



بررسی آزمایشگاهی تأثیر تعداد موج قطره‌گیر تیغه‌ای بر راندمان جمع‌آوری، افت فشار قطره‌گیر و عملکرد برج خنک‌کن تر

رضا ذبیحی قادی، فرهاد طالبی*، روح الله رفعی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۶
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۰۱
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۰۱

کلمات کلیدی:

قطره‌گیر
دبی آب جبرانی
راندمان بروندی
راندمان جمع‌آوری
افت فشار هوا

خلاصه: در این مقاله، تأثیر استفاده از سه مدل قطره‌گیر با تعداد موج متفاوت در یک طول کلی ثابت بر دبی آب جبرانی و راندمان بروندی برج خنک‌کن و راندمان جمع‌آوری و افت فشار قطره‌گیر مورد بررسی قرار گرفته است. این قطره‌گیرها در سه مدل شامل: نوع الف با یک موج، نوع ب با دو موج و نوع ج با سه موج و از جنس آهن گالوانیزه ساخته شدند. هدف اصلی از بررسی این موضوع، بررسی تأثیر استفاده از قطره‌گیر بر عملکرد برج خنک‌کن است. بر این اساس، آزمایش‌هایی در برج خنک‌کن آزمایشگاهی در شرایط ثابت محیطی از نظر دما و رطوبت بر روی آن‌ها صورت گرفت و پارامترهایی شامل: دبی جرمی هوا، دبی جرمی آب و دمای آب ورودی به برج به عنوان پارامترهای ثابت فرض شد. اعتبارسنجی این آزمایش‌ها از دو طریق تکرارپذیری با تکرار پنج‌گانه برای هر نوع قطره‌گیر و محاسبه عدم قطعیت پارامترهای مشتق شده از دما و سرعت انجام شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از این قطره‌گیرها می‌تواند موجب افزایش ۴۸ درصدی راندمان جمع‌آوری و کاهش ۲۰ درصدی دبی آب جبرانی برج خنک‌کن شود. از طرف دیگر استفاده از این قطره‌گیرها افت فشار جریان هوا را به میزان ۷۰ درصد به ازای هر موج و راندمان بروندی برج را تا ۱۸/۵ درصد افزایش می‌دهد.

۱- مقدمه

میکروارگانیزم‌ها به همراه خود به اتمسفر است که از جمله آن‌ها مجموعه‌ای از باکتری‌هاست که به لژیونلا شهرت دارد. کاهش مصرف آب و جلوگیری از انتشار این قطرات از برج به اتمسفر، عامل بسیار مهمی در طراحی و ساخت برج‌های خنک‌کن تر است [۱].

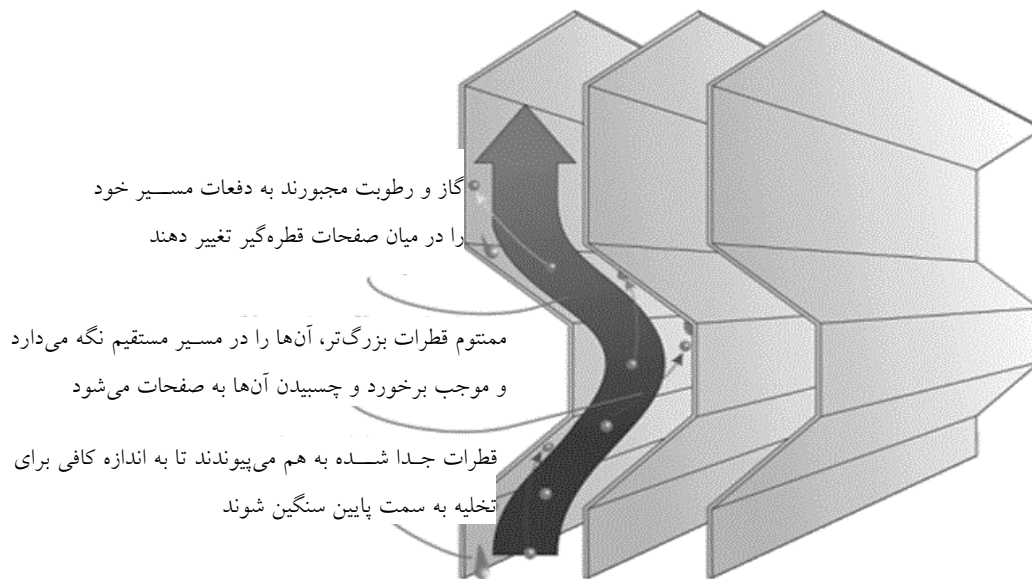
استفاده از قطره‌گیر تیغه‌ای موجب کاهش قطرات خروجی از برج و در نتیجه کاهش مصرف آب می‌شود. این امر با توجه به بحران کمبود آب در جهان بسیار دارای اهمیت است. از این رو تحقیقات در این خصوص ادامه دارد. علاوه بر این استفاده از قطره‌گیر بر عملکرد حرارتی برج تأثیر مثبت دارد و می‌تواند موجب افزایش آن شود. این ویژگی می‌تواند تأثیر مثبتی بر عملکرد سایر دستگاه‌های مرتبط با برج خنک‌کن از جمله چیلرهای آب خنک و دیگر دستگاه‌های مورد استفاده در صنعت داشته باشد. همچنین وجود قطره‌گیر به دلیل افزایش افت فشار در مسیر جریان هوا، موجب کاهش دبی هوای عبوری از برج می‌شود. این اثر می‌تواند در برج‌های با جابجایی طبیعی که در آن‌ها حرکت هوا فقط در اثر اختلاف چگالی هوا بین ورودی و خروجی برج است، مضر باشد. در برج‌های با جابجایی اجباری، افت فشار ناشی از

برج‌های خنک‌کن تر دستگاه‌هایی هستند که معمولاً برای تخلیه حرارت از واحدهای تولید انرژی، سیستم‌های تبرید و تهویه آب‌خنک و فرآیندهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این حجم از حرارت باید برای حفظ پارامترهای عملکردی سیستم در شرایط کارکرد، به صورت مستمر حذف شود. اساس کار برج‌های خنک‌کن تر بر مبنای انتقال جرم و حرارت با استفاده از تماس مستقیم بین هوای محیط و آب گرم است. در این دستگاه، باید آب توسط یک سیستم پخش‌کننده به درون یک مجموعه مبدل حرارت (پکینگ) که از میان آن هوا عبور می‌کند، پاشیده شود. در نتیجه، تعدادی از قطرات آب به جریان هوا می‌پیوندند و بسته به سرعت هوا ممکن است به خارج از برج هدایت شوند. این قطرات خروجی به دریفت معروف شده‌اند که مستقل از اتلاف آب ناشی از تبخیر هستند [۱].

میزان قطرات خروجی از برج خنک‌کن به دلایل مختلفی حائز اهمیت هستند. دلایل اصلی آن افزایش مصرف آب و انتقال مواد شیمیایی و

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ftalebi@semnan.ac.ir





شکل ۱. مکانیزم جداسازی قطرات در قطره‌گیر تیغه‌ای [۳]

Fig. 1. Mechanism of separating droplets in vane type drift eliminator [3]

در قطره‌گیرهای تیغه‌ای قطرات بزرگ ممکن است به قطرات کوچک‌تر تبدیل شوند که قطرات ثانویه نام دارند. وقتی هوا وارد مجرای قطره‌گیر تیغه‌ای می‌شود، (۱ در شکل ۲) قطرات ثانویه به سه روش ایجاد می‌شوند [۴]:

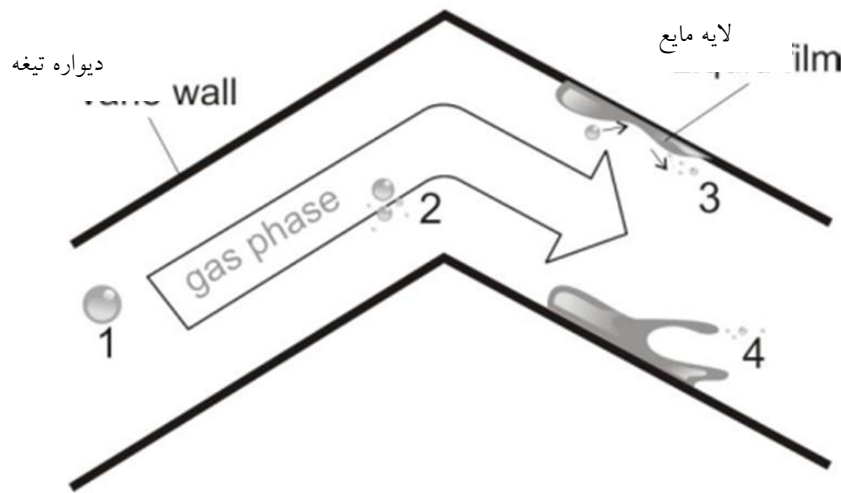
- (۱) شکست قطرات به دلیل برخورد با فاز پیوسته (۲ در شکل ۲)
 - (۲) شکست قطرات به دلیل برخورد با فیلم مایع (۳ در شکل ۲)
 - (۳) شکست فیلم مایع بر اثر فشار هوای در حال عبور (۴ در شکل ۲)
- برای قطر قطره یک مقدار بحرانی وجود دارد که زیر آن مقدار، راندمان جمع‌آوری به شدت کاهش می‌یابد و این مقدار بحرانی با افزایش سرعت هوا کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، افزایش سرعت هوا برای حذف قطرات کوچک‌تر مفید است. نکته مهم دیگر این است که قطرات بزرگ بر اثر افزایش سرعت هوا به دیواره برخورد می‌کنند که منجر به تشکیل قطرات کوچک‌تر و سخت‌تر شدن جداسازی آن می‌شود. برای حل این مشکل، به تیغه‌ها کانال تخلیه اضافه می‌گردد. کانال‌های تخلیه به جداسازی قطره‌ها و افزایش سرعت در محل نصب آن‌ها کمک می‌کنند؛ بنابراین راندمان قطره‌گیر را حتی در سرعت ورودی کم، بالا می‌برند [۵].

در قطره‌گیرهای تیغه‌ای، سرعت هوا، سرعت متوسطی است که هوا و قطرات مایع همراه آن، وارد قطره‌گیر می‌شوند و به صورت دبی هوا تقسیم بر

وجود قطره‌گیر می‌تواند با افزایش توان موتور فن جبران شود. بنابراین برای کاهش هزینه در برج‌های خنک‌کن با قطره‌گیر، افت فشار باید در کمترین مقدار ممکن باشد [۱ و ۲].

قطره‌گیرهای تیغه‌ای جریان هوا را مجبور می‌کنند که تغییر مسیر دهند. تغییرات در مسیر جریان هوا به علاوه اصطکاک بین دیواره صفحات و قطرات مایع، منجر به برخورد قطرات به صفحات قطره‌گیر و به هم پیوستن آن‌ها و تخلیه مایع به پایین بر اثر نیروی وزن می‌شود. شکل ۱ مکانیزم تأثیر اصطکاک و تغییر مسیر جریان هوا در درون قطره‌گیر تیغه‌ای را نشان می‌دهد [۳].

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، تیغه‌ها مسیر هوا را تغییر می‌دهند ولی تعدادی از قطرات در مسیر مستقیم حرکت می‌کنند و به تیغه‌ها برخورد می‌کنند. سپس بر روی سطح می‌چسبند و در نهایت بر اثر نیروی وزن به سمت پایین حرکت می‌کنند. اگر جنس تیغه آب‌گریز نباشد و اصطکاک کافی باشد، لایه تشکیل شده روی سطح می‌تواند موجب به هم پیوستن قطرات و تخلیه آن‌ها شود. در قطره‌گیرهای تیغه‌ای عوامل زیادی تعیین می‌کنند که آیا قطره به سطح برخورد می‌کند و یا به همراه جریان هوا می‌پیچد و به حرکت ادامه می‌دهد، از جمله: ابعاد قطره، فاصله بین صفحات، سرعت هوا، جنس صفحات و زاویه خم [۳].



شکل ۲. روش‌های ایجاد قطره ثانویه در قطره‌گیر تیغه‌ای [۴]

Fig. 2. Methods of creation secondary droplets in wane type drift eliminator [4]

استفاده قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که افزایش فاصله بین صفحات از ۲۵ تا ۳۵ میلی‌متر موجب کاهش راندمان جمع‌آوری شده اما تغییری در افت فشار ایجاد نمی‌کند.

استخرسر و همکاران [۸] در مطالعه‌ای اثرات طول موج و تعداد تغییر جهت بر عملکرد قطره‌گیرهای تیغه‌ای (موجی) با کانال تخلیه^۸ را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از ترکیب متد اویلری- لاگرانژی^۹ و مدل متقابل ادی^{۱۰} برای شبیه‌سازی پراکندگی قطره در جریان توربولانت^{۱۱} گاز استفاده کردند. همچنین مدل انتقال تنش رینولدز برای جریان هوای توربولانت به کار گرفته شد و به این نتیجه رسیدند که استفاده از خم‌های بیشتر در قطره‌گیر باعث افزایش راندمان جمع‌آوری و افزایش قابل توجه افت فشار می‌شود و قطره‌گیرهای با طول موج کم، افت فشار بیشتر و راندمان جمع‌آوری کمتر دارند.

استخرسر و رفیعی [۹] علاوه بر این، به بررسی عددی اثرات ابعاد کانال تخلیه بر راندمان جمع‌آوری و همچنین افت فشار هوا در قطره‌گیر تیغه‌ای پرداختند که برای این امر از ۶ مدل مختلف هندسه استفاده کردند. آن‌ها برای شبیه‌سازی پراکندگی قطره در جریان توربولانت از مدل اثر متقابل ادی و متد اویلری- لاگرانژی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که افزایش

سطح مقطع ورودی تعریف می‌شود. در این قطره‌گیرها، راندمان جمع‌آوری بر اثر افزایش فشار و کاهش سرعت هوا دچار کاهش می‌شود. هر قدر سرعت هوا کاهش می‌یابد، اصطکاک بین قطره و سطح نیز کاهش می‌یابد و قطرات تمایل به ادامه مسیر با جریان هوا و انتقال به بیرون از قطره‌گیر دارند و به صفحات قطره‌گیر نمی‌چسبند [۶].

قطره‌گیرهای تیغه‌ای از نظر جنس در انواع مختلفی شامل: پی‌وی‌سی^۱، پلی‌پروپیلن^۲، فایبرگلاس- پلیمر^۳، پلی‌سولفون^۴، آهن گالوانیزه^۵، پلاستیک^۶ و استیل ضدزنگ^۷ ساخته می‌شوند که هر کدام از آن‌ها فواید و مضراتی دارند. انتخاب جنس، به صورت مستقیم بر هزینه ساخت، عملکرد و نگهداری قطره‌گیر مؤثر است. در خصوص قطره‌گیرهای تیغه‌ای مطالعات مختلفی انجام شده است که برخی از آن‌ها در ادامه بیان می‌گردد.

رفعی و رحیم‌زاده [۷] به بررسی عددی عملکرد قطره‌گیر نوع تیغه‌ای با فواصل صفحات ۲۵ تا ۳۵ میلی‌متر پرداختند. در این پژوهش، آن‌ها جریان در یک مجرا از قطره‌گیر تیغه‌ای را بر پایه متد اویلری- لاگرانژی شبیه‌سازی کردند و مدل اثر متقابل ادی را برای بکارگیری پراکندگی توربولانت مورد

8 Drainage channel
9 Euler-Lagrangian
10 Eddy interaction model
11 Turbulant

1 PVC
2 Polypropylene
3 FRP
4 Polysulfone
5 Galvanized iron
6 Plastic
7 Stainless steel

دورمتغیر بود. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که افزایش سرعت هوا، افت فشار را افزایش می‌دهد و ضریب فشار با افزایش عدد رینولدز، کاهش می‌یابد.

هدف اصلی از این پژوهش، بررسی چگونگی تأثیر استفاده از قطره‌گیر بر عملکرد برج خنک‌کن است. در این راستا، تأثیر استفاده از قطره‌گیر بر چهار پارامتر دبی آب جبرانی و راندمان برودتی برج خنک‌کن و افت فشار هوا و راندمان جمع‌آوری قطره‌گیر به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مقاله، قطره‌گیر در قالب برج خنک‌کن و اثر آن به صورت مستقیم بر دبی آب جبرانی و راندمان برودتی بررسی و همچنین با اندازه‌گیری دمای تر و خشک هوا، مقدار رطوبت هوا محاسبه می‌شود که بررسی هم‌زمان هر چهار پارامتر اقدامی نو و مؤثر در بررسی تأثیر استفاده از قطره‌گیر بر عملکرد برج خنک‌کن است. برای بررسی تأثیر تعداد موج نیز، طول کلی قطره‌گیر ثابت نگه داشته می‌شود که این نیز از موارد نوآوری در این مقاله است.

۲- فرآیند آزمایش

برای انجام آزمایشات، دستگاه‌ها، روابط و محاسباتی استفاده شده است که در این بخش از مقاله به تشریح آن‌ها می‌پردازیم.

۲-۱- برج خنک‌کن و متعلقات آن

برای انجام آزمایش‌ها در این مقاله از یک دستگاه برج خنک‌کن آزمایشگاهی استفاده شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، برج خنک‌کن شامل بخش‌های مختلفی از جمله سینی^۵، محفظه پکینگ^۶، سیستم پخش آب^۷، محفظه قطره‌گیر، فن هوادهی، مخزن آب جبرانی، پمپ آب در گردش و حسگرهای^۸ اندازه‌گیری است.

در فرآیند کاری برج، ابتدا آب از مخزن توسط پمپ مکش می‌شود و پس از عبور از فلومتر^۹ به قسمت بالای برج می‌رسد. سپس توسط سیستم پخش آب، در کل سطح پخش و با حرکت به سمت پایین، وارد سینی و سپس مخزن آب جبرانی می‌شود. در این مسیر آب به ناچار از محفظه‌ای عبور می‌کند که پکینگ در آن قرار دارد و در نتیجه، سطح تماس و تبادل حرارت آب و هوا افزایش یافته و این امر موجب تبخیر بخشی از آب و کاهش دمای مقدار آب باقی‌مانده می‌شود. از سوی دیگر، هوای محیط، توسط فن

طول کانال تخلیه باعث افزایش راندمان جمع‌آوری می‌شود، افزایش عرض کانال تخلیه موجب کاهش راندمان جمع‌آوری و افت فشار می‌شود و افزایش طول کانال تخلیه موجب باریک‌تر شدن مسیر جریان و در نتیجه افزایش افت فشار می‌شود.

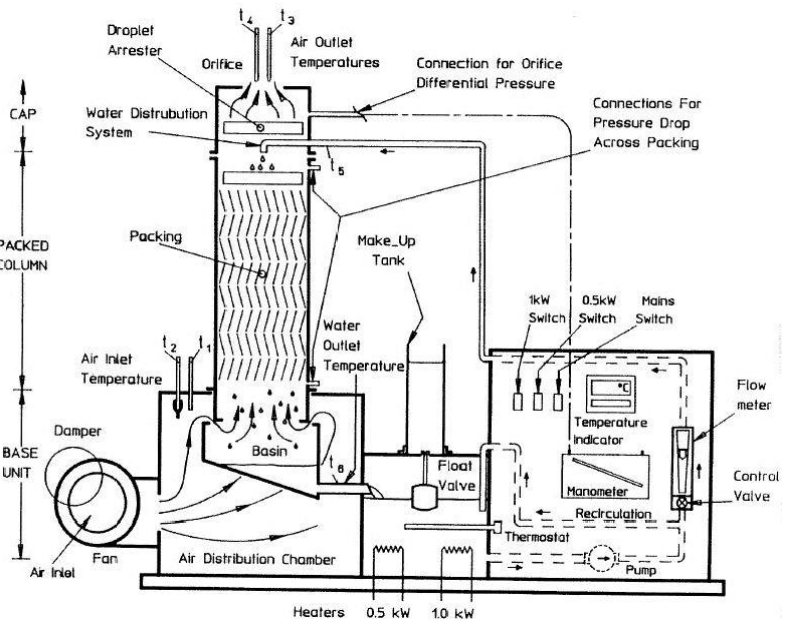
علمشاهی و همکاران [۱۰] در مقاله‌ای عددی به بررسی تأثیر ایجاد زبری مصنوعی بر عملکرد قطره‌گیر زیگزاگی با استفاده از مدل‌های توربولانس کی اسیلون^۱ و انتقال تنش رینولدز^۲ پرداختند. در این پژوهش، آن‌ها از سه مدل قطره‌گیر زیگزاگی با سطح داخلی صاف، با سطح دارای سه زبری مصنوعی بعد از هر خم و با سطح دارای پنج زبری مصنوعی بعد از هر خم استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که افزودن زبری بر روی سطح موجب افزایش حداکثر سرعت هوا بعد از هر خم و افزایش افت فشار و راندمان قطره‌گیری می‌شود. روئیز^۳ و همکاران [۱۱] در مقاله خود به بررسی آزمایشگاهی افت فشار و راندمان قطره‌گیری در چند مدل قطره‌گیر تجاری پرداختند تا اطلاعات قابل اطمینانی را برای طراحی و انتخاب قطره‌گیر ارائه کنند. در این مطالعه آن‌ها از ۶ مدل قطره‌گیر به شکل‌های تیغه‌ای، رشته‌ای و لانه زنبوری استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که قطره‌گیرهای لانه زنبوری و رشته‌ای بهترین عملکرد را در خصوص افت فشار و راندمان قطره‌گیری دارند.

لوکاس^۴ و همکاران [۱۲] در مقاله‌ای به بررسی آزمایشگاهی عملکرد حرارتی یک برج جریان متقاطع اجباری مجهز به شش نوع قطره‌گیر مختلف با رنج وسیعی از دبی آب و هوا پرداختند. آن‌ها با استفاده از داده‌های ثبت شده در دستگاه آزمایشگاهی، روابطی برای پارامترهای مرتبط با برج یافتند که عملکرد حرارتی برج را تعریف می‌کند. سپس دمای پیش‌بینی شده آب خروجی توسط این روابط را با مقادیر بدست آمده از آزمایشات با حداکثر اختلاف $\pm 3\%$ درصد مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از قطره‌گیر علاوه بر دبی هوای عبوری، بر روی انتقال حرارت و جرم تأثیر می‌گذارد.

بنی طبائی و همکاران [۱۳] در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی میزان افت فشار در قطره‌گیرهای موجی با فواصل متفاوت بین صفحات و سرعت‌های مختلف جریان هوا پرداختند. اجزاء دستگاه آزمایشگاهی آنها شامل یک کانال افقی از جنس پلکسی‌گلس با ابعاد $1830 \times 300 \times 300$ میلی‌متر، یک ردیف قطره‌گیر، دو ردیف صفحات لانه زنبوری و یک فن

5 Basin
6 Packing
7 Water distributor
8 Sensor
9 Flow meter

1 k- ω
2 RSTM
3 Ruiz
4 Lucas



شکل ۳. شماتیک و واقعی برج خنک کن آزمایشگاهی

Fig. 3. Schematic and real shape of laboratory cooling tower

- دمای آب ورودی به برج توسط هیترهای الکتریکی ثابت نگه داشته شده است و تأثیر تغییر دمای آب بررسی نشده است.
 - در فرآیند آزمایش هر سه مدل قطره گیر، یک نوع پکینگ از لحاظ جنس و تعداد به کار رفته است تا تغییر آن تأثیری بر پارامترهای متغیر نداشته باشد.
- مقادیر پارامترهای ثابت در آزمایشات در جدول ۱ قابل مشاهده است. برای ثابت نگه داشتن دبی هوا از یک دمپر استفاده شده است تا علی رغم کاهش افت فشار و افزایش دبی هوا ناشی از کاهش تعداد موج قطره گیر، دبی هوای عبوری از برج ثابت باشد.

۲-۱-۱- حسگرهای اندازه گیری

دمای آب و هوا با استفاده از حسگرهایی مطابق شکل ۴ در دو نقطه اندازه گیری می شوند. در ورودی و خروجی هوای برج، دمای هوا به دو صورت تر و دمای آب نیز در نقطه ورودی و خروجی برج اندازه گیری می شود. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود، برای اندازه گیری فشار در برج از یک مانومتر^۱ استفاده می شود که می تواند اختلاف فشار نقاط مختلف برج

با دور ثابت، موجود در قسمت پایین برج به داخل برج دمیده و به سمت بالا به حرکت در می آید. در این مسیر، هوا با آب تماس پیدا می کند و پس از تغییرات دما از بالای برج خارج می گردد. وظیفه تنظیم و یا تثبیت دمای آب ورودی به برج (شبیه سازی افزایش دمای ناشی از عبور آب از کندانسور) بر عهده دو هیتر الکتریکی است که با ظرفیت های ۰/۵ و ۱ کیلووات قادر به افزایش دمای آب هستند.

برای انجام آزمایشات شرایط و فرض هایی را در نظر می گیریم تا مسئله را ساده تر کنیم. این شرایط و فرض ها عبارتند از:

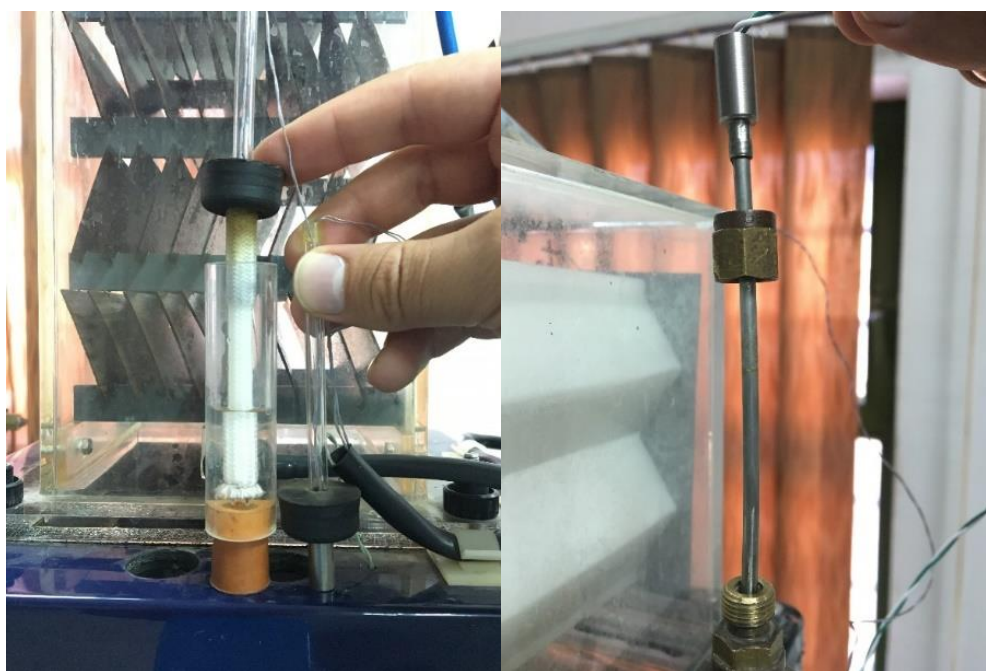
- در بازه زمانی مذکور، دما و رطوبت محیط در محدوده مشخصی قرار داشته و ثابت فرض شده است. با توجه به سرپوشیده بودن محل آزمایش، از تأثیرات باد و جریان هوای محیط می توان صرف نظر کرد.
- با توجه به معادله پیوستگی و پایدار بودن جریان هوا در برج، دبی جرمی هوا در طول مسیر آن از ورودی به خروجی برج ثابت فرض شده است.
- دبی آب توسط فلومتر مجهز به شیر کنترل در طول هر یک از آزمایشات ثابت نگه داشته شده است و تأثیر آن در این مقاله مورد بررسی قرار نگرفته است.

1 Manometer

جدول ۱. مقادیر پارامترهای ثابت در آزمایشات

Table 1. Fixed parameters values in experiments

مقدار	واحد	پارامتر
۲۸	°C	دمای آب ورودی
۴۰	g/s	دبی آب
۲۷	°C	دمای هوای ورودی
۵۵/۲	g/s	دبی هوا
۰/۰۰۷	kg/kg _{air}	رطوبت مطلق هوای ورودی



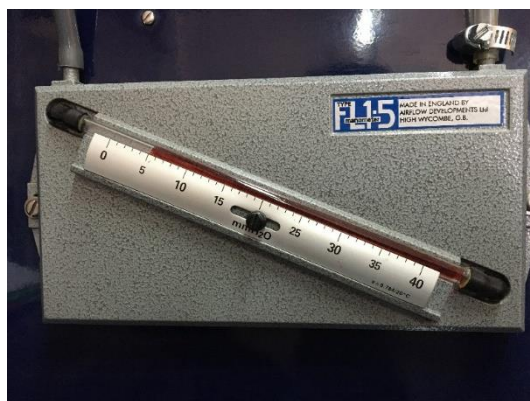
شکل ۴. حسگرهای دمای هوا و آب در برج خنک کن آزمایشگاهی

Fig. 4. Air and water temperature sensors in the laboratory cooling tower

جدول ۲. مشخصات حسگرهای اندازه‌گیری مورد استفاده

Table 2. Characteristics of the measurement sensors used

پارامتر	سنسور	محدوده اندازه‌گیری	صحت
دمای آب	ترموکوپل نوع K	۱۸- تا ۲۷۷ °C	±۰/۲ °C
دمای هوا	ترموکوپل نوع K	۱۸- تا ۲۷۷ °C	±۰/۵ °C
فشار هوا	مانومتر اختلاف فشار نوع FL ۱/۵	۰ تا ۴۰ mmH ₂ O	±۰/۱ mmH ₂ O
دبی آب	روتامتر	۰ تا ۵۰ g/s	±۰/۵ g/s
سرعت هوا	هات وایر	۴۰ تا ۳۹۴۰ fpm	± ۱+۲۰ % fpm



شکل ۵. مانومتر فشار هوا در برج خنک‌کن آزمایشگاهی

Fig. 5. Air pressure manometer in laboratory cooling tower

می‌آید. با جمع این مقادیر دبی و متوسط‌گیری، مقدار دبی محاسبه می‌شود. مشخصات دستگاه سیم داغ استفاده شده و سایر حسگرهای اندازه‌گیری در جدول ۲ آمده است.

۲-۱-۲- قطره‌گیر تیغه‌ای

قطره‌گیرهای مورد استفاده در برج در سه هندسه با نام‌های الف، ب و ج با چهار پارامتر ثابت مشترک بین همه قطره‌گیرها ساخته شدند؛ طول کلی برابر ۹۰ میلی‌متر، ارتفاع موج برابر ۱۵ میلی‌متر، فاصله بین صفحات برابر با ۴ میلی‌متر و ۵ میلی‌متر ابتدایی و انتهایی طول قطره‌گیر که به صورت موازی با دیواره محفظه برای هدایت جریان به مسیر اصلی در نظر گرفته شده است.

را نسبت به اتمسفر و نسبت به یکدیگر اندازه‌گیری کند. برای اندازه‌گیری دبی جریان آب در گردش در برج از فلومتر روتاری^۱ مجهز به شیر کنترل^۲ استفاده می‌شود. آب در گردش از پمپ خارج شده و پس از عبور از فلومتر به پخش‌کننده آب در بالای برج می‌رسد. شکل ۶ فلومتر مورد استفاده را نشان می‌دهد. برای محاسبه دبی هوا ابتدا مساحت مقطع عبور هوا را به چند قسمت تقسیم کرده سپس با یک دستگاه سیم داغ^۳ سرعت هوا را به دست آورده و در مساحت هر کدام از این قسمت‌ها ضرب کرده و دبی آن‌ها به دست

- 1 Rotary
- 2 Control valve
- 3 Hot wire

۲-۱-۳- روابط حاکم

با توجه به اینکه هر مقدار هوا وارد برج شود، همان مقدار از آن خارج می‌گردد و جریان در آن پایدار است، معادله پیوستگی جرم در آن به این صورت صادق می‌گردد:

$$\dot{m}_i = \dot{m}_e \quad (1)$$

$$\dot{m} = \rho VA \quad (2)$$

که در آن‌ها \dot{m} دبی جرمی، ρ چگالی، V سرعت و A مساحت سطح مقطع است.

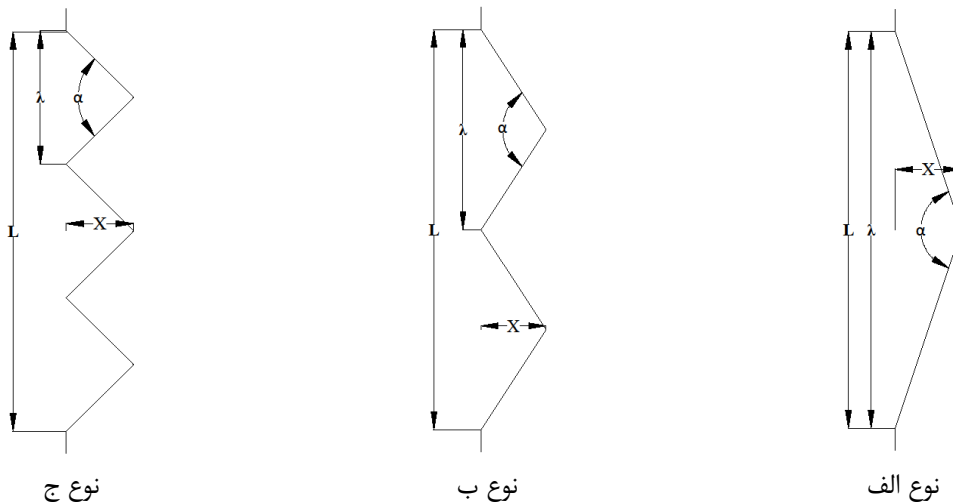
بر اساس این معادله و ثابت بودن دبی هوا در طول کانال، با به دست آوردن دبی هوای خشک در ورودی هوا به کانال، دبی هوا در سایر نقاط را نیز داریم. با استفاده از معادله (۳) می‌توان دبی هوای خشک را به دست آورد. با توجه به اینکه مقدار رطوبت مطلق هوا در ورودی به برج ناچیز است، از آن صرف نظر می‌شود. بنابراین، دبی هوای خشک ورودی همان دبی اندازه‌گیری شده است.



شکل ۶. فلومتر روتاری آب در برج خنک‌کن آزمایشگاهی

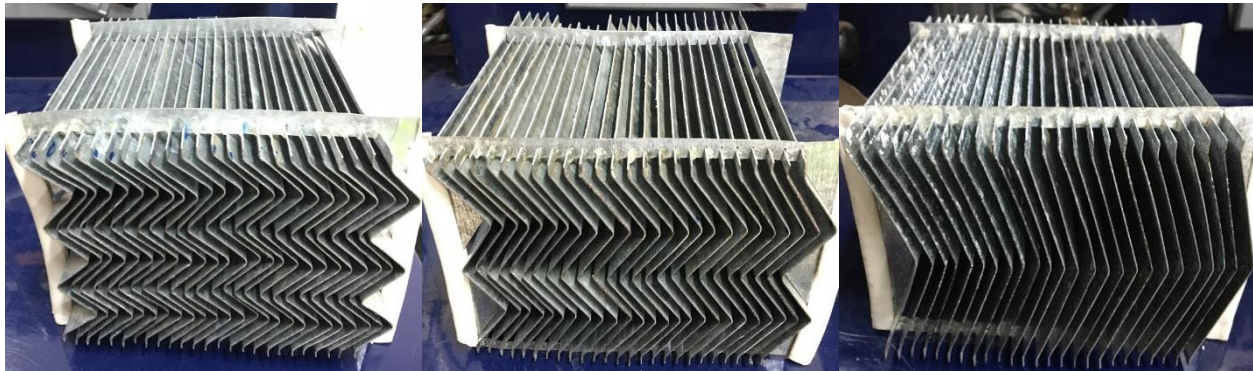
Fig. 6. Rotary water flowmeter in laboratory cooling tower

این قطره‌گیرها از جنس آهن گالوانیزه ساخته شدند که در شکل‌های ۷ و ۸ نمای شماتیک و واقعی این قطره‌گیرها و در جدول ۳ مشخصات هندسی آن‌ها قابل مشاهده است.



شکل ۷. شکل شماتیک قطره‌گیرهای مورد استفاده

Fig. 7. Schematic shape of the drift eliminators used



نوع ج

نوع ب

نوع الف

شکل ۸. شکل واقعی قطره گیرهای مورد استفاده

Fig. 8. Real shape of the drift eliminators used

جدول ۳. مشخصات هندسی قطره گیرهای مورد استفاده

Table 3. Geometric characteristics of the drift eliminators used

زاویه خم (degree)	طول موج (mm)	تعداد موج	ارتفاع موج (mm)	طول (mm)	جنس	نوع قطره گیر
۱۴۳	۹۰	۱	۱۵	۹۰	آهن گالوانیزه	الف
۱۱۳	۴۵	۲	۱۵	۹۰	آهن گالوانیزه	ب
۹۰	۳۰	۳	۱۵	۹۰	آهن گالوانیزه	ج

$$\omega_1 = \frac{C_p(T_v - T) + \omega_v h_{fg}}{h_{g_v} - h_{f_v}} \quad (5)$$

$$\dot{m}_t = \dot{m}_a + \dot{m}_{\omega_1} \quad (3)$$

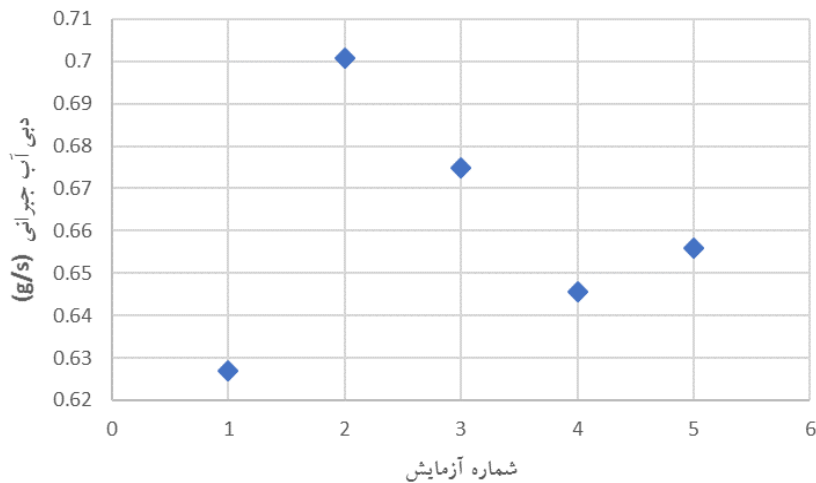
$$\omega_v = \frac{0.1622 P_{g_v}}{P_v - P_{g_v}} \quad (6)$$

$$\dot{m}_t = \dot{m}_a (1 + \omega) \quad (4)$$

در معادله (۳)، \dot{m}_t دبی کلی هوا، \dot{m}_a دبی هوای خشک و \dot{m}_{ω_1} دبی هوای مرطوب در ورودی هوا به کانال است.

در معادله اشباع آدیاباتیک، ω_1 رطوبت مطلق ورودی، ω_v رطوبت مطلق خروجی، C_p گرمای ویژه در فشار ثابت، T دما، h_{f_v} آنتالپی مایع، h_{g_v} آنتالپی گاز، P فشار هوا و P_{g_v} فشار گاز در حالت اشباع است.

برای به دست آوردن مقدار رطوبت مطلق هوا در ورودی و خروجی برج، پس از اندازه گیری دمای خشک و تر هوا، می توان از معادله اشباع آدیاباتیک و یا نمودار سایکرومتریک استفاده کرد:



شکل ۹. مقادیر دبی آب جبرانی در تکرار آزمایشات قطره‌گیر نوع الف

Fig. 9. Compensatory water flow rates in repetition of tests of drift eliminator type A

خنک‌کن را نشان می‌دهد و هرچه این پارامتر بیشتر باشد، مصرف آب کمتر. برای این مهم از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{drift, inlet} - \dot{m}_{drift, outlet}}{\dot{m}_{drift, inlet}} \times 100 \quad (10)$$

در معادله (۱۰)، $\dot{m}_{drift, inlet}$ دبی قطرات ورودی به قطره‌گیر و $\dot{m}_{drift, outlet}$ دبی قطرات خروجی از قطره‌گیر است.

۳- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی آزمایشات از دو روش تکرارپذیری و محاسبه عدم قطعیت پارامترها استفاده می‌شود. برای اطمینان از مقادیر پارامترهای به دست آمده برای هر مدل قطره‌گیر، آزمایشات ۵ بار تکرار شد تا صحت روند و نتایج به دست آمده مورد تأیید قرار گیرد. مقادیر دبی آب جبرانی در شکل ۹، اختلاف فشار قطره‌گیر در شکل ۱۰ و اختلاف دمای آب در شکل ۱۱ در ۵ بار تکرار آزمایش برای قطره‌گیر نوع الف به عنوان نمونه نمایش داده شده‌اند. همانطور که می‌بینید تفاوت هر کدام از دو پارامتر شامل دبی آب جبرانی و اختلاف فشار هوای ورودی و خروجی قطره‌گیر و اختلاف دمای آب ورودی و خروجی برج در ۵ تکرار، مقدار کمی است؛ در نتیجه نتایج به دست آمده قابل قبول است.

با داشتن رطوبت مطلق هوا در ورودی و خروجی برج و با استفاده از دبی هوا می‌توان دبی تبخیر و در نتیجه دبی قطرات خروجی از برج را به دست آورد. همچنین با داشتن اختلاف دمای ورود و خروج آب و دمای تر محیط، می‌توان راندمان بروودی برج را به دست آورد.

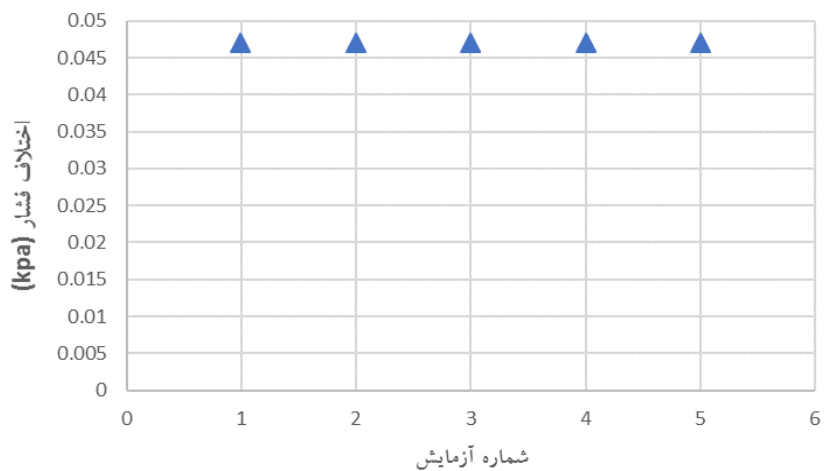
$$\dot{m}_{evaporation} = \dot{m}_a (\omega_r - \omega_i) \quad (7)$$

$$\dot{m}_{drift} = \dot{m}_{makeup} - \dot{m}_{evaporation} \quad (8)$$

$$C.E = \frac{T_{water, inlet} - T_{water, outlet}}{T_{water, inlet} - T_{wetbulb}} \times 100 \quad (9)$$

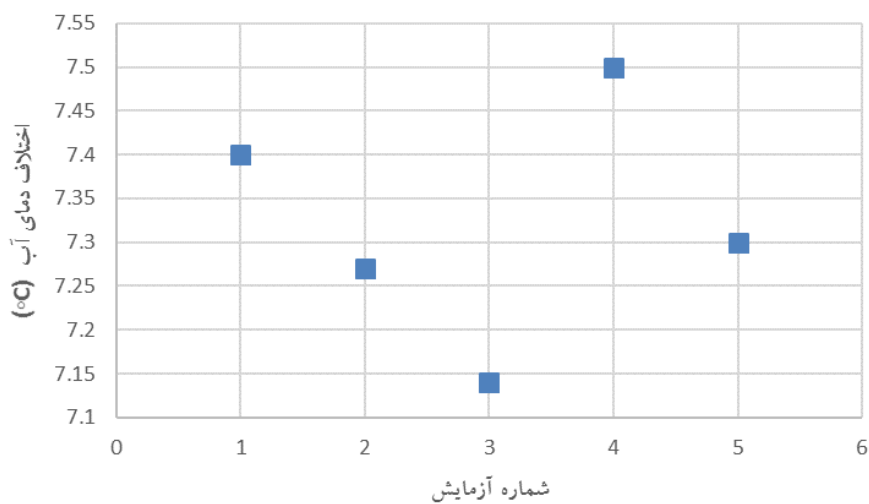
در معادله (۷)، ω_i رطوبت مطلق هوای ورودی به برج و ω_r رطوبت مطلق هوای خروجی از برج است. در معادله (۹)، $C.E$ راندمان بروودی برج، $T_{wetbulb}$ دمای تر محیط، $T_{water, inlet}$ دمای آب ورودی به برج و $T_{water, outlet}$ دمای آب خروجی از برج است.

راندمان جمع‌آوری، میزان کاهش قطرات خروجی از قطره‌گیر در برج



شکل ۱۰. مقادیر اختلاف فشار قطره‌گیر در تکرار آزمایشات قطره‌گیر نوع الف

Fig. 10. Pressure difference values in repetition of tests of drift eliminator type A



شکل ۱۱. مقادیر اختلاف دمای آب در تکرار آزمایشات قطره‌گیر نوع الف

Fig. 11. Temperature difference values in repetition of tests of drift eliminator type A

جدول ۴. عدم قطعیت کمیت‌های مشتق شده

Table 4. Uncertainty of derived parameters

عدم قطعیت با ۹۵ درصد اطمینان	پارامترهای مؤثر اندازه‌گیری شده	کمیت مشتق شده
$9/34 \times 10^{-4}$ kg/kg air	دمای خشک و تر هوای ورودی و فشار هوای ورودی	رطوبت مطلق هوای ورودی به برج
$4/72 \times 10^{-4}$ kg/kg air	دمای خشک و تر هوای ورودی و فشار هوای ورودی	رطوبت مطلق هوای خروجی از برج
$2/8 \times 10^{-3}$ kg/s	سرعت هوای ورودی	دبی هوای ورودی

شامل رطوبت هوا و دبی آن تابعی از پارامترهای اندازه‌گیری شده هستند و مقدار تبخیر و خروج قطرات از برج را تعیین می‌کنند، باید عدم قطعیت آن‌ها نیز محاسبه شود. برای این کار از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\omega_R = \sqrt{\sum_i^n \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} \omega_{x_i} \right)^2} \quad (14)$$

که در این رابطه x_i هر کدام از داده‌های اندازه‌گیری شده، R پارامتر رطوبت و دبی هوا، ω_{x_i} عدم قطعیت پارامتر اندازه‌گیری شده و ω_R عدم قطعیت پارامتر مشتق شده است. بنابراین عدم قطعیت رطوبت مطلق هوا در ورودی و خروجی برج و دبی هوای ورودی مطابق جدول ۴ است.

۴- نتایج و بحث

جدول ۵ مقادیر دبی آب جبرانی و راندمان برودتی برج خنک‌کن و راندمان جمع‌آوری و افت فشار قطره‌گیر را نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، هرچه تعداد موج در قطره‌گیر بیشتر می‌شود، راندمان جمع‌آوری قطرات افزایش می‌یابد که بیشترین مقدار این افزایش مربوط به قطره‌گیر نوع ج و برابر ۴۸ درصد است. علاوه بر این دبی آب جبرانی نیز تحت تأثیر افزایش تعداد موج، کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که هرچه بر تعداد موج افزوده می‌شود، دبی آب جبرانی با شیب بیشتری کاهش می‌یابد و این امر تأثیر استفاده از موج‌های بیشتر در قطره‌گیر را نشان

در آزمایش‌ها، عمدتاً نتایج به دست آمده در تکرار آزمایش‌ها با هم برابر نیست و پارامترهای اندازه‌گیری شده با مقداری انحراف معیار حول یک مقدار (مقدار متوسط) مشخص نوسان می‌کند. برای یافتن مقدار متوسط داده‌ها، انحراف معیار برای تعداد محدود داده و عدم قطعیت پارامترهای اندازه‌گیری شده از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\bar{x} = \frac{\sum_i^n x_i}{N} \quad (11)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{N - 1} \quad (12)$$

$$\bar{x}_{inf} = \bar{x}_f + t_{v,p} \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (13)$$

در این روابط، x_i هر کدام از داده‌های اندازه‌گیری شده، \bar{x} مقدار متوسط داده‌های اندازه‌گیری شده، N تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده، $t_{v,p}$ توزیع دانشجویی t ، σ انحراف معیار، \bar{x}_f مقدار متوسط داده‌های محدود و \bar{x}_{inf} مقدار متوسط داده‌های نامحدود است. $t_{v,p} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ عدم قطعیت پارامتر را نشان می‌دهد.

پس از اندازه‌گیری پارامترهایی شامل: دمای خشک و تر هوا در ورودی و خروجی برج، دمای آب، سرعت هوای ورودی و فشار هوا، عدم قطعیت آن‌ها با استفاده از روابط بالا محاسبه می‌شود. از طرفی به دلیل اینکه پارامترهایی

جدول ۵. مقادیر دبی آب جبرانی و راندمان برودتی برج و افت فشار و راندمان قطره‌گیر در حالت‌های مختلف قطره‌گیر

Table 5. Compensatory water flow rates and cooling efficiency of the cooling tower and pressure drop and collection efficiency in different drift eliminator types

پارامتر	بدون قطره‌گیر	قطره‌گیر نوع الف	قطره‌گیر نوع ب	قطره‌گیر نوع ج
راندمان جمع‌آوری (%)	۰	۲/۱۴	۳۳/۴۳	۴۷/۷۳
دبی آب جبرانی (kg/s)	$6/757 \times 10^{-4}$	$6/609 \times 10^{-4}$	$6/277 \times 10^{-4}$	$5/475 \times 10^{-4}$
راندمان برج (%)	۴۹/۲	۵۹/۵	۶۳/۲	۶۷/۷
افت فشار (kPa)	۰	۰/۰۰۵۸	۰/۰۱	۰/۰۱۷۶

می‌دهد. دلیل این افزایش شیب این است که هرچه تعداد موج بیشتر می‌شود، توانایی قطره‌گیر در به دام انداختن قطرات با قطر کمتر افزایش می‌یابد، زیرا قطرات بزرگتر در موج‌های اول و قطرات کوچک‌تر در موج‌های بعدی جدا می‌شوند. در نتیجه مقدار قطرات بیشتری در حین خروج از برج جدا شده و به آن بازگردانده می‌شوند. بر اساس جدول ۵ کمترین مقدار دبی آب جبرانی متعلق به قطره‌گیر نوع ج است که کاهش حدود ۲۰ درصدی نسبت به حالت بدون قطره‌گیر را نشان می‌دهد.

راندمان برودتی برج نیز برای حالت‌های مختلف قطره‌گیر در جدول ۵ بیان شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید هرچه تعداد موج در قطره‌گیر افزایش می‌یابد، راندمان برودتی برج نیز بیشتر می‌شود. بر اثر استفاده از قطره‌گیر نوع الف، راندمان برودتی برج حدود ۱۰ درصد و قطره‌گیر نوع ج حدود ۱۸/۵ درصد بیشتر از حالت بدون قطره‌گیر است. با توجه به این که قطرات خروجی هنگام عبور از قطره‌گیر به دام افتاده و سپس به برج باز می‌گردند و در این مدت در تماس با هوا هستند، می‌توان علت کاهش دمای آب بر اثر استفاده از قطره‌گیر را اینطور تحلیل کرد که قطره‌گیر نیز همانند پکینگ عمل کرده و تا حدودی موجب کاهش دمای آب خروجی از برج می‌شود.

موج از ۱ به ۲، مقدار افت فشار حدود ۷۲ درصد و از ۲ به ۳ نیز حدود ۷۶ درصد افزایش می‌یابد که این مهم می‌تواند تأثیر بسزایی در توان مصرفی فن برج خنک‌کن داشته باشد. با توجه به طول کلی ثابت در هر سه نوع قطره‌گیر، با افزایش تعداد موج، طول مسیر عبور جریان هوا نیز افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند موجب افزایش افت فشار اصطکاکی شود. از طرفی بعد از هر خم بر اثر تغییر مسیر ایجاد شده در جریان هوا، یک ناحیه چرخشی در جریان در نزدیکی جداره به وجود می‌آید که باعث جدایی جریان از جداره و کاهش مقطع عبور هوا شده و در نتیجه افت فشار ایجاد می‌کند. بنابراین با افزایش تعداد موج، بر تعداد این نواحی چرخشی و نیز مقدار افت فشار مسیر افزوده می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به صورت آزمایشگاهی تأثیر استفاده از قطره‌گیر در برج خنک‌کن مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار تغییراتی از لحاظ هندسه در تعداد موج قطره‌گیر در طول ثابت ایجاد شد و تفاوت انواع قطره‌گیر ساخته شده نسبت به هم و نسبت به حالت بدون قطره‌گیر بررسی شد. در این راستا چهار پارامتر هدف شامل راندمان جمع‌آوری و افت فشار قطره‌گیر و دبی آب جبرانی و راندمان برودتی برج خنک‌کن در نظر گرفته شد و تأثیر استفاده از سه مدل قطره‌گیر بر این چهار پارامتر مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با تحلیل و بررسی موارد مطرح شده به نتایج زیر دست یافتیم:

- استفاده از قطره‌گیر در برج خنک‌کن موجب کاهش دبی آب

منابع

- [1] M. Lucas, P. Martínez, A. Viedma, Experimental study on the thermal performance of a mechanical cooling tower with different drift eliminators, *Energy Conversion and Management*, 50(3) (2009) 490-497.
- [2] A. Younger, P. Eng, Natural gas processing principles and technology-part I, Gas Processors Association, Tulsa Oklahoma, (2004).
- [3] I. Wenten, A.S. Chandranegara, Improving Mist Eliminator Performance in Gas-Liquid Separators, (2008).
- [4] L. Williams, L. Dykhno, T. Hanratty, Droplet flux distributions and entrainment in horizontal gas-liquid flows, *International journal of multiphase flow*, 22(1) (1996) 1-18.
- [5] L. Jia, S. Huang, W. Xiaomo, Numerical study of steam-water separators with wave-type vanes, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 15(4) (2007) 492-498.
- [6] J.H. Gavin, F.W. Hoffman, Droplet removal efficiency and specific carryover for liquid entrainment separators, *Environment International*, 6(1-6) (1981) 3-9.
- [7] R.E. RAFIEI, H. Rahimzadeh, Performance evaluation of a curved type vane separator at different plate spacings in the range of 25 to 35mm using numerical simulation, (2010).
- [8] M.H. Estakharsar, R. Rafee, Effects of wavelength and number of bends on the performance of zigzag demisters with drainage channels, *Applied Mathematical Modelling*, 40(2) (2016) 685-699.
- [9] M.H.H. Estakharsar, R. Rafee, Effect of drainage channel dimensions on the performance of wave-plate mist eliminators, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 30(6) (2013) 1301-1311.
- [10] F. Alamshahi, H. Rahimzadeh, R. Rafee, M. Moghimi, P. Talebizadehsardari, Effects of Roughness on the Performance of a threaded Zigzag Demister Using RSM and k- ω turbulent models, *Sādhanā*, 45(1) (2020) 1-14.
- [11] J. Ruiz, C. Cutillas, A. Kaiser, B. Zamora, H. Sadafi, M. Lucas, Experimental study on pressure loss and

جبرانی و افزایش راندمان جمع‌آوری می‌شود و هرچه تعداد موج ایجاد شده در قطره‌گیر و در نتیجه تغییر مسیر جریان هوای در حال خروج از برج بیشتر باشد، کاهش بیشتری در دبی آب جبرانی و افزایش بیشتری را در راندمان جمع‌آوری شاهد خواهیم بود.

- استفاده از قطره‌گیر موجب افزایش راندمان برودتی برج می‌شود که می‌توان علت این افزایش را این دانست که قطره‌گیر نیز همانند پکینگ عمل کرده و تا حدودی موجب کاهش دمای آب خروجی از برج می‌شود.
- استفاده از قطره‌گیر موجب افزایش افت فشار هوا در برج می‌شود که از جمله عوامل آن می‌توان به نواحی چرخشی جریان اشاره کرد که بعد از هر خم و تغییر مسیر جریان شکل می‌گیرد.
- در راستای دستیابی به بهترین عملکرد، قطره‌گیر نوع ج موجب کمترین دبی آب جبرانی، بیشترین راندمان برودتی برج و همچنین بیشترین راندمان جمع‌آوری قطره‌گیر و قطره‌گیر نوع الف موجب کمترین افت فشار می‌شوند.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

L	طول کلی قطره‌گیر، mm
X	ارتفاع هر موج قطره‌گیر، mm
S	فاصله بین صفحات قطره‌گیر، mm
R	زبری سطح، mm
\dot{m}	دبی جرمی، g/s
P	فشار، kPa
Q	عملکرد حرارتی، W
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه، J/kgK
T	دما، °C
V	سرعت، m/s
A	مساحت سطح مقطع، m^2
E	انرژی، J
n	تعداد موج قطره‌گیر
h	آنتالپی، kJ/kg
t	زمان، s

علائم یونانی

ρ	چگالی، kg/m^3
λ	طول موج هر قطره‌گیر، mm
α	زاویه خم هر موج قطره‌گیر، degree
ϕ	رطوبت نسبی هوا
ω	رطوبت مطلق هوا، kg/kg air
π	گروه بی‌بعد
μ	لزجت دینامیکی، kg/m.s

- and Management, 50(3) (2009) 490-497.
- [13] S.A. Banitabaei, H. Rahimzadeh, R. Rafee, Determination of minimum pressure drop at different plate spacings and air velocity in a wave-plate mist eliminator, Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 7(4) (2012) 590-597.
- collection efficiency of drift eliminators, Applied Thermal Engineering, 149 (2019) 94-104.
- [12] M. Lucas, P. Martínez, A. Viedma, Experimental study on the thermal performance of a mechanical cooling tower with different drift eliminators, Energy Conversion

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Zabihi Ghadi, F. Talebi, R. Rafee, Experimental Study on the Effect of Numbers of Waves in Vane Type Drift Eliminator on the Collection Efficiency, Pressure Drop and the Wet Cooling Tower Performance, Amirkabir J. Mech Eng., 54(3) (2022) 531-546.

DOI: 10.22060/mej.2021.19638.7077



