



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

امین کانونی<sup>\*</sup>، محمدرضا کهن

گروه مهندسی آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۱  
بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۰  
پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۱/۱۰

### کلمات کلیدی:

جمع کننده  
راندمان  
لایه  
مش آلومینیوم  
مش راشل

**خلاصه:** یکی از روش‌های ارتقاء راندمان استحصال آب در جمع کننده‌های مه، افزایش تعداد لایه در انواع جمع کننده‌ها است. در پژوهش حاضر با تحلیل روابط نظری موجود و انجام آزمایش تجربی، اثر تعداد لایه بر راندمان جمع کننده‌های مرسوم (راشل و آلومینیوم) بررسی شد. در بخش آزمایشگاهی بعد از راه‌اندازی سیستم تولید و استحصال مه، جریان خروجی از دستگاه رطوبت‌ساز به صفحه جمع کننده برخورد و پس از استحصال مه و اندازه‌گیری مقادیر آب جمع شده، راندمان جمع کننده‌های 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 جمع کننده، 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 ۳۳ 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.

### ۱- مقدمه

پروژه‌های امکان‌سنجی در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. این جمع کننده از یک صفحه توری دولایه از جنس پلی‌پروپیلن با ضریب تخلخل ۳۵ درصد، به ابعاد ۱×۱ مترمربع و به ارتفاع ۲ متر از سطح زمین ساخته می‌شود. نمونه بزرگ‌تر آن (جمع کننده مه بزرگ<sup>۴</sup>) معمولاً با ابعاد ۴×۱۲ مترمربع ساخته می‌شود که در پروژه‌های عملیاتی به کار برده می‌شود. جمع کننده‌های مه از مواد و اشکال مختلفی مانند مش راشل<sup>۵</sup>، 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 جمع کننده‌های دیگر، به صورت گسترده در پروژه‌های تحقیقاتی و عملیاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱ انواع جمع کننده‌های مش راشل (الف و د)، سیم چنگ تفلونی (ب) و استوانه‌ای یوویک با توری آلومینیومی (ج) را نشان می‌دهد. راندمان جمع‌آوری آب یک جمع کننده به پارامترهای مختلفی از جمله عوامل هواشناسی و جغرافیایی، هندسه کلی جمع کننده (مسطح، استوانه‌ای،

استحصال آب از مه یکی از روش‌های قابل‌دسترس 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 به شمار می‌رود. به همین منظور از جمع کننده‌های مختلفی مانند جمع کننده مه استاندارد<sup>۱</sup>، یوویک<sup>۲</sup> و سیم چنگ<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. جمع کننده مه استاندارد پرکاربردترین جمع کننده مه می‌باشد که به دلیل سادگی تهیه و بهره‌برداری، در اکثر

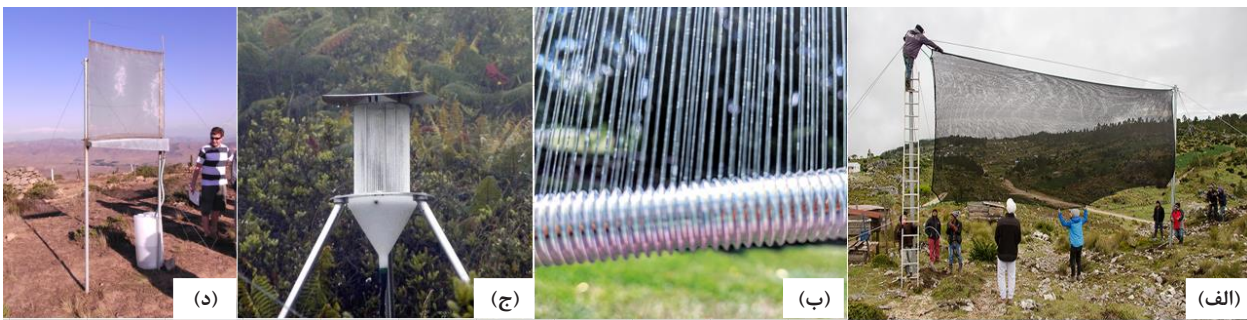
- 1 Standard Fog Collector (SFC)
- 2 Juvik
- 3 Harp-wire

- 4 Large Fog Collector (LFC)
- 5 Raschel

<sup>\*</sup> نویسنده عهده‌دار مکاتبات: amin.kanooni@uma.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.





شکل ۱. الف) جمع کننده مه بزرگ (ب) جمع کننده سیم چنگ (ج) جمع کننده استوانه‌ای یوویک (د) جمع کننده مه استاندارد

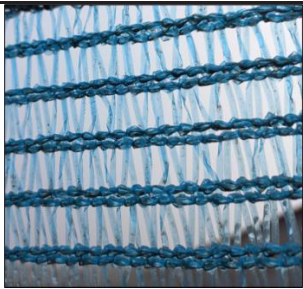

Fig. 1. a) Large Fog Collector b) Harp-Wire Collector c) Juvik Cylindrical Collector d) Standard Fog Collector

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

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، تأثیری 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، 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 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

جدول ۱. مشخصات جمع‌کننده‌ها به همراه ضریب تخلخل آن‌ها

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

تصویر مش	ضریب تخلخل	مشخصات ساختاری مش	نوع مش
	۰/۳۵	تشکیل‌شده 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	مش راشل
	۰/۲۳	تشکیل‌شده از روبان‌های آلومینیومی به شکل لوزی با ابعاد ۴×۹ میلی‌متر و پهنا و ضخامت به ترتیب ۱/۵ و ۰/۲ میلی‌متر	مش آلومینیوم

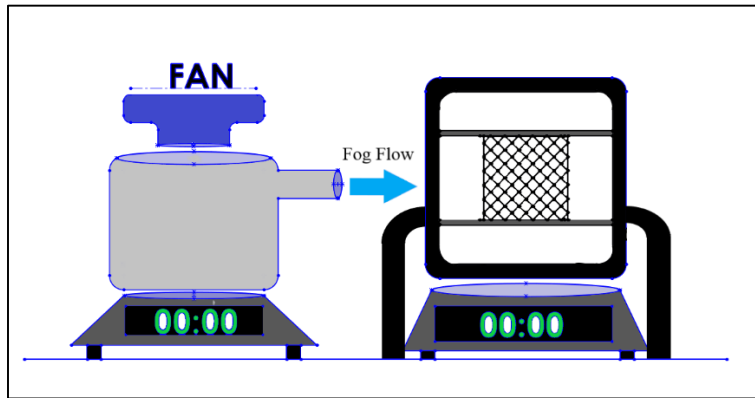
و آلومینیوم) و مقایسه آن‌ها با مقادیر حاصل از روابط نظری موجود، تعداد بهینه لایه انتخاب و با تحلیل هزینه‌های اجرایی، اقتصادی‌ترین جمع‌کننده نیز معرفی شد.

## 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 ذکرشده 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

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 دو لایه 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 ریتز [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



شکل ۲. شماتیک جمع کننده مه آزمایشگاهی

Fig. 2. Schematic of laboratory fog collector

دیجیتال 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.

به منظور تعیین ضریب تخلخل جمع‌کننده‌ها، ابتدا تصویر جمع‌کننده مورد نظر تهیه و سپس از کد کامپیوتری نوشته شده در محیط پایتون<sup>۱</sup> 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.

۲-۲- تئوری

تحت شرایط مه، مقدار نظری آب جمع‌شده توسط جمع‌کننده را می‌توان با رابطه (۱) تخمین زد [۲۰].

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

که در آن،  $Q$  آب جمع‌شده (Lit/hr)،  $LWC$  محتوای آب مایع (

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

جریان مه ممکن است به دلیل هندسه یا شکل صفحه جمع‌کننده از مسیر مستقیم منحرف‌شده و از اطراف آن عبور کند. برای تعیین کسری از

جمع‌کننده  $\eta_{coll}$  (gr / m<sup>۳</sup>)،  $A$  سطح مقطع جمع‌کننده (m<sup>۲</sup>)،  $\eta_{coll}$  راندمان جمع‌کننده (بی‌بعد)،  $u$  سرعت باد (m/s) و  $3/6$  ضریب تبدیل واحد است. یک جمع‌کننده هرگز قادر به گرفتن همه قطرات عبوری نیست. لذا برای مشخص کردن مقدار قطرات جذب‌شده توسط جمع‌کننده از راندمان جمع‌کننده ( $\eta_{coll}$ ) استفاده می‌شود. به صورت نسبت مقدار جریان آب جمع‌شده در واحد سطح صفحه جمع‌کننده ( $q$ ) به شار عبوری مه از سطح مقطع تعریف می‌شود. برای تعیین راندمان جمع‌کننده، لازم است سرعت باد،  $LWC$  و آب جمع‌آوری‌شده اندازه‌گیری شوند. بدین ترتیب راندمان کل جمع‌آوری را می‌توان با رابطه (۲) نشان داد [۱۱].

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

۱ Python

$$C_{O_r} = \sum_{i=1}^{nR} C_{O_i} \quad (۶)$$

که در آن،  $nR$  تعداد لایه‌های جمع‌کننده 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]:

$$\eta_{imp} = \begin{cases} \frac{S_{tk}^2}{(S_{tk} + 0.6)^2} & S_{tk} \geq 0.08 \\ 0 & S_{tk} < 0.08 \end{cases} \quad (۷)$$

که در آن،  $\eta_{imp}$  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.

$$S_{tk} = \frac{\rho_d D_d^2 u}{9\nu d} \quad (۸)$$

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

$$\eta_{impN} = 1 - (1 - \eta_{imp} SC)^{nR} \quad (۹)$$

نسبت مقدار آب جمع‌آوری شده به مقدار آب جذب‌شده توسط جمع‌کننده، بیان‌کننده راندمان زهکشی ( $\eta_{dr}$ ) است که تحت تاثیر عواملی چون بازگشت

جریان مه که بدون انحراف، خود را به صفحه جمع‌کننده می‌رساند از راندمان آیرودینامیکی استفاده می‌شود. راندمان آیرودینامیکی (نسبت قطرات مه رسیده به صفحه جمع‌کننده به کل جریان مه) از رابطه (۳) قابل تعیین است:

$$\eta_{AC} = \frac{SC}{1 + \sqrt{\frac{C_O}{C_D}}} \quad (۳)$$

که در آن،  $SC$  ضریب تخلخل صفحه جمع‌کننده (نسبت مساحت جامد مش به مساحت کل صفحه جمع‌کننده)،  $C_O$  ضریب افت فشار و  $C_D$  ضریب دراگ است [۱۱]. ضریب افت فشار که بیان‌کننده اختلاف فشار جریان مه در محل صفحه و بعد از آن می‌باشد، به عواملی چون ضریب تخلخل، تعداد لایه‌های جمع‌کننده و شکل صفحه جمع‌کننده بستگی دارد. روش‌های زیادی برای محاسبه  $C_O$  پیشنهاد شده است که می‌توان به مدل‌های ارائه شده توسط گلارت و همکاران [۲۱]، ایدلچیک [۲۲، ۲۳]، کو و جیمز [۲۴] و دی‌دیوس ریورا [۱۱] اشاره کرد. ایدلچیک [۲۲] کامل‌ترین مجموعه محاسبه  $C_O$  برای صفحات مشبک سیمی و ابریشمی را ارائه کرده است. با استفاده از رابطه (۴) می‌توان ضریب افت فشار را بر اساس ضریب تخلخل و ضریب اصلاحی ( $k_{Re}$ ) محاسبه کرد.

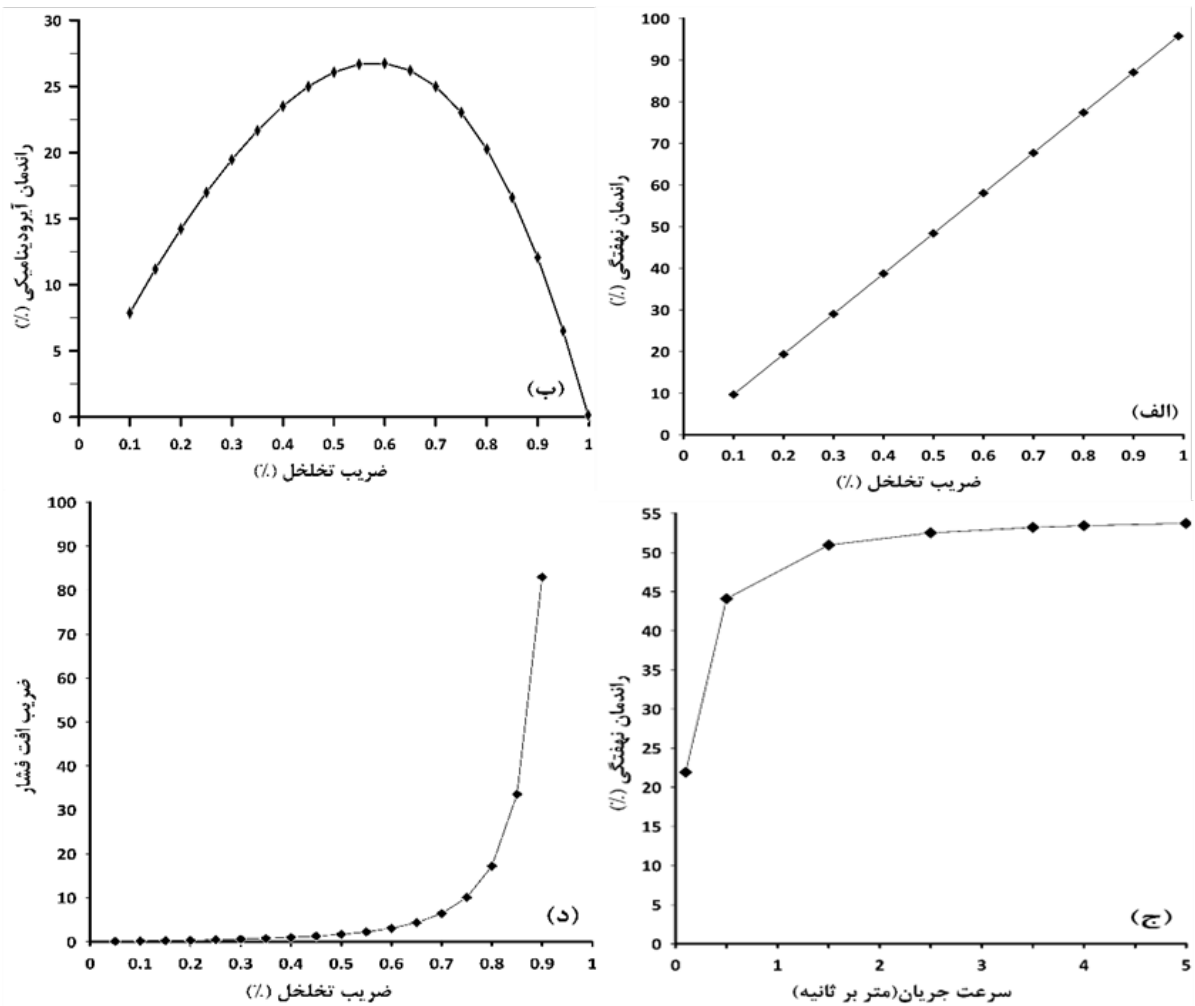
$$C_O = k_{Re} \left[ 1.3 \times SC + \left( \frac{SC}{1 - SC} \right)^2 \right] \quad (۴)$$

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

$$k_{Re} = -2.32439 \times 10^{-8} (Re)^3 + 2.12241 \times 10^{-5} (Re)^2 - 0.00652975 (Re) + 1.71227 \quad (۵)$$

که در آن،  $Re$  عدد رینولدز است.

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



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

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

ابتدا از روابط نظری حاکم بر ادبیات موضوع استفاده شد. با تغییر ضریب تخلخل و سرعت جریان مه و ثابت نگه داشتن پارامترهای دیگر، راندمان‌های آیرودینامیکی و نهفتگی محاسبه شدند. شکل ۳ رابطه راندمان آیرودینامیکی و نهفتگی با پارامترهای موثر را نشان می‌دهد.

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

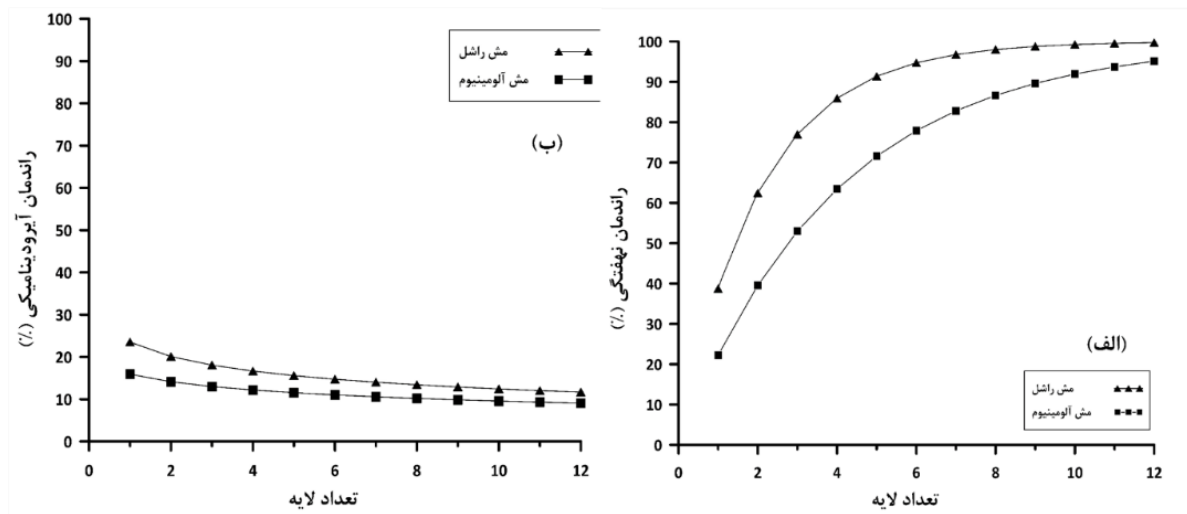
مجدد قطرات به جریان هوا و نشست آب در مسیر جریان آب به مخزن، قرار می‌گیرد. تحقیقات بسیاری برای افزایش راندمان زهکشی صورت گرفته ولی رابطه‌ای که بتوان از آن طریق راندمان زهکشی را تعیین کرد ارائه نشده است [۱۵، ۱۶، ۲۷-۳۰]. با توجه به موارد فوق، راندمان جمع‌آوری کل از رابطه (۱۰) قابل محاسبه است [۳۰].

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

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج نظری

برای بررسی رابطه بین راندمان جمع‌آوری و تعداد لایه‌های جمع‌کننده،

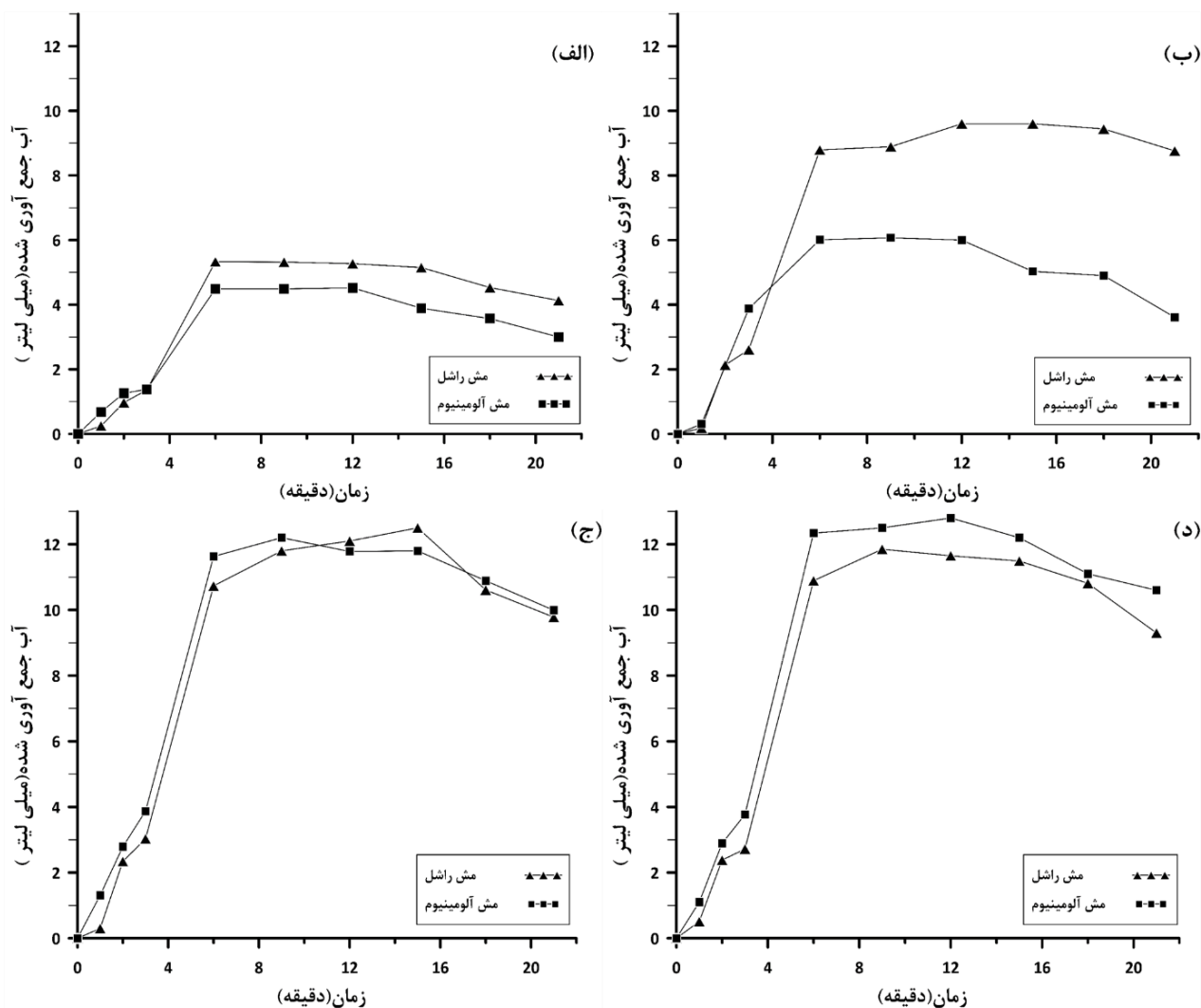


شکل ۴. تغییرات راندمان نهفتگی (الف) و آیرودینامیکی (ب) نظری با تعداد لایه در مش راشل و آلومینیوم

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

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

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 به‌جای 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



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

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

### ۳-۲- نتایج آزمایش تجربی

سرعت مناسب جریان مه با توجه به نتایج حاصل از روابط نظری،  $3/5$  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.

نهفتگی افزایش می‌یابد. البته باید به این نکته توجه کرد که اگر چه 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.



میلی لیتر بوده است. کمترین مقدار کاهش آب جمع‌آوری در مش‌های راشل و آلومینیوم به ترتیب ۰/۸ و ۱/۵ میلی‌لیتر در ۶ و ۷ لایه، و بیشترین مقدار کاهش نیز در هر دو جمع‌کننده برابر با ۲/۷ میلی‌لیتر به دست آمد. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، با تجمع و پیوستن قطرات کوچک به یکدیگر، قطرات بزرگ‌تر 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 ناودان سقوط میکنند. در واقع زمانی که بخشی از منافذ به دلیل تجمع قطرات بزرگ مسدود می‌شود، مش جمع‌کننده به یک صفحه تقریباً نفوذناپذیر تبدیل شده و باعث کاهش راندمان آبرودینامیکی و انحراف جریان می‌شود. به علاوه زمانی که قطرات تخلیه نشده‌اند، سطح جدیدی برای برخورد قطرات مه فراهم نمی‌شود. این عوامل می‌تواند از دلایل کاهش مقدار آب جمع‌آوری شده در جمع‌کننده‌ها باشد. البته ممکن است شکل، اندازه و جنس جمع‌کننده‌ها نیز در تخلیه موثر قطرات استحصال‌یافته موثر باشند.

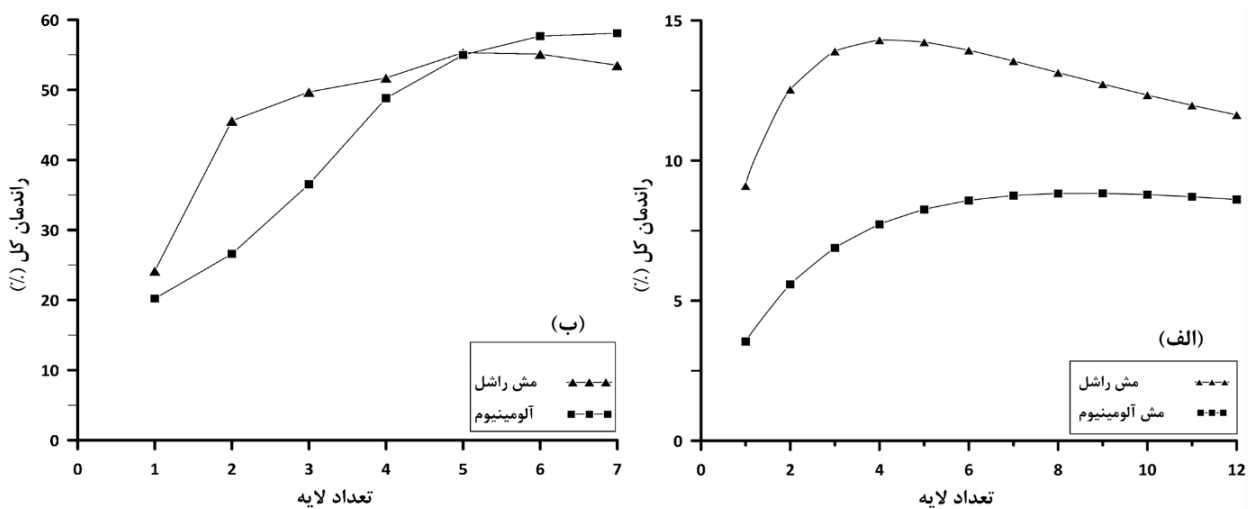
شکل ۶ تغییرات راندمان کل مش راشل و آلومینیوم را با توجه به روابط نظری و داده‌های تجربی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر راندمان نظری جمع‌آوری آب اختلاف زیادی با نتایج تجربی دارند. در واقع روش‌های نظری، بسیاری از عوامل موثر بر راندمان جمع‌آوری در شرایط واقعی را در نظر نمی‌گیرند. این موضوع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

### ۳-۳- تعداد بهینه لایه جمع‌کننده مه

همان‌طور که از نتایج روش‌های تئوری استنباط می‌شود بیشترین راندمان مش راشل در حالت ۴ لایه با مقدار ۱۴/۳ درصد و بیشترین راندمان مش آلومینیوم در حالت ۷ لایه با مقدار ۸/۸ درصد قابل‌حصول است. بر اساس 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 با راندمان ۵۸/۱ درصد به دست آمد. لذا نتایج آزمایش تجربی ضمن تایید تقریبی نتایج حاصل از روش‌های تئوری، می‌تواند به عنوان معیاری مناسب در طراحی بهینه جمع‌کننده‌ها در نظر گرفته شود. در مطالعات امکان‌سنجی انجام طرح‌های استحصال آب از مه که قبل

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، بالابودن راندمان جمع‌آوری مش راشل نسبت به مش آلومینیوم در حالت یک لایه را می‌توان به دلیل بالابودن راندمان آبرودینامیکی 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 یک‌لایه به این دلیل است که در زمان نصب جمع‌کننده، لایه‌های مش آلومینیوم در یک حالت برهم‌نهی<sup>۱</sup> 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 باهم برابر است. هرچند 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. همان طوری که 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 آبرودینامیکی آن جمع‌کننده جستجو کرد. مش راشل به دلیل ضریب تخلخل بیشتر و همچنین قرارگیری نامنظم لایه‌ها پشت یکدیگر، نسبت به مش آلومینیوم در تعداد لایه‌های کمتری به یک صفحه تقریباً نفوذناپذیر تبدیل شده و بنابراین با انحراف جریان مه، راندمان آبرودینامیکی و در نتیجه راندمان کل را کاهش می‌دهد.

نکته دیگری که از شکل ۵ استنباط می‌شود کاهش مقدار آب جمع‌شده با زمان در هر دو جمع‌کننده و برای همه حالت‌ها (۱، ۲، ۵ و ۷ لایه) است. البته کاهش راندمان در مش راشل و آلومینیوم با تعداد لایه‌های مختلف یکسان نیست. به‌طور کلی، میانگین مقدار کاهش آب جمع‌آوری شده بعد از نقطه بیشینه برای مش‌های راشل و آلومینیوم به ترتیب برابر ۱/۹ و ۲/۲



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

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

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

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 به‌دست 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.

#### 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.

جدول ۲. هزینه واحد آب استحصال شده 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 استحصال شده (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

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. درحالی‌که 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.

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 کاهش‌ی دارد، به طوری‌که 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

## ۵- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

$A$	سطح مقطع جمع کننده، $m^2$
$d$	قطر عناصر جمع کننده، $m$
$D_d$	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 جمع کننده
$C_o$	ضریب افت فشار
$C_D$	ضریب دراگ
$Re$	عدد رینولدز
$S_{tk}$	عدد استوکس

### علائم یونانی

$\eta_{AC}$	راندمان آیرودینامیکی
$\eta_{dr}$	راندمان زهکشی
$\eta_{imp}$	راندمان نهفتگی
$\eta_{coll}$	راندمان کل
$k_{Re}$	ضریب اصلاحی
$\rho_d$	چگالی آب، $kg/m^3$
$v$	ویسکوزیته دینامیکی هوا، $N.S/m^2$

## منابع

- [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. Gherezghiher, 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. Carabali, 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.
- [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.

- [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.
- [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).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Kanooni \*, M. R. Kohan, Determining the optimal number of collector layers in fog water harvesting system, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(11) (2024) 1319-1332.

DOI: [10.22060/mej.2024.22438.7618](https://doi.org/10.22060/mej.2024.22438.7618)



