

تعیین تعداد بهینه لایه جمع کننده در سیستم استحصال آب از مه

امین کانونی*، محمدرضا کهن

گروه مهندسی آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

* نویسنده مسئول: amin.kanooni@uma.ac.ir

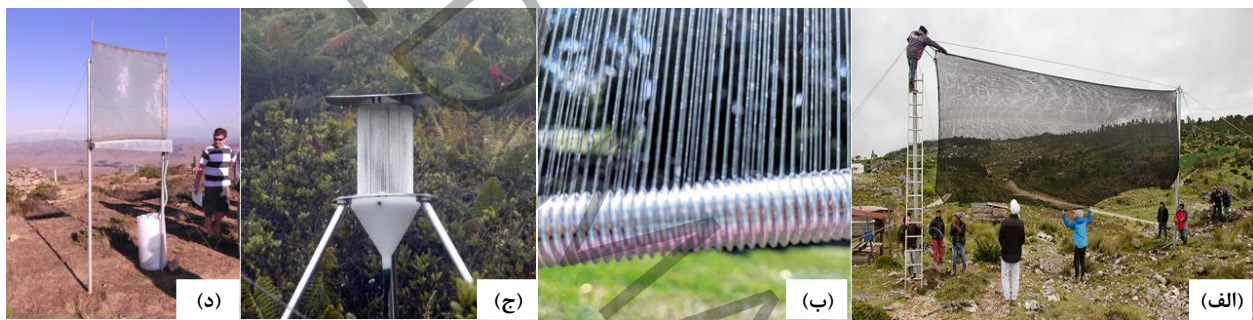
چکیده

یکی از روش‌های ارتقاء راندمان استحصال آب در جمع‌کننده‌های مه، افزایش تعداد لایه در انواع جمع‌کننده‌ها است. در پژوهش حاضر با تحلیل روابط نظری موجود و انجام آزمایش تجربی، اثر تعداد لایه بر راندمان جمع‌کننده‌های مرسوم (راشل و آلومینیوم) بررسی شد. در بخش آزمایشگاهی بعد از راه‌اندازی سیستم تولید و استحصال مه، جریان خروجی از دستگاه رطوبت‌ساز به صفحه جمع‌کننده برخورد و پس از استحصال مه و اندازه‌گیری مقادیر آب جمع‌شده، راندمان جمع‌کننده‌های با تعداد ۱، ۲، ۵ و ۷ لایه، برآورد و مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج بررسی روابط نظری حاکم بر استحصال آب از مه نشان داد که با افزایش ضریب تخلخل جمع‌کننده، راندمان آیرودینامیکی ابتدا افزایش و پس از ضریب تخلخل حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد، مقدار آن کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش تعداد لایه‌های مش راشل و آلومینیوم از ۱ تا ۱۲ لایه، راندمان آیرودینامیکی به ترتیب ۱۲ و ۷ درصد کاهش و راندمان نهفتگی آن‌ها به ترتیب ۶۱ و ۷۳ درصد افزایش یافت. بیشترین راندمان نظری مش راشل و مش آلومینیوم به ترتیب در حالت ۴ و ۷ لایه به دست آمد. طبق نتایج آزمایش تجربی نیز، بیشترین راندمان جمع‌آوری آب مش راشل در حالت ۵ لایه برابر با ۵۵/۳ درصد و برای مش آلومینیوم در حالت ۶ لایه برابر با ۵۸/۱ درصد به دست آمد. در صورتی که مبنای انتخاب تعداد لایه‌ها، هزینه‌های اجرای سیستم استحصال باشد تعداد بهینه لایه در مش راشل و آلومینیوم به ترتیب ۲ و ۴ لایه خواهد بود.

کلمات کلیدی: جمع‌کننده، راندمان، لایه، مش آلومینیوم، مش راشل

۱- مقدمه

استحصال آب از مه یکی از روش‌های قابل دسترس تامین آب است که در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. در بسیاری از نقاط مستعد مه در جهان که بارندگی کافی و با توزیع مناسبی ندارد و یا به علت صعب‌العبور بودن منطقه امکان انتقال آب میسر نیست، استفاده از مه به عنوان منبع آب نامتعارف، گزینه مناسبی در تامین آب آن مناطق به‌شمار می‌رود [۱]. مقدار و کیفیت آب جمع‌آوری شده از پارامترهای مهم در امکان‌سنجی استحصال آب از مه در مناطق مستعد به‌شمار می‌رود. به همین منظور از جمع‌کننده‌های مختلفی مانند جمع‌کننده مه استاندارد^۱، یوویک^۲ و سیم‌چنگ^۳ استفاده می‌شود. جمع‌کننده مه استاندارد پرکاربردترین جمع‌کننده مه می‌باشد که به دلیل سادگی تهیه و بهره‌برداری، در اکثر پروژه‌های امکان‌سنجی در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. این جمع‌کننده از یک صفحه توری دولایه از جنس پلی‌پروپیلن با ضریب تخلخل ۳۵ درصد، به ابعاد ۱×۱ متر مربع و به ارتفاع ۲ متر از سطح زمین ساخته می‌شود. نمونه بزرگ‌تر آن (جمع‌کننده مه بزرگ^۴) معمولاً با ابعاد ۴×۱۲ متر مربع ساخته می‌شود که در پروژه‌های عملیاتی به کار برده می‌شود. جمع‌کننده‌های مه از مواد و اشکال مختلفی مانند مش راشل^۵، مش فلزی و سیم‌های نایلونی، تفلونی و فلزی ساخته می‌شوند. مش راشل ساخته شده از پلی‌پروپیلن، به دلیل در دسترس و ارزان بودن آن نسبت به جمع‌کننده‌های دیگر، به صورت گسترده در پروژه‌های تحقیقاتی و عملیاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱ انواع جمع‌کننده‌های مش راشل (الف و د)، سیم‌چنگ تفلونی (ب) و استوانه‌ای یوویک با توری آلومینیومی (ج) را نشان می‌دهد.



شکل ۱. الف) جمع‌کننده مه بزرگ (ب) جمع‌کننده سیم‌چنگ (ج) جمع‌کننده استوانه‌ای یوویک (د) جمع‌کننده مه استاندارد

Figure 1. a) Large Fog Collector b) Harp-Wire Collector c) Juvik Cylindrical Collector d) Standard Fog Collector

راندمان جمع‌آوری آب یک جمع‌کننده به پارامترهای مختلفی از جمله عوامل هواشناسی و جغرافیایی، هندسه کلی جمع‌کننده (مسطح، استوانه‌ای، چندوجهی)، شکل عنصر جمع‌کننده (سیم‌ی یا روبان)، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سطح جمع‌کننده (درجه ترشوندگی) و آرایش شبکه (تعداد لایه‌ها) بستگی دارد، به طوری که ایجاد تغییر در هر یک از آن عوامل، تاثیری مستقیم بر کارایی سیستم جمع‌آوری می‌گذارد. استحصال آب از مه از نظر جغرافیایی به عواملی چون ارتفاع از سطح دریا و توپوگرافی محل نصب جمع‌کننده و از نظر هواشناسی به عواملی چون محتوای آب مایع^۶، فراوانی و مدت وقوع مه و سرعت و جهت باد بستگی دارد [۳، ۴]. توپوگرافی و ارتفاع، نقش اساسی در تشکیل و هدایت مه ایفا می‌کنند. لذا استحصال آب از مه در مناطق کوهستانی، کارایی بالایی دارد [۵]. در صورت نصب جمع‌کننده در نقاط مرتفع، کارایی استحصال آب می‌تواند تا ۱۹ برابر افزایش یابد [۶]. فراوانی و مدت وقوع مه نیز رابطه‌ای مستقیم با مقدار آب استحصالی دارد. بنابراین برای برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌های استحصال آب از مه، لازم است از فراوانی، مدت و فصل وقوع مه در منطقه آگاهی کافی کسب کرد [۷]. جهت و سرعت باد غالب، رابطه مستقیمی با راندمان جمع‌آوری آب از مه دارد [۸]. سرعت زیاد

¹ Standard Fog Collector (SFC)

² Juvik

³ Harp-wire

⁴ Large Fog Collector (LFC)

⁵ Raschel

⁶ Liquid Water Content (LWC)

باد، علاوه بر افزایش شار ورودی مه، باعث کاهش انحراف قطرات مه از مسیر اصلی حرکت می‌شود و لذا با برخورد قطرات مه به جمع‌کننده، راندمان آن افزایش می‌یابد. البته در بادهای با سرعت بسیار زیاد، به علت بازگشت مجدد قطرات جذب شده توسط جمع‌کننده به جریان باد، امکان کاهش راندمان وجود دارد. در استفاده از جمع‌کننده‌های مسطح، جهت وزش باد اهمیت ویژه‌ای دارد. سطح جمع‌کننده باید عمود بر جهت باد در نظر گرفته شود. در حالتی که جهت باد و جمع‌کننده موازی باشند راندمان جمع‌آوری عملاً صفر خواهد بود [۹]. اگر جهت وزش باد در یک منطقه بسیار متغیر باشد، می‌توان به منظور افزایش راندمان استحصال آب، از جمع‌کننده استوانه‌ای یا چندوجهی استفاده کرد [۱۰]. به طور معمول، یک جمع‌کننده مسطح به دلیل طراحی ساده بر یک جمع‌کننده استوانه‌ای یا چندوجهی ترجیح داده می‌شود [۱۱]. جمع‌کننده‌های با رشته‌های سیمی به دلیل مقاومت کمتر در برابر جریان هوا، از مش‌های ساخته شده از روبان (مانند مش معمولی راشل) عملکرد بهتری دارند [۱۱-۱۳]. این نکته در طبیعت نیز صادق است، به طوری که درختان سوزنی‌برگ و یا گیاهانی که اندام‌های هوایی آن‌ها از قسمت‌های نازک (مانند مژه) تشکیل یافته است توانایی بیشتری در جذب قطرات مه نسبت به درختان و گیاهان پهن برگ دارند [۱۴]. تحقیقات انجام‌یافته در خصوص تأثیر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سطح جمع‌کننده بر راندمان جمع‌آوری مه، نشان می‌دهد که با ایجاد پوشش‌های شیمیایی و اصلاح سطوح جمع‌کننده‌ها می‌توان کارایی آن‌ها را افزایش داد. آزاد و همکاران [۱۵] با ایجاد یک پوشش شیمیایی بر روی جمع‌کننده مش، نشان دادند که راندمان جمع‌آوری مش فوق‌آبدوست حدود پنج برابر بیشتر از مش آبدوست و حدود دو برابر بیشتر از مش آب‌گریز است. علی‌رغم عملکرد بالای مش‌های فوق‌آبدوست در جذب مه، قطرات استحصال یافته به آسانی تخلیه نمی‌شوند. از طرف دیگر، اگر چه قطرات در سطوح فوق‌آبگریز به آسانی تخلیه می‌شوند اما به علت چسبندگی کم آن سطوح، امکان بازگشت مجدد قطرات به جریان باد، زیاد است [۱۶]. استفاده از مواد شیمیایی برای اصلاح ترشوندگی جمع‌کننده‌ها دارای معایبی نیز است که از آن جمله می‌توان به خواص فیزیکی و شیمیایی ناپایدار مواد به کار رفته و عمر پایین آن در صورت استفاده در محیط بیرون، ایجاد مسمومیت در آب جمع‌آوری شده به دلیل استفاده از ترکیبات حاوی فلئوئور و همچنین شرایط سخت آماده‌سازی و به‌کارگیری آن‌ها در مقیاس بزرگ اشاره کرد [۱۷، ۱۸]. یکی دیگر از روش‌های بهبود راندمان جمع‌کننده‌ها، افزایش تعداد لایه‌های صفحه جمع‌کننده است. نتایج یک تحقیق میدانی انجام شده بر روی جمع‌کننده استوانه‌ای یک و دولایه نشان داد، عملکرد جمع‌کننده دو لایه بیشتر از یک لایه بوده و رابطه‌ای خطی بین تعداد لایه و مقدار آب استحصالی وجود دارد، به طوری که با افزایش تعداد لایه، مقدار آب استحصالی نیز افزایش می‌یابد [۱۹]. همچنین نتایج تحقیق نظری انجام شده توسط رگالادو و ریتر [۱۳] نشان داد که با افزایش تعداد لایه تا پنج عدد، راندمان جمع‌آوری افزایش و پس از آن، مقدار راندمان کاهش می‌یابد. تناقض موجود در پیشینه تحقیق در خصوص اثرات تعداد لایه بر راندمان استحصال آب جمع‌کننده‌ها، دلیل اصلی انجام پژوهش حاضر بوده است. از طرف دیگر، با توجه به اینکه پژوهش تجربی جامعی برای تعیین تعداد بهینه لایه در جمع‌کننده‌های مختلف انجام نشده است، لذا در تحقیق حاضر با انجام آزمایش تجربی و اندازه‌گیری راندمان جمع‌کننده‌های مرسوم (راشل و آلومینیوم) و مقایسه آن‌ها با مقادیر حاصل از روابط نظری موجود، تعداد بهینه لایه انتخاب و با تحلیل هزینه‌های اجرایی، اقتصادی‌ترین جمع‌کننده نیز معرفی شد.

۲- مواد و روش تحقیق

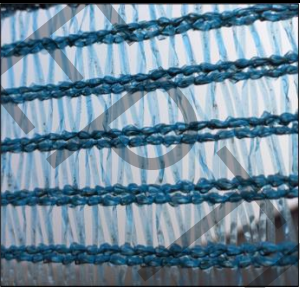

۲-۱- اندازه‌گیری آزمایشگاهی

به منظور تعیین تعداد بهینه لایه جمع‌کننده مه با حداکثر راندمان استحصال، تحقیقی در محیط آزمایشگاهی با استفاده از مش‌های راشل و آلومینیوم با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ انجام گرفت. برای این منظور، شبیه‌سازی جریان مه در محیط آزمایشگاهی توسط چهار رطوبت‌ساز اولتراسونیک مدل MLH-330 انجام شد. ماژول‌های رطوبت‌ساز درون یک محفظه پلاستیکی حاوی آب مقطر قرار داده شد و سپس با استفاده از یک فن دمنده مدل Turbo vph-15S2S که بر روی محفظه قرار می‌گرفت مه ایجاد شده به سمت جمع‌کننده هدایت شد (شکل ۲). مش‌های تهیه شده درون یک قاب فلزی در فاصله پنج سانتی‌متری از خروجی قرار گرفتند. سرعت مه خروجی در نزدیکی جمع‌کننده‌ها نیز با یک سرعت‌سنج دیجیتالی مدل Testo245 اندازه‌گیری شد. با شروع آزمایش، جرم مه خروجی و همچنین

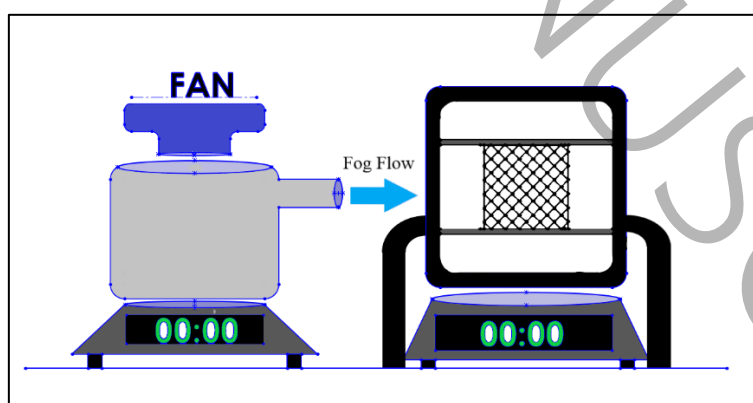
آب جمع‌آوری شده توسط جمع‌کننده‌ها با استفاده از دو ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری‌ها برای هر یک از مش‌های راشل و آلومینیوم با تعداد ۱ تا ۷ لایه انجام گرفت. لایه‌های مش روی هم و بدون فاصله از هم قرار گرفتند و هر آزمایش نیز در سه تکرار و هر یک به مدت ۲۱ دقیقه به طول انجامید.

Table 1. The characteristics of the collectors with their shading coefficients

جدول ۱. مشخصات جمع‌کننده‌ها به همراه ضریب تخلخل آن‌ها

نوع مش	مشخصات ساختاری مش	ضریب تخلخل	تصویر مش
مش راشل	تشکیل شده از روبان‌های پلی‌پروپیلن به شکل مثلث‌های متساوی‌الساقین با اندازه پایه ۵ و اضلاع ۹ میلی‌متر و پهنا و ضخامت به ترتیب ۱/۵ و ۰/۱ میلی‌متر	۰/۳۵	
مش آلومینیوم	تشکیل شده از روبان‌های آلومینیومی به شکل لوزی با ابعاد ۴×۹ میلی‌متر و پهنا و ضخامت به ترتیب ۱/۵ و ۰/۲ میلی‌متر	۰/۳۳	

به منظور تعیین ضریب تخلخل جمع‌کننده‌ها، ابتدا تصویر جمع‌کننده مورد نظر تهیه و سپس از کد کامپیوتری نوشته شده در محیط پایتون^۱ استفاده شد. الگوریتم مربوطه، تعداد همه پیکسل‌های تصویر و پیکسل‌های رنگ‌شده را در دو متغیر جداگانه ذخیره و سپس مقدار رنگی هر پیکسل را با دو حد بالا و پایین مقایسه و پیکسل‌های با رنگ مناسب را تشخیص می‌داد. در انتها با شمردن تعداد آنها، ضریب تخلخل تعیین شد.



شکل ۲. شماتیک جمع‌کننده مه آزمایشگاهی

Figure 2. Schematic of laboratory fog collector

¹ Python

تحت شرایط مه، مقدار نظری آب جمع شده توسط جمع کننده را می توان با رابطه (۱) تخمین زد [۶، ۲۰].

$$Q = 3.6 \times LWC \times u \times A \times \eta_{coll} \quad (1)$$

که در آن، Q آب جمع شده (Lit/hr)، LWC محتوای آب مایع (gr/m^3)، A سطح مقطع جمع کننده (m^2)، 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 همه قطرات عبوری نیست. لذا برای مشخص کردن مقدار قطرات جذب شده توسط جمع کننده از راندمان جمع کننده (η_{coll}) استفاده می شود. به صورت نسبت مقدار جریان آب جمع شده در واحد سطح صفحه جمع کننده (q) به شار عبوری مه از سطح مقطع تعریف می شود. برای تعیین راندمان جمع کننده، لازم است سرعت باد، LWC و آب جمع آوری شده اندازه گیری شوند. بدین ترتیب راندمان کل جمع آوری را می توان با رابطه (۲) نشان داد [۱۱].

$$\eta_{coll} = \frac{q}{3.6 \times LWC \times u} \quad (2)$$

همان طور که گفته شد یک جمع کننده فقط می تواند کسری از کل قطرات عبوری را گرفته و در مخزن ذخیره کند. این کاهش راندمان می تواند به دلیل انحراف مسیر قطرات مه قبل از رسیدن به صفحه جمع کننده، عبور قطرات مه از فضای خالی و عدم برخورد به بخش جامد مش، ریزش قطرات به خارج از محیط جمع آوری به دلیل سرعت بالای باد و اعوجاج صفحه جمع کننده و همچنین تلفات ناشی از نشستی در سیستم زهکشی باشد.

جریان مه ممکن است به دلیل هندسه یا شکل صفحه جمع کننده از مسیر مستقیم منحرف شده و از اطراف آن عبور کند. برای تعیین کسری از جریان مه که بدون انحراف، خود را به صفحه جمع کننده می رساند از راندمان آیرودینامیکی استفاده می شود. راندمان آیرودینامیکی (نسبت قطرات مه رسیده به صفحه جمع کننده به کل جریان مه) از رابطه (۳) قابل تعیین است:

$$\eta_{AC} = \frac{SC}{1 + \sqrt{\frac{C_O}{C_D}}} \quad (3)$$

که در آن، SC ضریب تخلخل صفحه جمع کننده (نسبت مساحت جامد مش به مساحت کل صفحه جمع کننده)، C_O ضریب افت فشار و C_D ضریب دراگ است [۱۱]. ضریب افت فشار که بیان کننده اختلاف فشار جریان مه در محل صفحه و بعد از آن می باشد، به عواملی چون ضریب تخلخل، تعداد لایه های جمع کننده و شکل صفحه جمع کننده بستگی دارد. روش های زیادی برای محاسبه C_O پیشنهاد شده است که می توان به مدل های ارائه شده توسط گلارت و همکاران [۲۱]، ایدلچیک [۲۲، ۲۳]، کو و جیمز [۲۴] و دی دیوس ریورا [۱۱] اشاره کرد. ایدلچیک [۲۲] کامل ترین مجموعه محاسبه C_O برای صفحات مشبک سیمی و ابریشمی را ارائه کرده است. با استفاده از رابطه (۴) می توان ضریب افت فشار را بر اساس ضریب تخلخل و ضریب اصلاحی (k_{Re}) محاسبه کرد.

$$C_O = k_{Re} \left[1.3 \times SC + \left(\frac{SC}{1 - SC} \right)^2 \right] \quad (4)$$

به ازای $Re < 400$ ضریب k_{Re} از رابطه (۵) قابل محاسبه است [۲۴].

$$k_{Re} = -2.32439 \times 10^{-8} (Re)^3 + 2.12241 \times 10^{-5} (Re)^2 - 0.00652975 (Re) + 1.71227 \quad (5)$$

که در آن، Re عدد رینولدز است.

با نصب موازی لایه ها، ضریب افت فشار کل (C_{O_T}) برابر با مجموع ضرایب افت فشار صفحات خواهد بود [۲۲]. یعنی:

$$C_{O_T} = \sum_{i=1}^{nR} C_{O_i} \quad (6)$$

که در آن، nR تعداد لایه های جمع کننده است.

همان‌طور که بیان شد، کسری از قطرات مه موجود در جریان هوا در مواجهه با صفحه جمع‌کننده به آن برخورد و بقیه از فضای خالی موجود در مش عبور می‌کنند. برای تعیین راندمان نهفتگی (نسبت قطرات مه برخوردشده به صفحه جمع‌کننده به کل قطرات مه ورودی) از رابطه (۷) استفاده می‌شود [۲۵]:

$$\eta_{imp} = \begin{cases} \frac{S_{tk}^2}{(S_{tk} + 0.6)^2} & S_{tk} \geq 0.08 \\ 0 & S_{tk} < 0.08 \end{cases} \quad (7)$$

که در آن، η_{imp} راندمان نهفتگی و S_{tk} عدد استوکس است. عدد استوکس بی‌بعد بوده و تعادل جنبشی قطره با جریان هوای اطراف را نشان می‌دهد. در اعداد استوکس کوچک ($S_{tk} \ll 1$)، قطرات را می‌توان در تعادل نزدیک با سیال حامل در نظر گرفت. همچنین، اعداد بزرگ استوکس ($S_{tk} \gg 1$) منجر به کارایی بالا در جمع‌آوری قطرات مه می‌شود [۶، ۱۳]. عدد استوکس را می‌توان از رابطه (۸) محاسبه کرد.

$$S_{tk} = \frac{\rho_d D_d^2 u}{9\nu d} \quad (8)$$

که در آن، ρ_d چگالی آب (kg/m^3)، D_d قطر قطره مه (m)، ν ویسکوزیته دینامیکی هوا ($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$)، d قطر عناصر جمع‌کننده (m) و u سرعت جریان مه (m/s) می‌باشند. راندمان نهفتگی در یک صفحه چندلایه (η_{impN}) نیز از رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$\eta_{impN} = 1 - (1 - \eta_{imp} SC)^{nR} \quad (9)$$

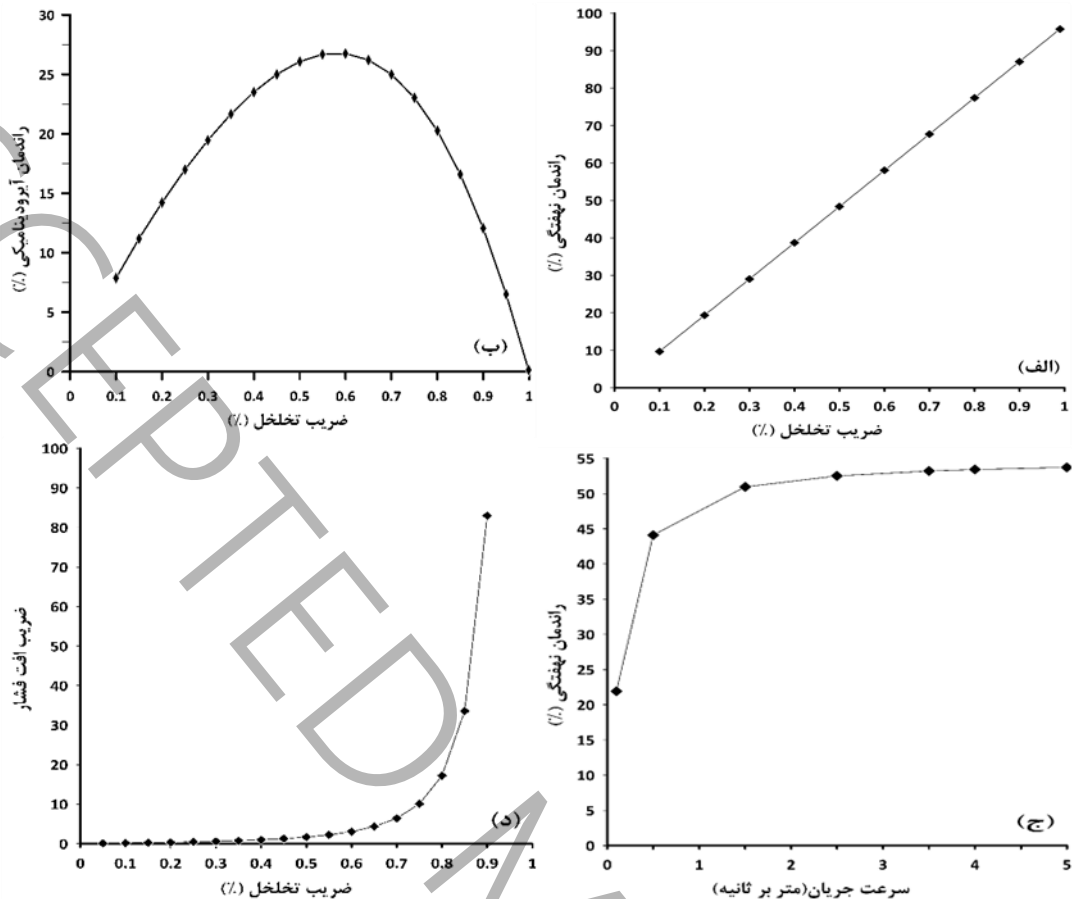
نسبت مقدار آب جمع‌آوری شده به مقدار آب جذب‌شده توسط جمع‌کننده، بیان‌کننده راندمان زهکشی (η_{dr}) است که تحت تاثیر عواملی چون بازگشت مجدد قطرات به جریان هوا و نشت آب در مسیر جریان آب به مخزن، قرار می‌گیرد. تحقیقات بسیاری برای افزایش راندمان زهکشی صورت گرفته ولی رابطه‌ای که بتوان از آن طریق راندمان زهکشی را تعیین کرد ارائه نشده است [۱۵، ۱۶، ۲۷-۳۰]. با توجه به موارد فوق، راندمان جمع‌آوری کل از رابطه (۱۰) قابل محاسبه است [۳۰]:

$$\eta_{coll} = \eta_{AC} \times \eta_{imp} \times \eta_{dr} \quad (10)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج نظری

برای بررسی رابطه بین راندمان جمع‌آوری و تعداد لایه‌های جمع‌کننده، ابتدا از روابط نظری حاکم بر ادبیات موضوع استفاده شد. با تغییر ضریب تخلخل و سرعت جریان مه و ثابت نگه‌داشتن پارامترهای دیگر، راندمان‌های آیرودینامیکی و نهفتگی محاسبه شدند. شکل ۳ رابطه راندمان آیرودینامیکی و نهفتگی با پارامترهای موثر را نشان می‌دهد.

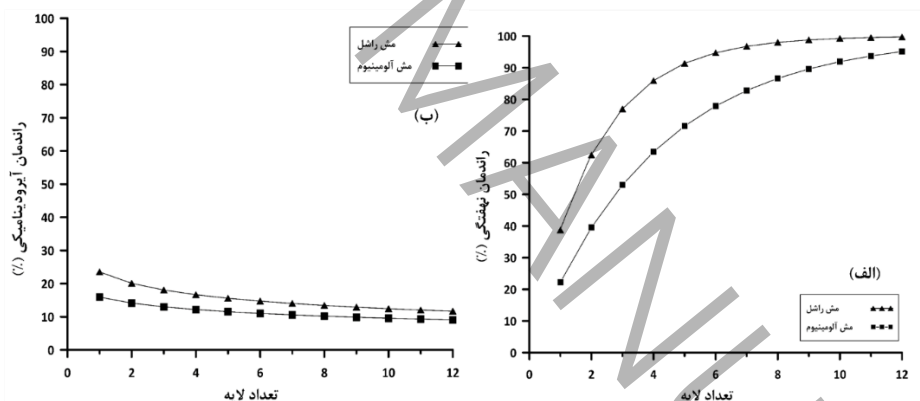


شکل ۳. رابطه راندمان نهفتگی و آیرودینامیکی با ضریب تخلخل، سرعت جریان مه و ضریب افت فشار

Figure 3. Relation of aerodynamic and impaction efficiencies with shade coefficient, fog flow speed and pressure drop coefficient

در تحقیق حاضر، راندمان زهکشی ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد، زیرا آزمایش در محیط کنترل شده انجام گرفت و عملاً هیچگونه تلفاتی در مراحل جمع‌آوری مه وجود نداشت. راندمان نهفتگی جمع‌کننده، تابعی از عدد استوکس است که خود این پارامتر نیز تابعی از قطر قطرات مه، قطر عنصر جمع‌کننده و سرعت باد می‌باشد (روابط ۷ و ۸). قطر قطرات مه و سرعت باد رابطه‌ای مستقیم با عدد استوکس ولی قطر عنصر جمع‌کننده رابطه معکوسی با آن دارد. با افزایش سرعت باد، راندمان نهفتگی به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. البته، افزایش راندمان نهفتگی در سرعت‌های بیش از حدود ۳/۵ متر بر ثانیه قابل‌ملاحظه نیست (شکل ۳-ج). از دیگر پارامترهای موثر در راندمان نهفتگی، ضریب تخلخل جمع‌کننده‌ها است. با افزایش ضریب تخلخل و به تبع آن افزایش سطح برخورد، راندمان نهفتگی به صورت خطی افزایش می‌یابد (شکل ۳-الف). این موضوع در مورد راندمان آیرودینامیکی صادق نیست. رابطه این راندمان با ضریب تخلخل، ابتدا افزایشی ولی با عبور از ضریب تخلخل حدود ۰/۶، راندمان آیرودینامیکی کاهش می‌یابد (شکل ۳-ب). با افزایش ضریب تخلخل به بیش از حدود ۶۰ درصد، ضریب افت فشار افزایش قابل‌توجهی پیدا کرده (شکل ۳-د) و لذا با توجه به رابطه عکس ضریب افت فشار با راندمان آیرودینامیکی، مقدار این راندمان تنزل می‌یابد. در ضریب تخلخل نزدیک به ۱۰۰ درصد، راندمان نهفتگی بیشترین مقدار را دارد و این در حالی است که با همین مقدار ضریب تخلخل، راندمان آیرودینامیکی تقریباً برابر با صفر است. به عبارت دیگر در ضریب تخلخل زیاد، قطرات موجود در جریان هوا به جای برخورد به صفحه جمع‌کننده، به اطراف منحرف می‌شوند. بطور کلی می‌توان گفت که یک جمع‌کننده ایده‌آل حاصل تعامل بین راندمان آیرودینامیکی و راندمان نهفتگی است. جمع‌کننده با ضریب تخلخل بهینه می‌تواند باعث افزایش راندمان آیرودینامیکی و در نتیجه افزایش راندمان کل شود. با توجه به مباحث فوق، می‌توان گفت که جمع‌کننده با ضریب تخلخل حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد، شرایط بهینه‌ای را فراهم کرده و می‌تواند راندمان آیرودینامیکی حدود ۲۶ درصد را تحقق بخشد.

با افزودن تعداد لایه‌های جمع‌کننده، سطح برخورد قطرات افزایش می‌یابد. در واقع به کسری از قطرات که نتوانسته بودند در لایه اول به صفحه جمع‌کننده برخورد کنند، این فرصت داده می‌شود تا توسط لایه‌های بعدی جمع‌آوری شوند. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، راندمان آیرودینامیکی با جذر ضریب افت فشار رابطه‌ای عکس دارد. زمانی که لایه‌های جمع‌کننده به صورت موازی در کنار یکدیگر قرار بگیرند، ضریب افت فشار کل برابر با مجموع ضرایب افت فشار لایه‌ها خواهد بود. بنابراین با اضافه کردن لایه‌ها، ضریب افت فشار افزایش یافته و لذا راندمان آیرودینامیکی کاهش می‌یابد. شکل ۴-ب کاهش راندمان آیرودینامیکی به ازای افزایش تعداد لایه‌ها در دو مش راشل و آلومینیوم را نشان می‌دهد. راندمان آیرودینامیکی نظری برای مش راشل و آلومینیوم (طبق مشخصات جدول ۱) به ترتیب از ۲۴ و ۱۶ درصد در حالت ۱ لایه به ۱۲ و ۹ درصد در حالت ۱۲ لایه کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش لایه‌ها، جمع‌کننده‌ها به صفحاتی تقریباً غیرقابل نفوذ تبدیل شده و باعث انحراف جریان می‌شوند. در مورد راندمان نهفتگی این موضوع صادق نیست. با افزایش لایه‌ها در مش‌های راشل و آلومینیوم، راندمان نهفتگی نظری به ترتیب از ۳۹ و ۲۲ درصد در حالت یک لایه به ۱۰۰ و ۹۵ درصد در حالت ۱۲ لایه افزایش می‌یابد (شکل ۴-الف). در واقع افزایش تعداد لایه‌ها باعث افزایش سطح برخورد شده و در نتیجه راندمان نهفتگی افزایش می‌یابد. البته باید به این نکته توجه کرد که اگر چه با افزایش لایه‌ها به ۱۲ عدد، راندمان آیرودینامیکی مش‌های راشل و آلومینیوم به ترتیب ۱۲ و ۷ درصد کاهش می‌یابد، ولی راندمان نهفتگی این دو مش به ترتیب ۶۱ و ۷۳ درصد افزایش می‌یابد. از آنجایی که افزایش راندمان نهفتگی بسیار بیشتر از کاهش راندمان آیرودینامیکی است و با توجه به اینکه افزایش راندمان آیرودینامیکی در عمل به سهولت قابل انجام نیست، پس می‌توان با افزایش تعداد لایه‌ها جهت رسیدن به راندمان نهفتگی بالا، از کاهش اندک راندمان آیرودینامیکی صرف‌نظر کرد.

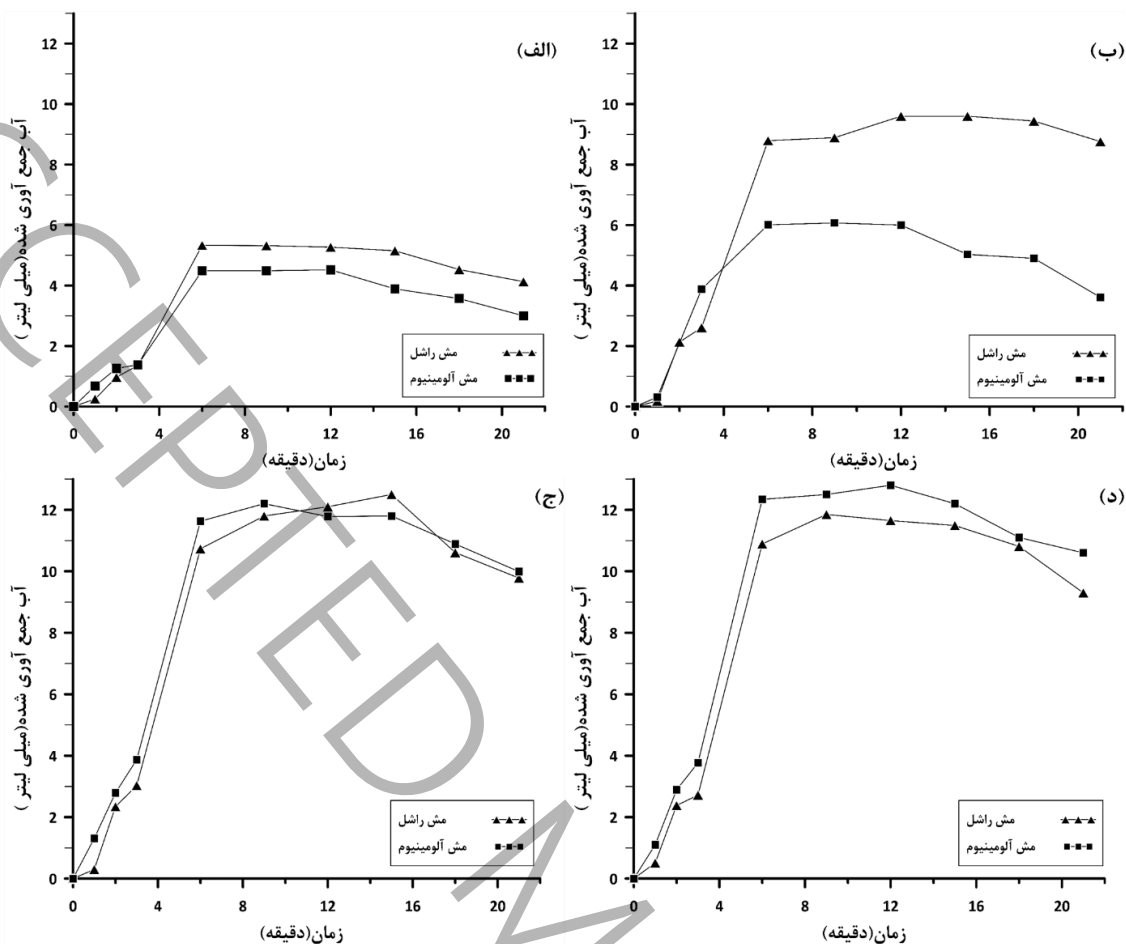


شکل ۴. تغییرات راندمان نهفتگی (الف) و آیرودینامیکی (ب) نظری با تعداد لایه در مش راشل و آلومینیوم

Figure 4. Variations of impaction (a) and (b) aerodynamic efficiencies with the number layers in Raschel and Aluminum meshes

۳-۲- نتایج آزمایش تجربی

سرعت مناسب جریان مه با توجه به نتایج حاصل از روابط نظری، ۳/۵ متر بر ثانیه به دست آمد که ملاک سرعت مه خروجی از دستگاه رطوبت‌ساز در آزمایش تجربی قرار گرفت. بدین ترتیب، پس از استقرار سیستم تولید مه، جرم مه خروجی و جرم آب جمع‌آوری شده در زمان‌های مختلف، اندازه‌گیری و سپس راندمان هر یک از جمع‌کننده‌ها تعیین گردید. شکل ۵ مقادیر آب جمع‌آوری شده از مش‌های راشل و آلومینیوم با تعداد ۱، ۲، ۵ و ۷ لایه را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۵. میانگین مقدار آب جمع شده در مش‌های راشل و آلومینیوم با ۱ (الف)، ۲ (ب)، ۵ (ج) و ۷ لایه (د)

Figure 5. The average water collected in Raschel and Aluminum meshes with 1 (a), 2 (b), 5 (c) and 7 layers (d).

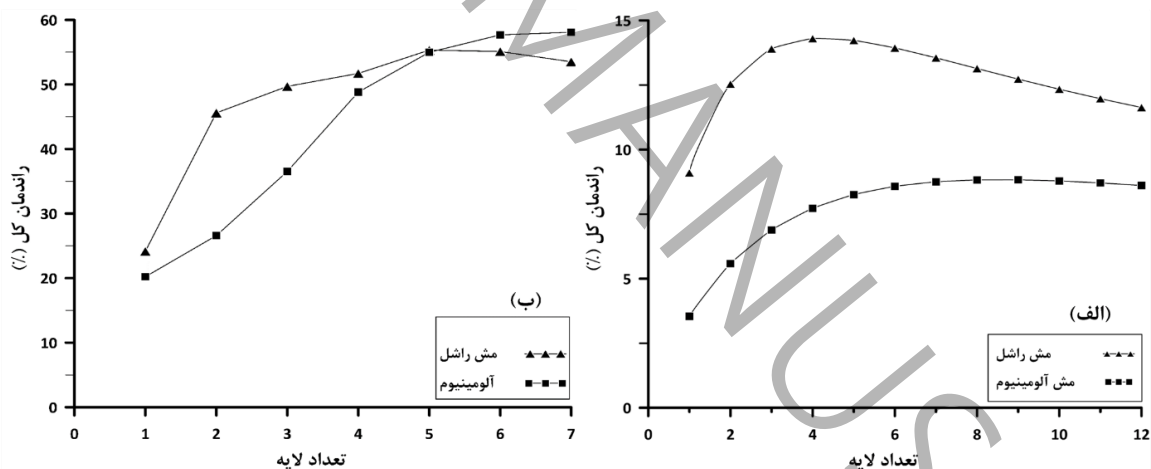
در حالت یک لایه، مش راشل حدود ۴ درصد آب بیشتری نسبت به مش آلومینیوم جمع‌آوری کرده است. با توجه به ضریب تخلخل مش راشل و آلومینیوم، بالا بودن راندمان جمع‌آوری مش راشل نسبت به مش آلومینیوم در حالت یک لایه را می‌توان به دلیل بالا بودن راندمان آیرودینامیکی و نهفتگی مش راشل دانست. در حالت دو لایه نیز راندمان مش راشل از مش آلومینیوم بیشتر بوده است. با این تفاوت که در حالت دو لایه، اختلاف راندمان دو جمع‌کننده حدود ۱۹ درصد به دست آمد. این اختلاف بالای راندمان نسبت به حالت یک لایه به این دلیل است که در زمان نصب جمع‌کننده، لایه‌های مش آلومینیوم در یک حالت برهم‌نهی^۱ قرار گرفتند. به بیان دیگر، عناصر مش آلومینیوم لایه دوم دقیقاً پشت عناصر لایه اول قرار گرفتند. اما در مش راشل این موضوع صادق نبود و در واقع با افزودن لایه‌های مش راشل، شکل‌گیری نامنظمی ایجاد شد. بنابراین، با اضافه نمودن تعداد لایه‌ها، سطح برخورد قطرات در مش راشل با شیب تندتری نسبت به مش آلومینیوم افزایش یافت و لذا راندمان نهفتگی مش راشل افزایش بیشتری نسبت به مش آلومینیوم پیدا کرد. همان‌طور که در شکل ۵-ج مشخص است، راندمان جمع‌آوری هر دو جمع‌کننده در حالت ۵ لایه تقریباً با هم برابر است. هر چند که با افزودن تعداد لایه‌ها راندمان جمع‌آوری مش راشل افزایش یافت ولی از ۵ لایه به بعد، این روند حالت کاهشی به خود گرفت. در حالیکه در مش آلومینیوم با افزودن تعداد لایه‌های جمع‌کننده راندمان جمع‌آوری همچنان روند افزایشی داشت (شکل ۵-ج). در واقع تعداد ۵ لایه، نقطه شروع روند کاهشی مش راشل بوده است. همان‌طوری‌که در شکل ۵-د مشاهده می‌شود، در حالت ۷ لایه، راندمان جمع‌آوری مش آلومینیوم حدود ۵ درصد بیشتر از مش راشل است. علت کاهش راندمان مش راشل در تعداد لایه‌های ۵ و ۷ را می‌توان در کاهش راندمان آیرودینامیکی آن جمع‌کننده جستجو کرد. مش راشل به دلیل ضریب تخلخل بیشتر و همچنین قرارگیری نامنظم لایه‌ها پشت یکدیگر، نسبت به مش

¹ Superposition

آلومینیوم در تعداد لایه‌های کمتری به یک صفحه تقریباً نفوذناپذیر تبدیل شده و بنابراین با انحراف جریان مه، راندمان آیرودینامیکی و در نتیجه راندمان کل را کاهش می‌دهد.

نکته دیگری که از شکل ۵ استنباط می‌شود کاهش مقدار آب جمع شده با زمان در هر دو جمع کننده و برای همه حالت‌ها (۲، ۵ و ۷ لایه) است. البته کاهش راندمان در مش راشل و آلومینیوم با تعداد لایه‌های مختلف یکسان نیست. به طور کلی، میانگین مقدار کاهش آب جمع آوری شده بعد از نقطه بیشینه برای مش‌های راشل و آلومینیوم به ترتیب برابر $1/9$ و $2/2$ میلی لیتر بوده است. کمترین مقدار کاهش آب جمع آوری در مش‌های راشل و آلومینیوم به ترتیب $0/8$ و $1/5$ میلی لیتر در ۶ و ۷ لایه، و بیشترین مقدار کاهش نیز در هر دو جمع کننده برابر با $2/7$ میلی لیتر به دست آمد. همان طور که قبلاً نیز بیان شد، با تجمع و پیوستن قطرات کوچک به یکدیگر، قطرات بزرگ تر به وجود می‌آیند و زمانی که این قطرات به حجم بحرانی می‌رسند بین منافذ خالی مش به صورت معلق باقی مانده و سپس به داخل نودان سقوط می‌کنند. در واقع زمانی که بخشی از منافذ به دلیل تجمع قطرات بزرگ مسدود می‌شود، مش جمع کننده به یک صفحه تقریباً نفوذناپذیر تبدیل شده و باعث کاهش راندمان آیرودینامیکی و انحراف جریان مه می‌شود. به علاوه زمانی که قطرات تخلیه نشده‌اند، سطح جدیدی برای برخورد قطرات مه فراهم نمی‌شود. این عوامل می‌تواند از دلایل کاهش مقدار آب جمع آوری شده در جمع کننده‌ها باشد. البته ممکن است شکل، اندازه و جنس جمع کننده‌ها نیز در تخلیه موثر قطرات استحصال یافته موثر باشند.

شکل ۶ تغییرات راندمان کل مش راشل و آلومینیوم را با توجه به روابط نظری و داده‌های تجربی نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود مقادیر نظری جمع آوری آب اختلاف زیادی با نتایج تجربی دارند. در واقع روش‌های نظری، بسیاری از عوامل موثر بر راندمان جمع آوری در شرایط واقعی را در نظر نمی‌گیرند. این موضوع در مطالعات انجام شده توسط دی دبوس ریورا [۱۱] نیز گزارش شده است. می‌توان گفت که مدل‌های نظری راهنمای خوبی برای انتخاب تعداد بهینه لایه در طراحی جمع کننده‌ها محسوب می‌شوند ولی به دلیل پیچیدگی حاکم بر فرآیند طراحی جمع کننده‌ها، بهتر است با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی، مدل‌ها را اصلاح و دقت برآورد راندمان را افزایش داد.



شکل ۶. تغییرات راندمان نظری (الف) و تجربی (ب) با تعداد لایه در مش راشل و آلومینیومی

Figure 6. Variations of theoretical (a) and experimental (b) efficiencies with the number of layers in Raschel and Aluminum meshes

۳-۳- تعداد بهینه لایه جمع کننده مه

همان طور که از نتایج روش‌های تئوری استنباط می‌شود بیشترین راندمان مش راشل در حالت ۴ لایه با مقدار $14/3$ درصد و بیشترین راندمان مش آلومینیوم در حالت ۷ لایه با مقدار $8/8$ درصد قابل حصول است. بر اساس نتایج آزمایش تجربی نیز، بیشترین راندمان جمع آوری آب مش راشل در حالت ۵ لایه برابر با $55/3$ درصد و برای مش آلومینیوم در حالت ۶ لایه با راندمان $58/1$ درصد به دست آمد. لذا نتایج آزمایش تجربی ضمن تایید تقریبی نتایج حاصل از روش‌های تئوری، می‌تواند به عنوان معیاری مناسب در طراحی بهینه جمع کننده‌ها در نظر گرفته شود.

در مطالعات امکان‌سنجی انجام طرح‌های استحصال آب از مه که قبل از شروع اجرای هر پروژه‌ای انجام می‌شود علاوه بر مسائل فنی، ملاحظات اقتصادی نیز مد نظر قرار می‌گیرد. یک طرح تحقیقاتی بدون داشتن توجیه اقتصادی، امکان شکست پروژه را افزایش می‌دهد. به همین دلیل لازم است تعداد بهینه لایه‌ها از دیدگاه اقتصادی نیز بررسی شود. در این پژوهش به منظور تعیین تعداد بهینه لایه از دیدگاه اقتصادی، هزینه اجرای یک سیستم استحصال آب از مه در مقیاس بزرگ برآورد شد (جدول ۲). هزینه اجرای یک سیستم جمع‌کننده مه شامل هزینه سازه اصلی و هزینه لایه‌هایی است که بر روی آن نصب می‌شوند. مقدار آب قابل استحصال نیز با توجه به راندمان کل به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی در ازای واحد حجم جریان مه عبوری (مترمکعب) محاسبه شد. در نهایت، برای انتخاب تعداد بهینه لایه با رویکرد اقتصادی، هزینه واحد آب استحصال‌یافته محاسبه گردید. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود از دیدگاه اقتصادی، تعداد بهینه لایه در مش راشل و آلومینیوم به ترتیب ۲ و ۴ لایه می‌باشد و هزینه واحد آب استحصال شده آن‌ها نیز به ترتیب ۱۴۱/۲۵ و ۳۷۷/۷۶ هزار ریال در لیتر بوده است.

جدول ۲. هزینه واحد آب استحصال‌شده در جمع‌کننده‌های راشل و آلومینیوم با تعداد لایه‌های مختلف

Table 2. Unit cost of extracted water in Raschel and Aluminum collectors with different number of layers

نوع جمع‌کننده	تعداد لایه	راندمان (درصد)	هزینه سیستم استحصال آب (میلیون ریال)	مقدار آب قابل استحصال در واحد جریان مه عبوری (لیتر در مترمکعب)	هزینه واحد آب استحصال‌شده (هزار ریال در لیتر)
راشل	۱	۲۴/۰±۱/۸	۵۷/۲	۲۴۱/۴۸	۲۳۶/۸۷
	۲	۴۵/۲±۶	۶۴/۴	۴۵۵/۹۳	۱۴۱/۲۵
	۳	۴۹/۱±۷/۲	۷۱/۶	۴۹۶/۹۹	۱۴۴/۰۷
	۴	۵۱/۱±۷/۲	۷۸/۸	۵۱۷/۰۷	۱۵۲/۴۰
	۵	۵۵/۳±۳/۶	۸۶/۰	۵۵۳/۲۱	۱۵۵/۴۶
	۶	۵۵/۱±۱/۶	۹۳/۲	۵۵۱/۰۱	۱۶۹/۱۴
	۷	۵۳/۱±۵/۵	۱۰۰/۴	۵۳۵/۱۳	۱۸۷/۶۲
آلومینیوم	۱	۲۰/۱±۲/۳	۸۳/۶	۲۰۲/۰۷	۴۱۳/۷۲
	۲	۲۶/۳±۶/۷	۱۱۷/۲	۲۶۵/۸۵	۴۴۰/۸۵
	۳	۳۶/۲±۵	۱۵۰/۸	۳۶۵/۲۳	۴۱۲/۸۹
	۴	۴۸/۲±۸/۲	۱۸۴/۴	۴۸۸/۱۴	۳۷۷/۷۶
	۵	۳±۵۵/۵	۲۱۸/۰	۵۴۹/۸۲	۳۹۶/۴۹
	۶	۵۷/۱±۷/۷	۲۵۱/۶	۵۷۶/۷۵	۴۳۶/۲۴
	۷	۵۸/۱±۱/۸	۲۸۵/۲	۵۸۰/۹۵	۴۹۰/۹۲

۳-۴- عدم قطعیت‌های حاکم بر استحصال آب از مه

مقدار آب استخراج‌شده از مه با عدم قطعیت‌هایی همراه است که نتایج تحقیق را تحت تاثیر قرار می‌دهند. مقدار آب جمع‌شده در شرایط میدانی، تحت تاثیر پارامترهای هواشناسی و نوع سیستم برداشت مه متفاوت است. با توجه به اینکه پارامترهای هواشناسی قابل کنترل نیستند، برای سنجش مقدار آب استحصال‌ی لازم است آن پارامترها با دقت بیشتری اندازه‌گیری شوند. از بین پارامترهای مختلف، سرعت و جهت باد از عوامل مهم اقلیمی در جمع‌آوری آب محسوب می‌شوند که بر مقدار آب استحصال‌ی موثر هستند. در صورتی که سرعت باد به اندازه کافی نباشد، راندمان جمع‌آوری کاهش خواهد یافت. هرچند که طراحی و ساخت جمع‌کننده‌های از نوع بزرگ، آسان‌تر و کم‌هزینه‌تر از جمع‌کننده‌های چندوجهی است، ولی برای به حداکثر رسیدن کارایی استحصال آب، این نوع جمع‌کننده‌ها باید در راستای عمود بر جهت باد نصب شوند. علاوه بر آن، ثبات نسبی جهت وزش باد در افزایش راندمان استحصال آب داری اهمیت است و تخطی از آن، عدم قطعیت‌هایی را وارد نتایج خواهد کرد. در شرایط آزمایشگاهی نیز عوامل متعددی بر ایجاد عدم قطعیت موثر هستند. در ستون سوم جدول ۲ مقادیر عدم قطعیت اندازه‌گیری در شرایط آزمایشگاهی ارائه شده است.

۴- نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های ارتقاء راندمان استحصال آب در جمع‌کننده‌های مختلف، افزایش تعداد لایه جمع‌کننده است که مطالعات تجربی و نظری جامعی در این خصوص انجام نشده است. به همین منظور، در این تحقیق با استفاده از روش‌های نظری موجود در ادبیات استحصال مه و همچنین اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، تعداد بهینه لایه جمع‌کننده‌های مش راشل و آلومینیوم با ضریب تخلخل‌های به ترتیب ۳۵ و ۲۳ درصد تعیین شد. با توجه به روابط نظری حاکم بر موضوع، با افزایش ضریب تخلخل جمع‌کننده، راندمان نهفتگی به صورت خطی افزایش می‌یابد ولی راندمان آیرودینامیکی ابتدا روند افزایشی و سپس کاهش دارد، به طوری که در ضریب تخلخل حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد بیشترین راندمان آیرودینامیکی حاصل شد. همچنین، با افزایش تعداد لایه‌های مش راشل و آلومینیوم از ۱ به ۱۲ لایه، راندمان آیرودینامیکی به ترتیب ۱۲ و ۷ درصد کاهش و راندمان نهفتگی آن‌ها به ترتیب ۶۱ و ۷۳ درصد افزایش یافت که نشان می‌دهد افزایش راندمان نهفتگی بسیار بیشتر از کاهش راندمان آیرودینامیکی بوده است.

نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نیز نشان داد که در مش راشل، با افزایش تعداد لایه‌ها تا ۵ لایه، راندمان کل افزایش یافته (به دلیل افزایش سطح برخورد قطرات) و فراتر از آن، نه تنها راندمان افزایش نمی‌یابد بلکه با کاهش نفوذپذیری جریان هوا، جریان مه منحرف شده و راندمان کل کاهش می‌یابد. راندمان جمع‌آوری مش آلومینیوم نیز تا ۶ لایه صعودی بوده و بیش از آن، مقدار ثابتی دارد. نتایج به دست آمده از این تحقیق با نتایج پژوهش موسوی‌بایگی [۱۹] که در آن افزایش راندمان استحصال آب هم‌سو با افزایش تعداد لایه گزارش شده، متفاوت بوده ولی منطبق با نتایج تحقیق نظری ارائه شده توسط رگالادو و ریتر [۱۳] بوده است. در ادامه به منظور تحلیل اقتصادی، تهیه و راه‌اندازی جمع‌کننده‌ها، هزینه اجرایی آن‌ها با تعداد لایه‌های مختلف برآورد شد. نتایج بررسی نشان داد که از نظر اقتصادی، مناسب‌ترین تعداد لایه مش راشل و آلومینیوم به ترتیب برابر با ۲ و ۴ لایه است. در حالی که بدون توجه به مسائل اقتصادی، تعداد بهینه لایه در جمع‌کننده‌های راشل و آلومینیوم به ترتیب ۵ و ۶ لایه به دست آمد. لازم به ذکر است که نتایج بدست آمده فقط برای این دو نوع مش و با خصوصیات ذکر شده در جدول ۱ معتبر است و برای جمع‌کننده‌های با مشخصات دیگر، لازم است تحقیقات مشابهی انجام و نتایج آن‌ها مقایسه شوند.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A سطح مقطع جمع‌کننده، m^2

d قطر عناصر جمع‌کننده، m

Dd قطر قطره مه، m

LWC محتوای آب مایع، gr/m^3

Q آب جمع شده، lit/hr

u سرعت باد، m/s

SC ضریب تخلخل صفحه جمع‌کننده

Co ضریب افت فشار

CD ضریب دراگ

Re عدد رینولدز

Stk عدد استوکس

علائم یونانی

η_{AC} راندمان آیرودینامیکی

η_{dr} راندمان زهکشی

η_{imp} راندمان نهفتگی

η_{coll} راندمان کل

k_{Re} ضریب اصلاحی

ρ_d چگالی آب، kg / m^3

v ویسکوزیته دینامیکی هوا، $\text{N.S} / \text{m}^2$

۶- منابع و مراجع

- [1] S.A. Abdul-Wahab, H. Al-Hinai, K.A. Al-Najar, M.S. Al-Kalbani, Feasibility of fog water collection: a case study from Oman, *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 56(4) (2007) 275-280.
- [2] R.S. Schemenauer, P. Cereceda, A proposed standard fog collector for use in high-elevation regions, *Journal of applied Meteorology and Climatology*, 33(11) (1994) 1313-1322.
- [3] D. Carvajal, M. Mora-Carreño, C. Sandoval, S. Espinoza, Assessing fog water collection in the coastal mountain range of Antofagasta, Chile, *Journal of Arid Environments*, 198 (2022) 104679.
- [4] S. Montecinos, P. Cereceda, D. Rivera, Fog collection and its relationship with local meteorological variables in a semiarid zone in Chile, *Atmósfera*, 31(2) (2018) 143-153.
- [5] O. Klemm, R.S. Schemenauer, A. Lummerich, P. Cereceda, V. Marzol, D. Corell, J. Van Heerden, D. Reinhard, T. Gherezghier, J. Olivier, Fog as a fresh-water resource: overview and perspectives, *Ambio*, 41 (2012) 221-234.
- [6] A. Ritter, C. Regalado, G. Aschan, 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) (2008) 920-935.
- [7] M. Fessehaye, S.A. Abdul-Wahab, M.J. Savage, T. Kohler, S. Tesfay, The potential for scaling up a fog collection system on the eastern escarpment of Eritrea, *Mountain Research and Development*, 35(4) (2015) 365-373.
- [8] R.S. Schemenauer, P.I. Joe, The collection efficiency of a massive fog collector, *Atmospheric Research*, 24(1-4) (1989) 53-69.
- [9] M.J. Estrela, J.A. Valiente, D. Corell, D. Fuentes, A. Valdecantos, Prospective use of collected fog water in the restoration of degraded burned areas under dry Mediterranean conditions, *Agricultural and forest meteorology*, 149(11) (2009) 1896-1906.
- [10] D.C. Villacrés, J.L. Carrera Villacrés, T. Braun, Z. Zhao, J. Gómez, J.Q. Carabalí, Fog harvesting and IoT based environment monitoring system at the Ilalo volcano in Ecuador, *International journal on advanced science, engineering and information technology*, 10(1) (2020) 407-412.
- [11] J. de Dios Rivera, Aerodynamic collection efficiency of fog water collectors, *Atmospheric Research*, 102(3) (2011) 335-342.
- [12] A. Moncuquet, A. Mitranescu, O.C. Marchand, S. Ramanarivo, C. Duprat, Collecting fog with vertical fibres: combined laboratory and in-situ study, *Atmospheric Research*, 277 (2022) 106312.
- [13] C.M. Regalado, A. Ritter, The design of an optimal fog water collector: A theoretical analysis, *Atmospheric Research*, 178 (2016) 45-54.
- [14] S. Vogel, U. Müller-Doblies, Desert geophytes under dew and fog: The “curly-whirlies” of Namaqualand (South Africa), *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 206(1) (2011) 3-31.
- [15] M. Azad, D. Ellerbrok, W. Barthlott, K. Koch, Fog collecting biomimetic surfaces: Influence of microstructure and wettability, *Bioinspiration & biomimetics*, 10(1) (2015) 016004.
- [16] K.-C. Park, S.S. Chhatre, S. Srinivasan, R.E. Cohen, G.H. McKinley, Optimal design of permeable fiber network structures for fog harvesting, *Langmuir*, 29(43) (2013) 13269-13277.
- [17] A.T. Paxson, J.L. Yagüe, K.K. Gleason, K.K. Varanasi, Stable dropwise condensation for enhancing heat transfer via the initiated chemical vapor deposition (iCVD) of grafted polymer films, *Adv. Mater*, 26(3) (2014) 418-423.
- [18] D. Torresin, M.K. Tiwari, D. Del Col, D. Poulikakos, Flow condensation on copper-based nanotextured superhydrophobic surfaces, *Langmuir*, 29(2) (2013) 840-848.
- [19] M. Mousavi Baygi, The implementation of fog water collection systems in Northeast of Iran, *International Journal of Pure and Applied Physics*, 4 (2008).
- [20] J. Goodman, The collection of fog drip, *Water Resources Research*, 21(3) (1985) 392-394.
- [21] H. Glauert, D. Hirst, A. Hartshorn, Induced flow through a partially choked pipe, His Majesty's Stationery Office, Great Britain, (1932).
- [22] I.E. Idel'Cik, Memento des pertes de charge, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, (1969).
- [23] J.-K. Koo, D.F. James, Fluid flow around and through a screen, *Journal of Fluid Mechanics*, 60(3) (1973) 513-538.
- [24] W. Shi, M.J. Anderson, J.B. Tulkoff, B.S. Kennedy, J.B. Boreyko, Fog harvesting with harps, *ACS applied materials & interfaces*, 10(14) (2018) 11979-11986.

- [25] I. Langmuir, K. Blodgett, A mathematical investigation of water droplet trajectories, Army Air Forces Headquarters, Air Technical Service Command, United States,(1946).
- [26] B. Demoz, J. Collett Jr, B. Daube Jr, On the Caltech active strand cloudwater collectors, Atmospheric Research, 41(1) (1996) 47-62.
- [27] D. Gurera, B. Bhushan, Optimization of bioinspired conical surfaces for water collection from fog, Journal of colloid and interface science, 551 (2019) 26-38.
- [28] J. Ju, Y. Zheng, L. Jiang, Bioinspired one-dimensional materials for directional liquid transport, Accounts of chemical research, 47(8) (2014) 2342-2352.
- [29] A. Lee, M.-W. Moon, H. Lim, W.-D. Kim, H.-Y. Kim, Water harvest via dewing, Langmuir, 28(27) (2012) 10183-10191.
- [30] M. Rajaram, X. Heng, M. Oza, C. Luo, Enhancement of fog-collection efficiency of a Raschel mesh using surface coatings and local geometric changes, Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects, 508 (2016) 218-229.

Determining the optimal number of collector layers in fog water harvesting system

Amin Kanooni^{1*}, Mohammad Reza Kohan²

^{1,2} Department of Water Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Abstract

Enhancing fog collector efficiency can be achieved by increasing the number of layers in various collectors. This study scrutinized the influence of layers on efficiency for conventional collectors (Raschel and Aluminum mesh) through a meticulous analysis of theoretical relationships and the execution of experimental tests. In the laboratory phase, following the installation of the system, the output flow from the humidifier was directed towards the collecting plate. Subsequently, the efficiency of collectors with 1, 2, 5, and 7 layers was assessed and compared based on the amount of collected water post-fog extraction. The results of the investigation into the theoretical relations governing water extraction from fog revealed a significant trend. As the shade coefficient of the collector increases, aerodynamic efficiency demonstrates an initial increase, peaking at 50-60%, followed by a subsequent decrease. Furthermore, the efficiency of Raschel and Aluminum mesh is intricately linked to the number of layers, with the highest theoretical efficiency observed at 4 and 7 layers, respectively. Experimental findings indicated the highest water collection efficiency for Raschel mesh with 5 layers at 55.3% and for Aluminum mesh with 6 layers at 58.1%. In terms of cost-effectiveness, the optimal number of layers for Raschel and Aluminum mesh is determined to be 2 and 4 layers, respectively.

Keywords: Aluminum mesh, Collector, efficiency, Number of layers, Raschel mesh

¹ Corresponding Author, Email: amin.kanooni@uma.ac.ir