

استخراج‌کننده آب اتمسفر با سیستم‌های تجدیدپذیر و خورشیدی برای گذر از بحران آب در ایران

محمد فلاحیان، حمیدرضا زارع

۱- گروه مهندسی برق، دانشگاه ملی مهارت، شیراز، ایران mohammad.falahian81@gmail.com

۲- گروه مهندسی برق، دانشگاه ملی مهارت، شیراز، ایران eng.hamidrezazare@gmail.com

چکیده

کمبود آب شیرین، امروزه به یکی از جدی‌ترین چالش‌های جهانی تبدیل شده و زندگی بیش از دو میلیارد نفر را تحت تأثیر قرار داده است. ایران نیز به دلیل موقعیت جغرافیایی خود در منطقه ی خشک و نیمه‌خشک، به شدت با بحران آب دست‌وپنجه نرم می‌کند. در چنین شرایطی، استخراج آب از هوای اطراف، با بهره‌گیری از انرژی خورشیدی و سایر منابع تجدیدپذیر، به عنوان یک راهکار نوین و غیرمتمرکز برای تأمین آب شیرین مطرح شده است. در این مقاله، با روشی تحلیلی-مروری، دو فناوری پیشرو در این زمینه بررسی شده‌اند: نخست، سیستمی که توسط گروهی از پژوهشگران دانشگاه علم و صنعت ملک عبدالله^۱ طراحی شده و بر پایه ی «پل‌های انتقال جرم» کار می‌کند؛ و دوم، رویکردی که بر «انتقال جرم در فرایند جذب» تأکید دارد و توسط تیم دیگری ارائه شده است. هدف اصلی، ارزیابی قابلیت اجرای این دو فناوری در اقلیم‌های گوناگون ایران است. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که سیستم‌های خورشیدی استخراج آب از هوا، در مناطق مرطوب شمالی مانند بابلسر و رامسر، و حتی در مناطق نیمه‌خشک مثل تهران، عملکرد امیدوارکننده‌ای دارند. برای نمونه، سیستم غیرفعال اول در رطوبت ۹۰ درصد، توانسته به نرخ تولید ۰٫۶۵ لیتر آب در هر مترمربع در ساعت دست یابد و حتی در رطوبت ۴۰ درصد نیز به کار خود ادامه دهد. رویکرد دوم نیز با هدایت هدفمند مولکول‌های آب درون یک بستر جاذب، امکان تولید پیوسته آب را بدون نیاز به جابه‌جایی مکانیکی فراهم می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی ساختار و استفاده از انرژی‌های پاک، می‌توان از این فناوری‌ها برای تأمین آب آشامیدنی و آبیاری در مناطق دورافتاده و کم‌آب ایران بهره برد.

کلمات کلیدی: استخراج آب از اتمسفر، انرژی خورشیدی، انتقال جرم، جاذب‌های رطوبتی، بحران آب در ایران، سیستم‌های غیرمتمرکز تأمین آب.

^۱ KAUST



۱. مقدمه

۱-۱- بحران آب در ایران و جهان

کمبود آب شیرین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های فراوری جامعه بشری، ابعاد گسترده‌ای از جمله سلامت عمومی، امنیت غذایی، توسعه اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی را تحت تأثیر قرار داده است. بر اساس گزارش‌های معتبر، حدود دوسوم جمعیت جهان (حدود ۴ میلیارد نفر) حداقل یک ماه از سال در شرایط کمبود شدید آب زندگی می‌کنند. در این میان، ایران با میانگین بارندگی کمتر از یک‌سوم متوسط جهانی و واقع شدن در منطقه خشک و نیمه‌خشک، با بحرانی عمیق‌تر روبروست. برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، کاهش سطح سفره‌های آب‌دار، خشک شدن تالاب‌ها و ریزگردها، همگی نشانه‌هایی از این بحران فزاینده هستند.

اتمسفر زمین، منبعی عظیم و تا حد زیادی ناشناخته از آب شیرین محسوب می‌شود. برآوردها نشان می‌دهد که حجم بخار آب موجود در اتمسفر حدود ۱۲۹۰۰ تریلیون لیتر است که معادل شش برابر حجم کل آب شیرین موجود در رودخانه‌های جهان می‌باشد. این منبع، برخلاف منابع آب سطحی و زیرزمینی، محدودیت جغرافیایی نداشته و در دسترس بودن آن با گرمایش جهانی نیز در حال افزایش است. استخراج آب از اتمسفر، به‌ویژه با بهره‌گیری از انرژی خورشیدی، می‌تواند راه‌حلی پایدار برای تأمین آب شیرین در مناطق دورافتاده، جزایر و مناطقی که به منابع آب متمرکز دسترسی ندارند، ارائه دهد.

۱-۲- هدف و ساختار مقاله

هدف این مقاله، بررسی تطبیقی دو رویکرد نوین در زمینه استخراج آب اتمسفری با انرژی خورشیدی و ارزیابی قابلیت کاربرد آنها در شرایط اقلیمی ایران است. رویکرد اول، سیستم استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی^۱ است که توسط گروهی از پژوهشگران در دانشگاه علم و صنعت ملک عبدالله ارائه شده و بر اساس پل‌های انتقال جرم^۲ و محلول لیتیم کلرید^۳ عمل می‌کند. رویکرد دوم، مفهوم انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب^۴ است که توسط چو و همکاران مطرح شده و بر جذب و واجذب هم‌زمان مولکول‌های آب در دو طرف یک بستر جاذب ثابت تأکید دارد.

ساختار مقاله به این صورت است: پس از مقدمه، در بخش دوم به معرفی و تحلیل سیستم استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی پرداخته می‌شود. بخش سوم به بررسی سیستم مفهوم انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب اختصاص دارد. در بخش چهارم، این دو رویکرد با یکدیگر مقایسه شده و مزایا و محدودیت‌های هر یک تبیین می‌شود. بخش پنجم به بررسی پتانسیل کاربرد این فناوری‌ها در اقلیم‌های مختلف ایران با استناد به پژوهش‌های پیشین می‌پردازد. در بخش ششم، چالش‌ها و چشم‌انداز آینده مورد بحث قرار گرفته و در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه می‌شود.

^۱ SAWE^۲ MTBs^۳ LiCl^۴ MT-SAWH



۲. سیستم استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی

۲-۱. اصول طراحی و عملکرد

سیستم استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی ارائه شده توسط گان و همکاران، یک دستگاه کاملاً غیرفعال است که می‌تواند به‌طور پیوسته و بدون نیاز به نگهداری دوره‌ای، آب شیرین تولید کند. هسته اصلی این سیستم، ساختار سه‌بعدی پل‌های انتقال جرم است که از ورق‌های غشای الیاف شیشه‌ای^۱ ساخته شده و با محلول اشباع لیتیم کلرید تزریق می‌شود.

مکانیسم عملکرد این سیستم بر اساس دو ناحیه عملکردی متمایز در ساختار پل‌های انتقال جرم استوار است (شکل ۱ الف و ب در مقاله اصلی):

- ناحیه جذب آب اتمسفری (دمای اتاق): بخش پایینی پل‌های انتقال جرم که در معرض محیط قرار دارد. محلول لیتیم کلرید موجود در این بخش، رطوبت هوا را جذب می‌کند.

- ناحیه تولید بخار (دمای بالا): بخش بالایی پل‌های انتقال جرم که در یک محفظه شیشه‌ای محصور شده است. یک جاذب خورشیدی که از نانولوله‌های کربنی نیمه‌اکسیده^۲ بر روی ورق‌های غشای الیاف شیشه‌ای ساخته شده، نور خورشید را به انرژی گرمایی تبدیل می‌کند. این گرما سبب تبخیر آب از محلول جاذب در این ناحیه می‌شود.

کلید نوآوری این سیستم در فرایند خودتنظیم انتقال جرم است:

۱. جذب رطوبت: محلول لیتیم کلرید در ناحیه پایینی، مولکول‌های آب را از هوای محیط جذب کرده و آنها را در ساختار پل‌های انتقال جرم ذخیره می‌کند.

۲. انتقال موئینه: آب جذب‌شده به‌دلیل خاصیت موئینگی الیاف ورق‌های غشای الیاف شیشه‌ای و گرادیان غلظت ایجادشده، به‌سمت ناحیه بالایی با دمای بالاتر حرکت می‌کند.

۳. تبخیر و تولید آب: در ناحیه بالایی، گرمای تولیدشده توسط جاذب خورشیدی، آب را تبخیر کرده و بخار آب تولید می‌کند. این بخار روی دیواره‌های خنک‌تر محفظه شیشه‌ای متراکم شده و به‌صورت آب شیرین جمع‌آوری می‌شود.

۴. بازگشت جاذب: محلول لیتیم کلرید غلیظ‌شده در ناحیه بالایی، به‌دلیل گرادیان غلظت، مجدداً به سمت پایین حرکت کرده و چرخه جدیدی از جذب رطوبت را آغاز می‌کند.

این چرخه خودبه‌خودی و پیوسته، بدون نیاز به هیچ گونه عملیات دستی یا قطعات متحرک، امکان تولید آب در طول شبانه‌روز را فراهم می‌سازد.

^۱ GFM

^۲ CNTs



۲-۲. عملکرد و بهره‌وری

سیستم استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی نمونه اولیه با سطح تبخیر 3×3 سانتی‌متر، در یک محیط کنترل‌شده مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که این سیستم:

- در رطوبت نسبی ۹۰٪ و تحت تابش ۱ خورشید، به نرخ تولید آب تثبیت‌شده ۶۵/۰ لیتر بر مترمربع در ساعت دست می‌یابد که معادل بازده جمع‌آوری آب-خورشید ۳٪/۴۴ است.

- در محیط‌های خشک‌تر با رطوبت نسبی تا ۴۰٪ نیز عملکرد خود را حفظ می‌کند.

- پتانسیل تولید آب جهانی آن در مناطق استوایی با تابش خورشیدی فراوان و رطوبت بالا، به حداکثر ۶/۴ لیتر بر مترمربع در روز می‌رسد.

برای تأیید کاربرد عملی، یک نمونه بزرگ‌شده با سطح تبخیر $24 \times 5/13$ سانتی‌متر در شهر ثول، عربستان سعودی به مدت ۳۵ روز در دو فصل تابستان و پاییز آزمایش شد. نتایج آزمایش‌های میدانی نشان داد:

- در تابستان، تولید آب روزانه بین ۰/۲ تا ۰/۳ لیتر بر مترمربع در روز متغیر بود.

- در پاییز، این مقدار بین ۰/۱ تا ۸/۲ لیتر بر مترمربع در روز گزارش شد.

کیفیت آب تولیدشده نیز با اندازه‌گیری غلظت یون‌ها و سلول‌های میکروبی ارزیابی شد. تمام شاخص‌های یونی پایین‌تر از مقادیر راهنمای سازمان جهانی بهداشت^۱ بودند و شاخص‌های میکروبیولوژیکی کمتر از حد تشخیص بودند که نشان‌دهنده کیفیت مطلوب آب برای آشامیدن و آبیاری است.

۲-۳. کاربرد در آبیاری

یکی از جذاب‌ترین کاربردهای سیستم استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی، آبیاری خارج از شبکه است. در آزمایشی جداگانه، آب جمع‌آوری‌شده از اتمسفر برای آبیاری گیاهان کلم چینی^۲ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که زیست‌توده گیاهان آبیاری‌شده با آب اتمسفری، قابل‌مقایسه با گیاهانی بود که با آب شیر معمولی آبیاری شده بودند. در مقابل، گیاهانی که آبیاری نشدند، هیچ نشانه‌ای از رشد نشان ندادند. این یافته، پتانسیل سیستم استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی را برای تأمین آب مورد نیاز کشاورزی در مناطق دورافتاده و کم‌آب به‌خوبی نشان می‌دهد.

۳. مفهوم انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب

۳-۱. از ناپیوستگی تا پیوستگی: نگاهی نو به انتقال جرم

سیستم‌های سنتی استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب معمولاً به‌صورت ناپیوسته عمل می‌کنند. در این سیستم‌ها، جذب در شب رطوبت هوا را جذب کرده و در طول روز با استفاده از انرژی خورشیدی، آب جذب‌شده را آزاد می‌کند. این ماهیت

^۱ WHO

^۲ Brassica rapa



چرخه‌ای، دو اشکال اساسی دارد: (۱) تولید آب به‌صورت متناوب و ناپیوسته انجام می‌شود، و (۲) ظرفیت تولید آب توسط ظرفیت جذب جذب محدود می‌شود.

چو و همکاران در مقاله خود با عنوان "پیشرفت‌ها در برداشت آب اتمسفری: به‌سوی عملکرد پیوسته از طریق بهینه‌سازی انتقال جرم"، ریشه این ناپیوستگی را در عدم توجه به فرایند انتقال جرم درون جذب دانسته و مفهوم جدیدی به نام انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب را معرفی کرده‌اند. به‌باور آنها، سیستم‌های استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی فعلی به‌جای نگاه سیستمی به کل فرایند انتقال جرم، صرفاً بر جذب سطحی و واجذب سطحی متمرکز شده‌اند و از مهاجرت جهت‌دار مولکول‌های آب درون جذب غافل مانده‌اند.

۲-۳. اصول و مکانیسم مفهوم انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب

در سیستم مفهوم انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب، بستر جذب ثابت است و فرایندهای جذب و واجذب به‌طور هم‌زمان در دو طرف آن انجام می‌شود (شکل ۳b در مقاله اصلی). (این امر با ایجاد یک گرادیان پتانسیل شیمیایی در دو طرف جذب محقق می‌شود:

۱. سمت جذب: با استفاده از یک سیستم خنک‌کننده، دمای یک طرف جذب کاهش داده می‌شود. این امر باعث افزایش ظرفیت جذب جذب و جذب مولکول‌های آب از هوای محیط می‌شود.

۲. سمت واجذب: در طرف مقابل، با استفاده از یک منبع حرارتی (مانند انرژی خورشیدی یا یک سیستم گرمایشی کمکی)، دما افزایش یافته و مولکول‌های آب جذب‌شده، به‌صورت بخار آزاد می‌شوند.

۳. انتقال جرم داخلی (مهم‌ترین بخش): مولکول‌های آب جذب‌شده در سمت سرد، به‌دلیل گرادیان غلظت (یا گرادیان پتانسیل شیمیایی)، درون ساختار جذب به سمت گرم مهاجرت کرده و بلافاصله آزاد می‌شوند.

این فرایند جذب-نفوذ-واجذب پیوسته، به سیستم اجازه می‌دهد تا بدون نیاز به اشباع و بازسازی دوره‌ای جذب، به‌طور مداوم آب تولید کند. به عبارت دیگر، جذب در این سیستم نقش یک پمپ مولکولی را ایفا می‌کند که مولکول‌های آب را از یک طرف برداشت و در طرف دیگر تحویل می‌دهد.

۳-۳. مزایای سیستم مفهوم انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب در مقایسه با سیستم‌های سنتی

بر اساس تحلیل پژوهشگران، سیستم مفهوم انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب مزایای قابل توجهی نسبت به سیستم‌های ناپیوسته و حتی پیوسته‌ای که بر پایه جابه‌جایی فیزیکی جاذب‌ها کار می‌کنند، دارد:

- سادگی طراحی: عدم نیاز به قطعات متحرک یا جابه‌جایی دوره‌ای بسترهای جذب، پیچیدگی سیستم را به‌شدت کاهش می‌دهد.
- قابلیت اطمینان بیشتر: با حذف قطعات متحرک، احتمال خرابی سیستم کاهش یافته و نیاز به نگهداری کمتر می‌شود.
- افزایش بازده: به‌دلیل حذف زمان‌های توقف برای بازسازی جاذب (سورتینگ)، زمان مفید تولید آب افزایش یافته و بازده کلی سیستم بهبود می‌یابد.

- استفاده بهینه از جاذب: در سیستم مفهوم انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب، جاذب به‌طور مداوم در حال جذب و واجذب است و بنابراین از کل ظرفیت جاذب به‌طور مؤثری استفاده می‌شود. در مقابل، در سیستم‌های ناپیوسته، جاذب پس از اشباع، تا زمان واجذب، غیرفعال می‌ماند.

پژوهشگران با مقایسه سیستم‌های مختلف استخراج آب از هوای اتمسفر با استفاده از انرژی خورشیدی^۱ بر اساس نرخ تولید آب و محدوده رطوبت نسبی قابل کاربرد، نشان داده‌اند که سیستم‌های مبتنی بر بهینه‌سازی انتقال جرم درون جاذب (مانند مفهوم انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب)، عملکرد برتری در تولید آب پیوسته و پایدار دارند و می‌توانند محدوده وسیع‌تری از رطوبت نسبی را پوشش دهند.

۴. تحلیل تطبیقی و همگرایی دو رویکرد

اگرچه سیستم استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی ارائه‌شده توسط گان و مفهوم انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب ارائه‌شده توسط چو از دو مسیر متفاوت به مسئله استخراج آب اتمسفری نگاه کرده‌اند، اما هر دو بر یک اصل اساسی تأکید دارند: اهمیت انتقال جرم پیوسته و کارآمد برای دستیابی به تولید آب بدون وقفه.

جدول ۱. مقایسه تطبیقی دو رویکرد استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی و مفهوم انتقال جرم در استخراج

ویژگی	سیستم استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی	مفهوم انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب
مکانیسم اصلی	انتقال جرم خودبه‌خود از طریق پل‌های انتقال جرم و گرادیان غلظت ناشی از تبخیر	جذب-نفوذ-واجذب هم‌زمان از طریق گرادیان دما در دو طرف جاذب ثابت
جاذب	محلول لیتیم کلرید درون پل‌های انتقال جرم	جاذب جامد یا مایع با ساختار متخلخل و قابلیت انتقال داخلی آب
نیروی محرکه	گرادیان غلظت (ناشی از تبخیر در ناحیه گرم) و اثر موئینگی	گرادیان دما (اختلاف دمای دو طرف جاذب) و گرادیان غلظت

^۱ SAWH

حالت عملیاتی	کاملاً غیرفعال و بدون نیاز به نگهداری	می‌تواند غیرفعال یا با تجهیزات کمکی (فن، گرمایش کمکی) باشد
مزیت کلیدی	خودتنظیمی، عدم نیاز به عملیات دستی، قابلیت آبیاری خارج از شبکه	سادگی طراحی، پتانسیل برای استفاده در طیف وسیع‌تری از رطوبت‌ها
چالش اصلی	وابستگی به رطوبت نسبی بهینه در ($RH > 40\%$)، مدیریت آلودگی‌های هوا	طراحی مواد جاذب با نفوذپذیری بالا، مدیریت تعادل حرارتی و جرمی

آب اتمسفری مبتنی بر جذب

نکته کلیدی: هر دو رویکرد بر اهمیت مهاجرت جهت‌دار مولکول‌های آب درون یک محیط متخلخل یا جاذب تأکید دارند. سیستم استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی این امر را با طراحی فیزیکی پل‌های انتقال جرم و استفاده از جاذب مایع محقق می‌سازد، در حالی که رویکرد مفهوم انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب بر طراحی خود جاذب و ایجاد گرادیان پتانسیل برای هدایت این حرکت متمرکز است. به عبارتی، سیستم استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی یک نمونه عملی و موفق از پیاده‌سازی مفهوم انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب در مقیاس آزمایشگاهی و میدانی محسوب می‌شود.

۵. پتانسیل کاربرد در ایران: فرصت‌ها و چالش‌ها

۵-۱. تنوع اقلیمی ایران و پتانسیل استخراج آب از هوا

ایران به دلیل تنوع جغرافیایی و اقلیمی، از پتانسیل‌های متفاوتی برای استخراج آب از هوا برخوردار است. پژوهش‌های متعددی به بررسی عملکرد سیستم‌های استخراج آب اتمسفری در اقلیم‌های مختلف ایران پرداخته‌اند که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود.

- شهرهای ساحلی شمالی (رطوبت بالا): شهرهای بابل، رامسر و رشت با میانگین رطوبت نسبی بالا، پتانسیل بسیار خوبی برای سیستم‌های جذبی و استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی دارند. مطالعه‌ای بر روی سیستم جذبی مبتنی بر سیلیکاژل در بابل نشان داد که این سیستم می‌تواند پاسخگوی نیاز آبی یک سیستم تولید هم‌زمان آب و برق خارج از شبکه باشد. همچنین نتایج یک مطالعه عددی بر روی ترکیب سیستم تقطیر خورشیدی و استخراج آب از هوا نشان داد که در رامسر، این سیستم می‌تواند عملکرد قابل توجهی داشته باشد.

- شهرهای مرکزی و نیمه‌خشک (رطوبت متوسط تا پایین): تهران با اقلیم نیمه‌خشک، پتانسیل متوسطی دارد. تحقیقات نشان داده است که سیستم‌های خورشیدی با بهره‌گیری از کلکتورهای سهموی^۱ و چرخه تبرید جذبی آمونیاکی می‌توانند در تهران با جذب حداکثر ۳۵/۴۸ کیلووات‌ساعت انرژی خورشیدی در ماه، آب تولید کنند.
- مناطق خشک و کویری (رطوبت پایین): چالش اصلی در این مناطق، رطوبت پایین هواست. با این حال، سیستم استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی ارائه‌شده توسط گان توانسته است در رطوبت نسبی تا ۴۰٪ نیز عملکرد خود را حفظ کند. همچنین استفاده از مواد جاذب پیشرفته مانند موف^۲ ها می‌تواند کارایی سیستم‌های استخراج آب از هوا را در اقلیم‌های خشک بهبود بخشد.

جدول ۲. خلاصه پژوهش‌های مرتبط با پتانسیل استخراج آب از هوا در ایران

رویکرد	شهر(های) هدف	نتایج کلیدی
سیستم تبرید جذبی با کلکتور سهموی	تهران، بندرعباس، رامسر	پیش‌بینی تولید آب بر اساس داده‌های اقلیمی؛ جذب ۳۵/۴۸ کیلووات‌ساعت انرژی در تهران
سیستم جذبی مبتنی بر سیلیکاژل	بابل‌سر	تأیید امکان‌پذیری تولید آب در سیستم هم‌زمان آب و برق خارج از شبکه
سیستم ترکیبی تقطیر و استخراج با ترموالکتریک	رامسر، بوشهر، رشت	افزایش ۱۳۴٪ عملکرد در رامسر با بازیابی حرارتی؛ تولید سالانه ۱۲۰۱۱ کیلوگرم آب در بهترین حالت
سیستم غیرفعال استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی (لیتیوم کلرید)	ثول (عربستان سعودی) قابل تعمیم به شمال ایران	تولید ۶۵/۰ لیتر بر مترمربع در ساعت در RH=90٪؛ عملکرد در RH تا ۴۰٪

^۱ CPC^۲ MOF



۵-۲. کاربردهای بالقوه در ایران

۱. تأمین آب آشامیدنی در مناطق دورافتاده: بسیاری از روستاها و مناطق عشایری در ایران به شبکه آب سراسری متصل نیستند و حمل آب با تانکر، هزینه‌بر و دشوار است. سیستم‌های خورشیدی استخراج آب از هوا می‌توانند به‌عنوان یک منبع غیرمتمرکز و پایدار، آب آشامیدنی مورد نیاز این مناطق را تأمین کنند. سیستم استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی با قابلیت عملکرد غیرفعال و بدون نیاز به نگهداری، گزینه‌ای بسیار مناسب برای این کاربرد است.
۲. آبیاری خارج از شبکه: همان‌طور که در آزمایش آبیاری کلم چینی در عربستان سعودی نشان داده شد، آب استخراج‌شده از هوا می‌تواند برای آبیاری گیاهان و درختان در مناطق کم‌آب مورد استفاده قرار گیرد. این امر به‌ویژه در طرح‌های جنگل‌کاری و فضای سبز شهری در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران (مانند طرح "کاشت یک میلیارد درخت" در عربستان سعودی که گان به آن اشاره کرده) کاربرد فراوانی دارد.
۳. کمک به مدیریت بحران‌های طبیعی: پس از وقوع بلایای طبیعی مانند زلزله، سیل یا خشکسالی‌های شدید که ممکن است به زیرساخت‌های تأمین آب شهری آسیب وارد شود، سیستم‌های قابل حمل استخراج آب از هوا می‌توانند به‌عنوان یک منبع آب جایگزین و سریع‌الوصول مورد استفاده قرار گیرند.
۴. تأمین آب برای گلخانه‌ها و کشاورزی دقیق: در گلخانه‌های مناطق مرکزی ایران که با کمبود آب مواجه هستند، این سیستم‌ها می‌توانند رطوبت داخل گلخانه را جذب کرده و به آب مایع تبدیل کنند. این کار هم رطوبت گلخانه را کنترل کرده و هم آب مورد نیاز آبیاری را تأمین می‌نماید.

۶. چالش‌ها و چشم‌انداز آینده

با وجود پتانسیل بالای فناوری‌های استخراج آب از هوا، موانعی برای پذیرش گسترده آنها وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرند.

۶-۱. چالش‌های فنی و اقتصادی

- وابستگی به رطوبت نسبی: مهم‌ترین چالش، کاهش بازده سیستم‌ها در رطوبت‌های پایین است. اگرچه سیستم‌های جدید مانند سیستم استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی گان تا $RH=40\%$ عملکرد دارند، اما در اقلیم‌های بسیار خشک و کویری ایران (با RH زیر 20% در برخی فصول)، کارایی آنها به‌شدت کاهش می‌یابد. پژوهش در زمینه مواد جاذب جدید با کارایی بالا در رطوبت پایین (مانند موف‌ها) و سیستم‌های ترکیبی ضروری است.
- هزینه سرمایه‌گذاری اولیه: ساخت جاذب‌های پیشرفته (مانند سی‌ان‌تی^۱ ها، موف‌ها و لیتیم کلرید با خلوص بالا) و تجهیزات جانبی (مانند کلکتورهای خورشیدی، پنل‌های فتوولتائیک و سیستم‌های خنک‌کننده) هزینه‌بر است. برای کاربردهای گسترده در ایران، نیاز به بومی‌سازی فناوری و استفاده از مواد ارزان‌قیمت‌تر (مانند سیلیکاژل) یا توسعه روش‌های تولید مقیاس‌پذیر احساس می‌شود.

^۱ CNT



- آلودگی هوا و کیفیت آب: از آنجایی که آب از هوای محیط استخراج می‌شود، کیفیت آن مستقیماً تحت تأثیر آلودگی‌های هوا (ذرات معلق، ترکیبات شیمیایی و میکروارگانیسم‌ها) قرار می‌گیرد. در کلان‌شهرهای ایران با آلودگی هوای بالا، تصفیه تکمیلی آب تولیدی یا استفاده از فیلترهای ورودی هوا ضروری است. همچنین نیاز به پروتکل‌های نگهداری و تمیزکاری منظم برای جلوگیری از رشد میکروبی درون سیستم وجود دارد.

۶-۲. چشم‌انداز آینده و مسیر پیش رو

۱. توسعه مواد جاذب نسل جدید: تحقیقات در زمینه مواد جاذب با ظرفیت جذب بالا، سینتیک سریع و هزینه پایین، کلید اصلی پیشرفت این فناوری است. ترکیب جاذب‌های نمکی با بسترهای متخلخل (مانند هیدروژل‌ها و چوب‌های اسفنجی) و استفاده از موف‌ها، مسیرهای امیدوارکننده‌ای هستند.
۲. بهینه‌سازی سیستم با رویکرد انتقال جرم: همان‌طور که در رویکرد مفهوم انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب تأکید شد، طراحی سیستم نباید صرفاً بر مواد جاذب متمرکز باشد، بلکه باید بر بهینه‌سازی کل فرایند انتقال جرم از هوا تا مخزن آب متمرکز گردد. این شامل طراحی هوشمندانه مسیرهای انتقال، ایجاد گرادیان‌های دمایی و غلظتی مؤثر، و مدیریت بهینه حرارت و جرم است.
۳. تأمین انرژی با منابع تجدیدپذیر ترکیبی: استفاده ترکیبی از انرژی خورشیدی حرارتی، فتوولتائیک و حتی باد می‌تواند پایداری سیستم را افزایش دهد. ذخیره‌سازی انرژی حرارتی با استفاده از مواد تغییر فازدهنده^۱ می‌تواند امکان تولید آب در شب یا روزهای ابری را فراهم کند.
۴. یکپارچه‌سازی با کشاورزی و صنعت: طراحی سیستم‌های یکپارچه که علاوه بر تولید آب، بتوانند برق تولید کنند (هم‌زمان آب و برق (یا از آب تولیدی برای سرمایش یا گرمایش استفاده نمایند، می‌تواند توجیه اقتصادی این فناوری را افزایش دهد.

۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مقایسه دو رویکرد استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی و مفهوم انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب نشان می‌دهد که هر دو با بهره‌گیری از اصول انتقال جرم، گام‌های بلندی در جهت رفع محدودیت‌های سیستم‌های سنتی استخراج آب از هوا برداشته‌اند. سیستم استخراج آب اتمسفری با نیروی خورشیدی ارائه‌شده توسط گان، یک نمونه عملی و موفق از سیستمی کاملاً غیرفعال و با نگهداری پایین است که پتانسیل بالایی برای کاربرد در مناطق با رطوبت متوسط تا بالا، از جمله مناطق ساحلی شمال ایران، دارد. از سوی دیگر، مفهوم انتقال جرم در استخراج آب اتمسفری مبتنی بر جذب یک چارچوب نظری و طراحی کلی ارائه می‌دهد که می‌تواند برای توسعه نسل‌های بعدی سیستم‌های استخراج آب با بهره‌وری بالاتر و در محدوده وسیع‌تری از رطوبت‌ها، از جمله اقلیم‌های خشک‌تر ایران، مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به تنوع اقلیمی ایران و شدت بحران آب در بسیاری از مناطق، به‌کارگیری این فناوری‌ها می‌تواند نقش مؤثری در مدیریت پایدار منابع آب ایفا کند. با این حال، برای دستیابی به کاربرد عملی و گسترده، پیشنهادات زیر ارائه می‌شود:

۱. انجام مطالعات امکان‌سنجی منطقه‌ای: با استفاده از داده‌های اقلیمی دقیق از شهرهای مختلف ایران (مانند تهران، مشهد، اصفهان، شیراز، بندرعباس، رشت و بابل‌سر)، پتانسیل واقعی تولید آب با هر یک از فناوری‌های موجود شبیه‌سازی و محاسبه شود. مطالعات پیشین در این زمینه نشان‌دهنده پتانسیل قابل توجهی در شهرهای شمالی و نیمه‌خشک است.

^۱ PCM

۲. ساخت و آزمایش نمونه‌های داخلی: با توجه به تحریم‌ها و محدودیت‌های دسترسی به فناوری‌های خارجی، تمرکز بر بومی‌سازی و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی با استفاده از مواد در دسترس (مانند سیلیکاژل، نمک‌های کلریدی و کلکتورهای خورشیدی ساده) ضروری است.

۳. حمایت از پژوهش‌های دانشگاهی: تأسیس مراکز تحقیقاتی تخصصی در حوزه استخراج آب از هوا در دانشگاه‌های کشور و حمایت از پایان‌نامه‌های تحصیلات تکمیلی با تمرکز بر طراحی مواد جاذب جدید و بهینه‌سازی سیستم‌ها با رویکرد انتقال جرم.

۴. برنامه‌ریزی برای کاربردهای پایلوت: انتخاب یک منطقه روستایی یا یک پروژه پایلوت (مانند تأمین آب یک گلخانه یا فضای سبز شهری) برای نصب و ارزیابی عملی سیستم‌های استخراج آب از هوا و جمع‌آوری داده‌های عملکردی در شرایط واقعی.

۵. توجه به چرخه حیات و پایداری: ارزیابی دقیق هزینه‌های چرخه عمر، مصرف انرژی و اثرات زیست‌محیطی این سیستم‌ها و مقایسه آنها با روش‌های سنتی تأمین آب (مانند انتقال آب با تانکر یا شیرین‌سازی آب دریا) برای تصمیم‌گیری بهتر در سطح کلان.

در نهایت، استخراج آب از اتمسفر با انرژی خورشیدی، اگرچه راه‌حلی جادویی برای همه مشکلات آبی نیست، اما می‌تواند به‌عنوان یک گزینه ارزشمند در سبد راه‌حل‌های مدیریت منابع آب ایران، به‌ویژه در مناطق دورافتاده و برای کاربردهای خاص مانند آبیاری و تأمین آب آشامیدنی اضطراری، جایگاه ویژه‌ای پیدا کند.

۸. مراجع

1. Sadi, M., & Arabkoohsar, A. (2022). Energy and exergy analysis of an atmospheric water generator integrated with the compound parabolic collector with storage tank in various climates. ScienceDirect.
2. Gan, Q., Yang, K., Pan, T., et al. (2024). A solar-driven atmospheric water extractor for off-grid freshwater generation and irrigation. Nature Communications, 15.
3. Chu, W., Ding, J., Peng, C., & Xu, Z. (2024). Advancements in atmospheric water harvesting: toward continuous operation through mass transfer optimization. Communications Engineering, 3.
4. Chu, W., Ding, J., Peng, C., & Xu, Z. (2024). Advancements in atmospheric water harvesting: toward continuous operation through mass transfer optimization (Challenges section). Nature.
5. (2026). Synergistic MOF-based composite enabling significant solar-to-water generation enhancement in climate-resilient AWH. Nature Communications.



6. (2018). Thermodynamic analysis and improvement of a novel solar driven atmospheric water generator. ScienceDirect.
 7. Gan, Q., Yang, K., Pan, T., et al. (2024). A solar-driven atmospheric water extractor for off-grid freshwater generation and irrigation – Abstract. Europe PMC.
 8. Chu, W., Ding, J., Peng, C., & Xu, Z. (2024). Advancements in atmospheric water harvesting: toward continuous operation through mass transfer optimization – Abstract. Stanford University.
 9. Ji, X., Shan, H., Zhou, J., et al. (2026). Hygroscopic wood sponge with dual phase change function for enhanced all-weather atmospheric water harvesting. Nature Communications.
 10. (2025). Experimental study of a solar adsorption-based atmospheric water harvesting system for off-grid cogeneration. ScienceDirect.
 11. Physics World. (2024). Solar-driven atmospheric water extractor provides continuous freshwater output.
 12. (2026). Toward practical atmospheric water harvesting technologies. Science | AAAS.
 13. Chu, W., Ding, J., Peng, C., & Xu, Z. (2024). Advancements in atmospheric water harvesting: toward continuous operation through mass transfer optimization. Semantic Scholar.
 14. (2024). Enhanced continuous atmospheric water harvesting with scalable hygroscopic gel driven by natural sunlight and wind. Nature Communications.
- Sadi, S., Ghobadian, B., & Minaei, S. (2025). Synergistic water production by a combined atmospheric water generator and distillation powered by solar energy: a numerical analysis for Iran. Fraunhofer-Publica.