

Article Type: Applied Article

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

Feasibility of Fog Water Harvesting in Abi-beyglu, Ardabil

امکان‌سنجی استحصال آب از مه در منطقه آبی‌بیگللو، اردبیل

A. Kanooni^{1*}, M. R. Kohan^{2*}

امین کانونی^{۱*}، محمدرضا کهن^{۲*}

1, 2- Associate Professor and PhD Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran.

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار و دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

*(Corresponding Author Email: amin.kanooni@uma.ac.ir)

*(نویسنده‌ی مسئول، (E-Mail: amin.kanooni@uma.ac.ir)

Received: 03-02-2024

Revised: 22-05-2024

Accepted: 26-05-2024

Available Online: 08-08-2024

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۱۸

Abstract

The decrease in rainfall and the increase in demand for limited water resources show the necessity of supplying water from non-conventional sources. In this research, the possibility of harvesting water from fog in the Abi-beyglu region, which is the main place where moist winds from the Caspian Sea enter the Ardabil plain, was investigated. First, by examining local observations and meteorological parameters, the possibility of harvesting fog water was investigated in terms of different geographical and climatic factors, and then by installing a standard fog collector, the amount of extracted water was measured daily. The results of the investigation of meteorological parameters indicate suitable conditions for the implementation of the fog water harvesting system in the region. The high average relative humidity (more than 70%) throughout the year, the high number of foggy days (more than a third of the year), as well as the appropriate wind speed (4.6 m/s on average) and its high frequency showed that there is a high potential in collecting fog entering the region. The average daily water collected during the foggy period was equal to 3.6 liters per square meter, which shows an acceptable value compared to the results of similar projects. In general, according to the quantitative and qualitative values of collected water, the implementation of fog water harvesting plans in the region is justified and therefore part of the water needs of the region can be provided.

Keywords: Non-conventional Water, Abi-beyglu, Fog Collector, Raschel.

چکیده

کاهش نزولات جوی و افزایش تقاضا برای منابع محدود آب، ضرورت تامین آب از منابع نامتعارف را بیش از پیش نشان می‌دهد. در این پژوهش امکان استحصال آب از مه در منطقه آبی‌بیگللو که محل اصلی ورود بادهای حاوی رطوبت دریای خزر به دشت اردبیل می‌باشد بررسی شد. ابتدا با بررسی مشاهدات محلی و پارامترهای هواشناسی، امکان استحصال آب از مه از نظر عوامل مختلف جغرافیایی و اقلیمی بررسی و سپس با نصب جمع‌کننده مه استاندارد، مقادیر آب استحصال شده به صورت روزانه اندازه‌گیری شد. نتایج بررسی پارامترهای هواشناسی نشان داد شرایط اجرای سامانه استحصال آب از مه در منطقه مناسب می‌باشد. بالا بودن میانگین رطوبت نسبی (بیش از ۷۰ درصد) در طول سال، بالا بودن تعداد روزهای مه‌آلود (بیش از یک سوم سال) و همچنین سرعت مناسب باد (به طور میانگین ۴/۶ متر بر ثانیه) و فراوانی بالای آن نشان داد پتانسیل زیادی در جمع‌آوری مه ورودی به منطقه وجود دارد. میانگین روزانه آب جمع شده در دوره وقوع مه برابر با ۳/۶ لیتر در متر مربع به دست آمد که در مقایسه با نتایج پروژه‌های مشابه مقدار قابل قبولی را نشان می‌دهد. به‌طور کلی باتوجه به نتایج کمی و کیفی آب جمع‌آوری شده، اجرای طرح‌های استحصال آب از مه در منطقه توجیه‌پذیر بوده و می‌توان برای تأمین بخشی از نیازهای آبی منطقه مورد توجه قرار داد.

واژه‌های کلیدی: آب نامتعارف، آبی‌بیگللو، جمع‌کننده مه، راشل.

قطرات مه به دلیل اندازه کوچک خود سرعت سقوط بسیار کمی دارند (۱ تا ۵ سانتی متر بر ثانیه). بنابراین با وزش باد به صورت افقی حرکت می کنند (Tav و همکاران، ۲۰۱۸). به این ترتیب، با نصب جمع کننده می توان به راحتی قطرات مه را جمع آوری کرد. استحصال آب از مه در ابعاد عملیاتی غالباً توسط جمع کننده های مه بزرگ (LFC)^۲ انجام می پذیرد اما به منظور انجام پروژه های تحقیقاتی و امکان مقایسه با مطالعات مشابه از جمع کننده های استاندارد (SFC)^۳ استفاده می شود (Schemenauer و Cereceda، ۱۹۹۴b). سابقه تاریخی استحصال آب از مه به امپراتوری اینکا^۴ در آمریکای جنوبی بازمی گردد. جایی که در آن، آب مه توسط درختان جمع آوری و در مخازن ذخیره می شدند (Go و Ismail، ۲۰۲۱). در چند دهه گذشته پژوهش های بسیاری به منظور استحصال آب از مه انجام شده است. پژوهش های انجام شده شامل مطالعات میدانی برای امکان سنجی تأمین آب مورد نیاز یک منطقه (Algarni، ۲۰۱۸؛ Khalil و همکاران، ۲۰۲۲)، پژوهش های آزمایشگاهی به منظور افزایش راندمان جمع آوری آب (Shi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Elshennawy و همکاران، ۲۰۲۲) و پژوهش های مربوط به شبیه سازی و مدل سازی عددی برای تعیین پارامترهای موثر در استحصال مه و تخمین مقدار آب جمع شده می باشد (Ritter و Regalado، ۲۰۱۶؛ Carvajal و همکاران، ۲۰۲۰). پروژه کامانچاکا^۵ در شیلی بزرگ ترین پروژه استحصال مه برای تأمین آب شرب یک جامعه روستایی است که اجرای آن در سال ۱۹۸۷ آغاز و نتایج آن برای اولین بار در متون علمی توصیف و مستند شد. در این پژوهش تعداد ۱۰۰ جمع کننده از نوع LFC در ارتفاعات ال توفو در رقوم ۷۵۰ متری نصب شدند. مقدار آب استحصالی در این پروژه ۳ لیتر در متر مربع در روز به دست آمد. نتایج نشان داد مه یک منبع آب پایدار بوده و می تواند نیاز شرب جامعه ای با بیش از ۵۰۰ نفر را تأمین کند (Cereceda و همکاران، ۲۰۰۰). از پژوهش های دیگر می توان به پروژه استحصال آب از مه در منطقه لیام^۶ نیال اشاره کرد که با نصب شش SFC، امکان سنجی برداشت مه در سکونتگاه های کوچک واقع در ارتفاعات ۲۰۰۰ تا ۳۵۰۰ متری از سطح دریا بررسی شد. عملکرد جمع کننده ها از فوریه ۱۹۹۸ تا آوریل ۲۰۰۰ به صورت دوازده ساعته پایش شد. میانگین آب جمع آوری شده برابر ۷/۱ لیتر در متر مربع در روز به دست آمد. همچنین، از آنجایی که در مناطق دورافتاده انرژی لازم برای پمپاژ آب بسیار پرهزینه است، استحصال مه به عنوان یک منبع جایگزین برای توسعه اقتصادی و اجتماعی این جوامع دورافتاده پیشنهاد شد (MacQuarrie و همکاران، ۲۰۰۱). وجود مه پیاپی در برخی از مناطق کوهستانی رشته کوه آندس^۷ در کلمبیا لزوم انجام آزمایشاتی برای استحصال آب از مه به عنوان یک منبع آب جایگزین و سالم را نشان داد. به همین منظور ۱۲ جمع کننده SFC بر اساس شرایط توپوگرافی در ارتفاعات ۱۶۸۰ تا ۱۸۵۰ نصب شدند. نتایج به دست آمده نشان دهنده پتانسیل بالای منطقه برای اجرای پروژه جمع آوری آب از مه در مقیاس بزرگ بود، به طوری که

کاهش نزولات جوی و افزایش نیاز روزافزون جمعیت روبه رشد به آب سالم، فشار زیادی بر دولت ها برای یافتن راه حل های پایدار تأمین آب وارد می کنند. مشکلات مربوط به تأمین آب به ویژه در کشورهای در حال توسعه با مناطق خشک و نیمه خشک و منابع محدود آب، روبه روز در حال افزایش است (He و همکاران، ۲۰۲۱؛ Al-Mandhari، ۲۰۱۹). افزون بر این، گزینه های موجود تأمین آب نیز با محدودیت های زیادی همراه است. به عنوان مثال، جریان ورودی از رودخانه های مرزی به دلیل گستره جهانی تغییر اقلیم و خشکسالی، با کاهش قابل ملاحظه ای روبه رو شده است (میان آبادی، ۱۳۹۱). استفاده از آب های زیرزمینی نیز به عنوان یکی از منابع اصلی تأمین آب، به دلیل کاهش سطح تراز آبخوان ها محدود شده است. همچنین، نمک زدایی وسیع آب دریا، به دلیل هزینه بالای تولید و انتقال و مسائل محیط زیستی آن توجیه پذیر نیست (Zolghadr-Asli و همکاران، ۲۰۲۳). در این شرایط، استحصال منابع آب های نامتعارف و بهره برداری از آن ها می تواند گامی موثر در راستای مقابله با پیامدهای جبران ناپذیر بحران آب باشد. یکی از روش های تولید آب شیرین و سالم، استحصال آب از مه است (Qadir و همکاران، ۲۰۲۱). از دیدگاه هواشناسی، مه نوعی ابر استراتوس است که از سطح زمین عبور می کند (Pauli و همکاران، ۲۰۲۰). با افزایش رطوبت هوا و کاهش دما به نقطه شبنم، بخار آب موجود در هوا متراکم شده و قطرات آب معلق به قطر ۱ تا ۴۰ میکرومتر تحت عنوان "مه" تشکیل می شوند (Tu و همکاران، ۲۰۱۸). مه تشعشعی، فرارفتی و کوهستانی از جمله رایج ترین انواع مه می باشند که با توجه به نحوه و مکان تشکیل آن، نام گذاری می شوند. مه تشعشعی از یک وارونگی دما در مجاورت سطح زمین تشکیل می شود. با خنک شدن لایه سطحی اتمسفر در شب، بخار آب موجود در هوای ذرات آئروسول جو شروع به متراکم شدن کرده و در نتیجه قطرات کوچک آب تشکیل می شود. این نوع مه، بسیار کم عمق و محلی بوده و عمر آن معمولاً به یک بازه زمانی نسبتاً کوتاه محدود می شود. مه فرارفتی به طور عمده در مکان های ساحلی و به دلیل اختلاف شدید دما بین خشکی و دریا تشکیل می شود و با وزش افقی باد در مجاورت سطح زمین حرکت کرده و در نهایت با افزایش دما از بین می رود. در مناطق ساحلی این مه به نام مه ساحلی نیز شناخته می شود. مه کوهستانی معمولاً از ابرهایی تشکیل می شوند که از پایین ترین سطح تراکم خود در ابتدای شیب کوهستان به سمت بالا امتداد می یابند (Lakra و Avishek، ۲۰۲۲). با جابه جایی عمودی ابر از سطح زمین در امتداد شیب کوهستان و کاهش دمای محیط، مه متراکم تر می شود. در واقع با افزایش تراکم مه، مقدار آب در واحد حجم (LWC)^۱ آن افزایش می یابد که مقدار آن بسته به نوع مه از ۰/۱ تا ۰/۷ گرم بر مترمکعب متفاوت است.

میانگین سالانه نرخ جمع آوری آب برابر با ۴/۲ لیتر در هر متر مربع در روز به دست آمد. از اثرات مثبت سامانه جمع آوری مه در این منطقه می توان به تامین آب شرب جوامع روستایی منطقه، رونق کشاورزی و باغبانی در مقیاس کوچک و بهبود شرایط زندگی و در نهایت بازگشت مهاجران به محل زندگی خود اشاره کرد (Escobar و Molina, ۲۰۰۸).

از پژوهش های دیگر در زمینه استحصال آب از مه با هدف تامین نیاز آبی جنگل کاری و کشاورزی می توان به بررسی امکان استفاده از مه برای احیاء جنگل های سوخته در منطقه والنسیا اسپانیا اشاره کرد. بارش اندک و مشکلات تامین آب از چالش های مهم در این منطقه عنوان شدند. مه مکرر در منطقه زمینه انجام آزمایش هایی برای امکان سنجی برداشت آب از مه به منظور آبیاری و بازیابی جنگل ها را فراهم کرد. به این منظور یک LFC متصل به سه مخزن هزار لیتری، در منطقه مورد مطالعه مستقر شد. در این مطالعه از آب استحصالی برای آبیاری قطره ای نهال های موجود استفاده شد. نتایج نشان داد نرخ سالانه جمع آوری آب مه برابر ۳/۳ لیتر در متر مربع در روز بوده و با آبیاری به موقع و استفاده از کمپوست، شرایط احیای جنگل در منطقه فراهم می شود (Estrela و همکاران، ۲۰۰۹). بارش اندک و تبخیر و تعرق بالا در منطقه گالات اکوادور واقع در ارتفاع ۳۵۰۰ متر از سطح دریا چالشی اساسی برای تامین آب شرب و کشاورزی منطقه به شمار می رفت. به همین دلیل، پروژه ای با هدف جمع آوری آب از مه برای کمک به رفع نیاز آبی جوامع ساکن در منطقه و برآورد نیاز آبی محصولات کشاورزی به اجرا درآمد. به این ترتیب جمع کننده های مه SFC در منطقه مستقر شدند. میانگین آب جمع شده در سال ۲۰۱۴-۲۰۱۵ بین ۵ تا ۱۰ لیتر در متر مربع در روز در طول کل سال و حدود ۲۰ لیتر در متر مربع روز در طول فصل بارش بود. نتایج نشان داد سامانه جمع آوری مه می تواند حدود ۵ درصد از نیاز آبی محصولات کشاورزی منطقه را تامین کند (Carrera-Villacres و همکاران، ۲۰۱۷).

کاهش بارندگی و وقوع خشکسالی در سال های اخیر موجب افت سطح تراز آبخوان در منطقه آبی بیگلو شده است که می تواند صدمات جبران ناپذیری بر کشاورزی و جامعه روستایی وارد کند. با توجه به رشد جمعیت و نیاز روزافزون به آب، در صورت ادامه چنین وضعیتی، بیکاری، کوچ اجباری و گسترش حاشیه نشینی شهرها در سال های آینده دور از انتظار نیست. با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه و تشکیل مه پیاپی در آن، لزوم توجه به استحصال آب از مه به عنوان یک منبع آب پایدار و استفاده از آن برای مقاصد شرب و کشاورزی بیش از پیش احساس می شود. با استحصال آب مه عبوری از این منطقه می توان مقدار قابل توجهی آب را ذخیره و برای تامین قسمتی از آب مورد نیاز بخش کشاورزی و یا حتی تامین آب شرب اهالی روستاهای منطقه استفاده کرد. بررسی پژوهش های پیشین نشان می دهد قبل از اجرای هر نوع پروژه استحصال آب از مه، لازم است پتانسیل جمع آوری مه بررسی شود. برای این منظور در این پژوهش با تهیه

و نصب جمع کننده استاندارد از نوع راشل، مقدار آب استحصالی در منطقه آبی بیگلو برآورد و نتایج کمی و کیفی آن بررسی شد.

مواد و روش ها

• سازوکار جمع آوری مه

در شرایط مه، مقدار نظری آب جمع شده توسط جمع کننده را می توان با رابطه (۱) تخمین زد (Ritter و همکاران، ۲۰۰۸).

$$q = 3.6 \times LWC \times u \times A \times \eta_{Coll} \quad (1)$$

که در آن، q آب جمع شده (Lit/hr)، LWC محتوای آب مایع (gr/m³)، A سطح مقطع جمع کننده (m²)، η_{Coll} راندمان جمع کننده (بی بعد)، u سرعت باد (m/s) و $3/6$ ضریب تبدیل واحد است.

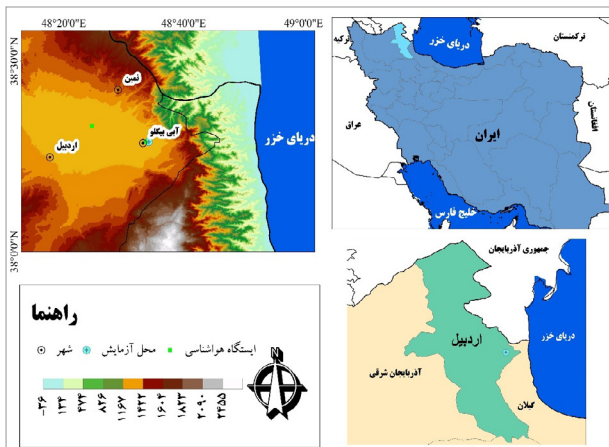
یک جمع کننده هرگز قادر به گرفتن کل قطرات مه عبوری نمی باشد. برای بیان مقدار شار عبوری جذب شده توسط جمع کننده از راندمان جمع کننده (η_{Coll}) استفاده می شود که به صورت نسبت مقدار آب جمع شده در واحد سطح جمع کننده (q) به شار عبوری از سطح مقطع تعریف می شود (Azeem و همکاران، ۲۰۲۰a). قطرات مه ممکن است به دلیل هندسه یا شکل صفحه جمع کننده از مسیر مستقیم منحرف شده و از اطراف آن عبور کنند. کسری از قطرات مه که بدون انحراف از مسیر مستقیم، خود را به صفحه جمع کننده می رساند با راندمان آیرودینامیکی بیان می شود. از طرف دیگر، تنها کسری از جریان مه که توانسته خود را به صفحه جمع کننده برساند به صفحه برخورد کرده و جذب می شود (راندمان جذب) و مابقی بدون برخورد به صفحه از قسمت های خالی آن عبور می کند. قطراتی که به سطح جمع کننده برخورد می کنند پس از رسوب در سطح جمع کننده به یکدیگر پیوسته و قطرات بزرگ را تشکیل می دهند. وقتی که حجم این قطرات به اندازه بحرانی برسند تحت تاثیر نیروی گرانش به داخل ناودان تعبیه شده در زیر پرده جمع کننده سقوط کرده و در نهایت به داخل مخزن هدایت می شوند. بخشی از قطرات جذب شده ممکن است قبل از سقوط به ناودان به دلیل اعوجاج صفحه یا سرعت زیاد باد دوباره به جریان هوا بازگردد و یا به علت وجود نشی در سامانه زهکشی به مخزن منتقل نشود (راندمان زهکشی). بنابراین راندمان کل جمع آوری به صورت رابطه (۲) بیان می شود (Azeem و همکاران، ۲۰۲۰b).

$$\eta_{Coll} = \eta_{AC} \times \eta_{Capt} \times \eta_{dr} \quad (2)$$

که در آن، η_{AC} راندمان آیرودینامیکی، η_{Capt} راندمان جذب و η_{dr} راندمان زهکشی هستند.

• مشخصات منطقه مورد مطالعه

شهر آبی بیگلو با مختصات جغرافیایی ۳۸ درجه و ۲۷ دقیقه شمالی و ۴۸ درجه و ۵۶ درجه شرقی و با ارتفاع متوسط ۱۳۱۸ متر از سطح دریا در بخش ویلکیج شهرستان نمین و در ۲۰ کیلومتری اردبیل واقع



شکل ۱- موقعیت منطقه و محل اجرای سامانه استحصال مه

• روش انجام تحقیق

قبل از اجرای پروژه‌های استحصال آب از مه لازم است امکان‌سنجی اجرای آن باتوجه به عوامل مختلف جغرافیایی، اقلیمی، اجتماعی و اقتصادی بررسی شود. سپس با نصب جمع‌کننده‌ای مناسب مقدار آب جمع‌آوری شده در دوره وقوع مه، اندازه‌گیری و پس از تحلیل نتایج، پیشنهاد عملیاتی مناسب ارائه شود. در ادامه روش انجام تحقیق به ترتیب اولویت تشریح می‌شود.

- **بررسی پارامترهای هواشناسی:** پس از بررسی عوامل جغرافیایی (وجود مناطق مرتفع) موثر در تشکیل مه و ضرورت اجرای پروژه جمع‌آوری آب از مه، پارامترهای هواشناسی موثر بر تشکیل مه و جمع‌آوری آب بررسی شد. ایستگاه هواشناسی آبی بیگلر نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به محل انجام طرح است که تحت مدیریت شرکت آب منطقه‌ای اردبیل پارامترهای هواشناسی مورد نظر را اندازه‌گیری و ثبت می‌کند. این ایستگاه در موقعیت جغرافیایی $54^{\circ} 16' 38''$ عرض شمالی و $29^{\circ} 33' 48''$ طول شرقی قرار دارد. داده‌های هواشناسی مورد نیاز پژوهش شامل رطوبت نسبی، بارش، سرعت و جهت باد غالب به‌صورت ماهانه از سال ۱۳۷۶ تا ۱۴۰۰ از ایستگاه آبی بیگلر دریافت شد. همچنین باتوجه به اینکه وقوع مه در این ایستگاه اندازه‌گیری و ثبت نمی‌شود، داده‌های مربوط به تعداد روزهای وقوع مه به‌صورت ماهانه از سال ۱۳۸۲ تا ۱۴۰۰ از ایستگاه سینوپتیک فرودگاه با موقعیت جغرافیایی $50^{\circ} 19' 38''$ عرض شمالی و $57^{\circ} 24' 48''$ طول شرقی که در فاصله کوتاهی از محل انجام طرح واقع شده، تهیه و استفاده شد.

- **نصب سامانه استحصال مه و اندازه‌گیری آب جمع‌شده:** به‌منظور اجرای سامانه استحصال آب از مه، محل مناسب ورود مه از دریای خزر به دشت اردبیل شناسایی و سه جمع‌کننده مه استاندارد (SFC) در مختصات 38° درجه و 17 دقیقه و 17 ثانیه شمالی و 48° درجه و 34 دقیقه و 11 ثانیه شرقی مستقر شدند. در این مقاله نتایج مربوط به جمع‌کننده نوع راشل (ساخته شده از الیاف پلی‌پروپیلن) با ضریب سایه 35 درصد به‌منظور امکان مقایسه آن با پژوهش‌های

شده است. بخش خاوری منطقه (رشته کوه باغروداغ) با بهره‌گیری از رطوبت مستقیم دریای خزر، جزء مناطق مرطوب خزری بوده و دامنه‌های باختری آن به دلیل نزدیکی به این پهنه و تاثیرپذیری از آن، به‌عنوان منطقه گذار بین آذربایجان و گیلان محسوب می‌شود. استقرار درخت‌زارهای کم ارتفاع در این منطقه، به‌ویژه گونه‌های مشخص فندق و بلوط، جنگل‌های خزان‌شونده منحصربه‌فردی را در انتهای خاوری استان اردبیل به نام منطقه فندقلو ایجاد کرده است. وضعیت طبقات ارتفاعی منطقه فندقلو تاثیر مستقیمی در میزان رطوبت دریافتی از دریای خزر به‌عنوان اصلی‌ترین منبع تامین رطوبت و بارندگی دارد. بخش‌های مرکزی منطقه با ارتفاع حدود 1300 متر از سطح دریا، کمترین میانگین ارتفاعی را در منطقه داشته و محل اصلی عبور ابرها و ریزش آن به دشت اردبیل است. از سوی دیگر مناطق شمالی و جنوبی منطقه فندقلو، با ارتفاع بیشتری که نسبت به منطقه مرکزی دارند، به کانالیزه کردن رطوبت دریافتی، کمک بیشتری می‌کنند (صمدزاده، ۱۳۸۸). براساس آمار ایستگاه باران‌سنجی آبی بیگلر (آمار ۲۴ ساله)، حداقل و حداکثر دمای ثبت شده به ترتیب 34 - و $39/5$ درجه سانتی‌گراد، متوسط حداقل و حداکثر دما به ترتیب $3/37$ و 13 درجه سانتی‌گراد و میانگین کلی دما $9/6$ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. متوسط رطوبت نسبی سالانه منطقه 76 درصد و متوسط بارندگی سالانه آن نیز $347/4$ میلی‌متر است. آب‌وهوای آبی بیگلر سرد و مرطوب بوده و به دلیل نزدیکی به جنگل حیران اغلب پوشیده از مه غلیظ می‌باشد. این منطقه به دلیل موقعیت خاص آن از لحاظ جغرافیایی، آب‌وهوایی و برخورداری از منابع غنی خاک حاصلخیز، اهمیت خاصی در زمینه تولیدات کشاورزی دارد. خشکسالی سال‌های گذشته، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و کشت محصولات کشاورزی پرمصرف مانند سیب‌زمینی، باعث افت شدید سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در منطقه شده است. به همین دلیل کمبود آب زراعی به‌عنوان مهمترین چالش منطقه بوده که نه تنها کشاورزی منطقه بلکه اقتصاد متکی به آن را به طور جدی تهدید می‌کند. با این حال کشاورزی دیم، شامل محصولاتی چون گندم، جو، عدس و سایر محصولات زراعی همچنان نقش مهمی در امرار معاش مردم بومی منطقه دارد. باتوجه به موقعیت جغرافیایی منطقه و به دلیل هجوم بادهای حاوی رطوبت دریای خزر و کشیدن ابرهای استراتوس (ارتفاع پایین) به سطح زمین که با افت نسبی دمای هوا همراه است تشکیل مه محلی در منطقه شایع می‌باشد، به‌طوری‌که حدود یک سوم روزهای هر ماه با مه همراه است. همین موضوع لزوم توجه به روش‌های مختلف استحصال آب از مه را نشان می‌دهد. با استحصال آب از مه‌های عبوری می‌توان مقدار زیادی از رطوبت هوا را که قسمت اعظم آن پس از عبور از منطقه تبخیر می‌شود، ذخیره و در رشد و نمو گیاهان زراعی منطقه و یا حتی تامین آب شرب اهالی روستاهای منطقه استفاده کرد. شکل (۱) موقعیت منطقه آبی بیگلر و محل انجام پژوهش را نشان می‌دهد.

پیشین ارائه شده است. توری پلی پروپیلن به دلیل قیمت پایین، در دسترس بودن و مقاومت بالا در برابر تابش آفتاب در اکثر پروژه‌های استحصال مه استفاده می‌شود. از این نوع جمع کننده، به عنوان معیاری برای مقایسه نتایج به دست آمده از پروژه‌های اجرا شده در نقاط مختلف جهان و مقایسه عملکرد آن با جمع کننده‌های دیگر استفاده می‌شود. جمع کننده مه طبق استاندارد ذکر شده توسط Schemenauer و Cereceda (۱۹۹۴a) با ابعاد 1×1 متر و ارتفاع ۲ متر تهیه و عمود بر جهت باد غالب منطقه نصب شد. برای هدایت آب از جمع کننده به مخزن ذخیره از یک ناودان که برشی از یک لوله پلی اتیلن با شیب ۲ درصد بود استفاده شد. اندازه‌گیری آب جمع‌آوری شده از تاریخ ۱۴۰۰/۱/۲۱ تا ۱۴۰۰/۸/۳۱ به صورت روزانه و در ساعت ۹ صبح انجام شد. همزمان با اندازه‌گیری آب جمع شده، وقوع و یا عدم وقوع مه توسط اپراتور ثبت شد. با بررسی وقوع مه در محل جمع کننده و کنترل آن با داده‌های دریافتی از ایستگاه سینوپتیک فرودگاه، مشخص شد همخوانی کاملی از نظر زمان‌های وقوع مه در دو منطقه وجود دارد. لازم به ذکر است به دلیل مسائل امنیتی و همچنین دسترسی آسان به محل انجام پژوهش، جمع کننده در اراضی نزدیک شهر آبی بیگلو مستقر شد تا اندازه‌گیری‌های لازم به راحتی انجام شود. در شکل (۲) جمع کننده‌های مه نصب شده در منطقه و مخازن جمع‌آوری آب مشاهده می‌شود.



شکل ۲- جمع کننده‌های مه نصب شده در منطقه آبی بیگلو

نتایج و بحث

اجرای موفق پروژه استحصال آب از مه، نیازمند مطالعه‌ای دقیق شامل: مشاهدات محلی، بررسی پارامترهای هواشناسی و در نهایت برآورد مقدار جمع‌آوری آب با استفاده از جمع کننده استاندارد (SFC) می‌باشد. بدون در نظر گرفتن هر یک از پارامترهای ذکر شده، امکان شکست پروژه افزایش می‌یابد. مشاهدات محلی مورد نیاز برای ارزیابی مقدار آب استحصال شده از مه عبارتند بودند از:

الف) ضرورت تامین نیاز آبی منطقه: کمبود آب در هر منطقه، اجرای سامانه جمع‌آوری مه را توجیه‌پذیر می‌کند. خشکسالی‌های اخیر و کاهش نزولات جوی و در نتیجه کاهش سطح تراز آب‌های زیرزمینی،

کشاورزی دیم و آبی منطقه آبی بیگلو را شدیداً تحت تأثیر قرار داده است. در صورت تداوم خشکسالی‌ها امکان وارد شدن آسیب به طبیعت و حیات وحش منطقه نیز وجود دارد. با چنین دورنمایی، احتمال بروز مشکل در تأمین آب شرب مردم در سال‌های آینده بیش از پیش احساس می‌شود. بنابراین، استحصال آب از مه می‌تواند به عنوان یکی از راه‌حل‌های مقابله با کم‌آبی در منطقه مطرح باشد.

ب) وجود ارتفاعات مشرف به محل عبور مه: وجود کوه‌های مرتفع که بستر لازم برای تشکیل مه را فراهم می‌کند اهمیت زیادی در مکان‌یابی استقرار سامانه‌های جمع‌آوری مه دارد. مه تشکیل شده در نقاط مرتفع علاوه بر LWC زیاد، سرعت زیادی نسبت به مناطق پست و هموار دارد. در مشاهدات محلی، امتداد مناطق مرتفع نیز باید مد نظر قرار گیرد، به طوری که عمود بودن محور طولی کوهستان بر جهت بادهای غالب، شرایط بهینه‌ای در استفاده هر چه بیشتر از پتانسیل مه به وجود می‌آورد. طبق مشاهدات انجام شده، منطقه آبی بیگلو رشته‌کوه‌های مرتفع با ارتفاع ۱۷۰۰ متر از سطح دریا دارد و محور طولی رشته کوه، عمود بر جهت بادهای شرقی است (شکل ۱). این موارد نشان دهنده شرایط بالقوه منطقه در جمع‌آوری مه و استحصال آب می‌باشد.

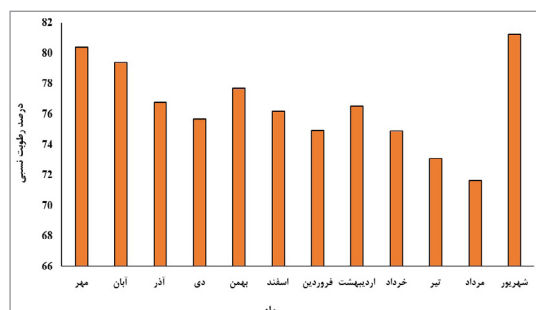
ج) پوشش گیاهی: در صورتی که تراکم پوشش گیاهی در یک منطقه بیشتر از مناطق اطراف باشد و هیچ عامل دیگری نتواند این ویژگی‌ها را توصیف کند، مشخص می‌شود بقا و پایداری اکوسیستم محلی وابسته به وجود مه پایدار است. براساس مشاهدات انجام شده، ارتفاعات مشرف به آبی بیگلو پوشش گیاهی با تراکم بالایی نسبت به مناطق دیگر دارند که نشان دهنده وجود مه مکرر با LWC بالا است.

• تحلیل پارامترهای هواشناسی

الف) رطوبت نسبی: رطوبت نسبی به عنوان یکی از اصلی‌ترین پارامتر هواشناسی در تشکیل مه محسوب می‌شود. در واقع، وجود رطوبت بالا در منطقه آبی بیگلو که حاصل تبخیر از سطح آب‌های دریای خزر و هدایت آن به منطقه می‌باشد، بستر تشکیل مه را فراهم می‌سازد. باتوجه به میانگین ماهانه درصد رطوبت نسبی ایستگاه آبی بیگلو (شکل ۳)، ماه‌های شهریور و مرداد با ۸۱ و ۷۱ درصد به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار رطوبت نسبی را در طول سال داشتند. با بررسی تغییرات رطوبت نسبی در ماه‌های مختلف، می‌توان گفت که ماه‌های شهریور، مهر و آبان شرایط مناسبی را برای تشکیل مه در منطقه دارند.

ب) تعداد روزهای مه‌آلود: جدول (۱) میانگین و درصد ماهانه و فصلی تعداد روزهای مه‌آلود در منطقه را نشان می‌دهد. ماه‌های مهر، شهریور و آبان به ترتیب با ۱۲/۷، ۱۱/۷ و ۱۱/۶ درصد، بیشترین فراوانی وقوع روزهای مه‌آلود و همچنین ماه‌های خرداد، تیر و مرداد به ترتیب با ۵/۶، ۶/۱ و ۵/۶ درصد، کمترین فراوانی وقوع روزهای مه‌آلود را دارد. تشکیل مه همواره به رطوبت نسبی هوا همبستگی دارد. به

همین دلیل، در ماههایی از سال مانند خرداد، تیر و مرداد که کمترین مقدار رطوبت نسبی را دارد، فراوانی وقوع مه اندک است. برعکس، در ماههای با رطوبت نسبی بالا مانند شهریور، مهر و آبان، فراوانی وقوع مه نیز افزایش می‌یابد. بررسی نتایج نشان داد به طور متوسط ۱۴۶ روز سال (بیش از یک سوم)، در منطقه مه‌آلود است. تعداد روزهای مه‌آلود به خوبی ورود جبهه رطوبتی از دریای خزر را نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً بیان شد هجوم بادهای حاوی رطوبت دریای خزر که با افت نسبی دما همراه است باعث تشکیل مه محلی می‌شود. قابل ذکر است نتایج مربوط به وقوع مه (جدول ۱)، بر اساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک فرودگاه بوده و درحالی‌که منطقه آبی‌بیگلو (منطقه مورد مطالعه) در ابتدای محل ورود جبهه رطوبتی دریای خزر قرار دارد و مشاهدات محلی حاکی از بالا بودن شدت و مدت وقوع مه در آن، نسبت به ایستگاه سینوپتیک فرودگاه می‌باشد.



شکل ۳- میانگین ماهانه درصد رطوبت نسبی در ایستگاه آبی‌بیگلو (۱۳۷۶-۱۴۰۰)

جدول ۱- میانگین و درصد ماهانه و فصلی تعداد روزهای مه‌آلود در ایستگاه سینوپتیک فرودگاه در دوره آماری ۱۳۷۶-۱۴۰۰

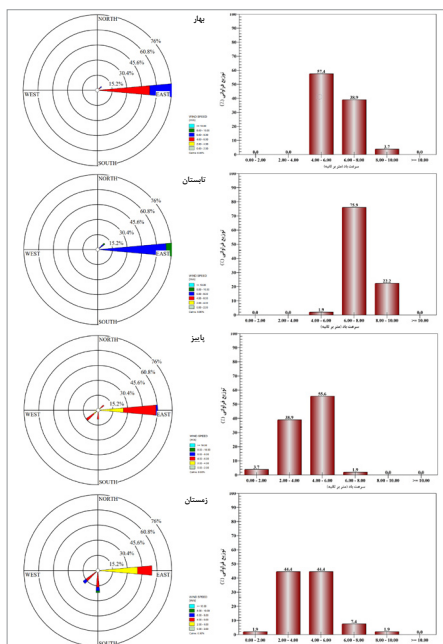
تعداد روزهای مه‌آلود				
فصل	ماه	میانگین	درصد ماهانه	درصد فصلی
پاییز	مهر	۱۸	۱۲/۳	۳۲/۸
	آبان	۱۷	۱۱/۶	
	آذر	۱۳	۸/۹	
زمستان	دی	۱۰	۶/۹	۲۳/۳
	بهمن	۱۱	۷/۵	
	اسفند	۱۳	۸/۹	
بهار	فروردین	۱۳	۸/۹	۲۰/۶
	اردیبهشت	۱۰	۶/۹	
	خرداد	۷	۴/۸	
تابستان	تیر	۸	۵/۵	۲۳/۳
	مرداد	۹	۶/۲	
	شهریور	۱۷	۱۱/۶	
مجموع		۱۴۶	۱۰۰	۱۰۰

ج) بارش: بارش به‌عنوان یکی از پارامترهای هواشناسی، سهم قابل توجهی در افزایش مقدار آب استحصالی دارد. سامانه جمع‌کننده مه، علاوه بر قطرات مه، توانایی جمع‌آوری قطرات باران را نیز دارد. جدول (۲) میانگین و درصد بارش ماهانه در ایستگاه آبی‌بیگلو را نشان می‌دهد. ماه‌های اردیبهشت و آبان هر یک با ۱۴/۴ درصد، بیشترین و مرداد ماه با ۲ درصد، کمترین بارش ماهانه را در منطقه دارند. همچنین فصل پاییز با ۳۴/۲ درصد و فصل تابستان با ۱۱/۶ درصد به ترتیب بیشترین و کمترین بارش فصلی منطقه را دارد.

جدول ۲- میانگین و درصد بارش ماهانه و فصلی ایستگاه آبی‌بیگلو (۱۳۷۶-۱۴۰۰)

بارش				
فصل	ماه	میانگین (میلی‌متر)	درصد ماهانه	درصد فصلی
پاییز	مهر	۳۸/۳	۱۱	۳۴/۲
	آبان	۵۰/۴	۱۴/۴	
	آذر	۳۰/۹	۸/۸	
زمستان	دی	۲۰/۵	۵/۹	۲۴/۳
	بهمن	۳۵/۵	۱۰/۱	
	اسفند	۲۹	۸/۳	
بهار	فروردین	۳۴/۲	۹/۸	۲۹/۹
	اردیبهشت	۵۰/۲	۱۴/۴	
	خرداد	۲۰/۱	۵/۷	
تابستان	تیر	۱۰/۱	۲/۹	۱۱/۶
	مرداد	۷/۲	۲/۰	
	شهریور	۲۳/۲	۶/۶	
مجموع		۳۴۹/۸	۱۰۰	۱۰۰

د) سرعت و جهت باد: باد یکی از پارامترهای هواشناسی است که تاثیر مهمی در انتقال رطوبت و مه از نقطه‌ای به نقطه دیگر دارد. از این رو، بررسی رفتار آن اهمیت زیادی در مطالعات امکان‌سنجی استحصال آب مه دارد. به‌منظور اطلاع از وضعیت باد در منطقه، داده‌های بلندمدت سرعت و جهت باد از ایستگاه آبی‌بیگلو تهیه و تحلیل شد. جدول (۳) میانگین ماهانه سرعت باد غالب در جهات مختلف را در طول دوره آماری نشان می‌دهد. میانگین سرعت باد غالب در طول سال برابر با ۴/۶ متر بر ثانیه است. باد شرقی (بادی که از طرف شرق به غرب می‌وزد) نیز بیشترین سرعت سالانه را دارد. همچنین، به‌منظور تحلیل بادهای غالب از نمایش گرافیکی باد (گلباد) که در محیط نرم‌افزار WRPLOT ترسیم شد استفاده شد. نتایج نشان داد باد غالب منطقه، شرقی است که حدود ۷۰ درصد فراوانی بادهای سالانه را دارد. این باد که به باد خزری معروف است، رطوبت دریای خزر را با خود



شکل ۴- گلباد و توزیع فراوانی باد در فصول مختلف سال بر اساس آمار بلندمدت ایستگاه هواشناسی آبی بیگللو

به دشت اردبیل می‌آورد. اصلی‌ترین علت وزش این باد، جبهه پرفشار سیبری در نیمه سرد سال و فرابار خزری در نیمه گرم سال است. گلباد فصلی ایستگاه آبی بیگللو برای فصول مختلف در شکل (۴) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه فصول، باد شرقی باد غالب منطقه است. باد شرقی در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب با ۶۰، ۹۰، ۹۵ و ۵۵ درصد فراوانی، همچنان به‌عنوان باد غالب منطقه به حساب می‌آید. در فصل پاییز اگرچه باد غالب، همچنان شرقی است ولی از فراوانی بادهای شرقی کاسته شده و بر فراوانی بادهای جنوب غربی، شمال شرقی و جنوبی افزوده می‌شود. این روند چرخش در وضعیت بادهای در فصل زمستان قوت بیشتری پیدا می‌کند و بادهای جنوبی و جنوب غربی فراوانی بیشتری پیدا می‌کنند. از طرف دیگر سرعت وزش بادهای شرقی در فصل تابستان به مراتب بیشتر از سرعت آن در فصل بهار، پاییز و زمستان است. در فصل زمستان نیز سرعت بادهای جنوب و جنوب غربی بیشتر از بادهای شرقی می‌شود.

جدول ۳- میانگین سرعت باد غالب (متر بر ثانیه) در ماه‌های مختلف و جهت‌های جغرافیایی در ایستگاه آبی بیگللو (۱۴۰۰-۱۳۷۶)

ماه / جهت جغرافیایی	شمالی	شمال شرقی	شمال غربی	شرقی	جنوبی	جنوب شرقی	جنوب غربی	غربی
مهر	۲/۹۴	۵/۴۵	۳/۳۵	۵/۹۰	۴/۸۳	۳/۰۶	۵/۷۸	۳/۷۷
آبان	۲/۸۴	۴/۹۰	۳/۴۵	۵/۲۰	۶/۰۸	۲/۸۹	۵/۴۵	۳/۴۲
آذر	۲/۷۱	۴/۱۱	۳/۱۱	۴/۹۲	۶/۷۹	۳/۰۵	۶/۰۴	۳/۵۸
دی	۳/۳۳	۴/۷۲	۳/۲۶	۴/۶۰	۷/۲۹	۳/۰۵	۶/۵۱	۳/۵۹
بهمن	۳/۱	۵/۱۱	۳/۶۲	۵/۱۸	۷/۱۴	۳/۳۵	۶/۳۸	۳/۴۷
اسفند	۳/۲۳	۵/۹۶	۳/۹۱	۶/۱۲	۶/۸۴	۳/۵۶	۷/۱۱	۴/۳۱
فروردین	۴/۰۹	۶/۰۷	۴/۲۹	۶/۳۶	۵/۹۲	۳/۳۷	۶/۴۷	۳/۹۹
اردیبهشت	۳/۶۳	۶/۱۱	۴/۰۲	۶/۴۳	۵/۰۹	۳/۱۹	۵/۶۷	۴/۱۳
خرداد	۳/۵۰	۷/۱۰	۳/۳۴	۷/۴۷	۳/۳۹	۳/۰۲	۴/۱۸	۳/۴۳
تیر	۲/۸۳	۷/۷۱	۲/۸۴	۷/۸۳	۲/۵۸	۲/۹۵	۲/۹۲	۲/۷۰
مرداد	۳/۱۹	۷/۶۲	۲/۸۹	۷/۷۲	۲/۹۵	۲/۷۵	۲/۷۳	۲/۹۴
شهریور	۲/۸	۶/۸۷	۳/۶	۶/۹۹	۳/۷۶	۲/۶۶	۴/۷۶	۳/۶۵
میلنگین	۳/۱۸	۵/۹۸	۳/۴۷	۶/۲۳	۵/۲۲	۳/۰۷	۵/۳۳	۳/۵۸

آمد. همچنین، باتوجه به تعداد روزهای مه‌آلود در دوره اندازه‌گیری، میانگین روزانه آب جمع شده ۳/۶ لیتر بر متر مربع در روز برآورد شد. در شکل (۵) مقدار ماهانه آب جمع‌آوری شده توسط جمع‌کننده راشل و بارندگی در روزهای مه‌آلود مشاهده می‌شود. کل بارندگی از شروع تا پایان دوره اندازه‌گیری برابر ۲۰۹/۵ میلی‌متر بوده و مقدار بارندگی در روزهای مه‌آلود برابر ۱۷۳ میلی‌متر بوده است. بیشترین مقدار بارندگی در ماه‌های مرداد و مهر اتفاق افتاده است. مشاهده می‌شود که مقدار آب استحصالی در زمان‌های مختلف، متفاوت

• تحلیل مقدار آب جمع‌آوری شده توسط جمع‌کننده همزمان با نصب جمع‌کننده، اندازه‌گیری آب جمع شده به‌طور روزانه از تاریخ ۱۴۰۰/۱۱/۲۱ شروع و تا ۱۴۰۰/۱۱/۲۹ ادامه یافت که در مجموع ۲۲۵ روز را شامل شد. از این مقدار، ۸۱ روز هوا مه‌آلود بود (جدول ۱). همان‌طور که در جدول (۴) نیز مشاهده می‌شود، آب جمع شده در طول دوره اندازه‌گیری توسط جمع‌کننده راشل برابر با ۲۸۹ لیتر بر متر مربع بوده است. حداکثر و حداقل مقدار آب جمع‌آوری شده در دوره اندازه‌گیری به ترتیب ۰/۰۲ و ۱۶ لیتر بر متر مربع بر روز به‌دست

است. در بعضی از دوره‌ها، باوجود عدم بارش، استحصال آب وجود داشته که نشان‌دهنده وجود مه در منطقه است. از طرف دیگر، در دوره‌ای با وجود بارندگی، آب جمع شده کمتر و یا بیشتر از مقدار بارندگی بوده است. بیشتر بودن آب جمع شده نسبت به بارندگی، به دلیل وقوع همزمان بارندگی و مه در منطقه است که باعث شده تا آب بیشتری استحصال شود. از طرف دیگر، ممکن است آب جمع شده کمتر از مقدار بارندگی باشد (مرداد ماه)، که می‌تواند به دلیل تاثیر

عوامل مختلف دیگر از جمله سرعت وزش باد باشد. زیرا سرعت زیاد باد، فرصت جذب رطوبت و زهکشی مناسب آن توسط جمع‌کننده را نمی‌دهد. لازم به ذکر است در دو مورد از اندازه‌گیری‌ها با وجود بارندگی زیاد، آب جمع شده کمتر گزارش شده است که به دلیل سرریز شدن ظرف جمع‌آوری آب، خطایی در اندازه‌گیری آب وجود داشت. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود مه‌ماه بیشترین مقدار بارندگی و آب جمع شده در جمع‌کننده را داشته است.

جدول ۴- مقادیر آب استحصال شده (بارش و مه) با جمع‌کننده راشل در منطقه آبی‌بیگللو (لیتر بر مترمربع بر روز)

روز	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان
۱	-	۰/۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	-	۰/۲۸	۰/۲۴	۰	۰/۵۷	۰	۴/۹	۰
۳	-	۰/۳۷	۴	۰	۰/۵۵	۲/۳۵	۴/۹	۴/۹
۴	-	۰/۰۸	۵	۰	۰/۴۶	۰	۸/۲	۸/۲
۵	-	۰	۰	۰	۰	۰	۶/۲	۶/۲
۶	-	۰	۰	۰	۴/۴۸	۰	۶	۰
۷	-	۵	۳	۰	۷/۵۲	۰	۹/۶	۱/۹۵
۸	-	۲/۸۴	۳/۵	۰	۱۱/۸۴	۰	۱۴/۰۶	۳/۸
۹	-	۰/۲۴	۰	۰	۵/۲۸	۰	۸/۵	۴
۱۰	-	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰	۴/۰۵	۰
۱۱	-	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲/۵	۰
۱۲	-	۳/۵	۰/۶۴	۰	۰	۳/۱	۴	۰
۱۳	-	۰	۰/۸	۰	۰	۴/۲	۱۵/۲	۰/۴۷
۱۴	-	۴	۰/۸۸	۰	۰	۰/۰۲	۱۶	۰
۱۵	-	۱/۷	۰/۹	۰	۰	۰/۵۲	۹/۱	۰
۱۶	-	۴/۵	۱/۴	۰	۰	۵/۱	۷/۳	۰
۱۷	-	۰	۱/۵	۱/۱۵	۰	۹/۰۶	۶/۲	۰
۱۸	-	۰	۲/۱	۰/۸۵	۰	۲/۱	۷/۵	۰
۱۹	-	۰	۲/۷	۰/۲۱	۰	۰/۶	۰/۲۸	۰
۲۰	-	۰/۵۵	۱/۱	۰	۰	۰	۰	۰
۲۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۲۳
۲۲	۰/۵	۰	۰	۰/۱۵	۰	۰	۰	۰/۱۴
۲۳	۰	۰	۱/۲	۰	۰	۰	۲/۸	۰
۲۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۶	۰
۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳/۹	۰
۲۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۹	۰
۲۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۶	۰
۲۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸	۰
۲۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳۰	۰/۰۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳۱	۰/۱۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مجموع	۰/۷۳	۲۳/۲۴	۲۸/۹۶	۲/۳۶	۳۰/۷	۲۷/۰۵	۱۴۵/۹۹	۲۹/۸۹

(۶) مقادیر پارامترهای کیفی آب مه مشاهده می‌شود. نتایج نشان داد آب جمع شده بسیار خالص و غلظت‌های بسیار کم سولفات، نیترات، فسفات، سدیم، کلسیم، منیزیم و پتاسیم دارد. باتوجه به نتایج آزمایشات کیفی، می‌توان بیان کرد آب استحصال، مناسب نیازهای بخش شرب و کشاورزی می‌باشد. با این حال به منظور جلوگیری از آلوده شدن آب پس از جمع‌آوری مه و برای استفاده ایمن از آن برای مصارف شرب، ممکن است نیاز به فیلتراسیون و تصفیه آب باشد.

جدول ۵- مقادیر واقعی و پتانسیل آب استحصال شده در ماه‌های مختلف

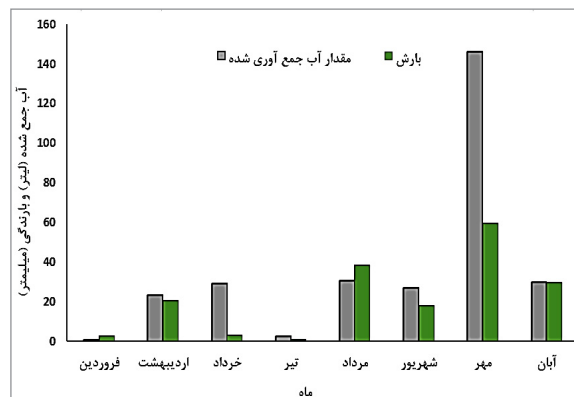
ماه	میلگین سرعت باد (متر بر ثانیه)	پتانسیل استحصال آب (لیتر)	
		مقدار واقعی آب استحصالی (لیتر)	حد اقل حداکثر
فروردین	۳/۸	۰/۷	۳۶۹
اردیبهشت	۳/۵	۲۳/۲	۵۳۷
خرداد	۴/۱	۲۹	۵۷۴
تیر	۴/۵	۲/۴	۸۱۸
مرداد	۴/۳	۳۰/۷	۱۳۵۸
شهریور	۳/۷	۲۷/۱	۲۲۴۹
مهر	۳/۳	۱۴۶	۲۶۹۰
آبان	۳/۰	۲۹/۹	۱۶۸۸

جدول ۶- نتایج آنالیز کیفیت آب مه

پارامترهای کیفی	حداکثر مقدار مجاز (میلی‌گرم بر لیتر)	مقدار به دست آمده (میلی‌گرم بر لیتر)
pH	۶/۸-۵	۶/۸۱
EC	-	۰/۰۰۶۵
TDS	۱۰۰۰	۴۵
SO ₄ ²⁻	۵۰	۲/۴۳
NO ₃ ⁻	۵۰	۲/۱۲
PO ₄ ³⁻	-	۱/۰۲
Na ⁺	۲۰۰	۱/۸
K ⁺	-	۰/۸۹
Ca ²⁺	۲۰۰	۴/۴
Mg ²⁺	۱۲۵	۳/۲
HCO ₃ ⁻	-	۱/۶
Cl ⁻	۲۵۰	۳

۵-۳- تحلیل اقتصادی

در مطالعات امکان‌سنجی انجام طرح‌های استحصال آب از مه که قبل از شروع اجرای هر پروژه‌ای انجام می‌شود علاوه بر مسائل



شکل ۵- مقادیر ماهانه بارندگی و آب جمع‌آوری شده در جمع‌کننده راشل

• پتانسیل استحصال آب از مه

پتانسیل استحصال آب از مه در یک منطقه بیانگر مقدار کل آب موجود در هوا (به صورت قطرات مه) است که توسط باد منتقل می‌شود. پتانسیل استحصال آب توسط جمع‌کننده SFC به ازای مقادیر حداقل و حداکثر LWC و با فرض راندمان جمع‌آوری ۱۰۰ درصد با استفاده از رابطه (۱) تعیین شد. نتایج حداقل و حداکثر آب قابل استحصال به همراه مقادیر واقعی آن در ماه‌های مختلف در جدول (۵) ارائه شده است. بر این اساس بیشترین مقدار آب قابل استحصال مربوط به ماه‌های شهریور و مهر بوده و کمترین آن مربوط به ماه فروردین می‌باشد. یک جمع‌کننده، هرگز قادر به جمع‌آوری همه محتوی آب مایع عبوری نمی‌باشد. از مهمترین دلایل کاهش آب قابل استحصال می‌توان به راندمان پایین جمع‌کننده اشاره کرد. به طور کلی راندمان جمع‌کننده‌های مه سنتی، در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد است (De Dios Rivera, ۲۰۱۱; Azeem و همکاران، ۲۰۲۰b). از عوامل دیگر موثر در پایین بودن راندمان استحصال آب جمع‌کننده‌ها می‌توان به کاهش سرعت و تغییر جهت وزش باد و کاهش تراکم قطرات مه اشاره نمود. با این حال، در سال‌های اخیر پژوهش‌های مناسبی در خصوص جمع‌آوری آب مه با استفاده از نیروی الکترواستاتیک شروع شده است که نشان‌دهنده امکان جمع‌آوری مه با راندمان بالای ۹۰ درصد می‌باشد (Cruzat و Varanasi و Damak، ۲۰۱۸; Hanckes و Yan و Jiang، ۲۰۲۱).

• کیفیت آب مه

ارزیابی دقیق کیفیت آب مه و استفاده از آن برای اهداف مختلف، نیازمند انجام آزمایش‌های کیفی و تحلیل شیمیایی آن است. با بررسی این تحلیل‌ها می‌توان نوع مصرف آب استحصال را نیز تعیین کرد. به منظور بررسی کیفیت آب استحصال شده در این پژوهش، ضمن آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب جمع‌آوری شده، نتایج آن با استاندارد سازمان جهانی بهداشت مقایسه شد. در جدول

پژوهش حاضر به منظور امکان‌سنجی استحصال آب از مه در منطقه آبی‌بیگلو در شمال غرب ایران انجام شد. در بخش اول پژوهش، با مشاهدات محلی و تحلیل آمار بلندمدت پارامترهای هواشناسی، امکان استحصال آب مه از نظر عوامل مختلف جغرافیایی و اقلیمی بررسی شد. در بخش دوم پژوهش، به صورت میدانی و با استفاده از جمع‌کننده مه استاندارد، مقادیر آب استحصال شده به صورت روزانه اندازه‌گیری و با نتایج پژوهش‌های گذشته مقایسه شد. نتایج بررسی پارامترهای هواشناسی شامل رطوبت نسبی، فراوانی وقوع مه، بارش، سرعت و جهت باد نشان دهنده شرایط مناسب اجرای سامانه استحصال آب از مه در منطقه می‌باشد. میانگین رطوبت نسبی بالای ۷۰ درصد در طول سال، بیانگر تشکیل مه پایدار در منطقه است. بالا بودن تعداد روزهای مه‌آلود (بیش از یک سوم سال) نشان داد پدیده مه در منطقه مورد مطالعه مقطعی و فصلی نیست. همچنین، وجود سرعت باد مناسب (به طور میانگین ۴/۶ متر بر ثانیه) می‌تواند مه حاصل از دریای خزر را به حرکت درآورد و به منطقه منتقل کند. باتوجه به اینکه سرعت باد غالب در بازه ۲ تا ۱۰ متر بر ثانیه، فراوانی بالایی دارد، بنابراین پتانسیل زیادی در جمع‌آوری مه ورودی به منطقه با راندمان قابل قبول و بدون آسیب رسیدن به سامانه جمع‌کننده وجود دارد. همچنین به دلیل غالب بودن باد شرقی با فراوانی ۷۰ درصد، استفاده از جمع‌کننده‌های تخت با هزینه کم و نصب آسان توصیه‌پذیر است. باتوجه به این که سامانه جمع‌کننده می‌تواند علاوه بر مه، آب حاصل از بارش را نیز جمع‌آوری و ذخیره کند، لذا باتوجه به میانگین بارش سالانه منطقه (۳۵۰ میلی‌متر)، می‌توان استحصال مقدار آب قابل توجهی را انتظار داشت. میانگین روزانه آب جمع‌شده در دوره وقوع مه که در بخش مطالعه میدانی برابر با ۳/۶ لیتر در متر مربع به دست آمد در مقایسه با نتایج پروژه‌های مشابه مقدار قابل قبولی را نشان می‌دهد. به‌طور کلی باتوجه به نتایج کمی و کیفی آب جمع‌آوری شده می‌توان به منظور تامین بخشی از نیاز شرب منطقه یا نیاز آبیاری قسمتی از اراضی کشاورزی، اجرای طرح‌های استحصال آب از مه را مورد توجه قرار داد.

با وجود پتانسیل قابل قبول استحصال آب از مه در منطقه، وجود برخی از محدودیت‌ها می‌تواند در روند اجرای سامانه مشکل‌ساز باشد. از جمله محدودیت‌های موجود در این پژوهش می‌توان به عدم امکان نصب جمع‌کننده‌ها در ارتفاعات منطقه (به دلایل حفاظتی) نام برد. این مسئله باعث کم‌برآوردی پتانسیل واقعی استحصال آب از مه در پروژه‌های تحقیقاتی و کاهش راندمان جمع‌آوری آب در پروژه‌های عملی می‌شود. تفکیک سهم آب استحصالی مه از بارش یکی دیگر از محدودیت‌ها است. حتی با وجود دسترسی به داده‌های بارش، امکان تفکیک آن با دقت

فنی، ملاحظات اقتصادی نیز در نظر گرفته می‌شود. یک طرح پژوهشی بدون داشتن توجیه اقتصادی، امکان شکست پروژه را افزایش می‌دهد. به همین دلیل لازم است سامانه جمع‌آوری مه از دیدگاه اقتصادی نیز بررسی شود. در این پژوهش به منظور تحلیل اقتصادی، هزینه اجرای سامانه استحصال آب از مه در مقیاس بزرگ (LFC) برآورد و سپس باتوجه به حجم آب استحصال شده در طول یک سال، هزینه واحد آب استحصال شده محاسبه شد. هزینه سامانه استحصال آب با لحاظ تجهیزات فلزی و پایدار آن برابر با ۵۷/۲ میلیون ریال بود، بنابراین هزینه واحد آب استحصال شده برابر با ۲۲۶۷/۳ ریال در لیتر به دست آمد. لازم به ذکر است هزینه واحد آب به‌ازای حجم آب استحصال شده در یک سال بوده است. درحالی که سامانه، قابلیت بهره‌برداری در طول چندین سال را دارد.

• مقایسه نتایج پژوهش با مطالعات پیشین

میانگین آب جمع‌شده توسط جمع‌کننده SFC در منطقه آبی‌بیگلو برابر با ۳/۶ لیتر بر مترمربع در روز به دست آمد که با نتایج مطالعات در نقاط مختلف دنیا قابل مقایسه است. بررسی پیشینه مطالعات نشان می‌دهد میانگین آب استحصال شده از مه در جمع‌کننده نوع SFC برابر با ۶ لیتر در مترمربع در روز بوده است که بیشترین مقدار آن با ۳۰ لیتر در مترمربع در روز مربوط به عمان (Schemenauer و Cereceda, ۱۹۹۶b) و کمترین آن مربوط به شیلی با ۰/۱۶ لیتر در مترمربع در روز (Carvajal و همکاران، ۲۰۲۲) بوده است. یکی از دلایل پایین بودن میانگین استحصال آب از مه در منطقه مورد مطالعه نسبت به متوسط جهانی، عدم نصب جمع‌کننده در نقاط ارتفاعی محل جبهه ورودی مه به دشت اردبیل می‌باشد. در این پژوهش به دلیل سهولت دسترسی و اندازه‌گیری دقیق و مطمئن، جمع‌کننده‌ها در نزدیکی آبی‌بیگلو و در ارتفاع ۱۳۴۰ متری نصب شدند، درحالی که ارتفاعات منطقه ورودی به دشت اردبیل حداکثر رقومی برابر با ۱۷۰۰ متر دارند. لذا در صورتی که جمع‌کننده‌ها در رقوم بالاتری نصب شوند می‌توان انتظار داشت مقدار بیشتری آب استحصال شود. نکته دیگر مربوط به مدت انجام اندازه‌گیری‌ها است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، اندازه‌گیری‌های انجام شده بخشی از ماه‌های فروردین و آذر و کل زمستان را پوشش نمی‌داد (به دلیل نامناسب بودن شرایط جوی). باتوجه به این که بخش قابل توجهی از رخدادهای مه و بارش در این بازه زمانی رخ می‌دهد، بنابراین به نظر می‌رسد پتانسیل جمع‌آوری آب مه بیش از مقدار به دست آمده می‌تواند باشد. به بیان دیگر نرخ استحصال آب ۳/۶ لیتر در مترمربع در روز مربوط به مدت زمان دوره وقوع مه است. براساس داده‌های بلندمدت (۱۴۰۰-۱۳۷۶)، دوره وقوع مه در منطقه مورد مطالعه برابر با ۱۴۶ روز در سال است که بیش از یک سوم سال را شامل می‌شود. بنابراین باتوجه به دوره طولانی مدت وقوع مه، برای استحصال آب از مه در منطقه مورد مطالعه می‌توان پتانسیل بالایی را انتظار داشت.

Al-Mandhari, A. (2019). Achieving "Health for All by All" in the Eastern Mediterranean Region. *Eastern Mediterranean Health Journal*, 25(9), 595-596. doi: [10.26719/2019.25.9.595](https://doi.org/10.26719/2019.25.9.595)

Azeem, M., Guérin, A., Dumais, T., Caminos, L., Goldstein, R. E., Pesci, A. I., de Dios Rivera, J., Josefina Torres, M., Wiener, J., Luis Campos, J., & Dumais, J. (2020a). Optimal design of multilayer fog collectors. *ACS applied materials & interfaces*, 12(6), 7736-7743. doi: [10.1021/acsami.9b19727](https://doi.org/10.1021/acsami.9b19727)

Azeem, M., Noman, M. T., Wiener, J., Petru, M., & Louda, P. (2020b). Structural design of efficient fog collectors: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101169. doi: [10.1016/j.eti.2020.101169](https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101169)

Carrera-Villacres, D. V., Robalino, I. C., Rodriguez, F. F., Sandoval, W. R., Hidalgo, D. L., & Toulkeridis, T. (2017). An innovative fog catcher system applied in the Andean communities of Ecuador. *Transactions of the ASABE*, 60(6), 1917-1923. doi: [10.13031/trans.12368](https://doi.org/10.13031/trans.12368)

Carvajal, D., Silva-Llanca, L., Larraguibel, D., & González, B. (2020). On the aerodynamic fog collection efficiency of fog water collectors via three-dimensional numerical simulations. *Atmospheric Research*, 245, 105123. doi: [10.1016/j.atmosres.2020.105123](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105123)

Carvajal, D., Mora-Carreño, M., Sandoval, C., & Espinoza, S. (2022). Assessing fog water collection in the coastal mountain range of Antofagasta, Chile. *Journal of Arid Environments*, 198. doi: [10.1016/j.jaridenv.2021.104679](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104679)

Cereceda, P., Larrain, H., Lázaro, P., Osses, P., Schemenauer, R. S., & Boroevic, X. (2000). La niebla, agua potable para zonas rurales. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 45, 143-160.

Cruzat, D., & Jerez-Hanckes, C. (2018). Electrostatic fog water collection. *Journal of Electrostatics*, 96, 128-133. doi: [10.1016/j.elstat.2018.10.009](https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.10.009)

Damak, M., & Varanasi, K. K. (2018). Electrostatically driven fog collection using space charge injection. *Science advances*, 4(6), eaao5323. doi: [10.1126/sciadv.aao.5323](https://doi.org/10.1126/sciadv.aao.5323)

De Dios Rivera, J. (2011). Aerodynamic collection efficiency of fog water collectors. *Atmospheric Research*, 102(3), 335-342. doi: [10.1016/j.atmosres.2011.08.005](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.08.005)

مناسب میسر نمی‌باشد و این به دلیل زاویه متفاوت جبهه بارش و جمع‌کننده است که در سرعت‌های مختلف باد تغییر می‌یابد. اگر چه از دیدگاه بهره‌برداری، منشا آب استحصال شده چندان اهمیتی ندارد، اما تفکیک سهم بارش و مه به منظور انجام مطالعات و توسعه سامانه‌های جمع‌کننده مه، امری ضروری است. باتوجه به این که تحقیق حاضر زمینه را برای انجام مطالعات بعدی در این منطقه فراهم می‌کند، پیشنهاد می‌شود محیطی مناسب با تهیدات حفاظتی با کمک مردم بومی و یا سازمان‌های مربوط به آن در ارتفاعات منطقه ایجاد شود. همچنین، پیشنهاد می‌شود برای به حداقل رساندن خطا در تفکیک سهم مه و بارش در آب استحصال شده، از سامانه‌های کنترلی و اینترنت اشیا به جای قرائت روزانه آب جمع‌آوری شده، استفاده شود.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه محقق اردبیلی به شماره قرارداد ۹۹-د-۹-۱۳۷۷ انجام شده است. نویسندگان همچنین از شرکت آب منطقه‌ای اردبیل برای در دسترس قرار دادن مجموعه داده‌های هواشناسی مورد استفاده در این پژوهش تقدیر و تشکر می‌کنند.

پی‌نوشت‌ها

- 1-Liquid Water Content (LWC)
- 2-Large Fog Collector (LFC)
- 3-Standard Fog Collector (SFC)
- 4-Inca 5-Camanchaca
- 6-El Tofo 7-Liam
- 8-Andes 9-Galat

منابع

صمدزاده، رسول. (۱۳۸۸). تحلیل سیستم‌های محیطی دامنه‌های باختری ارتفاعات باغروداغ و نقش آن‌ها در پیدایش بیوم جنگلی فندقلو. فصلنامه جغرافیایی سرزمین، ۶(۲۲)، ۸۵-۱۰۵.

میان‌آبادی، حجت. (۱۳۹۱). آب، امنیت و رودخانه‌های مرزی. همایش ملی شهرهای مرزی و امنیت، چالش‌ها و رهیافت‌ها. دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

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. doi: [10.1111/wej.12330](https://doi.org/10.1111/wej.12330)

- water harvesting. *Frontiers in Water*, 3, 675269. doi: [10.3389/frwa.2021.675269](https://doi.org/10.3389/frwa.2021.675269)
- Regalado, C. M., & Ritter, A. (2016). The design of an optimal fog water collector: A theoretical analysis. *Atmospheric Research*, 178, 45-54. doi: [10.1016/j.atmosres.2016.03.006](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.006)
- Ritter, A., Regalado, C. M., & Aschan, G. (2008). Fog water collection in a subtropical elfin laurel forest of the Garajonay National Park (Canary Islands): a combined approach using artificial fog catchers and a physically based impaction model. *Journal of Hydrometeorology*, 9(5), 920-935. doi: [10.1175/2008JHM992.1](https://doi.org/10.1175/2008JHM992.1)
- Schemenauer, R. S., & Cereceda, P. (1994a). A proposed standard fog collector for use in high-elevation regions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 33(11), 1313-1322. doi: [10.1175/1520-0450](https://doi.org/10.1175/1520-0450)
- Schemenauer, R. S., & Cereceda, P. (1994b). Fog collection's role in water planning for developing countries. In *Natural Resources Forum*, 18(2), 91-100. doi: [10.1111/j.1477-8947.1994.tb00879](https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1994.tb00879)
- Shi, W., Anderson, M. J., Tulkoff, J. B., Kennedy, B. S., & Boreyko, J. B. (2018). Fog harvesting with harps. *ACS applied materials & interfaces*, 10(14), 11979-11986. doi: [10.1021/acsami.7b17488](https://doi.org/10.1021/acsami.7b17488)
- Tav, J., Masson, O., Burnet, F., Paulat, P., Bourriane, T., Conil, S., & Pourcelot, L. (2018). Determination of fog-droplet deposition velocity from a simple weighing method. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(1), 103-113. doi: [10.4209/aaqr.2016.11.0519](https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.11.0519)
- Tu, Y., Wang, R., Zhang, Y., & Wang, J. (2018). Progress and expectation of atmospheric water harvesting. *Joule*, 2, 1452-1475. doi: [10.1016/j.joule.2018.07.015](https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.07.015)
- Yan, X., & Jiang, Y. (2021). Numerical evaluation of the fog collection potential of electrostatically enhanced fog collector. *Atmospheric Research*, 248, 105251. doi: [10.1016/j.atmosres.2020.105251](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105251)
- Zolghadr-Asli, B., McIntyre, N., Djordjevic, S., Farmani, R., Pagliero, L., Martínez-Alvarez, V., & Maestre-Valeiro, J. F. (2023). A review of limitations and potentials of desalination as a sustainable source of water. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(56), 118161-118174. doi: [10.1007/s11356-023-30662-x](https://doi.org/10.1007/s11356-023-30662-x)
- Estrela, M. J., Valiente, J. A., Corell, D., Fuentes, D., & Valdecantos, A. (2009). Prospective use of collected fog water in the restoration of degraded burned areas under dry Mediterranean conditions. *Agricultural and forest meteorology*, 149(11), 1896-1906. doi: [10.1016/j.agrformet.2009.06.016](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.016)
- Elshennawy, A. A., Abdelaal, M. Y., & Hamed, A. M. (2022). Fog collection-materials, techniques and affecting parameters-A review. *SeaTific Engineering Research Journal*, 2(2), 102-127. doi: [10.14744/seatific.2022.0009](https://doi.org/10.14744/seatific.2022.0009)
- He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J., & Bryan, B. A. (2021). Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature communications*, 12(1), 1-11. doi: [10.1038/s41467-021-25026-3](https://doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3)
- Ismail, Z., & Go, Y. I. (2021). Fog-to-Water for Water Scarcity in Climate-Change Hazards Hotspots: Pilot Study in Southeast Asia. *Global Challenges*, 5(5). doi: [10.1002/gch2.202000036](https://doi.org/10.1002/gch2.202000036)
- Khalil, M. M., Kara-Ali, A., & Assad, M. (2022). Potential of harvesting water from fog and dew water over semi-arid and arid regions in Syria. *Water Supply*, 22(1), 874-882. doi: [10.2166/ws.2021.229](https://doi.org/10.2166/ws.2021.229)
- Lakra, K., & Avishek, K. (2022). A review on factors influencing fog formation, classification, forecasting, detection and impacts. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 33(2), 319-353. doi: [10.1007/s12210-022-01060-1](https://doi.org/10.1007/s12210-022-01060-1)
- MacQuarrie, K., Shrestha, Y., Schemenauer, R. S., Vitez, F., Kowalchuk, K., & Taylor, R. (2001). Results from a high elevation fog water supply project in Nepal. In *Proceedings of 2th International Conference on Fog and Fog Collection*. St. John's, Canada.
- Molina, J. M., & Escobar, C. M. (2008). Fog collection variability in the Andean Mountain range of Southern Colombia. *Die Erde*, 139, 127-140.
- Pauli, E., Andersen, H., Bendix, J., Cermak, J., & Egli, S. (2020). Determinants of fog and low stratus occurrence in continental central Europe—a quantitative satellite-based evaluation. *Journal of Hydrology*, 591, 125451. doi: [10.1016/j.jhydrol.2020.125451](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125451)
- Qadir, M., Jiménez, G. C., Farnum, R. L., & Trautwein, P. (2021). Research history and functional systems of fog