سرمقاله

معرفی سیستم‌های سرمایش تبخیری نقطه‌شبنم و کاربردهای آن‌ها

علی سوهانی[۱]، حسین صیادی[۲ و *]

[۱] دانشجوی دکترا، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

[۲] دانشیار، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

sayyaadi@kntu.ac.ir

◄ چکیده

متن حاضر به مروری کوتاه بر خنک‌کننده‌های تبخیری نقطه‌شبنم و کاربردهای آن‌ها می‌پردازد. در ابتدا، مزایای سیستم‌های سرمایش تبخیری نسبت به سیستم‌های تبرید تراکمی بیان شده و پس از آن انواع مختلف سیستم‌های سرمایش تبخیری معرفی می‌شوند. در ادامه، اساس عملکرد سیستم‌های سرمایش تبخیری غیرمستقیم که خنک‌کننده‌های نقطه‌شبنم نوعی از آن‌ها هستند بیان شده و سپس درباره خنک‌کننده‌های نقطه‌شبنم و انواع مختلف متداول آن شامل سیستم‌های سرمایش تبخیری نقطه‌شبنم جریان‌مخالف و جریان‌متقاطع توضیح داده می‌شود. در انتها نیز کاربردهایی که استفاده از سیستم‌های سرمایش تبخیری نقطه‌شبنم در آن‌ها متداول است شامل استفاده به منظور انجام عملیات تهویه‌مطبوع در ساختمان‌ها و به کارگیری برای پیش‌سرمایش هوای ورودی به کمپرسور در نیروگاه‌های تولید توان که در آن‌ها توربین گازی وجود دارد مورد بررسی قرار می‌گیرند.

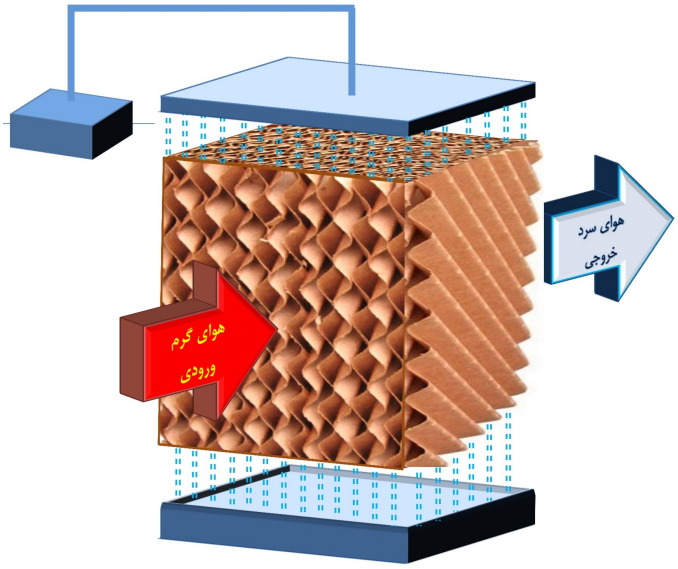
◄ واژگان کلیدی

آرایش جریان‌متقاطع
آرایش جریان‌مخالف
پیش‌سرمایش هوای ورودی به کمپرسور
خنک‌کننده تبخیری غیرمستقیم
خنک‌کننده نقطه‌شبنم
سیستم سرمایش تبخیری
کاربرد مسکونی
کاربرد نیروگاهی

۱ مقدمه

سیستم‌های سرمایش تبخیری[۱] به عنوان راهکاری قدیمی، اما همچنان محبوب برای خنک کردن هوا به شمار می‌آیند. مزایایی مانند قیمت اولیه ارزان‌تر، مصرف برق کمتر، میزان آلایندگی پایین‌تر و ضریب عملکرد بالاتر در مقایسه با رقیب اصلی، یعنی سیستم‌های تبرید تراکمی، خنک‌کننده‌های تبخیری را به عنوان بهترین گزینه در هر جایی که قابل به کارگیری باشند، مطرح می‌کنند [۱].

چنان که از نام پیداست در خنک‌کننده‌های تبخیری هوا بر اثر تبخیر شدن آب خنک می‌شود. بر اساس تماس یا عدم تماس آبی که تبخیر می‌شود و هوایی که قصد خنک کردن آن وجود دارد، خنک‌کننده‌های تبخیری به دو دسته اصلی خنک‌کننده‌های مستقیم[۲] و غیر مستقیم[۳] تقسیم می‌شوند. در خنک‌کننده‌های تبخیری مستقیم هوا در اثر تماس مستقیم با آب که روی یک سطح افزایش دهنده انتقال حرارت و جرم (مانند پوشال یا پد) پخش شده است (شکل ۱)، در یک فرایند تقریباً انتالپی ثابت خنک می‌شود. این در حالی است که چنان که در ادامه به تفصیل توضیح داده خواهد شد، در خنک‌کننده‌های تبخیری غیرمستقیم، آب و هوا در تماس مستقیم با یکدیگر قرار نداشته و هوایی که قصد خنک‌کردن آن وجود دارد، در یک فرایند که در آن رطوبت مطلق افزایش نمی‌یابد خنک می‌شود [۲].

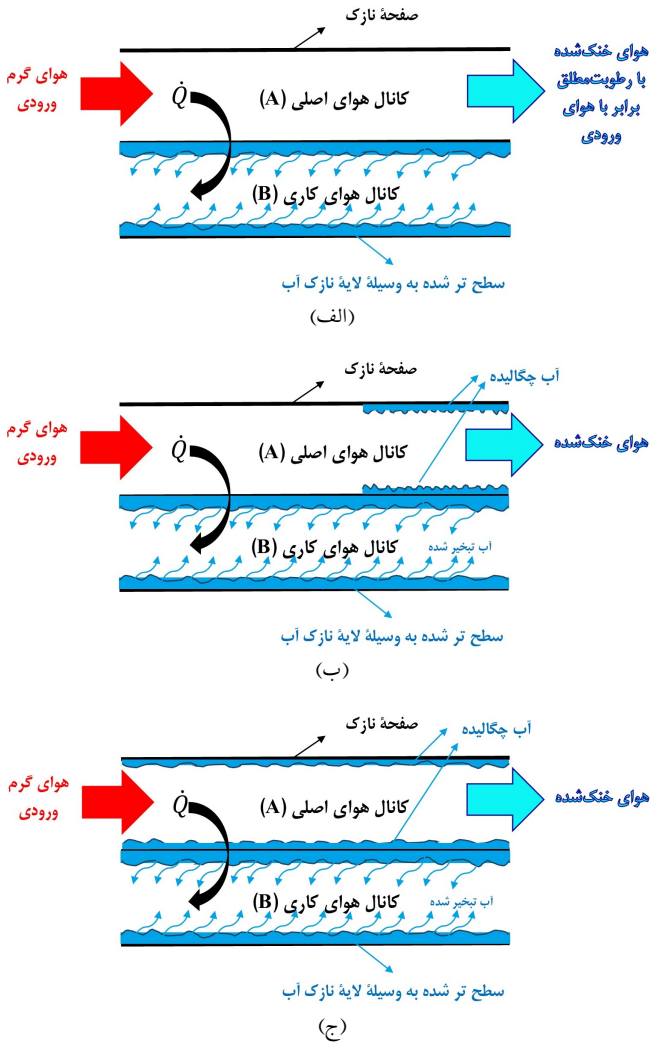


شکل ۱: تماس مستقیم آب و هوا در یک پد تبخیری [۳]

۲ اساس عملکرد خنک‌کننده‌های تبخیری غیرمستقیم

مطابق شکل ۲، سه صفحه نازک در نظر بگیرید که در کنار یکدیگر قرار

[1] Evaporative coolers [2] Direct evaporative coolers [3] Indirect evaporative coolers



شکل ۲: حالت‌های مختلف احتمالی برای هوای کاری در سیستم‌های سرمایش تبخیری غیرمستقیم؛ الف) حالت بدون چگالش[۱]، ب) حالت چگالش در بخشی از کانال[۲]، ج) حالت چگالش در کل کانال[۳]، [۵]

گرفته و تشکیل دو کانال موازی داده‌اند. سطح زیرین صفحه میانی و سطح بالایی صفحه پایینی (سطح داخلی کانال B) با آب که بر روی آن اسپری گردیده مرطوب شده‌است. هوایی که قصد خنک‌کردن آن وجود دارد و هوای اصلی نامیده می‌شود، وارد کانال A که کانال هوای اصلی یا کانال خشک[۴] نام دارد می‌گردد. هنگامی که این هوا در طول کانال پیش می‌رود بر اثر انتقال حرارت گرمای خود را به آب موجود در سطح کانال B داده و باعث تبخیر بخشی از آن می‌شود. بدین ترتیب هوا خنک می‌شود.

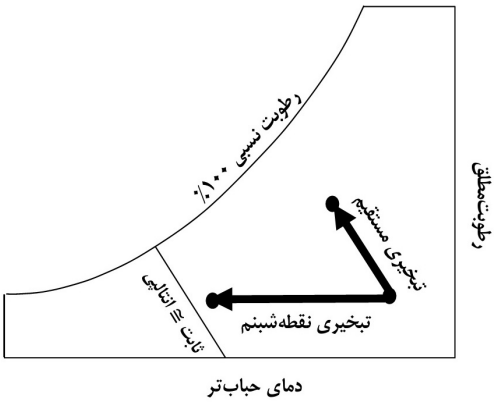
به منظور عملکرد بهتر، رطوبت تبخیر شده در کانال B باید از کانال خارج شود. به همین دلیل، علاوه بر جریان هوای اصلی در کانال A یک جریان هوا نیز در داخل کانال B وجود دارد که رطوبت تبخیر شده در کانال B را با خود از کانال خارج می‌کند. این جریان، جریان هوای کاری و کانال B کانال مرطوب یا کانال هوای کاری[۵] نامیده می‌شود.

بر اساس شرایط هوای اصلی و هوای کاری ورودی، سه احتمال برای هوای اصلی وجود دارد. احتمال اول آن است که رطوبت‌مطلق آن در تمام طول کانال ثابت بماند و هوا با رطوبت‌مطلقی برابر رطوبت مطلق ورودی خارج شود. یعنی به عبارت دیگر هیچ مقداری از رطوبت موجود در هوا چگالیده نشود. احتمال دوم آن است که از جایی به بعد در کانال رطوبت موجود در هوای کاری چگالیده شود و حالت سوم حالتی است که هوا از همان ابتدای ورود به کانال اصلی شروع به از دست دادن رطوبت کند. بنابراین نکته مهم آن است که بر خلاف آن چه در پاره‌ای از موارد به اشتباه تصور می‌گردد فرایند سرمایش تبخیری غیر مستقیم الزاماً فرایندی رطوبت‌مطلق ثابت نیست و تنها در مورد آن می‌توان اشاره کرد که باعث افزایش رطوبت‌مطلق هوای اصلی نمی‌شود. چنان که واضح است در یک خنک‌کننده غیرمستقیم شمار زیادی صفحه نازک در کنار هم قرار گرفته‌اند؛ به گونه‌ای که به جز کانال‌های ابتدای و انتهایی (کانال‌هایی که یک وجه مشترک با مرز سیستم دارند)، هر کانال هوای مرطوب در تماس با دو کانال هوای خشک و هر کانال هوای خشک در تماس با دو کانال هوای مرطوب است [۴].

۳ معرفی خنک‌کننده‌های تبخیری نقطه‌شبنم[۶]

در یک سیستم تبخیری غیرمستقیم منابع مختلفی برای تأمین هوای کاری وجود دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به هوای بیرون، هوای برگشتی از اتاق در عملیات تهویه مطبوع، ترکیب آن‌ها و غیره اشاره کرد. از آن جا که چنان که اشاره شد شرایط هوای کاری تاثیر زیادی بر روی عملکرد سیستم دارد، تلاش‌های فراوانی در طول سالیان اخیر برای یافتن گزینه‌های مناسب برای آن صورت گرفته است. طبق یافته‌ها، استفاده از بخشی از هوای اصلی خنک‌شده به عنوان هوای کاری ورودی به کانال‌های مرطوب باعث ارتقای چشمگیر عملکرد سیستم سرمایش تبخیری غیرمستقیم می‌شود. از آن‌جا که در این حالت، به صورت تئوری امکان دستیابی به دمای نقطه‌شبنم به جای دمای حباب‌تر وجود دارد، این نوع از خنک‌های تبخیری غیر مستقیم، سیستم سرمایش تبخیری نقطه‌شبنم نامیده می‌شوند. بنابراین، سیستم سرمایش تبخیری نقطه‌شبنم، خنک‌کننده غیرمستقیمی است که در آن از بخشی از هوای کاری خنک‌شده به عنوان هوای کاری ورودی استفاده می‌شود. هر سیستم سرمایش تبخیری نقطه‌شبنم، یک خنک‌کننده تبخیری غیر مستقیم است اما عکس آن صادق نیست [۴].

چنان که در نمودار سایکرومتریک شکل ۳ نشان داده شده است، از نظر



شکل ۳: مقایسه فرایندهای سرمایش تبخیری مستقیم و نقطه‌شنم بر روی نمودار سایکرومتریک [۱]

تقسیم‌بندی، خنک‌کننده‌های تبخیری نقطه‌شبنم از نوعی هستند که در آن هیچ

[1]Non-condensation state [2]Partial condensation state [3]Total condensation state [4]Main or dry (air) channel [5]Working or wet (air) channel [6]Dew-point evaporative coolers

گونه چگالشی در کانال هوای اصلی اتفاق نمی‌افتد. همچنین این سیستم‌ها در یک ظرفیت خنک‌کنندگی مشابه دارای مصرف آب به مراتب پایین‌تری نسبت به سیستم‌های تبخیری مستقیم هستند. از آن جا که بخش اعظمی از مطالعات اولیه و تجاری‌سازی این سیستم‌های توسط پژوهشگری به نام والری مایسوتسنکو[1] در شوروی سابق و پس از آن در آمریکا انجام شده است، این دسته از خنک‌کننده‌ها به خنک‌کننده‌های مایسوتسنکو یا خنک‌کننده‌های ام‌سایکل[2] نیز معروف هستند [۲، ۴].

۴ انواع خنک‌کننده‌های نقطه‌شبنم

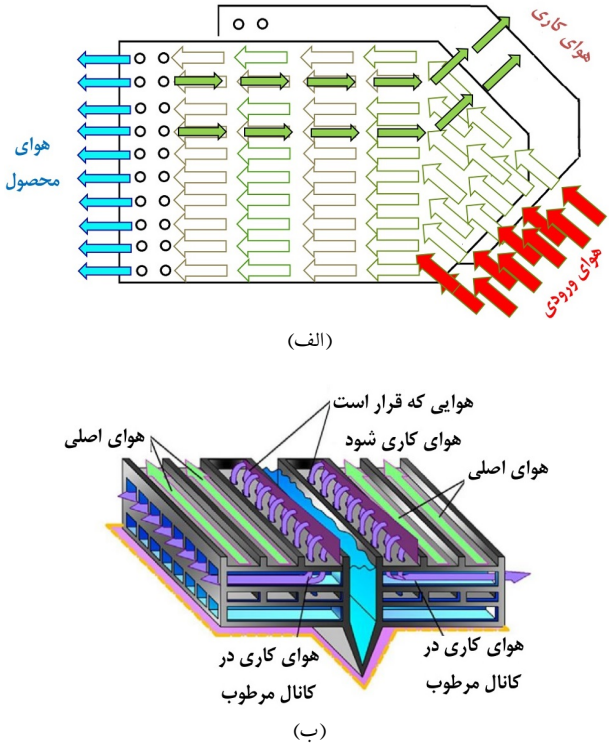
یک خنک‌کننده نقطه‌شبنم، در حقیقت یک مبدل حرارتی هوا به هواست. با این توجه، مانند تمام مبدل‌های حرارتی دیگر، بر اساس آرایش جریان به سه دسته جریان‌موازی، جریان‌مخالف و جریان‌متقاطع تقسیم می‌شود که استفاده از آرایش جریان‌موازی به علت پایین بودن بازدهی نقطه‌شبنم نسبت به دو نوع دیگر بسیار کمتر متداول است.

در متداول‌ترین نوع خنک‌کننده‌های نقطه‌شبنم جریان‌مخالف تمام جریان هوای کاری از جریان هوایی که به طور کامل خنک شده است برداشت می‌شود (شکل ۴الف) و در خنک‌کننده‌های جریان‌متقاطع نحوه فراهم آمدن هوای کاری بدین صورت است که انتهای تعدادی از کانال‌های هوای خشک مسدود بوده و تعدادی سوراخ در آن‌ها وجود دارد که باعث انتقال تدریجی هوای سرد شده موجود در آن‌ها به کانال مرطوب می‌شود (شکل ۴ب) [۵].

۵ کاربردهای خنک‌کننده‌های نقطه‌شبنم

استفاده از خنک‌کننده‌های نقطه‌شبنم در کاربردهای مختلفی به ویژه تهویه‌مطبوع و پیش‌سرمایش هوای ورودی به کمپرسور در واحدهای تولید توان متداول است. طبق تحقیقات انجام شده، سیستم سرمایش تبخیری نقطه‌شبنم در چهار اقلیم از مقیاس آب و هوایی کوپن–گیگر[3] که سیستم سرمایش تبخیری مستقیم در آن‌ها قابلیت رساندن هوا به شرایط آسایش حرارتی را ندارد و شهرهای احمدآباد، لندن، ویندزور و ریاض نماینده آن‌ها هستند به عنوان بهترین سیستم برای به کارگیری در مقیاس مسکونی مطرح است.

در اقلیم‌های بسیار گرم و خشک مثل ریاض خنک‌کننده جریان‌مخالف برداشت‌کننده از هوای محصول و در اقلیم‌های دیگر خنک‌کننده جریان‌متقاطع نسبت به نوع دیگر برتری دارد. برای یک ساختمان مسکونی به مساحت ۹۷/۱ متر مربع در شهر ویندزور استفاده از ساختار بهینه برای خنک‌کننده نقطه‌شبنم دارای هزینه‌های چرخه‌عمر ۳۱۱۱/۵ دلار، مصرف سالیانه آب ۵/۶۷ متر مکعب و میانگین سالیانه ضریب عملکرد ۱۸/۲ است [۲]. به علاوه تحقیقی که در مورد استفاده از خنک‌کننده جریان‌مخالف برداشت‌کننده از هوای محصول برای نیروگاه سیکل‌ترکیبی منتظر قائم انجام شده است نشان داده است که استفاده از ساختار بهینه برای آن، مقدار تولید توان مجموعه و پتانسیل تولید توان توسط سیکل بخار پایین‌دستی را ۶/۰۲٪ و ۸/۹۲٪ افزایش می‌دهد در حالی که دوره بازگشت سرمایه آن ۲/۶۷ سال است [۶].



شکل ۴: انواع مختلف خنک‌کننده‌های نقطه‌شبنم؛ الف) جریان مخالف (نوع برداشت‌کننده از هوای محصول)، ب) جریان‌متقاطع

۶ جمع‌بندی

در متنی که از نظر گذشت، پس از توضیح درباره سیستم‌های سرمایش تبخیری و مزایای آن‌ها نسبت به سیستم‌های تبرید تراکمی، اساس عملکرد سیستم‌های سرمایش تبخیری غیرمستقیم بیان گردید. سپس خنک‌کننده‌های نقطه‌شبنم که نوع خاصی از خنک‌های تبخیری غیرمستقیم هستند و انواع آن‌ها معرفی شد و در ادامه کاربردهای خنک‌کننده‌های نقطه‌شبنم مورد بررسی قرار گرفت. چنان که مرور انجام شده نشان داد، این سیستم‌ها دارای پتانسیل به کارگیری بالایی در هر دو زمینه انجام عملیات تهویه مطبوع و نیز پیش‌سرمایش هوای ورودی به کمپرسور در سیستم‌های تولید توان هستند. با توجه به مسائلی که در مورد سوخت‌های فسیلی، منابع آب و آلاینده‌های زیست‌محیطی وجود دارد پیش‌بینی می‌شود این سیستم‌ها در آینده سهم بیشتری از بازار را به خود اختصاص دهند و در آینده بیشتر از آن‌ها شنیده شود.

مراجع

[1] Sohani, A. and Sayyaadi, H., 2018. Thermal comfort based resources consumption and economic analysis of a two-stage direct-indirect evaporative cooler with diverse water to electricity tariff conditions. Energy Conversion and Management, 172, pp.248-264.

[2] Sohani, A., Sayyaadi, H. and Mohammadhosseini, N., 2018. Comparative study of the conventional types of heat and mass exchangers to achieve the best design of dew point evaporative coolers at diverse climatic conditions. Energy Conversion and Management, 158, pp.327-345.

[3] Sohani, A., Zabihigivi, M., Moradi, M.H., Sayyaadi, H. and

[1]Valery Maisotsenko [2]Maisotsenko or M-cycle indirect evaporative coolers [3]Koppen-Geiger climate classification system

Balyani, H.H., 2017. A comprehensive performance investigation of cellulose evaporative cooling pad systems using predictive approaches. Applied Thermal Engineering, 110, pp.1589-1608.

[4] Sohani, A., Sayyaadi, H. and Hoseinpoori, S., 2016. Modeling and multi-objective optimization of an M-cycle cross-flow indirect evaporative cooler using the GMDH type neural network. International Journal of Refrigeration, 69, pp.186-204.

[5] Sohani, A., Sayyaadi, H., Balyani, H.H. and Hoseinpoori, S., 2016. A novel approach using predictive models for performance analysis of desiccant enhanced evaporative cooling systems. Applied Thermal Engineering, 107, pp.227-252.

[6] Sohani, A., Farasati, Y. and Sayyaadi, H., 2017. A systematic approach to find the best road map for enhancement of a power plant with dew point inlet air pre-cooling of the air compressor. Energy Conversion and Management, 150, pp.463-484.