

ریسک امنیت آب - بخش دوم

آب از آسمان بگیریم، انقلاب خاموشی که تشنگی ایران را درمان می کند

امیرحسین خدائی - پژوهشگر

رودخانه‌ای که از بالای سرمان می‌گذرد

دهه‌هاست بر سر تقسیم آب رودخانه‌ها و قنات‌ها با یکدیگر و با همسایگان درگیری هست. اما در تمام این سال‌ها، رودخانه‌ای عظیم، پاک و تمام‌نشدنی، بی‌صدا از بالای سرمان عبور کرده است: هوای پیرامون ما. بر اساس یافته‌های علمی منتشرشده در مجلات معتبر جهانی، حجم بخار آب موجود در جو زمین حدود سیزده هزار میلیارد مترمکعب برآورد شده است، رقمی که شش برابر حجم کل آب تمام رودخانه‌های جهان است. امروز، فناوری به ما امکان داده تا از این منبع الهی، آب آشامیدنی سالم و پایدار استحصال کنیم. این موضوع دیگر داستان علمی-تخیلی نیست، این یک انقلاب اقتصادی در دسترس است.

فصل نخست: آب از هوا چگونه به دست می‌آید؟

فناوری برداشت آب از هوا، یعنی استخراج رطوبت پنهان موجود در جو و تبدیل آن به آب قابل مصرف. این فناوری در ادبیات علمی امروز به‌عنوان یکی از مسیرهای جدی برای تاب‌آوری آبی، امنیت غذایی و توسعه مناطق کم‌آب شناخته می‌شود. دستگاه‌های تولید آب از هوا، درست مانند یک دستگاه رطوبت‌گیر بسیار پیشرفته عمل می‌کنند. هوای مرطوب وارد دستگاه می‌شود، سرد می‌گردد تا به نقطه شبنم برسد، و بخار آب به قطرات مایع تبدیل می‌شود. در روش دیگر، از مواد جاذب رطوبت مانند چارچوب‌های آلی-فلزی استفاده می‌شود که بخار آب را جذب کرده و سپس با حرارت‌دهی (معمولاً با انرژی خورشیدی)، آب آزاد می‌گردد.

ارزان‌ترین روش برداشت آب از هوا، جمع‌آوری مه در مناطق ساحلی و کوهستانی است. در این روش، با نصب تورهای مخصوص، قطرات ریز مه جمع‌آوری می‌شود.

فصل دوم: نانوحباب؛ نیروی پنهان در پشت این انقلاب

آب تولیدشده از هوا، آبی با خلوص بالاست. اما نانوحباب این آب را به یک محلول اکسیژن رسان پایدار و زیست‌فعال تبدیل می‌کند. نانوحباب‌ها، حباب‌هایی با قطر کمتر از یک هزارم میلی‌متر هستند که ویژگی‌های شگفت‌انگیزی دارند:

- سطح ویژه بسیار بزرگ برای انتقال اکسیژن و مواد مغذی
- بار سطحی منفی که باعث می‌شود ماه‌ها در آب معلق بمانند
- قابلیت تولید رادیکال‌های آزاد برای ضدعفونی طبیعی آب

تلفیق آب از هوا با نانوحباب، یک معادله جدید می‌سازد: آبی که از هوا گرفته می‌شود، با تزریق نانوحباب‌های اکسیژن، به آبی اکسیژن رسان پایدار و مغذی تبدیل می‌شود که برای کشاورزی، شیلات، دامداری و حتی مصارف پزشکی بسیار ارزشمند است.

فصل سوم: پتانسیل ویژه ایران، مزیتی که نباید نادیده گرفت

پژوهش‌های علمی نشان می‌دهد که ایران در یکی از ارزان‌ترین روش‌های تولید آب غیرمتعارف جهان، مزیت نسبی دارد. بر اساس مطالعه‌ای که در نشریه معتبر نیچر منتشر شده است:

مناطق جنوبی کشور (سواحل خلیج فارس و دریای عمان) پتانسیل برداشت آب از مه را تا روزانه شصت و پنج لیتر به ازای هر مترمربع دارند.

مناطق شمالی و شرقی نیز بین بیست و پنج تا چهل و پنج لیتر در روز به ازای هر مترمربع پتانسیل دارند.

هزینه برداشت آب از مه در ایران حدود بیست و پنج سنت به ازای هر مترمکعب برآورد شده است.

با انتقال دانش فنی و بومی سازی فناوری، هزینه ۲۵ سنتی برداشت آب از هوا در ایران به طور قابل توجهی کاهش می یابد. نمونه های موفق، ابعاد این کاهش را نشان می دهند: ساخت نمونه داخلی یک دستگاه با یک سوم هزینه نمونه خارجی، و استفاده از جاذب های نانوساختار بومی (MOF-801) که هزینه تولید را به کمتر از ۱۰۰ تومان (کمتر از ۰.۰۰۲ دلار) در هر لیتر رسانده است. همچنین، تحقیق روی غشاهای پلیمری در اقلیم های مختلف ایران، مصرف انرژی را تا ۲۹ درصد کاهش داده و سامانه های خورشیدی جذبی با کاهش مصرف انرژی تا ۸۲ درصد و سامانه های غیرفعال الهام گرفته از فضا، امکان تولید آب با هزینه کمتر از ۲ سنت در هر لیتر را فراهم کرده اند. در نهایت، تولید انبوه و استفاده از انرژی های تجدیدپذیر مانند خورشید، هزینه نهایی را به محدوده ۲ تا ۵ سنت در هر لیتر کاهش می دهد و آب تولیدی را به یکی از مقرون به صرفه ترین منابع آبی کشور تبدیل می کند.

برای مقایسه، شیرین سازی آب دریا حدود شصت سنت به ازای هر مترمکعب هزینه دارد. این یعنی برداشت آب از مه در ایران اگر هم بومی سازی نشود نزدیک به دو سوم شیرین سازی آب دریا ارزان تر است.

با بومی سازی و کاهش هزینه به ۲ تا ۵ سنت، برداشت آب از هوا ۱۲ تا ۳۰ برابر ارزان تر از شیرین سازی خواهد شد. این یعنی در یک پروژه یک میلیون مترمکعبی، صرفه جویی سالانه بین ۵۵۰ تا ۵۸۰ هزار دلار محقق می شود. علاوه بر این، برداشت آب از هوا هزینه سرمایه گذاری اولیه پایین تر، مصرف انرژی بسیار کمتر (با استفاده از انرژی خورشیدی رایگان) و قابلیت استقرار در مناطق دور از ساحل را دارد، در حالی که شیرین سازی نیازمند تأسیسات گران قیمت، مصرف انرژی بالا و دسترسی به آب دریا است. این تفاوت چشمگیر، برداشت آب از هوا را به یک جایگزین راهبردی و اقتصادی برای تأمین آب در مناطق کم آب و دور از ساحل تبدیل می کند.

جزایر کیش و قشم و منطقه چابهار به عنوان نقاط پایلوت اولویت دار معرفی شده اند.

علاوه بر این، ایران دارای تنوع اقلیمی شگفت انگیزی است: از سواحل مرطوب جنوب و شمال گرفته تا مناطق کوهستانی البرز و زاگرس، و از مناطق نیمه بیابانی مرکزی تا بیابان های کویر لوت و دشت کویر. این تنوع به این معناست که یک فناوری واحد برای همه ایران مناسب نیست، اما برای هر منطقه ای، یک فناوری متناسب وجود دارد.

فصل چهارم: آب از هوا در فصول و اقلیم‌های مختلف، تلفیقی هوشمندانه با سدهای خاکی و ذخیره‌سازی

در بهار که رطوبت هوا در بسیاری از مناطق افزایش می‌یابد، دستگاه‌های تولید آب از هوا به حداکثر بازدهی خود می‌رسند. در این فصل، باید آب تولیدشده را ذخیره کنیم، در مخازن، در پشت سدهای خاکی کوچک، و در سفره‌های زیرزمینی. تصور کنید در یک روستای کوهپایه‌ای، آب بهار را در یک استخر خاکی ذخیره می‌کنیم و با نانوحباب، آن را برای ماه‌های خشک سال حفظ می‌کنیم. در استان گلستان، پس از سیلاب سال ۱۳۹۸، احداث سدهای کوچک خاکی و مدیریت روان‌آب‌ها در بالادست حوضه گرگان‌رود، موجب کاهش چهل درصدی شدت سیلاب‌های فصلی شد. حالا تصویر مشابهی را در ذهن مجسم کنید: در یک منطقه کوهستانی، همزمان با بارش‌های بهاری، دستگاه‌های تولید آب از هوا نیز فعال‌تر می‌شوند و آب مازاد، هم از باران و هم از هوا، در پشت سدهای خاکی و مخازن ذخیره می‌شود.

در تابستان که هوا گرم و مصرف آب بالا می‌رود، دستگاه‌های تراکمی در مناطق مرطوب جنوبی بهترین عملکرد را دارند. در مناطق کویری، فناوری‌های جذب‌محور با انرژی خورشیدی به کار می‌آیند. در این فصل، اولویت با تولید آب شرب، آبیاری گلخانه‌ها، تأمین آب دام و مصارف اضطراری است. در یک گلخانه در حومه کرمان، دستگاه تولید آب از هوا با ظرفیت پانصد لیتر در روز، نیاز آبی گلخانه را تأمین می‌کند و نانوحباب، رشد گیاهان را تا سی درصد افزایش می‌دهد.

در پاییز که رطوبت نسبی کاهش می‌یابد اما هنوز قابل قبول است، باید روی ذخیره‌سازی و آبیاری تکمیلی تمرکز کرد. آب تولیدشده در پاییز برای کشت پاییزه و احیای پوشش گیاهی مناطق خشک استفاده می‌شود.

در زمستان که هوا سرد است، دستگاه‌های تراکمی مصرف انرژی بیشتری دارند. در این فصل، فناوری‌های جاذب و جمع‌آوری شبنم در مناطق مرطوب شمالی و کوهستانی مناسب‌ترند. همچنین در مناطق سردسیر، می‌توان از گرمای اتلافی ساختمان‌ها برای کمک به فرآیند تولید آب استفاده کرد.

در مناطق سرسبز شمال کشور، آب از هوا می‌تواند مکمل باران باشد و برای آبیاری فضای سبز و باغچه‌ها به کار رود. در مناطق کوهستانی، برداشت مه و شبنم اولویت دارد و برای روستاهای دورافتاده و صعب‌العبور بسیار مفید

است. در مناطق نیمه‌بیابانی مانند بسیاری از مناطق مرکزی ایران، دستگاه‌های جذب‌محور با انرژی خورشیدی بهترین گزینه هستند و می‌توانند آب مورد نیاز گلخانه‌ها، گیاهان دارویی و دامداری‌ها را تأمین کنند. در مناطق بیابانی، نباید شیفته فناوری شد، باید ابتدا محاسبه کرد که آب‌شیرین‌کن بهتر است یا برداشت از هوا؟ تانکر بهتر است یا برداشت از هوا؟ انتقال آب بهتر است یا برداشت از هوا؟ پساب تصفیه‌شده بهتر است یا برداشت از هوا؟ اگر برداشت از هوا برنده شد، اجرا کنیم.

تلفیق با سدهای خاکی و ذخیره‌سازی: سدهای خاکی کوچک و استخرهای ذخیره، نقش کلیدی در این معادله دارند. آب تولیدشده از هوا در فصول مرطوب، در این سدها و استخرها ذخیره می‌شود و با تزریق نانوحباب، کیفیت خود را برای ماه‌ها حفظ می‌کند. در فصل خشک، این آب ذخیره‌شده برای آبیاری تکمیلی، دامداری و مصارف شرب به کار می‌رود. تجربه موفق طرح‌های آبخوان‌داری در استان کرمان نشان داده است که با پخش سیلاب و تغذیه مصنوعی، سطح آب زیرزمینی تا پنج متر افزایش یافته است. حالا تصویر بزرگ‌تر را ببینید: باران + آب از هوا + سدهای خاکی + آبخوان‌داری + نانوحباب، این ترکیب می‌تواند تاب‌آوری آبی کشور را به طور چشمگیری افزایش دهد.

فصل پنجم: خورشید و هوا، همتای آسمانی برای حل بحران آب

در بخش‌های پیشین گفتیم که چگونه می‌توان از رطوبت هوا آب تولید کرد و چگونه نانوحباب‌ها این آب را به یک محلول اکسیژن رسان پایدار تبدیل می‌کنند. اما یک پرسش اساسی باقی می‌ماند: انرژی این فرآیند از کجا تأمین می‌شود؟

پاسخ، درخشان‌ترین منبع انرژی در دسترس ماست: خورشید. تلفیق انرژی خورشیدی با فناوری برداشت آب از هوا، نه تنها هزینه‌ها را به شدت کاهش می‌دهد، بلکه این فناوری را در دورافتاده‌ترین نقاط کشور، جایی که شبکه برق وجود ندارد، نیز قابل استفاده می‌سازد.

خورشید چگونه به تولید آب از هوا کمک می‌کند؟

روش نخست: سرمایش با انرژی خورشیدی

دستگاه‌های تراکمی برای سرد کردن هوا و تبدیل بخار به آب، به برق نیاز دارند

. پنل‌های خورشیدی این برق را تأمین می‌کنند. در روزهای آفتابی، پنل‌ها حداکثر توان را تولید می‌کنند و دستگاه با بیشترین ظرفیت خود آب تولید می‌کند. آب تولیدشده در مخازن ذخیره می‌شود تا در شب و روزهای ابری نیز در دسترس باشد. شرکت‌هایی مانند واترجن در اسرائیل و زیرو ماس واتر در آمریکا سال‌هاست که از این روش استفاده می‌کنند.

روش دوم: گرمایش خورشیدی برای آزادسازی آب از جاذب‌ها

این روش هوشمندانه‌تر و برای مناطق خشک‌تر مناسب‌تر است. مواد جاذب رطوبت (مانند هیدروژل‌ها یا چارچوب‌های آلی-فلزی) شب هنگام که هوا خنک‌تر و رطوبت نسبی بالاتر است، بخار آب را جذب می‌کنند. وقتی خورشید طلوع می‌کند، گرمای آن این مواد را حرارت می‌دهد و آب جذب‌شده را به صورت بخار آزاد می‌کند. سپس این بخار در بخش سردتر دستگاه، به قطرات آب مایع تبدیل می‌شود.

یک مطالعه در سال ۲۰۲۴ در نشریه نیچر کامونیکیشنز نشان داد که یک دستگاه مبتنی بر هیدروژل با استفاده از نور خورشید و باد طبیعی، توانسته به تولید روزانه ۱۴.۹ لیتر آب به ازای هر مترمربع در شرایط آزمایشگاهی و ۳.۵ تا ۸.۹ لیتر در شرایط بیرونی دست یابد.

روش سوم: سیستم‌های هیبریدی خورشیدی-الکتریکی

در مناطقی با رطوبت بسیار کم یا روزهای ابری، گرمای خورشید به تنهایی کافی نیست. پژوهشگران سیستم‌های هیبریدی طراحی کرده‌اند که در آن اولویت با انرژی خورشیدی است، اما در مواقع ضروری، از گرمایش کمکی برقی نیز استفاده می‌شود. آزمایش‌ها نشان داده است که در یک اقلیم خشک با رطوبت حدود سی درصد در روز، این سیستم توانسته روزانه ۱۰.۵۶ کیلوگرم آب تولید کند و در عین حال، مصرف برق در طول روز را تا چهل

درصد نسبت به شب کاهش دهد. این یعنی خورشید بیش از پنجاه درصد از انرژی مورد نیاز را به رایگان تأمین می‌کند.

جدیدترین دستاوردهای علمی، تلفیق هوشمندانه خورشید و آب

پژوهش‌های سال ۲۰۲۶ پیشرفت‌های شگفت‌انگیزی در این حوزه نشان داده‌اند:

ذخیره‌سازی انرژی در خود ماده جاذب: پژوهشگران چینی یک اسفنج چوبی رطوبت‌گیر ساخته‌اند که هم رطوبت را جذب می‌کند و هم با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، گرمای خورشید را در خود ذخیره می‌کند تا در شب یا روزهای ابری، آب آزادسازی شده را گرم کند و فرایند تولید آب را ادامه دهد. این یعنی دستگاه حتی وقتی خورشید نیست هم کار می‌کند!

تولید همزمان آب و برق: فناوری جدیدی که در نشریه ساینسی دایرکت معرفی شده، با تلفیق پنل‌های خورشیدی و برداشت آب از هوا، همزمان آب و برق تولید می‌کند. در این سیستم، گرمای هدررفته پنل‌های خورشیدی برای آزادسازی آب از جاذب‌ها استفاده می‌شود و خود پنل‌ها نیز برق مورد نیاز دستگاه را تأمین می‌کنند. یک مطالعه نشان داده که با انتخاب جاذب مناسب بر اساس اقلیم هر منطقه، می‌توان بازده تولید آب را تا ۱۸.۶ درصد افزایش داد.

هیدروژل‌های نسل جدید: پژوهشگران نوعی هیدروژل ساخته‌اند که در شرایط یک تابش خورشیدی (معادل شدت نور خورشید در یک روز آفتابی)، ۸۹.۵ درصد از آب جذب‌شده خود را در مدت هفتاد دقیقه آزاد می‌کند و قابلیت جذب آبی معادل ۴.۱ برابر وزن خود را دارد. این یعنی با یک کیلوگرم از این ماده می‌توان بیش از چهار لیتر آب در روز تولید کرد.

مزیت ویژه ایران، خورشید فراوان، فرصتی بی‌نظیر

ایران با میانگین بیش از سیصد روز آفتابی در سال، یکی از بالاترین پتانسیل‌های انرژی خورشیدی در جهان را دارد. این یعنی دستگاه‌های خورشیدی برداشت آب از هوا در ایران، بیش از بسیاری از کشورهای دیگر کارایی دارند.

یک مطالعه در سال ۲۰۲۵ توسط پژوهشگران مؤسسه فراون هافر آلمان، به طور خاص عملکرد یک سیستم ترکیبی برداشت آب از هوا و نمک‌زدایی خورشیدی را در اقلیم‌های مختلف ایران شبیه‌سازی کرده است. نتایج نشان داد که این سیستم در شهرهای مختلف ایران عملکرد بسیار خوبی دارد. به عنوان مثال، در بوشهر، تولید آب هفتاد درصد و در رامسر ۵۷.۶ درصد افزایش یافته است. در بهترین حالت، این سیستم توانسته سالانه بیش از دوازده هزار کیلوگرم (دوازده مترمکعب) آب تولید کند.

همچنین پژوهشگران داخلی با همکاری مراکز بین‌المللی در حال کار روی سیستم‌های ترکیبی برداشت آب از هوا و نمک‌زدایی خورشیدی هستند که می‌تواند برای مناطق جنوبی کشور که هم رطوبت بالا و هم تابش خورشیدی فراوان دارند، بسیار مؤثر باشد.

تلفیق با نانوحباب؛ مثلث طلایی خورشید، آب و هوا

حالا تصویر کامل را ببینید:

گام اول: پنل‌های خورشیدی، انرژی رایگان و پاک را تأمین می‌کنند.

گام دوم: دستگاه برداشت آب از هوا، با استفاده از این انرژی، رطوبت هوا را به آب مایع تبدیل می‌کند. در مناطق خشک، از مواد جاذب پیشرفته استفاده می‌شود که با گرمای خورشید، آب را آزاد می‌کنند.

گام سوم: این آب خالص، با تزریق نانوحباب‌های اکسیژن، به آبی آبراکسیژنه و زیست‌فعال تبدیل می‌شود.

گام چهارم: آب آبرشارژ شده، در مخازن ذخیره می‌شود و برای آب یاری گلخانه‌ها، تغذیه دام و طیور، پرورش ماهی، یا حتی مصرف شرب به کار می‌رود.

نتیجه نهایی: یک سیستم کاملاً مستقل از شبکه‌های آب و برق که در دل کویر، در یک منطقه کوهستانی دورافتاده، یا روی پشت‌بام یک ساختمان شهری، آب سالم و باکیفیت تولید می‌کند.

چرا این تلفیق، تحول‌آفرین است؟

کاهش هزینه: انرژی خورشیدی رایگان است. پس از سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه تولید آب به شدت کاهش می‌یابد. استقلال از شبکه: این سیستم‌ها در مناطقی که شبکه برق وجود ندارد یا غیرقابل اعتماد است، قابل استفاده هستند.

پایداری زیست‌محیطی: هیچ سوخت فسیلی مصرف نمی‌شود و هیچ آلاینده‌ای تولید نمی‌گردد.

قابلیت حمل و نصب آسان: سیستم‌های خورشیدی-برداشت آب از هوا، ماژولار هستند و می‌توان آن‌ها را در هر نقطه‌ای نصب کرد.

تولید در محل مصرف: آب در همان جایی تولید می‌شود که مصرف می‌شود، هزینه‌های انتقال و هدررفت شبکه به صفر می‌رسد.

نتیجه راهبردی، خورشید، هوا و آب، سه هدیه آسمانی

ترکیب انرژی خورشیدی، فناوری برداشت آب از هوا، و نانوحباب، یک مثلث طلایی می‌سازد که می‌تواند ایران را از بحران آب عبور دهد. خورشید انرژی می‌دهد، هوا آب می‌دهد، و نانوحباب کیفیت می‌بخشد. این مثلث، در کویر لوت و در سواحل خلیج فارس، در کوهستان‌های زاگرس و در پشت‌بام خانه‌های شهری، قابل پیاده‌سازی است.

ارزش واقعی این تلفیق، در استقلالی است که به کشور و هر واحد مسکونی، صنعتی و خدماتی می‌دهد: استقلال از شبکه‌های آب، استقلال از شبکه‌های برق، و استقلال از واردات فناوری. این همان مسیری است که ایران را از یک کشور مصرف‌کننده فناوری، به یک کشور تولیدکننده و صادرکننده آن تبدیل می‌کند.

فصل ششم: کاربردهای استراتژیک، از خانه و روستا تا کشاورزی و صنعت

در کشاورزی، این فناوری تحولی شگرف ایجاد می‌کند. در کشت دیم، آب از هوا برای نهال کاری، استقرار اولیه و تغذیه اضطراری گیاه در دوره‌های خشکسالی بسیار مفید است. در گلخانه، آب تولیدی عاری از میکروارگانیسم‌ها و نمک‌های مضر است و با نانوحباب، مصرف آب تا چهل درصد کاهش می‌یابد. در کشت هیدروپونیک (کشت بدون خاک)، آب از هوا نیاز به آب با کیفیت بسیار بالا را برطرف می‌کند و نانوحباب با افزایش اکسیژن محلول در ریشه، رشد را بیست تا چهل درصد افزایش می‌دهد. بیشترین توجیه اقتصادی در کشاورزی برای گلخانه، نهالستان، سبزی و صیفی، و سیستم‌های هیدروپونیک است.

در دامداری و طیور، تأمین آب بهداشتی و سرشار از اکسیژن برای دام و طیور، ضمن کاهش چشمگیر بیماری‌ها، کیفیت و میزان تولید شیر و گوشت را افزایش می‌دهد. استفاده از آب نانوحباب‌دار در آبشخور دام، سلامت دستگاه گوارش دام را بهبود می‌بخشد.

در شیلات و پرورش ماهی، اینجا از بهترین کاربردهای نانوحباب است. سیستم‌های نانوحباب با بازده انتقال اکسیژن بسیار بالا، می‌توانند اکسیژن محلول را تا هفتاد و یک درصد نسبت به روش‌های معمولی افزایش دهند. ترکیب آب از هوا با نانوحباب در سیستم‌های بسته، امکان پرورش ماهی با تراکم بالا را در هر نقطه از کشور، حتی در دل کویر، فراهم می‌کند.

در صنایع سبک مانند کارگاه‌ها، بسته‌بندی، صنایع غذایی، نساجی و دارویی، آب از هوا می‌تواند آب مورد نیاز فرآیندهای تولیدی را تأمین کند. در صنایع سنگین مانند نیروگاه‌ها، معادن، پالایشگاه‌ها و فولاد، بهترین کاربرد در جاهایی است که آب در محل مصرف گران، نامطمئن یا پرمیسک است.

در منازل مسکونی، دستگاه‌های خانگی می‌توانند روزانه بیست تا پنجاه لیتر آب آشامیدنی با کیفیت عالی تولید کنند که جایگزین آب معدنی گران‌قیمت می‌شود. در ویلاها و ساختمان‌های دور از شبکه آبرسانی، این فناوری می‌تواند به طور کامل نیاز آبی را تأمین کند.

احیای مراتع و بیابان‌زدایی: با استقرار دستگاه‌های برداشت آب از هوا در مناطق بحرانی و آبیاری نهال‌ها با آب نانوحباب‌دار، می‌توان کمربندهای سبز ایجاد کرد، از فرسایش خاک جلوگیری نمود و نیاز کشور به واردات نهاده‌های دامی را با احیای مراتع کاهش داد.

فصل هفتم: بازگشت آبادی به روستاها، آب، اشتغال و امید

تصور کنید یک روستای دورافتاده که سال‌هاست با خشکسالی و مهاجرت جوانان دست‌وپنجه نرم می‌کند، چگونه با این فناوری متحول می‌شود:

اول، یک دستگاه تولید آب از هوا در مرکز روستا نصب می‌شود که روزانه دویست تا پانصد لیتر آب سالم تولید می‌کند.

دوم، این آب با نانوحباب غنی می‌شود و برای آبیاری یک گلخانه کوچک و یک واحد پرورش ماهی استفاده می‌گردد.

سوم، گلخانه محصولات با ارزشی مانند گیاهان دارویی یا سبزیجات خارج‌فصل تولید می‌کند و واحد پرورش ماهی، ماهیانی با کیفیت بالا و یا زینتی پرورش می‌دهد.

چهارم، این محصولات در خود روستا بسته‌بندی و از طریق فروش اینترنتی به شهرهای بزرگ ارسال می‌شوند. پنجم، جوانان روستا که برای کار به شهر رفته بودند، با دیدن این تحول به روستا بازمی‌گردند و کسب‌وکارهای جدیدی راه‌اندازی می‌کنند.

ششم، روستا از یک نقطه مصرف‌کننده آب، به یک نقطه تولیدکننده آب و ثروت تبدیل می‌شود.

هفتم، الگوی موفق این روستا به روستاهای همجوار سرایت می‌کند و یک شبکه از روستاهای مولد آب و غذا شکل می‌گیرد.

فصل هشتم: پدافند غیرعامل، آب، خط مقدم دفاع از کشور

در شرایط بحرانی مانند زلزله، سیل، جنگ و خشکسالی شدید، دسترسی به آب سالم، حیاتی‌ترین نیاز است. فناوری برداشت آب از هوا، یک ابزار راهبردی برای پدافند غیرعامل محسوب می‌شود:

در زمان زلزله که شبکه‌های آبرسانی تخریب می‌شوند، واحدهای سیار برداشت آب از هوا می‌توانند در عرض چند ساعت، آب آشامیدنی سالم را برای مناطق آسیب‌دیده و نیروهای امدادی فراهم کنند. این واحدها نیازی به زیرساخت ندارند و با انرژی خورشیدی یا ژنراتورهای کوچک کار می‌کنند.

در زمان جنگ و محاصره، که دشمن می‌تواند منابع آب سطحی و زیرزمینی را هدف قرار دهد، سامانه‌های برداشت آب از هوا در پناهگاه‌ها، پایگاه‌های نظامی و مراکز فرماندهی، امنیت آبی نیروهای مسلح و مردم را تضمین می‌کنند. این سامانه‌ها در نقاط صعب‌العبور و مرزی، وابستگی به تانکرهای آبرسانی را که خود هدفی آسیب‌پذیرند، به شدت کاهش می‌دهند.

در زمان خشکسالی‌های طولانی، که سفره‌های زیرزمینی افت شدید پیدا می‌کنند و رودخانه‌ها خشک می‌شوند، برداشت آب از هوا می‌تواند به عنوان یک منبع مکمل، فشار بر منابع طبیعی را کاهش دهد و تاب‌آوری کشور را افزایش دهد.

در پاسگاه‌های مرزی و مناطق صعب‌العبور، که انتقال آب با تانکر بسیار پرهزینه و پرریسک است، دستگاه‌های برداشت آب از هوا می‌توانند نیاز آبی نیروهای مستقر را به طور پایدار تأمین کنند.

تلفیق با نانوحباب در پدافند غیرعامل، آب تولیدی را به آبی ضدعفونی‌شده و پایدار تبدیل می‌کند که می‌تواند ماه‌ها در مخازن ذخیره باقی بماند و کیفیت خود را حفظ کند.

فصل نهم: معماری قواعد برای فراگیر شدن، از قانون تا عمل

برای اینکه این فناوری در کشور فراگیر شود، به یک بسته سیاستی هوشمند نیاز داریم که از لایه‌های زیر تشکیل می‌شود:

لایه اول: استانداردهای فنی و بهداشتی تدوین استاندارد ملی برای کیفیت آب تولیدشده از هوا، مصرف انرژی، و ایمنی دستگاه‌ها. سازمان استاندارد و وزارت بهداشت باید برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی استانداردهای جداگانه تعریف کنند.

لایه دوم: الزام قانونی نصب در ساختمان‌ها همان‌گونه که امروز نصب سیستم‌های اعلام حریق و پله‌های فرار در ساختمان‌ها الزامی است، نصب سیستم‌های برداشت آب از هوا نیز باید به عنوان یک الزام قانونی در ساختمان‌های جدید، به ویژه ساختمان‌های دولتی، بیمارستان‌ها، مدارس، هتل‌ها و مجتمع‌های مسکونی بزرگ، در نظر گرفته شود. نمایندگان مجلس می‌توانند با تصویب ماده‌ای در قانون نظام مهندسی، این الزام را ایجاد کنند. همچنین، صدور پایان کار ساختمان‌های جدید می‌تواند منوط به نصب این سامانه‌ها شود.

لایه سوم: تسهیل‌گری حقوقی و قانونی دولت باید با همکاری مجلس، قانون حمایت از توسعه فناوری‌های نوین آب‌محور را تصویب کند. در این قانون، معافیت‌های مالیاتی برای تولیدکنندگان داخلی و واردکنندگان قطعات، تسهیل در صدور مجوزها، و تعرفه ترجیحی برای تجهیزات تولید داخل پیش‌بینی شود. همچنین، سازمان برنامه و بودجه باید ردیف بودجه مستقل برای حمایت از پروژه‌های پایلوت در نظر بگیرد.

لایه چهارم: حمایت نهادهای نظامی، امنیتی و پدافند غیرعامل، وزارت دفاع، ستاد کل نیروهای مسلح، سازمان مدیریت بحران، هلال احمر، وزارت بهداشت، وزارت نیرو و سازمان پدافند غیرعامل باید در تدوین استانداردهای سامانه‌های قابل حمل و سیار مشارکت کنند و برای استقرار این سامانه‌ها در پایگاه‌های نظامی، پاسگاه‌های مرزی و پناهگاه‌های عمومی، بودجه اختصاص دهند.

لایه پنجم: حمایت وزارت بهداشت و سازمان مدیریت بحران، وزارت بهداشت باید استانداردهای کیفیت آب شرب تولیدشده از هوا را تدوین و نظارت کند. سازمان مدیریت بحران نیز باید ذخیره‌سازی استراتژیک این سامانه‌ها را در انبارهای امدادی در سراسر کشور برنامه‌ریزی کند تا در زمان بحران، بلافاصله قابل استفاده باشند. هلال احمر نیز می‌تواند در کمک‌های انسان‌دوستانه خود از این فناوری بهره ببرد.

لایه ششم: حمایت از تولید داخلی و صادرات، وزارت صنعت، معدن و تجارت باید با اعطای تسهیلات بانکی کم‌بهره و معافیت‌های مالیاتی، از تولیدکنندگان داخلی تجهیزات برداشت آب از هوا، نانوحباب، پنل‌های خورشیدی و

مخازن ذخیره حمایت کند. همچنین، با ایجاد شهرک‌های صنعتی تخصصی و حمایت از صادرات، زمینه را برای تبدیل ایران به یک قطب صادرات فناوری آب از هوا در منطقه فراهم آورد. صادرات خدمات مهندسی، مشاوره اجرایی و تجهیزات به کشورهای دارای بحران آب در خاورمیانه، آسیای میانه و شمال آفریقا، می‌تواند منبع درآمد ارزی قابل توجهی برای کشور ایجاد کند.

لایه هفتم: اکوسیستم مردمی کردن اقتصاد دانش بنیان

با تشکیل بنیاد تعاون آب و فناوری‌های نوین دانشگاه، به مدیریت تخصصی دانشگاه‌های دارای رشته‌های مرتبط، می‌توان مدلی کارآمد برای صنعتی‌سازی فناوری برداشت آب از هوا و نانوحباب طراحی کرد. این بنیاد با ایجاد اعتبار و دریافت تسهیلات بانکی و صندوق‌های توسعه ملی، ریسک مالی نخستین گام‌ها را کاهش داده و با هموارسازی مسیر اجرایی و تأمین مالی پروژه‌ها، زمینه را برای پیوند نخبگان دانشگاهی، شرکت‌های دانش‌بنیان و صنایع فراهم می‌آورد.

در این ساختار، اساتید، کارمندان، دانشجویان، فارغ‌التحصیلان و اهالی بومی هر منطقه با اختصاص سهام مشارکتی به بنیاد پیوسته و ضمن جذب سرمایه‌های خرد مردمی، اقتصاد دانش‌بنیان را از حالت متمرکز به ساختاری سلولی، مشارکتی و مردم‌بنیان تبدیل می‌کنند. این بنیاد با ایجاد یک شتاب‌دهنده تخصصی و مرکز نوآوری مشترک، زمینه مهاجرت معکوس نخبگان، هم‌افزایی میان شرکت‌های دانش‌بنیان در حوزه‌های طراحی، ساخت، نصب و بهره‌برداری از سامانه‌های آب از هوا را فراهم می‌آورد و با واگذاری پروژه‌های عملیاتی بر اساس تخصص هر مجموعه، چرخه پژوهش تا تولید را تسریع می‌بخشد.

همچنین، با بهره‌گیری از ظرفیت پایان‌نامه‌های تحصیلی و پروژه‌های کارآموزی، نیروی انسانی متخصص از دل دانشگاه تربیت شده و با اختصاص سهام به دانشجویان و فارغ‌التحصیلان، ماندگاری آن‌ها در مناطق بومی تضمین می‌شود. نقش کلیدی بنیاد در ایجاد اعتبار، دریافت تسهیلات و هموارسازی مسیر حقوقی پروژه‌ها، نه تنها ریسک سرمایه‌گذاری را کاهش می‌دهد، بلکه زمینه جذب سرمایه‌های خرد و کلان را فراهم کرده و صنایع بزرگ آب‌بر را به مشارکت در این اکوسیستم ترغیب می‌کند. این مدل با ایجاد بازار داخلی برای محصولات دانش‌بنیان، کاهش وابستگی به واردات، ایجاد اشتغال پایدار، و زمینه‌سازی برای صادرات فناوری و خدمات مهندسی به کشورهای همسایه، ایران را به قطب فناوری آب از هوا در منطقه تبدیل می‌کند.

فصل دهم: توجیه اقتصادی، چرا آب از هوا ارزان‌تر از بسیاری روش‌های دیگر است؟

بر اساس داده‌های علمی منتشرشده، هزینه برداشت آب از مه در ایران حدود بیست و پنج سنت به ازای هر مترمکعب است که با بومی کردن و استفاده از انرژی خورشیدی ۲ تا ۵ سنت کاهش خواهد داشت. برای مقایسه:

- شیرین‌سازی آب دریا: حدود شصت سنت به ازای هر مترمکعب
- انتقال آب با تانکر در مسافت‌های طولانی: چند دلار به ازای هر مترمکعب
- حفر چاه عمیق در مناطق کویری: هزینه اولیه بالا و کاهش تدریجی آینده

تصفیه فاضلاب: بین سی تا پنجاه سنت به ازای هر مترمکعب (بسته به مقیاس)

این یعنی برداشت آب از هوا در مناطق مستعد ایران، حداقل نزدیک به دو سوم شیرین‌سازی آب دریا و بسیار ارزان‌تر از انتقال آب با تانکر است.

اما ارزش واقعی این فناوری، فقط در هزینه تولید آب نیست. ارزش اصلی آن در تولید آب در محل مصرف و حذف هزینه‌های انتقال و توزیع است. وقتی آب در همان جایی تولید می‌شود که مصرف می‌شود، هزینه‌های لوله‌کشی، پمپاژ، نگهداری شبکه و هدررفت در مسیر انتقال (که در ایران گاهی به سی درصد می‌رسد) به صفر می‌رسد.

تلفیق با نانوحباب، ارزش آب تولیدی را چندین برابر افزایش می‌دهد. آبی که با نانوحباب غنی می‌شود، در کشاورزی مصرف آب را تا سی درصد کاهش می‌دهد، در شیلات رشد ماهی را تا بیست درصد افزایش می‌دهد، و در صنایع سبک کیفیت محصولات نهایی را بهبود می‌بخشد. این یعنی هر لیتر آبی که از هوا گرفته می‌شود و با نانوحباب تلفیق می‌گردد، به مراتب بیشتر از یک لیتر آب معمولی ارزش اقتصادی ایجاد می‌کند.

فصل یازدهم: نتیجه راهبردی، از بحران آب تا اقتدار آبی

فناوری برداشت آب از هوا و تلفیق آن با نانوحباب، تنها یک راهکار فنی نیست، یک مانیفست برای تحول اقتصادی اجتماعی است. این فناوری می‌تواند:

تولید ناخالص داخلی را با ایجاد صنایع و مشاغل جدید افزایش دهد.

با تولید محصولات کشاورزی استراتژیک، واردات را کاهش و صادرات را افزایش دهد.

اقتصاد را از حالت متمرکز دولتی به یک اقتصاد آن سلولی، توزیع شده و مردم‌بنیاد تبدیل کند.

در فصول و مناطق پررطوبت، آب را برای فصول خشک ذخیره کرده و امنیت آبی پایدار ایجاد کند.

مهاجرت معکوس به روستاها را ممکن سازد و روستاها را دوباره آباد کند.

فشار بر نهادهای حمایتی را با ایجاد اشتغال و درآمد کاهش دهد.

ارزش واقعی آب از هوا، در مقدار آبی نیست که دستگاه تولید می‌کند، در مقدار آبی است که به واسطه آن می‌توان از برداشت ناپایدار از رودخانه، آبخوان و منابع طبیعی جلوگیری کرد.

این همان نقطه‌ای است که آب از هوا می‌تواند از یک فناوری جذاب به یک ابزار واقعی برای امنیت آب، امنیت غذایی، امنیت اقتصادی و تاب‌آوری ایران تبدیل شود.

شعار این مانیفست انقلاب خاموش:

از آب موجود در هوا تا اقتصاد آب، هر منطقه، منبع آب خودش را داشته باشد.

پیوند با پیشنهاد های راهبردی قبلی

این یادداشت ، حلقه ای از زنجیره راهکار های ارائه شده در یادداشت های پیشین درباره مدیریت ریسک امنیت آب و نقش آبخیزداری در تقویت امنیت آب است. در یادداشت ها، بر لایروبی سدها، احیای قنات ها، آبخوانداری، پخش سیلاب و مشارکت مردمی تأکید شد. اکنون، برداشت آب از هوا به عنوان یک منبع مکمل جدید به این مجموعه اضافه می شود.

تصویر کامل مدیریت آب در ایران، ترکیبی از این راهکارها هست:

آب طبیعی (باران، رودخانه، آبخوان) + آب غیرمتعارف (برداشت از هوا، شیرین سازی) + آب بازیافتی (پساب تصفیه شده) + ذخیره سازی (سدها، سدهای خاکی، آبخوانداری، مخازن) + بهره‌وری (نانوحباب، آبیاری هوشمند، کاهش نشت) + مشارکت مردمی (تعاونی ها، صندوق های محلی، اقتصاد مردم بنیان)

این همان سبد هوشمند و غیرمتمرکز منابع آب است که می تواند ایران را از بحران کم آبی عبور دهد و به سوی آینده ای پایدار، تاب آور و سرسبز هدایت کند.