مخاطر أمن المياه – الجزء الثانى

لنأخذ الماء من السماء: الثورة الصامتة التى تعالج عطش إيران

أمير حسين خدائى – باحث

النهر الذى يمر فوق رؤوسنا

منذ عقود، تدور خلافات حول تقاسم مياه الأنهار والقنوات، فيما بيننا ومع الدول المجاورة. لكن طوال كل هذه السنوات، ظل نهر هائل ونقى ولا ينضب يمر بصمت فوق رؤوسنا: الهواء المحيط بنا. واستناداً إلى نتائج علمية منشورة فى مجلات علمية عالمية مرموقة، يُقدَّر حجم بخار الماء الموجود فى الغلاف الجوى للأرض بنحو ثلاثة عشر تريليون متر مكعب، وهو رقم يعادل ستة أضعاف إجمالى حجم المياه فى جميع أنهار العالم. واليوم، أتاحت لنا التكنولوجيا إمكانية استخراج مياه شرب آمنة ومستدامة من هذا المورد الإلهى. لم يعد هذا الأمر قصة من قصص الخيال العلمى، بل أصبح ثورة اقتصادية متاحة.

الفصل الأول: كيف نحصل على الماء من الهواء؟

تعنى تكنولوجيا استخراج المياه من الهواء استخلاص الرطوبة الكامنة فى الغلاف الجوى وتحويلها إلى مياه قابلة للاستخدام. وتُعرف هذه التكنولوجيا فى الأدبيات العلمية اليوم باعتبارها أحد المسارات الجادة لتعزيز القدرة على الصمود المائى، والأمن الغذائى، وتنمية المناطق التى تعانى من شح المياه. وتعمل أجهزة إنتاج المياه من الهواء بطريقة تشبه إلى حد كبير أجهزة إزالة الرطوبة المتطورة للغاية. يدخل الهواء الرطب إلى الجهاز، ويتم تبريده حتى يصل إلى نقطة الندى، ثم يتحول بخار الماء إلى قطرات سائلة. وفى طريقة أخرى، تُستخدم مواد ماصة للرطوبة مثل الأطر العضوية الفلزية لامتصاص بخار الماء، ثم يتم تحرير الماء من خلال التسخين، عادةً باستخدام الطاقة الشمسية.

وتُعد أرخص طريقة لاستخراج المياه من الهواء هى جمع الضباب فى المناطق الساحلية والجبلية. وفى هذه الطريقة، يتم تركيب شبكات خاصة لجمع قطرات الضباب الدقيقة.

الفصل الثانى: الفقاعات النانوية؛ القوة الخفية وراء هذه الثورة

الماء المنتج من الهواء يتمتع بدرجة عالية من النقاء. إلا أن الفقاعات النانوية تحول هذا الماء إلى محلول مستقر ونشط حيوياً لتوصيل الأكسجين. والفقاعات النانوية هى فقاعات يقل قطرها عن واحد من ألف من المليمتر، وتتمتع بخصائص مذهلة:

- مساحة سطح نوعية كبيرة جداً لنقل الأكسجين والمواد المغذية
- شحنة سطحية سالبة تجعلها قادرة على البقاء معلقة فى الماء لأشهر
- القدرة على إنتاج الجذور الحرة من أجل التعقيم الطبيعى للمياه

إن دمج المياه المستخرجة من الهواء مع الفقاعات النانوية يخلق معادلة جديدة: فالماء الذى يتم الحصول عليه من الهواء، من خلال حقن فقاعات الأكسجين النانوية، يتحول إلى ماء مستقر وغنى بالمغذيات وموصل للأكسجين، وهو ذو قيمة كبيرة للزراعة، ومصايد الأسماك، وتربية المواشى، وحتى الاستخدامات الطبية.

الفصل الثالث: الإمكانات الخاصة لإيران، ميزة لا ينبغى تجاهلها

تُظهر الأبحاث العلمية أن إيران تتمتع بميزة نسبية فى واحدة من أرخص طرق إنتاج المياه غير التقليدية فى العالم. واستناداً إلى دراسة منشورة فى مجلة ***Nature*** المرموقة:

تمتلك المناطق الجنوبية من البلاد (سواحل الخليج العربى وبحر عُمان) إمكانية استخراج ما يصل إلى خمسة وستين لتراً من المياه من الضباب يومياً لكل متر مربع.

كما تتمتع المناطق الشمالية والشرقية بإمكانية تتراوح بين خمسة وعشرين وخمسة وأربعين لتراً يومياً لكل متر مربع.

وتُقدَّر تكلفة استخراج المياه من الضباب فى إيران بنحو خمسة وعشرين سنتاً لكل متر مكعب.

ومن خلال نقل المعرفة الفنية وتوطين التكنولوجيا، يمكن خفض تكلفة استخراج المياه من الهواء فى إيران، البالغة ٢٥ سنتاً، بشكل كبير. وتوضح النماذج الناجحة حجم هذا الانخفاض: فقد تم تصنيع نموذج محلى لجهاز بتكلفة تعادل ثلث تكلفة النموذج الأجنبى، كما أدى استخدام المواد الماصة النانوية ذات البنية النانوية المنتجة

محلياً (MOF-801) إلى خفض تكلفة الإنتاج إلى أقل من ١٠٠ تومان (أقل من ٠.٠٠٢ دولار) لكل لتر. كذلك، أدى البحث فى الأغشية البوليمرية فى مختلف المناخات الإيرانية إلى خفض استهلاك الطاقة بنسبة تصل إلى ٢٩ بالمئة، بينما أتاحت أنظمة الامتصاص الشمسية، مع خفض استهلاك الطاقة بنسبة تصل إلى ٨٢ بالمئة، والأنظمة السلبية المستوحاة من الفضاء، إنتاج المياه بتكلفة تقل عن سنتين لكل لتر. وفى نهاية المطاف، يمكن أن يؤدى الإنتاج على نطاق واسع واستخدام مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية إلى خفض التكلفة النهائية إلى نطاق يتراوح بين ٢ و٥ سنتات لكل لتر، مما يجعل المياه المنتجة واحدة من أكثر مصادر المياه فعالية من حيث التكلفة فى البلاد.

وللمقارنة، تبلغ تكلفة تحلية مياه البحر نحو ستين سنتاً لكل متر مكعب. وهذا يعنى أن استخراج المياه من الضباب فى إيران، حتى من دون توطين التكنولوجيا، أرخص بنحو الثلثين من تحلية مياه البحر.

ومع توطين التكنولوجيا وخفض التكلفة إلى ٢–٥ سنتات، سيصبح استخراج المياه من الهواء أرخص بنحو ١٢ إلى ٣٠ مرة من تحلية المياه. وهذا يعنى أنه فى مشروع تبلغ سعته مليون متر مكعب، يمكن تحقيق وفورات سنوية تتراوح بين ٥٥٠ ألفاً و٥٨٠ ألف دولار. إضافة إلى ذلك، يتطلب استخراج المياه من الهواء استثمارات رأسمالية أولية أقل، ويستهلك طاقة أقل بكثير (عند استخدام الطاقة الشمسية المجانية)، ويمكن نشره فى المناطق البعيدة عن الساحل، فى حين تتطلب تحلية المياه منشآت باهظة التكلفة، واستهلاكاً مرتفعاً للطاقة، وإمكانية الوصول إلى مياه البحر. وهذا الاختلاف الكبير يجعل استخراج المياه من الهواء بديلاً استراتيجياً واقتصادياً لتوفير المياه فى المناطق التى تعانى من شح المياه والمناطق البعيدة عن السواحل.

تم تحديد جزر كيش وقشم ومنطقة تشابهار باعتبارها مواقع تجريبية ذات أولوية.

بالإضافة إلى ذلك، تتمتع إيران بتنوع مناخى مذهل: من السواحل الرطبة فى الجنوب والشمال إلى المناطق الجبلية فى ألبرز وزاغروس، ومن المناطق شبه الصحراوية فى وسط البلاد إلى صحارى كوير لوت ودشت كوير. ويعنى هذا التنوع أن تقنية واحدة لا تصلح لجميع أنحاء إيران، ولكن لكل منطقة تقنية مناسبة لها.

الفصل الرابع: الماء من الهواء فى الفصول والمناخات المختلفة — تكامل ذكى مع السدود الترابية والتخزين

فى فصل الربيع، عندما ترتفع رطوبة الهواء فى العديد من المناطق، تصل أجهزة إنتاج المياه من الهواء إلى أقصى كفاءتها. وفى هذا الفصل، يجب علينا تخزين المياه المنتجة، فى الخزانات، وخلف السدود الترابية الصغيرة، وفى طبقات المياه الجوفية. تخيلوا أننا فى قرية تقع عند سفح الجبال، نقوم بتخزين مياه الربيع فى حوض ترابى، ونحافظ عليها باستخدام الفقاعات النانوية للأشهر الجافة من السنة. فى محافظة غلستان، وبعد فيضانات عام ٢٠١٩، أدى إنشاء سدود ترابية صغيرة وإدارة مياه الجريان السطحى فى أعالى حوض

نهر غورغان رود إلى خفض شدة الفيضانات الموسمية بنسبة أربعين بالمئة. والآن تخيلوا صورة مماثلة: فى منطقة جبلية، وبالتزامن مع هطول الأمطار الربيعية، تصبح أجهزة إنتاج المياه من الهواء أكثر نشاطًا أيضًا، ويتم تخزين المياه الفائضة، سواء من الأمطار أو من الهواء، خلف السدود الترابية وفى خزانات التخزين.

فى فصل الصيف، عندما يكون الطقس حارًا ويرتفع استهلاك المياه، تحقق الأجهزة القائمة على التكثيف أفضل أداء لها فى المناطق الجنوبية الرطبة. وفى المناطق الصحراوية، تُستخدم التقنيات القائمة على الامتزاز والمدعومة بالطاقة الشمسية. وفى هذا الفصل، تكون الأولوية لإنتاج مياه الشرب، وريّ البيوت المحمية، وتوفير المياه للماشية، وتلبية الاحتياجات الطارئة. وفى أحد البيوت المحمية فى ضواحى كرمان، يقوم جهاز لإنتاج المياه من الهواء بسعة خمسمائة لتر يوميًا بتأمين احتياجات البيت المحمى من المياه، بينما تزيد الفقاعات النانوية نمو النباتات بنسبة تصل إلى ثلاثين بالمئة.

فى فصل الخريف، عندما تنخفض الرطوبة النسبية لكنها تظل ضمن مستوى مقبول، ينبغى التركيز على التخزين والرى التكميلى. وتُستخدم المياه المنتجة فى الخريف للزراعة الخريفية ولإعادة تأهيل الغطاء النباتى فى المناطق الجافة.

فى فصل الشتاء، عندما يكون الهواء باردًا، تستهلك الأجهزة القائمة على التكثيف طاقة أكبر. وفى هذا الفصل، تكون تقنيات الامتزاز وجمع الندى أكثر ملاءمة فى المناطق الشمالية والجبلية الرطبة. كما يمكن فى المناطق الباردة الاستفادة من الحرارة المهدرة من المبانى للمساعدة فى عملية إنتاج المياه.

فى المناطق الشمالية الخضراء من البلاد، يمكن أن تكون المياه المستخرجة من الهواء مكملة لمياه الأمطار، وأن تُستخدم لرى المساحات الخضراء والحدائق. وفى المناطق الجبلية، ينبغى إعطاء الأولوية لجمع الضباب والندى، وهى تقنية مفيدة جدًا للقرى النائية وصعبة الوصول. وفى المناطق شبه الصحراوية، مثل العديد من المناطق الوسطى فى إيران، تُعد الأجهزة القائمة على الامتزاز والمدعومة بالطاقة الشمسية الخيار الأفضل، ويمكنها تأمين المياه اللازمة للبيوت المحمية والنباتات الطبية ومزارع تربية الماشية. أما فى المناطق الصحراوية، فلا ينبغى أن ننخدع بالتكنولوجيا؛ بل يجب أولًا أن نحسب: هل تحلية المياه أفضل أم استخراج المياه من الهواء؟ هل الصهريج أفضل أم استخراج المياه من الهواء؟ هل نقل المياه أفضل أم استخراج المياه من الهواء؟ هل مياه الصرف الصحى المعالجة أفضل أم استخراج المياه من الهواء؟ إذا كان استخراج المياه من الهواء هو الخيار الأفضل، فلننفذه.

التكامل مع السدود الترابية والتخزين :تلعب السدود الترابية الصغيرة وأحواض التخزين دورًا محوريًا فى هذه المعادلة. فالمياه المنتجة من الهواء خلال الفصول الرطبة تُخزّن فى هذه السدود والأحواض، ومن خلال حقن الفقاعات النانوية، تحافظ على جودتها لأشهر. وفى فصل الجفاف، تُستخدم هذه المياه المخزنة للرى التكميلى، وتربية الماشية، وأغراض الشرب. وقد أظهرت التجربة الناجحة لمشروعات إدارة مستجمعات المياه فى محافظة كرمان أنه من خلال نشر مياه الفيضانات والتغذية الاصطناعية، ارتفع منسوب المياه الجوفية بما يصل إلى خمسة أمتار. والآن انظروا إلى الصورة الأكبر: الأمطار + المياه من الهواء + السدود الترابية + تغذية طبقات المياه الجوفية + الفقاعات النانوية. يمكن لهذا المزيج أن يزيد بشكل كبير من قدرة البلاد على الصمود المائى.

الفصل الخامس: الشمس والهواء — ثنائى سماوى لحل أزمة المياه

فى الأقسام السابقة، قلنا كيف يمكن إنتاج المياه من رطوبة الهواء، وكيف يمكن للفقاعات النانوية أن تحول هذه المياه إلى محلول مستقر موصل للأكسجين. ولكن يبقى سؤال أساسى: من أين تأتى الطاقة اللازمة لهذه العملية؟

الإجابة هى ألمع مصدر للطاقة متاح لنا: الشمس. إن دمج الطاقة الشمسية مع تقنية استخراج المياه من الهواء لا يخفض التكاليف بشكل كبير فحسب، بل يجعل هذه التقنية قابلة للاستخدام أيضًا فى أكثر مناطق البلاد نائية، حيث لا توجد شبكة كهرباء.

كيف تساعد الشمس فى إنتاج المياه من الهواء؟

الطريقة الأولى: التبريد بالطاقة الشمسية

تحتاج الأجهزة القائمة على التكثيف إلى الكهرباء لتبريد الهواء وتحويل البخار إلى ماء. وتوفر الألواح الشمسية هذه الكهرباء. وفى الأيام المشمسة، تنتج الألواح أقصى طاقة لها، ويقوم الجهاز بإنتاج المياه بأقصى قدرته. وتُخزّن المياه المنتجة فى خزانات لتظل متاحة خلال الليل والأيام الغائمة أيضًا. وتستخدم شركات مثل واترجن فى إسرائيل وزيرو ماس ووتر فى الولايات المتحدة هذه الطريقة منذ سنوات.

الطريقة الثانية: التسخين بالطاقة الشمسية لتحرير المياه من المواد المازّة

هذه الطريقة أكثر ذكاءً وملاءمة للمناطق الأكثر جفافًا. تقوم المواد المازّة للرطوبة (مثل الهيدروجيلات أو الأطر العضوية المعدنية) بامتصاص بخار الماء ليلًا، عندما يكون الهواء أكثر برودة وتكون الرطوبة النسبية أعلى. وعندما تشرق الشمس، تقوم حرارتها بتسخين هذه المواد وتحرير المياه الممتصة على شكل بخار. ثم يتحول هذا البخار، فى الجزء الأكثر برودة من الجهاز، إلى قطرات من الماء السائل.

أظهرت دراسة نُشرت عام ٢٠٢٤ فى مجلة *Nature Communications* أن جهازًا قائمًا على الهيدروجيل، باستخدام ضوء الشمس والرياح الطبيعية، تمكن من إنتاج ١٤.٩ لترًا من الماء لكل متر مربع يوميًا فى الظروف المختبرية، ومن ٣.٥ إلى ٨.٩ لتر فى الظروف الخارجية.

الطريقة الثالثة: الأنظمة الهجينة الشمسية-الكهربائية

فى المناطق ذات الرطوبة المنخفضة جدًا أو فى الأيام الغائمة، لا تكفى حرارة الشمس وحدها. وقد صمم الباحثون أنظمة هجينة تكون فيها الأولوية للطاقة الشمسية، ولكن يتم عند الضرورة استخدام تسخين كهربائى مساعد. وأظهرت التجارب أنه فى مناخ جاف تبلغ فيه الرطوبة نحو ثلاثين بالمئة خلال النهار، تمكن هذا النظام من إنتاج ١٠.٥٦ كيلوغرام من الماء يوميًا، مع خفض استهلاك الكهرباء خلال النهار بنسبة تصل إلى أربعين بالمئة مقارنة بالاستهلاك ليلًا. وهذا يعنى أن الشمس توفر مجانًا أكثر من خمسين بالمئة من الطاقة المطلوبة...

أحدث الإنجازات العلمية: التكامل الذكى بين الشمس والماء

أظهرت الأبحاث التى أُجريت فى عام ٢٠٢٦ تطورات مذهلة فى هذا المجال:

تخزين الطاقة داخل المادة المازّة نفسها :طوّر باحثون صينيون إسفنجة خشبية ماصّة للرطوبة، لا تقوم بامتصاص الرطوبة فحسب، بل تخزن أيضًا حرارة الشمس باستخدام مواد متغيرة الطور، بحيث تستطيع خلال الليل أو فى الأيام الغائمة تسخين المياه التى تم تحريرها ومواصلة عملية إنتاج المياه. وهذا يعنى أن الجهاز يستطيع العمل حتى عندما لا تكون الشمس موجودة!

إنتاج الماء والكهرباء فى الوقت نفسه :تجمع تقنية جديدة تم تقديمها فى مجلة *ScienceDirect* بين الألواح الشمسية وتقنية استخراج المياه من الهواء لإنتاج الماء والكهرباء فى الوقت نفسه. وفى هذا النظام، تُستخدم الحرارة المهدرة من الألواح الشمسية لتحرير المياه من المواد المازّة، بينما توفر الألواح نفسها الكهرباء اللازمة لتشغيل الجهاز. وقد أظهرت إحدى الدراسات أنه من خلال اختيار المادة المازّة المناسبة وفقًا لمناخ كل منطقة، يمكن زيادة كفاءة إنتاج المياه بنسبة تصل إلى ١٨.٦ بالمئة.

الهيدروجيلات من الجيل الجديد :طوّر الباحثون نوعًا من الهيدروجيل يستطيع، تحت إشعاع شمسى يعادل شدة ضوء الشمس فى يوم مشمس، تحرير ٨٩.٥ بالمئة من المياه التى امتصها خلال سبعين دقيقة، كما يمتلك القدرة على امتصاص كمية من الماء تعادل ٤.١ أضعاف وزنه. وهذا يعنى أنه يمكن إنتاج أكثر من أربعة لترات من الماء يوميًا باستخدام كيلوغرام واحد من هذه المادة.

الميزة الخاصة لإيران: وفرة أشعة الشمس، فرصة لا مثيل لها

تمتلك إيران، بمتوسط يزيد على ثلاثمائة يوم مشمس سنويًا، واحدة من أعلى إمكانات الطاقة الشمسية فى العالم. وهذا يعنى أن أجهزة استخراج المياه من الهواء التى تعمل بالطاقة الشمسية يمكن أن تكون أكثر كفاءة فى إيران مقارنة بالعديد من البلدان الأخرى.

وقد قامت دراسة أجراها عام ٢٠٢٥ باحثون فى معهد فراونهوفر الألمانى بمحاكاة أداء نظام هجين لاستخراج المياه من الهواء وتحلية المياه بالطاقة الشمسية، بشكل خاص فى مختلف المناخات الإيرانية. وأظهرت النتائج أن هذا النظام يتمتع بأداء جيد جدًا فى مدن إيرانية مختلفة. فعلى سبيل المثال، ارتفع إنتاج المياه بنسبة سبعين بالمئة فى بوشهر، وبنسبة ٥٧.٦ بالمئة فى رامسر. وفى أفضل الظروف، تمكن هذا النظام من إنتاج أكثر من اثنى عشر ألف كيلوغرام (اثنى عشر مترًا مكعبًا) من المياه سنويًا.

كما يعمل باحثون إيرانيون بالتعاون مع مراكز دولية على أنظمة هجينة لاستخراج المياه من الهواء وتحلية المياه بالطاقة الشمسية، والتى يمكن أن تكون فعالة جدًا فى المناطق الجنوبية من البلاد، حيث تتوافر الرطوبة العالية وأشعة الشمس الوفيرة فى آن واحد.

التكامل مع الفقاعات النانوية: المثلث الذهبى للشمس والماء والهواء

والآن انظروا إلى الصورة الكاملة:

الخطوة الأولى :توفر الألواح الشمسية طاقة مجانية ونظيفة.

الخطوة الثانية :يستخدم جهاز استخراج المياه من الهواء هذه الطاقة لتحويل رطوبة الهواء إلى ماء سائل. وفى المناطق الجافة، تُستخدم مواد مازّة متقدمة تعمل حرارة الشمس على تحرير المياه منها.

الخطوة الثالثة :يتحول هذا الماء النقى، من خلال حقن فقاعات الأكسجين النانوية، إلى ماء فائق الأكسجة ونشط حيويًا.

الخطوة الرابعة :تُخزّن المياه فائقة الشحن فى الخزانات، وتُستخدم لرى البيوت المحمية، وتغذية الماشية والدواجن، وتربية الأسماك، أو حتى لأغراض الشرب.

النتيجة النهائية :نظام مستقل تمامًا عن شبكات المياه والكهرباء، قادر على إنتاج مياه آمنة وعالية الجودة فى قلب الصحراء، أو فى منطقة جبلية نائية، أو فوق سطح مبنى داخل مدينة.

لماذا يُعد هذا التكامل تحوليًا؟

خفض التكاليف :الطاقة الشمسية مجانية. ولذلك، بعد الاستثمار الأولى، تنخفض تكلفة إنتاج المياه بشكل كبير.

الاستقلال عن الشبكات :يمكن استخدام هذه الأنظمة فى المناطق التى لا توجد فيها شبكة كهرباء أو تكون الشبكة فيها غير موثوقة.

الاستدامة البيئية :لا يتم استهلاك أى وقود أحفورى ولا يتم إنتاج أى ملوثات.

سهولة النقل والتركيب :الأنظمة الشمسية لاستخراج المياه من الهواء ذات طبيعة معيارية ويمكن تركيبها فى أى مكان.

الإنتاج فى موقع الاستهلاك :يتم إنتاج المياه فى المكان نفسه الذى تُستهلك فيه، فتصل تكاليف النقل وفواقد الشبكة إلى الصفر.

النتيجة الاستراتيجية: الشمس والهواء والماء — ثلاث هبات سماوية

إن الجمع بين الطاقة الشمسية وتقنية استخراج المياه من الهواء والفقاعات النانوية يصنع مثلثًا ذهبيًا يمكن أن يساعد إيران على تجاوز أزمة المياه. الشمس تمنح الطاقة، والهواء يمنح الماء، والفقاعات النانوية تمنح الجودة. ويمكن تطبيق هذا المثلث فى صحراء لوت وعلى سواحل الخليج العربى، وفى جبال زاغروس وعلى أسطح المنازل فى المدن.

وتكمن القيمة الحقيقية لهذا التكامل فى الاستقلال الذى يمنحه للبلاد ولكل وحدة سكنية وصناعية وخدمية: الاستقلال عن شبكات المياه، والاستقلال عن شبكات الكهرباء، والاستقلال عن استيراد التكنولوجيا. وهذا هو المسار الذى يمكن أن يحول إيران من دولة مستهلكة للتكنولوجيا إلى دولة منتجة ومصدرة لها.

الفصل السادس: التطبيقات الاستراتيجية — من المنازل والقرى إلى الزراعة والصناعة

فى مجال الزراعة، تُحدث هذه التكنولوجيا تحولًا هائلًا. وفى الزراعة البعلية، تكون المياه المستخرجة من الهواء مفيدة جدًا لزراعة الشتلات، وإنشاء النباتات فى مراحلها الأولى، وتغذيتها بشكل طارئ خلال فترات الجفاف. وفى البيوت المحمية، تكون المياه المنتجة خالية من الكائنات الحية الدقيقة والأملاح الضارة، ومع استخدام الفقاعات النانوية ينخفض استهلاك المياه بنسبة تصل إلى أربعين بالمئة. وفى الزراعة المائية (الزراعة من دون تربة)، تلغى المياه المستخرجة من الهواء الحاجة إلى مياه ذات جودة عالية جداً، بينما

تزيد الفقاعات النانوية النمو بنسبة تتراوح بين عشرين وأربعين بالمئة من خلال زيادة الأكسجين المذاب حول الجذور. وتتمثل أعلى جدوى اقتصادية فى الزراعة بالنسبة إلى البيوت المحمية والمشاتل والخضروات والمحاصيل البستانية وأنظمة الزراعة المائية.

وفى تربية الماشية والدواجن، فإن توفير مياه صحية وغنية بالأكسجين للماشية والدواجن، مع خفض الأمراض بشكل كبير، يؤدى إلى زيادة جودة وكمية إنتاج الحليب واللحوم. كما أن استخدام المياه المحتوية على الفقاعات النانوية فى أحواض شرب الماشية يحسن صحة الجهاز الهضمى للحيوانات.

وفى مجال الثروة السمكية وتربية الأسماك، يُعد هذا من أفضل تطبيقات الفقاعات النانوية. إذ تستطيع أنظمة الفقاعات النانوية، بفضل كفاءتها العالية جدًا فى نقل الأكسجين، زيادة الأكسجين المذاب بنسبة تصل إلى واحد وسبعين بالمئة مقارنة بالطرق التقليدية. ويتيح الجمع بين المياه المستخرجة من الهواء والفقاعات النانوية فى الأنظمة المغلقة إمكانية تربية الأسماك بكثافة عالية فى أى مكان من البلاد، حتى فى قلب الصحراء.

وفى الصناعات الخفيفة مثل الورش وقطاعات التعبئة والتغليف والصناعات الغذائية والنسيجية والدوائية، يمكن للمياه المستخرجة من الهواء توفير المياه اللازمة للعمليات الإنتاجية. أما فى الصناعات الثقيلة مثل محطات توليد الكهرباء والمناجم والمصافى وصناعة الصلب، فإن أفضل تطبيق يكون فى الأماكن التى تكون فيها المياه عند موقع الاستهلاك مكلفة أو غير موثوقة أو محفوفة بالمخاطر.

وفى المنازل السكنية، تستطيع الأجهزة المنزلية إنتاج ما بين عشرين وخمسين لترًا من مياه الشرب عالية الجودة يوميًا، لتحل محل المياه المعدنية المعبأة مرتفعة التكلفة. وفى الفلل والمبانى البعيدة عن شبكات إمداد المياه، يمكن لهذه التكنولوجيا أن تلبى احتياجات المياه بالكامل.

إحياء المراعى ومكافحة التصحر :من خلال نشر أجهزة استخراج المياه من الهواء فى المناطق الحرجة ورى الشتلات بالمياه المحتوية على الفقاعات النانوية، يمكن إنشاء أحزمة خضراء، ومنع تآكل التربة، وتقليل حاجة البلاد إلى استيراد مدخلات الأعلاف الحيوانية من خلال إعادة تأهيل المراعى.

الفصل السابع: عودة العمران إلى القرى — الماء والعمل والأمل

تخيلوا كيف يمكن لقرية نائية تعانى منذ سنوات من الجفاف وهجرة الشباب أن تتحول بفضل هذه التكنولوجيا:

أولًا، يتم تركيب جهاز لإنتاج المياه من الهواء فى وسط القرية، ينتج ما بين مئتين وخمسمائة لتر من المياه النظيفة يوميًا.

ثانيًا، يتم إثراء هذه المياه بالفقاعات النانوية واستخدامها لرى بيت محمى صغير وتزويد وحدة لتربية الأسماك بالمياه.

ثالثًا، ينتج البيت المحمى منتجات ذات قيمة مثل النباتات الطبية أو الخضروات خارج موسمها، بينما تقوم وحدة تربية الأسماك بإنتاج أسماك عالية الجودة أو أسماك زينة.

رابعًا، يتم تغليف هذه المنتجات داخل القرية نفسها وإرسالها إلى المدن الكبرى من خلال البيع عبر الإنترنت.

خامسًا، يعود شباب القرية الذين ذهبوا إلى المدن للعمل، بعد أن يشاهدوا هذا التحول، إلى القرية ويؤسسون أعمالًا تجارية جديدة.

سادسًا، تتحول القرية من نقطة مستهلكة للمياه إلى نقطة لإنتاج المياه والثروة.

سابعًا، ينتقل النموذج الناجح لهذه القرية إلى القرى المجاورة، وتتشكّل شبكة من القرى المنتجة للمياه والغذاء.

الفصل الثامن: الدفاع المدنى غير العسكرى — المياه، خط الدفاع الأول عن البلاد

فى الظروف الحرجة مثل الزلازل والفيضانات والحروب والجفاف الشديد، يعد الوصول إلى المياه الآمنة أهم احتياج حيوى. وتُعد تقنية استخراج المياه من الهواء أداة استراتيجية للدفاع المدنى غير العسكرى:

فى وقت الزلزال، عندما تتعرض شبكات إمداد المياه للتدمير، تستطيع وحدات متنقلة لاستخراج المياه من الهواء توفير مياه شرب آمنة للمناطق المتضررة وقوات الإغاثة خلال بضع ساعات. ولا تحتاج هذه الوحدات إلى بنية تحتية، وتعمل بالطاقة الشمسية أو بواسطة مولدات صغيرة.

وفى أوقات الحرب والحصار، عندما يستطيع العدو استهداف مصادر المياه السطحية والجوفية، تضمن أنظمة استخراج المياه من الهواء فى الملاجئ والقواعد العسكرية ومراكز القيادة الأمن المائى للقوات المسلحة والسكان. وفى المناطق الحدودية وصعبة الوصول، تقلل هذه الأنظمة بشكل كبير الاعتماد على صهاريج نقل المياه، التى تمثل هى نفسها أهدافًا معرضة للخطر.

وفى فترات الجفاف الطويلة، عندما تنخفض مستويات المياه الجوفية بشكل حاد وتجف الأنهار، يمكن لاستخراج المياه من الهواء أن يعمل كمصدر تكميلى، مما يقلل الضغط على الموارد الطبيعية ويزيد من قدرة البلاد على الصمود.

وفى نقاط الحدود والمناطق صعبة الوصول، حيث يكون نقل المياه بواسطة الصهاريج مكلفًا ومحفوفًا بالمخاطر للغاية، تستطيع أجهزة استخراج المياه من الهواء تلبية الاحتياجات المائية للقوات المتمركزة بصورة مستدامة.

إن دمج الفقاعات النانوية فى منظومة الدفاع المدنى غير العسكرى يحول المياه المنتجة إلى مياه معقمة ومستقرة، يمكن تخزينها فى الخزانات لأشهر مع الحفاظ على جودتها.

الفصل التاسع: هندسة القواعد من أجل الانتشار الواسع — من القانون إلى التطبيق

لكى تنتشر هذه التكنولوجيا على نطاق واسع فى البلاد، نحتاج إلى حزمة سياسات ذكية تتكون من الطبقات التالية:

الطبقة الأولى: المعايير الفنية والصحية

وضع معيار وطنى لجودة المياه المنتجة من الهواء، واستهلاك الطاقة، وسلامة الأجهزة. وينبغى للمنظمة الوطنية للمواصفات ووزارة الصحة وضع معايير منفصلة للاستخدامات المتعلقة بالشرب والزراعة والصناعة.

الطبقة الثانية: الإلزام القانونى بالتركيب فى المبانى

وكما أن تركيب أنظمة إنذار الحريق وسلالم الطوارئ أصبح اليوم إلزاميًا فى المبانى، ينبغى اعتبار تركيب أنظمة استخراج المياه من الهواء أيضًا متطلبًا قانونيًا فى المبانى الجديدة، ولا سيما المبانى الحكومية والمستشفيات والمدارس والفنادق والمجمعات السكنية

الكبيرة. ويمكن لأعضاء مجلس الشورى الإسلامى إنشاء هذا الالتزام من خلال إقرار مادة فى قانون نظام الهندسة. كما يمكن جعل إصدار شهادة إتمام البناء للمبانى الجديدة مشروطًا بتركيب هذه الأنظمة.

الطبقة الثالثة: التسهيل القانونى والتنظيمى

ينبغى للحكومة، بالتعاون مع مجلس الشورى الإسلامى، إقرار قانون لدعم تطوير التقنيات الجديدة المرتبطة بالمياه. وينبغى أن يتضمن هذا القانون إعفاءات ضريبية للمنتجين المحليين ومستوردِى القطع، وتسهيل إصدار التراخيص، وتعرفة تفضيلية للمعدات المنتجة محليًا. كما ينبغى لمنظمة التخطيط والميزانية تخصيص بند مستقل فى الميزانية لدعم المشاريع التجريبية.

الطبقة الرابعة: دعم المؤسسات العسكرية والأمنية والدفاع المدنى غير العسكرى

ينبغى لوزارة الدفاع، وهيئة الأركان العامة للقوات المسلحة، ومنظمة إدارة الأزمات، والهلال الأحمر، ووزارة الصحة، ووزارة الطاقة، ومنظمة الدفاع المدنى غير العسكرى، المشاركة فى وضع معايير الأنظمة المحمولة والمتنقلة، وتخصيص ميزانيات لنشر هذه الأنظمة فى القواعد العسكرية ونقاط الحدود والملاجئ العامة.

الطبقة الخامسة: دعم وزارة الصحة ومنظمة إدارة الأزمات

ينبغى لوزارة الصحة وضع معايير جودة مياه الشرب المنتجة من الهواء والإشراف عليها. كما ينبغى لمنظمة إدارة الأزمات التخطيط للتخزين الاستراتيجى لهذه الأنظمة فى مستودعات الإغاثة فى جميع أنحاء البلاد، بحيث تكون جاهزة للاستخدام الفورى عند وقوع الأزمات. ويمكن للهلال الأحمر أيضًا الاستفادة من هذه التكنولوجيا فى مساعداته الإنسانية.

الطبقة السادسة: دعم الإنتاج المحلى والتصدير

ينبغى لوزارة الصناعة والمناجم والتجارة دعم المنتجين المحليين لمعدات استخراج المياه من الهواء، والفقاعات النانوية، والألواح الشمسية، وخزانات التخزين، من خلال تقديم تسهيلات مصرفية منخفضة الفائدة وإعفاءات ضريبية. كما ينبغى إنشاء مدن صناعية متخصصة ودعم الصادرات، لتهيئة الظروف لتحويل إيران إلى مركز إقليمى لتصدير تكنولوجيا استخراج المياه من الهواء. ويمكن لتصدير الخدمات الهندسية والاستشارات التنفيذية والمعدات إلى الدول التى تعانى من أزمات المياه فى الشرق الأوسط وآسيا الوسطى وشمال أفريقيا أن يوفر مصدرًا مهمًا للإيرادات بالعملات الأجنبية للبلاد.

الطبقة السابعة: منظومة تعميم الاقتصاد القائم على المعرفة

من خلال إنشاء «مؤسسة تعاون المياه والتقنيات الحديثة التابعة للجامعة»، وإدارتها بصورة متخصصة من قبل الجامعات التى تضم تخصصات ذات صلة، يمكن تصميم نموذج فعال لتصنيع تقنية استخراج المياه من الهواء والفقاعات النانوية على المستوى الصناعى. ومن خلال إنشاء الائتمان والحصول على التسهيلات المصرفية وموارد صناديق التنمية الوطنية، يمكن لهذه المؤسسة خفض المخاطر المالية للخطوات الأولى، ومن خلال تسهيل المسار التنفيذى والتمويلى للمشاريع، تهيئة الظروف لربط النخب الأكاديمية والشركات القائمة على المعرفة والصناعات.

وفى هذا الهيكل، يستطيع الأساتذة والموظفون والطلاب والخريجون والسكان المحليون فى كل منطقة الانضمام إلى المؤسسة من خلال تخصيص أسهم تشاركية، ومع جذب رؤوس الأموال الشعبية الصغيرة، تحويل الاقتصاد القائم على المعرفة من نموذج مركزى

إلى هيكل خلوى تشاركى قائم على الناس. ومن خلال إنشاء مسرّعة أعمال متخصصة ومركز ابتكار مشترك، تستطيع هذه المؤسسة تهيئة الظروف للهجرة العكسية للنخب، وتحقيق التكامل بين الشركات القائمة على المعرفة فى مجالات تصميم وتصنيع وتركيب وتشغيل أنظمة المياه المستخرجة من الهواء. ومن خلال إسناد المشاريع التشغيلية وفقًا لتخصص كل مجموعة، يمكن تسريع دورة البحث وصولًا إلى الإنتاج.

كما يمكن، من خلال الاستفادة من إمكانات رسائل وأطروحات الدراسات الأكاديمية ومشاريع التدريب العملى، إعداد كوادر بشرية متخصصة داخل الجامعات، ومن خلال تخصيص أسهم للطلاب والخريجين، ضمان بقائهم فى مناطقهم الأصلية. ولا يقتصر الدور المحورى للمؤسسة فى إنشاء الائتمان والحصول على التسهيلات وتسهيل المسار القانونى للمشاريع على خفض مخاطر الاستثمار، بل يهيئ أيضًا الظروف لجذب الاستثمارات الصغيرة والكبيرة، ويشجع الصناعات الكبرى كثيفة استهلاك المياه على المشاركة فى هذه المنظومة.

ومن خلال إنشاء سوق محلية للمنتجات القائمة على المعرفة، وتقليل الاعتماد على الواردات، وخلق فرص عمل مستدامة، وتهيئة الظروف لتصدير التكنولوجيا والخدمات الهندسية إلى الدول المجاورة، يمكن لهذا النموذج أن يحول إيران إلى مركز إقليمى لتكنولوجيا استخراج المياه من الهواء.

الفصل العاشر: التبرير الاقتصادى — لماذا تكون المياه المستخرجة من الهواء أرخص من كثير من الطرق الأخرى؟

استناداً إلى البيانات العلمية المنشورة، تبلغ تكلفة استخراج المياه من الضباب فى إيران نحو خمسة وعشرين سنتًا لكل متر مكعب، وهى تكلفة ستنخفض، من خلال توطين التكنولوجيا واستخدام الطاقة الشمسية، إلى ما بين ٢ و٥ سنتات. وللمقارنة:

- **تحلية مياه البحر :**نحو ستين سنتًا لكل متر مكعب.
- **نقل المياه بواسطة الصهاريج لمسافات طويلة :**عدة دولارات لكل متر مكعب.
- **حفر الآبار العميقة فى المناطق الصحراوية :**تكلفة أولية مرتفعة وانخفاض تدريجى فى غزارة المياه.
- **معالجة مياه الصرف الصحى :**بين ثلاثين وخمسين سنتًا لكل متر مكعب (بحسب الحجم).

وهذا يعنى أن استخراج المياه من الهواء فى المناطق المناسبة فى إيران لا يتجاوز، من حيث التكلفة، ما يقارب ثلثى تكلفة تحلية مياه البحر، وهو أرخص بكثير من نقل المياه بواسطة الصهاريج.

لكن القيمة الحقيقية لهذه التكنولوجيا لا تكمن فقط فى تكلفة إنتاج المياه. فقيمتها الأساسية تكمن فى إنتاج المياه فى موقع الاستهلاك وإلغاء تكاليف النقل والتوزيع. وعندما يتم إنتاج المياه فى المكان نفسه الذى تُستهلك فيه، تصبح تكاليف مدّ الأنابيب، والضخ، وصيانة الشبكة، والفواقد أثناء النقل — التى تصل أحيانًا فى إيران إلى ثلاثين بالمئة — صفراً.

إن دمجها مع الفقاعات النانوية يرفع قيمة المياه المنتجة عدة أضعاف. فالمياه المُثرَاة بالفقاعات النانوية يمكنها أن تخفض استهلاك المياه فى الزراعة بنسبة تصل إلى ثلاثين بالمئة، وأن تزيد نمو الأسماك فى الاسترزاع السمكى بنسبة تصل إلى عشرين بالمئة، وأن تحسن جودة المنتجات النهائية فى الصناعات الخفيفة. وهذا يعنى أن كل لتر من المياه يُستخرج من الهواء ويُدمج مع الفقاعات النانوية يولّد قيمة اقتصادية أكبر بكثير من لتر واحد من المياه العادية.

الفصل الحادى عشر: النتيجة الاستراتيجية — من أزمة المياه إلى الاقتدار المائى

إن تكنولوجيا استخراج المياه من الهواء ودمجها مع الفقاعات النانوية ليست مجرد حل تقنى، بل هى مانيفستو للتحول الاقتصادى والاجتماعى. ويمكن لهذه التكنولوجيا أن:

- تزيد الناتج المحلى الإجمالى من خلال إنشاء صناعات وفرص عمل جديدة.
- تخفض الواردات وتزيد الصادرات من خلال إنتاج المنتجات الزراعية الاستراتيجية.
- تحول الاقتصاد من نموذج حكومى مركزى إلى اقتصاد خلوى وموزع وقائم على الناس.
- تخزن المياه فى الفصول والمناطق الرطبة لاستخدامها فى الفصول الجافة، وبذلك تحقق أمنًا مائيًا مستدامًا.
- تجعل الهجرة العكسية إلى القرى ممكنة، وتعيد إعمار المناطق الريفية.
- تخفف الضغط على المؤسسات الداعمة من خلال إيجاد فرص العمل والدخل.

إن القيمة الحقيقية للمياه المستخرجة من الهواء لا تكمن فى كمية المياه التى ينتجها الجهاز، بل فى كمية المياه التى يمكن، بفضلها، الحفاظ عليها من خلال تجنب الاستنزاف غير المستدام للأنهار، والمياه الجوفية، والموارد الطبيعية.

وهنا تحديداً يمكن للمياه المستخرجة من الهواء أن تنتقل من كونها تكنولوجيا جذابة إلى أداة حقيقية للأمن المائى، والأمن الغذائى، والأمن الاقتصادى، والقدرة على الصمود فى إيران.

شعار هذا المانيفستو للثورة الصامتة:

من المياه الموجودة فى الهواء إلى اقتصاد المياه؛ ليكن لكل منطقة مصدرها المائى الخاص.

الارتباط بالمقترحات الاستراتيجية السابقة

هذه المذكرة تمثل حلقة فى سلسلة الحلول التى قُدمت فى المذكرات السابقة حول إدارة مخاطر الأمن المائى ودور إدارة أحواض الأنهار فى تعزيز الأمن المائى. وقد تم فى تلك المذكرات التأكيد على تجريف السدود، وإحياء القنوات المائية التقليدية (القنوات/القنوات الجوفية)، وإدارة المياه الجوفية، ونشر مياه السيول، والمشاركة الشعبية. والآن يُضاف استخراج المياه من الهواء بوصفه مصدراً تكميليًا جديداً إلى هذه المجموعة.

إن الصورة الكاملة لإدارة المياه فى إيران هى مزيج من هذه الحلول:

المياه الطبيعية)الأمطار، والأنهار، والمياه الجوفية + **(المياه غير التقليدية**)استخراج المياه من الهواء، والتحلية + **(المياه المعاد تدويرها**)مياه الصرف الصحى المعالجة + **(التخزين**)السدود، والسدود الترابية، وإدارة المياه الجوفية، والخزانات + **(الكفاءة**)الفقاعات النانوية، والرى الذكى، وتقليل التسرب + **(المشاركة الشعبية**)التعاونيات، والصناديق المحلية، والاقتصاد القائم على الناس(

هذه هى محفظة الموارد المائية الذكية واللامركزية التى يمكن أن تساعد إيران على تجاوز أزمة شح المياه والتوجه نحو مستقبل مستدام، وقادر على الصمود، وأخضر...