



## بررسی تأثیر ساختار توری و ماژول نگهدارنده‌ی توری بر نرخ استحصال آب از مه

امیررضا محبی<sup>۱</sup>، مهرداد مظفریان<sup>۲\*</sup>، محمد کریمی

۱- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

۲- دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۳

بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۲/۲۷

### کلمات کلیدی:

استحصال آب از مه

توری ۶ ضلعی

توری راشل

ماژول ۲ استوانه‌ای

ماژول مثلثی کانال باز

**خلاصه:** امروزه به دلایل افزایش جمعیت، تغییرات آب‌وهوایی و توسعه‌ی کشاورزی و صنایع، مشکل کمبود آب بیش‌ازپیش حس می‌شود؛ از این رو می‌بایست از تمامی منابع آب در دسترس، برای جمع‌آوری آب استفاده کرد که یکی از این منابع، مه می‌باشد. فرایند استحصال آب از مه که یک روش با صرفه می‌باشد، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده و محققان در تلاش‌اند که بازده این روش را با روش‌های مختلف افزایش دهند. در این تحقیق با ارائه‌ی یک سیستم آزمایش بسیار کاربردی، میزان تأثیر گذاری توری و ماژول نگهدارنده‌ی توری بر نرخ استحصال آب مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ بدین صورت که ۶ مجموعه‌ی ماژول و توری در مقابل جریان بخار قرار گرفتند و پس از حاصل شدن نتایج، موثرترین عامل از بین توری و ماژول تعیین شدند؛ در حین آزمایش، تمامی عوامل مؤثر بر استحصال آب ثابت نگه داشته شدند و صرفاً تأثیر توری و ماژول مورد بررسی قرار گرفت؛ توری تارهای تفلونی که سبب افزایش ۲۳ تا ۷۷ درصدی استحصال آب از مه شد، به‌عنوان بهترین توری انتخاب شد؛ همچنین ماژول مثلثی کانال باز که استحصال آب را ۷ تا ۹ برابر افزایش داد به‌عنوان بهترین ماژول برگزیده شد. این میزان تأثیر گذاری بی‌نظیر را باید از خاصیت آیرودینامیکی ماژول مثلثی کانال باز دانست که به‌خوبی از شدت جریان مه در راستای افزایش استحصال آب، بهره می‌برد.

### ۱- مقدمه

امروزه افزایش جمعیت، توسعه یافتن کشاورزی و صنایع برای تأمین مایحتاج مردم، و تغییرات آب‌وهوایی سبب شده‌اند که مشکل کمبود آب بیش‌ازپیش حس شود [۱ و ۲]؛ از این رو روش‌های پربازده برای تأمین آب آشامیدنی مورد نیاز است که برخی از کشورها به تقطیر و شیرین‌سازی آب روی آورده‌اند که این ۲ روش، به انرژی و هزینه‌ی بالایی نیاز دارد و بیش‌تر برای تأمین انرژی این روش‌ها از منابع تجدیدناپذیر استفاده می‌شود؛ بنابراین تمامی کشورها قادر به استفاده از این روش‌ها نیستند [۳]. یکی از روش‌های کم هزینه و کم انرژی، استحصال آب از مه است که برای افزایش بازده این روش، مطالعات زیادی انجام شده است [۴-۶]. به طور معمول مه در مناطق مرطوب و نیمه مرطوب مانند نواحی ساحلی تشکیل می‌شود [۷] و حدود یک دهم کل آب آشامیدنی دنیا را در برمی‌گیرد [۸]. به طور کلی می‌توان با تغییر جنس توری، ساختار توری و ساختار ماژول نگهدارنده‌ی توری، بازده جمع‌آوری آب را افزایش داد؛ یک روش بسیار کاربردی که

سبب افزایش چندبرابری بازده جمع‌آوری آب می‌شود، ترکیب کردن ۲ یا چند ماژول و توری می‌باشد؛ بدین صورت که ۲ یا چند مجموعه‌ی توری و ماژول موفق در کشورهای مختلف، انتخاب شده و از میان آن‌ها بهترین ماژول و بهترین توری تعیین شده و در آخر به عنوان یک مجموعه‌ی جدید به کار گرفته می‌شوند.

مطالعات نشان داده است که بسیاری از گیاهان و حیوانات قادر به استحصال آب از مه هستند که در این زمینه محققان زیادی با الهام گرفتن از حیوانات و گیاهانی نظیر سوسک، کاکتوس، گل گلایبول دالنی، گیاه کوزه‌دار، برگ برنج و غیره، صفحات و توری‌هایی ساخته‌اند که دارای ۲ بخش آب‌دوست و آب‌گریز می‌باشد و نرخ استحصال روزانه آب از مه را از ۴۳/۹۲ تا ۹۶۰ لیتر به‌ازای هر مترمربع از سطح توری به خود اختصاص داده‌اند [۹-۱۵]. به‌عنوان نمونه، بای و همکاران [۹] در سال ۲۰۲۰، با بهره‌گیری از هندسه خارهای کاکتوس، یک طرح توری ۲ بعدی ساخته و به نرخ استحصال آب روزانه ۹۶۰ لیتر به‌ازای هر مترمربع از توری رسیدند که این مقدار حدود ۱۱ برابر نرخ استحصال توسط توری‌های تخت می‌باشد.

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mozaffarian@aut.ac.ir

همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۸، با فلورینه کردن نانوفیبرهای پلی‌اکریلونیتریل، و بهینه کردن زاویه‌ی چین‌های نانوفیبرها و فاصله‌ی دستگاه تولیدکننده‌ی بخار از توری، به نرخ استحصال آب روزانه ۸۰/۴ لیتر به‌ازای هر مترمربع از صفحه رسیدند. آزاد و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۵، ۳ جنس مختلف مش، رپلیکا، سیم مسی و پلی‌الفین را برای فرآیند استحصال آب از مه مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که فوق‌آب‌گریز کردن سطح با استفاده از پلی‌الفین، ۵ برابر عملکرد بهتر نسبت به سطح آب‌دوست و ۲ برابر عملکرد بهتر نسبت به سطح آب‌گریز در استحصال آب دارد. بیش‌ترین نرخ استحصال آب در این مطالعه، استحصال آب روزانه ۴۷/۷۶ لیتر به‌ازای هر مترمربع از مش بود. نبچیک کورچاک و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۲۱، با مقایسه‌ی روکش‌های آب‌دوست و آب‌گریز به این نتیجه رسیدند که نرخ استحصال آب با توری دارای روکش‌های آب‌گریز نسبت به توری با روکش آب‌دوست، دارای عملکرد بهتری به میزان ۴۰ درصد می‌باشد. مالانی و میسونات [۱۹] در سال ۲۰۲۱، تأثیر دو ساختار متفاوت (سیلیسیم (طلا))، که به اصطلاح نانومثلثی و نانوحفره‌ای نامیده می‌شوند، را بر نرخ استحصال آب از مه بررسی کردند. در این مطالعه که از توری‌های ۶-ضلعی استفاده شد به این نتیجه رسیدند که تغییر جنس مش تأثیر بسزایی در بازده استحصال آب دارد، به گونه‌ای که ساختار نانوحفره‌ای حدود ۲ برابر میزان استحصال آب بیش‌تری از ساختار نانومثلثی داشت و به نرخ استحصال قابل قبول روزانه ۲۵۲/۱۴ لیتر به‌ازای هر مترمربع توری رسیدند. علاوه بر این می‌توان از ساختار ۲ بخشی آب‌دوست و آب‌گریز برای ساخت توری‌ها استفاده کرد. اودین و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۲۰، با استفاده از مواد میکرو و نانو، یک توری مقرون‌به‌صرفه برای مصارف خانگی و کشاورزی که دارای دو قسمت آب‌دوست و آب‌گریز بود، ساختند. بخش آب‌دوست سبب تشکیل قطرات آب، و بخش آب‌گریز سبب چکه کردن قطرات آب تشکیل شده به مخزن جمع‌آوری می‌شد که در نهایت به نرخ استحصال روزانه تقریباً ۱/۵ لیتر به‌ازای هر مترمربع از توری رسیدند. یکی از راه‌های دیگر افزایش نرخ استحصال آب از مه، این است که ماژول‌های نگه‌دارنده‌ی توری متداول در یک منطقه‌ی خاص با یکدیگر مقایسه شده و بهترین ماژول در آن منطقه به کار گرفته شود [۴ و ۲۱]. به عنوان نمونه هولمز و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۵، به دلیل اثرات مخرب جریان باد بر مه‌گیرهای تخت در کشور شیلی، ماژول نگه‌دارنده‌ی توری مثلثی کانال باز و مثلثی کانال بسته را ارائه دادند که این ماژول‌ها از جریان شدید باد در راستای افزایش نرخ استحصال عمل می‌کرد و ماژول مثلثی کانال باز به عنوان بهترین ماژول

دای و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۸، با الهام از گیاه کوزه‌دار و برگ برنج، صفحه‌ای را که قابلیت جمع‌آوری قطرات آب و همچنین هدایت قطرات آب به مخزن جمع‌آوری را دارا بود طراحی کردند. این صفحه دارای سطح آب‌دوست بوده و شیارهای ایجاد شده در مقیاس میکرو بر روی صفحه آب‌گریز می‌باشند که سبب عملکرد ۲ منظوره‌ی سطح یعنی هم جذب آب و هم هدایت آن می‌شود. بر اساس آزمایش با این صفحه، دای و همکاران به نرخ استحصال آب روزانه ۱۲۰/۲۴ لیتر به‌ازای هر مترمربع از سطح رسیدند. گائو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۸، با الهام از سوسک، پارچه‌ای ساختند که دارای تارهای آب‌دوست و پودهای فوق‌آب‌گریز بود که قابلیت ۱۰ بار مصرف بدون افت نرخ استحصال آب را دارا بود. آن‌ها به نرخ استحصال آب روزانه ۳۰۴/۱۲ لیتر به‌ازای هر مترمربع از پارچه رسیدند. لی و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۹، یک توری ۳ بعدی الهام گرفته از طبیعت که دارای بخش بالایی آب‌دوست و بخش پایین آب‌گریز بود، از جنس اکسید روی (ZnO) ساختند و به نرخ استحصال آب روزانه ۸۶۵/۱ لیتر به‌ازای هر مترمربع از توری رسیدند. شارما و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۸، با الهام از گل گلابول دالنی، صفحه‌ای با روش لیتوگرافی نرم ساختند که به استحصال آب روزانه ۴۳/۹۲ لیتر به‌ازای هر مترمربع از صفحه رسیدند. ون و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۹، با الهام از سوسک، صفحه‌ای آب‌گریز که دارای سوزن‌های برجسته‌ی آب‌دوست می‌باشد، ساختند که سوزن‌های آب‌دوست سبب جذب آب از جریان مه می‌شد و صفحه‌ی آب‌گریز قطرات جمع‌آوری شده را به ظرف ذخیره‌سازی هدایت می‌کرد. برای هدایت بهتر قطرات آب به ظرف ذخیره‌سازی، کانال‌هایی بر روی سطح آب‌گریز ایجاد شده بود که در نهایت نرخ استحصال آب روزانه ۲۵۵/۸۱ لیتر به‌ازای هر مترمربع از سطح صفحه ثبت شد. بین و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۷، با الهام از سوسک، روشی مقرون‌به‌صرفه برای تولید صفحه‌ی آب‌دوست و آب‌گریز ارائه دادند که بخش آب‌دوست از جنس مس و بخش آب‌گریز از نانوذرات تفلونی ساخته شده بودند. همچنین برای مقاوم‌سازی سطح در برابر خوردگی، صفحه در محلول‌های اسید، باز و نمک ۱۰ درصد قرار داده شد که در نهایت بین و همکاران به نرخ استحصال آب روزانه ۴۸/۷۲ لیتر به‌ازای هر مترمربع از سطح رسیدند. برای افزایش نرخ استحصال آب از مه، مشاهده شده است جنس توری تأثیر بسزایی در نرخ استحصال آب دارد که با استفاده از روکش‌های آب‌گریز و فوق‌آب‌گریز و یا استفاده از نانوساختارهای خاص، می‌توان نرخ استحصال آب از مه را ۲ تا ۸ برابر نسبت به حالت عدم استفاده از روکش‌ها و یا نانوساختارها، افزایش داد [۱۹-۱۶]. در این زمینه الماسیان و

لیتر به ازای هر مترمربع از سطح غشا هستند. ونگ و همکاران [۲۲]، از غشا جانوس که دارای ۲ بخش آب دوست و آب گریز بود در استحصال آب از مه استفاده کردند. در این بخش آب گریز در قسمت بالایی و بخش آب دوست در قسمت زیرین غشا قرار داشتند که انتقال قطرات آب از بالا به پایین غشا را از نظر ترمودینامیکی امکان پذیر می کردند. آن‌ها در نهایت به نرخ استحصال آب بسیار زیاد روزانه ۱۲۷۴ لیتر به ازای هر مترمربع غشا رسیدند. به طور خلاصه مطالعات انجام شده در این زمینه در جدول ۱ گردآوری شده‌اند:

برگزیده شد که سبب افزایش ۳۸ درصدی نرخ استحصال و همچنین بدون تخریب توری توسط جریان شدید باد می‌شد. موسوی بیگی [۲۱] در سال ۲۰۰۸، میزان استحصال آب را با استفاده از ۳ ماژول تخت، تک-استوانه‌ای و ۲- استوانه‌ای که توری تارهای تفلونی به آنها نصب شده بود در مناطق مه‌خیز ایران اندازه گیری کرد. ماژول ۲ - استوانه‌ای با نرخ استحصال آب روزانه ۳/۲ لیتر به ازای هر مترمربع از توری، بهترین عملکرد را در بین سایر ماژول‌ها داشت. به تازگی از غشاها به عنوان توری، در فرآیند استحصال آب از مه استفاده شده است که دارای نرخ استحصال روزانه بیش از ۱۰۰۰

### جدول ۱. مطالعات انجام شده در راستای افزایش نرخ استحصال آب از مه

Table 1. literatures about improving fog collection rate

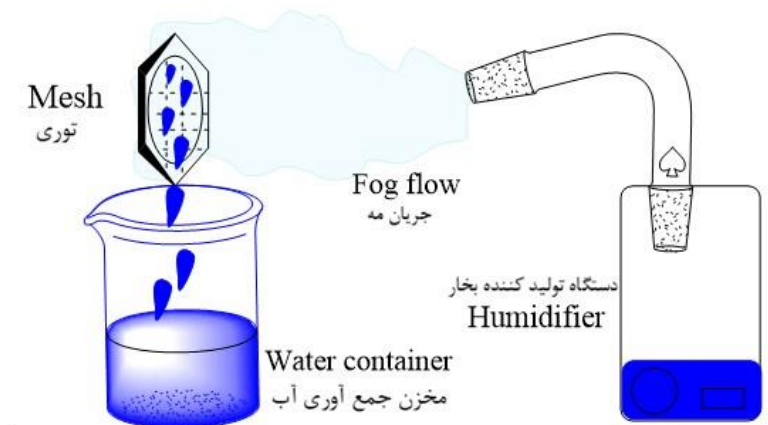
مرجع	مشخصات آزمایش اشاره شده در مراجع	نرخ استحصال آب بر حسب $\frac{l}{m^2 \cdot day}$	مه گیر
[۲۲]	نرخ جریان مه ۱۵۰ میلی لیتر بر ساعت بافاصله ۲۰ سانتی متری منبع جریان از توری، دمای ۲۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۸۴ درصد	۱۲۷۴/۴	۱ غشا جانوس با دو بخش آب دوست و آب گریز
[۱۹]	نرخ جریان مه ۳۰۰ میلی لیتر بر ساعت، سرعت ۵۰ سانتی متر بر ثانیه بافاصله ۱۰ سانتی متری منبع جریان از توری، دمای $25 \pm 1/5$ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۹۰-۸۰ درصد	۲۵۲/۱۴	۲ ساختار نانوی متفاوت SiAu (سیلیسیم طلا) با مش‌های ۶- ضلعی
[۲۰]	نرخ جریان مه ۱۵۰ میلی لیتر بر ساعت بافاصله ۲۰ سانتی متری منبع جریان از توری، دمای $19 \pm 2$ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی $68 \pm 3$ درصد	۱/۵	۳ توری ساخته شده از مواد میکرو و نانو دارای ۲ بخش آب دوست و آب گریز
[۹]	سرعت جریان مه ۲۲۰ سانتی متر بر ثانیه	۹۶۰	۴ توری ۲ بعدی بهره گرفته شده از خارهای کاکتوس
[۱۲]	سرعت جریان مه ۷۵ سانتی متر بر ثانیه بافاصله ۶ سانتی متری از توری، دمای ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۹۰ درصد	۸۶۵/۱	۵ توری ۳ بعدی الهام گرفته از طبیعت دارای دو بخش آب دوست و آب گریز
[۱۴]	سرعت جریان مه ۷۰ سانتی متر بر ثانیه بافاصله ۵ سانتی متری از توری، دمای ۳۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۹۰-۸۵ درصد	۲۵۵/۸۱	۶ صفحه‌ای آب گریز الهام گرفته شده از سوسک با سوزن‌های آب دوست

[۱۳]	نرخ جریان مه $30 \pm 130$ میلی لیتر بر ساعت بافاصله ۱۵ سانتی متری منبع جریان از توری دمای ۳۰-۷۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۳۰-۱۰۰ درصد	۴۳/۹۲	توری الهام گرفته شده از گل گلابول دالنی	۷
[۱۱]	نرخ جریان مه ۱۰۰ گرم بر ساعت بافاصله ۷ سانتی متری منبع جریان از توری، دمای ۲۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۸۰ درصد	۳۰۴/۱۲	پارچه الهام گرفته از سوسک با تارهای آبدوست و پودهای آب‌گریز	۸
[۱۶]	سرعت جریان مه ۰/۶ سانتی متر بر ثانیه بافاصله ۱۵ سانتی متری منبع جریان از توری، دمای ۲۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۷۰ درصد	۸۰/۴	نانوفیبرهای پلی اکریلونیتریل فلورینه شده، و بهینه کردن زاویه‌ی چین‌های نانوفیبرها و فاصله‌ی دستگاه تولیدکننده‌ی بخار از توری	۹
[۱۰]	فاصله‌ی منبع جریان مه از توری ۵ سانتی متر می‌باشد	۱۲۰/۲۴	صفحه‌ی الهام گرفته شده از گیاه کوزه‌دار و برگ دارای صفحه‌ی آبدوست و شیارهای آب‌گریز	۱۰
[۱۵]	سرعت جریان مه ۱۰ سانتی متر بر ثانیه بافاصله ۸ سانتی متری منبع جریان از توری، دمای ۲۰ درجه سلسیوس	۴۸/۷۲	صفحه‌ی الهام گرفته شده از سوسک آبدوست از جنس مس و دارای بخش آب‌گریز از نانوذرات تفلونی	۱۱
[۱۷]	سرعت جریان مه ۱/۶ سانتی متر بر ثانیه بافاصله ۱۷ سانتی متری منبع جریان از توری و رطوبت نسبی ۷۵-۸۵ درصد	۴۷/۷۶	مقایسه‌ی مش‌های رپلیکا، سیم مسی و پلی‌الفین	۱۲
[۲۱]	میانگین سرعت جریان باد ۲/۱ متر بر ثانیه و رطوبت نسبی ۳۷-۷۷ درصد	۳/۲	مقایسه‌ی ماژول تخت، تک استوانه‌ای و ۲ استوانه‌ای	۱۳

نیز متمرکز شد و جنس توری فقط یکی از پارامترهای مؤثر در افزایش نرخ استحصال می‌باشد.

در این پروژه میزان تاثیرگذاری ساختار توری و ماژول نگهدارنده توری بر نرخ استحصال آب، با یکدیگر مقایسه خواهند شد؛ بدین صورت که سایر عوامل مؤثر نظیر جنس توری، میزان رطوبت جریان برخوردی به توری و سرعت برخورد جریان مه با توری ثابت نگه داشته شده و با تغییر ماژول نگهدارنده توری و ساختار توری، میزان نرخ استحصال آب اندازه‌گیری می‌شود. در آخر میزان تأثیر تغییر دادن ماژول و تغییر دادن ساختار توری بر نرخ استحصال آب، تعیین شده و موثرترین عامل از بین آن دو انتخاب

همان‌طور که از جدول ۱ مشخص است، در سالیان اخیر بیش‌تر مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی افزایش نرخ استحصال آب از مه، بر مبنای ساخت مش‌های دوبخشی آبدوست و آب‌گریز می‌باشد که با وجود تأثیر مثبت در افزایش نرخ استحصال، بسیاری از آن‌ها با برآورده کردن نیازهای زندگی واقعی فاصله زیادی دارند؛ چرا که هزینه‌ی تولید توری‌ها و راه‌اندازی فرایندها بالا بوده و همچنین بزرگ کردن مقیاس‌ها از آزمایشگاهی به صنعتی بسی دشوار است. این در حالی است که فرایند استحصال آب از مه به عوامل متعددی نظیر شدت جریان باد، پیکربندی ماژول نگهدارنده توری، ساختار توری، جنس توری و ... بستگی دارد که بهتر است بر روی تأثیر این پارامترها



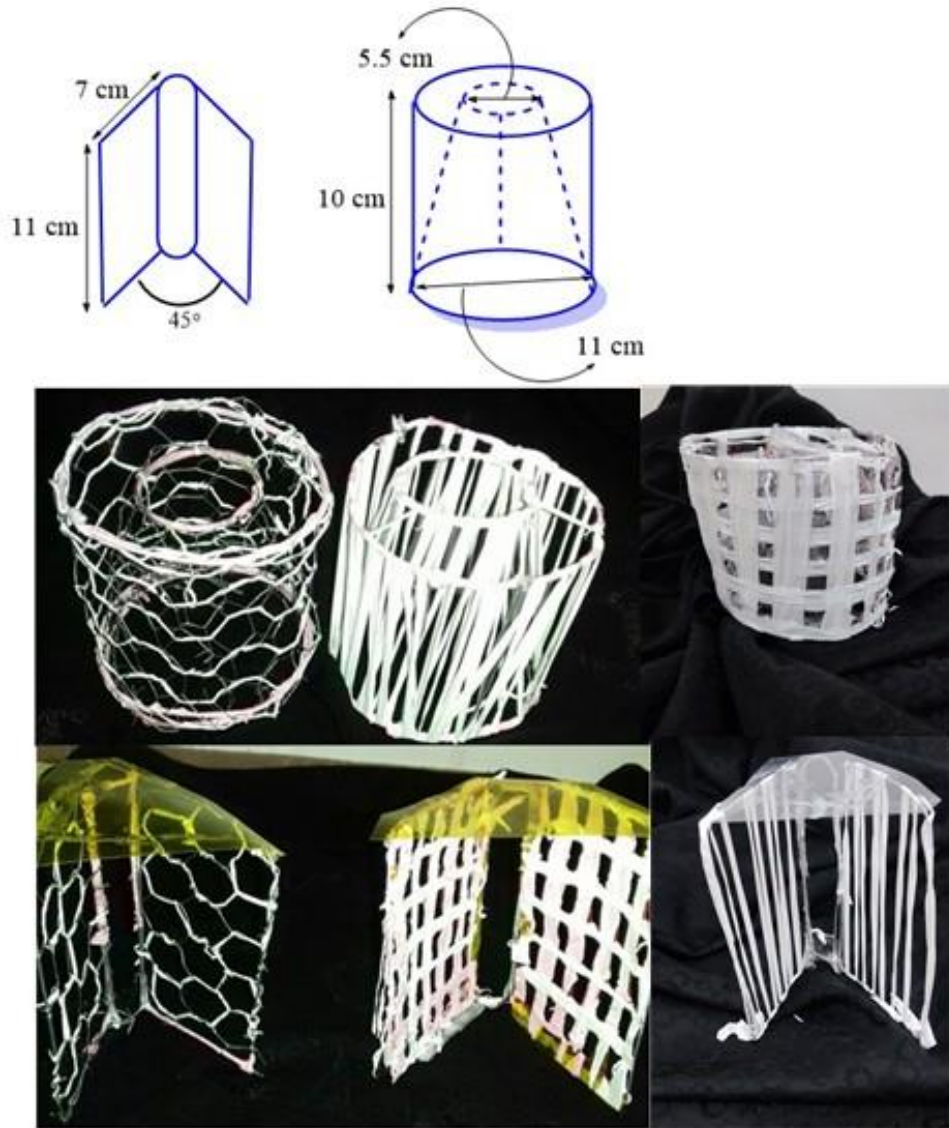
شکل ۱. چیدمان آزمایش. تصویر بالا: طرح‌واره چیدمان آزمایش، تصویر پایین: چیدمان واقعی آزمایش

Fig. 1. Experimental setup. Upper picture: Schematic setup. Lower picture: Real setup

است. ماژول مثلثی کانال باز با بهره‌گیری از نتایج حاصل از تحقیق هولمز و همکاران [۴] و ماژول ۲ استوانه‌ای نیز با بهره‌گیری از نتایج حاصل از موسوی بیگی [۲۱] انتخاب شدند. با ساخت این ۲ ماژول در ابعاد آزمایشگاهی که در ادامه ابعاد آن‌ها مشخص شده‌اند، می‌توان در راستای هدف پروژه پیشروی کرد.

خواهد شد. از آنجایی که در این پروژه می‌بایست میزان تاثیرگذاری توری و ماژول با یکدیگر مقایسه شوند، باید ماژول‌هایی طراحی شوند که از نظر ساختاری کم‌ترین آسیب را در برابر جریان مه از خود نشان دهند. از این رو ۲ ماژول مثلثی کانال باز و ماژول ۲ استوانه‌ای طراحی و ساخته شدند. منطبق به کاررفته در طراحی بر اساس نتایج منتشر شده در منابع علمی





شکل ۲. ماژول‌های مورد استفاده در آزمایش. تصویر بالا: طرح‌واره ماژول‌ها، تصویر میانی: ماژول ۲ - استوانه‌ای تصویر پایین: ماژول مثلثی کانال باز

**Fig. 2. Employed modules in experiment. Upper picture: Schematic modules. Middle picture: double cylindrical module. Lower picture: Modular Funnel-Large Fog collector (MF-LFC) module**

مثلثی کانال باز با توری راشل، ماژول مثلثی کانال باز با توری تارهای تفلونی، مخزن جمع‌آوری آب و وسایل لازم برای اندازه‌گیری دما، رطوبت نسبی و میزان آب جمع‌آوری شده می‌باشد. در این آزمایش دمای محیط  $20 \pm 2$  درجه‌ی سلسیوس، میزان رطوبت نسبی ۹۰-۸۰ درصد، شدت جریان مه ۵۵۰ میلی‌لیتر بر ساعت و فاصله‌ی دستگاه تولیدکننده بخار از توری ۸ سانتی‌متر می‌باشد. برای اندازه‌گیری دمای محیط از دماسنج و رطوبت‌سنج الکتریکی عقربه‌ای DYWSJ ساخت کشور ایران که دقت دماسنج آن ۲

## ۲- شرح آزمایش

در این تحقیق به صورت تجربی، میزان تأثیر ماژول نگهدارنده‌ی توری و ساختار توری بر افزایش نرخ استحصال آب از مه، مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو تجهیزات مورد استفاده در این آزمایش شامل: دستگاه تولیدکننده‌ی بخار، محفظه‌ی ۳ راهی، ماژول ۲ - استوانه‌ای با توری ۶ - ضلعی، ماژول ۲ - استوانه‌ای با توری تارهای تفلونی، ماژول ۲ - استوانه‌ای با توری راشل (شکل ۳) ماژول مثلثی کانال باز با توری ۶ - ضلعی، ماژول



شکل ۳. ساختار توری‌های مورد استفاده در آزمایش. تصویر سمت چپ: توری راشل [۲۴]، تصویر میانی: توری ۶ - ضلعی تصویر سمت راست: توری تارهای تفلونی

Fig. 3. Structure of meshes employed in experiment. left picture: Rachel mesh [24]. Middle picture: Hexagonal mesh. Right picture: Teflon yarns mesh

مربع و یک توری دیگر استوانه‌ای خارجی با مساحت جانبی  $347/57$  سانتی‌متر مربع را احاطه کرده است. همچنین ماژول مثلثی کانال باز از ۲ صفحه‌ی مستطیلی با عرض ۱۱ و طول ۷ سانتی‌متر تشکیل شده است که با یکدیگر زاویه‌ی ۴۵ درجه می‌سازند که ۲ توری مستطیل شکل به ابعاد ۷ در ۱۱ سانتی‌متر به روی آن تعبیه شده‌اند. توری‌ها همگی دارای روکش تفلونی هستند که به دلیل داشتن زاویه‌ی تماس سطح ۱۰۶ درجه [۲۳]، یک سطح آب‌گریز محسوب می‌شود. طرح‌واره کلی و مدل واقعی از هر ۲ ماژول در شکل ۲ آورده شده‌اند.

باتوجه به هدف تحقیق، از ۳ نوع توری تارهای تفلونی، ۶ - ضلعی و راشل استفاده شده است. ساختار هر کدام از توری‌ها در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. تمامی توری‌ها بر روی هر ۲ ماژول مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

هدف از این تحقیق مقایسه‌ی ماژول ۲ - استوانه‌ای و ماژول مثلثی کانال باز، همچنین مقایسه‌ی توری راشل و توری تارهای تفلونی است که در نهایت منجر به تعیین میزان تاثیرگذاری توری و ماژول بر نرخ استحصال آب می‌شود. برای به نتیجه رسیدن این مقایسه‌ها ۳ توری ۶ - ضلعی، تارهای تفلونی و راشل بر روی ۲ ماژول ۲ - استوانه‌ای و مثلثی کانال باز نصب می‌شوند و میزان نرخ استحصال آب از مه اندازه‌گیری می‌شود و پس از تعیین شدن بهترین توری و بهترین ماژول میزان تاثیرگذاری هر کدام بر افزایش نرخ استحصال آب بررسی خواهد شد.

درجه‌ی سلسیوس و دقت رطوبت‌سنج آن ۵ درصد می‌باشد استفاده شده است. برای اندازه‌گیری حجم آب استحصال شده از سرنگ انسولین ۱ میلی‌لیتری آوا ساخت کشور ایران که دارای دقت  $0/01$  می‌باشد استفاده شده است. طرح شماتیک و واقعی از چیدمان آزمایش در شکل ۱ آورده شده است. برای جریان مه از دستگاه تولیدکننده‌ی بخار (ALPX مدل GS528B ساخت کشور چین) استفاده شده است که جریان بخار را از یک سمت وارد محفظه‌ی ۳ راهی می‌کند. در داخل محفظه‌ی ۳ راهی، مجموعه‌ی ماژول و توری قرار می‌گیرند که جریان بخار پس از ورود به محفظه با ماژول و توری برخورد می‌کند. جریان بخار پس از برخورد با ماژول و توری از سمت دیگر محفظه‌ی ۳ راهی خارج می‌شود. قطرات آب تولید شده بر روی توری، با کمک نیروی جاذبه، از پایین محفظه که خروجی سوم می‌باشد، به مخزن جمع‌آوری آب تخلیه می‌شود و در آخر میزان آب جمع‌آوری شده اندازه‌گیری می‌شود. لازم به ذکر است که برای خنثی‌کردن تأثیر جنس توری بر نرخ استحصال آب، تمامی توری‌ها دارای روکش تفلونی هستند.

در این تحقیق، ماژول ۲ - استوانه‌ای از یک استوانه به قطر ۱۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر تشکیل شده است که در داخل آن یک مخروط ناقص هم مرکز با آن قرار گرفته است که دارای ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، قطر مقطع پایینی ۱۱ سانتی‌متر و قطر مقطع بالایی  $5/5$  سانتی‌متر می‌باشد. در این ماژول یک توری، نیمه مخروط داخلی با مساحت جانبی  $259/18$  سانتی‌متر

جدول ۲. مقادیر میانگین آب جمع‌آوری شده

Table 2. Averaged amount of collected water

نرخ استحصال آب بر حسب	توری	ماژول
$\frac{l}{m^3 \cdot day}$		
۷/۲۸	تارهای تفلونی	۲ - استوانه‌ای
۵/۰۶	۶ ضلعی	۲ - استوانه‌ای
۵/۶۲	راشل	۲ - استوانه‌ای
۶۲/۵۸	تارهای تفلونی	مثلثی کانال باز
۳۵/۳۸	۶ ضلعی	مثلثی کانال باز
۵۰/۰۷	راشل	مثلثی کانال باز

۲۳ درصد عملکرد بهتر نسبت به توری راشل می‌باشد. در ماژول مثلثی کانال باز نیز، توری تارهای تفلونی با نرخ استحصال روزانه ۶۲/۵۸ لیتر به‌ازای هر مترمربع از توری، دارای ۷۷ درصد عملکرد بهتر نسبت به توری ۶ - ضلعی و ۲۵ درصد عملکرد بهتر نسبت به توری راشل می‌باشد. باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده، از نظر توری، توری تارهای تفلونی بهترین عملکرد و توری ۶ - ضلعی ضعیف‌ترین عملکرد را در بین توری‌ها دارا می‌باشند. نکته‌ی جالب‌توجه این که با مقایسه‌ی ماژول ۲ - استوانه‌ای و ماژول مثلثی کانال باز با در نظر گرفتن میزان نرخ استحصال توری‌ها بر روی هر کدام از ماژول‌ها، مشاهده می‌شود که باتوجه‌به ثابت بودن توری، ماژول مثلثی کانال باز، ۷ تا ۹ برابر عملکرد بهتری نسبت به ماژول ۲ - استوانه‌ای داشته است؛ بدین صورت که با استفاده از تارهای تفلونی به‌عنوان توری ثابت با تغییر ماژول ۲ - استوانه‌ای به ماژول مثلثی کانال باز، نرخ استحصال آب به میزان ۸/۶ برابر افزایش می‌یابد. با ایجاد همین تغییر ماژول‌ها، در صورتی که توری راشل و توری ۶ - ضلعی ثابت باشند، نرخ استحصال آب به ترتیب ۹ و ۷ برابر افزایش می‌یابد.

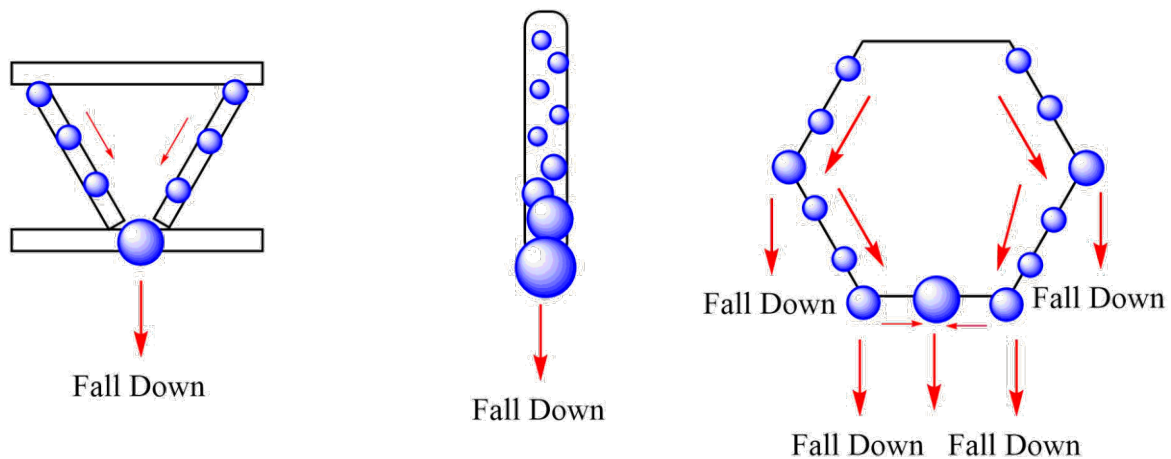
هر کدام از مجموعه‌های توری و ماژول در محفظه‌ی ۳ راهی قرار گرفته (طبق شکل ۱) و به مدت ۱ ساعت در برابر جریان بخار قرار می‌گیرند و میزان قطرات آب جمع‌آوری شده در مخزن، اندازه‌گیری می‌شود و در نهایت با بررسی نتایج حاصل شده میزان تاثیرگذاری توری و ماژول بر نرخ استحصال آب از مه تعیین خواهد شد. لازم به ذکر است که تکرارپذیری آزمایش‌ها انجام گردید و آزمایش‌ها دارای تکرارپذیری معقولی بودند.

### ۳- نتایج و بحث

هر کدام از ۶ مجموعه‌ی ماژول و توری، یعنی ماژول ۲ - استوانه‌ای با توری تارهای تفلونی، توری ۶ - ضلعی و راشل و ماژول مثلثی کانال باز با توری تارهای تفلونی، توری ۶ - ضلعی و راشل، در محفظه در مقابل جریان بخار قرار گرفتند که میانگین میزان آب جمع‌آوری شده توسط هر مجموعه در جدول ۲ ارائه شده است:

طبق جدول ۲ ملاحظه می‌شود که در ماژول ۲ - استوانه‌ای توری تارهای تفلونی با نرخ استحصال روزانه ۷/۲۸ لیتر به‌ازای هر مترمربع از توری، دارای ۴۴ درصد عملکرد بهتر نسبت به توری ۶ - ضلعی و





شکل ۴. نحوه‌ی هسته‌زایی و تشکیل قطرات در توری‌ها، تصویر سمت چپ: توری راشل (برگرفته از [۲۵])، تصویر میانی: توری تارهای تفلونی، تصویر سمت راست: توری ۶ - ضلعی

Fig. 4. Nucleation and droplet formation on the surface of meshes. left picture: Rachel mesh (redrawn from [25]). Middle picture: Teflon yarns mesh. Right picture: Hexagonal mesh

توری راشل و تارهای تفلونی، هسته‌زایی به‌خوبی انجام شده و به دلیل حرکت هسته‌ها در جهت همسو با یکدیگر و پیوستن آن‌ها به یکدیگر، قطرات درشت‌تری تشکیل شده و میزان نرخ استحصال آب افزایش می‌یابد. در این بین، در توری تارهای تفلونی، جهت حرکت هسته‌ها فقط به یک سمت می‌باشد و سبب تشکیل سریع‌تر قطرات درشت‌تر آب نسبت به توری راشل می‌شود که دارای ۲ جهت حرکت می‌باشد. به همین سبب، توری تارهای تفلونی دارای عملکرد بهتری نسبت به توری راشل می‌باشد.

قابلیت توری‌ها و یا سطوح مه‌گیر در هسته‌زایی و تشکیل قطرات درشت‌تر با هدایت درست هسته‌ها، تأثیر بسزایی در نرخ استحصال دارد [۵]. تک‌جهتی بودن مسیر حرکت هسته‌ها نیز به نوبه‌ی خود بر میزان استحصال آب مؤثر است [۲۶]. بر همین اساس توری تارهای تفلونی عملکرد بهتری نسبت به سایر توری‌ها از خود نشان داد.

عملکرد بهتر ماژول مثلثی کانال باز نسبت به ماژول ۲ - استوانه‌ای که با کنترل نمودن سایر عوامل مؤثر حاصل شد را این‌گونه می‌توان توجیه کرد که نیروی پسای ماژول مثلثی کانال باز در برابر جریان بخار (باد) بیش‌تر از نیروی پسای ماژول ۲ - استوانه‌ای است؛ بدین صورت که اگر ماژول نگهدارنده‌ی توری، مقاومت کم‌تری در برابر جریان بخار (باد) از خود نشان دهد، قطرات موجود در جریان بخار، با الگوی جریان بخار همگام شده و از توری عبور می‌کند که سبب می‌شود نرخ استحصال بسیار کاهش

در این تحقیق، تمامی عوامل مؤثر بر نرخ استحصال آب از مه کنترل شده و صرفاً تأثیر ساختار توری و ماژول نگهدارنده توری مورد بررسی قرار گرفته است؛ بدین صورت که آزمایش‌ها در شرایط دمایی یکسان  $20 \pm 2$  درجه‌ی سلسیوس انجام شده‌اند؛ شدت جریان بخار و رطوبت نسبی دستگاه تولیدکننده بخار به ترتیب به میزان ۵۵۰ میلی‌لیتر بر ساعت و ۹۰-۸۰ درصد ثابت شده‌اند و میزان رطوبت نسبی و دما با استفاده از دماسنج و رطوبت‌سنج در طول آزمایش اندازه‌گیری و بررسی می‌شوند. با انتخاب کردن روکش تفلونی و در نظر گرفتن فاصله‌ی ۸ سانتی‌متری از منبع تولید بخار برای تمامی توری‌ها، شرایط یکسانی از نظر جنس و فاصله از منبع تولید بخار برای تمامی توری‌ها فراهم کرده تا بدین ترتیب تأثیر این دو پارامتر در تمامی آزمایش‌ها یکسان باشد. از این‌رو عملکرد بهتر توری تارهای تفلونی نسبت به سایر توری‌های را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که میزان تراکم قطرات آب تشکیل شده بر روی تارهای تفلونی، نسبت به توری‌های ۶ - ضلعی و راشل بیش‌تر است و هسته‌زایی قطرات بهتر صورت می‌گیرد. برای درک بهتر این موضوع، شکل ۴، نحوه‌ی تشکیل قطرات و هسته‌زایی هر یک از توری‌ها را نشان می‌دهد:

طبق شکل ۴ ملاحظه می‌شود که به سبب ساختار توری ۶ - ضلعی، به قطرات آب اجازه‌ی هسته‌زایی و پیوستن آن‌ها به یکدیگر، داده نمی‌شود. از این‌رو قطرات کوچک‌تری در مدت‌زمان مشخص جمع‌آوری شده که سبب کاهش مقدار آب جمع‌آوری شده می‌شود؛ این در حالی است که در ساختار

نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که توری تارهای تفلونی، به دلیل قابلیت هسته‌زایی بالا و تک‌جهتی بودن جریان هسته‌ها در این توری که منجر به تشکیل سریع‌تر قطرات درشت آب می‌شد، عملکرد بهتری نسبت به سایر توری‌ها داشت. به بیان دیگر توری تارهای تفلونی به ترتیب ۴۴ تا ۷۷ درصد و ۳۳ تا ۲۵ درصد عملکرد بهتری را نسبت به توری ۶ ضلعی و توری راشل از خود نشان داد. از طرف دیگر ماژول مثلثی کانال باز به دلیل ساختار منحصربه‌فرد آیرودینامیکی خود، آمار فوق‌العاده‌ای به‌جای گذاشت و سبب افزایش ۷ تا ۹ برابری نرخ استحصال آب از مه شد. نتایج حاصل به‌وضوح گویای این مطلب هستند که علاوه بر جنس توری، با تمرکز بر ساختار آیرودینامیکی ماژول‌ها، می‌توان افزایش نرخ استحصال آب از مه را به‌صورت قابل‌توجهی افزایش داد.

### منابع

- [1] M. Fessehaye, S.A. Abdul-Wahab, M.J. Savage, T. Kohler, T. Gherezghiher, H. Humni, Fog-water collection for community use, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29 (2014) 52-62.
- [2] M.M. Mekonnen, A.Y. Hoekstra, Four billion people facing severe water scarcity, *Science advances*, 2(2) (2016) e1500323.
- [3] M.A. Imteaz, G. Al-Hassan, A. Shanableh, J. Naser, Development of a mathematical model for the quantification of fog-collection, *Resources, conservation and recycling*, 57 (2011) 10-14.
- [4] R. Holmes, J. de Dios Rivera, E. de la Jara, Large fog collectors: New strategies for collection efficiency and structural response to wind pressure, *Atmospheric Research*, 151 (2015) 236-249.
- [5] D. Song, B. Bhushan, Enhancement of water collection and transport in bioinspired triangular patterns from combined fog and condensation, *Journal of colloid and interface science*, 557 (2019) 528-536.
- [6] L. Zhong, H. Zhu, Y. Wu, Z. Guo, Understanding how surface chemistry and topography enhance fog harvesting based on the superwetting surface with patterned hemispherical bulges, *Journal of colloid and interface*

یابد. از طرفی با بالا بودن نیروی پسا، سرعت جریان بخار در سطح توری کاهش‌یافته و قطرات آب به‌راحتی از توری عبور نمی‌کنند و نرخ استحصال افزایش می‌یابد. ماژول ۲ - استوانه‌ای نیز به دلیل دارا بودن انحنا، دارای نیروی پسای کم‌تری نسبت به ماژول مثلثی کانال باز که دارای صفحات تخت است، می‌باشد. تأثیر نیروی پسا در نرخ استحصال آب در نوع توری‌ها نیز مشهود است؛ چرا که در جدول ۱ ملاحظه شد که هنگامی که توری تارهای تفلونی به‌عنوان توری ثابت استفاده شد و ماژول ۲ - استوانه‌ای به ماژول مثلثی کانال باز تغییر یافت، نرخ استحصال آب ۸/۶ برابر افزایش یافت؛ درحالی‌که با استفاده از توری راشل و توری ۶ - ضلعی به‌عنوان توری ثابت و تغییر ماژول ۲ - استوانه‌ای به ماژول مثلثی کانال باز، نرخ استحصال آب به ترتیب ۹ و ۷ برابر افزایش یافت که این‌گونه می‌توان آن را توجیه کرد که توری راشل دارای بیش‌ترین ضریب پسا و توری ۶ - ضلعی دارای کم‌ترین ضریب پسا می‌باشد. همچنین، اگر اختلاف نیروی پسای مجموعه‌ی توری راشل و ماژول کانال مثلثی باز و مجموعه‌ی توری راشل و ماژول ۲ - استوانه‌ای برابر A و اختلاف نیروی پسای مجموعه‌ی توری تارهای تفلونی و ماژول کانال مثلثی باز و مجموعه‌ی توری تارهای تفلونی و ماژول ۲ - استوانه‌ای برابر B و اختلاف نیروی پسای مجموعه‌ی توری ۶ - ضلعی و ماژول کانال مثلثی باز و مجموعه‌ی توری ۶ - ضلعی و ماژول ۲ - استوانه‌ای برابر C در نظر گرفته شود، چون  $C < B < A$  می‌باشد، میزان افزایش نرخ استحصال آب هنگامی که توری راشل به‌عنوان توری ثابت استفاده می‌شود و ماژول ۲ - استوانه‌ای به ماژول مثلثی کانال باز تغییر می‌یابد، از هنگامی که ۲ توری تارهای تفلونی و ۶ - ضلعی به‌عنوان توری ثابت باشند و تغییر ماژول‌ها صورت گیرد، بیش‌تر خواهد بود. لازم به ذکر است که بالا بودن نیروی پسا، یک میزان بهینه دارد و اگر مقدار آن از یک حدی تجاوز کند باعث کاهش نرخ استحصال آب خواهد شد.

به‌طور کلی با تمرکز بر ساختار آیرودینامیکی ماژول‌های نگهدارنده‌ی توری و استفاده بهینه از شدت جریان مه، می‌توان نرخ استحصال آب را به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای افزایش داد [۴].

### ۴- نتیجه‌گیری

در این پروژه، با به‌کارگیری ۳ نوع توری، توری تارهای تفلونی، توری ۶ - ضلعی و توری راشل و همچنین ۲ ماژول نگهدارنده‌ی توری، ماژول ۲ - استوانه‌ای و ماژول مثلثی کانال باز، میزان تاثیرگذاری توری و ماژول نگهدارنده توری بر نرخ استحصال آب از مه، مورد بررسی قرار گرفت.

- A simple way to achieve bioinspired hybrid wettability surface with micro/nanopatterns for efficient fog collection, *Nanoscale*, 9(38) (2017) 14620-14626.
- [16] A. Almasian, G.C. Fard, M. Mirjalili, M.P. Gashti, Fluorinated-PAN nanofibers: Preparation, optimization, characterization and fog harvesting property, *Journal of industrial and engineering chemistry*, 62 (2018) 146-155.
- [17] M. Azad, D. Ellerbrok, W. Barthlott, K. Koch, Fog collecting biomimetic surfaces: Influence of microstructure and wettability, *Bioinspiration & biomimetics*, 10(1) (2015) 016004.
- [18] J. Knapczyk-Korczak, P.K. Szewczyk, U. Stachewicz, The importance of nanofiber hydrophobicity for effective fog water collection, *RSC Advances*, 11(18) (2021) 10866-10873.
- [19] B. Malani S, P. Viswanath, Wettability Contrast in the Hexagonally Patterned Gold Substrate of Distinct Morphologies for Enhanced Fog Harvesting, *Langmuir*, 37(27) (2021) 8281-8289.
- [20] M.N. Uddin, F.J. Desai, M.M. Rahman, R. Asmatulu, A highly efficient fog harvester of electrospun permanent superhydrophobic–hydrophilic polymer nanocomposite fiber mats, *Nanoscale Advances*, 2(10) (2020) 4627-4638.
- [21] M. Mousavi-baygi, The implementation of fog water collection systems in Northeast of Iran, *International Journal of Pure and Applied Physics*, 4(1) (2008) 13-21.
- [22] R. Wang, Q. Ye, J. Wu, B. Chen, X. Zhu, Janus Membrane with Bioinspired Heterogeneous Morphology for Efficient Fog Harvesting, *ACS ES&T Engineering*, (2021).
- [23] J. Włoch, A.P. Terzyk, M. Wiśniewski, P. Kowalczyk, Nanoscale water contact angle on Polytetrafluoroethylene surfaces characterized by molecular Dynamics–Atomic force microscopy imaging, *Langmuir*, 34(15) (2018) 4526-4534.
- [24] Malla Raschel Decorativa Premium de 2,1 × 50 m color Argento - Marienberg, in, November 9,2021.
- science, 525 (2018) 234-242.
- [7] H. Zhou, M. Zhang, C. Li, C. Gao, Y. Zheng, Excellent Fog-Droplets Collector via Integrative Janus Membrane and Conical Spine with Micro/Nanostructures, *Small*, 14(27) (2018) 1801335.
- [8] Y. Su, L. Chen, Y. Jiao, J. Zhang, C. Li, Y. Zhang, Y. Zhang, Hierarchical Hydrophilic/Hydrophobic/Bumpy Janus Membrane Fabricated by Femtosecond Laser Ablation for Highly Efficient Fog Harvesting, *ACS Applied Materials & Interfaces*, (2021).
- [9] H. Bai, T. Zhao, X. Wang, Y. Wu, K. Li, C. Yu, L. Jiang, M. Cao, Cactus kirigami for efficient fog harvesting: simplifying a 3D cactus into 2D paper art, *Journal of Materials Chemistry A*, 8(27) (2020) 13452-13458.
- [10] X. Dai, N. Sun, S.O. Nielsen, B.B. Stogin, J. Wang, S. Yang, T.-S. Wong, Hydrophilic directional slippery rough surfaces for water harvesting, *Science advances*, 4(3) (2018) eaaq0919.
- [11] Y. Gao, J. Wang, W. Xia, X. Mou, Z. Cai, Reusable Hydrophilic–superhydrophobic patterned weft backed woven fabric for high-efficiency water-harvesting application, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(6) (2018) 7216-7220.
- [12] C. Li, Y. Liu, C. Gao, X. Li, Y. Xing, Y. Zheng, Fog harvesting of a bioinspired nanocone-decorated 3D fiber network, *ACS applied materials & interfaces*, 11(4) (2019) 4507-4513.
- [13] V. Sharma, D. Orejon, Y. Takata, V. Krishnan, S. Harish, *Gladiolus dalenii* based bioinspired structured surface via soft lithography and its application in water vapor condensation and fog harvesting, *Acs sustainable chemistry & engineering*, 6(5) (2018) 6981-6993.
- [14] C. Wen, H. Guo, H. Bai, T. Xu, M. Liu, J. Yang, Y. Zhu, W. Zhao, J. Zhang, M. Cao, Beetle-inspired hierarchical antibacterial interface for reliable fog harvesting, *ACS applied materials & interfaces*, 11(37) (2019) 34330-34337.
- [15] K. Yin, H. Du, X. Dong, C. Wang, J.-A. Duan, J. He,

- [26] V. Sharma, H. Ali-Löyty, A. Koivikko, K. Yiannacou, K. Lahtonen, V. Sariola, Copper oxide microtufts on natural fractals for efficient water harvesting, *Langmuir*, 37(11) (2021) 3370-3381.
- [25] 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.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. R. Mohebi, M. Mozaffarian, M. Karimi, *Investigating the Effect of Mesh Structure and Mesh Retaining Module on the Rate of Fog Harvesting, Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(7) (2022) 1575-1586.

DOI: [10.22060/mej.2022.20812.7320](https://doi.org/10.22060/mej.2022.20812.7320)

