DOR: https://dorl.net/dor/20.1001.1.28212606.1400.4.10.1.6

فصلنامه علمی آماد و فناوری دفاعی، سال چهارم، شماره دهم، تابستان ۱۴۰۰

استحصال آب از مه در ایران، پدافندی غیرعامل

جهت تأمین آب در مناطق دورافتاده

بهزاد قیاسی[۱]، حنیف کازرونی[۲]، حامد حسنلو[۳]، رامیار علی رمایی[۴]

تاریخ دریافت:۱۳۹۸/۰۷/۲۰ **تاریخ پذیرش:۱۳۹۸/۰۸/۱۸**

چکیده

بحران کمبود منابع آب شیرین کشور در اثر رشد جمعیت، خشک‌سالی، مصرف بی‌رویه و عدم مدیریت صحیح منابع آب در حال حاضر تبدیل به معضلی جدی شده است. یکی از منابع آب مهم در دنیا که حجم کل آب آن تقریباً شش برابر رودخانه‌های سراسر دنیا می‌باشد، آب موجود در اتمسفر هوا است. استحصال این آب زمانی توجیه‌پذیر است که تعداد روز مه و رطوبت نسبی بالایی وجود داشته باشد. درنتیجه بررسی پتانسیل استحصال مه در ایران امری ضروری است. بدین منظور، در این تحقیق توجیه فنی و اقتصادی استحصال مه در کشور ایران انجام‌شده است. در این راستا، اطلاعات ۵ ایستگاه هواشناسی دارای بیشترین تعداد روز دارای مه در سال در مناطق مختلف کشور استخراج گردید. مقدار پتانسیل آب تولیدی از هوا در این ایستگاه‌ها به دست آمد و شرایط آب و هوایی آن‌ها با دیگر مطالعات انجام‌شده و نقاط مختلف دنیا مقایسه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که کشورهای دیگر باوجود پتانسیل کمتر آب موجود در هوا، تعداد روزهای مه و رطوبت نسبی کمتر، استفاده بیشتری از این منبع باارزش کرده‌اند. هزینه استحصال آب از مه تقریباً به ازای هر مترمکعب ۳۰۰۰۰ ریال تخمین زده شد که نسبت به دیگر روش ها هم چون آب شیرین‌کن به‌مراتب ارزان‌تر است. درنتیجه با توجه به پتانسیل بالای نقاط مختلف کشور با تعداد روزهای مه و مقدار آب موجود در هوای بالا، استفاده از این منبع ارزشمند باید در کشور به‌خصوص مناطق دورافتاده نهادینه شود و از این پتانسیل بالقوه موجود در کشور به‌عنوان یک پدافند غیرعامل استفاده نمود.

کلمات کلیدی: تأمین آب، رطوبت نسبی، منابع متعارف، مه، راهبرد دفاعی

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی محیط‌زیست – منابع آب، دانشکده محیط‌زیست، پردیس دانشکده فنی، دانشگاه تهران و نویسنده مسئول، پست الکترونیک: Behzad.ghiasi@ut.ac.ir

[۲] عضو هیئت‌علمی دانشگاه عالی دفاع ملی و تحقیقات راهبری

[۳] دانش‌آموخته دکتری مهندسی محیط‌زیست – آب و فاضلاب، دانشکده محیط‌زیست، پردیس دانشکده فنی، دانشگاه تهران

[۴] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه

آب‌های شیرین تنها سه درصد از آب‌های کره زمین را شامل می‌شوند که مطابق آمار موجود از این سه درصد، تقریباً ۶۹ درصد در قطب‌ها ذخیره‌شده است و عملاً غیرقابل‌دسترس می‌باشد و ۳۰ درصد نیز در آب‌های زیرزمینی موجود می‌باشد که برای دسترسی نیاز به حفر چاه است. رودخانه‌ها که در دسترس‌ترین منبع آب شیرین می‌باشند، ۰/۰۰۶ درصد منابع آب شیرین را تشکیل می‌دهند که تقریباً حجمی برابر ۲۱۲۰ کیلومتر مکعب می شود. آمار منابع آب کره زمین نشان می‌دهد که تقریباً ۰/۰۴ درصد منابع آب شیرین در اتمسفر موجود می‌باشد، یعنی تقریباً ۶ برابر آب رودخانه‌ها که حجم آب قابل‌توجهی را نشان می‌دهد (سایت USGS). این حجم آب موجود در اتمسفر اغلب به دلیل مقرون‌به‌صرفه نبودن استحصال آن، موردتوجه قرار نگرفته است. ولی مناطقی در دنیا وجود دارد که در بسیاری از روزهای سال دارای مه می‌باشند یا رطوبت بالایی دارند. همچنین در برخی مناطق به دلیل وجود شرایط مطلوب و توپوگرافی زمین، ابرها نزدیک سطح زمین شکل می‌گیرند. بنابراین رطوبت اتمسفر یکی از منابعی است که می‌تواند تأمین‌کننده بخشی از نیاز آب شیرین مناطق به شمار رود، به‌خصوص در مناطقی که دورافتاده هستند و جریان آب سطحی ندارند، ولی دارای رطوبت بالا و مه زیاد می‌باشند (بردی شیخ و همکاران، ۱۳۹۶).

امروزه بشر با تکیه بر تجربیات به‌دست‌آمده از سال‌های دور و زندگی در شرایط سخت و متنوع آب‌وهوایی و استفاده از برخی شیوه‌های سنتی تأمین توسط گذشتگان، از آخرین فناوری‌های علمی و عملی موجود برای حل مشکل کم‌آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمک می‌گیرد. روش استحصال آب از مه یک فناوری نسبتاً جدید با ریشه‌های باستانی است که در بسیاری از مناطق جهان همچون آمریکای شمالی، خاورمیانه، شمال آفریقا، چین و هند سابقه طولانی دارد. امروزه نیز کشورهای متعددی بر روی استحصال آب از مه سرمایه‌گذاری کرده‌اند که می‌توان از آن‌ها به شیلی، پرو، اکوادور، کانادا، نامبیا، عمان، عربستان سعودی و نپال اشاره کرد. هزینه استحصال آب از مه نسبت به سایر روش‌های تأمین آب نسبتاً کمتر است، همچنین فنّاوری ساده و قابل‌دسترس، استحصال آب با کیفیت خیلی خوب و پایداری منبع آب برای سال‌های متمادی از عوامل

موردتوجه قرار گرفتن این فناوری جدید بوده است. تحقیقات مختلف و متعددی در این زمینه انجام گردیده که منجر به معرفی روش‌های متنوع استحصال آب هوا و مه شده است (بردی شیخ و همکاران، ۱۳۹۶).

مارلوث[1] (۱۹۰۳) در خلال مطالعاتش بر روی مه و نحوه جمع‌آوری آن در رشته‌کوه‌های تیبل در آفریقای جنوبی، جهت جمع‌آوری و اندازه‌گیری آب حاصل از مه از دسته‌های نی که بر بالای یک باران‌سنج تعبیه کرده بود، استفاده می‌کرد. اولیویر[2] (۲۰۰۲) استحصال آب از مه در منطقه ساحل شرقی آفریقای جنوبی را امکان‌سنجی کرده است. در این تحقیق، پتانسیل آب مه منطقه موردمطالعه قرارگرفته است. ازآنجایی‌که میزان جمع‌آوری آب از مه تا حدی بستگی به ویژگی های مکانی و زمانی دارد، این جنبه‌ها موردبررسی قرار گرفتند. دستگاه جمع‌آوری مه در شش نقطه از سواحل غرب ساخته‌شده و میزان جمع‌آوری آب در مدت سه تا چهار سال اندازه‌گیری شده است. بالاترین میزان جمع‌آوری آب در کپ‌کولومبین[3] ثبت شد که در هر روز مقدار حجمی بیش از ۲/۵ لیتر در مترمربع از سطح جمع‌آوری گردید. از این مقدار، تقریباً ۹۰ در صد از طریق مه و ۱۰ در صد از طریق بارندگی به‌دست‌آمده است. کیفیت به‌دست‌آمده قابل‌قبول است و مناسب برای مصرف انسان می‌باشد. عبدالوهاب[4] و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی استحصال آب از مه و کیفیت آن برای مصارف خانگی و کشاورزی پرداختند. هر تابستان بین ماه های ژوئن و سپتامبر، منطقه ظفار در سلطان عمان، در معرض مه شدید قرار می‌گیرد. به‌طورکلی، مه در ۲۰ تا ۲۵ در صد از روز در طول سال اتفاق می‌افتد. آزمایش‌ها با استفاده از سه جمع کننده مه با مواد مختلف محلی انجام شد: پالایه[5] AC، پالایه سایه سبز و پالایه آلومینیومی. نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق نشان داد که مجموع مه در طول دوره آزمایش ۷۶ روزه با استفاده از پالایه AC، سبز سایه و شبکه‌بندی با آلومینیوم به ترتیب ۹۹۵/۰۴، ۸۷۹/۹۳ و ۷۵۲/۵۸ لیتر در مترمربع بود. غلظت یون‌ها در سایت موردبررسی قرار گرفت و با استانداردهای آب آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی مطابقت داشت. ازآنجایی که

[1] Rudolf Marloth
[2] Jana Olivier
[3] Cape Columbine
[4] Abdul Wahab
[5] Filter

سرعت جمع‌آوری آب از مه به متغیرهای هواشناسی وابسته است، تأثیر پارامترهای هواشناسی مختلف در میزان جمع‌آوری نیز در این مقاله بررسی شده است. نتایج نشان داد که رابطه معنی‌دار خطی بین آب مه جمع‌آوری‌شده و سرعت باد و بارندگی وجود دارد. با افزایش سرعت باد و بارندگی، میزان جذب آب مه افزایش می‌یابد، اما این رابطه با دما، رطوبت نسبی یا فشار مشاهده نشد. مارزول و سانچز[1] (۲۰۰۸) به ارزیابی پتانسیل و تقاضای استحصال آب از مه پرداختند. این آزمایش نمونه، امکان‌سنجی استحصال آب از مه در منطقه ایفنی[2] در مراکش را برای کمک به یک جامعه کوچک که در یک منطقه خشک زندگی می‌کند و به این آب نیاز دارد، بررسی می‌کند. چهار جمع کننده استاندارد مه در دو ناحیه کوهستانی در منطقه ایفنی نصب شده‌اند و از ژوئن ۲۰۰۶ داده‌هایی با کیفیت ارائه داده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که امکان دستیابی به متوسط ۷/۱ لیتر در مترمربع در هر روز در سایت داخلی وجود دارد درحالی که در ساحل ۱/۹ لیتر در مترمربع در روز به‌دست‌آمده است. تغییرات ناشی از توپوگرافی منطقه‌ای، در جهت بادهای مرطوب از اقیانوس اطلس که مه را ایجاد می‌کنند، مناسب‌ترین مکان ها برای استحصال آب از مه را تعیین می‌کنند. گاندهیداسان[3] و همکاران (۲۰۱۸) به مدل‌سازی و آنالیز سیستم استحصال آب از مه در منطقه اسیر[4] عربستان سعودی پرداختند. این منطقه با توجه به شکوفایی گردشگری، آبیاری در کشاورزی و افزایش سطح زندگی، با چالش های عمده مواجه است. در این تحقیق، جمع کننده مه نوع شبکه‌بندی منفذی به‌منظور پیش‌بینی میزان جمع‌آوری آب از مه از طریق ترکیب مدل‌های حرارتی و آیرودینامیکی، مورد آنالیز قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سرعت باد بیشتر و اندازه بزرگتر قطره مه، حجم بیشتر آب مه را نتیجه می‌دهد. همچنین بازده آیرودینامیکی در مقایسه با بازدهی حرارتی، تأثیر قابل‌توجهی بر بازده کل جمع کننده دارد. این مدل نشان می‌دهد که برای قطره مه ۳۰ میکرومتر با سرعت باد ۴ متر در ثانیه، آب مه را می‌توان با نرخ ۰/۶۵ تا ۹/۷ لیتر بر مترمربع بر ساعت جمع‌آوری نمود، در زمانی که مقدار مایع در مه به ترتیب برابر ۰/۲ تا ۳ گرم در

[1] Maria Victoria Marzol and Justin C. Sánchez
[2] Ifni
[3] Palanichamy Gandhidasan
[4] Asir

مترمکعب می‌باشد. موریچی[1] و همکاران (۲۰۱۸) روش‌های نوین کاربرد آب مه را بیان کرده‌اند. در این تحقیق، کاربردهای مختلف استحصال آب از مه، علاوه بر میزان آب شیرین موجود، برای آب موردنیاز احیای جنگل و کشاورزی نیز موردبررسی قرار گرفته است. شی[2] و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی و ارائه روشی به‌منظور استحصال مه پرداختند. در این تحقیق طراحی و تولید استحصال کننده مه که شامل مجموعه‌ای از سیم‌های عمودی می‌باشد و «چنگ مه[3]» نامیده شده است، انجام گردیده است. در شرایط آزمایشگاهی تحت کنترل، میزان استحصال مه برای چنگ مه با سه قطر سیم متفاوت با شبکه‌بندی‌های متداول از ابعاد برابر مقایسه شد. همان‌طور که برای ساختارهای شبکه‌بندی انتظار می‌رفت، سیم‌های متوسط دارای بیشترین میزان جمع‌آوری مه بودند. در مقابل، برای چنگ مه، میزان مه استحصال‌شده به علت ریزش قطره‌ای که مانع از مسدود شدن می شود، با کاهش قطر سیم، به‌طور مداوم افزایش یافت. این موضوع باعث افزایش ۳ برابری در میزان استحصال مه برای طرح چنگ در مقایسه با شبکه‌بندی متعادل می شود. مطالعات جدید بسیاری به‌منظور بهبود و افزایش درصد استحصال آب از مه نیز در سال ۲۰۱۹ انجام شده است که به‌عنوان نمونه می‌توان به طراحی وسیله‌ای با الهام از کاکتوس برای افزایش درصد استحصال آب از مه توسط یی و همکاران (۲۰۱۹)، ساخت دستگاه استحصال کننده آب از مه بدون باکتری با الهام از سوسک بیابان نامیب توسط ون و همکاران (۲۰۱۹)، ساخت شبکه الهام‌گرفته زیستی فیبری سه‌بعدی استحصال مه که با ذرات نانو بهبود یافته است توسط لی و همکاران (۲۰۱۹) و ساخت شبکه مش از جنس مس در مقیاس نانو که با یک مایع برای استحصال مه بهبود یافته است توسط ژونگ و همکاران (۲۰۱۹) اشاره کرد. در ایران نیز موسوی بایگی و شعبان‌زاده (۱۳۸۷) به‌منظور امکان‌سنجی استحصال آب از مه و ابرهای قله‌ای در ارتفاعات استان خراسان رضوی، اقدام به طراحی و ساخت چهار نوع جمع کننده با ابعاد و اندازه‌های مختلف نمودند. نتایج حاصل از کار آن‌ها نشان داد که استحصالی از این جمع کننده‌ها به‌طور متوسط در روزهای خشک می‌تواند تا ۴۰ لیتر در روز برسد. همچنین غضنفری و همکاران (۱۳۸۸) با اعتقاد به این مهم که موفقیت

[1] Gloria Morichi
[2] Weiwei Shi
[3] Fog Harp

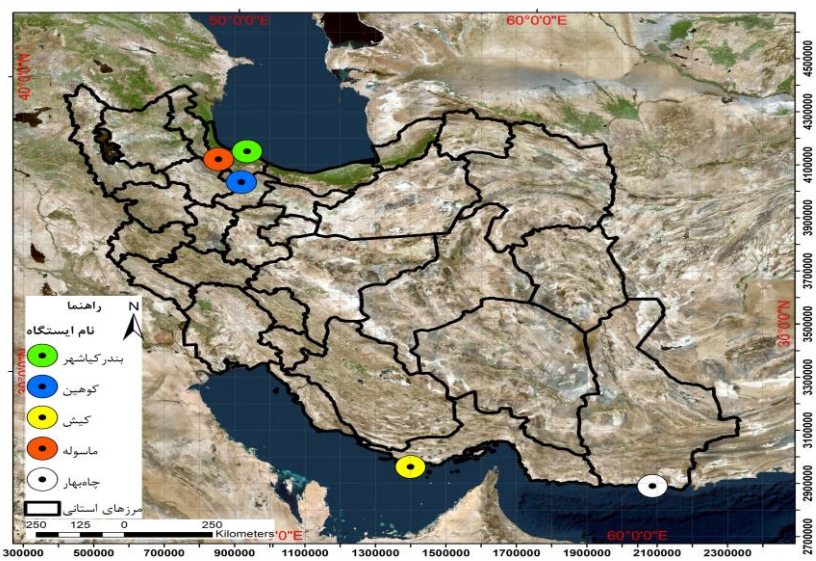
پروژه‌های استحصال آب از مه منوط به تخمین مناسب حجم به‌دست‌آمده قبل از اجرای این نوع پروژه‌ها می‌باشد، اقدام به پیش‌بینی مقدار آب استحصالی از مه نمودند. محمودی و همکاران (۱۳۹۵) به مطالعه امکان‌سنجی استحصال آب رطوبت هوا در جنوب استان سیستان و بلوچستان پرداختند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که سواحل جنوب شرقی ایران به علت میانگین رطوبت نسبی بالا، مستعد اجرای طرح‌های استحصالی برای برداشت آب می‌باشد. میانگین آب موجود در یک مترمکعب هوای منطقه موردمطالعه در مرطوب‌ترین حالت ۲۹ گرم و در خشک‌ترین حالت ۸/۱ گرم برآورد گردیده است؛ اما با توجه به اینکه استحصال آب به شرایط مختلفی وابسته بوده و در بهترین شرایط نیز نمی‌توان همه رطوبت موجود در جو را جمع‌آوری نمود، طی آزمایش میدانی و بررسی آمارهای موجود مشخص گردید که می‌توان حدود ۲۰ درصد آب موجود در هوا را در این منطقه استحصال نمود؛ بنابراین بر اساس این آستانه، بیشترین مقدار آب استحصالی مربوط به ماه خرداد با ۸/۶ لیتر بر مترمربع در روز و کمترین مقدار آن ۱/۱ لیتر بر مترمربع در روز مربوط به ماه بهمن بوده است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که جنوب شرق ایران با توجه به داشتن رطوبت نسبی بالای ۷۰ درصد در بیشتر ایام سال و وزش مداوم باد شرایط مناسبی جهت استحصال از رطوبت هوا دارد. کریم پور ریحان و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیقی مکان مناسب جهت انجام پروژه‌های استحصال آب رطوبت هوا در استان بوشهر را با استفاده از GIS تعیین کردند. در این تحقیق پس از تهیه داده‌های هواشناسی، لایه‌های ایجاد شده در GIS با روش بولین وزن‌دهی شده و در نهایت پس از تلفیق نقشه‌ها، مکان‌های مناسب جهت انجام پروژه‌های استحصال آب تعیین گردید. در انتها نیز با قرار دادن لایه‌های ساخته شده بر روی یکدیگر، منطقه مناسب برای ماه‌های تعیین‌شده نیز مشخص شدند.

لذا با توجه به مطالب و تحقیقات اخیر و همچنین با توجه به اینکه کشور ایران در ناحیه کمربند خشک جهان واقع شده است و قسمت اعظم آن از کمبود آب کافی رنج می برد، می توان به‌منظور امکان‌سنجی این موضوع که آیا می‌توان برای قسمتی از نواحی خشک ساحلی ایران، خصوصاً نواحی روستایی که حتی گاهی برای آب شرب موردنیاز با مشکل مواجه هستند، راهی را جستجو کرد که حداقل آب موردنیاز واحدهای کوچک کشاورزی و حتی مسکونی را با روشی آسان و

ارزان تأمین نمود. به همین منظور، در این تحقیق بر اساس مطالعات مشابه و داده های موجود کشور در پنج ایستگاه هواشناسی در شمال و جنوب کشور که بیشترین تعداد روز دارای مه را دارند، توجیه فنی و اقتصادی استحصال مه انجام شده است.

روش‌شناسی

اولین مرحله انجام مطالعات استحصال آب از مه، شناسایی مناطق دارای بیشترین روز مه در سال و تعیین آب موجود در هوا بر اساس اطلاعات هواشناسی موجود است. لذا در گام اول مناطق مه خیز کشور ازنظر پتانسیل آب قابل استحصال بررسی می‌شوند. بدین منظور پس از بررسی تمام ایستگاه‌های هواشناسی ازنظر تعداد روز دارای مه غلیظ[1] و مه رقیق[2] و با توجه به پراکندگی مناسب ایستگاه‌ها در کل کشور، ایستگاه‌های هواشناسی جزیره کیش، چابهار، ماسوله، بندر کیاسر و کوهین انتخاب شدند. شکل شماره ۱ پراکندگی ایستگاه‌های انتخاب‌شده در کل کشور را نشان می‌دهد.



شکل شماره ۱. پراکندگی ایستگاه‌های منتخب

[1] Fog
[2] Haze

عواملی همچون الگوی باد، توپوگرافی کوهستانی، ارتفاع، جهت توپوگرافی، فاصله از ساحل و مکان برای مه‌گیرها بر میزان استحصال آب از مه تأثیر می گذارد. لذا بر اساس اطلاعات سالنامه آماری سازمان هواشناسی کشور برای سال ۱۳۹٤، داده های متوسط دما، متوسط فشار بخارآب، متوسط رطوبت نسبی، جهت و سرعت باد و تعداد روزهای دارای مه غلیظ و رقیق این ایستگاه‌ها استخراج گردید.

قدم اول در تعیین پتانسیل آب قابل استحصال، محاسبه رطوبت مطلق[1] است. برای تعیین این پارامتر از رابطه زیر استفاده می‌شود (علیزاده، ۱۳۹۰):

$$AH = \frac{216.98}{T} \times e \qquad (۱)$$

که در آن AH رطوبت مطلق برحسب گرم بر مترمکعب، T دمای هوا برحسب درجه کلوین و e فشار بخار در ایستگاه بر اساس میلی بار است.

به‌منظور محاسبه مقدار آب قابل استحصال در هوا از رابطه زیر استفاده می‌شود (علیزاده، ۱۳۹۰):

$$Q_{w-air} = AH \times U \times A \times t \times E \qquad (۲)$$

که در آن Q_{w-air} مقدار آب قابل استحصال برحسب لیتر در روز بر مترمربع، AH رطوبت مطلق برحسب گرم بر مترمکعب، U سرعت باد برحسب متر بر ثانیه، A واحد سطح برحسب مترمربع، t زمان برحسب ثانیه و E کارایی سیستم استحصال آب و مقدار درصد تبدیل آب موجود در هوا به آب می‌باشد که در این تحقیق بر اساس مطالعات گذشته مقدار ۳۰ درصد انتخاب‌شده است.

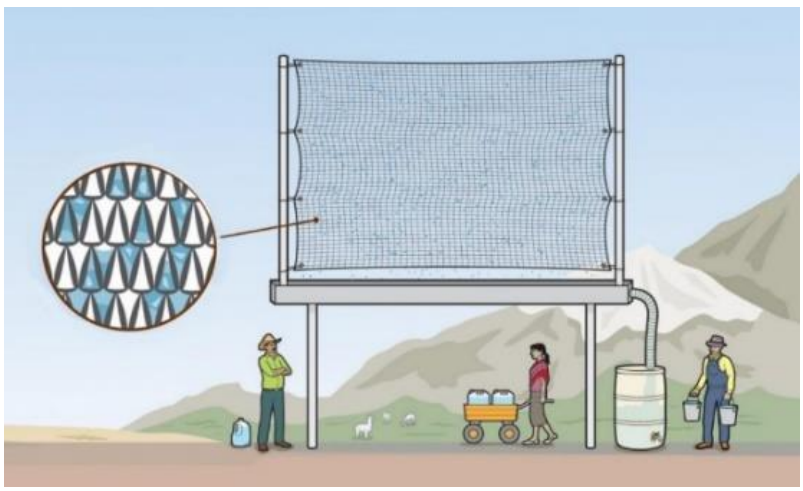
سرعت ایستگاه‌های هواشناسی در ۸ جهت مختلف (٤ جهت اصلی و ٤ جهت فرعی) اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به اینکه بهترین حالت سیستم استحصال مه، عمود بودن صفحه برجهت حرکت مه است و این صفحه به‌صورت ثابت مورداستفاده قرار می‌گیرد، باید مقدار آب قابل استحصال در جهات مختلف تعیین شود تا بیشترین مقدار آن انتخاب شود و صفحه در راستایی عمود بر آن قرار گیرد. درنتیجه، مقادیر استحصالی از مه در ۸ جهت مطابق جدول زیر محاسبه گردید.

جدول شماره ۱. جهت‌های سرعت باد

[1] Absolute Humidity (AH)

عنوان	D_8	D_7	D_6	D_5	D_4	D_3	D_2	D_1
جهت	شمال غربی	غرب	جنوب غربی	جنوب	جنوب شرقی	شرق	شمال شرقی	شمال
سرعت								
زاویه	۲۹۲/۵ تا ۳۳۷/۵	۲۴۷/۵ تا ۲۹۲/۵	۲۰۲/۵ تا ۲۴۷/۵	۱۵۷/۵ تا ۲۰۲/۵	۱۱۲/۵ تا ۱۵۷/۵	۶۷/۵ تا ۱۱۲/۵	۲۲/۵ تا ۶۷/۵	۳۳۷/۵ تا ۲۲/۵

پس از انتخاب محل مناسب و تعیین پتانسیل مقدار آب قابل استحصال آن، مرحله بعدی طراحی سیستم استحصال مه با توجه به میزان آب تولیدی و موقعیت منطقه بوده که شامل یک سیستم جمع کننده، انتقال و ذخیره آب می‌باشد و طرح کلی آن در شکل شماره ۲ نشان داده‌شده است.



شکل شماره ۲. نمونه طرح کلی استحصال آب مه

قسمت جمع کننده شامل یک توری (از جنس‌های مختلف مانند نایلون یا پلی پروپیلن) تشکیل می‌شود. شکل شبکه‌بندی این توری را می‌توان تغییر داد، زیرا در مقدار آب استحصال شده تأثیر دارد. قسمت انتقال‌دهنده شامل کانال زیر توری می‌باشد که آبی که روی توری جمع می شود به‌وسیله آن به مخزن هدایت می‌شود. درنهایت نیز یک مخزن که حجم آن بر اساس حداکثر مقدار قابلیت تولید از مه در بازه زمانی برداشت، انتخاب می شود. مخزن با استفاده از کلر گندزدایی می‌شود.

نتایج و بحث

مقادیر قابل استحصال آب برای ۵ ایستگاه منتخب در بهترین جهت های سرعت باد و برای ضریب استحصال ۳۰ درصدی مطابق جدول زیر محاسبه گردید.

جدول شماره ۲. مقادیر آب قابل استحصال در ۵ ایستگاه منتخب (لیتر در روز بر مترمربع)

ایستگاه	کیش	ماسوله	چابهار	کوهین	کیاسر
ماه/جهت باد بهینه	D_8	D_1	D_7	D_8	D_6
ژانویه	۷/٤	۳/۱	٤/٦	۲/۳	۲/۰
فوریه	۷/٤	۱/۹	٦/۱	۲/۸	۲/۵
مارس	۹/۵	۲/۳	٦/۵	۳/۷	۲/۷
آوریل	۱۱/۹	۲/۷	۸/۸	۳/۳	۳/۳
می	۱٤/۹	٤/۳	۷/۲	۵/۵	٤/۹
جون	۱٤/۲	۵/۳	۱۱/۱	٦/۳	۸/۲
جولای	۱۰/٤	۵/۹	۷/٦	۹/۳	۹/۲
اوت	۱۰/۲	۷/٤	۷/۰	۷/۸	٦/۹
سپتامبر	۱۳/۷	۵/۰	۸/۸	۵/۸	۷/٤
اکتبر	۱۰/۲	٤/۱	۵/۹	۵/۱	۵/۱
نوامبر	۷/۸	۲/۲	۵/۵	۲/٦	۲/۷
دسامبر	۷/٤	۱/۲	۲/۷	۲/٦	۱/٦
متوسط سالیانه	۱۰/٤	۳/۸	۷/۰	٤/٦	٤/۷

مطابق این جدول، مقدار آب قابل استحصال در جنوب کشور بیشتر است به‌طوری که در ایستگاه کیش بیشترین مقدار به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود. کمترین مقدار آب موجود نیز در ایستگاه ماسوله به‌دست‌آمده است. مقدار آب موجود در هوا در صورتی قابل‌توجه است که تداوم نیز داشته باشد؛ یعنی تعداد روزهای مه بیشتر باعث می‌شود تا طرح توجیه داشته باشد. تعداد روز های دارای مه غلیظ و رقیق این ایستگاه‌ها در جدول شماره ۳ نشان داده‌شده است.

جدول شماره ۳. تعداد روزهای دارای مه غلیظ و رقیق ایستگاه‌های منتخب

ایستگاه	کیش	ماسوله	چابهار	کوهین	کیاسر
تعداد روز با مه غلیظ	۲۳	۱۷۷	۰	۱۲٤	۱٤۸

تعداد روز با مه رقیق	۳۲۹	۱۹	۲۲۱	۷٦	۹۲

از نظر عملی تنها مه غلیظ قابل استحصال است. مه رقیق را تنها درصورتی‌که دمای هوای آن سرد شود و قطراتی با قطر بیشتر شکل گیرد، می‌توان تبدیل به آب کرد. لذا باوجود پتانسیل بالای آب موجود در هوای ایستگاه‌های کیش و چابهار، این ایستگاه‌ها به‌طورمعمول قابلیت استحصال آب پایینی دارند و باید یا با عملیاتی هوای این ایستگاه‌ها را سرد یا متراکم نمود یا اینکه نقاطی نزدیک آن‌ها پیدا کرد که در ارتفاع بیشتری باشد. با توجه به این موضوع، مقدار آب قابل استحصال سالیانه ایستگاه‌های منتخب مطابق جدول شماره ٤ به‌دست‌آمده آمد.

جدول شماره ۴. متوسط مقدار آب قابل استحصال سالیانه در حالت عادی و با عملیات متراکم یا سرد کردن هوا (لیتر در مترمربع)

ایستگاه	کیش	ماسوله	چابهار	کوهین	کیاسر
حالت عادی	۲۳۹/۲	٦۷۲/٦	۰	۵۷۰/۰	٦۹۵/٦
با انجام عملیات پیش‌نیاز	۳٤۲۱/٦	۷۲/۲	۱۵٤۷/۰	۳٤۹/٦	٤۳۲/٤

نتایج جدول شماره ٤ نشان می‌دهد که در صورت انجام عملیات پیش‌نیاز یا انتخاب مکان‌هایی با ارتفاع بیشتر در نزدیک ایستگاه‌ها، حجم آب قابل‌توجهی را می‌توان استحصال نمود و موردا ستفاده قرار داد. کشورهای بسیاری روی استحصال آب مه و تأمین مصارف مختلف آب شیرین سرمایه‌گذاری کرده‌اند. خلاصه‌ای از طرح‌های انجام شده در جدول شماره ۵ آورده شده است. پتانسیل بالای مناطق کشور در استحصال آب از مه را می‌توان با مقایسه با مطالعات و پروژه های انجام شده در دیگر نقاط دنیا و کشور نیز برر سی نمود. بدین منظور شرایط آب‌و هوایی (که مهم‌ترین پارامتر آن رطوبت نسبی می‌باشد) و مقدار آب قابل استحصال در دو تحقیق انجام شده در کشور عربستان سعودی توسط الغرنی (۲۰۱۸) و کشور ایران، منطقه چابهار توسط محمودی و همکاران (۱۳۹۵) با شرایط ایستگاه دارای کمترین مقدار پتانسیل آب قابل استحصال موردبرر سی قرار گرفته است. نتایج این مقایسه در جدول شماره ٦ نشان داده‌شده است.

جدول شماره ۵. خلاصه پروژه‌های انجام‌شده استحصال مه در کشورهای مختلف

ردیف	کشور	توضیحات
۱	شیلی	ارائه آب شیرین برای ۱۰۰ خانواده
۲	شیلی	ارائه آب برای باغبانی و مراجعین به کلیسا
۳	شیلی	مورداستفاده برای جنگل‌زدایی با درختان بومی و برای آموزش زیست‌محیطی
٤	شیلی	یک بستر برای تحقیقات اکوسیستم و اقلیم، نرخ تولید 6 $lit/m^2.day$
٥	پرو	فراهم آوردن آب برای جنگل‌زدایی و بازیابی اکوسیستم‌های ساحلی تخریب‌شده برای رشد میوه‌ها و تأمین آب شیرین برای جمعیت
٦	اکوادور	نرخ تولید 12 $lit/m^2.day$ برای مناطق کوهستانی
۷	گواتمالا	۳۵ جمع کننده با تولید متوسط ٦۳۰۰ لیتر در روز در ٤–٦ ماه خشک.
۸	جمهوری دومینیکن	نرخ تولید 4000 lit/day
۹	آفریقای جنوبی	نرخ تولید بین 1 $lit/m^2.day$ تا 5 $lit/m^2.day$ در مناطق کوهستانی بالاتر از ارتفاع ۱۷۰۰ متر، 10 $lit/m^2.day$ ارائه آب برای مدارس و مصارف خانگی
۱۰	اریتریا	افزایش دسترسی به آب آشامیدنی برای مدارس و ۱۲۰ خانواده
۱۱	عمان	تا نرخ تولید 30 $lit/m^2.day$ – مه فقط در ۲ ماه از سال در دسترس است
۱۲	یمن	متوسط نرخ تولید 30 $lit/m^2.day$ برای دوره سه‌ماهه خشک زمستان
۱۳	کرواسی	نرخ تولید 4 $lit/m^2.day$ در فصل خشک تابستان
۱٤	اسپانیا	تا نرخ تولید 7 $lit/m^2.day$

جدول شماره ۶. مقایسه رطوبت نسبی و میزان آب تولیدی در دو تحقیق با رطوبت نسبی شهر ماسوله

ماه/مکان	عربستان سعودی		چابهار		ماسوله
	رطوبت نسبی (درصد)	مقدار آب استحصال‌شده (لیتر در روز بر مترمربع)	رطوبت نسبی (درصد)	مقدار آب استحصال‌شده (لیتر در روز بر مترمربع)	رطوبت نسبی (درصد)
ژانویه	۸۸/۰	٦/۳	٦۱/۰	۳/۰	۷۸/۰

فوریه	۹۳/۱	۸/۷	٦٥/۰	۲/۱	۸٤/۰
مارس	۹٦/۸	۹/۱	۷۲/۰	۳/۸	۹۳/۰
آوریل	۹٥/٤	۸/۷	۷۳/۰	٥/٦	۸۷/۰
می	۹۰/۲	۷/٥	۷٦/۰	۷/۰	۸۹/۰
جون	۸٦/٤	٦/۱	۸۰/۰	۷/۹	۸۰/۰
جولای	۸۲/۱	٥/۳	۸۱/۰	۷/۸	۸۸/۰
اوت	۷۷/٥	٤/٦	۸۱/۰	۷/٦	۸۷/۰
سپتامبر	٦۸/٥	۲/۳	۸۱/۰	۷/٦	۹٦/۰
اکتبر	٦۱/٥	۱/٥	۷۷/۰	٦/۲	۹٤/۰
نوامبر	۷٥/۸	۲/٦	۷۱/۰	٥/٤	۷۳/۰
دسامبر	۸۰/٤	۳/۹	٦٥/۰	۳/۲	۸٤/۰
میانگین سالانه	۸۳/۰	٥/٦	۷۳/٦	٥/٦	۸٦/۱

نتایج جدول شماره ٦ نشان می‌دهد که ایستگاه ماسوله با وجود داشتن کمترین پتانسیل مقدار آب موجود در هوا در بین ایستگاه‌های منتخب در کشور ایران، در مقایسه با دو پروژه انجام شده رطوبت نسبی به‌مراتب بهتری دارد. با توجه به آمار ذکرشده در جدول شماره ٥، این موضوع نتیجه گرفته می‌شود که در نقاط دیگر با توجه به پتانسیل کمتر آب موجود در هوا، اقدام به استحصال آب از مه نموده‌اند و این فرصت در کشور ایران جهت اقدامات عملی و استفاده از مه به‌مراتب شرایط بهتری دارد که باید از آن بهره برد.

مطابق مطالعات و پروژه‌های اخیر انجام‌شده، هزینه استحصال آب از مه شامل تولید و توزیع آب و در صورت استفاده از یک نیروی داوطلب، تقریباً به ازای هر مترمکعب ۱/٤ دلار می‌باشد (غدیر و همکاران، ۲۰۱۸). این هزینه در صورت نیاز به یک نیروی ثابت یا مخزن ذخیره افزایش پیدا می‌کند. در ٦ شهر از شمال کشور شیلی هزینه تولید آب به ازای هر مترمکعب ۱/۹٦ تا ۳/۰٦ دلار و در کشور آفریقایی اریتره هزینه تولید آب به ازای هر مترمکعب ۱/۷ تا ۳/۳ می‌باشد (غدیر و همکاران، ۲۰۱۸).

مقایسه هزینه تولید آب مه از اهمیت زیادی برخوردار است، اما واقعیت این است که چنین هزینه‌هایی را به دلیل تفاوت در مقیاس دو فناوری نمی‌توان با برخی منابع دیگر آب مانند شیرین سازی مقایسه کرد. علاوه بر این، فناوری‌های برداشت مه در مرحله نصب ازنظر هزینه زیاد هستند، اما پس‌ازآن به نگهداری بسیار کم یا منابع اضافی کمی احتیاج دارند، درحالی که فناوری هایی مانند نمک‌زدایی و تصفیه فاضلاب به ورودی مداوم انرژی، مواد شیمیایی و نیروی کار نیاز دارند (غدیر و همکاران، ۲۰۱۸).

در جدول شماره ۷، هزینه تقریبی هر مترمربع برای دو مش مختلف موجود در دنیا به‌منظور تخمین هزینه تولید آب از مه در ایستگاه چابهار ارائه‌شده است. اعداد و ارقام این جدول با استفاده از تحقیق غدیر و همکاران (۲۰۱۸) به‌دست‌آمده است.

جدول شماره ۷. مقایسه هزینه استفاده از مش‌های مختلف برای تولید آب از مه در ایستگاه چابهار

عنوان	مش نوع Raschel	شبکه‌های فشرده سه‌بعدی با راندمان بالا
هزینه به ازای هر مترمربع مش (ریال)	۶۰۰/۰۰۰ تا ۶/۰۰۰/۰۰۰ (۵ تا ۵۰ دلار)	۱۰۰/۰۰۰/۰۰۰ (۸۳۰ دلار)
وضعیت استحصال آب	عادی	دو تا سه برابر
عمر مفید	۱۰	بیشتر از ۲۰ سال
مقدار متوسط تولید آب طی عمر مفید (مترمکعب)	۲۰	۸۰–۱۲۰
نسبت هزینه به آب تولیدشده طی عمر مفید (ریال)	۳۰/۰۰۰ تا ۳۰۰/۰۰۰	۸۳۰/۰۰۰ تا ۱/۲۵۰/۰۰۰

نتایج این جدول نشان می‌دهد که هزینه تقریبی تمام شده استحصال مه در ایستگاه چابهار در کمترین حالت به ازای هر مترمکعب ۳۰۰۰ تومان به‌دست‌آمده می‌آید. هزینه تمام شده تولید آب در حالت عادی در کشور ایران به ازای هر مترمکعب ۱۲۰۰ تومان و با استفاده از آب شیرین‌کن ۱۲۰۰۰ تومان است (معاون شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور). از طرفی به این هزینه‌ها باید

هزینه انتقال آب به مناطق دوردست را نیز در نظر گرفت که قابل‌توجه است. همچنین با بومی‌سازی این روش در کشور، می‌توان هزینه تمام‌شده آن را به‌مراتب پایین آورد. درنتیجه روش استحصال آب از مه در مناطق دورافتاده و بدون دسترسی به منبع آب پایدار کشور ایران از نظر اقتصادی نیز قابل توجیه است.

نتیجه‌گیری

یکی از راهکارهای مقابله تعریف منابع آبی جدید و متعارف می‌باشد. با توجه به حجم از موجود در هوا و راهکار گذشتگان در مقابله با خشک سالی، یکی از راه های مهم استحصال آب از مه می‌باشد. این روش ساده و ارزان است و قابل‌استفاده در مناطق دوردست که دسترسی به شبکه آب‌رسانی ندارند، می‌باشد. لذا در این تحقیق توجیه فنی و اقتصادی استفاده از این روش انجام شده است. بدین منظور ۵ ایستگاه دارای پراکندگی مناسب در سطح کشور انتخاب گردید و آمار هواشناسی آن‌ها استخراج گردید. با بررسی شرایط این ایستگاه‌ها و مقایسه با پروژه های مشابه انجام‌شده در دیگر نقاط دنیا و ایران، این نتیجه به‌دست‌آمده آمد که پتانسیل آب موجود در هوا در مناطقی از ایران بالا است و باید بدان توجه شود. به‌طوری‌که مقدار متوسط پتانسیل آب موجود در هوا در برخی نقاط ایران یا پروژه‌های موفق انجام‌شده در چابهار و عربستان سعودی برابر است و حتی این نقاط پیشنهادی در کشور شرایط آب‌وهوایی بهتری را نیز دارا می‌باشند. همچنین بر اساس تحلیل هزینه برای هر مترمکعب آب تولیدی، روش استحصال آب از مه در کشور ایران به‌مراتب هزینه‌ای کمتر از آب‌شیرین‌کن دارد. در برخی نقاط دنیا حتی این هزینه کمتر از روش عادی تولید آب است (مانند شیلی)، ولی در کشور ایران به دلیل منابع آب کافی و کیفیت مناسب آن، هزینه تولید آب به روش عادی کمتر از استحصال آب از مه است.

با توجه به مطالب فوق و وجود انواع دستگاه‌های جمع کننده آب از مه و با توجه به وجود مناطق مهخیز در کشورمان، پس از تعیین مناطق مستعد تولید آب از مه، می‌توان به صورت گسترده از این نعمت خدادادی به‌عنوان یک منبع تجدیدشونده با صرف هزینه‌های قابل توجیه استفاده

نمود. مناطق ساحلی، مناطق کوهستانی که در طول فصل مه بیشتری دارند و مناطقی با ارتفاع زیاد که در مسیر توده هوای گرم و مرطوب هستند، نقاط مهخیز کشور را تشکیل می‌دهند. بدیهی است در صورت موفقیت، این روش می‌تواند گامی مؤثر در راستای تأمین آب در مصارف مختلف عمومی، کشاورزی، جنگلداری، دامپروری و صنعت باشد و از آن بتوان به‌عنوان «راهکار پدافند غیرعامل» جهت تأمین آب در مناطق دورافتاده استفاده نمود.

منابع

Abdul-Wahab, S. A., Al-Hinai, H., Al-Najar, K. A., & Al-Kalbani, M. S. 2007. Fog water harvesting: quality of fog water collected for domestic and agricultural use. Environmental Engineering Science, 24(4), 446-456.

Algarni, S. 2018. Assessment of fog collection as a sustainable water resource in the southwest of the Kingdom of Saudi Arabia. Water and environment journal, 32(2), 301-309.

Alizadeh, A. 2010. Principle of Applied Hydrology. Emam Reza University Press, 650p. (In Persian)

Bardi Sheikh, V., Jafari Shalamzari, M. and Gholami, A. 2018. Principles and methods of traditional and modern water harvesting. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources Press, 444 pp. (In Persian)

Batisha, A. F. 2015. Feasibility and sustainability of fog harvesting. Sustainability of water quality and ecology, 6, 1-10.

Gandhidasan, P., Abualhamayel, H. I., & Patel, F. 2018. Simplified Modeling and Analysis of the Fog Water Harvesting System in the Asir

Region of the Kingdom of Saudi Arabia. Aerosol and Air Quality Research, 18, 200-213.

Ghazanfari, M.S., Alizadeh, A., Naseri, M., and Mousavi Baygi, M. 2010. Dynamical Assessment of Fog Harvesting Based on Fractal Theory. J. Water Soil. 3: 527-533. (In Persian)

Karimpour Reihan, M., Alizadeh, M. and Kamalian, S. 2017. Selection of suitable sites for water harvesting from air humidity in Bushehr province using GIS. Journal of Geography and Regional Planning, 7(1): 43-51. (In Persian)

Mahmoudi, P., Khajeh Amiri Khaledi, Ch. and Salari Fanodi, M.R. 2016. Examining the feasibility of water harvesting from air humidity in the Southern province of Sistan and Baluchestan. J. of Water and Soil Conservation, 23(2): 253-265.

Marloth, R. 1903. Results of experiments on Table Mountain for ascertaining the amount of moisture deposited from the south-east clouds. Transactions of the South African Philosophical Society, 14(1), 403-408.

Marzol, M. V., & Sánchez, J. 2008. Fog water harvesting in Ifni, Morocco. An assessment of potential and demand. Die Erde, 139(1-2), 97-119.

Mousavi-Baygi, M., and Shabanzadeh, S. 2008. Design and construction of an apparatus for fog and cap cloud collection (A new method of water harvesting). Agricultural Sciences and Technology (Special Issue in Water and Soil), 1: 2-11. (In Persian)

Morichi, G., Calixto, L. B., & Zanelli, A. 2018. Novel Applications for Fog Water Harvesting. Journal of Geoscience and Environment Protection, 6(03), 26.

Olivier, J. 2002. Fog-water harvesting along the West Coast of South Africa: A feasibility study. Water Sa, 28(4), 349-360.

Qadir, M., Jiménez, G., Farnum, R., Dodson, L., & Smakhtin, V. (2018). Fog water collection: Challenges beyond technology. Water, 10(4), 372.

Shi, W., Anderson, M. J., Tulkoff, J. B., Kennedy, B. S., & Boreyko, J. B. 2018. Fog Harvesting with Harps. ACS applied materials & interfaces.

Yi, S., Wang, J., Chen, Z., Liu, B., Ren, L., Liang, L., & Jiang, L. (2019). Cactus Inspired Conical Spines with Oriented Microbarbs for Efficient Fog Harvesting. Advanced Materials Technologies.

Wen, C., Guo, H., Bai, H., Xu, T., Liu, M., Yang, J., ... & Zhang, L. (2019). Beetle-Inspired Hierarchical Antibacterial Interface for Reliable Fog Harvesting. ACS applied materials & interfaces, 11(37), 34330-34337.

Li, C., Liu, Y., Gao, C., Li, X., Xing, Y., & Zheng, Y. (2019). Fog Harvesting of a Bioinspired Nanocone-Decorated 3D Fiber Network. ACS applied materials & interfaces, 11(4), 4507-4513.

Zhong, L., Feng, J., & Guo, Z. (2019). An alternating nanoscale (hydrophilic–hydrophobic)/hydrophilic Janus cooperative copper mesh fabricated by a simple liquidus modification for efficient fog harvesting. Journal of Materials Chemistry A, 7(14), 8405-8413.