



Experimental Investigation of the Effect of Mesh Hole Geometry on Fog Harvesting

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Nikbakht S.¹,
Heyhat M.M.^{1*}

How to cite this article

Nikbakht S, Heyhat M.M.
Experimental Investigation of the
Effect of Mesh Hole Geometry on Fog
Harvesting. Modares Mechanical
Engineering; 2024;24(12):699-707.

¹ Department of Mechanical
Engineering, Tarbiat Modares
University, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Mechanical
Engineering, Tarbiat Modares
University, Tehran, Iran.

mmheyhat@modares.ac.ir

Article History

Received: February 12, 2025
Accepted: December 18, 2024
ePublished: January 21, 2025

ABSTRACT

Nowadays, fresh water scarcity is one of the major concerns of the global community. To tackle the freshwater scarcity situation, several solutions have been suggested, including the extraction of water from fog-laden flow. Fog harvesting is known as a sustainable and effective approach to supplying freshwater. Various types of fog collecting elements (FCEs) have been implemented in studies to collect water from fog-laden flow. Woven meshes with square-shaped holes are among the most frequently employed FCEs in studies. One of the major drawbacks of these types of FCEs is their low water collection efficiency, particularly at low wind velocities. In this study, two alternative mesh hole geometries, triangular and hexagonal, were proposed to enhance the collection efficiency and compared with an equivalent square mesh in terms of the shading coefficient (SC). The evaluations were conducted experimentally using an experimental setup capable of mimicking atmospheric fog-laden flow at two different air velocities. The results indicate that the water harvesting rate is highly affected by mesh hole geometry. Using triangular and hexagonal meshes, compared to square mesh, can improve the water collection rate by up to 12.6% and 29%, respectively.

Keywords Fog Harvesting, Mesh Geometry, Triangular Mesh, Square Mesh, Hexagonal Mesh.

CITATION LINKS

1- Four billion people facing severe water scarcity. 2- Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. science. 3- Fog water collection: challenges beyond technology. 4- Optimal design of permeable fiber network structures for fog harvesting. 5- From capture to transport: a review of engineered surfaces for fog collection. 6- Fog collection on a superhydrophilic wire. 7- Hydrophilic nanofibers in fog collectors for increased water harvesting efficiency. 8- Fog collecting biomimetic surfaces: Influence of microstructure and wettability. 9- Enhancement of fog-collection efficiency of a Raschel mesh using surface coatings and local geometric changes. 10- Effect of mesh wettability modification on atmospheric and industrial fog harvesting. 11- Enhancement of water collection efficiency by optimizing hole size and ratio of hydrophilic-superhydrophobic area on hybrid surfaces. 12- Multifunctional integrated pattern for enhancing fog harvesting water unidirectional transport in a heterogeneous pattern. 13- Influence of metal mesh wettability on fog harvesting in industrial cooling towers. 14- Clogged water bridges for fog harvesting. 15- Fog harvesting with harps. 16- Optimizing fog harps. 17- Harps under heavy fog conditions: superior to meshes but prone to tangling. 18- Aerodynamics-assisted, efficient and scalable kirigami fog collectors. 19- Origami-like 3D Fog Water Harvestor with Hybrid Wettability for Efficient Fog Harvesting. 20- Aerodynamic collection efficiency of fog water collectors. 21- Evaluating mesh geometry and shade coefficient for fog harvesting collectors. 22- Structural design of efficient fog collectors: A review. 23- Kirigami fog nets: how strips improve water collection. 24- Onset time of fog collection.

بررسی تجربی اثر شکل هندسی حفره توری در استحصال آب از مه

سینا نیکبخت^۱، محمد مهدی هیهات^۲

^۱ دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

امروزه یکی از نگرانی‌های جامعه‌ی جهانی کمبود آب شیرین می‌باشد. برای حل بحران کمبود آب شیرین، روش‌های مختلفی از جمله استفاده از آب موجود در جریان مه‌آلود جهت دستیابی به آب شیرین پیشنهاد شده‌است. استحصال آب از مه به‌عنوان یک روش پایدار و مؤثر برای تأمین آب شیرین شناخته می‌شود. در مطالعات، از انواع مختلف المان‌ها جهت جمع‌آوری آب از جریان مه‌آلود استفاده شده‌است. یکی از پرکاربردترین المان‌های جمع‌کننده‌ی مه که در مطالعات مختلف از آن‌ها استفاده شده‌است توری‌های بافته شده با شکل هندسی حفره‌ی مربعی می‌باشند. از مهم‌ترین معایب این نوع از المان‌ها می‌توان به راندمان جمع‌آوری آب پایین آن‌ها به خصوص در سرعت‌های پایین جریان باد اشاره کرد. در این مطالعه جهت بهبود راندمان جمع‌آوری، دو شکل هندسی حفره‌ی توری، مثلثی و شش‌ضلعی، پیشنهاد و با توری مربعی معادل از لحاظ ضریب سایه مقایسه شده‌است. بررسی‌ها به صورت تجربی و توسط یک بستر آزمون تجربی که امکان همانند سازی جریان هوای مه‌لود اتمسفری را فراهم می‌سازد در دو سرعت جریان هوا صورت گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که شکل هندسی حفره‌ی توری یکی از عوامل اثرگذار در نرخ استحصال آب می‌باشد به‌طوری‌که استفاده از توری مثلثی و شش‌ضلعی در مقایسه با توری مربعی، حداکثر به ترتیب می‌تواند نرخ استحصال آب را تا ۱۲/۶ و ۲۹ درصد بهبود ببخشد.

کلیدواژه‌ها: استحصال آب از مه، هندسه‌ی توری، توری مثلثی، توری مربعی، توری شش ضلعی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۲

*نویسنده مسئول: mmheyhat@modares.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه کمبود منابع آب شیرین یکی از نگرانی‌های جوامع بشری است به‌طوری‌که دو-سوم از جمعیت جهان حداقل یک ماه از سال، شرایط کمبود شدید آب شیرین را تجربه می‌کنند [1]. هم‌چنین رشد جمعیت و تغییرات آب و هوایی (گرمایش زمین) عواملی هستند که باعث تشدید مشکل کمبود آب می‌شوند [2]. از این جهت، برای رفع مشکل کمبود آب، منابع جایگزین از جمله استفاده از آب موجود در مه به‌عنوان یک روش مقرون به‌صرفه و اقتصادی به ویژه در مناطقی که امکان دسترسی به مه موجود می‌باشد، مورد توجه بسیاری از محققین در دنیا قرار گرفته‌است [3]. اساس روش استحصال آب از مه، جداسازی در نتیجه‌ی برخورد قطرات آب موجود در مه با سطح یک المان می‌باشد. میزان آب جمع‌آوری شده توسط المان‌ها به متغیرهای مختلفی از جمله میزان آب ورودی به المان، سرعت جریان هوا، رطوبت نسبی محیط و دمای هوا وابسته است. از این جهت برای از بین بردن اثر

میزان آب ورودی به المان، راندمان جمع‌آوری به صورت نسبت میزان آب استحصال شده توسط المان به کل آب ورودی به المان تعریف می‌شود. راندمان جمع‌آوری خود از سه جزء تحت عناوین راندمان آیرودینامیکی (η_{aero})، راندمان نشست (η_{dp}) و راندمان ریزش (η_{dr}) تشکیل شده‌است. المان‌هایی که در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند معمولاً صفحات و یا توری‌هایی نفوذپذیر می‌باشند. در قرارگیری المان جمع‌کننده‌ی مه در معرض جریان مه‌آلود به دلیل حضور المان بخشی از خطوط جریان در بالادست المان از مسیر اولیه‌ی خود منحرف شده و از سطح مقطع المان عبور نمی‌کنند. راندمان آیرودینامیکی نسبتی از خطوط جریان منحرف نشده از بالادست جریان که از سطح مقطع المان عبور می‌کنند را بیان می‌کند. مشخصات هندسی المان‌ها در راندمان آیرودینامیکی تأثیرگذار است. یکی از مشخصه‌های هندسی المان‌های نفوذپذیر، ضریب سایه‌ی (SC) آن‌ها می‌باشد که بیانگر بخشی از سطح المان است که با مسدود کردن مسیر ذرات مه ورودی قادر به جذب آن‌ها است [4]. راندمان نشست به بررسی نسبتی از قطرات نشسته روی سطح المان به کل قطرات عبور کرده از سطح مقطع المان که در واقع با سطح المان برخورد کرده و باعث تشکیل قطرات اولیه روی المان می‌شوند می‌پردازد. در انتها برای تکمیل شدن فرایند استحصال آب از جریان مه‌آلود نیاز است تا قطرات اولیه تشکیل شده روی سطح المان با یکدیگر ادغام شده و پس از رشد و غلبه‌ی نیروی جاذبه بر نیروهای کشش سطحی، به داخل یک مخزن ریزش انجام شود. راندمان ریزش بیانگر نسبتی از قطرات تشکیل شده روی سطح المان می‌باشد که به مخزن جمع‌آوری ریزش کرده و باعث تکمیل فرایند استحصال آب از مه می‌شوند. برهم‌کنش‌های بین مولکولی سطح جامد و مایع توسط ترشوندگی بیان می‌شود. ترشوندگی سطح از عوامل اثرگذار در راندمان ریزش می‌باشد [5]. بهبود راندمان جمع‌آوری با افزایش حداقل یکی از اجزای راندمان صورت می‌گیرد. اجزای تشکیل دهنده‌ی راندمان جمع‌آوری از یکدیگر مستقل نبوده و تغییر در هرکدام، در دیگر اجزا و راندمان جمع‌آوری اثر می‌گذارد. ترشوندگی در بهبود راندمان جمع‌آوری به دو صورت افزایش آب‌دوستی و افزایش آب‌گریزی سطح ایفای نقش می‌کند. افزایش آب‌دوستی، با کاهش جدایش قطرات تشکیل شده روی سطح به دلیل نیروی درگ وارده از طرف جریان که یکی از عوامل کاهش راندمان ریزش که می‌باشد باعث افزایش راندمان جمع‌آوری می‌شود [6-8]. از طرفی با افزایش خاصیت آب‌گریزی سطح، ریزش قطرات سریع‌تر انجام شده و در نتیجه توانایی سطح برای جذب قطرات جدید افزایش پیدا می‌کند و به این دلیل، استفاده از سطوح آب‌گریزی می‌تواند باعث افزایش راندمان جمع‌آوری شود [9, 10]. برای استفاده از هر دو مزیت تغییر آب‌دوستی، استفاده از سطوح با ترشوندگی دوگانه، ترکیب آب‌دوستی و آب‌گریزی استفاده شده است [11, 12].

را در مقیاس واقعی با چالش رو به رو کرده است [17]. هم‌چنین بخشی از مطالعات اخیر به بررسی ساختارهای سه‌بعدی در کاربرد استحصال آب از مه پرداخته‌اند. لی و همکاران [18] به بررسی راندمان جمع‌آوری ساختار سه‌بعدی ایجاد شده با برش زدن و تا کردن صفحات پلیمری پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد راندمان جمع‌آوری به دلیل ایجاد گردابه توسط ساختار سه‌بعدی پیشنهادی و بهبود خواص آیرودینامیکی جریان می‌تواند تا مقدار ۱۶/۱ درصد افزایش یابد. هم‌چنین در یک مطالعه‌ی دیگر از پنگ و همکاران [19] به بررسی ساختار سه‌بعدی زیگزاگی ورق از جنس روی پرداختند. نتایج آن‌ها افزایش میزان جمع‌آوری آب تا چهار برابر نسبت به حالت پایه با بکارگیری ساختار سه‌بعدی و ترکیب آن با ترشوندگی دوگانه را نشان می‌دهد. فارغ از شکل هندسی و فقط با در نظر گرفتن نفوذپذیری المان، روبرو [20] با استفاده از تئوری جریان پتانسیل و فرضیات ساده کننده یک رابطه‌ی تئوری برای راندمان آیرودینامیکی استخراج کرد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات راندمان آیرودینامیکی با ضریب سایه غیر خطی می‌باشد که بیشینه راندمان آیرودینامیکی در ضریب سایه‌ی ۵۴ درصد قابل دستیابی است.

همان‌طور که بررسی گردید، ساختار و شکل هندسی المان‌ها یکی از عوامل اثرگذار در استحصال آب از جریان مه‌آلود می‌باشند. ساختارهای مختلف از جمله انواع ساختارهای چنگک مانند و سه‌بعدی استفاده شده مرور شد. اما طبق بررسی مطالعات انجام شده توسط نویسندگان مطالعه‌ای بر شکل هندسی حفره‌ی المان‌های توری مانند موجود انجام نشده است. در این مطالعه، سه المان توری شکل با حفره‌هایی به اشکال، مثلث متساوی الاضلاع، مربع و شش ضلعی منتظم توسط چاپگرهای سه‌بعدی از جنس پلی‌لاکتیک اسید (PLA) تولید و مورد بررسی قرار گرفته است. طراحی اندازه‌ی این المان‌ها به گونه‌ای صورت گرفته است که راندمان آیرودینامیکی تمامی آن‌ها از لحاظ تئوری بیشینه می‌باشد. راندمان جمع‌آوری به متغیرهای مختلفی از جمله سرعت جریان هوا، محتوی آب جریان (LWC)، رطوبت نسبی جریان و دمای محیط وابسته است. در این مطالعه، نرخ استحصال آب از نمونه‌ها توسط یک بستر آزمون تجربی که امکان همانند سازی جریان هوای مه‌آلود را فراهم می‌کند انجام شده است. هم‌چنین راندمان آیرودینامیکی و خواص ریزشی توری‌ها به صورت تجربی محاسبه و مورد مطالعه قرار گرفته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

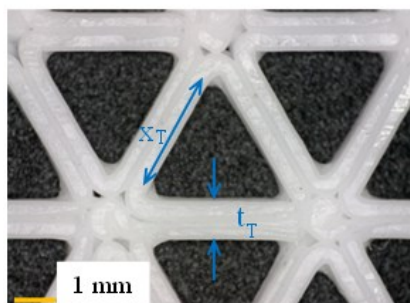
۲-۱- توری‌ها

هدف در این مطالعه، بررسی اثر شکل هندسی حفره‌ی المان توری شکل در نرخ استحصال آب می‌باشد. در این مطالعه، سه توری با ضریب سایه تقریباً یکسان و شکل هندسی متفاوت (شکل (۱)) جهت بررسی انتخاب شده است. همان‌طور که ذکر گردید در ضریب

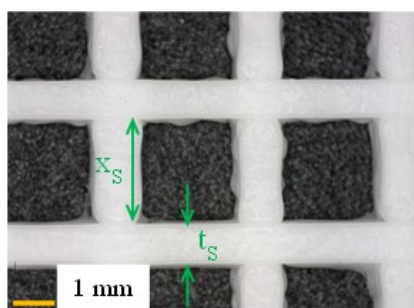
از المان‌های مختلفی از لحاظ شکل ساختاری در مطالعات مختلف با هدف استحصال آب از مه استفاده شده است که توری‌های راشل (Raschel mesh) با شکل هندسی حفره‌ی ذوزنقه از جنس پلی‌اتیلن یکی از متداول‌ترین آن‌ها می‌باشند. راجرام و همکاران [9] در یک مطالعه‌ی تجربی به بررسی میزان آب جداسازی شده از توری‌های راشل پرداختند. آن‌ها ضمن تغییر و اصلاح شکل هندسی توری‌های راشل موجود، اثرات تغییر ترشوندگی را نیز در مطالعه‌ی خود بررسی کردند. پوشش آب‌گریز استفاده شده برای توری‌های راشل تا ۵۰ درصد افزایش میزان آب استحصال شده توسط این توری را نشان داد. هم‌چنین آن‌ها با تغییرات شکل هندسی، از جمله فاصله‌ی بین الیاف و ضخامت الیاف استفاده شده، توانستند میزان آب جمع‌آوری شده را تا ۵۰ درصد دیگر (تا دو برابر حالت عادی) افزایش دهند. هم‌چنین یکی دیگر از انواع المان‌ها جهت استحصال آب از مه، توری‌های بافته شده‌ی مربعی می‌باشد [4]. علاوه بر جریان هوای مه‌آلود، جریان خروجی از برج‌های خنک‌کننده‌ی تر نیز به دلیل وجود قطرات آب می‌تواند یکی از منابع تأمین آب باشد. گوش و همکاران [13] با ساخت یک بستر آزمون تجربی در جهت قائم به بررسی توانایی استحصال آب توسط توری‌های فلزی از جریان شبیه‌سازی شده‌ی برج‌خنک‌کننده پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که در توری‌های فلزی مطالعه شده، پوشش آب‌دوست با زاویه قرارگیری ۱۵ درجه بهترین عملکرد را دارد. همان‌طور که ذکر شد، راندمان آیرودینامیکی وابسته به ابعاد هندسی المان می‌باشد. توری‌های با بافت بزرگ به خوبی توانایی مسدود کردن جریان و جذب قطرات را ندارند از طرفی کاهش اندازه‌ی بافت توری باعث رخ دادن پدیده‌ی گرفتگی در توری می‌شود که می‌تواند بر راندمان جمع‌آوری اثرگذار باشد [14]. گرفتگی توری می‌تواند منجر به کاهش راندمان آیرودینامیکی و در نتیجه کاهش راندمان جمع‌آوری توری شود. برای برطرف کردن گرفتگی در توری‌ها استفاده از ساختارهای چنگک مانند پیشنهاد شده است. شی و همکاران [15] به مقایسه‌ی ساختارهای چنگک مانند و توری در شرایط آزمایشگاهی پرداختند. آن‌ها هم‌چنین به بررسی اثرات هندسی در این ساختارها با تغییر قطر سیم‌های استفاده شده و ثابت نگه‌داشتن ضریب سایه و یا نسبت گام قرار گیری سیم‌ها پرداختند. نتایج بیان می‌کند که ساختارهای چنگک مانند با قطر سیم ریز می‌تواند به خوبی، قطرات آب را جذب و سپس انتقال دهد درحالی‌که توری‌های با قطر سیم ریز به دلیل گرفتگی، ریزش کمی دارند. کووالسکی و همکاران [16] به بررسی جنس، طول گام و طول سیم در ساختارهای چنگک مانند پرداختند. نتایج آن‌ها راندمان ۱۷ درصدی برای حالت بهینه‌ی چنگک‌های از جنس فولاد را نشان می‌دهد که از راندمان توری‌های راشل معمول بیش از سه مرتبه بیشتر است. البته یکی از مشکلات ساختارهای چنگک مانند درهم تنیدگی آن‌ها در قرارگیری در معرض باد با سرعت بالا می‌باشد که استفاده از آن‌ها

شکل ۲ نتایج آزمون اندازه‌گیری زاویه تماس در دمای ۲۶/۴ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۳۰ درصد را نشان می‌دهد که بر اساس آن توری‌های تولید شده، آب‌دوست با زاویه تماس 83 ± 1 درجه هستند.

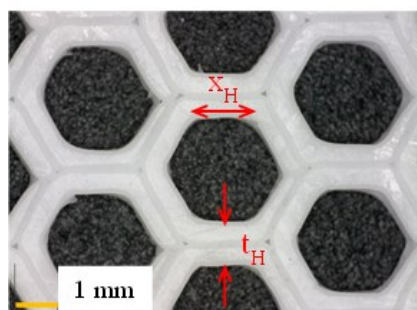
(الف)



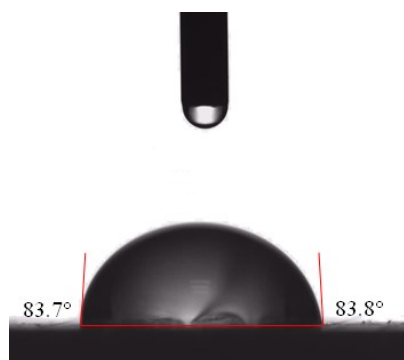
(ب)



(ج)



شکل ۱ تصاویر میکروسکوپی توری‌های تولید شده (الف) توری مثلثی، (ب) توری مربعی و (ج) توری شش‌ضلعی. شاخص طول مشخص شده با خط نارنجی در تصاویر بیانگر طول ۱ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۲ زاویه تماس قطره روی سطح المان‌های تولید شده

سایه ۵۴ درصد، راندمان آیرودینامیکی توری‌ها بیشینه می‌باشد [20]. از این جهت ضریب سایه‌ی طراحی توری‌ها ۵۴ درصد انتخاب شده‌است. مطابق با مطالعه‌ی انجام شده توسط الشناوی و همکاران [21]، ضریب سایه‌ی توری‌ها با هندسه‌های مثلث متساوی‌الاضلاع (شکل الف-۱)، مربعی (شکل ب-۱) و شش ضلعی منظم (شکل ج-۱) به ترتیب از روابط ۱ تا ۳ محاسبه می‌شود.

$$SC = 1 - \frac{x_T^2 \sqrt{3}(b-t)}{4b(\frac{\sqrt{3}}{2}x_T + t)(t + \frac{x_T}{2})} \quad (۱)$$

$$SC = 1 - \frac{x_S^2(b-t)^2}{b^2(x_S + t)^2} \quad (۲)$$

$$SC = 1 - \frac{3\sqrt{3}x_H^2(b-2t)(b-t)}{2(\sqrt{3}x_H + t)(1.5x_H + t)b^2} \quad (۳)$$

در روابط فوق، x ، طول ضلع، b ، ابعاد کلی خارجی المان و t ، ضخامت الیاف المان می‌باشد. نمونه‌ها در این مطالعه به شکل خارجی مربع با طول ضلع (b) ۸ سانتی‌متر می‌باشند. در این روابط زیروندهای T ، S و H به ترتیب به توری‌های مثلثی، مربعی و شش‌ضلعی اشاره دارند. به منظور طراحی هندسی المان‌ها از میان متغیرهای معرفی شده در روابط ۱-۳، جهت دستیابی به بیشینه راندمان آیرودینامیکی تئوری، ضریب سایه‌ی المان‌ها ۵۴ درصد انتخاب شده‌است. هم‌چنین از بین متغیرهای ضخامت الیاف و طول ضلع هر شکل هندسی، الیاف با ضخامت ۱ میلی‌متر انتخاب شده‌است و در ادامه طول ضلع هر شکل هندسی از روابط ۱-۳ محاسبه شده‌است. ضریب سایه‌ی واقعی توری‌های تولید شده با در نظر گرفتن خطای ساخت به همراه مشخصات هندسی میانگین المان‌ها در جدول ۱ گزارش شده‌است.

نمونه‌های طراحی شده توسط دستگاه چاپگر سه‌بعدی (شرکت کیتک مدل آلفا ۳۰) و از جنس پلی‌لاکتیک‌اسید (شرکت YOUSU) با سرعت پرینت ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه و قطر نازل ۰/۴ میلی‌متر تولید گردید که در شکل ۱ نشان داده شده‌است. هم‌چنین همان‌طور که ذکر گردید یکی از عوامل اثرگذار در راندمان ریزش و در نتیجه راندمان جمع‌آوری، ترشوندگی سطح المان می‌باشد. تغییر خواص ترشوندگی از اهداف این مطالعه نمی‌باشد اما با توجه به تأثیرگذاری آن در این مطالعه نیز اندازه‌گیری زاویه تماس با دستگاه CAG-20 ساخت شرکت نانو مهندسی سطح ژیکان اندازه‌گیری شده‌است.

جدول ۱ مشخصات هندسی میانگین و ضریب سایه‌ی واقعی سه توری مطالعه شده

شکل هندسی حفره‌ی توری	طول ضلع (میلی متر)	ضخامت الیاف (میلی متر)	ضریب سایه (%)
مثلثی	۳/۴۶۵	۰/۹۴۰	۵۱/۲
مربعی	۲/۴۷۹	۱/۱۰۸	۵۳/۵
شش‌ضلعی	۱/۴۷۰	۰/۹۴۴	۵۲/۲

صورت نسبت میزان آب جمع‌آوری شده ($m_{collected}$) به کل آب ورودی به المان در مدت زمان مشخص ($m_{entered}$) به صورت رابطه‌ی ۴ بیان می‌شود.

$$\eta = \frac{m_{collected}}{m_{entered}} \quad (۴)$$

با فرض یکسان بودن میزان آب ورودی به المان در زمان، میزان آب جمع‌آوری شده توسط المان در زمان مشخص می‌تواند به عنوان معیار مقایسه انتخاب شود. هم‌چنین برای ایجاد امکان مقایسه‌ی دقیق‌تر در این مطالعه از متغیر نرخ استحصال آب بر حسب مساحت که به صورت رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود برای مقایسه‌ی بین المان‌های مختلف استفاده شده است.

$$\text{water collection rate} = m_{collected} / (A_{mesh})(t) \quad (۵)$$

که در این رابطه، A_{mesh} ، مساحت المان توری شکل (۶۴ سانتی‌متر مربع) و t مدت زمان انجام آزمایش‌ها، پس از دستیابی به حالت پایدار، می‌باشد. بررسی توانایی استحصال آب توری‌های مختلف در دو سرعت ۱ و ۴ متر بر ثانیه که بر اساس حدود سرعت در جریان هوای مه‌آلود اتمسفری انتخاب شده [22]، انجام شده است.

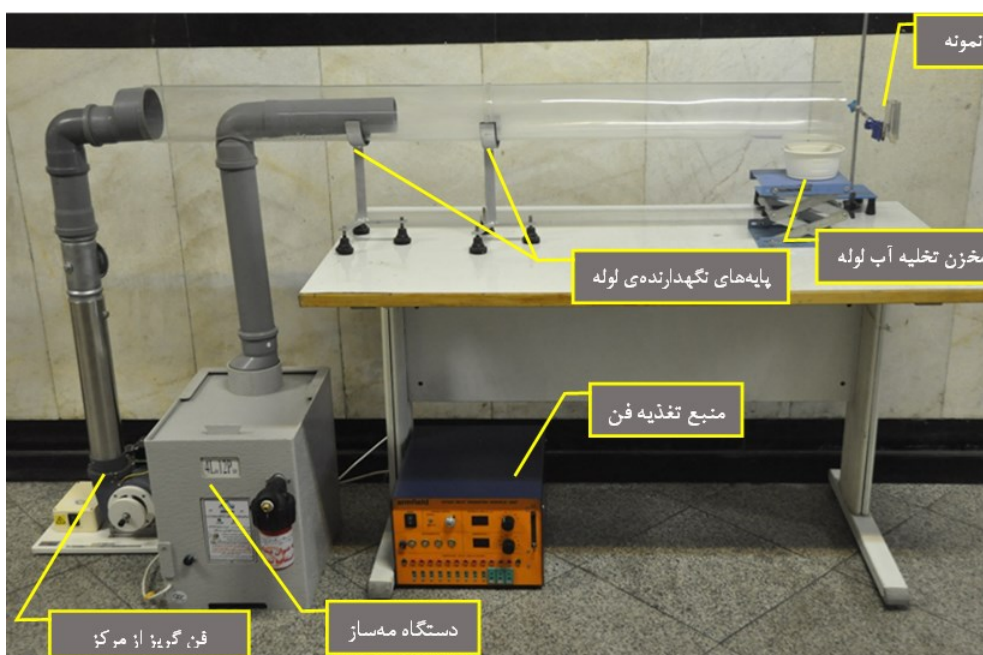
در ابتدای قرارگیری انواع مختلف المان‌ها در معرض جریان مه‌آلود به دلیل خشک بودن سطح المان در ابتدا، نیاز است تا مدت زمانی طی شود تا تشکیل و ریزش قطرات (و در نتیجه نرخ استحصال آب) به یک حالت پایدار برسد [23]. به منظور بدست آوردن مدت زمان مورد نیاز برای دستیابی به حالت پایدار در هر یک از نمونه‌ها میزان آب جمع‌آوری شده از هر نمونه از ابتدای انجام آزمایش با قرارگیری مخزن جمع‌آوری آب روی یک ترازو و خوانش وزن ترازو در فاصله‌ی زمانی یک دقیقه این مدت محاسبه و نشان داده شده است. آزمایش‌های محاسبه‌ی راندمان جمع‌آوری پس از رسیدن به حالت پایدار و به مدت زمان ۱۵ دقیقه انجام شده است.

۲-۲- بستر آزمون تجربی

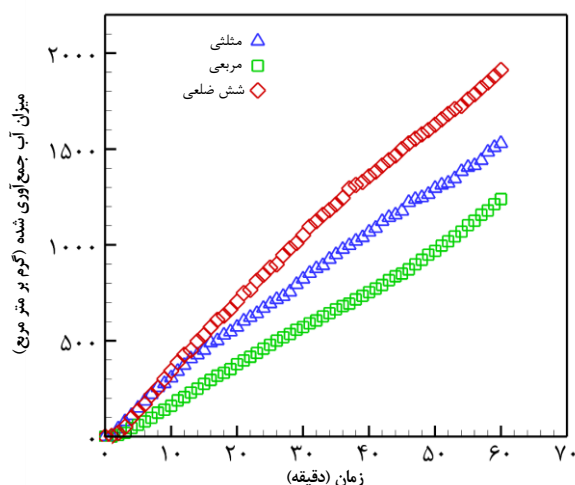
در این بخش بستر آزمون طراحی شده جهت بررسی توانایی استحصال آب المان‌ها از جریان مه‌آلود بررسی شده است. شکل ۳ نمای بستر آزمون به همراه تجهیزات را نشان می‌دهد. در این بستر آزمون برای ایجاد مه، از یک دستگاه مه‌ساز نیمه صنعتی استفاده شده است. هم‌چنین جریان هوا توسط یک فن گریز از مرکز تأمین می‌شود. هوا و مه با یکدیگر به داخل یک لوله‌ی شفاف از جنس پلکسی گلس با قطر داخلی ۱۱ سانتی‌متر تزریق شده و ترکیب آن‌ها باعث ایجاد جریان مه‌آلود در خروجی لوله می‌شود. نمونه‌ها در فاصله‌ی ۱۰ سانتی متری از انتهای لوله قرار گرفته و آب جمع شده توسط نمونه به داخل یک مخزن ریزش کرده و جمع‌آوری می‌شود. جرم آب جمع‌آوری شده توسط هر المان با استفاده از یک ترازو به دقت ۰/۰۱ گرم در حین انجام آزمایش و پس از انجام آزمایش اندازه‌گیری می‌شود. یکی دیگر از متغیرهای اثرگذار در راندمان جمع‌آوری آب، سرعت جریان هوا می‌باشد. برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا در این بستر آزمون از یک سرعت‌سنج سیم داغ با دقت $\pm 3\%$ درصد و با وضوح ۰/۰۰۱ متر بر ثانیه استفاده شده است. نکته‌ی قابل ذکر در استفاده از سرعت‌سنج این است که با توجه به اثرگذاری قطرات مه در کارکرد این نوع سرعت‌سنج، اندازه‌گیری سرعت در عدم حضور مه انجام شده است. تمامی آزمایش‌ها در شرایط محیط با دمای ۲۶ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی محیط ۴۰ درصد انجام شده است.

۲-۳- روش انجام آزمایش

هدف در این مطالعه بدست آوردن نرخ استحصال آب از المان‌های مختلف می‌باشد. راندمان جمع‌آوری آب از المان‌های مختلف به



شکل ۳) نمای بستر آزمون طراحی شده جهت بررسی توانایی استحصال آب المان‌های مختلف



شکل ۴) بررسی تغییرات زمانی نرخ استحصال آب از توری‌ها

با یکسان بودن شرایط مه برخوردی، توری‌هایی که دارای شیب تندتر در نمودار هستند (افزایش سریع‌تر میزان آب جمع‌آوری شده در واحد زمان)، نشان‌دهنده راندمان بالاتر در جمع‌آوری آب هستند. شیب نمودارهای مثلثی، مربعی و شش‌ضلعی (در حالت پایدار) به ترتیب برابر با ۲۳/۵۹، ۲۲/۲۳ و ۲۸/۷۵ گرم بر متر مربع در دقیقه می‌باشد. همان‌طور که ذکر گردید نمودار شکل ۴ برای بررسی مدت زمان مورد نیاز جهت دستیابی به حالت پایدار در یک آزمایش ترسیم شده‌است.

برای مقایسه‌ی دقیق‌تر اثر شکل هندسی حفره توری بر میزان آب جمع‌آوری شده، در شکل ۵ میزان آب جمع‌آوری شده از توری‌های مثلثی، مربعی و شش‌ضلعی در سرعت‌های ۱ و ۴ متر بر ثانیه نشان داده شده‌است. مشاهده‌ی اولیه‌ی این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش سرعت جریان باد در هر سه توری میزان آب استحصال شده افزایش می‌یابد. همان‌طور که ذکر گردید راندمان جمع‌آوری از سه جزء تحت عناوین راندمان آیرودینامیکی، راندمان نشست و راندمان ریزش تشکیل شده‌است. با افزایش سرعت قطرات، اینرسی قطرات افزایش می‌یابد و احتمال برخورد قطرات عبور کرده از سطح مقطع المان با سطح المان افزایش می‌یابد. این پدیده مطابق تعریف به معنای افزایش راندمان نشست می‌باشد و در نتیجه با افزایش سرعت، نرخ استحصال آب زیاد می‌شود.

در سرعت ۱ متر بر ثانیه نرخ استحصال آب از توری مثلثی ۱/۳۸، توری مربعی ۱/۲۶ و توری شش‌ضلعی ۱/۶۴ کیلوگرم بر متر مربع بر ساعت می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سرعت پایین جریان هوا، توری مربعی کم‌ترین نرخ استحصال آب را در بین توری‌های مطالعه شده دارد به‌طوری‌که استفاده از توری مثلثی و شش‌ضلعی پیشنهادی می‌تواند نرخ استحصال آب را به‌ترتیب تا ۹ و ۲۹ درصد بهبود ببخشد.

هم‌چنین برای محاسبه‌ی فرکانس ریزش قطرات و بررسی راندمان ریزش پس از دستیابی به حالت پایدار، قطرات ریزش کرده از سطح المان در مدت زمان معین شمارش شده‌است. در این مطالعه، راندمان آیرودینامیکی المان‌ها به روش تجربی محاسبه شده‌است. راندمان آیرودینامیکی با اندازه‌گیری سرعت در نزدیکی المان و سرعت جریان مغشوش نشده در بالادست جریان به‌صورت رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود [20].

$$\eta_{aero,exp} = (v_1/v_0) SC \quad (6)$$

در این رابطه، v_1 سرعت در نزدیکی المان، v_0 سرعت در بالادست جریان و SC ضریب سایه‌ی المان می‌باشد.

از طرفی راندمان آیرودینامیکی تئوری از رابطه‌ی ۷ استخراج می‌شود.

$$\eta_{aero,theory} = \frac{SC}{1 + \sqrt{C_0/C_d}} \quad (7)$$

در این رابطه، C_0 ضریب افت فشار می‌باشد که بیانگر تغییر مقدار افت فشار در عبور جریان از مقطع توری است که به دلیل وجود الیاف توری به جریان اعمال شده‌است. این ضریب تابعی از ضریب سایه است و C_d ضریب درگ می‌باشد. برای توری با شکل خارجی مربعی، C_0 و $C_d=1/18$ از رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود [20].

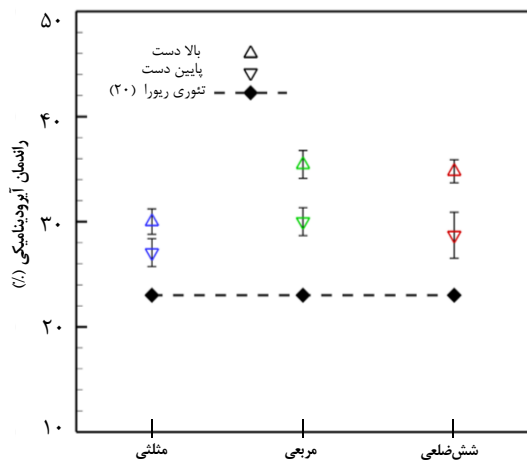
$$C_0 = 1.3 \times SC + \left(\frac{SC}{1 - SC}\right)^2 \quad (8)$$

در بخش نتایج راندمان آیرودینامیکی تئوری و تجربی محاسبه و مقایسه شده‌است. برای اطمینان از دقت نتایج هر آزمایش سه مرتبه تکرار و مقادیر میانگین اندازه‌گیری در بخش نتایج گزارش شده‌است.

۳- نتایج آزمون

۳-۱- بررسی جمع‌آوری آب از توری‌ها

در این بخش توانایی استحصال آب از جریان مه‌آلود توسط توری‌های مطالعه شده بررسی و مقایسه شده‌است. شکل ۴ تغییرات زمانی میزان آب جمع‌آوری شده به ازای مساحت سطح توری (بر حسب گرم بر متر مربع) در سرعت باد ۱ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. برای استخراج این نمودار، آب جمع‌آوری شده توسط توری‌ها هر یک دقیقه به مدت زمان یک ساعت توزین شده‌است. شیب این نمودار نرخ استحصال آب از انواع توری را مشخص می‌کند و می‌تواند به عنوان معیاری برای مقایسه توانایی استحصال آب استفاده شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود شیب این نمودار در ابتدای قرارگیری نمونه‌ها در معرض جریان مه‌آلود ثابت نیست و نیاز است تا مدت زمانی طی شود تا نرخ استحصال آب به یک مقدار ثابت (حالت پایدار) برسد. درباره‌ی ابتدای قرارگیری توری در معرض جریان در بخش‌های بعدی بحث شده‌است. تمامی اندازه‌گیری‌های استحصال آب از توری‌ها پس از طی مدت زمان ۳۰ دقیقه‌ای از قرارگیری المان در معرض جریان مه‌آلود انجام شده‌است.

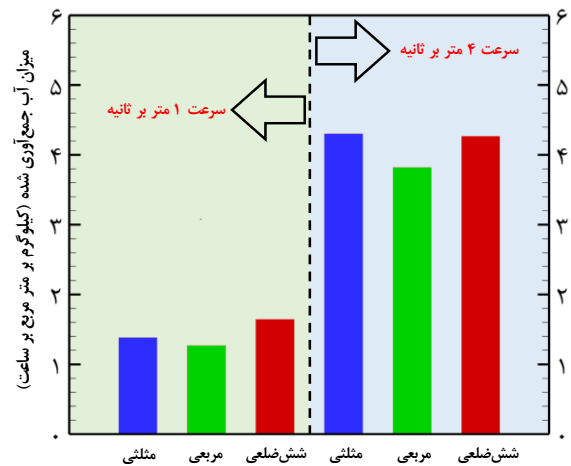


شکل ۶) راندمان آیرودینامیکی تئوری و تجربی توری‌های مطالعه شده

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود راندمان‌های آیرودینامیکی تجربی توری‌ها از مقادیر تئوری محاسبه شده بیش‌تر می‌باشد. راندمان آیرودینامیکی میانگین (میانگین راندمان آیرودینامیکی بالادست و پایین‌دست) توری مربعی با ۳۲/۷ درصد، بیش‌ترین مقدار در بین توری‌های مطالعه شده می‌باشد. راندمان آیرودینامیکی میانگین توری شش‌ضلعی و مثلی به ترتیب ۳۱/۷ و ۲۸/۵ درصد می‌باشد. مشاهده می‌شود که برخلاف نرخ استحصال آب از مه راندمان آیرودینامیکی توری مربعی بیش‌تر از دیگر انواع توری می‌باشد از این جهت در بخش بعدی برای توجیه افزایش راندمان توری‌های شش‌ضلعی و مثلی نسبت به توری‌های مربعی، ریزش قطرات از توری به‌عنوان بیانی از راندمان ریزش توری بررسی شده‌است.

۳-۳- بررسی خواص ریزشی

راندمان ریزش قطرات از توری به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد. از این جهت در این مطالعه از مفهوم زمان شروع جدایش و نرخ ریزش قطرات برای بررسی خواص ریزشی استفاده شده‌است. به دلیل خشک بودن سطح المان ریزش قطرات جذب شده از روی سطح المان بلافاصله پس از قرارگیری صورت نمی‌گیرد و نیاز است تا مدت زمانی طی شود تا جدایش آغاز شود. به زمان مورد نیاز برای جدایش اولین قطره از سطح المان، زمان شروع گفته می‌شود [24]. عوامل مختلف مانند سرعت جریان هوا و نیروهای سطحی بر زمان شروع جدایش قطرات اثرگذار هستند. مدت زمان مورد نیاز برای دستیابی به راندمان حالت پایدار که در بخش‌های قبلی ذکر شد نیز به دلیل خشک بودن سطح توری در ابتدای قرارگیری در معرض جریان مه‌آلود می‌باشد. همان‌طور که بیانگ و همکاران [24] نشان دادند، با افزایش سرعت جریان باد، زمان شروع جدایش کاهش می‌یابد. از این جهت در این قسمت و برای مشخص شدن راندمان حالت پایدار، بررسی‌ها در سرعت پایین جریان هوا (۱ متر بر ثانیه) انجام شده‌است. نتایج حاصل از بیش

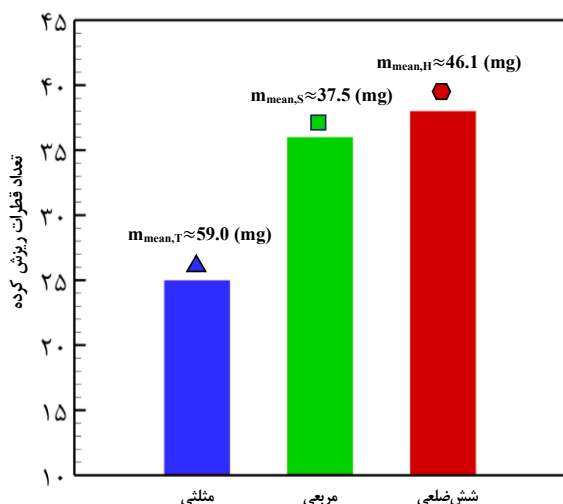


شکل ۵) نرخ استحصال آب از توری‌ها در حالت پایدار در سرعت ۱ و ۴ متر بر ثانیه

در سرعت ۴ متر بر ثانیه بیش‌ترین نرخ استحصال آب با اختلاف کمی نسبت به توری شش‌ضلعی مربوط به توری مثلی با ۴/۳۰ کیلوگرم بر متر مربع بر ساعت می‌باشد. نرخ استحصال آب از توری شش‌ضلعی و مربعی به ترتیب ۴/۲۶ و ۳/۸۲ کیلوگرم بر متر مربع بر ساعت می‌باشد. در این سرعت مشاهده می‌شود که استفاده از توری مثلی و شش‌ضلعی پیشنهاد شده در این مطالعه نسبت به توری مربعی می‌تواند به‌ترتیب منجر به ۱۲/۶ و ۱۱/۶ درصد افزایش در نرخ استحصال آب شود.

۳-۲- بررسی راندمان آیرودینامیکی

برای بررسی دقیق‌تر اثر شکل هندسی حفره توری، در این بخش راندمان آیرودینامیکی توری‌ها بررسی شده‌است. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده‌است ضریب سایه‌ی سه توری تقریباً یکسان می‌باشد. با استفاده از روش توضیح داده شده و روابط ۷ و ۸ راندمان آیرودینامیکی توری مثلی، مربعی و شش‌ضلعی به ترتیب ۲۳/۱، ۲۳/۰ و ۲۳/۰ درصد محاسبه می‌شود. مشاهده می‌شود که راندمان آیرودینامیکی تئوری این سه توری تقریباً یکسان می‌باشد. برای بررسی دقیق‌تر راندمان آیرودینامیکی تجربی نیز به روشی که در بخش ۲-۳ ذکر گردید نیز محاسبه و در شکل ۶ نشان داده شده‌است. برای محاسبه‌ی راندمان آیرودینامیکی از روش تجربی از رابطه‌ی ۶ استفاده شده‌است. همان‌طور که ذکر گردید برای استفاده از این رابطه، نیاز است تا سرعت جریان باد در نزدیکی توری اندازه‌گیری شود. از آن‌جهت که اندازه‌گیری سرعت جریان در عبور از توری امکان‌پذیر نمی‌باشد، با استفاده از سرعت‌سنج سیم‌داغ، سرعت جریان یک مرتبه در بالادست المان (جهت محاسبه‌ی راندمان آیرودینامیکی بالادست) و یک مرتبه در پایین دست توری (جهت محاسبه‌ی راندمان آیرودینامیکی پایین‌دست) اندازه‌گیری شده‌است و با اندازه‌گیری سرعت جریان بدون اغتشاش در خروجی لوله پلکسی‌گلس، راندمان آیرودینامیکی تجربی محاسبه شده‌است.



شکل ۸) تعداد قطرات ریزش کرده و جرم میانگین قطرات ریزشی در مدت زمان ۱۰ دقیقه

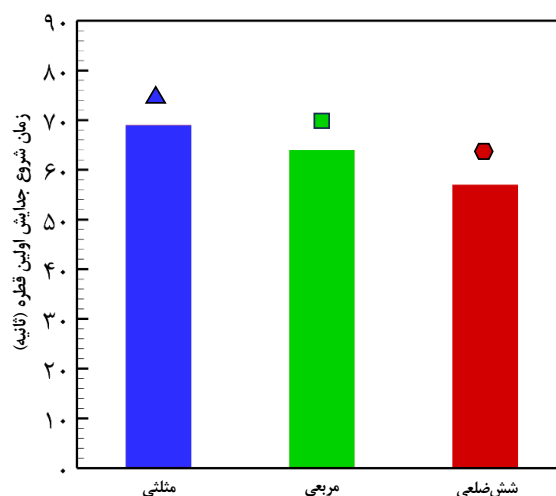
۴- جمع‌بندی

در مطالعات مختلف، انواع المان‌های مختلف از جهت ساختار، هندسه، خواص سطحی و شکل ظاهری مطالعه شده‌اند. در این مطالعه، سه نوع توری مثلی، مربعی و شش‌ضلعی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. برای بررسی هدفمند اثر شکل هندسی حفره، طراحی توری‌ها با ضریب سایه یکسان و ضخامت الیاف یکسان صورت گرفت به طوری که تنها متغیر در بین توری‌ها طول اضلاع اشکال می‌باشد. برای مقایسه‌ی بین این سه نوع توری، نرخ استحصال آب از سه توری در دو سرعت ۱ و ۴ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که توری شش‌ضلعی پیشنهادی می‌تواند نرخ استحصال آب را در مقایسه با توری مربعی در سرعت ۱ و ۴ متر بر ثانیه به ترتیب تا ۲۹ و ۱۱/۶ درصد بهبود ببخشد. هم‌چنین استفاده از توری مثلی نیز در مقایسه با توری مربعی می‌تواند منجر به افزایش نرخ استحصال آب از سه تا ۱۲/۶ درصد شود.

هم‌چنین برای توجیه نرخ جمع‌آوری بیش‌تر توری شش‌ضلعی و مثلی راندمان آیرودینامیکی و خواص ریزشی توری‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفت. برای مقایسه‌ی راندمان ریزشی توری‌ها از دو کمیت زمان شروع جدایش قطره و نرخ ریزش قطرات استفاده شد که نتایج بیان می‌کند توری شش‌ضلعی در مقایسه با توری مربعی تعداد قطرات بیش‌تر و با جرم بیش‌تری ریزش می‌کنند که منجر به افزایش نرخ استحصال آب از سه تا ۱۲/۶ درصد نسبت به توری‌های مربعی موجود می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که علاوه بر اهمیت اثر شکل هندسی حفره بر پدیده‌ی استحصال آب از سه، استفاده از توری‌های مثلی و شش‌ضلعی می‌تواند منجر به بهبود راندمان جمع‌آوری آب در مقایسه با توری‌های مربعی موجود شود.

از ۵ مرتبه اندازه‌گیری زمان شروع جدایش ریزش برای سه توری مطالعه شده در شکل ۷ نشان داده شده‌است. زمان شروع جدایش توری مثلی با میانگین ۶۹ ثانیه بیش‌ترین مقدار توری مربعی با ۶۴ ثانیه مقدار متوسط و کم‌ترین زمان شروع جدایش مربوط به توری شش‌ضلعی با ۵۷ ثانیه می‌باشد. زمان شروع جدایش کم‌تر نشان‌گر آسان‌تر بودن جدایش قطره از سطح توری و خواص ریزشی بهتر می‌باشد. زمان شروع جدایش به کمیت‌های مختلفی از جمله زاویه تماس پیش‌رو، زاویه تماس پس‌رو و ضخامت الیاف وابسته است [24] که چون متغیرهای فوق در مطالعه‌ی حاضر یکسان می‌باشند، تنها کمیت اثرگذار در این زمان شکل هندسی توری‌ها می‌باشد.

یکی دیگر از متغیرهایی که در مراجع به عنوان بیانی از راندمان ریزش استفاده شده‌است، نرخ ریزش قطرات از سطح توری می‌باشد [14]. در این مطالعه تعداد قطرات ریزش کرده از سطح سه توری در مدت زمان ۱۰ دقیقه اندازه‌گیری و نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود توری‌های مثلی با ۲۵ ریزش کم‌ترین تعداد قطره ریزش کرده از سطح را دارند. پس از توری‌های مثلی توری‌های مربعی و شش‌ضلعی به ترتیب با ۳۶ و ۳۸ قطره ریزش کرده قرار می‌گیرند. هم‌چنین با توجه به نرخ استحصال آب از سه محاسبه شده برای سه توری و با در نظر گرفتن تعداد قطرات ریزش کرده از سطح توری، جرم میانگین قطرات آب ریزش کرده (m_{mean}) از توری محاسبه شده و در نمودار شکل ۸ نمایش داده شده‌است. مشاهده می‌شود که توری مثلی بیش‌ترین جرم میانگین را در بین قطرات ریزش کرده دارد در حالیکه کم‌ترین جرم قطرات ریزش کرده مربوط به توری مربعی می‌باشد. با توجه به شکل فوق می‌توان گفت هندسه‌ی پیشنهادی شش‌ضلعی در این مطالعه بیش‌ترین تعداد ریزش قطرات با جرمی را دارد به‌طوری‌که منجر به بهترین خواص ریزش و در نتیجه بیش‌ترین نرخ استحصال آب در بین توری‌های مطالعه شده می‌شود.



شکل ۷) زمان شروع جدایش اولین قطره از توری‌های مطالعه شده

- 14- Park J, Lee C, Lee S, Cho H, Moon MW, Kim SJ. Clogged water bridges for fog harvesting. *Soft Matter*. 2021;17(1):136-44.
- 15- Shi W, Anderson MJ, Tulkoff JB, Kennedy BS, Boreyko JB. Fog harvesting with harps. *ACS applied materials & interfaces*. 2018;10(14):11979-86.
- 16- Kowalski NG, Shi W, Kennedy BS, Boreyko JB. Optimizing fog harps. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021;13(32):38826-34.
- 17- Shi W, De Koninck LH, Hart BJ, Kowalski NG, Fugaro AP, van der Sloot TW, Ott RS, Kennedy BS, Boreyko JB. Harps under heavy fog conditions: superior to meshes but prone to tangling. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020;12(42):48124-32.
- 18- Li J, Ran R, Wang H, Wang Y, Chen Y, Niu S, Arratia PE, Yang S. Aerodynamics-assisted, efficient and scalable kirigami fog collectors. *Nature communications*. 2021;12(1):5484.
- 19- Peng Z, Fu Y, Guo Z. Origami-like 3D Fog Water Harvester with Hybrid Wettability for Efficient Fog Harvesting. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2023;15(31):38110-23.
- 20- de Dios Rivera J. Aerodynamic collection efficiency of fog water collectors. *Atmospheric Research*. 2011;102(3):335-42.
- 21- Elshennawy AA, Abdelaal MY, Hamed AM, Awad MM. Evaluating mesh geometry and shade coefficient for fog harvesting collectors. *Water Resources Management*. 2023;37(15):6107-26.
- 22- Azeem M, Noman MT, Wiener J, Petru M, Louda P. Structural design of efficient fog collectors: A review. *Environmental Technology & Innovation*. 2020;20:101169.
- 23- Bintein PB, Cornu A, Weyer F, De Coster N, Vandewalle N, Terwagne D. Kirigami fog nets: how strips improve water collection. *npj Clean Water*. 2023;6(1):54.
- 24- Jiang Y, Machado C, Savarirayan S, Patankar NA, Park KC. Onset time of fog collection. *Soft matter*. 2019;15(34):6779-83.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- 1- Mekonnen MM, Hoekstra AY. Four billion people facing severe water scarcity. *Science advances*. 2016;2(2):e1500323.
- 2- Vorosmarty CJ, Green P, Salisbury J, Lammers RB. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *science*. 2000;289(5477):284-8.
- 3- Qadir M, Jiménez GC, Farnum RL, Dodson LL, Smakhtin V. Fog water collection: challenges beyond technology. *Water*. 2018;10(4):372.
- 4- Park KC, Chhatre SS, Srinivasan S, Cohen RE, McKinley GH. Optimal design of permeable fiber network structures for fog harvesting. *Langmuir*. 2013;29(43):13269-77.
- 5- Jiang Y, Machado C, Park KC. From capture to transport: a review of engineered surfaces for fog collection. *Droplet*. 2023;2(2):e55.
- 6- Jiang Y, Savarirayan S, Yao Y, Park KC. Fog collection on a superhydrophilic wire. *Applied Physics Letters*. 2019;114(8).
- 7- Knapczyk-Korczak J, Szewczyk PK, Ura DP, Berent K, Stachewicz U. Hydrophilic nanofibers in fog collectors for increased water harvesting efficiency. *RSC advances*. 2020;10(38):22335-42.
- 8- Azad MA, Ellerbrok D, Barthlott W, Koch K. Fog collecting biomimetic surfaces: Influence of microstructure and wettability. *Bioinspiration & biomimetics*. 2015;10(1):016004.
- 9- Rajaram M, Heng X, Oza M, Luo C. Enhancement of fog-collection efficiency of a Raschel mesh using surface coatings and local geometric changes. *Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects*. 2016;508:218-29.
- 10- Kang JH, Lee JW, Kim JY, Moon JW, Jang HS, Jung SY. Effect of mesh wettability modification on atmospheric and industrial fog harvesting. *Frontiers in Physics*. 2021;9:680641.
- 11- Liu C, Sun R, Zhao J, Hu Y, Mo J. Enhancement of water collection efficiency by optimizing hole size and ratio of hydrophilic-superhydrophobic area on hybrid surfaces. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023;11(5):111082.
- 12- Yang D, Ramu AG, Choi D. Multifunctional integrated pattern for enhancing fog harvesting water unidirectional transport in a heterogeneous pattern. *npj Clean Water*. 2024;7(1):20.
- 13- Ghosh R, Patra C, Singh P, Ganguly R, Sahu RP, Zhitomirsky I, Puri IK. Influence of metal mesh wettability on fog harvesting in industrial cooling towers. *Applied Thermal Engineering*. 2020;181:115963.