



Urban Water Sustainability through Energy-Free Fog Water Harvesting: A Review of Fog-Collecting Systems

Mohammadali Allahrabbi Shirazi¹ | Hossein Yousefi^{2*} | Amirhossein Fathi³ | Mehdi Baneshi⁴

1. PhD Student, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: aliallahrabbi@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Professor, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: hosseinyousefi@ut.ac.ir
3. Assistant Professor, School of Mechanical Engineering, University of Shiraz, Shiraz, Iran. Email: afathi@shirazu.ac.ir
4. Associate Professor, School of Mechanical Engineering, University of Shiraz, Shiraz, Iran. Email: mbaneshi@shirazu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 23 September 2025
Revised 02 November 2025
Accepted 21 November 2025
Published Online 01 January 2026

Keywords:
Urban water supply,
Fog water harvesting,
Energy-free technology,
Fresh water production,
PRISMA method,
Sustainable development.

ABSTRACT

This study reviews and analyzes methods for producing freshwater in urban systems, focusing on water harvesting from fog, a method that allows sustainable water supply without consuming energy in the production phase. Using the PRISMA approach, 20 selected studies were selected for the final analysis from 215 studies. The results show that most of the early research focused on collector geometry and was limited to simultaneous consideration of material properties, long-term durability, spatial analysis, and long-term operational data. Recent studies have focused on novel materials, biomimetic design, nanotechnology, and artificial intelligence modeling to increase system efficiency and sustainability. Passive fog collection systems can produce an average of 1.5 to 10 liters per square meter per day of water, and on an urban scale, replacing part of the water consumption can generate significant energy savings. The findings of this study can provide a clear path for future research and show policymakers the possibility of utilizing new capacities for sustainable urban water supply.

Cite this article: Allahrabbi Shirazi, M.; Yousefi, H.; Fathi, A. & Baneshi, M. (2026). Urban Water Sustainability through Energy-Free Fog Water Harvesting: A Review of Fog-Collecting Systems. *Urban Development Policy Making*, 3 (1), 69-94. DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2025.558718.1073>



© Mohammadali Allahrabbi Shirazi, Hossein Yousefi, Amirhossein Fathi, Mehdi Baneshi
DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2025.558718.1073>

Introduction

Water is one of the most vital resources on Earth and plays a fundamental role in domestic, industrial, power and agricultural sectors. Despite the relative abundance of water, usable freshwater resources are limited and only about 0.6% of it is readily available. The increase in urban population, changing lifestyles and economic development have greatly increased the demand for water and it is predicted that between 2.2 and 2.3 billion people will face severe water shortages by 2050. Water scarcity has wide-ranging impacts on meeting human needs, ecosystems and biodiversity. The use of conventional methods of urban water supply is often associated with high energy consumption and there is a need for sustainable and low-energy solutions. Water harvesting from fog, especially using fog-absorbing nets, is a novel and energy-efficient method that can provide a local and sustainable source of water.

This research, using the PRISMA approach, reviewed 20 selected studies out of 215 studies and analyzed the benefits, limitations, and parameters affecting the efficiency of fog collection systems, clarifying the path for sustainable urban research and decision-making.

Methodology

This study is a PRISMA-type systematic review that aims to investigate freshwater production methods in urban systems and analyze fog harvesting technology. Inclusion PRISMA structured approach, 215 relevant articles were searched from reputable scientific databases (Google Scholar, ScienceDirect, and Scopus) and based on the inclusion and exclusion criteria including research, focusing on fog harvesting mesh material and geometry, specialization, and full-text access, 20 final articles were selected for analysis. The review steps included screening titles and abstracts, quality assessment, key information extraction, and data analysis, and resource management was performed with EndNote software. The study will also examine the effect of mesh material and geometry on system efficiency and the potential for reducing energy consumption if the new fog harvesting method is replaced with urban sources. This analysis provides a suitable theoretical perspective for utilizing this technology in foggy and mountainous cities, despite the assumption of sufficient fog.

Conclusion

This study investigated the role of fog harvesting systems in sustainable water supply and energy consumption reduction. Early research mainly focused on the geometry of the grids and the shape of the collectors, while the effect of material type, nanocoatings and simultaneous geometry and material design have not been comprehensively investigated. Recent studies have focused on the use of novel materials, biomimetic designs, 3D structures and artificial intelligence to predict collector performance, but long-term durability, cost and scalability still need to be developed. Passive fog harvesting systems can produce between 1.5 and more than 10 liters of water per square meter of grid per day, providing a significant part of the water demand on a city scale and reducing the energy consumption associated with water treatment and transportation. Future research should focus on systematic geometry and material design, predictive modeling and long-term testing under real conditions to increase the sustainability and scalability of this technology.

پایداری شهری در تأمین آب از طریق برداشت آب از مه بدون مصرف انرژی: مروری بر سامانه‌های جمع آوری مه

محمدعلی الهربی شیرازی^۱ | حسین یوسفی^{۲*} | امیرحسین فتحی^۳ | مهدی بانسی^۴

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: aliallahrabbi@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hoseinyousefi@ut.ac.ir
۳. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: afathi@shirazu.ac.ir
۴. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: mabaneshi@shirazu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

این پژوهش به بررسی و تحلیل روش‌های تولید آب شیرین در سیستم‌های شهری با تمرکز ویژه بر برداشت آب از مه پرداخته است؛ روشی که بدون نیاز به مصرف انرژی در مرحله تولید، امکان تأمین آب پایدار را فراهم می‌آورد و می‌تواند به کاهش فشار بر منابع آب شهری کمک کند. با استفاده از رویکرد سیستماتیک PRISMA، از بین ۲۱۵ مطالعه موجود، ۲۰ مطالعه منتخب برای تحلیل نهایی انتخاب شدند تا مروری جامع بر پیشرفت‌های علمی و تکنولوژیک این حوزه ارائه شود. نتایج نشان می‌دهد بیشتر پژوهش‌های اولیه عمدتاً بر هندسه و طراحی کلکتورها تمرکز داشته‌اند، در حالی که بررسی هم‌زمان جنس مواد، دوام طولانی‌مدت، تحلیل مکانی و داده‌های عملیاتی بلندمدت هنوز محدود است. مطالعات اخیر توجه بیشتری به مواد نوین، طراحی زیست‌تقلید، فناوری نانو و به‌کارگیری مدل‌های هوش مصنوعی برای بهبود راندمان و پایداری سیستم دارند. سیستم‌های جمع‌آوری غیرفعال مه می‌توانند به طور متوسط ۱/۵ تا ۱۰ لیتر آب در روز به ازای هر مترمربع تولید کنند و در مقیاس شهری، جایگزینی بخشی از مصرف آب می‌تواند صرفه‌جویی قابل توجهی در انرژی به وجود آورد. یافته‌های این مطالعه می‌تواند مسیر روشنی برای تحقیقات آینده ارائه دهد و به سیاست‌گذاران امکان بهره‌گیری از ظرفیت‌های نوین برای تأمین پایدار آب شهری را نشان دهد.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱

کلیدواژه:

تأمین آب شهری،
برداشت آب از مه،
فناوری بدون مصرف انرژی،
تولید آب شیرین،
روش PRISMA،
توسعه پایدار.

استناد: الهربی شیرازی، محمدعلی؛ یوسفی، حسین؛ فتحی، امیرحسین و بانسی، مهدی (۱۴۰۵). پایداری شهری در تأمین آب از طریق برداشت آب از مه بدون مصرف انرژی: مروری بر سامانه‌های جمع‌آوری مه. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۳ (۱) ۶۹-۹۴.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2025.558718.1073>

© محمدعلی الهربی شیرازی، حسین یوسفی، امیرحسین فتحی، مهدی بانسی

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2025.558718.1073>



۱. مقدمه

آب از بارزترین منابع روی زمین است که در بخش‌های مختلف زندگی انسان نقش حیاتی دارد. در بخش خانگی، برای آشامیدن و فعالیتهای روزمره؛ در صنعت به عنوان حلال یا خوراک شیمیایی؛ در نیروگاه‌ها به عنوان خنک‌کننده و کشاورزی برای آبیاری، به آب نیاز دارند [۱]. با وجود فراوانی آب روی زمین، منابع قابل استفاده شیرین محدود و ناپایدار هستند؛ تنها حدود ۰/۶ درصد از آب شیرین به راحتی در دسترس است و بخش عمده آن در یخچال‌های طبیعی، یخ‌های قطبی و سفره‌های عمیق زیرزمینی قرار دارد [۲-۴]. افزایش جمعیت شهری، تغییر سبک زندگی و توسعه اقتصادی باعث افزایش شدید تقاضای آب شده است، به گونه‌ای که پیش‌بینی می‌شود تعداد افرادی که با کمبود آب شدید مواجه خواهند بود تا سال ۲۰۵۰ بین ۲/۲ تا ۲/۳ میلیارد نفر باشند؛ این به دلیل این است که انتظار می‌رود جمعیت ۳/۵ میلیارد نفری که در سال ۲۰۱۰ در مناطق شهری زندگی می‌کردند به ۶/۳ میلیارد نفر در سال ۲۰۵۰ افزایش یابد [۵ و ۶].

کمبود آب نه تنها بر تأمین نیازهای انسانی تأثیر می‌گذارد، بلکه اثرات گسترده‌ای بر اکوسیستم‌ها، پوشش گیاهی و تنوع زیستی دارد [۷ و ۸]. بخش شهری به دلیل تراکم جمعیت و الگوی مصرف بالا، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه و مناطق خشک، بیشترین فشار را بر منابع آب وارد می‌کند. استفاده از روش‌های مرسوم تأمین آب شهری اغلب با مصرف انرژی بالایی همراه است و به همین دلیل نیاز به راهکارهای پایدار و کم‌انرژی برای تأمین آب شهری احساس می‌شود [۹]. یکی از فناوری‌های نوین و تجدیدپذیر، برداشت آب از مه موجود در هوا است که در صورت استفاده از توری‌های جاذب مه می‌تواند بدون مصرف انرژی عمل کند و منبعی پایدار و محلی برای تأمین آب فراهم آورد [۱۰ - ۱۲].

استفاده محدود از فناوری برداشت آب از مه موجود در هوا در کشورهای مختلف جهان، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که دسترسی به منابع آبی محدود است، به عنوان یک راهکار نوین و پایدار برای تأمین آب آشامیدنی و کشاورزی در نظر گرفته شده است. این فناوری، که از فرایند جذب آب از رطوبت موجود در هوا استفاده می‌کند، پتانسیل بالایی برای حل مشکلات کم‌آبی در این مناطق دارد. ظرفیت این روش برای توسعه، به دلیل قابلیت بهره‌برداری از منابع غیر قابل دسترس همچون مه و بخار آب موجود در جو، موجب توجه روزافزون به آن در سطح جهانی شده است. بنابراین، این فناوری به عنوان یک راه‌حل پایدار و قابل اعتماد در مقابله با چالش‌های جهانی کم‌آبی، به‌ویژه در آینده‌ای نزدیک، جایگاه مهمی پیدا خواهد کرد. با توجه به ماهیت مروری این تحقیق، هدف تحلیل و بررسی کلیه مطالعات و نتایج موجود در زمینه برداشت آب از مه و سیستم‌های تأمین آب شهری بوده است. از این‌رو، در این مقاله به جای مرور ادبیات تحقیق، تمرکز بر ارزیابی و تحلیل نتایج پژوهش‌های پیشین در قالب یک جمع‌بندی جامع قرار گرفت. این رویکرد به ما امکان می‌دهد که تصویری کلی و سیستماتیک از وضعیت کنونی این فناوری‌ها ارائه دهیم و شکاف‌های تحقیقاتی را شناسایی کنیم.

هدف این پژوهش، بررسی و تحلیل روش‌های مختلف تولید آب شیرین در سیستم‌های شهری و ارزیابی مزایا و محدودیت‌های هر روش است. روش برداشت آب از مه به عنوان یک روش بدون مصرف انرژی در مرحله تولید آب پیشنهاد شده و تأثیر پارامترهای کلیدی مانند جنس و هندسه توری‌های جمع‌آوری مه بر کارایی این سیستم‌ها در مطالعات مختلف مرور شده است. با استفاده از رویکرد PRISMA، از میان ۲۱۵ مطالعه اولیه، ۲۰ مطالعه منتخب برای تحلیل نهایی انتخاب شدند تا تصویری جامع و سیستماتیک از وضعیت پژوهش‌های موجود ارائه شود. نتایج حاصل، علاوه بر روشن کردن مسیر پژوهش‌های آینده، می‌تواند به سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران شهری دیدگاهی عملی و نوین برای بهره‌برداری از منابع آب جایگزین و ارتقای پایداری تأمین آب شهری ارائه کند.

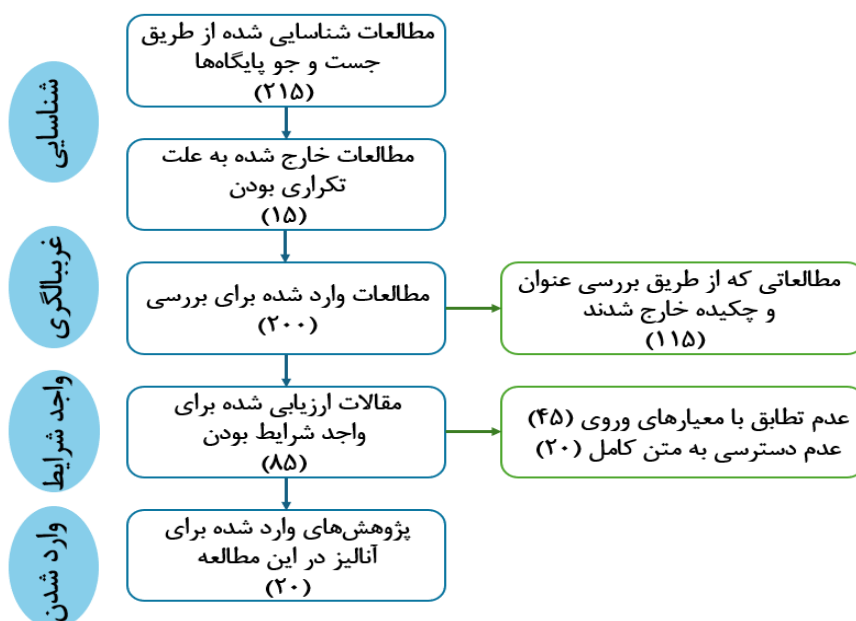
۲. روش‌شناسی

این مطالعه نوعی پژوهش مروری به روش پریسما (PRISMA) است که برای انجام مرور سیستماتیک و متاآنالیزها به منظور افزایش شفافیت و دقت در گزارش‌نویسی و انتخاب مقالات طراحی شده است [۱۳]. روش پریسما شامل مراحل جست‌وجوی مقالات، بررسی عناوین و چکیده‌ها، ارزیابی کیفیت مطالعات و تحلیل داده‌ها است. یکی از ویژگی‌های مهم این روش، استفاده از

نمودار جریان مقالات است که روند انتخاب و حذف مقالات را نشان می‌دهد و بر شفافیت تصمیم‌گیری می‌افزاید. فلوجارت مربوط به روند بررسی مقالات در این پژوهش به روش PRISMA در شکل ۱ نمایش داده شده است.

جامعه آماری شامل اسناد و مقالات در دسترس با موضوع سیستم استحصال آب از مه به تعداد ۲۱۵ مقاله است. روش نمونه‌گیری با ابزار بررسی اسنادی مرتبط با موضوع و با کلیدواژه‌های: تولید آب شیرین، استحصال آب از مه، توری جاذب مه، جنس و هندسه توری، تولید آب پایدار و تصفیه آب انجام شد. پس از بررسی‌های اولیه و رسیدن به کلیدواژگان مشخص‌تر در زمینه جنس و هندسه توری جاذب مه بر کارایی سیستم؛ سؤالات پژوهش به صورت زیر مطرح شد:

- انواع روش‌های موجود تولید آب شیرین در سیستم‌های آب شهری چه مزایا و معایبی دارند؟
 - روند مطالعات در فناوری استحصال آب از مه، به چه سمتی رفته است؟
 - اثر جنس و هندسه توری جاذب مه در مطالعات تا چه اندازه است؟
 - فناوری برداشت آب از مه بدون مصرف انرژی تا چه اندازه می‌تواند به صرفه‌جویی در مصرف انرژی کمک کند؟
- مطالعه حاضر با جست‌وجوی مقالات در پایگاه‌های معتبر علمی انگلیسی، از جمله ScienceDirect، Google Scholar و Scopus انجام شد. در این جست‌وجو، از کلیدواژه‌های بیان‌شده به زبان انگلیسی، شامل Freshwater production, fog water harvesting, fog-absorbing net, net material and geometry, sustainable water production and water purification استفاده شد.



شکل ۱. فلوجارت پریسما از روند بررسی و انتخاب مقالات در مطالعه حاضر

محدوده زمانی مقالات بررسی‌شده از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ در نظر گرفته شد و مقالات براساس معیارهای مشخصی انتخاب شدند. این معیارها شامل پژوهشی بودن مقالات انگلیسی، تخصصی بودن آن‌ها در زمینه اثر جنس و هندسه توری‌های جاذب مه بر کارایی و همچنین، بررسی تأثیر این مفاهیم بر یکدیگر بود. علاوه بر این، تنها مقالاتی انتخاب شدند که دسترسی به متن کامل آن‌ها امکان‌پذیر بود و کلمات کلیدی جست‌وجو شده یا معادل‌های آن‌ها در عنوان یا چکیده مقاله وجود داشت. همچنین، مقالات تکراری از روند انتخاب حذف شدند تا از بررسی‌های مجدد و اطلاعات تکراری جلوگیری شود.

منابع استخراج‌شده مورد بررسی قرار گرفتند؛ به این صورت که ابتدا عنوان و چکیده مقالات و در صورت نیاز، متن مقاله مورد مطالعه قرار گرفت. سپس، برای بررسی بیشتر متن کامل مطالعات مرتبط با پژوهش حاضر مطالعه شده و مقالات نهایی انتخاب شدند. برای اطمینان بیشتر، همه مراحل جست‌وجو دوباره تکرار شد. برای مدیریت منابع از نرم‌افزار اندنوت نسخه ۲۱ استفاده شد.

برای استخراج اطلاعات مورد نظر از فرمی شامل نام نویسنده، سال چاپ مقاله، عنوان مقاله، حوزه تمرکز پژوهش و یافته‌ها و نتایج اصلی استفاده شد. از ۲۱۵ مقاله مورد بررسی و پس از لحاظ کردن معیارهای ورود و خروج، ۲۰ مقاله در بررسی نهایی و سپس، با استفاده از چک‌لیست پرینما، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

معیارهای ورود و خروج مقالات در این پژوهش به گونه‌ای تعیین شدند که فقط مطالعات مرتبط و باکیفیت بررسی شوند. معیارهای ورود شامل پژوهشی بودن مقاله، تمرکز بر فناوری استحصال آب از مه، بررسی اثر جنس و هندسه توری جاذب مه بر عملکرد سیستم، و دسترسی به متن کامل مقاله بود. همچنین، مقالات باید به زبان انگلیسی منتشر شده و کلمات کلیدی مربوطه در عنوان یا چکیده آن‌ها وجود داشته باشد. از سوی دیگر، مقالات تکراری، غیرمرتبط یا بدون دسترسی به متن کامل، از روند بررسی حذف شدند تا تحلیل نهایی تنها بر مبنای داده‌های معتبر و مرتبط انجام شود.

۳. نتایج

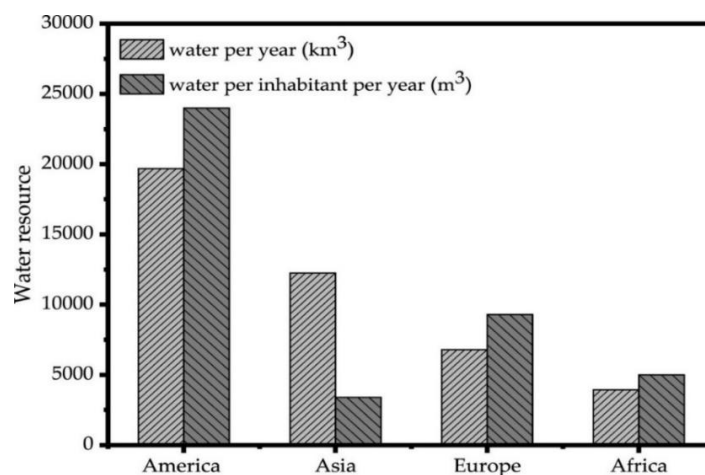
از بین مقالات استخراج‌شده، تعداد ۲۰ مقاله واجد شرایط برای ورود به مطالعه انتخاب شد. پس از مطالعه و بررسی، شرح نتایج بررسی مطالعات بیان می‌شود و سپس در جدول بخش مطالعات منتخب خلاصه‌وار ارائه می‌شود.

به طور کلی، نتایج این مطالعه در دو بخش اصلی ارائه می‌شود. در بخش نخست، یافته‌ها و اطلاعات کلیدی استخراج‌شده از مقالات در حوزه آب و تولید آب از طریق سامانه‌های توری جاذب مه مرور می‌شود تا دید جامعی از وضعیت پژوهش‌های انجام‌شده در سطح جهانی به دست آید. در بخش دوم، مطالعات منتخب به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد و شکاف‌ها و خلأهای تحقیقاتی موجود در زمینه کارایی، جنس و هندسه توری‌های جاذب مه تبیین می‌شود.

این پژوهش به منظور ارائه یک مرور کامل و جامع از وضعیت موجود در حوزه تولید آب شیرین و روش‌های مختلف آن انجام شده است. ابتدا به بررسی انواع روش‌های تولید آب شیرین پرداخته شده، سپس چالش‌های موجود در فرایندهای مختلف تولید و مصرف آب مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، فناوری برداشت آب از مه نیز به عنوان یک روش نوین و کم‌مصرف انرژی در تأمین آب مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر پارامترهای مختلف بر کارایی این سیستم‌ها تحلیل شده است. این بررسی در یک خط داستانی مشخص صورت گرفته که درک موضوع اصلی پژوهش روان‌تر شود.

۳-۱. تأمین آب شهری

در وهله اول، بررسی یافته‌های کمی و کیفی وضعیت و چالش‌های حوزه آب دید مناسبی به شرایط فعلی می‌دهد. برآوردی از وضعیت سرانه آب در مناطق مختلف جهان در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۴]. سرانه منابع آب در سال در قاره آمریکا و سپس، اروپا دارای بیشترین مقدار و قاره آسیا به واسطه جمعیت قابل توجه در مقابل دیگر قاره‌ها، کمترین مقدار را دارد. این شکل به نحوی نشان می‌دهد آب در آسیا می‌تواند اهمیتی دوچندان داشته باشد و توسعه سیستم‌های آبی یک امر ضروری شود.



شکل ۲. میزان منابع آب و وضعیت سرانه آن در مناطق مختلف [۱۴]

پس با توجه به اهمیت آب در بخش‌های مختلف زندگی شهری و حتی غیر شهری، ضروری است که در حفظ، احیا و تولید منابع آب اقدامات لازم صورت گیرد. در ادامه به برخی از روش‌های کلیدی تولید آب شیرین و اهمیت آن‌ها در رفع نیازهای جهانی آب پرداخته می‌شود. مطالعه این روش‌ها کمک می‌کند که فناوری‌های موجود به منظور تولید آب شیرین شناخته شده و مزایا و معایب هر یک مطرح شود. برای کمک به رفع یکی از مشکلات مشترک آن‌ها، نوعی فناوری معرفی می‌شود و پژوهش حاضر بر مبنای این فناوری و کمک به بهبود آن انجام می‌شود.

۳-۱-۱. انواع روش‌های تولید آب شیرین

آب شیرین، یک منبع محدود است و در دسترس تمام جوامع انسانی نیست. در نتیجه باید از فناوری‌های موجود برای تولید آب شیرین و آشامیدنی و یا حتی آب مورد نیاز در امور روزمره و بخش صنعتی، استفاده کرد و به منظور توسعه و بهینه‌سازی آن‌ها کوشید. آب باید عاری از مواد جامد معلق، میکروارگانیسم‌ها و مواد شیمیایی سمی باشد. توصیه غلظت مواد معدنی از کشوری به کشور دیگر متفاوت است، اما اکثر مواد معدنی دارای حداکثر غلظت توصیه‌شده برای اطمینان از آب سالم، متعادل و دلپذیر برای نوشیدن هستند. املاح معدنی زیادی در استانداردسازی آب شیرین نقش دارند. در جدول ۱ میزان برخی از این املاح که دارای اهمیت بیشتری هستند، برای تعیین استاندارد آب شیرین توسط سه نهاد مختلف بیان شده است. این نهادها به ترتیب آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا (EPA)^۱، WHO و اتحادیه اروپا (EU)^۲ هستند. شباهت زیادی بین این استانداردها وجود دارد و میزان اختلاف ناچیز است. واحد اعداد جدول ۱، میلی‌گرم بر لیتر است. این مقادیر به صورت حداکثر مجاز است.

جدول ۱. استاندارد میزان املاح آب شیرین توسط سه نهاد مختلف [۱۵]

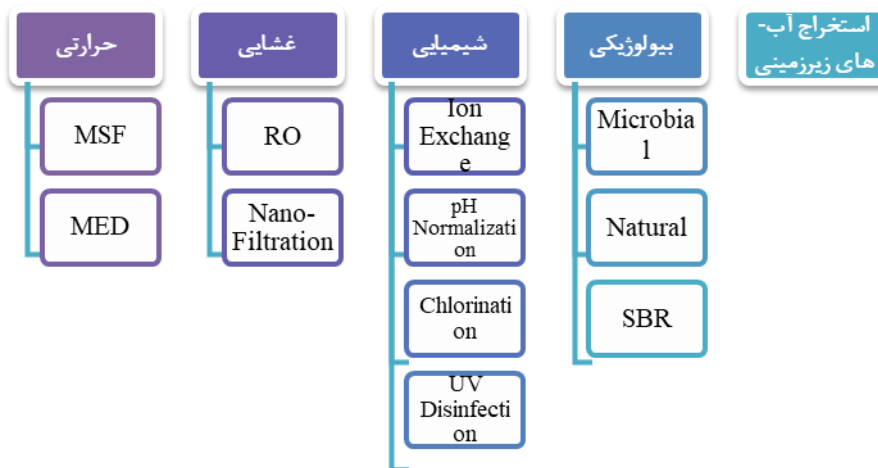
نوع املاح	نام نهاد		
	EU	WHO	EPA
بنزن ^۳	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۵
برومات ^۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
کادمیم ^۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵
کرومیوم ^۶	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱
آنتیموان ^۷	۰/۰۰۵	۰/۰۲	۰/۰۰۶
فلورید ^۸	۱/۵	۱/۵	۲
جیوه ^۹	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲
نترات ^{۱۰}	۱۱/۳	۱۱/۳	۱۰
نیتريت ^{۱۱}	۰/۱۵	۱	۱
سلنیوم ^{۱۲}	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۵
تتراکلرواتیلن ^{۱۳}	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۰۵

1. United States Environmental Protection Agency (EPA)
2. European Union (EU)
3. Benzene
4. Bromate
5. Cadmium
6. Chromium
7. Antimony
8. Fluoride
9. Mercury
10. Nitrate
11. Nitrite
12. Selenium
13. Tetrachloroethylene

با دانستن این استانداردها می‌توان، کیفیت آب تولیدی را به کیفیت مناسب رساند و به آب آشامیدنی تبدیل کرد. به طور کلی، روش‌های تولید آب شیرین به دو دسته روش‌های رایج (کاربرد بیشتر) و روش‌های غیر رایج تقسیم می‌شود که در ادامه شرح داده خواهد شد.

۳-۱-۱-۱. روش‌های رایج تولید آب شیرین

تولید آب شامل فرایندهای مختلفی برای اطمینان از در دسترس بودن آب شیرین و سالم است. مهم‌ترین و رایج‌ترین روش‌ها به پنج دسته طبقه‌بندی شده که در شکل ۳ نشان داده شده است. این پنج روش شامل روش‌های حرارتی^۱، غشایی^۲، شیمیایی، بیولوژیکی^۳ و استخراج آب‌های زیرزمینی^۴ می‌شود. هر یک دارای فناوری‌های مختلفی مانند تقطیر چندمرحله‌ای (MSF)^۵ و تقطیر چند اثره (MED)^۶ برای روش حرارتی؛ اسمز معکوس (RO)^۷ و نانو فیلتراسیون برای روش غشایی؛ تبادل یونی^۸، نرمال‌سازی pH، کلرزنی^۹ و تصفیه با اشعه UV^{۱۰} برای روش شیمیایی؛ سیستم‌های میکروبی، طبیعی و راکتور ناپیوسته متوالی (SBR)^{۱۱} برای روش بیولوژیکی است. هر روش مزایای خود را دارد و بسته به منبع آب، نیازهای کیفی و ملاحظات زیست‌محیطی برای شرایط مختلف مناسب است. فناوری‌های دیگری نیز وجود دارد، اما روش و فناوری‌های موجود در شکل ۳ مرسوم‌تر هستند. درخور یادآوری است که به طور مثال در فرایند روش RO، می‌توان از مواد شیمیایی مشخصی استفاده کرد و در نتیجه، فقط در روش غشایی قرار نگیرد.



شکل ۳. تولید آب شیرین با روش و فناوری‌های گوناگون [۱۶ - ۲۰]

دو فناوری به عنوان نمونه برای بیان پیچیدگی و مصرف انرژی در تولید آب شیرین بررسی می‌شوند:
 - روش اسمز معکوس (RO) که با استفاده از غشای نیمه‌تراوا، آب را از مواد دیگر جدا کرده و انواع شیمیایی و بیولوژیکی را حذف می‌کند. این روش برای تولید آب آشامیدنی و فرایندهای صنعتی استفاده می‌شود.

1. Thermal Methods
2. Membrane Methods
3. Biological Methods
4. Groundwater Extraction
5. Multi-Stage Flash Distillation (MSF)
6. Multi-Effect Distillation (MED)
7. Reverse Osmosis (RO)
8. Ion Exchange
9. Chlorination
10. UV Disinfection
11. Sequential Batch Reactor (SBR)

- روش کلرزنی نیز به فرایند ضد عفونی آب با افزودن کلر برای از بین بردن میکروبها می‌پردازد و از پمپها و کلریناتورها برای کنترل مقدار کلر تزریقی استفاده می‌کند. در ادامه، چالش‌های مصرف انرژی این روش‌ها بررسی خواهد شد [۲۱].

۳-۱-۱-۲. روش‌های غیر رایج تولید آب شیرین

روش‌هایی مانند صرفه‌جویی در مصرف آب و برداشت آب باران به عنوان راهکارهایی غیرمستقیم برای تولید آب شیرین مورد توجه قرار گرفته‌اند، اما به دلیل محدودیت‌های مختلف، کاربرد کمتری دارند. صرفه‌جویی در مصرف آب می‌تواند ۲۰ تا ۳۰ درصد از مصرف را کاهش دهد، و سیستم‌های برداشت آب باران در برخی کشورها به دلیل مزایای اقتصادی و رایگان بودن آب باران استفاده می‌شوند [۲۲]. اما این روش‌ها محدود به سطح برداشت و ذخیره‌سازی، آلودگی آب بر اثر انباشت، کاهش منابع آب زیرزمینی و تغییرات اقلیمی هستند. علاوه بر این، آلودگی آب توسط آلاینده‌های سمی مانند سرب، جیوه و آنتی‌بیوتیک‌ها، که می‌تواند سرطان‌زا و جهش‌زا باشند، یکی از چالش‌های اصلی است [۲۳ - ۲۵]. این مشکلات نیاز به توسعه فناوری‌های جدیدی دارد که معایب فوق را نداشته باشند و یا آن‌ها را به حداقل برسانند.

تولید آب شیرین با تصفیه آب و تمام فناوری‌های بیان شده مزایا و معایب زیادی دارند که در جدول ۲ به برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود.

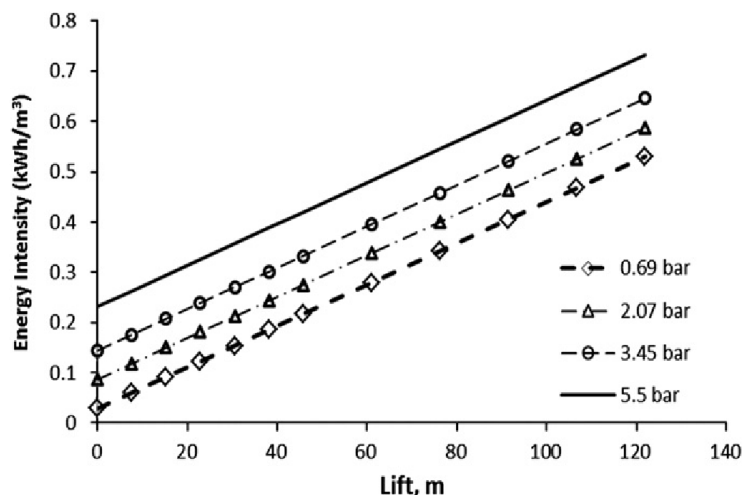
جدول ۲. مزایا و معایب فناوری‌های تولید آب شیرین [۲۶ و ۲۷]

فناوری	مزایا	معایب
تقطیر	کیفیت بالای خروجی، فرایند طبیعی	فرایند تولید آرام، گران
اسمز معکوس	مصرف کم انرژی، فضای مورد نیاز کم	نیاز به فشار بالا، دارای محدودیت
راکتور ناپیوسته متوالی	دارای کنترل کیفیت، ارزان	پیچیدگی، فضای مورد نیاز زیاد
تقطیر چندمرحله‌ای	طول عمر بالا	مصرف زیاد انرژی، دارای محدودیت
سیستم میکروبی	سیستم ساده، ارزان	تولید زیاد لجن و مشکل دفع
استخراج آب‌های زیرزمینی	کیفیت بالای آب، پایدار	آسیب زیست‌محیطی، گران

۳-۱-۲. چالش‌های تولید آب شیرین

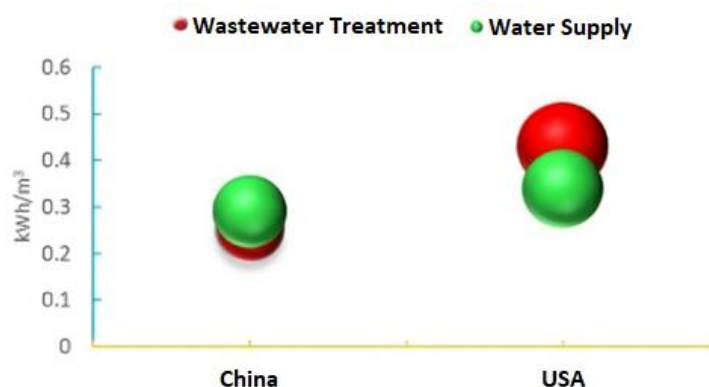
در این بخش، به یکی از چالش‌های مهم در فرایندهای تولید آب شیرین پرداخته می‌شود: مصرف انرژی. تمامی فناوری‌های تولید آب شیرین به نوعی انرژی مصرف می‌کنند، و این مصرف انرژی در هر مرحله از چرخه تأمین، تصفیه، استفاده و دفع آب وجود دارد. شدت مصرف انرژی به نوع فناوری‌های استفاده‌شده بستگی دارد و برای برخی از روش‌ها این مصرف انرژی کم و برای بیشتر آن‌ها بالا است. مصرف انرژی در بخش‌هایی همچون پمپاژ آب، فرایندهای حرارتی و دستگاه‌های الکتریکی مانند سیستم‌های UV تأثیر زیادی بر هزینه‌ها و کارایی دارند. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند تا سال ۲۰۵۰، با افزایش جمعیت شهری، چالش‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی افزایش می‌یابد و در عین حال فرصت‌هایی برای بهبود کارایی انرژی ایجاد خواهد شد [۲۸]. با توجه به اینکه بخش عمده‌ای از مصرف انرژی شهری متعلق به بخش آب و فاضلاب است و مصرف انرژی در این بخش طی ۱۵ سال آینده ۶۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش خواهد یافت، نیاز به فناوری‌های جدید برای کاهش مصرف انرژی و حفظ کیفیت آب تصفیه‌شده به یک نگرانی جهانی تبدیل شده است [۲۹].

آب و انرژی را نمی‌توان از هم جدا کرد؛ به این معنا که انرژی برای تولید آب شیرین و آب برای تولید انرژی استفاده می‌شود. تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب با انرژی کار می‌کنند: پمپ‌ها، کمپرسورهای هوا، هواکش‌های سطحی، ماشین‌های آبگیری، تجهیزات آنالیز، میکسرها، قطعات متحرک و سایر ماشین‌آلات واحدهای ضروری در هر تصفیه‌خانه هستند. در شکل ۴ میزان مصرف انرژی به منظور پمپاژ آب تحت شرایط مختلف نشان داده شده‌اند.



شکل ۴. برق مورد نیاز برای پمپاژ ۱ متر مکعب آب تحت ارتفاع و فشارهای مختلف [۳۰]

شدت انرژی، همان‌طور که بیان شد، در بخش‌های فرایند تأمین آب سالم و شیرین، مقدار قابل توجهی است. این میزان مصرف باید با بهبود کارایی و افزایش بهره‌وری سیستم‌های تولید آب و یا با استفاده و گسترش فناوری‌های نوین کم‌مصرف یا بدون مصرف انرژی (مانند توری‌های جاذب مه برای تولید آب سالم)، جایگزین شدت انرژی تأمین آب آشامیدنی و تصفیه فاضلاب در چین و ایالات متحده (USA) در شکل ۵ نشان داده شده است. در حالی که شدت انرژی برای تأمین آب آشامیدنی نسبتاً نزدیک است (۰/۲۹ کیلووات ساعت بر متر مکعب برای چین و ۰/۳۴ کیلووات ساعت بر متر مکعب برای ایالات متحده آمریکا)، شدت انرژی برای تصفیه فاضلاب در ایالات متحده تقریباً دو برابر است (۰/۴۳ کیلووات ساعت بر متر مکعب در مقایسه با ۰/۲۵۴ کیلووات ساعت در متر مکعب برای چین). همچنین، مشاهده شده که در چین، شدت انرژی برای تأمین آب آشامیدنی بیشتر از تصفیه فاضلاب است، در حالی که در ایالات متحده، تصفیه فاضلاب بسیار انرژی‌بر است.



شکل ۵. میانگین شدت انرژی تأمین آب آشامیدنی و تصفیه فاضلاب در چین و آمریکا [۳۱]

با توجه به اینکه حدود ۹۷ درصد آب را آب شور تشکیل می‌دهد، نمک‌زدایی در تمام نقاط جهان اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است. آب اقیانوس‌ها توسط نمک، باکتری‌ها و ذرات، آلوده شده است. برای مصرف انسان، آب اقیانوس‌ها باید نمک‌زدایی و تصفیه شود. با این حال، نمک‌زدایی همچنان یک فرایند انرژی‌بر و بسیار گران برای غلبه بر کمبود آب است. به‌طور مثال، نمک‌زدایی حرارتی^۱ آب که یکی از روش‌های قدیمی و رایج تولید آب شیرین است، انرژی قابل توجهی مصرف می‌کند. مصرف انرژی ویژه بالا که به‌تازگی با سوخت‌های فسیلی گران‌قیمت و هزینه‌های بالای تولید آب مواجه شده، محدودیت‌های اصلی تکنیک‌های نمک‌زدایی حرارتی است [۳۲]. به‌طور کلی، حدود ۱۰ هزار تن سوخت فسیلی در سال برای تولید ۱۰۰۰ متر مکعب

آب شیرین با استفاده از نمک‌زدایی آب دریا مورد نیاز است [۳۳]. روش‌های نمک‌زدایی معمولاً به دو دسته فرایندهای حرارتی و غشایی تقسیم می‌شوند. در فرایند حرارتی، آب دریا گرم شده و بخار به آب مقطر تبدیل می‌شود، که این روش نیاز به انرژی الکتریکی و حرارتی دارد. این روش به‌ویژه در کشورهای خلیج فارس که دارای آب‌های شور با شوری بالا هستند، کاربرد فراوانی دارد. در فناوری غشایی، آب شور از طریق یک غشا با فشار بالا از سمت غلظت بالا به سمت غلظت پایین عبور داده می‌شود تا آب آشامیدنی تولید شود [۳۴]. با توجه به استفاده زیاد از سوخت‌های فسیلی در کشورهای آسیایی و منطقه خلیج فارس، این روش‌ها به طور گسترده‌ای در این مناطق توسعه یافته‌اند. به منظور کاهش مصرف انرژی در حوزه تأمین آب، روش‌های کم‌مصرف‌تر مانند استفاده مجدد از فاضلاب، جمع‌آوری آب باران و شیرین‌سازی آب پیشنهاد می‌شود، که هر یک چالش‌های خاص خود را دارند که پیش‌تر مطرح شد.

جدول ۳ میزان انرژی مصرفی به ازای هر مترمکعب آب تصفیه‌شده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کشورهای آلمان، اسپانیا و ایتالیا را نشان می‌دهد.

تشدید تقاضای جهانی انرژی، وابستگی به سوخت‌های فسیلی و جمعیت رو به رشد، ما را با بحران انرژی مواجه کرده است [۳۵]. مصرف انرژی، مسئول ۶۰ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای^۱ است [۳۶]. اگر این روند معکوس نشود، تغییرات عمده‌ای در آب‌وهوای جهان رخ می‌دهد که تأثیر قابل توجهی بر مردم، صنعت و اقتصاد جهانی خواهد داشت. از سریع‌ترین، ارزان‌ترین و آسان‌ترین راه‌ها برای مهار تغییرات آب‌وهوایی، بهره‌وری انرژی و بهبود تقاضای انرژی است.

جدول ۳. میزان مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کشورهای آلمان، اسپانیا و ایتالیا [۳۷]

کشور	مصرف انرژی (kWh/m ³)
آلمان	۰/۱۵۵ - ۰/۶۹۷
اسپانیا	۰/۰۴۷ - ۰/۹۰۵
ایتالیا	۰/۴۸۵ - ۲/۹۷۱

چند راه ممکن برای کاهش تقاضای انرژی مانند افزایش بازده ترمودینامیکی تجهیزات تبدیلی مانند دیگ‌ها یا موتورها، با استفاده از سیستم‌های غیرفعال در بخش‌های مختلف و حتی حوزه آب وجود دارد. یکی از مسائل اصلی مرتبط با افزایش مصرف انرژی، بدتر شدن کیفیت محیطی است که از انتشار بیشتر آلاینده‌های تشکیل‌شده نشئت می‌گیرد. وجود دائمی این حالت، می‌تواند آب، خاک یا جو را آلوده کند.

میزان مصرف انرژی برای تصفیه آب فاضلاب در کشورهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. اکنون به میزان مصرف انرژی به منظور تولید آب شیرین در فناوری‌های مختلف پرداخته می‌شود. جدول ۴ میزان انرژی مصرفی فناوری‌های مختلف را به ازای ۱ مترمکعب آب شیرین تولیدی نشان می‌دهد.

جدول ۴. میزان مصرف انرژی در فناوری‌های مختلف تولید آب شیرین [۳۷]

فناوری	مصرف انرژی (kWh/m ³)
تصفیه آب سطحی	۰/۲ - ۰/۴
استفاده مجدد آب آشامیدنی	۱/۵ - ۲
نمک‌زدایی آب شور (غیر از دریا و اقیانوس)	۱/۵ - ۱/۰
نمک‌زدایی آب اقیانوس آرام	۲/۵ - ۴
اسمز معکوس	۲/۵ - ۳/۱

مقادیر انرژی مصرفی برای تولید آب شیرین بالا است. تلاش‌هایی برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند آب‌شیرین‌کن‌ها و تصفیه‌کننده‌های خورشیدی انجام شده، اما به دلیل هزینه بالا و کارایی سطح پایین، در مقیاس بزرگ قابل اجرا

نیستند. بنابراین، مصرف انرژی در تولید آب همچنان چالشی جدی است و نیاز به تحقیق و توسعه به منظور کاهش مصرف انرژی و بهره‌برداری از فناوری‌های نوین وجود دارد. راه‌حل‌های پیشنهادی برای حل این مشکل در ادامه مطرح خواهد شد.

یکی از روش‌های تولید آب شیرین، استحصال (برداشت و جمع‌آوری) آب از مه موجود در هوا (FWH)^۱ با توری‌های مشبک (جمع‌کننده آب از مه)^۲ است که مصرف انرژی صفر (هنگام تولید آب) را دارد. استحصال آب از هوا با روش‌های مختلف انجام می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها شامل باروری ابرها^۳، توری مه^۴، کلکتور شبنم^۵، تقطیرکننده مبتنی بر جذب (تقطیر خورشیدی)^۶ می‌شود. روش جذب و تراکم^۷ از پرکاربردترین فناوری‌ها هستند.

در این فناوری، آب از مه توسط توری‌ها استحصال و در مخزنی زیر آن ذخیره می‌شود، بدون اینکه انرژی مصرف شود. این آب برای مصرف در بخش‌های مختلف مانند کشاورزی مستقیم استفاده می‌شود، اما برای تبدیل آن به آب آشامیدنی، باید اصلاح مورد نیاز اضافه شده و آلودگی‌ها حذف شوند که این کار با استفاده از فیلترهای مناسب و پمپ آب انجام می‌شود. در مجموع، مصرف انرژی در این فناوری بسیار پایین است. اساس کارایی این فناوری به وجود مه مناسب بستگی دارد. طبیعت نیز راه‌حلی برای برداشت آب از مه ارائه کرده است که بسیاری از گونه‌های گیاهی و جانوری در مناطق خشک با ساختارهای خاص خود این کار را انجام می‌دهند.

برداشت آب از مه بر اساس اصل فیزیکی است که در آن مولکول‌های آب مه به سطح جامد می‌چسبند. برخی گیاهان قادر هستند در هوای مه‌آلود شبنم جمع‌آوری کنند تا کمبود آب را جبران کنند. ایده برداشت آب مه ابتدا توسط کشاورزان ایجاد شد که برای جمع‌آوری آب از هوای مرطوب، حفره‌ها و ظروفی در اطراف گیاهان قرار می‌دادند. این ابتکارات به سازه‌های برداشت مه تبدیل شد و تحقیقات بیشتری در این زمینه با الهام از طبیعت انجام شد. به‌ویژه از ویژگی‌های گیاهانی مانند کاکتوس و حشرات مانند سوسک صحرائی و ابریشم عنکبوت استفاده شده است. این مطالعات به توسعه روش‌های بیومیمتیک برای بهبود ساختار سطح مواد منجر شده و در مکان‌هایی مانند عمان و فلسطین، سنت‌های جمع‌آوری آب از مه وجود دارد.

از آنجا که مه اساس این فناوری است، مقدمه‌ای از مبنای آن در این بخش و در بخش بعدی به شناخت کامل آن پرداخته می‌شود. آب جوی (بدون توجه به شرایط جغرافیایی و هیدرولوژیکی) به شکل ابر، مه و بخار آب به عنوان یکی از منابع مهم آب شیرین پیشنهاد شده است. اتمسفر زمین آب را به شکل قطرات آب یا بخار (که تا حدود ۱۰ درصد از منابع آب شیرین را تشکیل می‌دهد) در خود نگه می‌دارد. در هر زمان معین، آب موجود در هوا هفت برابر بیشتر (۱۳ تریلیون متر مکعب) از کل آب شیرین رودخانه‌ها و دریاچه‌ها است [۳۸]. بنابراین، FWH می‌تواند یک رویکرد امیدوارکننده، قابل اعتماد و تأثیرگذار برای حل تنش آب حاد در حال حاضر و همچنین در آینده باشد. جمع‌آوری مه به عنوان منبع آب، برای نیازهای انسان سابقه طولانی دارد. کمبود روزافزون جهانی و در دسترس نبودن آب آشامیدنی در بسیاری از مناطق پرجمعیت باعث افزایش هشدار می‌شود. این وضعیت به گسترش علاقه به روش‌های منحصربه‌فرد و نوآورانه جمع‌آوری آب حتی در مناطق صنعتی توسعه‌یافته منجر شده است. در برخی مناطق که مصرف و تقاضای انسانی کمتر از کشورهای صنعتی است، برداشت آب مه به منبع اصلی آب تبدیل شده است.

تخمین زده می‌شود که جو زمین حدود ۵۰ هزار کیلومتر مکعب آب شیرین را به شکل قطرات ریز آب و مه در خود جای داده است؛ علاوه بر این، چرخه طبیعی هیدرولوژیکی، تأمین آب پایدار را امکان‌پذیر می‌کند [۳۹]. بنابراین، FWH به یک استراتژی مهم برای تولید آب در مناطقی از جهان تبدیل شده است.

۳-۱-۳. برداشت آب از مه با توری جاذب مه

سه روش رایج برای تولید آب از هوای جوی وجود دارد.

1. Fog Water Harvesting (FWH)
2. Fog Water Collectors (FWC)
3. Cloud Seeding
4. Fog Mesh
5. Massive Dew Collector
6. Sorption-based AWG (solar distiller)
7. Condense

(۱) کاهش دمای هوای مرطوب به زیر نقطه شبنم.

(۲) تجمع رطوبت از مه.

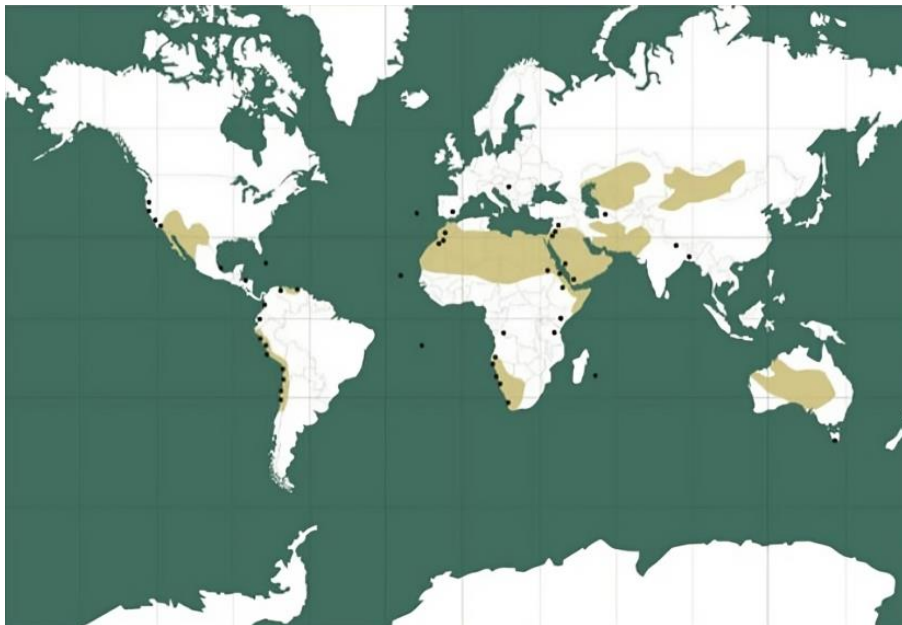
(۳) استفاده از یک ماده خشک‌کننده جامد یا مایع برای جذب بخار آب از هوای مرطوب، و سپس بازیابی آب استخراج‌شده با گرم کردن ماده خشک‌کننده و متراکم کردن آب تبخیرشده. از طرفی، مشکل تأمین آب شیرین در مناطق خشک متکی بر شرایط اقلیمی را می‌توان با استفاده از یکی از شیوه‌های زیر حل کرد.

۱. حمل‌ونقل آب از مکان‌های دیگر.

۲. نمک‌زدایی آب شور.

۳. برداشت آب از هوای مه آلود.

حمل‌ونقل آب در این مکان‌ها معمولاً بسیار گران است و هزینه اولیه قابل توجهی دارد. همچنین، نمک‌زدایی به وجود منابع آب شور بستگی دارد که در این مناطق غیر معمول و گران است، اما هوای جوی یک مخزن آب عظیم و پایان‌ناپذیر است. این منبع عظیم آب در هر نقطه از سطح سیاره در دسترس است. شکل ۶ پراکندگی جهانی مناطق مناسب استفاده از فناوری FWH را نشان می‌دهد؛ این شکل بر مبنای پروژه‌های عملی شده یا در دست اقدام برداشت آب از مه است.



شکل ۶. پراکندگی مناطق مناسب برای استفاده از فناوری FWH [۴۰]

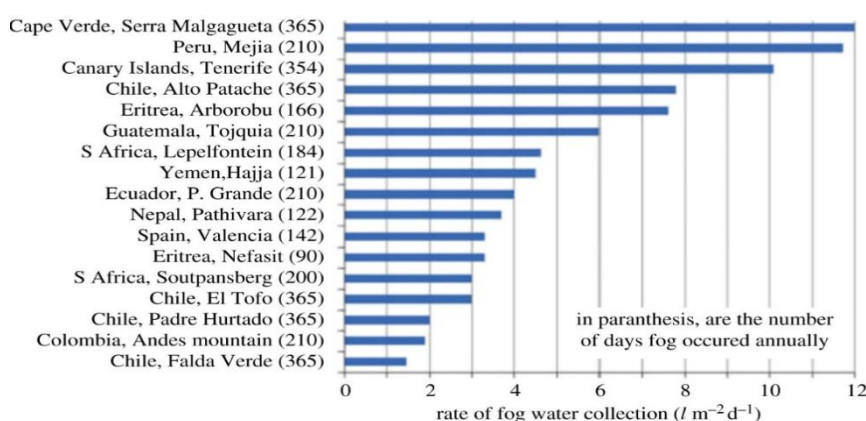
برای تشکیل مه، نیاز به هوای مرطوب و کاهش دما به زیر نقطه شبنم است. شرایطی مانند دمای بالای نقطه شبنم، رطوبت بالا و ارتفاع زیاد باعث شکل‌گیری مه می‌شوند. مه زمانی ایجاد می‌شود که غلظت بخار آب در جو به حد اشباع برسد و قطرات ریز آب معلق در هوا را تشکیل دهد. این پدیده بیشتر در شب‌های سرد، نزدیک به سطح زمین و در مناطق ساحلی مانند دریاچه‌ها یا اقیانوس‌ها مشاهده می‌شود. مه معمولاً می‌تواند تا ۷۵ کیلومتر در خشکی گسترش یابد. تفاوت مه و تنک‌مه در محل و تراکم آن‌هاست؛ مه به سطح زمین می‌رسد و غلیظ‌تر است، در حالی که تنک‌مه در ارتفاعات و بالای کوه‌ها قرار دارد و رقیق‌تر است. در سیستم‌های استحصال آب، جمع‌آوری قطرات آب موجود در مه توسط توری‌های خاص اهمیت زیادی دارد.

دو دانشمند برای اولین بار، استفاده از یک پارچه دولایه با ضریب سایه ۳۵ درصدی و لایه‌های پلی‌پروپیلنی یک میلی‌متری راشل را به عنوان استاندارد جمع‌کننده مه (SFC)^۱ پیشنهاد کردند که در یک قاب مسی استاندارد نصب شده است. استانداردسازی، تجزیه‌وتحلیل بازده کلی سیستم را تسهیل می‌کند. بازده کلی به عنوان لیتر آب مه جمع‌آوری‌شده توسط ۱ متر

1. Standard Fog Collector (SFC)

مربع توری در روز تعریف می‌شود. کارایی SFC و کلکتورهای بسیار بزرگ (۴۸ متر مربع) با افزایش قطر قطرات مه و افزایش سرعت باد افزایش می‌یابد [۸۰]. با اندازه‌های قطرات مه اندازه‌گیری شده با استفاده از پروب‌های طیف‌سنج سیستم‌های اندازه‌گیری ذرات^۱ و محاسبات راندمان جمع‌آوری بر اساس معادلات لانگمویر و بلاجت [۴۲]، بازده کلی استحصال آب، ۲۰ درصد می‌شود. بازده جمع‌آوری در مرکز یک جمع‌کننده مه بزرگ زمانی که قطرات ۱۱ میکرومتر با سرعت باد ۳/۵ تا ۶/۵ متر بر ثانیه حرکت می‌کنند، به بالاترین مقدار یعنی ۶۶ درصد می‌رسد. به منظور جمع‌آوری مؤثر مه، توری باید به قطرات آب با قطر ۱ تا ۵۰ میکرومتر اجازه عبور دهد و در عین حال سطح کافی را برای برخورد و چسبیدن قطرات مه فراهم کند. در سرعت‌های باد کمتر، قطرات کوچک‌تر تمایل به دنبال کردن خطوط جریان هوا دارند و از اطراف الیاف توری که پهن‌تر هستند عبور می‌کنند. با افزایش سرعت باد یا اندازه قطرات، اینرسی بیشتر قطرات، تمایل آن‌ها به برخورد با الیاف مش را افزایش می‌دهد. به طور مشابه، همان‌طور که الیاف مش باریک‌تر می‌شوند، قطرات مه معلق در هوا که توسط باد به سمت الیاف هدایت می‌شوند، از خطوط جریان باد کمتر پیروی می‌کنند و احتمال برخورد آن‌ها با الیاف مش بیشتر است. گزارش‌های زیاد و معتبری برای روزهای مه‌آلود مناطق مختلف جهان وجود ندارد. شکل ۷ تعداد روزهای مه‌آلود سالانه مناطق مختلف و همچنین، نرخ آب استحصال شده از مه در آن مناطق را نشان می‌دهد [۴۳].

نرخ آب جمع‌آوری شده از ۱/۵ تا ۱۲ لیتر به ازای یک متر مربع در روز متغیر است. میزان جمع‌آوری آب به عوامل محیطی مختلفی از جمله تفاوت بین دمای هوا و دمای نقطه شبنم، سرعت باد، جهت باد و دمای زمین بستگی دارد [۴۳].



شکل ۷. نرخ استحصال آب از مه و تعداد روزهای مه سالانه در نقاط مختلف بیابانی [۴۳]

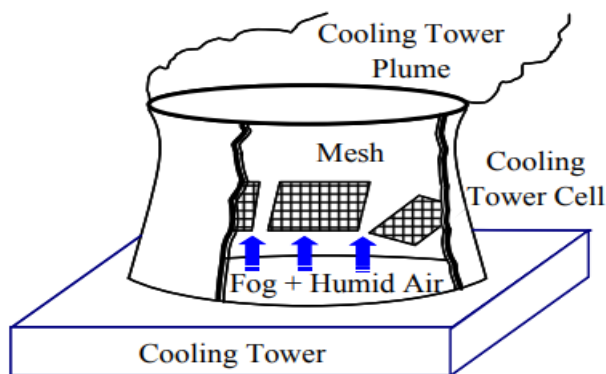
استحصال آب از مه با استفاده از توری مشبک^۲، یک سیستم غیرفعال، کم‌هزینه و پایدار است که می‌تواند آب آشامیدنی را برای مناطقی که شرایط مه دارند تأمین کند. این فناوری در بیش از ۲۰ کشور در شش قاره مطالعه شده و معمولاً در مناطقی که مه زیادی دارند، به کار می‌رود. برداشت آب از مه زمانی مفید است که سایر منابع آب کمیاب باشند. اگرچه این فناوری ظرفیت بالایی برای استخراج آب از مه دارد، تنها تعداد کمی از سیستم‌های FWH به صورت تجاری در حال استفاده هستند. برای اینکه یک سیستم FWH پایدار باشد، باید چهار معیار کلیدی کارایی، هزینه کم، پایداری و چرخه‌پذیری را برآورده کند، اما در حال حاضر هیچ سیستم استحصال آب مه این چهار معیار را به طور کامل ندارد. این فناوری به‌ویژه برای جوامعی که بارندگی کمی دارند و مه کافی در دسترس است، پتانسیل زیادی دارد. در این سیستم، توری‌ها به عنوان سطح جمع‌آوری مه عمل کرده و قطرات آب توسط نیروی گرانش به کانال‌های جمع‌آوری منتقل می‌شوند. با این حال، پیش‌بینی میزان جمع‌آوری آب مشکل است، که به دلیل فقدان استانداردهای دقیق در اندازه‌گیری و گزارش داده‌ها است. برداشت آب از مه پتانسیل زیادی برای تأمین آب شیرین در جوامعی با بارندگی کم و مه قابل قبول دارد. این فناوری ساده

شامل یک توری متخلخل است که در معرض مه قرار می‌گیرد و قطرات آب جمع‌آوری شده توسط نیروی گرانش به کانال‌های جمع‌آوری منتقل می‌شود. با وجود کارایی و پایداری این روش، پیش‌بینی میزان جمع‌آوری آب مشکل است به دلیل نبود استانداردهای دقیق در اندازه‌گیری و گزارش داده‌ها.

۲-۳. بررسی مطالعات منتخب

از سال ۱۹۶۰ میلادی که ایده برداشت آب از رطوبت هوا توسط محققان مطرح شد تا به امروز، مطالعات زیادی در خصوص روش‌های متفاوت انجام این کار به صورت تئوری، تجربی و مروری انجام گرفته است. در ادامه مطالعات منتخب که در این زمینه انجام شده به ترتیب سال انتشار، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در مطالعه تجربی گوش^۱ و همکاران، امکانات جذب مه از برج‌های خنک‌کننده صنعتی (CT)^۲ در یک نیروگاه حرارتی بررسی شد. CT یکی از منابع اصلی تلفات آب صنعتی است. مطالعه یادشده نشان می‌دهد با استفاده از استراتژی برداشت مه پیشنهادی می‌توان به بازایی حدود ۴۰ درصد آب که به میزان صرفه‌جویی حدود ۱۰/۵ متر مکعب آب در ساعت از یک واحد ۵۰۰ مگاواتی می‌رسد، دست یافت. نتایج، پایه‌های طراحی را برای سیستم‌های جمع‌آوری مه در مقیاس کامل ارائه می‌دهد که می‌توانند در برج‌های خنک‌کننده نیروگاه و طیف گسترده‌ای از دیگر مولدهای مه مصنوعی مستقر شوند. شکل ۸ طرحی از قرارگیری سیستم توری‌های جاذب مه در CT را در این پژوهش نشان می‌دهد [۴۴].



شکل ۸. سیستم توری‌های جاذب مه CT در پژوهش گوش و همکاران [۴۴]

ریگالادو^۳ و همکاران، به کارایی جمع‌آوری مجموعه‌های مختلف آبگیرهای مه‌گیر، عمدتاً سازه‌های مسطح و استوانه‌ای مجهز به چندین صفحه از رشته‌های تکان‌دهنده، با استفاده از معادلات پارامتری که هم تأثیرات ضربه‌ای و هم تأثیرات آیرودینامیکی را در نظر می‌گیرند، پرداختند. همچنین، مدل‌های مختلفی معرفی کردند که از نظر پیچیدگی و دامنه کاربرد متفاوت هستند، و ممکن است برای تجزیه و تحلیل تأثیر هندسه، تعداد صفحه‌ها، فاصله و شیب رشته‌ها بر بازده آب مه کلکتور استفاده شوند [۴۵].

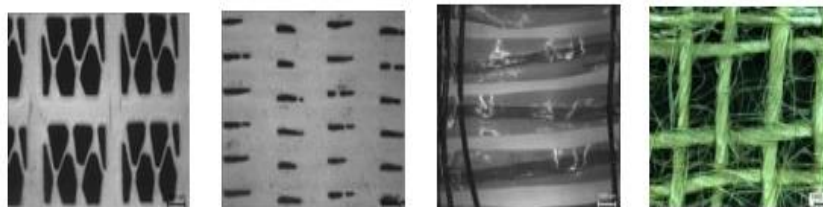
زهره کریمی دستنایی و همکاران، از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی مناطق با غلظت مه بالا استفاده کردند. چهار مدل، از جمله مدل خطی تعمیم‌یافته و مدل تقویت‌شده تعمیم‌یافته، دقت زیادی در نقشه‌برداری احتمال مه نشان دادند. متغیرهای اجتماعی در نظر گرفته شدند و نقشه‌های شاخص قابلیت برداشت مه آب^۴ با ترکیب احتمال مه و تناسب ایجاد شد. نتایج، جنوب شرقی منطقه را به عنوان مناسب‌ترین منطقه برای برداشت آب مه مشخص کرد [۴۶].

1. Ghosh
2. Cooling Tower (CT)
3. Regalado
4. Fog-Water Harvesting Capability Index (FCI)

عظیم^۱ و همکاران، با تمرکز بر یک رابطه هندسی که به عنوان راندمان استحصال آبرودینامیکی^۲ شناخته می‌شود، طرح‌هایی را برای جمع‌کننده‌های مه غیرفعال بهینه ارائه کردند. حداکثر راندمان تنها از طریق استفاده از کلکتورهای چندلایه‌ای به دست می‌آید که راندمان آن‌ها تا ۴۰ درصد از بهترین کلکتورهای تک‌لایه بیشتر است. این طرح می‌تواند تا ۴ برابر آنچه توسط مش دو لایه استاندارد راشل جمع‌آوری شده است، جمع‌آوری کند [۴۷].

اودین^۳ و همکاران با استفاده از مواد میکرو و نانو، یک توری به‌صرفه برای مصارف خانگی و کشاورزی که دارای دو قسمت آب‌دوست و آب‌گریز بود، ساختند. بخش آب‌دوست سبب تشکیل قطرات آب، و بخش آب‌گریز سبب چکه کردن قطرات آب تشکیل شده به مخزن جمع‌آوری می‌شد که در نهایت به نرخ استحصال روزانه تقریباً ۱/۵ لیتر به ازای هر مترمربع از توری رسیدند [۴۸].

هدبا^۴ و همکاران به ارزیابی عملی و نظری روزه‌های برداشت مه موجود به منظور مشخص کردن ویژگی‌های اقتصادی و فیزیکی آن‌ها پرداختند. اطلاعاتی در مورد توانایی مش‌های مختلف برای انجام در شرایط مختلف که قرار است به یک ساختار تهویه محیطی برای فضاهای بیرونی اضافه شود، ارائه کردند. روزه‌های مش مختلفی که مورد مطالعه و آزمایش قرار دادند در شکل ۹ نمایش داده شده است [۴۹].



شکل ۹. مش‌هایی با ابعاد روزه متفاوت در پژوهش هدبا و همکاران [۴۹]

کناپچیک کورکزاک^۵ و همکاران با ترکیب الیاف پلی وینیلیدین فلوراید^۶ برق‌ریسی شده، راندمان جمع‌آوری آب مش تجاری راشل را بیش از ۳۰۰ درصد بهبود دادند. یک سیستم نسبتاً ساده برای پیاده‌سازی و ارزان‌قیمت که روی راه‌حل‌های از قبل اعمال شده ساخته شده و قابلیت‌های طرح‌های موجود را گسترش می‌دهد نیز پیشنهاد دادند [۵۰].

چنگ^۷ و همکاران با توجه به مشکل انسداد آسان مش‌های سنتی جمع‌آوری مه، از ساختار برس‌های مه‌گیر برای جلوگیری از مشکل به طور مؤثر استفاده کردند. علاوه بر این، بیشتر پوشش‌های اصلاح‌شده روی مواد جمع‌آوری مه حاوی فلوروسیلان هستند که گران، مضر و برای استفاده طولانی‌مدت ناپایدار است [۵۱].

لی^۸ و همکاران به عنوان یک استراتژی مؤثر برای کاهش کمبود آب جهانی، از غشای ژانوس^۹ به طور گسترده برای برداشت قطرات مه استفاده کردند. با این حال، غشای ژانوس بسیار حساس به جهت جریان مه است که به طور پویا در طبیعت تغییر می‌کند. در این کار، یک جمع‌کننده مه سه‌لایه ساندویچی متشکل از یک مش داخلی آب‌دوست و دو مش بیرونی فوق آب‌گریز ایجاد شده است تا یک مجموعه مه پایدار و کارآمد مستقل از جهت جریان مه را فعال کند. این طراحی تجربی جدید دستاوردهای خوبی به همراه داشت [۵۲].

مونکوئه^{۱۰} و همکاران پی بردند که راه جذب آب از مه، با استفاده از شبکه‌هایی است که جمع‌کننده‌های مه نامیده می‌شوند

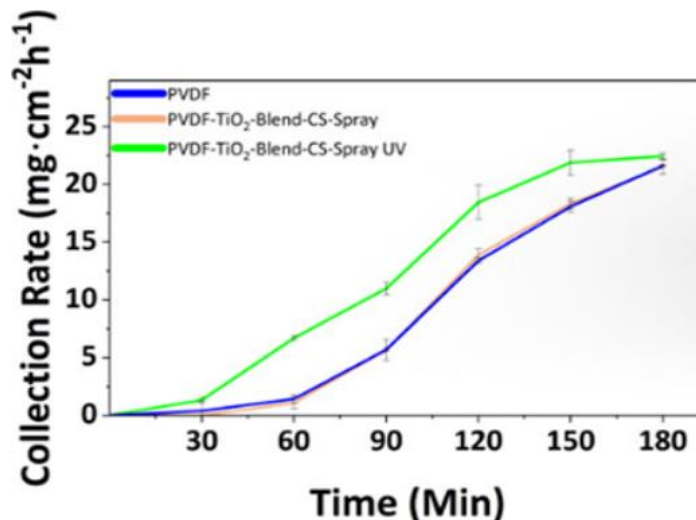
1. Azeem
2. Aerodynamic Collection Efficiency (ACE)
3. Uddin
4. Hadba
5. Knapczyk-Korczak
6. Electrospun Polyvinylidene Fluoride
7. Cheng
8. Li
9. Janus Membrane
10. Moncuquet

که این یک تکنیک امیدوارکننده برای تأمین آب شیرین در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. در این مطالعه، کارایی جذب مه‌گیرهای چنگک‌مانند متشکل از الیاف عمودی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های مقیاس آزمایشگاهی کنترل‌شده‌ای روی کلکتورهای مه مدل انجام و یک مدل نظری پیش‌بینی‌کننده برای توزیع مایع روی الیاف و اثرات آبرودینامیکی ایجاد و نتیجه خوبی بین مدل نظری و نتایج تجربی به دست آمد [۵۳].

کواس^۱ و همکاران مروری بر ادبیات سیستم‌های استحصال آب مبتنی بر جذب از دیدگاه مواد جاذب، تجزیه و تحلیل عملکرد، نیازهای انرژی و پیکربندی‌های سیستم ارائه کردند. رفتار جذب و معیارهای انتخاب جاذب‌های اخیر، به‌ویژه چارچوب‌های فلزی-آلی (MOFs)، نیز مورد بحث قرار گرفته گرفت. علاوه بر این، یک تحلیل عملکرد تعمیم‌یافته برای بحث و تحلیل پارامترهای عملکرد و نیازهای انرژی برای این سیستم‌ها مبتنی بر جذب ارائه شده است [۵۴].

مطالعه کاستلی^۲ و همکاران با هدف ارزیابی اولیه پتانسیل جمع‌آوری مه در منطقه‌ای با یک تحلیل تجربی ۱ ساله است که از طریق جمع‌کننده‌های مه ۱ متر مربعی در ۱۰ مکان مختلف انجام شده است. یک سیستم آبیاری با آب مه طراحی شده است که آب را برای یک مزرعه نظری استاندارد با چهار محصول محلی (ذرت، لوبیا سبز، سیب زمینی و گوجه فرنگی) در فصل خشک فراهم می‌کند. این مقاله نشان می‌دهد سالانه به طور متوسط می‌توان ۶/۰۱ لیتر بر مترمربع آب از رطوبت در روز، تا ماکزیمم ۸/۹۳ لیتر بر مترمربع در روز، استحصال کرد [۵۵].

پاریسی^۳ و همکاران با استفاده از مش‌های پلی‌وینیلیدین فلوراید برق‌ریسی^۴ شده که ترشوندگی آن‌ها با افزودن TiO_2 کنترل می‌شود، عملکرد جمع‌آوری آب مه در رطوبت بالا و پایین را مورد مطالعه قرار دادند و یافتند که مش‌ها پس از تابش اشعه ماوراء بنفش در نرخ‌های مه پایین‌تر، ۲۰۰ میلی‌لیتر در ساعت مؤثرتر بودند. عملکرد سه نوع مش بعد از ۶۰ دقیقه در مقابل نرخ پایین مه در شکل ۱۰ آورده شده است که مش تحت تابش اشعه بهترین عملکرد را دارد [۵۶].



شکل ۱۰. میزان نرخ استحصال سه مدل توری در گذر زمان در پژوهش پاریسی و همکاران [۵۶]

الشناوی^۵ و همکاران نوعی تکنیک ریاضی ساده برای محاسبه ضریب سایه مش‌های مختلف مورد استفاده در برداشت مه و برآورد تقریبی از حجم مش و هزینه ارائه کردند. از پنج هندسه جایگزین استفاده شد: مش مستطیل، مش مربع، مش راشل، مش مثلثی و مش شش‌ضلعی. روش ساده فعلی طراحی جمع‌کننده مش مه را تسهیل می‌کند و می‌تواند به دستیابی به ضریب سایه ایده‌آل و مؤثرترین هندسه مش برای برداشت مه کمک کند. مش‌های مستطیلی به عنوان نمونه برای ارزیابی نتایج استفاده شد و

1. Cuevas
2. Castelli
3. Parisi
4. Electrospinning
5. Elshennawy

با فولاد ضد زنگ با ضرایب سایه مختلف برای جمع‌آوری مه آزمایش شدند و مقدار آب جمع‌آوری شده توسط هر مش متفاوت شد. نتیجه‌گیری شد که ضریب سایه بهینه برای جمع‌آوری مه بین ۵۰ تا ۶۰ درصد است [۵۷].

موسی^۱ و همکاران یک مدل هوش مصنوعی با متغیرهای میانگین دمای روزانه، رطوبت نسبی و سرعت باد به عنوان ورودی با ۲۰ نورون برای یک طرح استوانه‌ای شکل توری توسعه دادند و نتایج معتبری حاصل شد که می‌تواند تلاش‌های تحقیقاتی آینده را هدایت کند و ارزیابی امکان‌سنجی جمع‌آوری آب مه را افزایش دهد [۵۸].

لی^۲ و همکاران نوعی روش نوین برداشت مه با جفت کردن مواد پلاسما و میکرونانو پیشنهاد کردند که می‌تواند ۹۳ درصد راندمان جمع‌آوری مه به دست آورد. روش اصلی استفاده از نانوذرات برای پوشش هر دو الکتروود تخلیه و الکتروود جمع‌آوری جمع‌کننده مه الکترواستاتیک میکرونانو است. برای الکتروود تخلیه، نانوذرات می‌توانند یک‌مرتبه به قدرت میدان الکتریکی بالاتر و کاهش در ولتاژ کاری دست یابند. برای الکتروود جمع‌آوری، یک ساختار ترکیبی جدید از آب‌گریز/آب‌دوست^۳ (HB/HL) پیشنهاد شده است. مزیت اصلی این است که انتقال قطرات جهت‌دار در محل اتصال HB و HL ناشی از کشش سطحی می‌تواند قطرات انباشته شده را در دو طرف تنظیم کند، که از باقی‌مانده قطرات و انسداد مش در ساختار کلی جلوگیری می‌کند. این فناوری نوعی رویکرد نوآورانه برای جمع‌آوری ریز قطرات و یک ایده طراحی جدید برای جمع‌کننده مه به منظور مقابله با بحران آب ارائه می‌دهد [۵۹].

محققان با الهام از طبیعت، مواد جدید و با کارایی بالایی برای برداشت آب ایجاد کرده‌اند که می‌تواند به طور مؤثری مشکلات کمبود آب را برطرف کند. اووآرانی و بیهورا^۴، با تجزیه و تحلیل عمیق ترشوندگی و انتقال قطرات آب این موجودات در طبیعت، سطوح بیونیک جدیدی که طبیعت و خواص مطلوب را با هم ترکیب می‌کنند، از طریق تکنیک‌های ساخت و جفت‌سازی نوآورانه توسعه دادند که می‌تواند ۲/۵ تا ۵/۳ برابر برداشت کارآمدتر آب نسبت به سطوح فوق آب‌گریز و فوق آب‌دوست معمولی داشته باشد. با ادغام مورفولوژی‌های مختلف مانند سوسک صحرا، کاکتوس و ژانوس، مقدار کارایی ۲۵۰ تا ۶۰۰ درصد در مقایسه با سطوح مورفولوژی یکنواخت فردی آن‌ها افزایش یافت. این بررسی همچنین چالش‌های فعلی و زمینه توسعه آینده در مواد برداشت آب را ارائه می‌کند [۶۰].

فو^۵ و همکاران یافتند که مواد فلزی بر اساس ترشوندگی و ساختار خاص به روشی مؤثر برای جمع‌آوری مه تبدیل شده‌اند. با این حال، بهبود بیشتر راندمان جمع‌آوری آب با طراحی دقیق ترشوندگی و ساختار ویژه مواد، هنوز یک مشکل است. بنابراین، پیشنهاد کردند که از گرادیان دما برای افزایش جمع‌آوری مه در سطح فلز استفاده شود. مکانیسم افزایش گرادیان دما، کارایی جمع‌آوری مه را تا ۵۴ درصد بهبود می‌بخشد. اندازه‌گیری‌های پراکندگی بیشتر نشان می‌دهد زمان جذب ذرات مه در سطح خنک‌کننده کم حدود ۴۰ درصد کوتاه می‌شود. بر اساس تئوری انتقال حرارت و ترموفورز^۶، گرادیان دمای اطراف فلز و رفتار ذرات مه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و به این نتیجه می‌رسد که افزایش عملکرد جمع‌آوری مه روی سطح فلز می‌تواند ناشی از گرادیان دمایی ناشی از گرماساز باشد [۶۱].

لی و همکارانش یک ساختار گوه‌ای زیست‌تقلید سه‌بعدی با الهام از برگ‌های گیاه آراوکاریا هتروفیلا توسعه دادند. این ساختار که برای برداشت آب بهینه شده است، ۱۱/۴۸ برابر بیشتر از صفحات مسطح آب جمع‌آوری می‌کند، در شرایط سخت کارآمد باقی می‌ماند و منبع آب پایداری را برای کشاورزی و مصارف خانگی در مناطق خشک فراهم می‌کند [۶۲]. زارعی و همکارانش یک سطح آلومینیومی الهام‌گرفته از طبیعت با الگوهای ناهموار از طریق چاپ سه‌بعدی و نانوپوشش برای افزایش برداشت آب جوی توسعه دادند. سطح اصلاح‌شده، رشد و تحرک قطرات را بهبود بخشید و در برداشت مه به ۳۰۵۵ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع بر ساعت رسید که پتانسیل بالایی را برای جمع‌آوری پایدار آب در محیط‌های متنوع نشان می‌دهد [۶۳].

1. Mosa
2. Li
3. Hydrophobic/Hydrophilic
4. Uvarani and Behura
5. Fu
6. Thermophoresis

پس از بررسی مطالعات منتخب، جدول ۵ مروری بر مطالعات منتخب در زمینه برداشت آب از مه با استفاده از توری‌ها ارائه می‌دهد. هر مطالعه بر هدف، روش کار، یافته‌ها و تمرکز بر هندسه یا جنس توری تمرکز دارد.

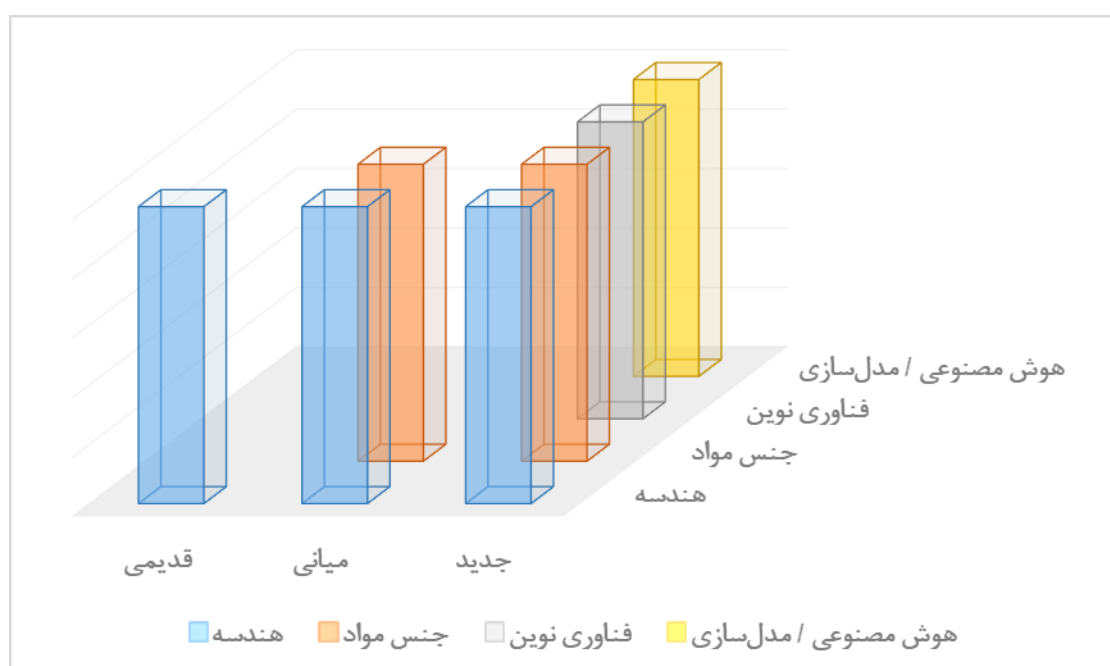
جدول ۵. مرور مطالعات منتخب در زمینه برداشت آب از مه با توری‌ها

منابع	هدف مطالعه	روش کار	یافته‌ها	تمرکز مطالعه
[۴۴]	بررسی امکانات جذب مه از برج‌های خنک‌کننده صنعتی	مطالعه تجربی روی CT	بازیابی حدود ۴۰ درصد آب، صرفه‌جویی ۱۰/۵ متر مکعب در ساعت؛ پایه طراحی سیستم جمع‌آوری مه در مقیاس کامل	هندسه
[۴۵]	کارایی جمع‌آوری مجموعه‌های مختلف آبگیرهای مه‌گیر	معادلات پارامتری، بررسی هندسه، تعداد صفحه‌ها، فاصله و شیب رشته‌ها	مدل‌های مختلف برای تحلیل پارامترهای هندسی	هندسه
[۴۶]	پیش‌بینی مناطق با غلظت مه بالا	الگوریتم‌های هوش مصنوعی	جنوب شرقی منطقه مناسب‌ترین منطقه برای برداشت آب مه	-
[۴۷]	طراحی کلکتورهای مه غیرفعال بهینه	تمرکز بر راندمان آپرودینامیکی، طراحی کلکتور چند لایه	حداکثر راندمان تا ۴۰ درصد بالاتر از کلکتورهای تک‌لایه	هندسه
[۴۸]	توری به‌صرفه خانگی و کشاورزی	مواد میکرو و نانو، دو قسمت آب‌دوست و آب‌گریز	نرخ استحصال روزانه ۱/۵ لیتر بر m^2	جنس
[۴۹]	ارزیابی عملی و نظری روزه‌های برداشت مه	آزمایش مش‌های مختلف با ابعاد روزه متفاوت	ارائه ویژگی‌های اقتصادی و فیزیکی روزه‌ها	هندسه
[۵۰]	بهبود راندمان مش تجاری راشل	ترکیب الیاف PVDF برقی‌رسی شده	افزایش راندمان بیش از ۳۰ درصد؛ سیستم ساده و ارزان	جنس
[۵۱]	حل مشکل انسداد مش‌های سنتی	ساختار برس‌های مه‌گیر، پوشش فلوروسیلان	انسداد کاهش یافت؛ پوشش‌ها پایدار نبودند	هندسه و جنس
[۵۲]	استراتژی کاهش کمبود آب جهانی	جمع‌کننده مه سه‌لایه ساندویچی، مش داخلی آب‌دوست، مش بیرونی آب‌گریز	دستاوردهای تجربی خوب برای جمع‌آوری پایدار مه	هندسه و جنس
[۵۳]	بررسی کارایی کلکتورهای چنگک	آزمایش مقیاس آزمایشگاهی، مدل نظری	هماهنگی خوب بین مدل نظری و نتایج تجربی	هندسه
[۵۴]	مروری بر سیستم‌های استحصال آب مبتنی بر جذب	تحلیل مواد جاذب، عملکرد، نیاز انرژی	تحلیل تعمیم‌یافته پارامترهای عملکرد و نیازهای انرژی	جنس
[۵۵]	ارزیابی پتانسیل جمع‌آوری مه یک‌ساله	تحلیل تجربی یک‌ساله با جمع‌کننده‌های ۱ m^2 در ۱۰ مکان	آب مه متوسط ۶۰۱ تا حداکثر ۸۹۳ لیتر/ m^2 /روز؛ طراحی سیستم آبیاری مزرعه نمونه	هندسه
[۵۶]	UV تحت PVDF عملکرد مش‌های تابش UV، مطالعه عملکرد در رطوبت بالا و پایین	تابش UV، مطالعه عملکرد در رطوبت بالا و پایین	مش تحت تابش مؤثرتر؛ ۲۰۰ میلی‌لیتر/h نرخ مه پایین‌تر	جنس
[۵۷]	محاسبه ضریب سایه مش‌ها	روش ریاضی ساده برای پنج هندسه مش	ضریب سایه بهینه ۵۰-۶۰٪؛ اختلاف جمع‌آوری آب بین مش‌ها	هندسه
[۵۸]	مدل هوش مصنوعی برای جمع‌آوری مه	مدل با دما، رطوبت، باد و ۲۰ نورون	نتایج معتبر؛ افزایش امکان‌سنجی جمع‌آوری آب مه	-
[۵۹]	برداشت مه با مواد پلاسما و میکرو نانو	پوشش نانوذرات روی الکتروود تخلیه و جمع‌آوری، ساختار HB/HL	راندمان جمع‌آوری مه ۹۳٪؛ جلوگیری از انسداد مش	جنس
[۶۰]	مواد جدید بیونیک برای برداشت آب	ترکیب مورفولوژی موجودات طبیعی	کارایی برداشت ۲۵-۳۵ برابر بیشتر؛ افزایش ۲۵۰-۶۰۰٪	جنس
[۶۱]	مواد فلزی با گرادیان دما	تحلیل ترشوندگی و ترموفورز	بهبود عملکرد تا ۵۴٪؛ کاهش زمان جذب ذرات مه ۴۰٪	جنس
[۶۲]	ساختار گوه‌ای زیست تقلید سه‌بعدی	الهام از برگ‌های Araucaria heterophylla	جمع‌آوری ۱۱۰۴۸ برابر بیشتر؛ منبع پایدار آب	هندسه و جنس
[۶۳]	سطح آلومینومی با چاپ سه‌بعدی و نانوپوشش	چاپ سه‌بعدی و نانوپوشش	رشد و تحرک قطرات بهبود یافته؛ برداشت $mg/m^2/h$ ۳۰۵۵	هندسه و جنس

با بررسی مطالعات اخیر در زمینه جمع‌آوری مه، چند خلأ و گپ پژوهشی آشکار می‌شود. بیشتر مطالعات اولیه عمدتاً روی هندسه توری‌ها و شکل کلکتورهای مه تمرکز داشتند تا افزایش راندمان جمع‌آوری، در حالی که مطالعه‌هایی که روی جنس مواد و بهبود ترشوندگی یا نانوپوشش‌ها تمرکز داشتند، محدود بوده و معمولاً هندسه را هم‌زمان بررسی نکرده‌اند. بنابراین، طراحی هم‌زمان و سیستماتیک هندسه و جنس کلکتورها هنوز به طور جامع بررسی نشده است. همچنین تنها تعداد کمی از مطالعات به مناطق مناسب برداشت مه و تحلیل مکانی توجه داشته‌اند و نقشه‌های پتانسیل مه و مدل‌های پیش‌بینی با داده‌های اقلیمی واقعی، به‌ویژه در مقیاس ملی یا منطقه‌ای، هنوز جای توسعه دارند. بیشتر آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی یا یک‌ساله انجام شده و داده‌های بلندمدت یا آزمایش‌ها در شرایط عملی واقعی که شامل تغییرات فصلی، سرعت باد و جهت جریان مه باشد، محدود است. مطالعات اخیر به مواد نانو، بیونیک و ساختارهای زیست‌تقلید توجه دارند، اما بررسی‌های سیستماتیک روی دوام طولانی‌مدت، هزینه و قابلیت مقیاس‌پذیری این مواد هنوز کم است. در زمینه مدل‌سازی و هوش مصنوعی نیز تنها تعداد محدودی از مطالعات به پیش‌بینی عملکرد کلکتورها پرداخته‌اند و استفاده گسترده از یادگیری ماشین و شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات برای پیش‌بینی عملکرد واقعی هنوز جا برای توسعه دارد.

با گذر زمان، تمرکز مطالعات تغییر کرده است. در مطالعات اولیه، تمرکز اصلی روی هندسه کلکتورها و بهبود راندمان ساده بود و روش‌ها بیشتر تجربی و پارامتری بودند. در مطالعات میانی، ترکیبی از بررسی هندسه و جنس مواد مشاهده می‌شود و مدل‌های ساده به کار گرفته شده‌اند، در حالی که استفاده از مش‌های جدید و تحلیل ترشوندگی نیز مطرح شد. در مطالعات اخیر، گرایش قوی به مواد نوین، طراحی‌های زیست‌تقلید، ساختارهای سه‌بعدی و فناوری نانو مشاهده می‌شود و هوش مصنوعی و مدل‌سازی پیش‌بینی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، روند مطالعات نشان می‌دهد جامعه علمی از تحلیل‌های تجربی ساده به سمت استفاده از فناوری‌های نوین و مواد پیشرفته برای افزایش راندمان و قابلیت مقیاس‌پذیری در شرایط واقعی حرکت کرده است.

مطابق شکل ۱۱، مطالعات قدیمی‌تر بیشتر روی طراحی هندسه توری‌ها و بهبود راندمان مکانیکی تمرکز داشتند، در حالی که مطالعات جدیدتر به سمت استفاده از مواد نوین، زیست‌تقلید و فناوری‌های هوش مصنوعی برای افزایش کارایی و پایداری برداشت آب مه گرایش یافته‌اند.



شکل ۱۱. تحول تمرکز مطالعات جمع‌آوری مه

بر اساس مطالعات مرور شده، سیستم‌های جمع‌آوری آب مه غیرفعال (passive)، بسته به راندمان طراحی و سطح پوشش، می‌توانند از حدود $1/5$ لیتر/ m^2 /روز تا بیش از 10 لیتر/ m^2 /روز آب برداشت کنند. اگر این روش در مقیاس شهری به کار رود، به‌خصوص برای شهرهایی با منابع محدود آب و مصرف بالای انرژی برای شیرین‌سازی و انتقال آب، نقش قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی خواهد داشت.

به طور مثال، فرض کنید یک شهر متوسط با جمعیت یک میلیون نفر و مصرف آب 200 لیتر/نفر/روز داشته باشد. برداشت غیرفعال مه با راندمان متوسط 5 لیتر/ m^2 /روز و استفاده از سطح کل توری‌های جمع‌آوری به اندازه 5 کیلومتر مربع، می‌تواند حدود 25 میلیون لیتر آب در روز تأمین کند. این میزان برابر با $12/5$ درصد از مصرف روزانه شهر است. با جایگزینی این بخش از آب، نیاز به پمپاژ، تصفیه و انتقال آب کاهش می‌یابد که به صورت مستقیم باعث صرفه‌جویی قابل توجه انرژی شهری خواهد شد. به بیان ساده‌تر، استفاده گسترده از سیستم‌های غیرفعال می‌تواند به عنوان راهکار مکمل پایدار برای کاهش بار انرژی و اتکای شهری به منابع آب انرژی‌بر عمل کند، به‌ویژه در مناطقی که انرژی و آب هر دو محدود هستند.

به طور کلی در حوزه تأمین پایدار آب، پژوهش‌ها نشان می‌دهد این مسئله تنها محدود به روش‌های برداشت مستقیم نیست و ارتباط نزدیکی با مدیریت انرژی و تحلیل رفتار سیالات دارد. مطالعاتی در زمینه ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، تأمین آب گرم با سامانه‌های خورشیدی و همچنین، کاربرد هوش مصنوعی در پیش‌بینی تبخیر، میعان و دینامیک بخار آب و همچنین، سیستم‌های انرژی نشان می‌دهند نگاه چندرشته‌ای، مسیر اصلی توسعه فناوری‌های نوین آب‌رسانی است [۶۴ - ۶۶]. توجه به بعد دیگر این فناوری‌ها، از تولید آب شیرین گرفته تا سیستم‌های انرژی و حتی حمل‌ونقل آن می‌تواند به توسعه پایدار منجر شود و اثرات زیست‌محیطی با تمرکز بیشتری به بخش فنی اضافه شود [۶۷ و ۶۸]. این رویکرد در نهایت بستر مناسبی برای بهبود کارایی روش‌هایی مانند جمع‌آوری مه فراهم می‌کند.

۴. نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی سیستم‌های جمع‌آوری آب مه و نقش آن‌ها در تأمین پایدار آب و کاهش مصرف انرژی پرداخت. با توجه به محدودیت منابع آب و افزایش تقاضا، استفاده از فناوری‌های کم‌مصرف و مبتنی بر انرژی طبیعی اهمیت یافته است. مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد پژوهش‌های اولیه عمدتاً بر هندسه توری‌ها و شکل کلکتورها تمرکز داشتند تا راندمان جمع‌آوری افزایش یابد، در حالی که بررسی جنس مواد، ترشوندگی و نانوپوشش‌ها محدود بوده و معمولاً هندسه را هم‌زمان در نظر نگرفته‌اند. طراحی هم‌زمان هندسه و جنس کلکتورها هنوز به طور جامع بررسی نشده است. همچنین، تنها تعداد کمی از مطالعات، تحلیل مکانی و شناسایی مناطق مناسب برداشت مه با استفاده از داده‌های اقلیمی واقعی را مورد توجه قرار داده‌اند و آزمایش‌های بلندمدت یا عملی واقعی محدود است.

با گذر زمان، تمرکز پژوهش‌ها تغییر کرده و مطالعات اخیر گرایش به مواد نوین، طراحی‌های زیست‌تقلید، ساختارهای سه‌بعدی و فناوری نانو دارند. استفاده از هوش مصنوعی و مدل‌سازی پیش‌بینی عملکرد کلکتورها نیز افزایش یافته است، اما بررسی سیستماتیک دوام طولانی‌مدت، هزینه و قابلیت مقیاس‌پذیری این روش‌ها هنوز جای توسعه دارد. روند مطالعات نشان می‌دهد جامعه علمی از تحلیل‌های تجربی ساده به سمت بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته و مدل‌های پیش‌بینی برای افزایش راندمان و کاربرد عملی حرکت کرده است.

مطالعات مرور شده نشان می‌دهند سیستم‌های غیرفعال جمع‌آوری آب مه، بسته به راندمان طراحی و سطح پوشش، می‌توانند بین $1/5$ تا بیش از 10 لیتر به ازای یک مترمربع توری در روز آب تولید کنند. به بیانی دیگر، تا $12/5$ درصد از مصرف روزانه آب یک شهر با جمعیت متوسط 1 میلیون نفر را می‌توانند تأمین کنند. استفاده از این فناوری نه تنها به کاهش وابستگی به منابع آب دیگر کمک می‌کند، بلکه به طور قابل توجهی مصرف انرژی مورد نیاز برای پمپاژ، تصفیه و انتقال آب را کاهش می‌دهد و صرفه‌جویی انرژی شهری قابل توجهی به همراه دارد. در مقیاس شهری، این مقدار می‌تواند بخش قابل توجهی از نیاز آب شهر را تأمین کرده و به کاهش مصرف انرژی مرتبط با تصفیه و انتقال آب کمک کند. بنابراین، جمع‌آوری آب مه، به‌ویژه در مناطق با محدودیت منابع آب و انرژی، به عنوان یک راهکار مکمل پایدار مطرح است و تحقیقات آینده باید بر طراحی سیستماتیک هندسه و مواد،

توسعه مدل‌های پیش‌بینی و اجرای آزمایش‌های بلندمدت در شرایط واقعی تمرکز کند تا قابلیت مقیاس‌پذیری و پایداری آن افزایش یابد.

پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های آینده بر طراحی هم‌زمان هندسه و جنس مواد کلکتورها تمرکز کنند تا راندمان جمع‌آوری افزایش یابد. علاوه بر این، استفاده از داده‌های اقلیمی واقعی برای تحلیل مکانی و شناسایی مناطق مناسب برداشت مه باید گسترش یابد. همچنین، اجرای آزمایش‌های بلندمدت و بررسی دوام طولانی‌مدت، هزینه و مقیاس‌پذیری این فناوری‌ها در شرایط واقعی ضروری است.

منابع

1. Tang W, Pei Y, Zheng H, Zhao Y, Shu L, Zhang H. Twenty years of China's water pollution control: Experiences and challenges. *Chemosphere*. 2022 May 1;295:133875.
2. Rijsberman FR. Water scarcity: fact or fiction?. *Agricultural water management*. 2006 Feb 24;80(1-3):5-22.
3. Hoff H. Global water resources and their management. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2009 Dec 1;1(2):141-7.
4. Lu J, Kong D, Zhang Y, Xie Y, Gu X, Gulakhmadov A. Hotspots of global water resource changes and their causes. *Earth's Future*. 2025 Feb;13(2):e2024EF005461.
5. Haddout S, Priya KL, Hogueane AM, Ljubenkov I. Water scarcity: A big challenge to slums in Africa to fight against COVID-19. *Science & Technology Libraries*. 2020 Jul 2;39(3):281-8.
6. Liyanage CP, Yamada K. Impact of population growth on the water quality of natural water bodies. *Sustainability*. 2017 Aug 9;9(8):1405.
7. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality: incorporating the first and second addenda. World Health Organization; 2022 Mar 31.
8. Water UN. Sustainable Development Goal 6 synthesis report on water and sanitation. Published by the United Nations New York, New York. 2018;10017.
9. Mohapatra SS, Arora M, Wu W, Tiwari MK. A Review of IUWM Approach to Address Urban Water Challenges Faced by a Developing Country. *Water Resources Management*. 2025 Mar 1:1-9.
10. Verbrugge N, Khan AZ. Water harvesting through fog collectors: a review of conceptual, experimental and operational aspects. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2023;18:392-403.
11. Domen JK, Stringfellow WT, Camarillo MK, Gulati S. Fog water as an alternative and sustainable water resource. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2014 Feb;16(2):235-49.
12. Olivier J. Fog-water harvesting along the West Coast of South Africa: A feasibility study. *Water Sa*. 2002;28(4):349-60.
13. Moaven M, Allahrabbi Shirazi M, Ghodusinejad MH. Systematic Analysis of the Impact of Life Cycle Assessment of Materials on Urban Heat Island Mitigation: A Path Toward Sustainable Urban Policy Using the PRISMA Method. *Urban Development Policy Making*. 2025 Apr 4;2(1):95-110.
14. Velmurugan A, Swarnam P, Subramani T, Meena B, Kaledhonkar MJ. Water demand and salinity. Desalination-challenges and opportunities. 2020 Jan 28;10.
15. Rajagopal R, Brands E, Wichman MD. Drinking Water. *International encyclopedia of geography*. US: John Wiley and Sons Ltd. 2016;10(978111878635):2.
16. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. World health organization; 2004 Aug 31.
17. Mittal H, Kumar V, Alhassan SM, Ray SS. Modification of gum ghatti via grafting with acrylamide and analysis of its flocculation, adsorption, and biodegradation properties. *International journal of biological macromolecules*. 2018 Jul 15;114:283-94.
18. Kumar N, Mittal H, Parashar V, Ray SS, Ngila JC. Efficient removal of rhodamine 6G dye from aqueous solution using nickel sulphide incorporated polyacrylamide grafted gum karaya bionanocomposite hydrogel. *RSC advances*. 2016;6(26):21929-39.
19. Kumar N, Ray SS, Ngila JC. Ionic liquid-assisted synthesis of Ag/Ag₂Te nanocrystals via a hydrothermal route for enhanced photocatalytic performance. *New Journal of Chemistry*. 2017;41(23):14618-26.
20. Mukweho N, Fosso-Kankeu E, Waanders F, Kumar N, Ray SS, Yangkou Mbianda X. Photocatalytic activity of Gd₂O₂CO₃·ZnO·CuO nanocomposite used for the degradation of phenanthrene. *SN Applied Sciences*. 2019 Jan;1(1):10.
21. Yang Z, Shan C, Zhang W, Jiang Z, Guan X, Pan B. Temporospatial evolution and removal mechanisms of As (V) and Se (VI) in ZVI column with H₂O₂ as corrosion accelerator. *Water Research*. 2016 Dec 1;106:461-9.

22. Gómez NS, Ballesteros RM, Canese SE. Adaptándose a la escasez de agua en comunidades rurales del corredor seco centroamericano: análisis de costo-beneficio para mejorar la provisión de agua potable en la comunidad de Maraxco, Chiquimula, Guatemala. *Aqua-LAC*. 2017;9(2):85-101.
23. Kordbacheh F, Heidari G. Water pollutants and approaches for their removal. *Materials Chemistry Horizons*. 2023 May 1;2(2):139-53.
24. Liu W, Dai C, He L, Liu X, Zhao Z, Yan W, Yuan M, Song Z, Cui S. Biomass aerogel: An emerging eco-friendly material for adsorbing pollutants in water. *Chemical Engineering Journal*. 2025 Apr 22:162977.
25. Gadipelly C, Pérez-González A, Yadav GD, Ortiz I, Ibáñez R, Rathod VK, Marathe KV. Pharmaceutical industry wastewater: review of the technologies for water treatment and reuse. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014 Jul 23;53(29):11571-92.
26. Gusain R, Kumar N, Ray SS. Recent advances in carbon nanomaterial-based adsorbents for water purification. *Coordination Chemistry Reviews*. 2020 Feb 15;405:213111.
27. Bieber S. Water treatment equipment for in-center hemodialysis. In *Handbook of Dialysis Therapy* 2023 Jan 1 (pp. 80-92). Elsevier.
28. Mazza D, Tarchi D, Juan AA. Advanced technologies in smart cities. *Energies*. 2022 Jun 29;15(13):4764.
29. Masłoń A, Czarnota J, Szaja A, Szulżyk-Cieplak J, Łagód G. The enhancement of energy efficiency in a wastewater treatment plant through sustainable biogas use: Case study from Poland. *Energies*. 2020 Nov 19;13(22):6056.
30. Martin DL, Dorn TW, Melvin SR, Corr AJ, Kranz WL. Evaluating energy use for pumping irrigation water.
31. Chini CM, Stillwell AS. The state of US urban water: data and the energy-water nexus. *Water Resources Research*. 2018 Mar;54(3):1796-811.
32. Zhou J, Reniers G. Petri net simulation of multi-department emergency response to avert domino effects in chemical industry accidents. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021 Feb 1;146:916-26.
33. Karim MR, Naser J. Numerical modelling of solid biomass combustion: difficulties in initiating the fixed bed combustion. *Energy Procedia*. 2017 Mar 1;110:390-5.
34. Aladwani SH, Al-Obaidi MA, Mujtaba IM. Performance of reverse osmosis based desalination process using spiral wound membrane: Sensitivity study of operating parameters under variable seawater conditions. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021 Dec 1;5:100284.
35. Barus T, Wati L, Suwanto A. Diversity of protease-producing *Bacillus* spp. from fresh Indonesian tempeh based on 16S rRNA gene sequence. *HAYATI Journal of Biosciences*. 2017 Jan 1;24(1):35-40.
36. Poudyal R, Loskot P, Nepal R, Parajuli R, Khadka SK. Mitigating the current energy crisis in Nepal with renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019 Dec 1;116:109388.
37. Longo S, Mauricio-Iglesias M, Soares A, Campo P, Fatone F, Eusebi AL, Akkersdijk E, Stefani L, Hospido A. ENERWATER—A standard method for assessing and improving the energy efficiency of wastewater treatment plants. *Applied Energy*. 2019 May 15;242:897-910.
38. Muhlfeld CC, Kovach RP, Jones LA, Al-Chokhachy R, Boyer MC, Leary RF, Lowe WH, Luikart G, Allendorf FW. Invasive hybridization in a threatened species is accelerated by climate change. *Nature Climate Change*. 2014 Jul;4(7):620-4.
39. Zhao F, Zhou X, Liu Y, Shi Y, Dai Y, Yu G. Super moisture-absorbent gels for all-weather atmospheric water harvesting. *Advanced Materials*. 2019 Mar;31(10):1806446.
40. Klemm O, Schemenauer RS, Lummerich A, Cereceda P, Marzol V, Corell D, Van Heerden J, Reinhard D, Gherezghiher T, Olivier J, Osses P. Fog as a fresh-water resource: overview and perspectives. *Ambio*. 2012 May;41(3):221-34.
41. Cereceda P, Schemenauer RS. The occurrence of fog in Chile. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1991 Aug;30(8):1097-105.
42. Langmuir I, Blodgett K. A mathematical investigation of water droplet trajectories. Army Air Forces Headquarters, Air Technical Service Command; 1946.

43. Lu W, Yuan H. Investigating waste reduction potential in the upstream processes of offshore prefabrication construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013 Dec 1;28:804-11.
44. Ghosh R, Ray TK, Ganguly R. Cooling tower fog harvesting in power plants—A pilot study. *Energy*. 2015 Sep 1;89:1018-28.
45. Regalado CM, Ritter A. The design of an optimal fog water collector: A theoretical analysis. *Atmospheric Research*. 2016 Sep 1;178:45-54.
46. Karimidastenaei Z, Haghghi AT, Rahmati O, Rasouli K, Rozbeh S, Pirnia A, Pradhan B, Kløve B. Fog-water harvesting Capability Index (FCI) mapping for a semi-humid catchment based on socio-environmental variables and using artificial intelligence algorithms. *Science of The Total Environment*. 2020 Mar 15;708:135115.
47. Preetha P, Bathi JR, Kumar M, Kode VR. Predictive Tools and Advances in Sustainable Water Resources Through Atmospheric Water Generation Under Changing Climate: A Review. *Sustainability*. 2025 Feb 11;17(4):1462.
48. Uddin MN, Desai FJ, Rahman MM, Asmatulu R. A highly efficient fog harvester of electrospun permanent superhydrophobic–hydrophilic polymer nanocomposite fiber mats. *Nanoscale advances*. 2020;2(10):4627-38.
49. Hadba L, Mendonça P, Silva LT, Carvalho M. Selecting fog harvesting meshes for environmental conditioning structures.
50. Knapczyk-Korczak J, Szewczyk PK, Ura DP, Bailey RJ, Bilotti E, Stachewicz U. Improving water harvesting efficiency of fog collectors with electrospun random and aligned Polyvinylidene fluoride (PVDF) fibers. *Sustainable materials and technologies*. 2020 Sep 1;25:e00191.
51. Cheng Y, Zhang S, Liu S, Huang J, Zhang Z, Wang X, Yu Z, Li S, Chen Z, Zhao Y, Lai Y. Fog catcher brushes with environmental friendly slippery alumina micro-needle structured surface for efficient fog-harvesting. *Journal of cleaner production*. 2021 Sep 15;315:127862.
52. Li J, Li W, Han X, Wang L. Sandwiched nets for efficient direction-independent fog collection. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2021 Jan 1;581:545-51.
53. Moncuquet A, Mitranescu A, Marchand OC, Ramanarivo S, Duprat C. Collecting fog with vertical fibres: combined laboratory and in-situ study. *Atmospheric Research*. 2022 Oct 15;277:106312.
54. Cuevas JG, Bustamante C, Ostria-Gallardo E, Hernández P. The role of xerophytic vegetation on fog harvest. *Journal of Arid Environments*. 2023 Feb 1;209:104887.
55. Castelli G, Sanchez AC, Mestrallet A, Montaña LC, de Armentia TL, Salbitano F, Bresci E. Fog as unconventional water resource: Mapping fog occurrence and fog collection potential for food security in Southern Bolivia. *Journal of Arid Environments*. 2023 Jan 1;208:104884.
56. Parisi G, Szewczyk PK, Narayan S, Stachewicz U. Photoresponsive electrospun fiber meshes with switchable wettability for effective fog water harvesting in variable humidity conditions. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2023 Aug 9;15(33):40001-10.
57. Elshennawy AA, Abdelaal MY, Hamed AM, Awad MM. Evaluating mesh geometry and shade coefficient for fog harvesting collectors. *Water Resources Management*. 2023 Dec;37(15):6107-26.
58. Mosa M, Radwan F, Al-Ghobari H, Fouli H, Alazba AA. Impact of varied fog collector designs on fog and rainwater harvesting under fluctuating wind speed and direction. *Earth Science Informatics*. 2024 Feb;17(1):617-31.
59. Li D, Li C, Zhang M, Xiao M, Li J, Yang Z, Fu Q, Wang P, Yu K, Pan Y. Advanced fog harvesting method by coupling plasma and micro/nano materials. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2024 Feb 16;16(8):10984-95.
60. Uvarani A, Behura AK. Fog harvesting efficiency analysis of biomimicking surfaces: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2024 Feb 22;09544089241230162.
61. Fu Y, Li L, Ai S, Guo Z, Liu W. High-effective fog collection on metal surfaces by temperature gradients. *Materials Today Sustainability*. 2024 Mar 1;25:100654.
62. Li S, Li B, Wang C, Zhang R, Guo Z. 3D interlaced biomimetic wedge structures for efficient fog harvesting. *Small*. 2025 May;21(20):2412333.

63. Zarei M, Dabir B, Esmaeilian N, Warsinger DM. Biomimetic bumpy and eco-friendly slippery surfaces for enhanced dew and fog water harvesting. *Journal of Water Process Engineering*. 2025 Feb 1;70:106950.
64. Kaldeh SN, Yousefi H, Abdoos M, Shirazi MA, Noorollahi Y. Mapping thermal energy storage research in buildings (2020–2025): a bibliometric analysis of trends, themes, and global collaboration. *Energy Conversion and Management*: X. 2025 Oct 17:101345.
65. Mohammaddini S, Yousefi H, Abdoos M, Shirazi MA, Hajinezhad A. Techno-economic simulation of solar flat plate collector systems for building hot water demand supply. *Energy*. 2025 Oct 16:138933.
66. Naziri A, Tahavvor AR, Shirazi MA, Zahedi R. Feasibility study on heat recovery from gas turbine exhaust for absorption chiller operation and efficiency enhancement using neural networks. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2025 Oct 24:104210.
67. Allah Rabbi Shirazi MA. Idea generation and examination of environmental challenges of floating solar photovoltaic power plants on wetlands and its economic advantage for local communities. *Journal of Sustainable Energy Systems*. 2024 Jan; 3(1): 39-51.
68. Shirazi MA, Zahedi R, Yousefi H, Aslani A. Environmental and damage assessment of electric vehicles compared to internal combustion engine vehicles under various ambient temperature scenarios using the LCA approach. *Energy Nexus*. 2025 Nov 19; 100606.