة) | Cefas – المملكة المتحدة | نعم | لا | نعم |

# الفصل السادس

## الفصل السادس: دور الشبكة العربية في مواجهة تلوث البيئة بـمركبات PFAS والتحديات في المنطقة العربية

يسلط هذا الفصل الضوء على الجهود المبذولة من قبل الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة، والتي تلعب دورًا محوريًا في مواجهة تلوثPFAS .يستعرض محاور عمل الشبكة مثل بناء قاعدة بيانات إقليمية، تطوير بروتوكولات قياس موحدة، تعزيز التعاون الدولي، ورفع مستوى الوعي العام. كما يناقش جهودها في دعم السياسات البيئية وتشجيع البحث والابتكار. على الرغم من ذلك، يشير الفصل إلى التحديات الكبيرة مثل ضعف التمويل، نقص الكفاءات، غياب التنسيق بين المؤسسات، وفجوات البحث التي لا تزال واسعة.

**دور الشبكة العربية في التصدي لمركبات PFAS**

تُدرك الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة (EPN) حجم التحديات البيئية المتزايدة التي تواجه المنطقة العربية، وخصوصًا التحديات المرتبطة بالتلوث بمركبات PFAS التي تمثل تهديدًا بيئيًا وصحيًا بالغ الخطورة. وانطلاقًا من رسالتها في حماية البيئة وصحة الإنسان وتعزيز التنمية المستدامة، تسعى الشبكة إلى اتخاذ خطوات استراتيجية متكاملة وفعالة للتصدي لهذا التلوث المزمن، من خلال المحاور التالية :

### 6.1.1 بناء قاعدة بيانات إقليمية

تعتزم الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة إنشاء قاعدة بيانات شاملة ومتكاملة تسعى من خلالها إلى توثيق مستويات مركبات PFAS في مختلف البيئات العربية بشكل دقيق ومفصل. وستجمع هذه القاعدة بين البيانات البحثية المتاحة والبيانات الناتجة من مسوح ميدانية تُجرى في المناطق المشبوهة بالتلوث، مما يتيح رؤية شاملة للتوزيع الجغرافي لهذه المركبات. وتشمل مصادر جمع البيانات المياه الجوفية والسطحية، والتربة، والهواء، فضلاً عن العينات البيولوجية عند الحاجة. يُهدف من خلال هذه الجهود إلى تحديد البؤر الأكثر تلوثًا بدقة، وكشف المصادر المحتملة لانبعاث مركبات PFAS، مما يشكل أساسًا علميًا داعمًا لوضع سياسات بيئية فعالة وبرامج رقابية مستهدفة لمكافحة التلوث وتعزيز حماية البيئة والصحة العامة في المنطقة.

### 6.1.2 تطوير وتوحيد بروتوكولات القياس

ستعمل الشبكة، من خلال خبراتها وتعاونها الدولي، على تطوير بروتوكولات موحدة لقياس وتحديد مستويات مركبات PFAS، تشمل تدريب الكوادر الفنية على استخدام أحدث تقنيات التحليل وضمان جودة البيانات. يساهم ذلك في رفع مستوى موثوقية النتائج وقابليتها للمقارنة على الصعيد الدولي، مما يدعم الجهود الرامية إلى حماية البيئة وصحة المواطنين في المنطقة العربية بشكل فعّال ومستدام.

### 6.1.3 تعزيز التعاون الإقليمي والدولي

تؤمن الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة بأهمية التعاون والتكامل في مواجهة التحديات البيئية المرتبطة بمركبات PFAS .ومن هذا المنطلق، تسعى الشبكة إلى تعزيز الشراكات الاستراتيجية مع المنظمات الدولية المتخصصة، والمراكز البحثية الرائدة، بالإضافة إلى تفعيل التعاون الأكاديمي والبحثي بين الجامعات والمؤسسات العلمية العربية، وذلك لتبادل المعرفة وأحدث التقنيات المتقدمة في هذا المجال. يفتح هذا التعاون آفاقًا واسعة لنقل التكنولوجيا وتطوير حلول مبتكرة تتوافق مع الخصائص البيئية والاجتماعية الفريدة للمنطقة العربية.

علاوة على ذلك، ستعمل الشبكة على تفعيل الشراكات مع القطاع الخاص، وخصوصًا شركات التكنولوجيا البيئية، بهدف إدخال وتبني تقنيات معالجة متقدمة للتخلص من مركبات PFAS في المياه الصناعية ومياه الشرب، مما يسهم في تقليل الأعباء البيئية وحماية صحة الإنسان بفعالية.

### 6.1.4 رفع مستوى الوعي والتثقيف

تعمل الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة على إطلاق حملات توعية شاملة تستهدف مختلف فئات المجتمع، بما في ذلك صناع القرار، والقطاع الخاص، والجمهور العام. وتشمل هذه الحملات تنظيم ورش عمل متخصصة، وندوات علمية، وفعاليات توعوية تهدف إلى توضيح مخاطر مركبات PFAS وتأثيراتها السلبية على البيئة

وصحة الإنسان. كما تسعى الشبكة من خلال هذه الفعاليات إلى تقديم إرشادات واضحة وعملية للحد من التعرض لتلك المركبات.

ويأتي هذا الاهتمام نظراً لنقص الوعي الكافي بين المصنعين والمستهلكين حول استخدام مركبات PFAS والمخاطر المحتملة المرتبطة بها، مما يؤدي إلى استمرار الاستخدام العشوائي وغير المنظم للمنتجات التي تحتوي عليها دون رقابة فعالة. ومن هنا، تعمل الشبكة على سد هذه الفجوة المعرفية من خلال نشر المعلومات العلمية الدقيقة وبناء ثقافة بيئية مستدامة تعزز من حماية المجتمع والبيئة.

### 6.1.5 دعم السياسات والتشريعات البيئية

تسهم الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة بشكل فاعل في دعم وضع وتطوير سياسات وتشريعات بيئية تهدف إلى تنظيم استخدام مركبات PFAS والحد من انبعاثاتها المضرة بالبيئة والصحة العامة. وتشمل جهود الشبكة تقديم مقترحات تشريعية مبنية على الأدلة العلمية، والمشاركة الفعّالة في اللجان الاستشارية المعنية بصياغة وتنفيذ هذه السياسات. كما تعمل الشبكة على التنسيق مع الجهات الحكومية المختصة على المستويات الوطنية والإقليمية لضمان تطبيق المعايير البيئية الدولية، مستفيدةً من تجارب الدول المتقدمة مثل أستراليا التي طبقت أطر تنظيمية صارمة وفعالة في هذا المجال.

ويأتي هذا الدعم في ظل غياب قوانين واضحة أو لوائح محددة لدى الغالبية العظمى من دول المنطقة لتنظيم الملوثات البيئية الناشئة، خصوصًا مركباتPFAS ، إضافةً إلى نقص البرامج الوطنية الخاصة بالرصد المستمر لهذه الملوثات، مما يزيد من أهمية دور الشبكة في تعزيز الإطار التشريعي والتنفيذي البيئي ضمن جهود حماية البيئة وصحة السكان.

### 6.1.6 تشجيع البحث والابتكار

ستلتزم الشبكة بدعم البحث العلمي بشكل شامل من خلال تنفيذ برامج تدريبية متخصصة وتطوير مهني مستمر للباحثين، مع التركيز على بناء القدرات التقنية لتطبيق أحدث الأساليب والتقنيات المتقدمة للكشف الدقيق عن مركبات PFAS وإزالتها من البيئات المتنوعة. كما ستعمل الشبكة على تأسيس منصات بحثية إقليمية مشتركة تسهل التعاون العلمي بين المؤسسات البحثية والجامعات، وتعزز الابتكار وتبادل الخبرات والمعارف المتخصصة، بما يساهم في تطوير حلول مبتكرة ومستدامة لمواجهة تحديات التلوث بهذه المركبات في المنطقة العربية. وستدعم هذه المبادرات بناء شبكات علمية قوية تسهم في تعزيز التكامل البحثي والتطبيق العملي للنتائج العلمية بما يخدم السياسات البيئية والصحية المحلية والإقليمية.

### 6.1.7 مراقبة وتقييم التأثيرات البيئية والصحية

تعتزم الشبكة تنفيذ برامج مراقبة منتظمة ومستدامة تهدف إلى تقييم تأثير مركبات PFAS على صحة الإنسان والبيئة بدقة عالية. سيتم من خلال هذه البرامج جمع بيانات بيئية وصحية شاملة، وتحليلها بطرق علمية متقدمة للكشف عن الاتجاهات والارتباطات ذات الصلة. وتُستخدم هذه النتائج لدعم اتخاذ قرارات مدروسة ومبنية على أدلة علمية قوية، تعزز من فاعلية السياسات والإجراءات البيئية والصحية في المنطقة.

### 6.1.8 تطوير برامج إدارة مستدامة للمياه

نظرًا للأهمية الحيوية للمياه في المنطقة، تلتزم الشبكة بتطوير برامج متكاملة لإدارة موارد المياه بشكل مستدام، مع تركيز خاص على الحد من تلوث المياه بمركبات .PFAS وتشمل هذه البرامج تحسين وتبني تقنيات متقدمة لمعالجة المياه، تعزيز كفاءة استهلاك المياه في مختلف القطاعات، وتطوير حلول مبتكرة لإعادة استخدام المياه المعالجة بأمان. من خلال هذه المبادرات الاستراتيجية، تهدف الشبكة العربية للتصدي للملوّثات البيئية الناشئة إلى تحقيق تأثير إيجابي ملموس في مواجهة تحديات تلوثPFAS ، وضمان توفير بيئة صحية ومستدامة تحمي حقوق الأجيال الحالية والمستقبلية في المنطقة العربية.

### 6.1.9 إصدار تقارير تقنية دورية حول مركبات (PFAS)

تُدرك الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة (EPN) الأهمية المتزايدة لإعداد وإصدار تقارير تقنية دورية ومتخصصة حول مركبات البولي فلوروألكيل(PFAS) ، والتي تُعد من أبرز الملوثات البيئية الناشئة على المستوى العالمي. وتهدف هذه التقارير إلى تقديم محتوى علمي رصين يشمل معلومات فنية مفصلة، وبيانات إحصائية دقيقة، وتحليلات شاملة من مختلف الجهات المعنية، بالإضافة إلى مراجعات علمية محدثة تواكب آخر المستجدات والابتكارات البحثية في هذا المجال الحيوي.

تسعى الشبكة من خلال هذه المبادرات إلى تحقيق عدة أهداف رئيسية، منها:

- توفير المعلومات والبيانات الدقيقة لصناع القرار، لتمكينهم من اتخاذ إجراءات مبنية على أدلة علمية موثوقة؛
- تمكين الباحثين والمهنيين من الوصول إلى قاعدة معرفية عربية محدثة تسهل عليهم إجراء الدراسات والتطوير المستمر؛
- تعزيز الوعي البيئي لدى مختلف فئات المجتمع حول المخاطر الصحية والبيئية الناجمة عن مركباتPFAS ؛
- دعم تنفيذ الأجندة الإقليمية للتنمية المستدامة، مع التركيز الخاص على الهدف السادس المتعلق بالمياه النظيفة والهدف الثالث عشر المرتبط بمكافحة تغير المناخ.

وفي هذا السياق، تؤكد الشبكة على ضرورة تعزيز التعاون والتكامل المؤسسي بين الجهات الحكومية، والقطاع الخاص، ومنظمات المجتمع المدني، بالإضافة إلى المؤسسات البحثية والمعامل المتخصصة، بهدف التصدي للتحديات البيئية المشتركة عبر نهج إقليمي منسق ومستدام يضمن تحقيق نتائج فعّالة ومستدامة.

**أهمية التقارير التقنية البيئية ودورها في الحوكمة الرشيدة**

تُعد التقارير التقنية أداة استراتيجية فعّالة لنقل المعرفة العلمية إلى مختلف فئات المجتمع، وتتمثل أبرز وظائفها في الآتي:

- توفير معلومات موثوقة :تقدم التقارير بيانات دقيقة وإحصاءات حديثة تسهم في فهم أعمق للتحديات البيئية المرتبطة بـ PFAS في البيئات العربية.
- تعزيز الشفافية المؤسسية :توثق التقارير جهود الشبكة ومبادراتها وتوفر سجلًا معلنًا بالإجراءات المتخذة، ما يسهم في بناء الثقة بين الأطراف المعنية.

- تحفيز المشاركة المجتمعية :من خلال نشر المعرفة وتبسيط المفاهيم البيئية، تساهم هذه التقارير في تشجيع الأفراد والمجتمعات على الانخراط الفاعل في العمل البيئي.
- دعم صناعة القرار :تمكّن البيانات المجمّعة والمنظمة صانعي السياسات من وضع لوائح وتشريعات بيئية فعّالة ومدروسة.
- تعزيز الشراكات المتعددة الأطراف :تفتح التقارير المجال أمام تعاون منهجي بين القطاع الحكومي، الخاص، والأكاديمي، بهدف إيجاد حلول جماعية قائمة على الابتكار والمعرفة.

### 6.1.10 تقييم دوري لمركبات PFAS في مياه الشرب

توصي الشبكة العربية للتصدي للملوثات البيئية الناشئة (EPN) جميع الدول العربية بضرورة إدراج تحليل مركبات PFAS ضمن التحاليل الدورية التي تُجرى في محطات مياه الشرب المحلية، والتي تُغطّي احتياجات شريحة واسعة من المواطنين في مختلف البلدان العربية، على غرار المبادرات التي نفذتها الولايات المتحدة الأمريكية. ففي عام 2020، أصدر الكونغرس الأمريكي "قانون PFAS "، والذي ألزم وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) بوضع حدود قانونية قابلة للتنفيذ لقياس مستويات مركبات PFAS في مياه الشرب، عبر إجراء اختبارات تشمل 29مركبًا من هذه المركبات ، مع تركيز خاص على مركبات مثل PFOA وPFOS، نظرًا لما ثبت من خواصها المسرطنة علميًا.

وبناءً على ذلك، تدعو الشبكة إلى الإجراءات التالية :

- البدء الفوري بدمج تحاليل PFAS ضمن برامج المراقبة المنتظمة لمياه الشرب في الدول العربية.
- إعطاء أولوية للرصد المستمر لمركبات PFOA وPFOS، نظراً لخطورتها الصحية المؤكدة.

## 6.2 تحديات دراسات مركبات PFAS في المنطقة العربية

تتمثل القيود في الدراسات المتعلقة بمركبات PFAS في المنطقة العربية في غياب قاعدة بيانات حديثة وتاريخية عن مستويات هذه المركبات في البيئات المختلفة. يعود ذلك إلى عدم وجود بروتوكولات موحدة للكشف وتحديد مركبات PFAS، بالإضافة إلى غياب الأنظمة التي تنظم تصريف المخلفات الملوثة بهذه المركبات. كما أن عدم وجود برامج للرصد البيئي والهيئات المعنية بحماية البيئة يؤدي إلى اختلاف موثوقية البيانات بين الدول. ويُبطئ غياب الأنظمة عملية تنفيذ برامج الرصد والجهود الرامية إلى تقليل المخاطر المرتبطة بتلوث البيئة بمركبات PFAS.

على الرغم من توفر التمويل في معظم دول الشرق الأوسط، مثل دول الخليج، إلا أن هذه الدول تفتقر إلى نظام إدارة يخصص الأموال للكشف وتحديد مركبات PFAS في بيئاتها، نظراً لأن الدراسات في هذا المجال تتطلب تقنيات متقدمة وكوادر بحثية ذات مهارات عالية.

ومن الأسباب الأخرى لقلة الدراسات في مجال PFAS في الشرق الأوسط، تركيز أولويات الدول على قضايا أكثر إلحاحا مثل ندرة الموارد المائية والتلوث البيئي الناجم عن النفط وتأثيرات تحلية المياه. كما أن الوعي العام المنخفض لدى المجتمعات والتباطؤ في تبني السياسات البيئية يؤثر سلباً على أبحاث PFAS. ومن النقاط الهامة أيضاً، غياب التعاون بين مراكز البحوث والجامعات في دول الشرق الأوسط، مما يؤدي إلى عدم تبادل المعرفة بين العلماء والباحثين. علاوة على

ذلك، فإن معظم مركبات PFAS في الشرق الأوسط تأتي من المنتجات المستوردة، مما يمثل صعوبة في أخذ العينات ودراسة تلوث PFAS في مناطق مختلفة من الشرق الأوسط.

### 6.3 فجوات البحث في تحليل مركبات PFAS في المنطقة العربية

رغم التقدم الملحوظ في بعض الدراسات العربية المتعلقة برصد وتحليل مركبات PFAS في المصفوفات البيئية المختلفة، إلا أن هذا الحقل لا يزال في مراحله الأولى. توضح مراجعتنا المنهجية أن عدد كبير من الجوانب البحثية المتعلقة بهذه المركبات لم تُغطّ بعد، أو جرى تناولها بصورة غير شاملة. ويُعد تحديد الفجوات العلمية والتقنية خطوة محورية لتوجيه التمويل البحثي، وبناء القدرات التحليلية، وتعزيز السياسات الوقائية والتشريعية.

أظهرت قاعدة البيانات التي جُمعت أن معظم الدراسات ركزت على المياه، حليب الأم، وبعض الأغذية والكائنات البحرية. بينما تُعد مصفوفات بيئية مثل الهواء الجوي، المياه الجوفية، البول، الغشاء المخاطي، وحليب الأطفال غير ممثلة في الدراسات العربية، رغم أهميتها في تقييم التعرض البشري والانتقال البيئي. كما لم تتناول معظم الدراسات سوى المركبات التقليدية مثل PFOS و PFOA، بينما تم تجاهل الجيل الجديد من المركبات البديلة مثل GenX ، ADONA، و F-53B. غياب هذه المركبات من قوائم الاستهداف قد يؤدي إلى تقليل تمثيل المخاطر الحقيقية التي قد تتعرض لها المجتمعات.

من الجانب التحليلي واستخدام الأجهزة، أظهرت المقارنة أن عددًا كبيرًا من الدول (مثل تونس، الجزائر، البحرين، ومصر) أرسلت عيناتها إلى مختبرات أوروبية أو أمريكية، ما يدل على غياب أجهزة LC-MS/MS المتخصصة أو عدم جاهزيتها للعمل على PFAS محليًا. ويشير هذا إلى غياب البنية التحتية التحليلية المتخصصة، سواء من حيث التجهيزات أو الكوادر الفنية المدربة. ايضا لا توجد حاليًا بروتوكولات قياسية معتمدة إقليميًا لتحليل PFAS ، ما يخلق تباينًا في المنهجيات بين المختبرات ويجعل المقارنة بين النتائج محدودة أو غير دقيقة. يتطلب ذلك تطوير بروتوكولات مرجعية موحدة على المستوى العربي، على غرار ما هو معمول به في الاتحاد الأوروبي، مثل معايير ISO, DIN.

فيما يتعلق بالمخاطر الصحية والبيئية وباستثناء دراسات الأردن ولبنان ومصر، لم تتضمن معظم الأعمال تحليلًا لمخاطر التعرض أو تقييم الجرعة اليومية المقدّرة (EDI) أو حدود السمية المرجعية .(TDI) التركيز المفرط على الجوانب التحليلية دون ربطها بالتقييم الصحي أو البيئي يُضعف أثر هذه الدراسات في دعم السياسات الصحية والبيئية. كما لا توجد حتى الآن دراسات شاملة لتوزيع PFAS في مناطق جغرافية متعددة داخل الدولة الواحدة أو بين الشرائح السكانية (أطفال، نساء حوامل، عمال مصانع). كما لم تُجرَ نمذجة للتعرض طويل الأمد ولا مقارنة بمستويات مرجعية دولية مثل معايير EPA و EFSA .

# الفصل السابع

## الفصل الخامس: الاستنتاجات والتوصيات

يجمع هذا الفصل النتائج التي توصل إليها التقرير ليؤكد أن PFAS تمثل خطرًا بيئيًا وصحيًا متصاعدًا يتطلب استجابة عاجلة ومنسقة. يقدم توصيات عملية تبدأ بإنشاء مختبرات وطنية وإقليمية مزودة بتقنيات حديثة، وتطوير بروتوكولات قياسية للتحليل والتقييم الصحي. كما يدعو إلى وضع تشريعات واضحة تحد من استخدام هذه المركبات وتراقب مستوياتها في المياه والغذاء. يشدد الفصل على أهمية حملات التوعية الموجهة للجمهور وصناع القرار لتعزيز الفهم المجتمعي بخطورة PFAS. إضافة إلى ذلك، يحث على تعزيز التعاون الإقليمي والانخراط في المبادرات الدولية لتبني أساليب تحليل موحدة عالميًا. ويؤكد أن مواجهة هذا التحدي تتطلب نهجًا متعدد التخصصات يجمع بين العلوم البيئية والصحة العامة والتشريعات والتقنيات الحديثة، لضمان حماية البيئة وصحة الإنسان على المدى البعيد.

أظهر التقرير التقني الحالي، الذي ركّز في تغطيته الجغرافية على منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، وجود فجوة واضحة في البحث والتشريع والتنفيذ فيما يتعلق بمركباتPFAS ، مقارنة بالدول المتقدمة. فعلى الرغم من تصاعد الاهتمام العالمي بهذه المركبات المعروفة بثباتها البيئي، وتأثيراتها الصحية المحتملة، لا تزال الدول العربية تفتقر إلى الأسس المؤسسية والبنى التحتية الفنية اللازمة لرصدها ومعالجتها .وتُظهر قواعد البيانات البحثية عددًا محدودًا للغاية من الدراسات المنشورة عربيًا حولPFAS ، ويُعزى ذلك إلى عدة عوامل مترابطة، من أبرزها :ضعف الوعي البيئي، غياب الأطر التشريعية، ضعف الرقابة الحكومية، نقص المختبرات المجهزة، قلة الكوادر المتخصصة، ومحدودية التمويل الموجه لهذا المجال الحيوي.

وقد ساهم التعاون البحثي مع مؤسسات دولية في تمكين عدد من الباحثين العرب من تحليل عينات PFAS باستخدام تقنيات متقدمة مثلLC-MS/MS ، إلا أن الاعتماد المفرط على الشركاء الخارجيين يظل حلاً مرحليًا وغير مستدام. من هنا تبرز الحاجة إلى إنشاء مختبرات تحليل مرجعية إقليمية وتطوير بروتوكولات تحليلية تراعي الظروف البيئية الخاصة بالمنطقة، مثل الجفاف، الملوحة العالية، وندرة المياه. كما أن الربط بين التحليل الكيميائي والتقييمات الصحية والبيئية لا يزال محدودًا، إذ أن معظم الدراسات لا تطبّق منهجيات تقييم الجرعة اليومية المقدّرة(EDI) ، أو الحدود المرجعية للسمية(TDI) ، ولا تستند إلى نماذج تقييم مخاطر متعددة المسارات، مما يُضعف فعالية الربط بين النتائج العلمية والسياسات الوقائية.

تُعد رغوات مكافحة الحرائق، خاصة في المنشآت العسكرية والمطارات، من أهم مصادر التلوث بمركبات PFAS في المنطقة العربية، مما يستدعي ضرورة الالتزام بالتوصيات الدولية الرامية إلى التحوّل لاستخدام بدائل خالية من الفلور، كما فعلت مطارات عالمية عدة، التي فرضت قيودًا صارمة على التصنيع والتدريب.

وفي ضوء هذه المعطيات، يوصي التقرير بمجموعة من الإجراءات التقنية والمؤسسية، منها :

- إنشاء مختبرات تحليل مرجعية مجهزة بتقنيات.LC-MS/MS
- تطوير بروتوكولات إقليمية موحدة لتحليل مركبات PFAS في المياه، التربة، الأغذية، والهواء.
- توسيع قائمة المركبات المستهدفة لتشمل بدائل PFAS الحديثة.
- دعم الأبحاث التطبيقية التي تربط البيانات الكيميائية بالتقييمات الصحية والبيئية.
- إدماج تحليل PFAS ضمن برامج الرصد الوطنية للبيئة والغذاء.

ويشمل التقرير كذلك توصيات بحثية وتدريبية مهمة:

- إطلاق برامج تدريبية لبناء قدرات الباحثين والفنيين المحليين.
- تنظيم ورش عمل وندوات ومؤتمرات إقليمية لتبادل المعرفة والخبرات.
- بناء قاعدة بيانات عربية موحدة لرصد مستويات PFAS في البيئات المختلفة.
- تعزيز الشراكات الدولية مع التركيز على نقل المعرفة والتقنيات بدلاً من الاكتفاء بالخدمات التحليلية.

ويختتم التقرير بالتأكيد على أهمية التوصيات التنفيذية التالية:

- إلزام الشركات المصنعة التي تدخل مركبات PFAS في منتجاتها، بتنظيف ومعالجة مخلفاتها الصناعية قبل تصريفها، لمنع تسرب هذه المركبات إلى البيئة.

- تطوير محطات معالجة مياه الصرف الصحي لتكون قادرة على إزالة مركبات PFAS خلال مراحل المعالجة المختلفة، ومنع تصريفها إلى التربة والمسطحات المائية.
- تشديد الرقابة على استخدام PFAS في الصناعات الاستهلاكية، ولا سيما في أواني الطهي غير اللاصقة التي قد تُطلق كميات خطرة من هذه المركبات عند تعرّضها لدرجات حرارة عالية.

**خاتمة**

في غضون السنوات الخمس إلى العشر المقبلة، يمكن للمنطقة العربية أن تشهد تحولاً نوعيًا في مجال إدارة مركبات PFAS، إذا تم التركيز على الاستثمار الفعّال في بناء مختبرات وطنية مرجعية متطورة، وتطوير الكفاءات البشرية المحلية ذات المهارات العالية، بالإضافة إلى تمويل مشروعات وطنية مستدامة للرصد البيئي والتحليل الكيميائي. هذا التحول لا يقتصر فقط على تحسين الإمكانات الفنية والمؤسسية، بل يفتح المجال أمام المنطقة لتصبح مركزًا رائدًا لبحث ومعالجة هذه المركبات، مما يسمح لها بالانتقال من موقع المتلقّي للمعلومات والخدمات إلى موقع المنتج والمصدّر للمعرفة العلمية والتقنيات المتقدمة المتعلقة بمركبات PFAS . إن تحقيق هذه الرؤية الطموحة يتطلب إقامة تحالفات استراتيجية قوية بين مختلف الأطراف المعنية، بما في ذلك الجامعات والمؤسسات البحثية، والهيئات البيئية الوطنية، ووزارات الصحة والقطاعات الحكومية ذات الصلة. كما يتطلب الدعم الفاعل من شركاء دوليين ملتزمين بنقل التكنولوجيا الحديثة، وبناء القدرات التقنية والإدارية بشكل مستدام، مع مراعاة خصوصيات بيئة المنطقة وتحدياتها مثل الجفاف وارتفاع ملوحة المياه.

وفي هذا السياق، يُعد تعزيز التعاون الإقليمي والدولي وتبادل الخبرات والتقنيات المتقدمة ركيزة أساسية لتحقيق تطور شامل ومستدام في مجال رصد وإدارة مخاطر مركبات PFAS ، بما يضمن حماية البيئة والصحة العامة في المنطقة العربية على المدى الطويل.

# المراجع


[1] Androulakakis, A., Alygizakis, N., Bizani, E. & Thomaidis, N.S., 2022. Current progress in the environmental analysis of poly-and perfluoroalkyl substances (PFAS). Environmental Science: Advances, 1(5), pp.705–724.

[2] Cousins, I.T., DeWitt, J.C., Glüge, J., Goldenman, G., Herzke, D., Lohmann, R., Miller, M., Ng, C.A., Scheringer, M., Vierke, L. and Wang, Z., 2020. Strategies for grouping per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) to protect human and environmental health. Environmental Science: Processes & Impacts, 22(7), pp.1444-1460.

[3] Itumoh, E.J., Okafor, E.C., Zhang, Y., and Liu, J., 2024. Addressing the persistence of per-and poly-fluoroalkyl substances (PFAS): Current challenges and potential solutions. RSC Sustainability, [online] Available at: https://doi.org/10.1039/D4SU00023A [Accessed 28 Jul. 2025].

[4] Gunnarsdóttir, M.J., Andradóttir, H.Ó., Ólafsdóttir, K., Hlödversdóttir, Á.Ó., Kallenborn, R., Ræder, E.M., Lyche, J.L., Becanova, J. and Lohmann, R., 2025. PFAS in drinking water, wastewater and surface water in Reykjavik, Iceland. Environmental Science: Advances.

[5] Glüge, J., Scheringer, M., Cousins, I.T., DeWitt, J.C., Goldenman, G., Herzke, D., Lohmann, R., Ng, C.A., Trier, X. and Wang, Z., 2020. An overview of the uses of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS). Environmental Science: Processes & Impacts, 22(12), pp.2345–2373.

[6] Allen, J. G. 2018. These Toxic Chemicals are Everywhere—Even in Your Body. and They Won't Ever Go Away. Washington Post.

[7] Aras, D., Wasler, S., Bieri, A., Domenig, F. & Moor, J. 2022. PFAS–Forever Chemicals. Report EUT-P4-22FS-04/Institute for Biomass and Resource Efficiency.

[8] Buck, R. C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J. M., Cousins, I. T., De Voogt, P., Jensen, A. A., Kannan, K., Mabury, S. A. & Van Leeuwen, S. P. 2011. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins. Integrated environmental assessment and management, 7, 513-541.

[9] OECD, 2018. Toward a New Comprehensive Global Database of PFASs. Series on Risk Management No. 39. [online] Available at: https://www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals

[10] OECD. 2021. Reconciling terminology of the universe of per-and polyfluoroalkyl substances: recommendations and practical guidance. OECD Publishing Paris [Online]. Available: https://www.oecd.org/en/publications/reconciling-terminology-of-the-universe-of-per-and-polyfluoroalkyl-substances_e458e796-en.html. [Accessed 26-04-2025].

[11] Green Science Policy, I. 2024. Scientists' Statement on Defining PFAS [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1YLB2zvWG5Ez6VeMqqbw77LpVEj0JTj1H/view [Accessed 12-04-2025].

[12] Schymanski, E. L., Zhang, J., Thiessen, P. A., Chirsir, P., Kondic, T. & Bolton, E. E. 2023. Per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in PubChem: 7 million and growing. Environmental Science & Technology, 57, 16918-16928.

[13] USEPA, 2023. Proposed PFAS National Primary Drinking Water Regulation. United States Environmental Protection Agency.

[14] Christian, S., 2024. Data review: Chemical inventories and PFAS listings. USEPA CompTox Dashboard.

[15] Wollin, K.-M., Batke, M., Damm, G., Freyberger, A., Gundert-Remy, U., Mangerich, A., Hengstler, J. G., Partosch, F., Schu, T. & Sonnenburg, A. 2023. PFASs–restriction proposal commentary on ECHA's Annex XV restriction report, proposal for a restriction, March 2023. Archives of Toxicology, 97, 3305-3312.

[16] Christian, N. P. 2024. Chemical toxicity of per-and poly-fluorinated alkyl substances (PFAS). Encyclopedia of Toxicology (Fourth Edition), 2, 747-756.

[17] Gaines, L.G.T., 2023. Historical and current usage of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A literature review. American Journal of Industrial Medicine, 66(5), pp.353–378.

[18] Gaber, N., Bero, L. & Woodruff, T. J. 2023. The devil they knew: Chemical documents analysis of industry influence on PFAS science. Annals of global health, 89, 37.

[19] Dewapriya, P., Chadwick, L., Gorji, S. G., Schulze, B., Valsecchi, S., Samanipour, S., Thomas, K. V. & Kaserzon, S. L. 2023. Per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in consumer products: current knowledge and research gaps. Journal of Hazardous Materials Letters, 4, 100086.

[20] Travis, A. S. 2024. The discovery and analysis of PFAS ('forever chemicals') in human blood and biological materials. Substantia, 8.

[21] Giesy, J. P. & Kannan, K. 2001. Global distribution of perfluorooctane sulfonate in wildlife. Environmental science & technology, 35, 1339-1342.
[22] Espana, V. A. A., Mallavarapu, M. & Naidu, R. 2015. Treatment technologies for aqueous perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA): A critical review with an emphasis on field testing. Environmental Technology & Innovation, 4, 168-181.
[23] Ritter, S. K. 2015. The shrinking case for fluorochemicals. Chemical & Engineering News, 93, 27-29.
[24] Union, E. 2006. Directive 2006/122/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 amending for the 30th time Council Directive 76/769/EEC on the aroximation of the laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to restrictions on amrketing and use of certain dangerous substances and preparations (perfluorooctane sulfonates). Off J Eur Union, 372, 32-34.
[25] Brennan, N. M., Evans, A. T., Fritz, M. K., Peak, S. A. & Von Holst, H. E. 2021. Trends in the regulation of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS): a scoping review. International journal of environmental research and public health, 18, 10900.
[26] Goldenman, G., Fernandes, M., Holland, M., Tugran, T., Nordin, A., Schoumacher, C. & Mcneill, A. 2019. The cost of inaction: A socioeconomic analysis of environmental and health impacts linked to exposure to PFAS, Nordic Council of Ministers.
[27] Pinas, V., Van Dijk, C. & Weber, R. 2020. Inventory and action plan for PFOS and related substances in Suriname as basis for Stockholm Convention implementation. Emerging Contaminants, 6, 421-431.
[28] Hogue, C. 2022b. US drinking water to be tested for 29 PFAS. C&EN Global Enterprise, 100, 18-18.
[29] Furlow, B. 2024. US EPA sets historic new restrictions on toxic PFAS in drinking water. The Lancet Oncology, 25, e181.
[30] Moody, C. 2023. Proposed Drinking Water Standards for PFAS. Journal: American Water Works Association, 115.
[31] Erickson, B. E. 2022. EPA clamps down on 12 PFAS in pesticides. C&EN Global Enterprise, 100, 13-13.
[32] Hogue, C. 2022a. EPA seeks to boost reporting on PFAS releases. C&EN Global Enterprise, 100, 16-16.
[33] Hogue, C. 2023. EPA is poised to impose cleanup liability for 2 PFAS. C&EN Global Enterprise, 101, 24-24.
[34] Erickson, B. E. 2023. EPA regulation targets phased-out PFAS. C&EN Global Enterprise, 101, 15-15.
[35] Sajid, M. & Ilyas, M., 2017. PTFE-coated non-stick cookware and toxicity concerns: A perspective. Environmental Science and Pollution Research, 24(30), pp.23436–23440.
[36] Holmquist, H., Schellenberger, S., van Der Veen, I., Peters, G.M., Leonards, P.E.G. and Cousins, I.T., 2016. Properties, performance and associated hazards of state-of-the-art durable water repellent (DWR) chemistry for textile finishing. Environment international, 91, pp.251-264.
[37] Fujii, Y., Harada, K.H. & Koizumi, A., 2013. Occurrence of perfluorinated carboxylic acids (PFCAs) in personal care products and compounding agents. Chemosphere, 93(3), pp.538–544.
[38] Evich, M. G., Davis, M. J., Mccord, J. P., Acrey, B., Awkerman, J. A., Knae, D. R., Lindstrom, A. B., Speth, T. F., Tebes-Stevens, C. & Strynar, M. J. 2022. Per-and polyfluoroalkyl substances in the environment. Science, 375, eabg9065.
[39] Tansel, B. 2024. Geographical characteristics that promote persistence and accumulation of PFAS in coastal waters and open seas: Current and emerging hot spots. Environmental Challenges, 14, 100861.
[40] Higgins, C., Illangasekare, T., Stults, J. & Guo, B. 2024. Recent Advancements in Mechanistic Understandings of PFAS Fate & Transport in the Vadose Zone. Copernicus Meetings.
[41] Brunn, H., Arnold, G., Körner, W., Rien, G., Steinhäuser, K. G. & Valentin, I. 2023. PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites. Environmental Sciences Europe, 35, 1-50.
[42] Evich, M.G., Davis, M.J., McCord, J.P., Acrey, B., Awkerman, J.A., Knappe, D.R., Lindstrom, A.B., Speth, T.F., Tebes-Stevens, C., Strynar, M.J. and Wang, Z., 2022. Per-and polyfluoroalkyl substances in the environment. Science, 375(6580), p.eabg9065.
[43] USEPA, 2021. Human Health Toxicity Values for GenX Chemicals. United States Environmental Protection Agency.
[44] Rana, S., Marchiandi, J., Partington, J.M., Szabo, D., Heffernan, A.L., Symons, R.K., Xie, S. and Clarke, B.O., 2022. Identification of novel polyfluoroalkyl substances in surface water runoff from a chemical stockpile fire. Environmental Pollution, 313, p.120055.
[45] Xiao, F., 2017. Emerging PFAS in the aquatic environment: A review. Water Research, 124, pp.482–495.
[46] Manayil Parambil, A., Priyadarshini, E., Paul, S., Bakandritsos, A., Sharma, V.K. and Zboril, R., 2025. Emerging nanomaterials for the detection of per-and poly-fluorinated substances. Journal of Materials Chemistry A, 13(12), pp.8246-8281.

[47] Dauchy, X., Boiteux, V., Bach, C., Colin, A., Rosin, C. and Munoz, J.F., 2019. Mass flows and fate of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in a paper mill producing food contact materials. Environmental Science and Pollution Research, 26, pp.2018–2028.
[48] DeLuca, N.M., Minucci, J.M., Mullikin, A., Slover, R. and Hubal, E.A.C., 2022. Human exposure pathways to poly-and perfluoroalkyl substances (PFAS) from indoor media: A systematic review. Environment international, 162, p.107149.
[49] U.S. EPA, 2023. PFAS Strategic Roadmap and Drinking Water Health Advisories. [online] Available at: https://www.epa.gov/pfas [Accessed 16 Jul. 2025].
[50] Wang, Z., DeWitt, J.C., Higgins, C.P. and Cousins, I.T., 2017. A never-ending story of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs)?.
[51] Boitsov, S., Bruvold, A. & Hanssen, L., 2024. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in surface sediments of the North-east Atlantic Ocean: a non-natural PFAS background. Environmental Advances, 16, 100545. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100545
[52] Ahrens, L., Gashaw, H., Sjöholm, M., Gebrehiwot, S.G., Getahun, A., Derbe, E., Bishop, K. and Åkerblom, S., 2016. Poly-and perfluoroalkylated substances (PFASs) in water, sediment and fish muscle tissue from Lake Tana, Ethiopia and implications for human exposure. Chemosphere, 165, pp.352-357.
[53] Fraser, A.J., Webster, T.F., Watkins, D.J., Strynar, M.J., Kato, K., Calafat, A.M., Vieira, V.M. and McClean, M.D., 2013. Polyfluorinated compounds in dust from homes, offices, and vehicles as predictors of concentrations in office workers' serum. Environment international, 60, pp.128-136.
[54] Fromme, H., Tittlemier, S.A., Völkel, W., Wilhelm, M. and Twardella, D., 2009. Perfluorinated compounds–exposure assessment for the general population in Western countries. International journal of hygiene and environmental health, 212(3), pp.239-270.
[55] Dinardo, J. C. 2023. Per, and -Polyfluoroalkyl Substances (PFAS): Human Vitamin D Deficiency and Blood Plasma Protein Binding. International journal of clinical studies and medical case reports, 30.
[56] Brown-Leung, J. M. & Cannon, J. R. 2022. Neurotransmission targets of per-and polyfluoroalkyl substance neurotoxicity: mechanisms and potential implications for adverse neurological outcomes. Chemical research in toxicology, 35, 1312-1333.
[57] Zhuchen, H.-Y., Wang, J.-Y., Liu, X.-S. & Shi, Y.-W., 2023. Research progress on neurodevelopmental toxicity of PFAS. Journal TBD.
[58] Nasr, M. 2024. Chapter 19 - Poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) pollution and removal from aquatic environment. In: TYAGI, I., KUMAR, V. & KARRI, R. R. (eds.) Environmental Metagenomics, Water Quality and Suggested Remediation Measures of Polluted Waters. Elsevier.
[59] Ogbuewu, I. & Nnaji, J. 2023. Human Health Impacts of Perfluoroalkyl Substances, Micro-and Nanoplastics Contamination of Drinking Water. Archives of Ecotoxicology, 5, 75-82.
[60] Vujic, E., Ferguson, S. S. & Brouwer, K. L. 2024. Effects of PFAS on human liver transporters: implications for health outcomes. Toxicological Sciences, kfae061.
[61] Kirkwood-Donelson, K. I., Chael, J., Tobin, E., Dodds, J. N., Reif, D. M., Dewitt, J. C. & Baker, E. S. 2024. Investigating mouse hepatic lipidome dysregulation following exposure to emerging per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS). Chemosphere, 354, 141654.
[62] Sørli, J. B., Låg, M., Ekeren, L., Perez-Gil, J., Haug, L. S., Da Silva, E., Matrod, M. N., Gützkow, K. B. & Lindeman, B. 2020. Per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) modify lung surfactant function and pro-inflammatory responses in human bronchial epithelial cells. Toxicology in Vitro, 62, 104656.
[63] Xu, Y., Jakobsson, K., Harari, F., Andersson, E. M. & Li, Y. 2023. Exposure to high levels of PFAS through drinking water is associated with increased risk of type 2 diabetes—findings from a register-based study in Ronneby, Sweden. Environmental research, 225, 115525.
[64] Ward-Caviness, C. K., Moyer, J., Weaver, A., Devlin, R. & Diaz-Sanchez, D. 2022. Associations between PFAS occurrence and multimorbidity as observed in an electronic health record cohort. Environmental Epidemiology, 6, e217.
[65] Fenton, S.E., Ducatman, A., Boobis, A., DeWitt, J.C., Lau, C., Ng, C., Smith, J.S. and Roberts, S.M., 2021. Per-and polyfluoroalkyl substance toxicity and human health review: Current state of knowledge and strategies for informing future research. Environmental toxicology and chemistry, 40(3), pp.606-630.
[66] Chen, S., Fan, T., Zhang, N., Zhao, L., Zhong, R. and Sun, G., 2024. The oral acute toxicity of per-and polyfluoroalkyl compounds (PFASs) to Rat and Mouse: A mechanistic interpretation and prioritization analysis of untested PFASs by QSAR, q-RASAR and interspecies modelling methods. Journal of Hazardous Materials, 480, p.136071.

[67] Feinstein, J., Sivaraman, G., Picel, K., Peters, B., Vázquez-Mayagoitia, Á., Ramanathan, A., MacDonell, M., Foster, I. and Yan, E., 2021. Uncertainty-informed deep transfer learning of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substance toxicity. Journal of chemical information and modeling, 61(12), pp.5793-5803.

[68] Xing, J., Wang, G., Zhao, J., Wang, E., Yin, B., Fang, D., Zhao, J., Zhang, H., Chen, Y.Q. and Chen, W., 2016. Toxicity assessment of perfluorooctane sulfonate using acute and subchronic male C57BL/6J mouse models. Environmental Pollution, 210, pp.388-396.

[70] Peritore, A.F., Gugliandolo, E., Cuzzocrea, S., Crupi, R. and Britti, D., 2023. Current review of increasing animal health threat of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS): harms, limitations, and alternatives to manage their toxicity. International Journal of Molecular Sciences, 24(14), p.11707.

[71] Langberg, H.A., Breedveld, G.D., Kallenborn, R., Ali, A.M., Choyke, S., McDonough, C.A., Higgins, C.P., Jenssen, B.M., Jartun, M., Allan, I. and Hamers, T., 2024. Human exposure to per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) via the consumption of fish leads to exceedance of safety thresholds. Environment International, 190, p.108844..

[72] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM), 2020. Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. EFSA Journal, 18(9), p.e06223.

[73] Post, G.B., Cohn, P.D. & Cooper, K.R., 2012. PFOA as an emerging drinking water contaminant: A critical review. Environmental Research, 116, pp.93–117.

[74] Harrad, S., Goosey, E., Desborough, J., Abdallah, M.A.E., Roosens, L. and Covaci, A., 2010. Dust from UK primary school classrooms and daycare centers: the significance of dust as a pathway of exposure of young UK children to brominated flame retardants and polychlorinated biphenyls. Environmental science & technology, 44(11), pp.4198-4202.

[75] Laitinen, J.A., Koponen, J., Koikkalainen, J. and Kiviranta, H., 2014. Firefighters' exposure to perfluoroalkyl acids and 2-butoxyethanol present in firefighting foams. Toxicology Letters, 231(2), pp.227-232.

[76] Mondal, D., Weldon, R.H., Armstrong, B.G., Gibson, L.J., Lopez-Espinosa, M.J., Shin, H.M. and Fletcher, T., 2014. Breastfeeding: a potential excretion route for mothers and implications for infant exposure to perfluoroalkyl acids. Environmental health perspectives, 122(2), pp.187-192.

[77] Al-Zubari, W.K., El-Sadek, A.A., Al-Aradi, M.J. and Al-Mahal, H.A., 2018. Impacts of climate change on the municipal water management system in the Kingdom of Bahrain: Vulnerability assessment and adaptation options. Climate Risk Management, 20, .95-110.

[78] Bersuder, P., Smith, A.J., Hynes, C., Warford, L., Barber, J.L., Losada, S., Limpenny, C., Khamis, A.S., Abdulla, K.H., Le Quesne, W.J.F. and Lyons, B.P., 2020. Baseline survey of marine sediments collected from the Kingdom of Bahrain: PAHs, PCBs, organochlorine pesticides, perfluoroalkyl substances, dioxins, brominated flame retardants and metal contamination. Marine Pollution Bulletin, 161,111734.

[79] Hassan, H.F., Bou Ghanem, H., Abi Kharma, J., Abiad, M.G., Elaridi, J. and Bassil, M., 2023. Perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate in human milk: first survey from Lebanon. International journal of environmental research and public health, 20(1), 821.

[80] Picó, Y., Campo, J., Alfarhan, A.H., El-Sheikh, M.A. and Barceló, D., 2021. A reconnaissance study of pharmaceuticals, pesticides, perfluoroalkyl substances and organophosphorus flame retardants in the aquatic environment, wild plants and vegetables of two Saudi Arabia urban areas: Environmental and human health risk assessment. Science of the Total Environment, 776, 145843.

[81] De Mora, S., Fowler, S.W., Tolosa, I., Villeneuve, J.P. and Cattini, C., 2005. Chlorinated hydrocarbons in marine biota and coastal sediments from the Gulf and Gulf of Oman. Marine Pollution Bulletin, 50(8), .835-849.

[82] de Mora, S., Tolosa, I., Fowler, S.W., Villeneuve, J.P., Cassi, R. and Cattini, C., 2010. Distribution of petroleum hydrocarbons and organochlorinated contaminants in marine biota and coastal sediments from the ROPME Sea Area during 2005. Marine pollution bulletin, 60(12), .2323-2349.

[83] De Mora, S., Fowler, S.W., Wyse, E. and Azemard, S., 2004. Distribution of heavy metals in marine bivalves, fish and coastal sediments in the Gulf and Gulf of Oman. Marine pollution bulletin, 49(5-6), .410-424.

[84] Banjabi, A.A., Li, A.J., Kumosani, T.A., Yousef, J.M. and Kannan, K., 2020. Serum concentrations of perfluoroalkyl substances and their association with osteoporosis in a population in Jeddah, Saudi Arabia. Environmental Research, 187, 109676.

[85] Al-Sheyab, N.A., Al-Qudah, K.M. and Tahboub, Y.R., 2015. Levels of perfluorinated compounds in human breast milk in Jordan: the impact of sociodemographic characteristics. Environmental Science and Pollution Research, 22, 12415-12423.

[86] Olsen, G.W., Burris, J.M., Ehresman, D.J., Froehlich, J.W., Seacat, A.M., Butenhoff, J.L. and Zobel, L.R., 2007. Half-life of serum elimination of perfluorooctanesulfonate, perfluorohexanesulfonate, and perfluorooctanoate in retired fluorochemical production workers. Environmental health perspectives, 115(9), .1298-1305.

[87] Shoeib, M., Schuster, J., Rauert, C., Su, K., Smyth, S.A. and Harner, T., 2016. Emission of poly and perfluoroalkyl substances, UV-filters and siloxanes to air from wastewater treatment plants. Environmental Pollution, 218, pp.595-604.
[88] Ouertani, N., Naouali, H. and Hamouda, R., 2023. Preliminary results from the Tunisian monitoring program on POPs in air under the Stockholm Convention. Chemosphere, 335, 139127.
[89] WHO, 2022. Guidelines on PFAS in Drinking Water. Geneva: World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789240063872
[90] UNEP, 2023. Global PFAS Assessment: An Overview of Current Science and Regulation. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://www.unep.org/resources/report/global-pfas-assessment
[91] Yu, R.-S., Yu, H.-C., Yang, Y.-F. & Singh, S., 2025. A global overview of PFAS regulatory strategies and environmental impact. Toxics, 13(4), p.251. https://doi.org/10.3390/toxics13040251
[93] Shigei, M., Ahrens, L., Hazaymeh, A. and Dalahmeh, S.S., 2020. Per-and polyfluoroalkyl substances in water and soil in wastewater-irrigated farmland in Jordan. Science of The Total Environment, 716, 137057.
[94] Ali, A.M., Sanden, M., Higgins, C.P., Hale, S.E., Alarif, W.M., Al-Lihaibi, S.S., Ræder, E.M., Langberg, H.A. and Kallenborn, R., 2021. Legacy and emerging per-and polyfluorinated alkyl substances (PFASs) in sediment and edible fish from the Eastern Red Sea. Environmental Pollution, 280,116935.
[95] Ali, A.M., Higgins, C.P., Alarif, W.M., Al-Lihaibi, S.S., Ghandourah, M. and Kallenborn, R., 2021. Per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in contaminated coastal marine waters of the Saudi Arabian Red Sea: a baseline study. Environmental Science and Pollution Research, 28,2791-2803.
[96] Barhoumi, B., Sander, S.G., Driss, M.R. and Tolosa, I., 2022. Survey of legacy and emerging per-and polyfluorinated alkyl substances in Mediterranean seafood from a North African ecosystem. Environmental Pollution, 292,1 18398.
[97] Amziane, A., Monteau, F., Alamir, B., Le Bizec, B. and Dervilly, G., 2022. Optimization and validation of a fast supercritical fluid chromatography tandem mass spectrometry method for the quantitative determination of a large set of PFASs in food matrices and human milk. Journal of Chromatography B, 1210,123455.
[98] Kadar, H., Veyrand, B., Barbarossa, A., Pagliuca, G., Legrand, A., Bosher, C., Boquien, C.Y., Durand, S., Monteau, F., Antignac, J.P. and Le Bizec, B., 2011. Development of an analytical strategy based on liquid chromatography–high resolution mass spectrometry for measuring perfluorinated compounds in human breast milk: application to the generation of preliminary data regarding perinatal exposure in France. Chemosphere, 85(3), pp.473-480.
[99] Abass, K., Almusleh, Y., Shanableh, A. and Semerjian, L., 2024. PFAS in the GCC: Towards environmental sustainability and public health protection. Emerging Contaminants, 10(4), p.100360.
[100] IPEN, 2023. PFAS in Food Packaging: Global Survey Results. International Pollutants Elimination Network.
[101] Kossmeier, M., Tran, U.S. and Voracek, M., 2019. Visual inference for the funnel plot in meta-analysis. Zeitschrift für Psychologie, 227(1), pp.83–89.
[102] Mohammad, F.K., Mohammed, A.A., Rashid, H.M. and Salih, H.M., 2023. Effects of the antihistamine diphenhydramine on the acute toxicity of organophosphate and carbamate pesticides in different studies on animals: a metaanalysis [Article in Arabic]. Arab J Sci Res, 1, p.1.
[103] Kirkeli, C., Valdersnes, S. & Ali, A.M., 2025. Target and non-target screening of PFAS in fish liver samples from the River Nile in Sudan: A baseline assessment. Marine Pollution Bulletin, 211, p.117388.
[104] Naser, H.A., 2015. The role of environmental impact assessment in protecting coastal and marine environments in rapidly developing islands: The case of Bahrain, Arabian Gulf. Ocean & Coastal Management, 104, .159-169.
[105] Kuo, K.Y., Chen, Y., Chuang, Y., Lin, P. and Lin, Y.J., 2023. Worldwide serum concentration-based probabilistic mixture risk assessment of perfluoroalkyl substances among pregnant women, infants, and children. Ecotoxicology and Environmental Safety, 268, 115712.
[106] Decision(EU)2018/840, 2018. Commission Implementing Decision (EU) 2018/840 of 5 June 2018 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy pursuant to Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Implementing Decision (EU) 2015/ 495 (notified under document C(2018) 3362). L 141. Off. J. Eur. Union 9–12.
[107] Directive2013/39/EU, 2013. Of the European Parliament and of the Council of 12 August 2013 amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy L 226. Off. J. Eur. Union 1–17.
[108] Jones, P.D., Hu, W., De Coen, W., Newsted, J.L. and Giesy, J.P., 2003. Binding of perfluorinated fatty acids to serum proteins. Environmental toxicology and chemistry, 22(11), pp.2639-2649.

[109] Basaham, A.S., 2009. Re-evaluation of the impact of sewage disposal on coastal sediments of the Southern Corniche, Jeddah, Saudi Arabia. Marine Scienes, 20(1)

[110] Al-Farawati, R., 2010. Environmental conditions of the coastal waters of Southern Corinche, Jeddah, Eastern red sea: Physico-chemical aroach. Aust. J. Basic Al. Sci, 4(8), p.33243337.

[111] Shoeib, M., Harner, T., Wilford, B.H., Jones, K.C. and Zhu, J., 2005. Perfluorinated sulfonamides in indoor and outdoor air and indoor dust: occurrence, partitioning, and human exposure. Environmental science & technology, 39(17), pp.6599-6606.

[112] Goosey, E. and Harrad, S., 2011. Perfluoroalkyl compounds in dust from Asian, Australian, European, and North American homes and UK cars, classrooms, and offices. Environment international, 37(1), pp.86-92.

[113] González, P.C., Sadia, M., Baabish, A., Sobhanei, S. and Fiedler, H., 2021. Air monitoring with passive samplers for perfluoroalkane substances in developing countries (2017–2019). Chemosphere, 282, 131069.

[114] Alshemmari, H., 2021. Inventories and assessment of POPs in the State of Kuwait as a basis for Stockholm Convention implementation. Emerging Contaminants, 7,88-98.

[115] Fekete, J.T. and Gyorffy, B., 2025. MetaAnalysisOnline.com: an Online Tool for the Rapid Meta-Analysis of Clinical and Epidemiological Studies. Journal of Medical Internet Research.

[116] Nakagawa, S., Noble, D.W., Senior, A.M. and Lagisz, M., 2017. Meta-evaluation of meta-analysis: ten appraisal questions for biologists. BMC biology, 15(1), p.18.

[117] Lee, Y.H., 2018. An overview of meta-analysis for clinicians. Korean Journal of Internal Medicine, 33(2), pp.277–283.

[118] Egypt, 1994. Law No. 4 of 1994 for the Protection of the Environment, amended by Law No. 9 of 2009. Cairo: The Egyptian Gazette.

[119] Egypt, 1995. Executive Regulation No. 338 of 1995, amended by Decree No. 1741 of 2005, Decree No. 1095 of 2011, and Decree No. 710 of 2012. Cairo: Prime Minister’s Office.

المؤسسة العربية للعلوم والتكنولوجيا
ARAB SCIENCE & TECHNOLOGY FOUNDATION
2000

Emerging Pollutants Network

9 789948 686811