# IAEA BULLETIN

مجلة الوكالة الدولية للطاقة الذرية

منشور الوكالة الرئيسي | أيلول/سبتمبر 2025 | www.iaea.org/ar/bulletin

ملوثات المياه: أزمة الماء المخفية، ص. 10

إعادة التفكير في الري: تحسين استخدام المياه باستخدام العلوم النووية، ص. 20

الحلول النووية والنظيرية لندرة المياه، ص. 26

**مجلة الوكالة الدولية للطاقة الذرية**

يصدرها مكتب الإعلام العام والاتصالات
الوكالة الدولية للطاقة الذرية

العنوان:
International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre
PO Box 100, 1400 Vienna, Austria
الهاتف: 0-2600 (1- 43)
البريد الإلكتروني: **iaeabulletin@iaea.org**

**المحرِّرة:** نيها سود
**مديرة التحرير:** ماري ألبون
**التصميم والإنتاج:** ريتو كين

**مجلة الوكالة** متاحة عبر الإنترنت
بجميع لغات الأمم المتحدة
على الموقع التالي:
**www.iaea.org/bulletin**

يمكن استخدام مقتطفات من مواد الوكالة التي تتضمنها مجلة الوكالة في مواضع أخرى بِحُرِّية، شريطة الإشارة إلى مصدرها. وإذا كان مبيَّناً أنَّ الكاتب من غير موظفي الوكالة، فيجب الحصول منه أو من المنظمة المصدِرة على إذن بإعادة النشر، ما لم يكن ذلك لأغراض الاستعراض.

ووجهات النظر المُعرَب عنها في أي مقالة موقَّعة واردة في مجلة الوكالة لا تُمثِّل بالضرورة وجهة نظر الوكالة الدولية للطاقة الذرية، ولا تتحمَّل الوكالة أي مسؤولية عنها.

**صورة الغلاف من:**
الوكالة الدولية للطاقة الذرية

**تابعونا على**

IAEA | تسخير الذرة من أجل السلام والتنمية

تتمثل مهمة الوكالة الدولية للطاقة الذرية (الوكالة) في المساعدة على منع انتشار الأسلحة النووية ومساعدة جميع البلدان، لا سيما في العالم النامي، على الاستفادة من استخدام العلوم والتكنولوجيا النووية استخداماً سلميًّا ومأموناً وآمناً.

وقد تأسَّست الوكالة كمنظمة مستقلة في إطار منظومة الأمم المتحدة في عام 1957، وهي المنظمة الوحيدة ضمن هذه المنظومة التي لديها الخبرة في مجال التكنولوجيات النووية. وتساعد مختبرات الوكالة المتخصصة الفريدة من نوعها على نقل المعارف والدراية إلى الدول الأعضاء في الوكالة في مجالات مثل الصحة البشرية والأغذية والمياه والصناعة والبيئة.

وتقوم الوكالة كذلك بدور المنصة العالمية لتعزيز الأمن النووي. وقد أسَّست الوكالة سلسلة الأمن النووي لتصدر في إطارها المنشورات المحتوية على الإرشادات المتوافق عليها دوليًّا بشأن الأمن النووي. وتركِّز أنشطة الوكالة أيضاً على تقديم المساعدة للتقليل إلى أدنى حد من مخاطر وقوع المواد النووية وغيرها من المواد المشعة في أيدي الإرهابيين والمجرمين، أو خطر تعرُّض المرافق النووية لأعمال شريرة.

وتوفِّر معايير الأمان الصادرة عن الوكالة المبادئ الأساسية والمتطلبات والتوصيات اللازمة لضمان الأمان النووي وتجسيد توافق الآراء الدولي حول ما يشكِّل مستوى عالياً من الأمان لحماية الناس والبيئة من التأثيرات الضارة للإشعاعات المؤينة. وقد وُضِعت معايير الأمان الصادرة عن الوكالة لتطبيقها في جميع أنواع المرافق والأنشطة النووية التي تُستَخدَم للأغراض السلمية، وكذلك لتطبيقها في الإجراءات الوقائية الرامية إلى الحد من المخاطر الإشعاعية القائمة.

وتتحقَّق الوكالة أيضاً، من خلال نظامها التفتيشي، من مدى امتثال الدول الأعضاء للالتزامات التي قطعتها على نفسها بموجب معاهدة عدم انتشار الأسلحة النووية وغيرها من اتفاقات عدم الانتشار، والمتمثلة في عدم استخدام المواد والمرافق النووية إلا للأغراض السلمية.

ويشمل عمل الوكالة جوانب متعددة، وتشارك فيه طائفة واسعة ومتنوعة من الشركاء على الصعيد الوطني والإقليمي والدولي. وتُحدَّد برامج الوكالة وميزانياتها من خلال مقررات جهازي تقرير سياسات الوكالة، أي مجلس المحافظين المؤلَّف من 35 عضواً والمؤتمر العام الذي يضم جميع الدول الأعضاء.

ويقع المقر الرئيسي للوكالة في مركز فيينا الدولي، في فيينا بالنمسا. كما توجد مكاتب ميدانية ومكاتب اتصال في جنيف ونيويورك وطوكيو وتورونتو. وتدير الوكالة مختبراتٍ علميةً في كلٍّ من موناكو وزايبرسدورف وفيينا. وعلاوةً على ذلك، تدعم الوكالة مركز عبد السلام الدولي للفيزياء النظرية في تريبستي بإيطاليا وتوفر له التمويل اللازم.

# إنقاذ أثمن مواردنا من خلال قوة العلوم والتكنولوجيا النووية

رافائيل ماريانو غروسي، المدير العام للوكالة الدولية للطاقة الذرية

الماء هو أكبر مورد مشترك في العالم. فقد استند إليه نمو النظم البيئية والحضارات الإنسانية وتطورها. بيد أنَّ هذا الاحتياطي الحيوي يتعرض الآن لضغوط.

ويؤثر تغير المناخ في توافر المياه. فمع ارتفاع درجات الحرارة العالمية، تذوب الأنهار الجليدية، وتتبخر البحيرات، ويؤدي ارتفاع منسوب مياه البحار إلى تملُّح المياه الجوفية الساحلية. وتؤدي الظواهر الجوية الأكثر قسوة وتواترا إلى زيادة صعوبة التنبؤ بإمدادات المياه.

ومع استمرار تزايد عدد سكان العالم، يتزايد الطلب على المياه لأغراض الزراعة، والاستخدام المنزلي والصرف الصحي، والأنشطة الصناعية، وتوليد الطاقة. وفي الوقت نفسه، يتزايد تلوث المياه بمعدلات غير مسبوقة، مع تزايد عدد الملوثات التي تسبب ضررا على امتداد الدورة الهيدرولوجية.

ولحماية مواردنا المائية واستدامتها — وبالتالي استدامة مجتمعاتنا واقتصاداتنا، وصحتنا وصحة كوكبنا أيضا — يلزمنا أولاً أن نفهم تلك الموارد. ويعني ذلك قياس المياه وملوثاتها ورصدها وتتبعها. فنحن نحتاج إلى بيانات وتكنولوجيات توفير المياه — خاصة في الزراعة والصناعة — كما أننا نحتاج إلى نظم فعالة لإدارة المياه، بالإضافة إلى التعاون والتنسيق عبر القطاعات والحدود الوطنية.

"تسخير الذرة من أجل الماء" هو موضوع المحفل العلمي للوكالة لهذا العام. إذ توفر العلوم والتكنولوجيا النووية أدوات قوية لفهم مواردنا المائية وحمايتها. ولذلك تبوأ مجال المياه مكانة بين المجالات ذات الأولوية في عمل الوكالة منذ بدايتها.

وترصد الوكالة منذ 65 عاما هطول الأمطار من خلال الشبكة العالمية لاستخدام النظائر في دراسة الأمطار، وتوفر بيانات أساسية للبحوث الهيدرولوجية وإدارة الموارد المائية. ويعكف قسم الهيدرولوجيا النظيرية في الوكالة ومختبره على دراسة النظائر الموجودة في المياه لتحديد عمرها ومصدرها وتعقب حركتها وتقييم جودتها. ومن شأن ذلك أن يساعد على تحديد كمية المياه المتاحة والوقت الذي يستغرقه تجدّد المياه الجوفية وما إذا كنا نستخدمها بكفاءة. ومن شأنه أيضا أن يساعد على تحديد ملوثات المياه وتعقبها.

وتتمتع الوكالة بخبرة واسعة في تطوير ونشر تكنولوجيات وأساليب رصد الموارد المائية وقياسها واستدامتها والحفاظ عليها باستخدام التقنيات النووية والنظيرية. ويغطي هذا العدد من مجلة الوكالة بعضاً من أعمالنا في هذه المجالات، بما في ذلك الجمع بين البيانات المستمدة من أجهزة استشعار نيوترونات الأشعة الكونية وتكنولوجيا الري بالتنقيط بهدف استخدام المياه الزراعية على نحو أكثر كفاءة، ومعالجة مياه الصرف الصحي باستخدام تكنولوجيا الحزم الإلكترونية لتسهيل مهمة جمع المواد البلاستيكية الدقيقة وإزالتها.

كما يصف العدد الكيفية التي يستخدم بها علماء الوكالة الذكاء الاصطناعي وغيره من التكنولوجيات المتطورة لتطوير التحليل والنمذجة على امتداد الدورة الهيدرولوجية، وتزويد صانعي القرارات بمعلومات أفضل لإدارة الموارد المائية.

ويفسد التلوث، خاصة بالمواد البلاستيكية، نظمنا المائية ومحيطاتنا. وفي عام 2021، أطلقتُ مبادرة استخدام التكنولوجيا النووية لمكافحة التلوث بالمواد البلاستيكية (مبادرة نيوتيك للمواد البلاستيكية) لتسخير قوة العلوم النووية في معالجة أزمة البلاستيك العالمية من خلال تحسين إعادة تدوير البلاستيك والحد من التلوث البحري بالمواد البلاستيكية. وفي عام 2023، أطلقتُ الشبكة العالمية لمختبرات تحليل المياه (شبكة GlowAL) لتمكين البلدان من إدارة مواردها المائية بفعالية وتعزيز التعاون والابتكار في مجال بحوث المياه. ومن خلال برنامجنا للتعاون التقني، تزود الوكالة البلدان بالتدريبات والخبرات والمعدات اللازمة لتعزيز قدراتها الوطنية في مجال بحوث المياه ورصدها وإدارتها.

نحن نتشارك نظاما عالميا للمياه، حيث يمكن للتطورات في منطقة ما أن تؤثر في الموارد المائية في منطقة أخرى. ومن أجل إدارة الموارد المائية في العالم بفعالية، يلزمنا فهم هذه الروابط والتعاون فيما بيننا. وبالعمل معا، يمكننا بناء اقتصاد مياه أكثر دائرية واستدامة، يحمي بيئتنا ويعود علينا بالنفع جميعاً.

"نحن نتشارك نظاما عالميا للمياه، حيث يمكن للتطورات في منطقة ما أن تؤثر على الموارد المائية في منطقة أخرى. ومن أجل إدارة الموارد المائية في العالم بفعالية، يلزمنا فهم هذه الروابط والتعاون فيما بيننا."

— رافائيل ماريانو غروسي، المدير العام للوكالة

**1** إنقاذ أثمن مواردنا من خلال قوة العلوم والتكنولوجيا النووية

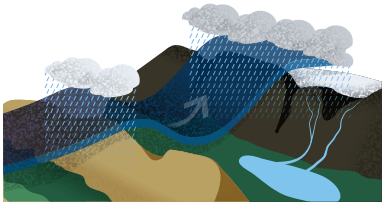
**4** الماء مسؤولية الجميع
مقابلة مع ريتنو مارسودي، المبعوثة الخاصة
للأمين العام للأمم المتحدة المعنية بالمياه

**6** آسيا الوسطى تقود جهود الحفاظ على الأنهار الجليدية

**10** ملوثات المياه: أزمة الماء الخفية

**14** فهم قصة قطرة الماء

**16** استراتيجية البرازيل لحماية مواردها من المياه العذبة



**18** العلماء يدرسون «الأنهار الخفية» لإدارة الظواهر الجوية القصوى وندرة المياه

**20** إعادة التفكير في الري

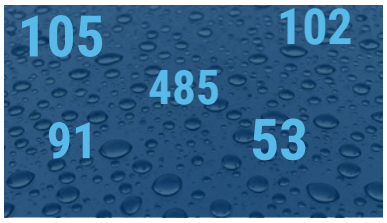
**22** فك شفرة المياه

**24** التعاون في مجال المياه العابرة للحدود يحدث تأثيراً مضاعفاً في جنوب شرق أوروبا

**26** الحلول النووية والنظيرية لندرة المياه
التركيز على أفريقيا وغرب آسيا

**28** يوم في حياة أخصائي في الهيدرولوجيا النظيرية في الوكالة

**30** شبكات الوكالة تعزز البحوث في مجال المياه




**31** الوكالة الدولية للطاقة الذرية بالأرقام


## تحديثات الوكالة


**32** الأخبار

**36** المنشورات

# الماء مسؤولية الجميع

## مقابلة مع ريتنو مارسودي، المبعوثة الخاصة للأمين العام للأمم المتحدة المعنية بالمياه

تُبدي المبعوثة الخاصة للأمين العام للأمم المتحدة المعنية بالمياه، السيدة ريتنو مارسودي، آراءها بشأن ما يلزم القيام به لضمان مستقبل تكون فيه للجميع القدرة على مواجهة أزمات المياه. وهي مناصرة عالمية لقضايا المياه، وداعمة للجهود الرامية إلى حشد التدابير والموارد وتعزيز التعاون الدولي للمضي قدماً في جدول الأعمال العالمي للمياه. وشغلت منصب وزيرة خارجية إندونيسيا من عام 2014 إلى عام 2024.

الحديث عن المياه لا يعني مجرد الحديث عن البنية الأساسية أو النُّظم — بل هو حديث عن البقاء على قيد الحياة. إن الأمر هو صون الركيزة الأساسية للحياة وسبل العيش.

— ريتنو مارسودي، المبعوثة الخاصة للأمين العام للأمم المتحدة المعنية بالمياه

### ماذا يعني الماء بالنسبة لكم شخصيا؟

لطالما كانت مسألة الماء أمرا شخصيا جدا بالنسبة لي. فلكوني امرأة، أفهم كيف تؤثر التحديات المتعلقة بالمياه في النساء والفتيات بشكل غير متناسب. وفي مناطق كثيرة من العالم، تفرض ندرة المياه ومحدودية فرص الحصول على مياه مأمونة عبئا غير متكافئ عليهن، مما يجبرهنَّ على قطع مسافات طويلة لجلب المياه لأسرهن.

غير أنَّ النساء هُنَّ أيضاً قادة التغيير. وأرى — والأدلة تظهر ذلك باستمرار — أنَّ قيادة المرأة في مجال المياه تؤدي إلى نتائج أكثر استدامةً وإنصافاً، ولا يقتصر ذلك على مجال المياه، بل يشمل أيضا جميع قطاعات التنمية الأخرى.

وأعتقد أيضا أن المسؤولية المتعلقة بإدارة المياه تتجاوز الالتزامات العالمية أو الولايات المؤسسية. فهي ترتبط ارتباطا جذريا بوجودنا وكرامتنا وحياة الأجيال القادمة. والحديث عن المياه لا يعني مجرد الحديث عن البنية الأساسية أو النُّظم — بل هو حديث عن البقاء على قيد الحياة. إن الأمر هو صون الركيزة الأساسية للحياة وسبل العيش.

وذلك ما يجعل مسؤولية تنفيذ الالتزامات العالمية المتعلقة بالمياه عبئاً ثقيلاً جداً. والأمر لا يتعلق بالسياسات فقط، بل يتعلق أيضا بتحسين الظروف المعيشية في كل مكان ولفائدة الجميع، خاصة لأولئك الذين غالبا ما يتخلفون عن الركب.

### ما هي الأولويات الرئيسية التي ترونها كفيلة بأن تُحقِّق لكوكبنا موارد مائية مستدامة؟

الماء ضروري للحياة، واليوم تتعرض نُظم المياه في عالمنا لضغوط لم يسبق لها مثيل. إذ يعيش ما يقدر بنحو 2,4 مليار شخص في بلدان تعاني من الإجهاد المائي. ففي عام 2022، اعتمد ما لا يقل عن 1,7 مليار شخص في العالم على مياه الشرب من مصادر ملوثة.

ولا يؤدي تغير المناخ والظواهر الجوية القصوى إلا إلى تفاقم هذا الوضع، حيث سجَّل عام 2024 درجات حرارة هي الأكثر ارتفاعاً على الإطلاق. وثمة حاجة إلى اتخاذ إجراءات عاجلة ومتعددة الأوجه، بما في ذلك تعزيز البحوث، وبناء القدرات، وتمكين النساء والشباب من تعزيز الابتكارات، فضلاً عن العديد من الجهود الأخرى.

وفي صميم كل هذه الجهود عنصر لا غنى عنه هو التعاون الدولي، الذي يستند إلى التضامن العالمي.

فالتعاون الدولي أساسي لترجمة الالتزامات العالمية إلى إجراءات ملموسة. ومما يؤسف له أن تمويل المياه لا يزال غير كافٍ وآخذٌ في التناقص في العالم. إذ ستتطلب تلبية الطلبات المستقبلية على المياه وبنيتها الأساسية ما يقدر بنحو 6,7 تريليون دولار بحلول عام 2030، وأكثر من 22 تريليون دولار بحلول عام 2050.

ولتحقيق مستقبل مأمون مائيا، يجب أن نوليَ الأولوية لأنشطة التعاون الدولي الجريئة — لا سيما في التمويل وتطوير التكنولوجيا وبناء القدرات لمن هم في أمس الحاجة إليها.

### ما هي أكثر النهج فعالية في تسريع الكفاءة والقدرة على الصمود والاستدامة في إدارة المياه؟

في الحوارات التي أجريها مع البلدان والجهات المعنية في مجال المياه، أشدد باستمرار على أنَّ الماء مسؤولية الجميع. إذ ليس بإمكان فرد أو مؤسسة أو بلد التصدي للتحديات العالمية في مجال المياه بمعزل عن الجهات الأخرى. ويجب أن تشارك الحكومات والقطاع الخاص والأوساط الأكاديمية ومنظمات المجتمع المدني وغيرها من الجهات مشاركة شاملة في تشكيل جهود إدارة المياه وتنفيذها.

ويعزز نهج الجهات المعنية المتعددة روح تحمل المسؤولية بضمان مشاركة جميع الجهات الفاعلة في تخطيط الحلول المائية وتنفيذها وتقييمها. ويستند هذا النهج إلى الخبرات

والقدرات المتنوعة التي تأتي بها كل جهة معنية إلى الطاولة.

ولا يقل عن ذلك أهمية اتباع نهج متعدد القطاعات يدمج المياه في جميع أبعاد التنمية. ومن خلال الإدارة المتكاملة للموارد المائية، يمكن للمياه أن تكون بمثابة حل موحِّد لجهود التصدي للعديد من التحديات العالمية، بما في ذلك القضاء على الفقر، والقدرة على الصمود أمام تغير المناخ، والأمن الغذائي وأمن الطاقة، والحد من مخاطر الكوارث، وتمكين النساء والشباب.

وتعتمد هذه النُّهج على إطار تشغيلي قوي. وهنا تبرز أهمية مبدأ 'Triple A' (المناصرة والمواءمة وتسريع التدابير): المناصرة تهدف إلى جعل قضية المياه أولوية مشتركة؛ والمواءمة تسعى إلى تحقيق الاتساق بين جميع المبادرات المتعلقة بالمياه؛ أما التسريع فيركِّز على دفع عجلة الابتكار والعمل بوتيرة أسرع.

وأخيرا، يجب ألا نفوت فرصة الاستفادة من الدور المؤثر للتكنولوجيا في تسريع كفاءة استراتيجيات إدارة المياه ومرونتها واستدامتها. ويمكننا باستخدام التكنولوجيا ضمان الإدارة والاستخدام الفعالين للمياه. ويمكننا إنتاج المزيد — أي المزيد من الغذاء، والمزيد من الطاقة، وتحقيق المزيد من النمو الاقتصادي — بكميات مياه أقل.

## أين ترون برأيكم أكبر إمكانات الوكالة للمساعدة في التصدي للتحديات المتعلقة بالمياه باستخدام العلوم والتكنولوجيا النووية؟

بإمكان الوكالة أن توفر الكثير بفضل تركيزها القوي على البحث والتطوير وبناء القدرات.

وتبرز الهيدرولوجيا النظيرية كمثال قوي على قدرة العلوم النووية على إحداث تحولات من أجل التصدي للتحديات المعقدة المتصلة بالمياه. كما أن قدرة الهيدرولوجيا النظيرية على تعقب منشأ المياه وعمرها وجودتها بدقة تجعلها تمثل نقطة تحوّل في إدارة الموارد المائية.

وتتيح لنا الهيدرولوجيا النظيرية أيضا فهما عميقا لنُظم المياه في العالم، مما يمكننا ليس فقط من التصدي للتحديات القائمة، بل أيضا من توقع مخاطر الكوارث المتصلة بالمياه مستقبلا والتأهب لها. كما تعزز الهيدرولوجيا النظيرية قدرات الإنذار المبكر والتخطيط الطويل الأجل والقدرة على الصمود أمام أزمات المياه.

وإنني أشجع الوكالة على الاستمرار في إيلاء الأولوية لتطبيق العلوم النووية أمام أكثر تحديات المياه إلحاحا، ولا سيما تلك التي تؤثر بشكل غير متناسب في البلدان النامية مثل الجفاف وندرة المياه، ومخاطر الفيضانات الناجمة عن الظواهر الجوية القصوى، وتلوث المياه. وبتطبيق العلوم والتكنولوجيا النووية، أرى أنَّ الوكالة ستساهم في تعزيز قدرة العالم على الصمود أمام أزمات المياه.

## ما هي آمالكم وتوقعاتكم بشأن مؤتمر الأمم المتحدة المعني بالمياه لعام 2026؟

أنا أسترشد بالآمال والتوقعات التي تُعرب عنها البلدان والجهات المعنية باستمرار في مجال المياه في جميع أنحاء العالم.

والتوقعات بشأن مؤتمر الأمم المتحدة المعني بالمياه لعام 2026 عالية. وسيمثل المؤتمر معلما حاسما في دفع عجلة التقدم العالمي في مجال المياه وفرصة محورية لتسريع تحقيق الهدف 6 من أهداف التنمية المستدامة (المياه النظيفة والصرف الصحي).

ومن المتوقع أيضا أن يضطلع المؤتمر بإرشاد وتشكيل مستقبل جدول الأعمال العالمي للمياه لما بعد عام 2030. ويعكس ذلك وعيا متزايدا بأنَّ ضمان مستقبلنا المائي لا يتطلب اتخاذ تدابير فورية فحسب، بل يتطلب أيضا رؤية واضحة للغد، ليس فقط لشعوب العالم بل أيضا لكوكب الأرض.

ونجاح مؤتمر الأمم المتحدة المعني بالمياه لعام 2026 رهين بشكل كبير بالالتزام القوي للبلدان والجهات المعنية في مجال المياه في جميع أنحاء العالم. ولا يمكن تحقيق نتائج مؤثرة وقابلة للتنفيذ إلا من خلال عمليات إعداد شاملة وشفافة. وأنا حريصة على التعاون مع الوكالة لتحقيق هذا الهدف.

(الصورة من AdobeStock)

# آسيا الوسطى تقود جهود الحفاظ على الأنهار الجليدية

بقلم ماري ألبون

في آسيا الوسطى والمناطق الجبلية الأخرى حول العالم، تذوب الأنهار الجليدية بوتيرة أسرع من أي وقت مضى. ويؤدي ارتفاع درجات الحرارة إلى تقصير الشتاء وإطالة الصيف، وهو ما يؤدي بدوره إلى تراجع الأنهار الجليدية.

وتخزن الأنهار الجليدية حوالي 70% من المياه العذبة في الأرض، ويعتمد عليها ما يقرب من ملياري شخص في مياه الشرب والزراعة والصناعة وإنتاج الطاقة. كما أنها تدعم النظم البيئية وهي "مثبتات مناخية" محلية، تحمي من امتصاص الحرارة عن طريق عكس الإشعاع الشمسي مرة أخرى إلى الفضاء.

ومع استمرار تقلص الأنهار الجليدية وحتى اختفائها، أصبح التنبؤ بالدورة الهيدرولوجية أكثر صعوبة، مما يؤثر في إمدادات المياه في جميع أنحاء العالم. ولا تمثل هذه الخسارة مشكلة بيئية فقط، بل هي أيضا مشكلة اقتصادية، تؤثر في سبل عيش الملايين من الناس. وتفيد تقديرات برنامج الأمم المتحدة للبيئة أنَّ استنفاد إمدادات المياه العذبة الواردة من الأنهار الجليدية يمكن أن يعرض للخطر 4 تريليونات دولار من الناتج المحلي الإجمالي العالمي من خلال تعطيل الزراعة وإمدادات المياه في المناطق الحضرية وإنتاج الطاقة.

## تأثير تغير المناخ في الأنهار الجليدية في آسيا الوسطى

في آسيا الوسطى، يزداد الوضع سوءا. إذ قال رئيس أوزبكستان، السيد شوكت ميرزيوييف، في مؤتمر قمة آسيا الوسطى السادس في آب/أغسطس 2024: "تؤثر التبعات المترتبة على تغير المناخ العالمي في كل بلد من بلداننا". وأضاف: "لا يزال ارتفاع درجات الحرارة وذوبان الأنهار الجليدية والفيضانات والجفاف والعواصف الترابية والعديد من التحديات الأخرى عوامل تسبب أضرارا جسيمة."

ووفقا لتقرير صادر عن مصرف التنمية الأوروبي الآسيوي لعام 2022، تزداد درجات الحرارة في المنطقة مرتين تقريبا أسرع من المتوسط العالمي، مما يزيد من التصحر ويسرع ذوبان الأنهار الجليدية.

ثيران القطاس في وادي جبلي بآسيا الوسطى.
(الصورة من: AdobeStock)

وقال رئيس طاجيكستان، السيد إمام علي رحمن، في المؤتمر الدولي الأول الرفيع المستوى بشأن الحفاظ على الأنهار الجليدية، الذي عقد في دوشانبي في أيار/مايو 2025: "حتى الآن، تعرض للذوبان أكثر من 1000 من الأنهار الجليدية البالغ عددها 14 000 نهرا بشكل كامل في طاجيكستان". وأضاف: "على مدى العقود القليلة الماضية، انخفض الحجم الإجمالي للأنهار الجليدية في بلدنا - التي تشكل أكثر من 60% من موارد المياه في منطقة آسيا الوسطى - بمقدار الثلث تقريبا."

ولم تسلم الأنهار الجليدية في قيرغيزستان بدورها، فقد انخفضت المساحة التي تغطيها الأنهار الجليدية بنسبة 16% خلال الخمسين إلى السبعين عاما الماضية.

وقال رئيس قيرغيزستان، السيد صدر جابروف، في مؤتمر الأمم المتحدة التاسع والعشرين المعني بتغير المناخ (مؤتمر COP29) في عام 2024: "إذا استمر هذا الاتجاه، قد يختفي جزء كبير من الأنهار الجليدية بحلول نهاية القرن". وأضاف: "هذه ليست مجرد إحصاءات، إنها تهديد مباشر لحياة ورفاه الملايين من الناس، الذين يعتمدون على الأنهار الجليدية كمصدر للمياه العذبة."

## وقف الأزمة

بناء على طلب طاجيكستان، أعلنت الجمعية العامة للأمم المتحدة عام 2025 السنة الدولية للحفاظ على الأنهار الجليدية بهدف إذكاء الوعي بشأن ذوبان الأنهار الجليدية والدعوة إلى وضع سياسات وتدابير للحفاظ عليها. وكانت الانطلاقة الرسمية لهذه الفعالية في نيويورك في 21 آذار/مارس 2025، احتفالاً بمناسبة أول يوم عالمي سنوي للأنهار الجليدية.

وبعد بضعة أسابيع، أسفر المؤتمر الدولي الرفيع المستوى المعني بالحفاظ على الأنهار الجليدية عن اعتماد إعلان دوشانبي بشأن الأنهار الجليدية، الذي أعرب عن القلق من احتمال أن يؤدي استمرار فقدان الأنهار والطبقات الجليدية والجليد السرمدي والتكتلات الثلجية إلى آثار لا رجعة فيها على بعض النظم البيئية والتأثيرات المضرة بالبيئة والمجتمعات والاقتصادات.

ودعا الإعلان إلى إجراء جرد عالمي للأنهار الجليدية وغيرها من الكتل الجليدية والثلجية المعمرة؛ واتخاذ نُهج متكاملة للتخفيف من آثار تغير المناخ والتكيف معه والقدرة على الصمود أمامه من أجل إدارة المياه إدارة مستدامة؛ والتعاون العلمي في مجال رصد الغلاف الجليدي للجبال وإجراء البحوث بشأنه، إلى جانب إطلاع جميع الجهات المعنية على النتائج؛ وجهود بناء القدرات التي تربط بين العلوم والسياسات والمعارف التقليدية لتدريب الجيل القادم من العلماء والممارسين في مجال الأنهار الجليدية.

## التعاون الدولي في مجال رصد الأنهار الجليدية والبحوث المتعلقة بها

يصادف هذا العام أيضا بداية عقد العمل من أجل النهوض بعلوم الغلاف الجليدي، الذي يندرج ضمن الجهود العالمية الرامية إلى تعزيز البحوث والتعاون الدولي وإذكاء الوعي بأهمية المناطق المتجمدة على الأرض، بما يشمل الأنهار الجليدية.

ويمثل الحفاظ على الأنهار الجليدية عنصراً رئيسياً في استراتيجية إقليمية شاملة للتكيف مع تغير المناخ في آسيا الوسطى، شاركت في إعدادها أوزبكستان وتركمانستان وطاجيكستان وقيرغيزستان وكازاخستان.

وقال الرئيس جاباروف: "لا يمكن لأي بلد أن يتصدى لتحديات تغير المناخ بمفرده." وأضاف: "نحن بحاجة إلى التضامن والتعاون وتبادل الخبرات."

وفي إطار هذه الاستراتيجية الإقليمية، تعزز البلدان الخمسة قدراتها الوطنية على رصد الأنهار الجليدية، وتعمل معا على الرصد المشترك وإعداد قائمة جرد شاملة للأنهار الجليدية في المنطقة.

وتتّسم البيانات المتعلقة بالأنهار الجليدية بأهمية رئيسية بالنسبة للتقييمات العلمية واتخاذ القرارات بشأن استراتيجيات التكيف والتخفيف. وفي عام 2025، افتتحت طاجيكستان أول مختبر للهيدرولوجيا النظيرية في آسيا الوسطى لإجراء البحوث بشأن الأنهار الجليدية، بدعم من برنامج للتعاون التقني للوكالة. وزودت الوكالة المختبر بمعدات لدراسة الأنهار الجليدية في ظروف ميدانية ودرَّبت العلماء على استخدامها. واقترحت طاجيكستان أيضا إنشاء شبكة إقليمية ضِمن الشبكة العالمية لمختبرات تحليل المياه (شبكة GlowAL)؛ وستعمل الوكالة مع بلدان آسيا الوسطى على وضع خارطة طريق للشبكة.

وقالت السيدة يوليا فيستافنا، الأخصائية في الهيدرولوجيا النظيرية في الوكالة: "تربط الهيدرولوجيا النظيرية في الأراضي القاحلة لآسيا الوسطى بين الماضي والحاضر. فهي تتبع بصمات المناخ القديمة وذوبان الأنهار الجليدية الحالية لتوجيه الاستخدام المستدام للمياه في منطقة حيث تكون كل قطرة مهمة."

## عمل الوكالة بشأن الأنهار الجليدية

تعمل الوكالة منذ أكثر من عقد من الزمن مع البلدان الجبلية لرصد تراجع الأنهار الجليدية وقياسه. وتشارك أوزبكستان وكازاخستان من بين 12 بلدا في مشروع بحثي منسق جديد للوكالة يستخدم أدوات الهيدرولوجيا النظيرية لتحسين تقييم العمليات المعقدة المتعلقة بتراجع الأنهار الجليدية وتأثيره الأوسع نطاقا على توافر الموارد المائية.

وعلى الرغم من أهمية ذوبان الثلوج والأنهار الجليدية وهطول الأمطار ومصادر المياه الأخرى من حيث إمدادات المياه، فإنها لا تقاس جيدا في العديد من المناطق المتجمدة. وسيدعم مشروع الوكالة البلدان في جمع بيانات دقيقة وموثوقة من أجل تحسين فهم الأنهار الجليدية وقدرات تجدُّد نظم الموارد المائية المحلية والإقليمية. وسيسهم ذلك في وضع استراتيجيات مستدامة لإدارة المياه في المناطق الجبلية وفي دعم تحسين تخطيط الموارد المائية لمجتمعات المصب.

وتعكف أوزبكستان وطاجيكستان وسبعة بلدان أخرى على دراسة الغطاء الثلجي والأنهار الجليدية الجبلية في إطار مشروع إقليمي جديد للتعاون التقني تابع للوكالة دعماً لإدارة قائمة على الأدلة للموارد المائية العابرة للحدود. ويتمثل أحد الأهداف الرئيسية لهذا العمل في الحفاظ على الخصائص النظيرية للأنهار الجليدية التي توشك على الاختفاء.

وتُجري الوكالة، من خلال المركز المشترك بين الفاو والوكالة لاستخدام التقنيات النووية في الأغذية والزراعة (المركز المشترك بين الفاو والوكالة)، دراسة تأثير تراجع الأنهار الجليدية على التربة والموارد المائية باستخدام التقنيات النووية والنظيرية المتقدمة. وتُمكِّن أدوات مثل أجهزة استشعار نيوترونات الأشعة الكونية والمقتفيات النظيرية من إجراء رصد دقيق

**إعداد عينات من المياه الذائبة للأنهار الجليدية بهدف تحليلها في مختبر الهيدرولوجيا النظيرية الجديد في طاجيكستان.**

(الصورة من: ي. فيستافنا/الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

وآني لتراكم الثلوج على الأنهار الجليدية وإجراء تقييمات لإعادة توزيع الرواسب الواردة من المناطق حيث ينحسر الجليد متجهة نحو الأنهار والبحيرات الواقعة أسفل مجرى المياه. وتقوم الوكالة، من خلال برنامجها للتعاون التقني، بتدريب العلماء من جبال الأنديز إلى جبال الهيمالايا على استخدام هذه التقنيات لرصد الأنهار الجليدية، وبذلك تدعم وضع استراتيجيات للتكيف مع تغير المناخ خاصة بمواقع محددة وقائمة على الأدلة.

وقال السيد غيرد ديركون، رئيس مختبر إدارة التربة والمياه وتغذية المحاصيل التابع للمركز المشترك بين الفاو والوكالة: "من خلال الجمع بين العلوم النووية والخبرات المحلية، نُمكِّن العلماء وواضعي السياسات من تحويل البيانات إلى تدابير عملية من أجل الصمود في وجه تغير المناخ."

**جبال بامير، قيرغيزستان.**
(الصورة من: AdobeStock)

# ملوثات المياه: الأزمة الخفية

بقلم إيما ميدجلي

إنَّ الماء عنصر أساسي للأمن الغذائي والصحة البشرية والتنمية الاقتصادية. ولكن مع نمو عدد السكان واشتداد تغير المناخ، يتزايد التلوث طوال مراحل الدورة الهيدرولوجية.

وتأتي ملوثات المياه في أشكال عديدة، وغالبا ما تكون خفية. ومن بين أكثر الملوثات شيوعاً الأسمدة والمواد البلاستيكية والصرف الصحي والمستحضرات الصيدلانية والهرمونات والمواد الكيميائية الصناعية والبتروكيماويات والمعادن الثقيلة والصرف التعديني.

وتتمثل إحدى العقبات الرئيسية أمام البلدان التي تسعى إلى تحسين جودة المياه في نقص البيانات عن مواردها المائية. ومن شأن التقنيات النووية والنظيرية أن تساعدنا على فهم مصدر تلوث المياه وتوفير حلول مدعومة علميا للتخفيف من صعوبة هذا التحدي.

## مشكلة النيتروجين

النيتروجين هو مصدر رئيسي لتلوث المياه، مع ما قد يترتب على ذلك من آثار خطيرة على الصحة البشرية والبيئة. وتشمل المصادر الرئيسية للتلوث بالنتروجين الأسمدة ومياه الصرف الصحي والتصريفات الصناعية. وفي حين أن الأسمدة النيتروجينية عززت إنتاج الأغذية على مدى القرن الماضي، فإن حوالي 80% منها يفقد في البيئة.

وقال السيد يوانيس ماتياتوس، الأخصائي في الهيدرولوجيا النظيرية في المركز اليوناني للبحوث البحرية في اليونان: "يشكل التلوث بالنيتروجين، وخاصة بالنترات، تهديدا كبيرا للأنهار والبحيرات والمياه الجوفية والمياه الساحلية." وأضاف: "إن تتبع مصدر التلوث بالنترات عامل ضروري لحماية النظم المائية وتوجيه الجهود نحو تنظيف المناطق الملوثة."

والنترات هي أكثر أشكال النيتروجين قابلية للذوبان، مما يعني إمكانية تسربها بسهولة إلى المياه الجوفية والبحيرات والأنهار. وإذا تركزت النترات في مياه الشرب، فإنها يمكن أن تؤدي إلى إضعاف قدرة الدم على نقل الأكسجين في جميع أنحاء الجسم. ويتسبب التلوث بالنيتروجين أيضا في إثراء المياه بالمغذيات بشكل مفرط، مما يؤدي إلى نمو الطحالب الضارة ونمو النباتات في البحيرات والأنهار. ووفقا لبرنامج الأمم المتحدة للبيئة، يمثل التلوث بالنيتروجين أكبر محرك لفقدان التنوع البيولوجي بعد تدمير الموائل وانبعاثات غازات الدفيئة.

ويزيد تغير المناخ من تفاقم تأثير التلوث بالنتروجين. ويسبِّب ارتفاع درجة حرارة مناخ الأرض المزيد من حرائق الغابات، مما يؤدي إلى زيادة استخدام مثبطات الحريق التي تحتوي على كميات كبيرة من المركبات القائمة على النيتروجين التي تتسرب إلى مصادر المياه. وفي الوقت نفسه، ترتفع درجة حرارة البحيرات والأنهار مع ارتفاع درجة حرارة الكوكب، مما يفاقم نمو أنواع النباتات التي يمكن أن تضر بالنظم الإيكولوجية والبيئة. ويمكن أن ينبعث أكسيد النيتروز من البحيرات الأعلى حرارة التي تكون مليئة بالطحالب، وهو غاز من غازات الدفيئة، في حين تزيل البحيرات الأكثر برودة النيتروجين من دورة النيتروجين وتُخزنه على مدى فترات طويلة.

## فك شفرة التلوث بالنيتروجين من خلال التحليل النظيري

تستخدم الوكالة تقنيات نظيرية للمساعدة في تحديد مصادر التلوث بالنيتروجين. وفي إطار هذا البحث، عملت الوكالة مع

كيس بلاستيكي أحادي الاستخدام يطفو بجانب شعاب مرجانية في بالي.
(الصورة من: ن بيرتولت جنسن / Ocean Image Bank)

(الصورة من: AdobeStock)

(الصورة من: AdobeStock)

جامعة ماساتشوستس على وضع أساليب أرخص سعرا وأكثر أمانا وأسرع وتيرة لتتبع أصل التلوث بالنيتروجين في الأنهار والبحيرات والبحار.

وقال السيد ماتياتوس: "تمثل تقنيات نظائر النترات أداة قوية لأنها تساعدنا على تحديد مصادر التلوث بالنترات وفهم كيفية استخدام النيتروجين وتحوله في الطبيعة."

وتساعد الوكالة البلدان، من خلال برنامجها للتعاون التقني، على بناء قدراتها في مجال التقنيات النظيرية لدراسة التلوث بالنيتروجين في كل مكان من جبال الألب الإيطالية — حيث تصبُّ المياه الجليدية الذائبة في البحيرات القريبة — إلى مدينة كولكاتا الكبرى في الهند.

وتستخدم الوكالة أيضا التقنيات النظيرية والنووية لمساعدة البلدان على استخدام الأسمدة بكفاءة أكبر، وتعزيز احتجاز الكربون والنيتروجين في النظم الإيكولوجية الزراعية، وبحث الكيفية التي يمكن بها لمحاصيل البقوليات، أو النظم المتكاملة بين المحاصيل والثروة الحيوانية، أن تقلل من الحاجة إلى الأسمدة الكيميائية.

## مركَّبات مثيرة لقلق ناشئ

هناك ملوثات تُكتَشف أكثر فأكثر في نظم المياه السطحية، ومنها المستحضرات الصيدلانية والهرمونات والمواد الكيميائية الصناعية ومنتجات العناية الشخصية. وتنشأ هذه الملوثات عادة في مياه الصرف الصحي البلدية والصناعية والمنزلية. وتعرف هذه العناصر باسم "المركَّبات المثيرة لقلق ناشئ"، ولم يُحدّد إلا مؤخرا أنها تمثل تهديدات محتملة للبيئة ولا تنظمها القوانين الوطنية أو الدولية على نطاق واسع بعد. وآثار هذه المركَّبات التي تكون في المياه العذبة ليست مفهومة جيدا، ولكن يُعتقد أنها قد تعطل الهرمونات وتساهم في مقاومة المضادات الحيوية في البشر والحيوانات وتؤثر سلبا في النظم الإيكولوجية المائية.

غير أنَّه يمكن استخدام المركَّبات المثيرة لقلق ناشئ من أجل فهم مصادر التلوث بالنترات بشكل أفضل لأنها تحدث معا في نظم المياه الملوثة. وتعمل الوكالة مع العلماء في جميع أنحاء العالم لتتبع مصادر ومسارات التلوث بالنترات في المياه السطحية والجوفية عن طريق ربط نظائر النترات بهذه المركَّبات.

وقالت السيدة يوليا فيستافنا، الأخصائية في الهيدرولوجيا النظيرية في الوكالة: "المركبات المثيرة لشواغل ناشئة هي مقتفيات مثالية للتلوث البرازي، لأنها ترتبط عادة بمصدر محدد ويمكن كشفها في العينات البيئية الملوثة."

## استخدام التكنولوجيا الإشعاعية لمعالجة مياه الصرف الصحي

تكتسي إزالة الملوثات الدقيقة مثل المواد البلاسيكية الدقيقة والملوثات العضوية الثابتة والمستحضرات الصيدلانية من مياه الصرف الصحي أهمية حاسمة في تحقيق توفير المياه النظيفة والحفاظ عليها. وتؤدي التكنولوجيا الإشعاعية، بما في ذلك الحزم الإشعاعية الإلكترونية والتشعيع بأشعة غاما، دورا هاما في مكافحة طائفة واسعة من الملوثات العضوية في مياه الصرف الصحي وحمأة المجاري عن طريق تفتيت هذه الجزيئات المعقدة إلى أشكال أقل ضررا أو أكثر قابلية للإزالة.

وتشكل المواد البلاستيكية الدقيقة تحديا مستعصيا بشكل خاص لأنها تقاوم التحلل البيولوجي وتميل إلى التفتت إلى جزيئات أصغر.

وقد عُثر على المواد البلاستيكية الدقيقة في مياه الصنابير والمياه المعبأة، والهواء الذي نتنفسه، ورواسب الأنهار والتربة. فهي تلوث المياه الجوفية والسطحية وينتهي بها المطاف في المحيط. فقد خَلُصت عملية رصد التلوث بالمواد البلاستيكية التي أُجريت في إطار مبادرة الوكالة بشأن استخدام التكنولوجيا النووية لمكافحة التلوث بالمواد البلاستيكية (مبادرة نيوتيك للمواد البلاستيكية) إلى وجود مواد بلاستيكية دقيقة حتى في أكثر مناطق الكوكب نقاء وحماية، بما في ذلك جزر غالاباغوسو وأنتاركتيكا.

وتقدم معالجة مياه الصرف الصحي باستخدام تكنولوجيا الحزم الإشعاعية الإلكترونية حلا واعدا. فهي تتيح تجميع المواد البلاستيكية الدقيقة في كتل يمكن إزالتها بسهولة من مياه الصرف الصحي. وتبين تجارب أجريت مؤخرا في معهد الكيمياء والتكنولوجيا النوويتين في بولندا، وهو مركز متعاون مع الوكالة في مجال التكنولوجيا الإشعاعية، إمكانية عزل ما بين 85% و95% من المواد البلاستيكية الدقيقة عن مياه الصرف الصحي بعد معالجتها بتكنولوجيا الحزم الإشعاعية الإلكترونية.

وقال السيد بومسو هان، الخبير في الإشعاعات وكبير المستشارين في شركة برايت فيوتشر تكنولوجيز في جمهورية كوريا: "من الصعب إزالة المواد البلاستيكية الدقيقة باستخدام الطرق التقليدية لمعالجة المياه ومياه الصرف الصحي."
وأضاف: "رغم أن البحث لا يزال في مراحله المبكرة، من المتوقع أن تساهم الدراسات الجارية مساهمةً كبيرةً في معالجة التلوث بالمواد البلاستيكية الدقيقة في بيئتنا."

## مبادرة نيوتيك للمواد البلاستيكية: مكافحة التلوث بالمواد البلاستيكية

تجمع المبادة الرائدة لمكافحة التلوث بالمواد البلاستيكية التي أطلقتها الوكالة بين البلدان والشركاء في جميع أنحاء العالم بهدف التصدي للتلوث بالمواد البلاستيكية عن طريق تسخير التكنولوجيات النووية لتحسين الكشف عن المواد البلاستيكية الدقيقة والمواد البلاستيكية النانوية وتحديدها في البيئة البحرية، ولتطوير تقنيات فعالة لإعادة تدوير المواد البلاستيكية تقلل من الاعتماد على المواد البلاستيكية القائمة على الوقود الأحفوري. ويمكن استخدام الإشعاعات لصنع مواد بلاستيكية حيوية، وهي بديل أكثر استدامة من المواد البلاستيكية التقليدية، لأنها قابلة للتحلل البيولوجي و أو يمكن إعادة تدويرها بسهولة حسب التصميم.

ويحرص العديد من البلدان على الانتقال نحو اقتصاد أكثر استدامة بشأن المواد البلاستيكية. وفي مؤتمر الأمم المتحدة للمحيطات لعام 2025، حيث ركز المشاركون على المفاوضات الجارية للتوصل إلى اتفاق دولي ملزم قانونا بشأن التلوث بالمواد البلاستيكية، سلطت الوكالة الضوء على دور العلوم النووية في التصدي لهذا التحدي.

وقال المدير العام للوكالة، السيد رافائيل ماريانو غروسي، في المؤتمر "إنَّ العلوم النووية تساعد على حماية محيطاتنا وتدعم الحياة تحت الماء". وأضاف قائلاً: "من خلال مختبراتنا البحرية في موناكو ومبادرة نيوتيك للمواد البلاستيكية، نساعد البلدان في التصدي للتلوث البحري من خلال تجهيز أكثر من 100 مختبر في جميع أنحاء العالم لرصد المواد البلاستيكية الدقيقة."

وينشأ حوالي 80% من التلوث البحري بالمواد البلاستيكية على الأرض، لذا فإن تكثيف الجهود لتحسين إعادة تدوير النفايات البلاستيكية ومعالجتها قبل أن ينتهي بها المطاف في مواقع طمر النفايات ونظم المياه، من شأنه أن يساعد على مواجهة هذا التحدي العالمي المتزايد.

(رسم بياني: غيليرمي أوليناريو/ الوكالة)

## استخدام المستنقعات الاصطناعية لاستصلاح مياه الصرف الناتجة عن التعدين

أثبتت المستنقعات الطبيعية — التي يحدث فيها ترشيح المياه العذبة نتيجة للعمليات الفيزيائية والجيوكيميائية والبيولوجية في التربة والرواسب والنباتات — فعاليتها في عزل الملوثات من المياه الملوثة. وتستخدم المستنقعات الاصطناعية — وهي نُظم هندسية تستخدم بالفعل هذه العمليات الطبيعية نفسها — لمعالجة مياه الصرف الصحي في جميع أنحاء العالم. وعادة ما تكون أقل تكلفة وأقل استهلاكا للطاقة في التشغيل والصيانة مقارنة بالنُظم التقليدية لمعالجة النفايات.

ويتزايد استخدام المستنقعات الاصطناعية لاستصلاح المياه الملوثة بالنواتج الثانوية للتعدين مثل المعادن الثقيلة والعناصر السامة الأخرى. ويمكن أن تستمر هذه النواتج لعقود بعد توقف التعدين، مع ما قد يترتب على ذلك من آثار خطيرة على الصحة البشرية والنظم الإيكولوجية المحيطة.

وعند تعدين اليورانيوم، غالبا ما توجد ملوثات مشعة طبيعية في مياه الصرف الصحي مثل الرادون والراديوم. ووفقا للسيدة هانا أفوم، الخبيرة في التكنولوجيا الصناعية في الوكالة، "هناك فجوة بحثية في مدى فعالية النباتات والرواسب في إزالة الملوثات المشعة في المستنقعات الاصطناعية."

وللمساعدة على سد هذه الفجوة، أطلقت الوكالة مؤخرا مشروعا بحثيا منسقا يستخدم المقتفيات الإشعاعية لدراسة الكيفية التي تنجح فيها التربة والحصى والنباتات في المستنقعات الاصطناعية من إزالة وتحويل الملوثات في مياه الصرف الصحي الناتجة عن تعدين

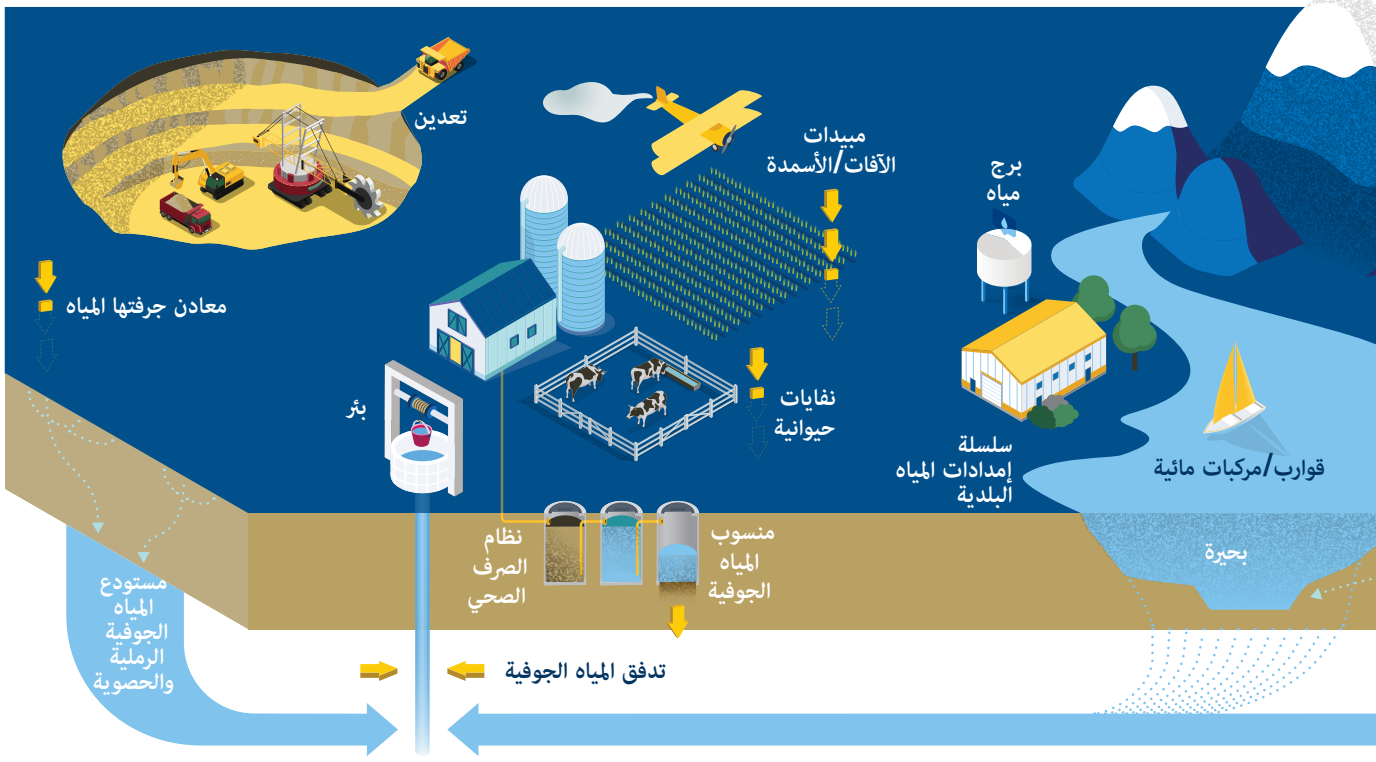
(الصورة من: AdobeStock)

اليورانيوم والنحاس والذهب. وبالنظر إلى احتمال أن تنخفض قدرة المستنقعات الاصطناعية على أداء هذا الدور بمرور الوقت، سيضطلع المشروع أيضا بدراسة الديناميكيات المائية للتدفقات وسيقوم بجمع البيانات لتحسين تصاميم المستنقعات المستقبلية.

وقال السيد أفوم: "يمكن أن تمنحنا البحوث المركزة رؤى حاسمة لتوجيه التصاميم المستدامة لهذه النظم وتحسين عزل الملوثات على المدى الطويل."

وتتعرض نظم المياه في العالم لضغوط متزايدة بسبب النيتروجين والمركبات المثيرة لشواغل ناشئة، والمواد البلاستيكية الدقيقة والمعادن الثقيلة. وتقدم العلوم النووية حلولا لمواجهة هذا التحدي.

### ملوثات ناجمة عن الانبعاثات الصناعية



# فهم قصة
# قطرة الماء

## لماذا هذا الأمر مهم؟

**هل مصدر المياه التي تشربونها هي الأمطار العذبة التي تسقط بانتظام بالقرب من مدينتكم، أو من احتياطي قديم لمياه جوفية في بلد مجاور على وشك النضوب؟**

فهم مصدر مياهنا واستدامتها أمرٌ بالغ الأهمية لمنع نقصها المفاجئ وضمان الوصول إليها على المدى الطويل.

باستخدام البيانات الصحيحة، يمكن للمجتمعات المحلية وصانعي القرارات اتخاذ تدابير مستنيرة. وتؤدي **الهيدرولوجيا النظيرية** دورا رئيسيا في هذه العملية، إذ تمكن العلماء من تتبع منشأ المياه وتحديد المدة التي استغرق دورانها منذ أول مرة سقطت في شكل أمطار. ويساعدنا ذلك على رسم خريطة لكيفية تحرك المياه عبر البيئة وتقييم سرعة استنفاد احتياطيات المياه الجوفية الأساسية.

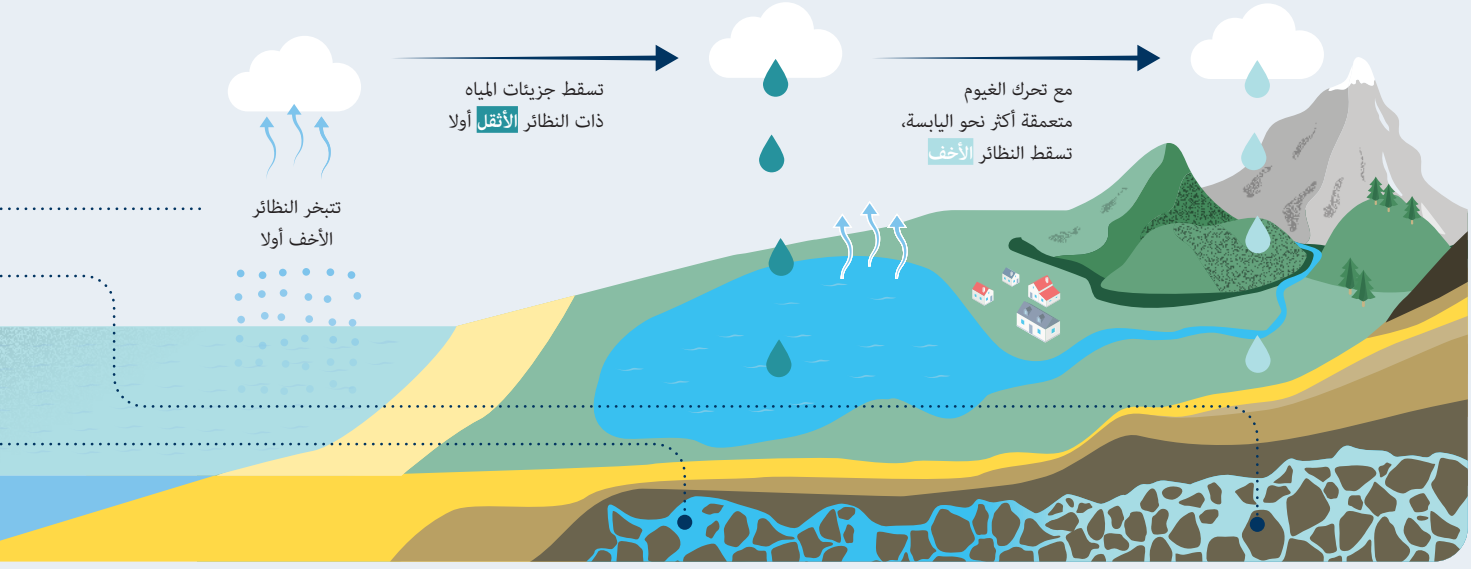
هذه الرؤى أساسية لإدارة الموارد المائية بشكل مستدام وحمايتها من أجل الأجيال القادمة.

## تحليل عينات المياه

لكل مصدر من مصادر المياه **بصمة نظيرية** فريدة تكشف عن منشئه وعمره وجودته ومعدل تجدده.

دأبت الوكالة وشركاؤها على جمع عينات المياه من الأمطار والبحيرات والأنهار ومستودعات المياه الجوفية وغيرها من المصادر في جميع أنحاء العالم لأكثر من 60 عاما. وتُستخدم

معدات عالية الدقة لتحليل هذه العينات المائية، والحصول على تركيبها النظيري.



## ما هو جزيء الماء؟

$H_2O$

يحتوي كل جزيء ماء على ذرة أكسجين، وذرتي هيدروجين

لجزيئات المياه نظائر مختلفة: بعضها **أخف** وزناً وبعضها **أثقل**

هذه الاختلافات ناجمة عن عمليات فيزيائية مثل **التبخر** و**التكثُّف**

## ما هو النظير؟

يُطلق على الذرات التي تحتوي على نفس عدد البروتونات (p+) ولكن على أعداد مختلفة من النيوترونات (n) اسم النظائر

لنأخذ **نظائر الهيدروجين** كمثال:

البروتيوم

الديوتيريوم

التريتيوم

هناك نوعان من النظائر – المستقرة وغير المستقرة.

**للنظائر المستقرة**، مثل البروتيوم والديوتيريوم، أوزان مختلفة وتبقى ثابتة بمرور الوقت.

وتسمى **النظائر غير المستقرة**، مثل التريتيوم، **النظائر المشعة**. وتتغير هذه النظائر بمرور الوقت وتحتوي على نيوترونات زائدة في نواتها وتنبعث منها الإشعاعات، مما يسمح باستخدامها لتحديد **عمر المياه**.

## تحديد عمر المياه

يُنتج **التريتيوم** عندما تصطدم **الأشعة الكونية** الغنية بالنيوترونات والواردة من الغلاف الجوي بالغيوم. ويحتوي التريتيوم على **نيوترونات زائدة**، مما يجعله **غير مستقر**.

عندما يحاول التريتيوم أن يصبح مستقرا، تنبعث منه **إشعاعات** منخفضة المستوى.

يتبع الاضمحلال الإشعاعي نمطا يمكن التنبؤ به في كل عنصر.

من خلال تحليل النشاط الإشعاعي للتريتيوم يمكننا تحديد عمره.

يتيح لنا ذلك معرفة الوقت الذي سقطت فيه هذه المياه آخر مرة على الأرض في شكل أمطار.

## منشأ الماء

يستطيع العلماء تحديد **منشأ المياه وحركتها** عن طريق قياس النسبة بين النظائر الثقيلة والنظائر الخفيفة في المياه الواردة من مصادر مختلفة.

**التجدد المباشر:** للمياه الجوفية ومياه الأمطار نفس البصمة النظيرية.

**الخليط:** البحيرة عبارة عن خليط من النظائر الموجودة في الأمطار والأنهار.

**التفاعل:** للمياه الجوفية ومياه البحيرات نفس البصمة النظيرية.

# استراتيجية البرازيل لحماية مواردها من المياه العذبة

بقلم إيما أتوهير

تستأثر البرازيل بنسبة 12% من المياه العذبة في العالم، إذ لديها أنهار ومستنقعات ممتدة عبر حوض الأمازون. ورغم وفرة المياه، لا يحصل الجميع عليها. ويؤدي تغير المناخ والأنشطة البشرية إلى تقليص هذه الموارد الطبيعية. وبما أن ما يقرب من نصف سكان البرازيل يعتمدون على هذه الموارد من المياه العذبة للاستهلاك المحلي والزراعة وإنتاج الطاقة، فإن حمايتها تمثل أولوية وطنية.

## الاستثمار في الابتكار العلمي

في حين أن العديد من البلدان لا تزال تعتمد على الأدوات الهيدرولوجية التقليدية مثل قياس هطول الأمطار أو تدفقات الأنهار من أجل رصد مواردها المائية، يستخدم مركز المسح الجيولوجي في البرازيل، وهو مركز متعاون مع الوكالة منذ عام 2015، أساليب هيدرولوجية وجيوكيميائية متطورة لفهم نظم المياه العذبة في البلد فهماً أفضل. والهدف النهائي هو تحسين جودة المياه، وتوفير فرص عادلة للحصول عليها، واستخدامها المستدام، والحفاظ عليها في الأجل الطويل.

وقدم برنامج الوكالة للموارد المائية الدعم إلى مركز المسح الجيولوجي في البرازيل في تحديد نُهج الهيدرولوجيا النظرية الرئيسية التي من شأنها أن تضيف قيمة إلى استراتيجيات إدارة المياه. ومن خلال هذا العمل، أنشأ المركز مختبرا للهيدرولوجيا النظرية، وتلقى المعدات المتخصصة والتدريب والدعم التقني من خلال برنامج التعاون التقني للوكالة. وحتى وقت قريب، كان يتعين أن يُرسل علماء المركز عينات من المياه إلى مختبر الهيدرولوجيا النظرية التابع للوكالة في فيينا لتحليلها. وبفضل تبرع سويسرا بمطياف كتلي غازي محمول وتوفير التدريب من جانب الوكالة، سيتمكن باحثو المركز من تحليل بيانات النظائر في الموقع بمجرد تركيب الجهاز الجديد. وسيمكنهم هذا الجهاز من دراسة الغازات الخاملة المذابة في المياه الجوفية، التي تكون حاسمة لتقدير عمر مصادر المياه ومنشئها وتدفقها وتقييم ما إذا كانت متجددة.

وقال السيد روبرتو كيرشهايم، الباحث في مركز العلوم الجيولوجية التطبيقية التابع للمركز: "أحدث هذا العمل الرائد في العديد من مجالات التطبيقات النظيرية وزيادة القدرات التقنية والتحليلية تأثيرا كبيرا في فهم ديناميات المياه، وبالتالي في إدارة الموارد."

وتتبادل البرازيل أيضا معارفها وخبراتها لدعم بلدان أمريكا اللاتينية الأخرى في تعزيز نظمها لإدارة المياه. ومركز المسح الجيولوجي في البرازيل على استعداد للاضطلاع بدور نشط في بناء شبكة إقليمية لمختبرات المياه من خلال الشبكة العالمية لمختبرات تحليل المياه التابعة للوكالة.

## مواجهة تغيُّر المناخ

يشكل تغيُّر المناخ تهديدا خطيرا للموارد المائية في البرازيل. ووفقاً لتقرير صادر عن الوكالة الوطنية للمياه والصرف الصحي في البرازيل في عام 2024، قد تشهد بعض مناطق البلد انخفاضا في الموارد المائية بأكثر من 40% بحلول عام 2040.

ويشارك علماء برازيليون في عدة مشاريع بحثية منسقة للوكالة من أجل تقييم تأثيرات تغير المناخ على توافر المياه باستخدام الهيدرولوجيا النظرية. وحدَّد واحد من هذه المشاريع الأمازون كمصدر رئيسي لهطول الأمطار في البرازيل والأرجنتين، مما دفع كلا البلدين إلى تعزيز جهودهما للحفاظ على الغابات المطيرة.

صيادان يبحران في زورق في نهر بالبرازيل.
(الصورة من: AdobeStock)

وتدرس البرازيل، من خلال مشروع بحثي منسق آخر للوكالة، كيفية استجابة نظم المياه العذبة للضغوط الناشئة عن تغيُّر المناخ والنشاط البشري لمساعدة البلد في التأهب للآثار المناخية في المستقبل. وسوف يُسترشد بهذه البيانات في المناقشات بشأن إدارة المياه الجوفية على مستوى الاتحاد والولايات على حد سواء، مما يمكن السلطات من اتخاذ قرارات تستند إلى الأدلة.

## استراتيجيات زراعية ذكية مناخيا من أجل الصمود أمام أزمات المياه

تمثل الزراعة قطاعا حيويا بالنسبة للبرازيل، لكنها تؤثر سلبا على موارد المياه في البلد. وغالبا ما تستخرج المياه الجوفية لأغراض الري بمعدلات تتجاوز معدلات تجددها الطبيعي، مما يهدد إدارة الموارد المائية على المدى الطويل.

ولمواجهة هذا التحدي، شاركت البرازيل في مشروع بحثي منسق للوكالة طَبَّق التقنيات النظيرية لتقييم مصادر المياه في نُظم الري. وبفضل الإرشاد والتنسيق العلميين المقدمين من الوكالة، تمكنت البرازيل من تحديد مصادر المياه المستخدمة للري، وتقييم سرعة تجدد هذه المصادر بشكل طبيعي، والتنبؤ بشأن توافرها في المستقبل.

وقد ساعدت هذه المعارف البرازيل على الحد من الإفراط في استخراج الموارد المائية، وتحسين تخصيص المياه، وتعزيز الممارسات الزراعية الذكية مناخيا.

## حماية مستودع غواراني للمياه الجوفية

يمثل مستودع غواراني للمياه الجوفية، الذي يمتد على مساحة تزيد على 1,2 مليون كيلومتر مربع في البرازيل والأرجنتين وباراغواي وأوروغواي، ثاني أكبر شبكة مستودعات مياه جوفية عابرة للحدود في العالم، حيث يخزن أكثر من 37 000 كيلومتر مكعب من المياه العذبة. وهو مستودع مهم بشكل خاص للبرازيل، حيث يوفر المياه لأكثر من 14 مليون شخص.

وقد أثار تلوث المياه وتزايد الطلب عليها واستخدامها غير المنظم مخاوف جدية بشأن مستقبل مستودع المياه الجوفية. وحتى وقت قريب، كانت البلدان الأربعة التي تتقاسمه تفتقر إلى البيانات اللازمة لتقييم كيفية تأثير النشاط البشري على مستودع المياه الجوفية وكيفية إدارته على نحو مستدام. وبدعم من برنامج الوكالة للموارد المائية، ونقل التكنولوجيا من خلال برنامجها للتعاون التقني، لجأ العلماء إلى الهيدرولوجيا النظيرية من أجل دراسة معدل تجدد المياه الجوفية وجودتها وقابلية تعرضها للتلوث. واستنادا إلى هذه المعارف، وضعت البلدان الأربعة استراتيجيات مشتركة لإدارة وحماية مستودع غواراني للمياه الجوفية من أجل الأجيال المقبلة.

باحث في الهيدروجيولوجيا في مركز المسح الجيولوجي في البرازيل يجري أخذ عينات نظيرية في جزء من شبكة مستودع غواراني للمياه الجوفية بجنوب البرازيل.

(الصورة من: ر. كيرشهايم/مركز المسح الجيولوجي في البرازيل)

وقالت السيدة إيزادورا أوموند كون، منسقة البرنامج الوطني لتطبيقات الهيدرولوجيا النظيرية في مركز المسح الجيولوجي في البرازيل: "إن الدعم المتواصل الذي تقدمه الوكالة قد مكَّن البرازيل من توليد مجموعات بيانات نظيرية لم يسبق لها مثيل عن هطول الأمطار والأنهار والمستنقعات ومستودعات المياه الجوفية العميقة، وكثير منها في مناطق تسجل ندرة في البيانات". ولم يسد ذلك الفجوات العلمية الحرجة فحسب، بل عزز أيضا تعاونا إقليميا أقوى في أمريكا الجنوبية".

## الطريق إلى مؤتمر المناخ COP30

في سياق استعدادات البرازيل لاستضافة الدورة الثلاثين لمؤتمر الأمم المتحدة المعني بتغيُّر المناخ (مؤتمر المناخ COP30) في تشرين الثاني/نوفمبر 2025، يتمتع البلد بوضع فريد يمكِّنه من قيادة الحوار بشأن الحاجة الملحة إلى حوكمة المياه في مواجهة تغير المناخ ومشاطرة ما اكتسبه البلد من خبرات في مجال العلوم النووية والتعاون الدولي لتحفيز عملية اتخاذ القرارات المستنيرة بالبيانات. وستعرض الوكالة، التي ساعدت في وضع الحلول النووية على جدول أعمال مؤتمر الأطراف، كيف بإمكانها أن تسهم في استراتيجيات التخفيف من حدة تغير المناخ والتكيف معه، خلال الدورة الثلاثين لمؤتمر الأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ. ويشمل ذلك بناء القدرة على الصمود في نظم المياه باستخدام العلوم والتكنولوجيا النووية.

# العلماء يدرسون "الأنهار الخفية" لإدارة الظواهر الجوية القصوى وندرة المياه

بقلم كاترينا فارغاس

مثلما تتدفق الأنهار عبر الأرض، لتعزيز قدرات المجتمعات المحلية وتوفير سبل العيش والتنوع البيولوجي، تتدفق "الأنهار الخفية" فوقنا، حاملة بخار ماء يفوق في كمياته ما تحمله جميع الأنهار على الأرض مجتمعة. وتُحدث هذه المسارات الرطبة — المعروفة باسم الأنهار الجوية — تأثيراً هائلاً في أنماط الطقس وهطول الأمطار على مستوى العالم.

ويؤثر تغير المناخ والأنشطة البشرية في سلوك الأنهار الجوية، مما يغير مساراتها ويسبب ظواهر جوية قصوى مثل الفيضانات والعواصف والجفاف. ويمكن أن تساعدنا دراسة النظائر في فهم الأنهار الجوية وفي تعقبها، وبالتالي تحسين التنبؤات الجوية والتنبؤات بالظواهر الجوية القصوى.

## ما هي الأنهار الجوية؟

الأنهار الجوية هي أحزمة طبيعية من بخار الماء المركز بطول آلاف الكيلومترات تمر عبر الغلاف الجوي للأرض. وتتشكل هذه الأنهار عندما تُبخِّر الحرارة الشديدة للشمس مياه المحيطات على طول خط الاستواء. وتحمل الرياح بخار الماء نحو القطبين، مكوِّنة "أنهارا في السماء"، لا ترتفع عادةً عن 3000 متر فوق سطح الأرض — أي حوالي ثلث ارتفاع جبل إيفرست. وعندما تقترب الأنهار الجوية من السواحل تُدفع نحو الأعلى، وعندما تقترب من الجبال تطلق الرطوبة في شكل أمطار وثلوج.

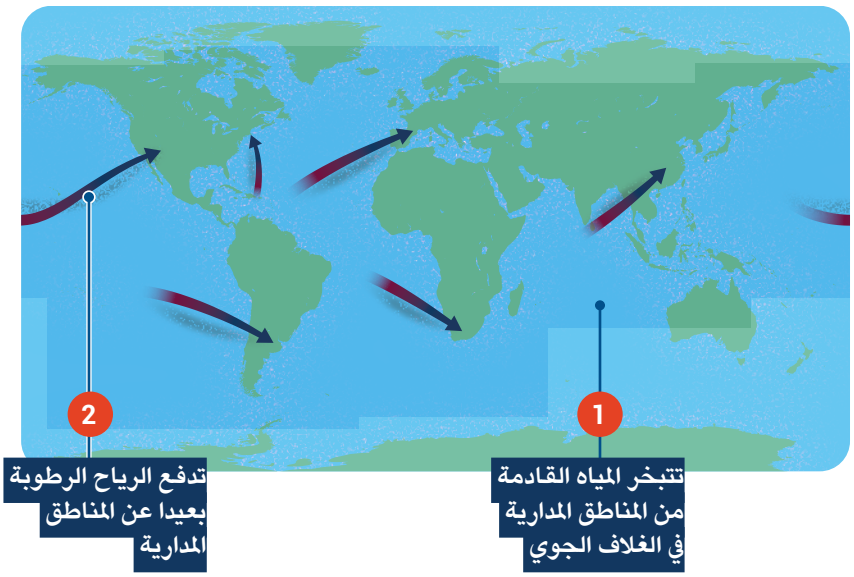
وتوفر الأنهار الجوية المياه العذبة الحيوية لمناطق كثيرة في العالم، خاصة في المناطق الساحلية. وفي كاليفورنيا، على الساحل الغربي للولايات المتحدة الأمريكية، تمثل الأنهار الجوية مصدر حوالي نصف كميات الأمطار السنوية، حيث تملأ الخزانات وتدعم المزارعين. كما أنها تمثل ما بين 30% و60% من الأمطار السنوية التي تهطل على سواحل شرق الصين وشبه الجزيرة الكورية وغرب اليابان.

## الضغوط الناشئة عن تغير المناخ

مع ارتفاع درجات الحرارة العالمية، يتراكم المزيد من الرطوبة في الغلاف الجوي، مما يؤدي إلى هطول أمطار أكثر كثافة وتواترا تصدر من الأنهار الجوية. وهذه الظاهرة مسؤولة عن أكثر من 80% من الأمطار الغزيرة التي تهطل في العديد من المناطق الساحلية في شرق آسيا.

وقالت السيدة جولي كالانسكي، نائبة مدير مركز الظواهر الجوية والمائية المتطرفة في الغرب في معهد سكريبس لعلوم المحيطات: "في ظل ارتفاع درجة حرارة المناخ، أصبحت الظواهر الجوية المتطرفة أكثر حدة، كما أنَّ العديد منها يحدث بسبب الأنهار الجوية."

وفي الوقت نفسه، تتحرك الأنهار الجوية بعيدا عن خط الاستواء نحو القطبين. وقد أصبحت أقل تواترا في المناطق شبه الاستوائية، التي تواجه الآن انخفاضا في إمدادات المياه والجفاف، في حين تشهد أماكن مثل شمال غرب المحيط الهادئ وأوروبا والقطب الشمالي هطول أمطار غزيرة وفيضانات.




رسم بياني: غيلهيرمي أبوليناريو/ الوكالة

## دور النظائر

قالت السيدة كالانسكي: "تتباين الأنهار الجوية تبايناً شديداً من سنة إلى أخرى، مما يُصعِّب التنبؤ بكمية الأمطار التي ستهطل علينا في كل عام." وأضافت: "تشكل عدم القدرة على التنبؤ بهطول الأمطار الموسمية تحديات كبيرة لإدارة إمدادات المياه."

ويستخدم العلماء النظائر المستقرة — وهي أشكال غير مشعة من الذرات — لدراسة كيفية تأثير تغير المناخ في الأنهار الجوية. وتَتبع هذه التقنيات مصدر بخار المياه، والمسافة التي يقطعها عبر الغلاف الجوي، ومكان نزوله في شكل أمطار، وكيفية تفاعله مع الدورة الهيدرولوجية. ويمكن استخدام هذه المعلومات للتنبؤ بالظواهر الجوية القصوى والحد من تأثيرها، وتحديد مخاطر الفيضانات، وإدارة الموارد المائية، ولا سيما أثناء الجفاف.

ويضطلع مشروع بحثي منسق جديد تابع للوكالة بدمج مقتفيات نظيرية في النماذج الهيدرولوجية والمناخية لتعقُّب ومحاكاة كيفية تحرك مختلف أشكال المياه وتغيُّرها على امتداد الدورة الهيدرولوجية.

وقالت السيدة جودي ميلر، رئيسة قسم الهيدرولوجيا النظيرية في الوكالة: "من شأن البيانات التي سنجمعها من خلال المشروع البحثي أن تساعد في تقييم المخاطر المتزايدة للفيضانات وحالات الجفاف وندرة المياه." وأضافت: "ويمكنها أيضا أن تساعد البلدان على وضع استراتيجيات للتخفيف من المخاطر وتحسين إدارة المياه وتعزيز القدرة على الصمود أمام تحديات المناخ."

وقال السيد كي يوشيمورا، وهو أستاذ في معهد العلوم الصناعية في جامعة طوكيو، وهو مشارك في المشروع: "نحن نستخدم البيانات المتعلقة بنظائر بخار الماء لتحسين دقة التنبؤات الجوية." وأضاف: "ستساعد البيانات النظيرية المفيدة بشكل خاص في خطوط العرض الوسطى على تحسين دقة التنبؤ بانتقال الرطوبة وأنماط هطول الأمطار المرتبطة بالأنهار الجوية."

ويستند المشروع إلى 65 عاما من البيانات المستمدة من الشبكة العالمية لاستخدام النظائر في دراسة الأمطار، التي تتعقب هطول الأمطار في أكثر من 1000 محطة رصد في جميع أنحاء العالم. ويمكن استخدام بيانات هذه الشبكة لتحليل منشأ الأنهار الجوية ومساراتها وأنماط هطول الأمطار الناتجة عنها، مما يوفر رؤى عن تغير سلوكها في مناخ يتسم بارتفاع درجة الحرارة.

# إعادة التفكير في الري

## تحسين استخدام المياه باستخدام العلوم النووية

بقلم مونيكا شيفوتوكا

يساعد جهاز استشعار نيوتروني بالأشعة الكونية مزارعاً في رصد مستويات مياه التربة من خلال التقاط بيانات آنية عن الرطوبة، وتُعرض هذه البيانات على الهاتف الذكي في المقدمة.

(الصورة من: م. كاسلينغ/الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

تمثل الزراعة أكبر قطاع مستهلك للمياه في العالم، إذ تستأثر في المتوسط بنسبة 70% من المياه العذبة المستمدة من البحيرات والأنهار ومستودعات المياه الجوفية في جميع أنحاء العالم. ويضع هذا القطاع ضغوطا هائلة على الموارد المائية، مما يهدد إدارة الموارد المائية على المدى الطويل، وهو أمن بالغ الأهمية لصحة المجتمعات المحلية والبيئة والاقتصادات في جميع أنحاء العالم.

وقال السيد محمد زمان، رئيس قسم إدارة التربة والمياه وتغذية المحاصيل في الوكالة: "في ظل تزايد الضغوط على الموارد المائية، لم يعد تحسين كفاءة استخدام المياه في الزراعة أمراً اختيارياً بل أصبح ضرورياً". وأضاف: "تساعد الحلول القائمة على العلم المزارعين في استخدام كل قطرة بحكمة مع الحفاظ على الإنتاجية والاستدامة."

وتُمكن الابتكارات في العلوم النووية والتكنولوجيات ذات الصلة المزارعين من اعتماد ممارسات زراعية ذكية مناخيا توفر المياه وتعزز غلة المحاصيل وتبني القدرة على الصمود أمام تغير المناخ.

وتقوم الوكالة، من خلال المركز المشترك بين الفاو والوكالة لاستخدام التقنيات النووية في الأغذية والزراعة (المركز المشترك)، بتزويد المزارعين في المناطق التي تعاني من ندرة المياه بالأدوات والإرشادات اللازمة للري بطريقة أكثر ذكاء. ويُمكنهم ذلك من تقييم توافر المياه وكذلك حركتها في التربة وامتصاصها من قبل المحاصيل، حتى يتمكنوا من استخدامها بكفاءة أكبر.

### دعم ممارسات ري فعَّالة

يحتوي الماء، الذي يتكون من ذرة أكسجين واحدة وذرتي هيدروجين، على نظائر طبيعية (ذرات من نفس العنصر تضم أعداد مختلفة من النيوترونات) يمكن تتبعها بسهولة. وتساعد التقنيات القائمة على نظائر الأكسجين العلماء على فهم كيفية استخدام النباتات للمياه. ومن خلال تحليل النظائر في المياه الموجودة في التربة وداخل النباتات، يمكن للباحثين تحديد مصادر المياه التي تعتمد عليها النباتات، وكمية المياه التي تستخدمها، والكمية المفقودة بسبب التبخر، والكمية التي تتسرب إلى التربة. ويتيح فهم هذه العمليات للخبراء التوصية بجداول ري أفضل، وأنواع محاصيل مناسبة، وممارسات زراعية محسنة للحفاظ على المياه وزيادة غلة المحاصيل. ويعود هذا النوع من المعلومات بالفائدة، بشكل خاص، على المناطق التي تواجه الجفاف أو ندرة المياه.

وتساعد تقنيات الزراعة الذكية مناخيا المزارعين على الاستخدام الأمثل للمياه وتحسين ظروف التربة، مما يضمن إنتاجا زراعيا مستداما. وما فتئ برنامج التعاون التقني للوكالة يدعم اعتماد تقنيات زراعية ذكية مناخيا في البلدان التي تعاني من الإجهاد المائي في أفريقيا وآسيا، بما في ذلك السودان وناميبيا.

## الري بالتنقيط من أجل الحفاظ على المياه في السودان

يؤدي تغير المناخ في السودان إلى تقلبات في أنماط الطقس، حيث تُسبب مواسم الجفاف وهطول الأمطار التي لا يمكن التنبؤ بها نقص المياه وفقدان المحاصيل وانعدام الأمن الغذائي.

وساعدت الوكالة مئات المزارعات في منطقة كسلا السودانية على زراعة المزيد من الأغذية بمياه أقل باستخدام نظم محسنة للري بالتنقيط، من خلال مبادرة تجريبية في إطار برنامج للتعاون التقني للوكالة. وتتميز هذه النظم بانخفاض التكلفة وسهولة التركيب والتشغيل كما أنها تزود جذور النباتات بالمياه مباشرة، مما يقلل من النفايات. وقد مكنت المزارعين السودانيين من تقليل استخدام المياه بنسبة تصل إلى 70% مع زيادة غلة المحاصيل بأكثر من 40%. وقال السيد أحمد بابكر خليفة، الاختصاصي في إدارة المياه في هيئة البحوث الزراعية في السودان: "بفضل هذا المشروع، شهدنا تحسينات قابلة للقياس في كفاءة استخدام المياه". وأضاف: "إن دمج الري بالتنقيط مع البيانات المستمدة من التقنيات النووية يساعدنا على استخدام الكمية المناسبة من المياه — وهذا حل عملي للزراعة في المناطق التي تعاني من ندرة المياه."

وقد كان هذا النجاح مصدر إلهام لاعتماد هذه التكنولوجيا على نطاق أوسع في السودان وخارجه، ومكّن النساء وساعد المجتمعات المحلية على التكيف مع التحديات المناخية وعزّز في الوقت نفسه الأمن الغذائي.

## تحسين المحاصيل في ناميبيا باستخدام أجهزة استشعار نيوترونات الأشعة الكونية

ناميبيا هي واحدة من أكثر البلدان جفافا في أفريقيا، حيث يُصنف 92% من أراضيها على أنها قاحلة أو شبه قاحلة. وفي السنوات الأخيرة، شهدت ناميبيا تقلبات في هطول الأمطار والفيضانات والجفاف الشديد بسبب تغير المناخ، مما أسهم في حدوث نقص خطير في الأغذية.

ومنذ عام 2020، تقوم الوكالة ومنظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة (الفاو)، من خلال المركز المشترك، بتدريب المزارعين في شمال ناميبيا على سقي حقولهم بكفاءة أكبر. ويستخدم المزارعون المعلومات المستمدة من مزيج من التقنيات النووية مثل أجهزة استشعار نيوترونات الأشعة الكونية وتكنولوجيات الري الموفرة للمياه، بما في ذلك الري بالتنقيط وتجميع مياه الأمطار.

وبإمكان المزارعين تقييم المياه الموجودة في التربة من خلال البيانات الآنية عن رطوبة التربة التي تجمعها أجهزة استشعار نيوترونات الأشعة الكونية والتقنيات ذات الصلة. ويساعدهم نظام الري بالتنقيط في تطبيق كميات دقيقة من المياه بقدر ما تحتاجه النباتات.

وقد مكّن مشروع للتعاون التقني تابع للوكالة المزارعين من الاستفادة من هذه التكنولوجيات لخفض استخدام المياه بنسبة 80%. كما نمت غلة محاصيل مثل الذرة والطماطم والفلفل بنسبة تصل إلى 70%.

وقال السيد ماليا تا أثون وانغا، وهو مسؤول علمي زراعي في وزارة الزراعة والمياه واستصلاح الأراضي في ناميبيا: "من شأن إدماج التقنيات النووية مع ممارسات الري الذكية أن يحدث ثورة في مجال دعم المزارعين". وأضاف: "تُمكن أجهزة استشعار نيوترونات الأشعة الكونية من اتخاذ قرارات معتمدة على البيانات، تؤدي مباشرة إلى تحسين كفاءة استخدام مجتمعاتنا المحلية للمياه، وتعزيز أمنها الغذائي وقدرتها على الصمود أمام تغير المناخ."

تمكن نظم الري بالتنقيط المتطورة المزارعين من تحسين استخدام المياه، وتقليل النفايات، وتعزيز غلة المحاصيل.

(الصورة من: ن. جاويرث/الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

# فك شفرة المياه

## أدوات متقدمة لفهم الموارد المائية

بقلم توماس بيروي

يضطلع اختصاصيون في الهيدرولوجيا النظيرية في الوكالة، بشأن مسائل شتى تتراوح بين ذوبان الجليد وأنماط هطول الأمطار ومعدلات التبخر، بجمع البيانات وتحليلها وتبادلها بهدف فهم مصادر المياه وتاريخها وحركتها بشكل أفضل. وتتيح الأدوات والأساليب الجديدة للباحثين تحليل بيانات المياه بدقة أكبر من أي وقت مضى، مما يوفر معلومات بالغة الأهمية من أجل الإدارة الفعالة للموارد المائية ونمذجة المناخ ووضع السياسات البيئية.

وقالت السيدة سيليست ساولو، الأمينة العامة للمنظمة العالمية للأرصاد الجوية: "تمثل البيانات المائية العمود الفقري للسياسات الذكية والاستثمارات المستنيرة." وأضافت: "بدون بيانات نفقد بصيرتنا. إذ إنَّ نُظم الإنذار المبكر بالفيضانات والجفاف وكذلك تصميم البنية الأساسية للمياه مثل الخزانات وبرامج الري ونُظم الصرف تعتمد على البيانات. وتضيف الهيدرولوجيا النظيرية منظورا فريدا يتمثل في تتبع مصادر المياه ومسارات تدفقها لمساعدتنا على إدارة الموارد المائية المشتركة على نحو مستدام."

### الذكاء الاصطناعي

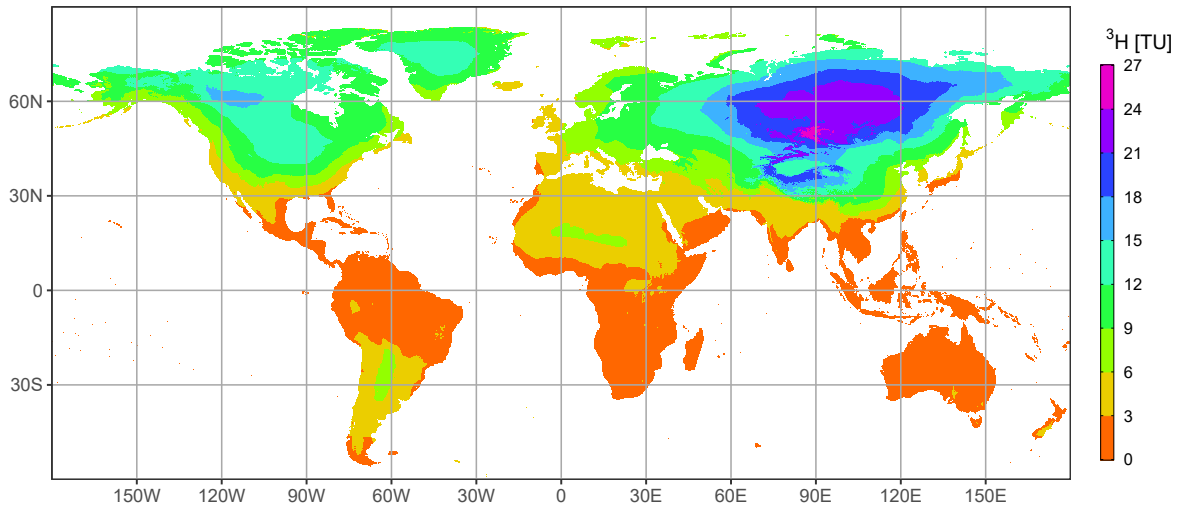
في ظل توسع الشبكات العالمية لبيانات المياه، تتقدم الهيدرولوجيا النظيرية بسرعة نحو مجال البيانات الضخمة. وتكشف نماذج الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي عن رؤى جديدة في بحوث المياه وتحسين التنبؤات وسد فجوات البيانات.

وكشفت دراسة أجرتها الوكالة باستخدام الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات النظيرية من 1257 بحيرة في 91 بلدا أنَّ نحو 20% من المياه المتدفقة إليها تضيع بسبب التبخر، وفي نحو 10% من الحالات، تظهر البحيرات خسائر فادحة بسبب التبخر تزيد على 40% من مجموع التدفقات الواردة إليها. ومعنى ذلك أنَّه ليس بإمكان العديد من البحيرات تعويض ما تبخر، مما يعرضها لخطر الاختفاء بمرور الوقت. وقالت السيدة يوليا فيستافنا، عالمة الهيدرولوجيا النظيرية في الوكالة والمؤلفة الأولى للدراسة: "استخدمنا الذكاء الاصطناعي لتحديد العوامل الرئيسية للتبخر." وأضافت: "تختلف عوامل التبخر حسب نوع المناخ — استوائي أو قاحل أو معتدل أو قاري أو بارد." واستخدمت الدراسة نماذج الذكاء الاصطناعي لتحديد أكثر البحيرات عرضة لخطر الاختفاء.

واستخدمت دراسة أخرى أجرتها الوكالة نماذج التعلم الآلي لتحديد العوامل المؤثرة في ديناميات المياه وتقدير "نسبة المياه الصغيرة العمر" — وهي المياه التي يقل عمرها عن ثلاثة أشهر — في 45 حوضا نهريا حول العالم. وجسَّد نسبة المياه الصغيرة العمر كيفية تخزين المياه وتصريفها في البيئة، مما يكشف عن أنماط الاحتفاظ بها وتدفقها. ويساعد ذلك على تعزيز فهم الكيفية التي تتفاعل بها الأنهار مع تغيرات الطقس والأراضي، مما يمكن المجتمعات المحلية من التأهب بشكل أفضل للفيضانات والجفاف وإدارة مواردها المائية بفعالية أكبر. وقالت السيدة تزانكا كوكالوفا-ويلدون، مديرة شعبة العلوم الفيزيائية والكيميائية في الوكالة: "من خلال فهم هذه الديناميات، يمكننا التكيف بشكل أفضل مع التحديات التي يفرضها تغير المناخ وتطور أنماط استخدام الأراضي، وضمان استمرار الأنهار في تقديم خدماتها الأساسية للنظم البيئية والمجتمعات البشرية."

تحليل صادر عن الوكالة مؤخرا أظهر أن العديد من البحيرات في جميع أنحاء العالم غير قادرة على تعويض المياه المتبخرة ومعرضة لخطر الاختفاء بمرور الوقت.

(الصورة من: ي. فيستافنا/الوكالة الدولية للطاقة الذرية)




**المستويات الحديثة للتريتيوم في مياه الأمطار.**

يشير الرمز TU إلى مستوى النشاط الإشعاعي للتريتيوم معبَّراً عنه بوحدات التريتيوم.

(الرسم البياني: الوكالة)

ويرى الخبراء أن استخدام الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي لتحليل بيانات المياه يُتيح القدرة على تحسين عمليات اتخاذ القرارات بشكل كبير من أجل إدارة المياه إدارةً مستدامةً. وللمضي قدما في هذه الجهود، وضعت الوكالة ومنظمة الأمم المتحدة للتربية والعلم والثقافة والمركز الدولي للفيزياء النظرية مؤخرا إطارا لإدماج الذكاء الاصطناعي في البيانات الهيدرولوجية والنظيرية.

## رسم خرائط التريتيوم العالية الدقة

يؤدي التريتيوم، وهو نظير مشع للهيدروجين موجود في الماء ويبلغ عمره النصفي نحو 12,3 سنة، دورا قيّما في تحديد المياه الجوفية التي تكون حديثة التجدد وتقييم تعرضها للتلوث. ويمكن للباحثين، من خلال رسم خرائط لمكان ظهور هذا الشكل القابل للتعقب من الهيدروجين في الأمطار والثلوج، اكتساب نظرة متعمِّقة لحركات المياه ومصادرها الحديثة. وباستخدام البيانات التي جمعت على مدى العقد الماضي، أعدّت الوكالة خرائط لتوزيع التريتيوم في مياه الأمطار من أجل تحسين عملية أخذ العينات، وتحديد الفجوات في البيانات الجوية، ودعم البحوث المتعلقة بتقييم هشاشة مستودعات المياه الجوفية.

ويستخدم العلماء الخرائط لمقارنة مستويات التريتيوم في مياه الأمطار والمياه الجوفية لفهم مدى سرعة وصول مياه الأمطار إلى مستودعات المياه الجوفية وتفاعلها معها. وعندما تكاد تتطابق كمية التريتيوم في المياه الجوفية مع الكمية التي تحملها الأمطار، فإن ذلك قد يدل على تجدّدها السريع، بمعنى أن مستودعات المياه الجوفية مزودة بإمدادات جيدة ولكنها معرضة للتلوث كذلك، لأن الملوثات يمكن أن تتبع نفس المسار بسهولة. وعندما تحتوي المياه الجوفية على نسبة تريتيوم أقل بكثير مما تحمله الأمطار المحلية، فإن ذلك قد يشير إلى أنه تم تخزين المياه بأمان تحت الأرض وتمت حمايتها من التلوث لعقود أو أكثر.

## قياس طيف أكسيد النيتروز بالليزر

قياس طيف أكسيد النيتروز بالليزر هي تقنية جديدة توفر قياسات عالية الدقة للنظائر المتعلقة بدورة النيتروجين (حركة النيتروجين بين الهواء والتربة والماء والكائنات الحية)، التي يمكن استخدامها لتتبع مصادر التلوث. وبالنظر إلى أنّ مصادر النيتروجين المختلفة (مثل حرق الوقود الأحفوري والانبعاثات الزراعية والعمليات الطبيعية) تحمل بصمات نظيرية متميزة، يمكن للعلماء تحديد مصادر التلوث البشرية ومصادر التلوث الطبيعية والتمييز بينها. ففي الهند، على سبيل المثال، حيث تضاعف استخدام الأسمدة ثلاث مرات خلال 30 عاما، استخدم علماء الوكالة هذه التقنية لدراسة تأثير الزراعة على نظم المياه. وأظهرت النتائج التي توصلو إليها أن التلوث بالنترات يرتفع خلال فترة الرياح الموسمية عندما تقود الأمطار الغزيرة الأسمدة إلى الأنهار والبحيرات، مما يؤدي إلى تدهور جودة المياه. ومن خلال تعقب النظائر، يمكن للعلماء تحديد مصادر هذا التلوث، مما قد يشجع المزارعين والحكومات على اعتماد ممارسات أنظف لتحسين جودة الماء والهواء على حد سواء.

وفي ظل استمرار تقدم القدرات التكنولوجية وأساليب جمع البيانات، تستكشف الوكالة بشكل استباقي أدوات ونهج جديدة لتحليل بيانات المياه دعماً لاستراتيجيات الإدارة المستدامة للمياه. وقال السيد ستيفان تيرزر-واسموث، الخبير في البيانات الجغرافية المكانية في الوكالة: "لا يُتيح لنا الجمع بين التكنولوجيا المتطورة وعقود من بيانات المياه التي جُمعت في كافة أنحاء العالم، دراسة المياه فقط، بل يُتيح أيضا تمكين البلدان من اتخاذ قرارات مستنيرة بشأن أثمن مواردها."

# التعاون في مجال المياه العابرة للحدود يحدث تأثيراً مضاعفاً في جنوب شرق أوروبا

بقلم ماري ألبون

تشكل البوسنة والهرسك والجبل الأسود جزءاً من تضاريس الكارست بجبال دينارا، وهي منطقة من الجبال الجيرية المذهلة التي تضم عدداً لا يحصى من الكهوف والحُفر البالوعية والينابيع والجداول الجوفية التي تمتد على طول ساحل البحر الأدرياتيكي.

والكارست هي بيئة جيولوجية معقدة تشكلها المياه، وتؤدي إلى تآكل الصخور اللينة وذوبانها. وبما أنَّ الحجر الجيري كثير المسام والثقب، فإن المياه السطحية لا تتجمع في التضاريس الطبيعية الكارستية — بل تتسرب، بدلا من ذلك، عبر الصخور لتشكيل مستودعات المياه الجوفية.

وتتقاسم البوسنة والهرسك والجبل الأسود مستودع المياه الجوفية الكارستية أوكو-بيلا غورا، الذي يمتد على الحدود بين البلدين ويغطي نحو 1800 كيلومتر مربع. وتمثل مستودعات المياه الجوفية الكارستية مفتاح الحفاظ على البيئة الطبيعية وهي مصدر مهم لمياه الشرب والمياه المستخدمة للزراعة والصناعة وتوليد الكهرباء. ويعتمد أكثر من ربع سكان العالم على المياه الواردة من مستودعات المياه الجوفية الكارستية. ومع ذلك، فإن مساميتها تجعلها عرضة للتلوث والتأثيرات الناتجة عن تغير المناخ.

## استخدام النظائر لفك شفرة مستودعات المياه الجوفية الكارستية

وحتى وقت قريب، لم يكن لدى أي من البلدين فهم جيد للظروف الهيدرولوجية لمستودعاتهما من المياه الجوفية. وفي عام 2020، انضم البَلَدان إلى 25 بلدا آخر في مختلف أنحاء أوروبا وآسيا الوسطى للمشاركة في مشروع إقليمي للتعاون التقني للوكالة من أجل دراسة كيفية تأثير تغير المناخ في موارد المياه الجوفية. وتمثل هدف المشروع في تدريب متخصصين في مجال المياه على أحدث التقنيات لأخذ عينات المياه وتحليلها، وحساب معدلات تجدّدها، وإعداد نماذج للدورات الهيدرولوجية الإقليمية. ومن خلال المنح الدراسية والزيارات العلمية والاجتماعات الإقليمية، عمَّق المشاركون معارفهم بشأن سيناريوهات تغير المناخ وشكلوا شبكة إقليمية من خبراء يتوفرون على المهارات والمعدات اللازمة لرصد وتقييم الموارد المائية باستخدام الهيدرولوجيا النظيرية.

وعمل أخصائيون في الهيدرولوجيا من البوسنة والهرسك والجبل الأسود معا لإعداد أول نموذج مفاهيمي لمستودع المياه الجوفية الكارستية أوكو-بيلا غورا. وقدمت الوكالة المعدات والإمدادات اللازمة للعمل الميداني والتحليل المختبري، كما نظَّمت دورات تدريبية في مجال تحليل النظائر. وجمع العلماء عينات من مياه الأمطار والمياه الجوفية والسطحية، واستخدموا مهاراتهم المكتسبة حديثا في التحليل النظيري لدراسة العوامل التي تؤثر في استدامة مستودع المياه الجوفية، بما في ذلك استخدامها كمصدر لمياه الشرب ولتوليد الطاقة الكهرمائية.

وأتاح دمج هذه النتائج مع البيانات الهيدرولوجية وبيانات الأرصاد الجوية التاريخية للباحثين تحديد ظروف تجدد مستودع المياه الجوفية. وبفضل هذه المعارف الجديدة، اضطلعوا بإعداد نماذج وخرائط لتحديد مناطق تجدد المياه الجوفية واستكشفوا كيفية تأثير المياه السطحية في الدورة الهيدروجيولوجية لمستودع المياه الجوفية. وتوفر هذه المعلومات مخططا لسياسة من سياسات إدارة الموارد المائية التي من شأنها أن تساعد كلا البلدين على حماية مستودع المياه الجوفية المشترك بينهما.

وقال السيد أوروش يوروسيفيتش، رئيس إدارة نظم المعلومات الجغرافية في هيئة المسح الجيولوجي لجمهورية صربسكا في البوسنة والهرسك: "لقد حدد تنفيذ هذا المشروع اتجاها واضحا لإرشاد تصميم البحوث المستقبلية في مجال إدارة بحوث المياه وتغير المناخ."

وكان هذا أول مشروع يستخدم التقنيات النظيرية لدراسة إدارة المياه الجوفية والسطحية العابرة للحدود في المنطقة. وأثبت المشروع أن الهيدرولوجيا النظيرية أداة هامة لدراسة مستودعات المياه الجوفية الكارستية.

وقال السيد دراغان رادوييفيتش، رئيس قسم الهيدروجيولوجيا والتحقيقات الجيوتقنية في هيئة المسح الجيولوجي للجبل الأسود: "إن العمل مع الزملاء من المنطقة يعزز التفاهم المتبادل ويدعم الإدارة المستدامة لهذا النظام الكارستي الهش."

جمع عينات المياه من نبع مؤقت يصب فيه مستودع المياه الجوفية الكارستية أوكو-بيلا غورا.

(الصورة: ب. يولوفيتش)

## التعاون العابر للحدود

يتقاسم أكثر من 150 بلدا موارد مائية عابرة للحدود، تمثل 60% من التدفقات العالمية للمياه العذبة.

وأظهرت تجربة البوسنة والهرسك والجبل الأسود، فضلا عن تجارب المشاركين الآخرين في مشروع الوكالة، أن التعاون الإقليمي أساسي لقدرة المياه العابرة للحدود على الصمود في مناخ متغير واستدامتها.

وقالت السيدة نجاة مختار، نائبة المدير العام ورئيسة إدارة العلوم والتطبيقات النووية: "من شأن التعاون بشأن الموارد المائية المشتركة أن يحسِّن إدارة المياه. ويمكن كذلك أن يمهد الطريق للتعاون في قطاعات أخرى."

وتواصل البوسنة والهرسك والجبل الأسود عملهما المشترك بشأن مستودع المياه الجوفية الكارستية أوكو-بيلا غورا من خلال مشروع إقليمي جديد للتعاون التقني للوكالة من أجل تعزيز القدرات الوطنية للهيدرولوجيا النظيرية ودعم إدارة المياه استنادا إلى الأدلة.

وقالت السيدة سيبل أونلو، إحدى المسؤولات في برنامج التعاون التقني للوكالة: "الهدف هو ترجمة المعارف العلمية إلى سياسات عملية تعزز إدارة المياه، وهو أمر مهم بشكل خاص بالنسبة للموارد المائية المشتركة وفي ضوء تغير المناخ." وأضافت قائلة: "يؤدي تحسين إدارة المياه العابرة للحدود بدوره إلى تعزيز إدارة الموارد المائية."

# الحلول النووية والنظيرية لندرة المياه التركيز على أفريقيا وغرب آسيا

بقلم جويل متى

جمع معهد الكويت للأبحاث العلمية عيّنات من المياه الجوفية العذبة المستمدة من مستودع المياه الجوفية في شمال الكويت لتحليلها بالتقنيات النظيرية.

(الصورة من: معهد الكويت للأبحاث العلمية)

في شمال الكويت القاحل، يضع العلماء أنبوبا لأخذ عينات من عمق بئر جاف من أجل الوصول إلى بركة مياه جوفية ضحلة في قاع البئر. ويجري تحليل المياه، المختفية تحت الأرض منذ آلاف السنين، في إطار مشروع بحثي للوكالة بشأن موارد المياه العذبة الطبيعية المحدودة في البلد. ويستخدم الفريق التحليل النظيري لدراسة كيفية تأثير مستويات ثاني أكسيد الكربون في مياه الأمطار والمياه الجوفية ولفهم التغيرات في جودة المياه فهما أفضل.

وتمثل المياه الجوفية موردا ضئيلا في مناطق كثيرة من أفريقيا وغرب آسيا. ويؤدي تضاؤل هطول الأمطار وارتفاع درجات الحرارة وتزايد الطلب على المياه إلى زيادة الضغط على مستودعات المياه الجوفية في المناطق. وبدعم من الوكالة، تنشر البلدان الهيدرولوجيا النظيرية — وهي تقنية نووية تتعقَّب مصادر المياه وتحدد عمرها وحركتها — من أجل إدارة إمدادات المياه الجوفية إدارةً مستدامة.

قالت السيدة جودي ميلر، رئيسة قسم الهيدرولوجيا النظيرية في الوكالة، إنَّ الهيدرولوجيا النظيرية "تعطينا بصمة لجزيء الماء." وأضافت "يسمح لنا استخدام هذه البصمة بتقييم المدة التي مضت منذ هطول المياه في الأرض في شكل أمطار."

## استخدام التكنولوجيا النووية لتقييم تلوث المياه الجوفية

في إطار مشروع بحثي منسق حديث للوكالة، استخدمت الكويت، إلى جانب الجزائر والمغرب وتونس، نظائر غازات خاملة مثل الهليوم-4 والكريبتون-81 لتحديد عمر المياه الأحفورية العميقة — وهي مياه جوفية قديمة ظلت تحت الأرض لآلاف السنين مع تجددها بنسبة قليلة أو منعدمة — ولتقييم التلوث المحتمل من النشاط النفطي القريب. وساعد البحث في تحديد ما إذا كانت المياه الجوفية مأمونة لاستخدامها الدائم، وهي خطوة حاسمة في تخطيط المياه على المدى البعيد.

وقال السيد تشيدامبارام ساباراثينام، وهو عالم بحوث في معهد الكويت للأبحاث العلمية: "لقد توصلت الدراسات التي استخدمت الغازات الخاملة والكربون المشع، إلى أن عمر المياه الجوفية في الكويت يبلغ حوالي 000 36 عام." وأضاف: "تساعدنا هذه المعلومات في تحديد فترات التجدد المكثف وتدعم التخطيط الطويل الأجل لإدارة هذه المصادر غير المتجددة للمياه بشكل مستدام."

وفي شبكة مستودعات المياه الجوفية الواقعة في شمال غرب الصحراء الكبرى — التي تمتد لأكثر من مليون كيلومتر مربع وتتقاسمها تونس والجزائر وليبيا — كشف استخدام الغازات الخاملة مثل الكريبتون-81 أن الكثير من المياه الجوفية يزيد عمرها على 000 150 سنة. وتتخذ البلدان خطوات منسقة لحماية أحد أهم الموارد المائية المشتركة في المنطقة وضمان استخدام المياه بمسؤولية والحفاظ عليها من أجل الأجيال القادمة.

وفي الكويت، حيث تُنتج جميع مياه الشرب تقريبا من خلال تحلية المياه، تظل المياه الجوفية الطبيعية تمثل احتياطيا حيويا، خاصة أثناء حالات الطوارئ أو انقطاع الإمدادات. واستُخدمت الغازات الخاملة والنظائر المستقرة لاختبار تلوث المياه الجوفية بالغازات المتفلتة من حقول النفط في البلد. ومنذ عام 2000، دعمت الوكالة بناء القدرات في مجال الهيدرولوجيا النظيرية وإدارة الموارد المائية من خلال برنامجها للتعاون التقني، بما في ذلك عن طريق مساعدة معهد الكويت للأبحاث العلمية في إنشاء مختبر لإجراء تحليلات بشأن النظائر وإجراء مسوح للمياه الجوفية.

## إدارة موارد مائية محدودة

تدعم المياه الجوفية جزءا كبيرا من الزراعة في تونس. ويؤدي انخفاض هطول الأمطار وزيادة الطلب على المياه إلى استنفاد احتياطيات المياه الجوفية. وتستجيب تونس لذلك من خلال إدارة تجدد مستودعات المياه الجوفية — وهي عملية تخزين المياه السطحية الفائضة تحت الأرض لاستخدامها خلال فترات الجفاف. وتعمل الوكالة مع علماء تونسيين على استخدام النظائر لتتبع المدة التي تبقى فيها المياه المجددة تحت الأرض والمسافة التي تقطعها من موقع تجدد المياه.

وقال السيد كمال الزواري، أستاذ ورئيس مختبر في المدرسة الوطنية للهندسة في صفاقس بتونس: "تؤدي النظائر البيئية دورا حاسما في إدارة موارد المياه الجوفية في تونس." وأضاف: "هذه التقنيات النظيرية فعالة بوجه خاص في تقييم شبكات مستودعات المياه الجوفية المعقدة المتعددة الطبقات، ولا سيما في المناطق الشديدة الجفاف."

## بناء القدرات المحلية

يمثل إدراج المياه الجوفية في استراتيجيات إدارة المياه أمرا بالغ الأهمية في جيبوتي، وهو البلد الذي يعاني من قلة المياه السطحية والجفاف المتكرر. وفي عام 2023، افتتحت جيبوتي، بدعم من برنامج التعاون التقني للوكالة، أول مختبر وطني للهيدرولوجيا النظيرية. وقد اضطلع المرفق بتحديث تحليل عينات المياه، وتحسين قدرة البلد على حماية إمدادات المياه وإدارة حالات الجفاف. ويشكل نجاح المختبر نموذجا لجهود أخرى من أجل بناء القدرات في المنطقة.

## رصد جودة المياه

تساعد الهيدرولوجيا النظيرية البلدان في تقييم جودة مياهها الجوفية. ففي تونس والمغرب، تُستخدم التقنيات النظيرية لتعقُّب مصادر ومسارات التلوث بالنترات في المياه الجوفية، ولا سيما من الصرف الزراعي ومياه الصرف الصحي في المناطق الحضرية. وفي الأردن، تُستخدم النظائر لتحديد النشاط الإشعاعي الطبيعي في المياه الجوفية العميقة وللاسترشاد بها في اتخاذ القرارات بشأن سلامة مياه الشرب.

## سد فجوة حرجة

مع تزايد ندرة المياه في أفريقيا وغرب آسيا، تصبح الحاجة إلى إدارة المياه على أساس علمي أكثر إلحاحا. وبدعم من الوكالة، تقوم البلدان في جميع أنحاء المنطقة بإنشاء برامج تدريبية ومختبرات، وتراكم الأدوات والخبرات اللازمة لاتخاذ قرارات مستنيرة بشأن كيفية ووقت استخدام مياهها. وتشكل هذه الأنشطة جزءا من مشاريع التعاون التقني الإقليمي للوكالة من أجل دعم الاستخدام المستدام للمياه في المناطق القاحلة.

وقالت السيدة هوا ليو، نائبة المدير العام للوكالة ورئيسة إدارة التعاون التقني: "يساعد استخدام التقنيات النووية في إدارة الموارد المائية المجتمعات المحلية على العمل من أجل تحقيق موارد مائية أكثر استدامة، القطرة تلو الأخرى، وهو ما يمكن أن يؤدي دورا في تعزيز التنمية الاقتصادية."

**جمع عينات من مياه الأمطار في جيبوتي لتحليلها نظيرياً باستخدام معدات جديدة قدمتها الوكالة.**

(الصورة من: ي. فيستافنا/الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

# يوم في حياة أخصائي في الهيدرولوجيا النظيرية في الوكالة

بقلم فولفغانغ بيكو

ما نقوم به يدعم العديد من المجالات — الزراعة وتغير المناخ والصحة العامة وأكثر من ذلك. أنا فخور بأن أكون جزءا من هذه الجهود.

— ستيفن وانغاري، مختبر الهيدرولوجيا النظيرية التابع للوكالة

في صباحٍ ربيعيٍ مشمس، ينضم السيد ستيفن وانغاري إلى علماء شباب آخرين من مختبر الهيدرولوجيا النظيرية التابع للوكالة حاملين مضخات وقوارير وحاويات بلاستيكية وأنابيب إلى منطقة هادئة منعزلة على نهر الدانوب بالقرب من مقر الوكالة الرئيسي في فيينا. ويقومون، على الضفة العشبية، بتوصيل معدات، وغمر أنبوب في الماء وتشغيل مضخة. وتبدأ المياه في الدوران ضمن النظام الذي أعدَّ، والذي يراقبه العلماء عن كثب.

وتقول السيدة أستريد هارجونغ، وهي باحثة في المختبر "هذا اختبار لتحسين عملية أخذ عينات المياه." وضحكت مشيرة إلى لوازم الاختبار المتناثرة على العشب فقالت: "لا يبدو الأمر مبهرا جدا، أليس كذلك؟" واستدركت قائلة: "لكن اختبارات ميدانية كهذه تمنحنا فرصة اختبار المعدات وضبطها في ظل ظروف حقيقية بما يمكّن من أخذ العينات بأعلى كفاءة ممكنة."

## تتبع هجرة المياه السطحية باستخدام الكبريت-35

تعمل أستريد وفريقها على تطوير طريقة جديدة تستخدم الكبريت-35 لتعقب كيفية انتقال المياه السطحية — وأي ملوثات قد تحملها — إلى المياه الجوفية.

وأوضحت أستريد بالقول: "يتّسم الكبريت-35 بنصف عمر قصير يبلغ 87 يوما ويحدث بشكل طبيعي عند هطول الأمطار." وأضافت قائلة: "يساعدنا تتبعه على التقييم السريع لما إذا كانت المياه الجوفية معرضة للتلوث في موقع معين. وقد يكون ذلك مفيدا بشكل خاص، على سبيل المثال، في مخيمات اللاجئين التي تفتقر إلى مرافق الصرف الصحي المناسبة أو في المناطق المتضررة من الكوارث الطبيعية."

وساعد ستيفن في التطوير الأولي لتحليل الكبريت-35 أثناء تدريبه في المختبر. وبعد فترة قضاها يعمل في مختبر في بلده كينيا، عاد الآن للعمل في الوكالة كتقني في مختبر الهيدرولوجيا النظيرية، حيث تحول تركيز عمله من الكبريت-35 إلى التريتيوم.

## فهم دورة المياه

التريتيوم هو نظير للهيدروجين يبلغ نصف عمره 12,3 سنة، ويوفر معلومات عن الدورة الهيدرولوجية على مدى إطار زمني يبلغ حوالي 50 عاما. وتساعد هذه المعلومات الأخصائيين في الهيدرولوجيا والقائمين على إدارة المياه على فهم التغيرات الأطول أجلا في تجدد المياه الجوفية، ومدى جودة ارتباط مستودعات المياه الجوفية بنظم المياه السطحية، وما يعنيه ذلك بالنسبة لاستدامة المياه الجوفية.

ولطالما كان دعم الدول الأعضاء بتحليل التريتيوم إحدى الوظائف الأساسية لمختبر الهيدرولوجيا النظيرية لأكثر من 60 عاما.

وفي حين يواصل زملاء ستيفن عملهم على ضفة النهر، يقوم بتوديعهم سريعا ويتوجه إلى المختبر لمعالجة عينات المياه من أجل الشبكة العالمية لاستخدام النظائر في دراسة الأمطار.

ويبحث عن عينات مياه جديدة من الدول الأعضاء ويخلص إلى أنَّ العديد منها قد وصل. وسيقضي يومه في تطهيرها وإثرائها وقياسها.

## كيف يعمل تحليل التريتيوم

يضع ستيفن كل عينة في نظام لتنقية المياه. ويقوم بتوصيل الأنابيب التي ستوجه المياه عبر أعمدة صغيرة مملوءة براتنجات التبادل الأيوني — وهي مواد خاصة تعمل مثل المغناطيس على الأملاح والجسيمات المشحونة الأخرى، فتزيلها من الماء. وتستغرق العملية حوالي ساعة، ويستغل ستيفن الوقت لتحديث قاعدة بيانات العينات في المختبر.

وعند الانتهاء من تنقية المياه، تكون العينات جاهزة للخطوة التالية: الإثراء. ويقوم ستيفن بإدخال العيِّنات في نظام الإثراء بالإلكتروليت، وهي آلة مؤطرة فولاذية بطول مترين مبطنة بكابلات وشاشات رقمية وصفوف من الأنابيب. وتبدأ الكهرباء بالتدفق عبر النظام.

وعلى عكس الكبريت-35، الذي يطفو بحُرية في الماء، فإن التريتيوم هو جزء من جزيء الماء نفسه، لذلك لا يمكن أن يكون ترشيحه للقياس مهمة بسيطة. ويقسم التحليل الكهربائي جزيئات الماء تدريجيا إلى غازَي الهيدروجين والأكسجين، مما يقلل من كمية الماء وبالتالي يركز التريتيوم.

ويقوم ستيفن بفحص الآلات وصيانتها بانتظام ويشرف على عملية الإثراء، التي قد تستغرق ما يصل إلى أسبوعين حتى تكتمل. كما يتولى مهمة ضمان زيادة الكهرباء التي تمر عبر العينات تدريجيا حسب الحاجة.

وقال: "نحن نسعى دائما لتحسين عملية الإثراء." وأضاف: "تركيز التريتيوم منخفض جدا ويصعب قياسه. كما أنَّ الإثراء الفعال ضروري لاستخراج معلومات موثوقة من العينات."

وعلى الرغم من أن التريتيوم يتركز تركيزا عاليا بعد عملية الإثراء، فإنه لا يزال بالكاد يُكتشف في عينات المياه. وحتى أدنى تلوث ناجم عن الإشعاع الجوي يمكن أن يشوه قياسات العينات. وذلك هو السبب الذي يجعل ستيفن يأخذ العينات موضوع الإثراء إلى غرفة تقع على عمق عدة طوابق تحت الأرض ومبطنة بالخرسانة السميكة، مما يحميها من الإشعاع البيئي. وفي هذه المرحلة، يخلط بعناية كل عينة بمحلول كيميائي ويضعها في آلات تقيس توقيعها الإشعاعي خلال مدة 24 ساعة القادمة.

وبالعودة إلى الطابق العلوي، يقترب اليوم من نهايته. وتكون أستريد قد عادت من الميدان فتتبادل أطراف الحديث مع ستيفن بشأن أحداث يومهما. إنهما سعيدان بما أحرزاه من تقدم ثم يناقشان مهامهما الخاصة باليوم التالي.

ويقول ستيفن وهو يعلق معطف المختبر مستعدا للعودة إلى منزله: "عملنا هنا يربطنا بالعديد من مناطق العالم." وأضاف: "ما نقوم به يدعم العديد من المجالات — الزراعة وتغير المناخ والصحة العامة وأكثر من ذلك. أنا فخور بأن أكون جزءا من هذه الجهود."

(الصور من: أدريان باربر هيوسكار، الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

# شبكات الوكالة الدولية للطاقة الذرية تعزز البحوث في مجال المياه

لا تمثل المياه العذبة النظيفة التي يمكن الوصول إليها سوى 0,5% من موارد المياه في الأرض، وتتعرض هذه الإمدادات المحدودة لضغوط التلوث وتغير المناخ وتزايد طلبات سكان العالم المتزايدين. ومع ذلك، تفتقر العديد من البلدان إلى بيانات أساسية عن موارد المياه العذبة التي لديها، مما يعوق قدرتها على إدارتها.

ولأكثر من ستة عقود، ساعدت الوكالة البلدان في تعقب مواردها المائية وإدارتها من خلال جمع البيانات وبناء شبكات عالمية تحسن كيفية تبادل البيانات المائية واستخدامها. وتعزز هذه الشبكات التعاون والابتكار في مجال بحوث المياه وإدارة الموارد المائية.

بيانات شبكة GNIP وشبكة GNIR متاحة على بوابة WISER (نظام تحليل البيانات وتصويرها بيانيا واستعادتها إلكترونيا في مجال النظائر المائية).

يرجى مسح رمز الاستجابة السريعة (QR Code) للدخول إلى بوابة WISER

وتوفر **الشبكة العالمية لاستخدام النظائر في دراسة الأمطار (شبكة GNIP)**، التي أنشأتها الوكالة والمنظمة العالمية للأرصاد الجوية في عام 1960، بيانات تساعد البلدان في فهم وتعقب التحولات في أنماط هطول الأمطار وتحديد الظواهر المتعلقة بالأمطار — العواصف المطيرة والأعاصير وتساقط الثلوج — التي تؤدي دورا رئيسيا في تجدد المياه الجوفية. وجمّعت الشبكة العالمية لاستخدام النظائر في دراسة الأمطار التي بلغت الآن عامها الخامس والستين، أكثر من 150 000 سجل شهري من 1200 موقع في أكثر من 100 بلد. وقالت السيدة سيليست ساولو، الأمينة العامة للمنظمة العالمية للأرصاد الجوية: "نعمل من خلال شراكتنا مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية، على تعميق الأسس العلمية لفهم الدورة الهيدرولوجية، وتوسيع نطاق البيانات المفتوحة، وإطلاق العنان للابتكارات التي تحفز اتخاذ قرارات أفضل في عصر يتسم بتغير المناخ وتفاقم الإجهاد المائي. ولا يمكننا إدارة ما لا نقيسه. لذلك، فإن تبادل البيانات يكتسي أهمية بالغة، وذلك رهين بالثقة والتعاون."

**وتوفر الشبكة العالمية لاستخدام النظائر في دراسة الأنهار (شبكة GNIR)**، التي أطلقتها الوكالة في عام 2002، بيانات عن مياه الأنهار لتقييم تدفقات المياه العذبة الداخلة والخارجة، وتقييم التأثيرات البشرية على الأنهار، وإجراء قياس كمي للتفاعلات بين المياه الجوفية والمياه السطحية، وتحديد آثار تغيرات استخدام الأراضي في الأنهار والجداول. وتساعدنا هذه البيانات في فهم كيفية تصدي الأنهار لتغير المناخ وضمان قدرتها على الصمود في المستقبل.

وتعكف الوكالة أيضا على إنشاء **شبكة عالمية لاستخدام النظائر في دراسة البحيرات (شبكة GNIL)** لرصد كيفية استجابة البحيرات لتغير المناخ، ولا سيما فقدان المياه بسبب التبخر.

# الوكالة الدولية للطاقة الذرية بالأرقام

يعيش أكثر من ملياري شخص في بلدان تعاني من الإجهاد المائي. ومن بين 120 بلدا تتوافر لديها بيانات عن جودة المياه، هناك 71 بلدا فقط لديها معلومات عن المياه الجوفية. وبحلول عام 2030، يمكن أن تتعرض صحة وسبل عيش 4,8 مليارات شخص للخطر إذا لم يُحسَّن رصد جودة المياه.

تعمل **105** دول أعضاء مع الوكالة في مجال **الهيدرولوجيا النظيرية** لتحسين **إدارة الموارد المائية**
(منذ عام 2020)

تدعم الوكالة **91 مشروعاً بحثياً** في 54 بلداً **من خلال برنامج الوكالة البحثي المنسق**
(حتى تموز/يوليه 2025)

تلقَّى **485** عالماً في **118 بلداً** التدريب في **الهيدرولوجيا النظيرية**
(منذ عام 2020)

تستخدم **53** دولة عضوا **الهيدرولوجيا النظيرية** **لتقييم الموارد المائية العابرة للحدود**

تساهم **102** من الدول الأعضاء ببيانات في **الشبكة العالمية لاستخدام النظائر في هطول الأمطار**

وتعمل الوكالة على زيادة التعاون في مجال المياه من خلال الشبكة العالمية لمختبرات تحليل المياه (شبكة GloWaL). وتهدف الشبكة، التي أطلقت في عام 2023، إلى تزويد البلدان بالأدوات والخبرات اللازمة لقياس مواردها المائية ورصدها وإدارتها بفعالية.

وقال المدير العام للوكالة السيد رافائيل ماريانو غروسي: "تجسد شبكة GloWAL تفاني الوكالة من أجل تمكين البلدان، وتشجيع التعاون، وإنتاج البيانات لأغراض صنع السياسات، وتعزيز المساهمة الأساسية للمياه في السلام والازدهار."

وتخطط شبكة GloWAL، في سنواتها الخمس الأولى، لإنشاء 7 شبكات مختبرات إقليمية، وتجهيز 100 مختبر، وتدريب 1000 خبير في المياه، وإنشاء ما لا يقل عن نصف مليون نقطة بيانات سيتم إدخالها في قاعدة بيانات عالمية يمكن للعلماء وصانعي السياسات الاطلاع عليها في جميع أنحاء العالم.

يرجى مسح رمز الاستجابة السريعة (QR Code) للاطلاع على المزيد حول **شبكة GloWAL**

# الوكالة الدولية للطاقة الذرية والبنك الدولي يوحدان جهودهما من أجل تعزيز الأمن المائي في النيجر

**المدير العام للوكالة السيد رافائيل ماريانو غروسي ووزير الموارد المائية والصرف الصحي والبيئة في النيجر، السيد مايزاما عبد الله، يوقعان اتفاقا بدعم مالي من البنك الدولي لتحسين الأمن المائي في البلد.** (الصورة من: د. كاندانو لاريس/الوكالة)

وقعت الوكالة والنيجر اتفاقا، بدعم مالي من البنك الدولي، لتحسين الأمن المائي في البلد. وسيعزز هذا التعاون التاريخي إدارة الموارد المائية من خلال بناء مختبر وطني لجودة المياه وتحديث مختبرات إقليمية للمياه في البلد.

وقال المدير العام للوكالة السيد رافائيل ماريانو غروسي: "بما أن ندرة المياه تؤثر في أرواح الناس وسبل عيشهم، فإن تعزيز إدارة المياه في النيجر يتّسم بأهمية بالغة." وأضاف: "من خلال هذا الاتفاق، نزود البلد بالبنية الأساسية والأدوات والخبرات التي يحتاجها لتحسين إدارة هذا المورد الثمين."

وقال السيد غروسي: "يمكن للنيجر أن يعتمد على الوكالة في تعزيز قدراته في مجال إدارة المياه وبناء قدرة طويلة الأجل على الصمود على هذه الجبهة."

ووَقَّع الاتفاق في 13 آذار/مارس 2025 في نيامي المدير العام للوكالة ووزير الموارد المائية والصرف الصحي والبيئة في النيجر، السيد مايزاما عبد الله، بحضور السيد هان فريترز، المدير القُطري للبنك الدولي في النيجر.

ويواجه النيجر ندرة حادة في المياه بسبب مناخه الجاف والنمو السكاني السريع والبنية الأساسية المحدودة للمياه، فضلا عن المخاوف المتزايدة للبلد بشأن جودة المياه.

وقال الوزير عبد الله إن تحديث المختبرات الإقليمية للمياه في النيجر "يكتسي أهمية أكبر من أي وقت مضى". وأضاف: "إنَّ الأمر يتعلق بتسريع التدابير التي يلزم اتخاذها لتحذير السكان من مخاطر التلوث وحمايتهم من هذه التهديدات الكيميائية. ويسعدني أن أوقع هذا الاتفاق مع الوكالة، الذي سيُنشئ مختبرا مرجعيا ويحدِّث المختبرات القائمة."

ويؤدي الأمن المائي — بما يشمل توافر المياه وجودتها وإدارتها وحمايتها — دوراً أساسياً في التنمية البشرية والاستدامة البيئية والاقتصادية. وتساعد الوكالة البلدان في إدارة مواردها من المياه العذبة باستخدام الهيدرولوجيا النظيرية، وهي تقنية نووية توفر معلومات عن احتياطيات المياه السطحية والجوفية — بما في ذلك منشأ المياه وحركتها وجودتها — والتفاعلات فيما بينها. وتقدم الوكالة دعما حاسما للبلدان التي تعمل على تحديد عمر احتياطياتها من المياه الجوفية لضمان إمكانية إدارتها على نحو مستدام.

وسيساعد المختبر الوطني الجديد المعني بجودة المياه في النيجر، بمجرد بدء تشغيله، في تقييم توزيع موارده المائية وتجددها وجودتها لدعم التنمية الاقتصادية التي يحتاجها البلد لمواكبة تزايد سكانه. ويمثل المختبر جزءاً من مشروع

أكـبر لتطوير منصة متكاملة للموارد المائية مـن أجل تعزيز ما يتعلق بالمياه من تخطيط وسياسات واستثمارات.

وتستند الشراكة الجديدة إلى الالتزامات التي تـم التعهد بها خلال مؤتمر الأمم المتحدة المعني بالمياه لعام 2023 في نيويورك. وفي فعالية جانبية لإطلاق الشـبكة العالمية لمختبرات تحليل الميـاه، تعهدت الوكالة والنيجر بالعمل معا في إطار شبكة GlowAL، بدعم من البنك الدولي.

والهدف الرئيسي للاتفاق هو ضمان أن يعمل المختبر الوطني الجديد لجودة المياه في النيجر بكامل طاقته وأن يكون مجهزا على النحو المناسب ومزودا بتقنيين تحليليين مهرة. وستعمل الوكالة عن كثب مع النيجر لإنشاء المختبر مع التركيز بشدة على الاستدامة الطويلة الأمد.

— بقلم توماس بيروي

**من شأن التعاون الجديد أن يُعزز إدارة الموارد المائية من خلال بناء مختبر وطني لجودة المياه وتحديث المختبرات الإقليمية للمياه في النيجر.** (الصورة من: د. كاندانو لاريس/الوكالة)

# التحلية النووية: حل مستدام للأمن المائي في المنطقة العربية

(الصورة من: AdobeStock)

التحليــة النووية للمياه هي تقنية توفِّر بديلاً نظيفــاً للبلدان في المنطقة العربية وخارجها يُستعاض به عن تحلية المياه التقليدية المتعطشة للطاقة.

وتشــكل ندرة المياه العذبة تحديا مستمرا في المنطقة العربية، حيث تفرض الموارد المائية الطبيعية المحدودة والنمو السكاني السريع ضغطاً متزايداً على الإمدادات. وعلى مدى عقود، اعتمــدت بلدان المنطقة على التحلية التقليدية، التي تعتمد بشــكل كبير على الوقود الأحفوري. ومــع تزايد الطلب على الطاقة والمخاوف المتعلقة بتغير المناخ، تستكشــف العديد من البلدان الآن البديل الأنظف.

وباستخدام الطاقة النووية لتشغيل عملية تحليــة المياه، يمكن للبلدان الحد من انبعاثات غازات الدفيئة وفي الوقت نفسه إنتاج إمدادات ثابتة من المياه العذبة.

وبدعم من الوكالة، تقوم عدة بلدان عربية بتقييم جدوى التحلية النووية من خلال الدراسات التقنية وبرامج التدريب والتعاون الإقليمــي. ومع تزايد الاهتمام بهذه التكنولوجيا، أصبح يُنظر إليها بشــكل متزايد ليس فقط باعتبارهــا حلا عمليا، بل أيضا كجزء من استراتيجية أوسع لتعزيز الأمن المائي في ظل التحديات التنموية والبيئية المعقدة.

## كيف تدعم الوكالة التحلية النووية

تعمل الوكالة مع البلدان العربية منذ ما يقرب من 30 عاما لدعم مبادرات التحلية النووية. وتساعد الوكالة البلدان، من خلال دراسات الجدوى والبرامج التدريبية والبحوث، على استكشاف الكيفية التي يمكن بها للطاقة النووية أن تدعم إنتاج المياه العذبة. وتُمكِّن أدوات متخصصة مثل برنامج التقييم الاقتصادي لتحلية المياه صانعي القرارات من مقارنة التكاليف والكفاءة عبر مختلف التكنولوجيات.

وخلافا للتحلية التقليدية، تســتخدم التحلية النووية الحرارة والكهرباء المولدتين من المفاعــلات لفصل الملح عن مياه البحر، مما يقلل من انبعاثات الكربون ويوفر في الوقت ذاته مصدرا مستقرا وطويل الأجل من مصادر المياه.

### الأردن

تطوير تقنية تحلية المياه باستخدام طاقة المفاعلات النمطية الصغيرة

يتخذ الأردن، الذي تصنف 75% من أراضيه عــلى أنها صحراء قاحلة، خطوات مهمة نحو التحلية النووية. وتستكشف الحكومة استخدام المفاعلات النمطية الصغيرة لإمداد محطات تحلية المياه بالطاقة.

وقال السيد خالد الخصاونة، مفوض مفاعلات الطاقة النووية في هيئة الطاقة الذرية الأردنية: "تعتبر تحلية المياه المصدر الرئيسي للميـاه العذبة في الأردن لتلبية الطلب المتوقع عليهـا والحد من العجز بين العرض والطلب. وأضاف: "فهي تقدم للمستهلكين النهائيين أسـعارا تنافسية للمياه العذبة، مقارنة بمصادر الطاقة المستوردة."

## المملكة العربية السعودية

### البلد الرائد في مجال تحلية المياه يستكشف التحلية النووية

بدأت المملكة العربية السعودية، وهي بالفعل أكبر منتج للمياه المحلاة في العالم، استكشـاف استخدام الطاقة النووية لتحلية المياه في سبعينيات القرن العشرين. وينظر البلد في الوقت الراهن، في إطار اسـتراتيجيته للانتقال من اقتصـاد قائم على النفط إلى إنتاج طاقة متنوع، في إنشاء محطات للقوى النووية من أجل تحقيـق طموحاته التي تتمثل في تحقيق صافي انبعاثـات صفري وتلبية احتياجاته المائية على المدى الطويل.

وبحسـب مدينة الملك عبد الله للطاقة الذرية والمتجـدِّدة، " تخطط المملكة لأن يكون لها مزيج طاقة مستدام يشمل الطاقة الذرية لتلبية احتياجات المملكة من الطاقة لإنتاج الكهرباء والمياه المحلاة والطاقة الحرارية" بهدف خفض الاعتماد على الهيدروكربونات ودعم النمو الاقتصادي.

## مصر

### القوى النووية واستراتيجية المياه

تقـوم مصر أيضاً بدمج التكنولوجيا النووية في استراتيجيتها المتعلقة بالمياه. وفي ظل وجود أول محطة للقوى النووية في البلد، وهي محطة الضبعة، قيد الإنشاء، تجري مناقشات حـول الجمع بين الطاقة النووية وتحلية المياه في المناطق الساحلية. ووفقا للهيئة العامة للاستعلامات المصرية، "من شأن المرافق النووية أن توفـر الطاقة اللازمة لمحطات تحلية المياه من أجل إنتاج مياه الشرب."

## الكويت

### استكشاف التحلية النووية من أجل حلول مستدامة في مجال المياه

إن الكويت التي تعتمد اعتمادا كبيرا على تحلية مياه البحر لتلبية احتياجاتها من المياه العذبة، تتجه أكثر فأكثر إلى التكنولوجيات النووية بغية إيجاد حلول أكثر استدامة. وقال السيد نادر العوضي، المفوَّض التنفيذي للتعاون الدولي في معهد الكويت للأبحاث العلمية: "تواجه الكويت آثار تغيُّر المناخ، وتحمُّض المحيطات، والتلوث الناجم عن صناعة النفط والشحن، وأنشطة توليد الكهرباء وتحلية المياه." وتماشيا مع جهود الكويت لمواجهة هذه التحديات البيئية، أنشأ البلد مرفقا واسع النطاق لإجراء البحوث في مجال تحمض المحيطات بهدف تعزيز فهم تأثيرات تغيُّر ظروف المحيطات على النظم الإيكولوجية البحرية، التي ترتبط ارتباطا مباشرا بفعالية تكنولوجيات تحلية المياه.

## آفاق المستقبل

تتطلب التحلية النووية استثمارات وأطرا رقابية ومشـاركة للجهات المعنية. وتعمل الوكالة عـن كثب مع الحكومات المهتمة من أجل المضي قدمـا في تنفيذ هذه التكنولوجيا على نحو مأمون وكفء وفعال من حيث التكلفة.

وسيؤدي استمرار الاستثمارات وتبادل المعارف والشراكات الإقليمية بين البلدان العربية التي تستكشف التحلية النووية، دورا رئيسيا في نجاحها. وإذا اعتُمدت التحلية النووية على نطاق واسـع، فإنَّ من شأنها أن تعزز الأمن المائي في المنطقة لأجيال قادمة. وفي معرض تسـليط الضوء على هذه المشاركة المتنامية في هذا المجال، قال السـيد الخصاونة من هيئة الطاقة الذرية الأردنية: "إنَّ دعم الوكالة للبرنامج النووي الأردني، لا سيما مشروع المفاعلات النمطية الصغيرة، يحظى بتقدير كبير ويؤدي دوراً محوريـاً في عملنا على تعزيز قدراتنا والمضي قدما في مساعينا."

وقال السيد فرانشيسكو غاندا، رئيس الفريق التقني للتطبيقات النووية غير الكهربائية في الوكالة: "تقدم التطبيقات غير الكهربائية التـي تعمل بالطاقة النووية، مثل تحلية المياه، حلولا مسـتدامة لعدد من التطبيقات الكثيفة الاستخدام للمياه — بدءاً من الاحتياجات الاستهلاكية لملايين الأسر والتطبيقات الصناعية للمياه العذبة، ووصولا إلى الزراعة وتربية المواشي."

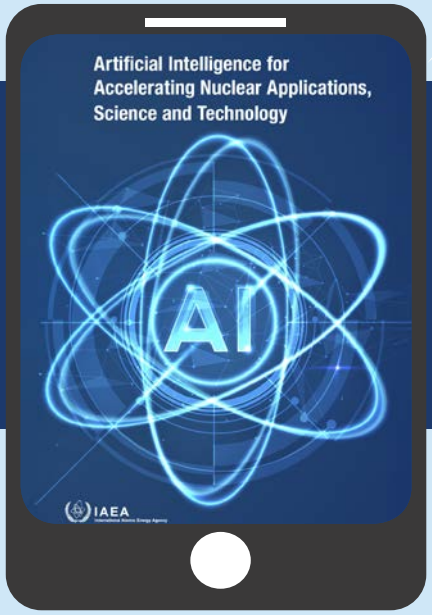
— بقلم جويل متى

## هل كنتم تعلمون

أنَّ العمل يجري على تحسين إدارة الموارد المائية من خلال تسخير قوة الذكاء الاصطناعي؟

كيف يسهم الذكاء الاصطناعي في تعزيز الاستخدامات السلمية للعلوم النووية في قطاع المياه.

يُرجى مسح الرمز المقروء آلياً للاطلاع على مزيد من المعلومات



## لتصفح جميع منشورات الوكالة

مجاناً على الموقع الإلكتروني

www.iaea.org/publications

لطلب كتاب، يُرجى مراسلتنا على العنوان التالي:

sales.publications@iaea.org

# منشورات الوكالة الدولية للطاقة الذرية

# شاركونا

## من أجل مستقبل أفضل

**ترحب الوكالة**

بالدول الأعضاء والدوائر الصناعية والمؤسسات المالية والجهات المعنية الأخرى للمشاركة في مبادراتنا الرائدة وللمساهمة بما لديها من الخبرات وأدوات النمذجة والمعارف الصناعية وأنشطة المناصرة والموارد المالية.

الصحة

IAEA DIAC

IAEA RAYS OF HOPE
CANCER CARE FOR ALL

المرأة في المجال النووي

IAEA Lise Meitner PROGRAMME

IAEA Marie Skłodowska-Curie FELLOWSHIP PROGRAMME

الطاقة

IAEA ATOMS 4 NET ZERO

IAEA NHSI NUCLEAR HARMONIZATION & STANDARDIZATION INITIATIVE

البيئة

IAEA NUTEC PLASTICS

الأغذية والزراعة

الفاو والوكالة ATOMS4FOOD
تنمية الأمن الغذائي

لمعرفة المزيد عن **المبادرات الرائدة** التي أطلقتها الوكالة

IAEA
تسخير الذرة من أجل السلام والتنمية

المحفل الدولي الرفيع المستوى بشأن

# مبادرة نيوتيك للمواد البلاستيكية

25–26 تشرين الثاني/نوفمبر 2025

مانيلا، الفلبين

حلٌّ نووي للتلوث البلاستيكي

25-02526 ISSN 0020-6067

باستضافة
جمهورية الفلبين

ندوة تُنظِّمها
الوكالة الدولية للطاقة الذرية

IAEA

#NUTECplastics