

امکان سنجی سیستم‌های سرمایش تبخیری مبتنی بر چرخه‌ی مایسوتسنکو در شهرهای ایران

چکیده: این مقاله به معرفی سیستم‌های سرمایشی تبخیری مستقیم و غیرمستقیم می‌پردازد. بعد از آن نوع خاصی از سیستم‌های سرمایشی تبخیری غیرمستقیم که بر اساس چرخه‌ی مایسوتسنکو کار می‌کنند معرفی می‌شود. سیستم‌هایی که بر اساس چرخه‌ی مایسوتسنکو کار می‌کنند، در حالت ایده‌آل می‌توانند دمای هوای ورودی را تا دمای نقطه‌ی شبنم هوای ورودی کاهش دهند. بازدهی حساب خیس این سیستم‌ها نسبت به سایر سیستم‌های سرمایشی تبخیری غیرمستقیم بالاتر است. در این سیستم‌ها از دو جریان هوا به‌جای یک جریان می‌توان استفاده‌ی مفید برد. این سیستم‌ها قادرند مصرف انرژی را تا ۹۰ درصد در مقایسه با راه‌حل‌های سنتی کاهش دهند. در ادامه با دسته‌بندی اقلیم‌های مختلف آب و هوایی ایران امکان استفاده از این سیستم در شهرهای مختلف ایران بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که با توجه به شرایط مختلف آب و هوایی شهرهای ایران، استفاده از این سیستم‌ها برای شهرهای با رطوبت نسبی بالا و اختلاف دمای زیاد بین حساب خشک و نقطه‌ی شبنم مانند رشت، ساری، رامسر و اردبیل مناسب نیست.

واژه‌های راهنما: سرمایش تبخیری غیرمستقیم، چرخه‌ی مایسوتسنکو، مصرف آب، مصرف انرژی.

امیرحسین عباسی
کارشناس ارشد

ولی محمدرزداری
دانشجوی کارشناسی ارشد

سید ابودر فناپی*
دانشیار،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه بیرجند، بیرجند

مقاله مروری
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱

Amirhossein
Abbasi
MSc

Vali
mohammadrazdari
MSc Student

Sayed aboozar
fanaee*
Associate Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering,
University of Birjand,
Birjand

Feasibility study of evaporative cooling systems based on Maisotsenko cycle in cities of Iran

Abstract: This article introduces direct and indirect evaporative cooling systems. Then a special type of indirect evaporative cooling systems working based on the Maisotsenko cycle is introduced. Systems based on the Maisotsenko cycle can ideally reduce the inlet air temperature to the dew point temperature of the inlet air. The wet-bulb efficiency of these systems is higher than other indirect evaporative cooling systems. These systems can reduce energy consumption up to 90% compared to traditional ways. In the following, by classifying the different climates of Iran, the possibility of using this system in different cities of Iran has been investigated. The obtained results show that due to the different climatic conditions of cities of Iran, using these systems is not suitable for cities with high relative humidity and large difference between dry-bulb and dew point temperatures such as Rasht, Sari, Ramsar, and Ardabil.

Keywords: Indirect evaporative cooling, Maisotsenko cycle, Water consumption, Energy consumption.

۱- مقدمه

میان گونه‌ی جدیدی از سیستم‌های سرمایش تبخیری غیرمستقیم به نام چرخه‌ی مایوسونکو وجود دارد. این چرخه همانند یک سیستم سرمایش تبخیری غیرمستقیم از صفحات خشک و خیس استفاده می‌کند اما با ایجاد یک جریان هوای بسیار متفاوت (پیش سرمایش هوا در کانال خشک پیش از ورود به کانال خیس) باعث ایجاد یک چرخه‌ی ترمودینامیکی جدید می‌شود [۹]. این سیستم جدید، جهش بزرگی در زمینه‌ی سیستم‌های تبخیری بوده است [۱۰]. باتوجه به آب‌وهوای خشکی که اکثر شهرهای ایران دارند، این سیستم را می‌توان جایگزین مناسبی با تولید هوای باکیفیت‌تر برای سیستم‌های سرمایشی مستقیم (کولرهای آبی) دانست [۱۱].

در این مقاله ابتدا نحوه‌ی عملکرد انواع سیستم‌های سرمایشی تبخیری بررسی شده و سپس سیستم سرمایش تبخیری غیرمستقیم مبتنی بر چرخه‌ی مایوسونکو معرفی و با دسته‌بندی شهرهای مختلف ایران با توجه شرایط متفاوت آب‌وهوایی، امکان استفاده از این چرخه در شهرهای مختلف ایران بررسی خواهد شد.

۲- سیستم‌های سرمایش تبخیری

سرمایش تبخیری یک روش کارآمد برای ایجاد سرمایش و رطوبت در ساختمان‌های مسکونی، اداری و همچنین برخی از فضاهای صنعتی هستند [۱۲]. سرمایش تبخیری مبتنی بر انتقال حرارت و جرم بین هوا و آب است [۱۳]. مبنای اصلی این سیستم ها، تبدیل گرمای محسوس به گرمای نهان است. هوای گرم و خشک موجود در فضای اطراف سیستم از طریق دیواره‌های متخلخل یا پوشال‌های خیس شده آن وارد محفظه‌ای بسته می‌شود. با انتقال بخشی از گرمای محسوس هوا به آب و تبدیل آن به گرمای نهان، مقداری از آب تبخیر می‌شود. تبخیر آب باعث کاهش دمای حباب خشک و افزایش رطوبت نسبی هوا می‌شود. انرژی لازم برای تبخیر آب از گرمای محسوس موجود در هوا گرفته می‌شود و هوای عبوری از محفظه‌ی بسته بدین‌وسیله سرد خواهد شد. به دلیل ثابت بودن مقدار آنتالپی در فرایند تبدیل گرمای محسوس به گرمای نهان، این فرایند یک فرایند آدیاباتیک هست [۱۴].

چهار عامل مهم و مؤثر بر میزان تبخیر آب در این سیستم‌ها به‌صورت زیر هستند [۱۴]:

(الف) رطوبت نسبی

این پارامتر به‌صورت نسبت درصد بخار آب موجود در هوای محیط به بیشترین ظرفیت امکان وجود بخار آب در هوا در آن دما تعریف می‌شود. هنگامی که رطوبت نسبی موجود در هوا کم

امروزه باتوجه به پیشرفت‌های صنعتی بشر بهبود استانداردهای زندگی و در این راستا آسایش حرارتی به‌صورت ویژه مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی رشد سریع مصرف انرژی، نگرانی‌های جدی در مورد تأمین منابع انرژی و تأثیرات شدید آن بر تغییر اقلیم زمین را به وجود آورده است [۱]. همچنین بر اساس بررسی‌های کمیسیون توسعه پایدار سازمان ملل متحد، ایران از سال ۱۹۹۰ به لیست کشورهای کم‌آب جهان اضافه شده است. در ایران محدودیت ذاتی منابع آب یکی از مهم‌ترین چالش‌های بخش آب است و در حال حاضر ایران در بین چهار سطح تعریف شده‌ی جهان برای تنش‌های آبی در حادترین سطح تنش قرار گرفته است [۲]. در دو دهه‌ی گذشته مصرف انرژی جهان (سوخت‌های فسیلی) ۴۹ درصد و انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید ۴۳ درصد افزایش پیدا کرده است [۳]. در کشورهای پیشرفته ۵۰ درصد از انرژی مصرفی ساختمان‌ها و ۲۰ درصد از انرژی کل مصرفی مربوط به سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع است [۴]. در سال‌های اخیر باتوجه به افزایش دمای هوا در فصل تابستان، عایق‌بندی ساختمان‌ها و نیاز به سیستم‌های تهویه در ساختمان‌ها افزایش پیدا کرده است [۵]. برای پاسخ‌گویی به این امر، نیاز به تهیه‌ی لوازم تهویه مطبوع بدون مصرف زیاد انرژی الکتریکی می‌باشد که برخی از این سیستم‌ها می‌توانند بر اساس استفاده از یک منبع انرژی طبیعی، مانند تبخیر آب گسترش یابند. پیشرفت روش‌های سرمایش تبخیری در زمینه‌ی کاهش مصرف برق و همچنین عدم استفاده از مبردهای خطرناک بسیار امیدوارکننده است [۶]. سیستم‌های سرمایش تبخیری^۱ از گرمای نهان تبخیر آب برای تهویه‌ی هوای ساختمان‌ها استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها ۲۰ درصد مقدار انرژی الکتریکی استفاده‌شده در سیستم‌های تبرید تراکمی را مصرف می‌کنند که، معادل کاهش ۴۴ درصدی تولید کربن‌دی‌اکسید تولیدشده به-وسیله‌ی سیستم‌های تبرید تراکمی است. از این‌رو سیستم‌های سرمایشی تبخیری خطرات کم‌تری را برای محیط‌زیست نیز به همراه دارند [۷]. سیستم‌های سرمایش تبخیری به دو دسته‌ی کلی سیستم‌های سرمایش تبخیری مستقیم^۲ و غیرمستقیم^۳ تقسیم می‌شوند. باتوجه به سیستم‌های متنوع موجود برای ایجاد سرمایش در محیط، سیستم‌های مبتنی بر سرمایش تبخیری غیرمستقیم باتوجه به هزینه‌ی کم و راندمان بالا می‌توانند به-صورت گسترده مورد استفاده قرار بگیرند [۸]. به لحاظ ترمودینامیکی، یک سیستم سرمایشی تبخیری غیرمستقیم هوای اولیه یا هوای تولیدی را از سمت خشک یک صفحه و هوای ثانویه یا هوای کاری را از سمت مخالف و خیس این صفحه عبور می‌دهد. سمت خیس صفحه با دریافت گرمای هوای سمت خشک و تبخیر شدن باعث سرد شدن هوای اولیه می‌شود [۹]. سیستم‌های مبتنی بر سرمایش تبخیری غیرمستقیم می‌توانند دمای پایین‌تری را تولید نمایند و علاوه بر آن هیچ‌گونه رطوبتی را به هوا اضافه نکنند. این سیستم‌ها در حالت ایده‌آل قادرند دمای هوا را تا دمای حباب خیس هوای ورودی کاهش دهند [۷]. در این

³ Indirect evaporative systems

¹ Evaporative coolers

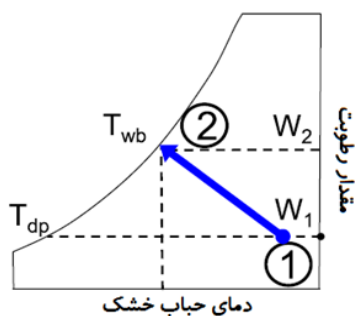
² Direct evaporative systems



شکل ۱ شماتیک سیستم سرمایش تبخیری مستقیم [۱۷]

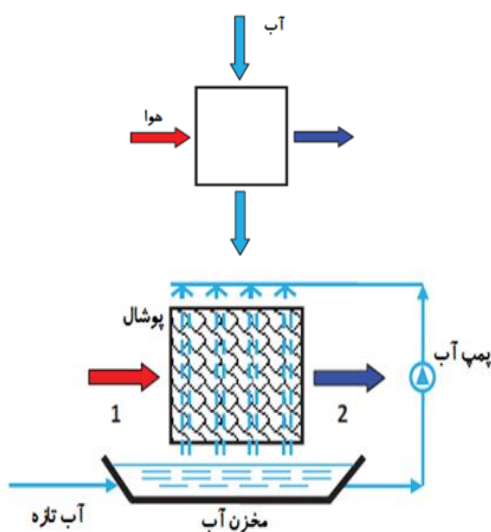
نمودار سایکومتریک این سیستم‌ها در شکل ۲ آمده است. در این سیستم دمای آب با دریافت انرژی حرارتی از هوا ضمن تبخیر شدن، کاهش پیدا می‌کند. گرمای تبخیر Q_v ، مطابق با رابطه‌ی زیر با اختلاف دمای هوا در ارتباط است [۱۵]:

$$C_{p,da}(T_{amb}-T_{out})=Q_v(W_{out}-W_{amb}) \quad (2)$$



شکل ۲ نمودار سایکومتریک سیستم سرمایشی تبخیری مستقیم [۱۷]

در شکل ۳ می‌توان نحوه‌ی عملکرد یک سیستم سرمایشی تبخیری مستقیم را مشاهده نمود. در این سیستم‌ها جریان هوا به طور مستقیم در تماس با جریان آب می‌باشد و همین موضوع باعث افزایش رطوبت هوا بعد از تبخیر آب می‌شود. برای گردش آب، از یک پمپ و برای افزایش سطح تبخیر آب، از پوشال‌های مخصوص این سیستم‌ها استفاده می‌شود [۱۵].



شکل ۳ نحوه‌ی عملکرد سیستم سرمایش تبخیری مستقیم [۱۵]

است، در این شرایط هوا می‌تواند رطوبت بیشتری را دریافت کند.

(ب) دمای هوا

آب با دریافت مقدار کافی انرژی جهت تغییر فاز، تبخیر می‌شود و هوای با دمای نسبتاً زیاد قادر به انجام این فرایند و نگهداری مقدار نسبتاً زیادی بخار آب می‌باشد؛ بنابراین میزان سرمایش یک سیستم تبخیری، متناسب با دمای هوای محیط اطراف آن خواهد بود.

(ج) جابجایی هوا

جابجایی هوا یک عامل مهم برای تبخیر می‌باشد. هم‌زمان با تبخیر آب روی سطح، میزان رطوبت هوا افزایش می‌یابد. چنانچه هوای مرطوب در نزدیکی سطح باقی بماند، میزان تبخیر کم می‌شود. از طرف دیگر اگر هوای تازه جایگزین هوای مرطوب نزدیک سطح شود، میزان تبخیر افزایش می‌یابد.

(د) مساحت سطح

هر چه سطح آب موجود برای تبخیر بیشتر شود، میزان تبخیر نیز افزایش می‌یابد. این بدان معناست که میزان تبخیر آب رابطه‌ی مستقیمی با مساحت سطح تبخیر دارد. بازدهی سیستم‌های تبخیری به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۵]:

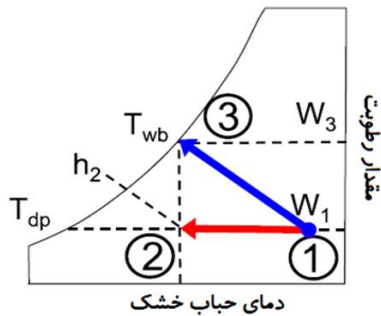
$$\eta = \frac{t_{amb}-t_{out}}{t_{amb}-t_{amb,wb}} \quad (1)$$

به‌طور کلی سیستم‌های سرمایش تبخیری به دو دسته‌ی مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند.

۲-۱- سیستم‌های سرمایشی تبخیری مستقیم

استفاده از سیستم‌های سرمایشی تبخیری مستقیم، رایج‌ترین شیوه برای تهیه مطبوع در ساختمان‌ها است [۱۶]. سیستم‌های سرمایش تبخیری مستقیم به‌منظور کاهش درجه‌ی حرارت و افزایش رطوبت هوا با استفاده از گرمای نهان تبخیر، ضمن تبدیل آب مایع به بخار آب استفاده می‌شوند. این سیستم‌ها از یک فن برای وارد کردن هوا به سطوح متخلخل یا پوشال‌های خیس شده که مساحت زیادی را برای تبخیر آب فراهم می‌سازند، استفاده می‌کنند. در این فرایند، هوای گرم و خشک تبدیل به هوای خنک و مرطوب می‌شود [۱۴]. این سیستم‌ها عملکرد رضایت‌بخشی در کاهش دمای هوا دارند، اما با توجه به ساختار آن‌ها رطوبت قابل توجهی را به هوا اضافه می‌کنند [۱۵].

شماتیک کلی یک سیستم سرمایشی تبخیری مستقیم در شکل ۱ آمده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود هوای ورودی به این سیستم به طور مستقیم با آب موجود بر روی سطوح متخلخل در تماس است و با یکدیگر تبادل حرارت انجام می‌دهند.



دمای حباب خشک

شکل ۵ نمودار سایکومتريک سيستم سرمايشی تبخیری غيرمستقيم [۱۷]

برای استفاده از مزیت کاهش دمای قابل توجه در سرمايش تبخیری مستقيم، می توان از سيستم های سرمايش تبخیری غيرمستقيم همراه با سيستم های مستقيم استفاده کرد که این سيستم را سيستم خنک کننده تبخیری مرکب نیز می نامند. این سيستم ها تا حد زیادی قابليت تنظيم رطوبت و دما را در مناطق مختلف ایجاد می کنند. این سيستم ها به دو دسته ی زیر تقسیم بندی می شوند:

الف) سيستم های خنک کننده تبخیری مرکب با مبدل لوله ای: در این سيستم ها یک محفظه ی خنک کننده تبخیری غيرمستقيم با مبدل لوله ای همراه با سيستم خنک کننده استفاده می شود. این سيستم راندمان بالایی، حداکثر در حدود ۹۴ درصد ایجاد می کند.

ب) سيستم های خنک کننده تبخیری مرکب با مبدل صفحه ای: در این سيستم ها مبدل از نوع صفحه ای بوده و جریان هوا در ورود به دو بخش اولیه و ثانويه تقسیم می شود. پس از انجام سرمايش محسوس بر روی جریان هوای اولیه، جریان ثانويه به بخش مستقيم منتقل شده و خنک می گردد [۱۸].

۳- سيستم سرمايشی غيرمستقيم مبتنی بر چرخه ی مایسوتسنکو

گونه ای از سيستم های سرمايش تبخیری غيرمستقيم از یک چرخه به نام چرخه ی مایسوتسنکو استفاده می کنند که در آن از مبدل حرارتی چندمرحله ای استفاده می شود. چرخه ی مایسوتسنکو، فرایندهای ترمودینامیکی انتقال حرارت و سرمايش تبخیری را با یکدیگر در یک سيستم واحد ترکیب می کند تا بتواند دمای هوا را تا دمای نقطه شبنم هوای ورودی (نه دمای حباب خيس) کاهش دهد. این چرخه با استفاده از تفاوت آنتالپی هوا با دمای نقطه ی شبنم و هوای اشباع شده از رطوبت با دمای بالاتر کار می کند. در این چرخه هوا قبل از عبور از محفظه ی تبخیر آب پيش سرد می گردد [۱۹].

شماتیک کلی یک سيستم سرمايشی تبخیری غيرمستقيم بر اساس چرخه ی مایسوتسنکو در شکل ۶ آمده است. همان طور که مشاهده می شود مقداری از هوای خنک شده موجود در کانال خشک قبل از خروج به کانال خيس منتقل می شود.

سيستم های تبخیری مستقيم به دليل ساختاری که دارند رطوبت قابل توجهی را به هوا اضافه می کنند. در نتیجه، این هوا را می توان برای کاربردهای رایج تهويه مطبوع نامناسب دانست زیرا تولید هوای با بیش از ۸۰ درصد رطوبت نسبی توسط این سيستم ها دور از انتظار نیست؛ بنابراین سيستم های سرمايشی تبخیری غيرمستقيم راه حل مناسبی برای رفع این مشکل هستند [۱۵].

۲-۲ سيستم سرمايشی تبخیری غيرمستقيم

سيستم های سرمايشی تبخیری غيرمستقيم هم زمان با بهره گیری از سيستم سرمايشی تبخیری مستقيم، از یک مبدل حرارتی برای انتقال انرژی سرمايشی به هوا استفاده می کنند. هوای مرطوب و خنک شده حاصل از فرایند سرمايش تبخیری مستقيم، هرگز در تماس مستقيم با هوای ورودی به ساختمان نخواهد بود. هوای مرطوب به فضای بیرون تخلیه می شود و یا برای خنک کردن یک دستگاه خارجی مانند یک سلول خورشیدی استفاده می شود [۱۴]. از آنجایی که در این سيستم ها دو جریان هوای قابل استفاده تولید می شود، توسعه ی این سيستم ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۵]. شکل ۴ شماتیک کلی یک سيستم سرمايشی تبخیری غيرمستقيم را نشان می دهد.



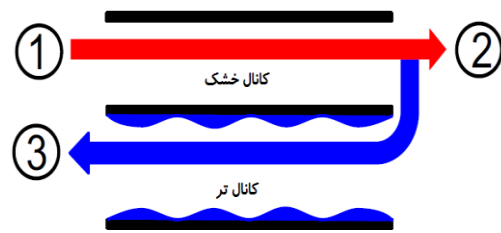
شکل ۴ شماتیک سيستم سرمايش تبخیری غيرمستقيم [۱۷]

مطابق با شکل ۴ هوای ورودی به محفظه ی خشک، گرمای خود را از طریق سطوح به محفظه ی خيس منتقل می کند و در نهایت هنگام خروج دارای دمای کمتری نسبت به حالت اولیه می باشد. ضمن این تبادل گرمای، رطوبت هوای خروجی از محفظه ی خشک تغییری نمی کند. فرایند رخ داده در محفظه ی خيس مانند یک سيستم سرمايش تبخیری مستقيم است. مزیت این سيستم ثابت نگاه داشتن رطوبت هوای ورودی به ساختمان است، اما نمی تواند

دمای هوا را به خوبی سيستم سرمايشی تبخیری مستقيم کاهش دهد. تعادل حرارتی بین دو جریان هوا در این سيستم به صورت زیر تعريف می شود [۱۵]:

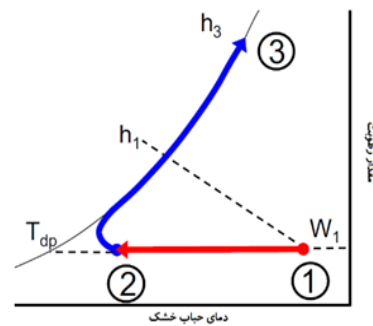
$$Q_{wc,s} = \dot{m}_{ac}(h_{amb} - h_{out}) = \dot{m}_{wc}[c_{p,da}(t_{amb} - t_{out}) + r(w_{out} - w_{amb})] \quad (۳)$$

نمودار سایکومتريک این سيستم ها در شکل ۵ آمده است. در این شکل خط آبی نشان دهنده ی جریان هوای محفظه ی خيس و خط قرمز نشان دهنده ی جریان هوای محفظه ی خشک است.



شکل ۶ شماتیک چرخه‌ی مبنای مایسوتسنکو [۱۷]

نمودار سایکومتریک چرخه‌ی مبنای مایسوتسنکو در شکل ۷ آمده است.



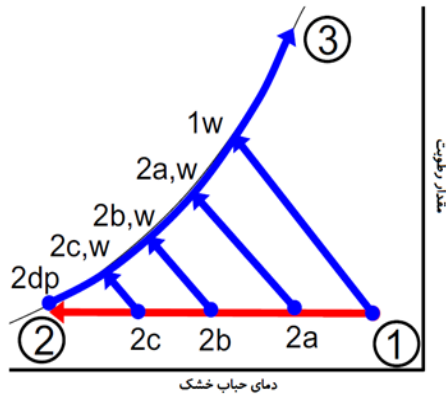
شکل ۷ نمودار سایکومتریک چرخه‌ی اولیه‌ی مایسوتسنکو [۱۷]

با توجه به شکل ۷، هوای خروجی از کانال خشک (خط قرمز) با ثابت ماندن مقدار رطوبت با دمای کمتری نسبت به حالت ورودی، وارد ساختمان می‌شود و جریان هوای ورودی به کانال خیس (خط آبی) با افزایش رطوبت بر روی خط اشباع حرکت می‌کند. با جداسازی هوای پیش‌سرد شده برای ورود به کانال تر و ایجاد یک دسته جریان هوای متفاوت، چرخه‌ی معرفی‌شده‌ی اولیه مایسوتسنکو اصلاح و کارایی آن افزایش می‌یابد. شماتیک کلی چرخه‌ی اصلاح‌شده در شکل ۸ آمده است.



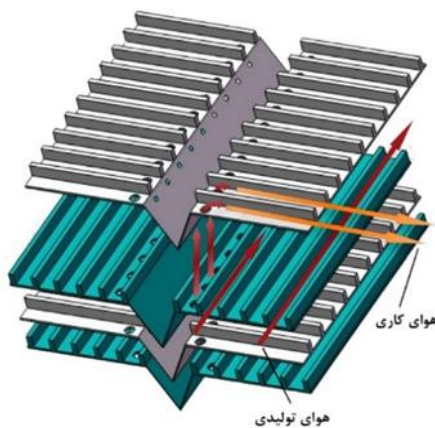
شکل ۸ شماتیک چرخه‌ی اصلاح‌شده‌ی مایسوتسنکو [۱۷]

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود تمام هوای ورودی به محفظه‌ی خشک با کاهش دما و ثابت ماندن مقدار رطوبت از سیستم خارج می‌شود. نمودار سایکومتریک این سیستم در شکل ۹ آمده است.



شکل ۹ نمودار سایکومتریک چرخه‌ی اصلاح‌شده‌ی مایسوتسنکو [۱۷]

در این سیستم‌ها می‌توان از یک مبدل حرارت و جرم جریان متقاطع و هم از مبدل حرارت و جرم جریان متقابل استفاده کرد. مبدل جریان متقابل دارای کارایی سرمایه‌ی بیشتری نسبت به مبدل جریان متقاطع است [۲۰]. سیستم سرمایه‌ی تبخیری غیرمستقیم جریان متقاطع بر اساس چرخه‌ی مایسوتسنکو در شکل ۱۰ نشان داده شده است. هوای کاری که بخشی از هوای ورودی است، از طریق سوراخ‌های توزیع‌شده در امتداد محفظه‌های کاری خشک به محفظه‌های کاری خیس منحرف می‌شود. همچنین هوای محصول که بخش دیگری از هوای ورودی است، در محفظه‌های خشک در جهت عمود بر هوای کاری جریان می‌یابد.



شکل ۱۰ شماتیک از یک مبدل حرارتی جریان متقاطع بر اساس چرخه‌ی مایسوتسنکو [۲۱]

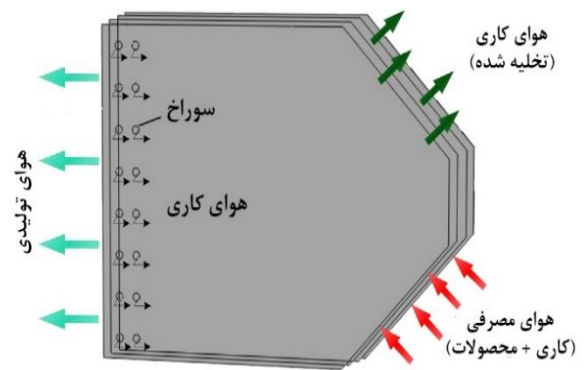
شکل ۱۱ نقشه‌ی یک مبدل جریان متقابل بر اساس چرخه‌ی مایسوتسنکو را نشان می‌دهد. هوای محصول و هوای کاری از سمت راست مبدل وارد محفظه‌های خشک می‌شوند. بخشی از جریان (هوای کاری) با عبور از سوراخ‌های تعبیه‌شده در انتهای محفظه‌های کاری خشک به محفظه‌های کاری خیس مجاور منتقل می‌شود. هوای کاری در جهت مخالف با هوای تولیدی جریان می‌یابد.

دادند. آن‌ها سه سیستم مختلف مبتنی بر چرخه‌ی مایسوتسنکو (سیستم‌های I و III برق مصرفی خود را مستقیماً از یک شبکه‌ی توزیع برق در ساختمان تهیه می‌کنند، در حالی که سیستم II از پنل‌های خورشیدی نصب‌شده بر روی خود سیستم برای تهیه‌ی برق استفاده می‌کنند) را مورد بررسی قرار دادند. برای هر سه سیستم سرعت جریان، جرم ورودی و آنتالپی هوای خشک یکسان است. نتایج این کار نشان می‌دهد ظرفیت سرمایشی چرخه‌ی حاضر به نرخ جریان جرم هوای خشک و اختلاف آنتالپی هوای ورودی و خروجی بستگی دارد.

ثقفی و گادالا [۲۷] استفاده از چرخه‌ی مایسوتسنکو در یک توربین گازی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد با استفاده از این چرخه بازدهی سیستم موردنظر در مقایسه با Air Bottoming Cycle، ۳/۷ درصد افزایش می‌یابد که همین امر باعث صرفه‌جویی ۲۶۰۰ تن سوخت گاز طبیعی در سال می‌شود. ژاو و همکاران [۲۸] و ژان و همکاران [۲۹] در مقالاتی یک چرخه‌ی مایسوتسنکو با جریان متقاطع را به صورت عددی بررسی کردند و نتایج زیر را گزارش دادند:

- ۱- بازدهی مبدل انتقال جرم و حرارت بر پایه‌ی چرخه‌ی مایسوتسنکو ۱۶/۷ درصد بیش‌تر از مبدل‌های غیرمستقیم معمولی است.
- ۲- با افزایش سرعت هوا در محفظه‌ها، بازدهی حباب خیس و ضریب عملکرد مبدل کاهش می‌یابد.
- ۳- کاهش سرعت جریان، باعث بزرگ‌تر شدن اندازه‌ی مبدل و افزایش هزینه‌ی ساخت می‌شود.
- ۴- کاهش ارتفاع محفظه‌ها، باعث افزایش بازدهی حباب خیس و ضریب عملکرد می‌شود.
- ۵- افزایش طول محفظه‌ها به ترتیب باعث افزایش و کاهش بازده و ضریب عملکرد دستگاه می‌شود.
- ۶- افزایش دمای هوای ورودی باعث افزایش بازده و ضریب عملکرد سیستم می‌شود.
- ۷- با افزایش رطوبت ورودی بازده و ضریب عملکرد سیستم به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد.
- ۸- عملکرد سیستم وابستگی زیادی به شرایط هوای ورودی دارد.

قربانی و همکاران [۲۲] نحوه‌ی عملکرد چرخه‌ی مایسوتسنکو را برای نقاط مختلف ایران بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که برخلاف سیستم‌های سرمایشی تبخیری مستقیم متداول (کولر آبی) که به علت افزایش رطوبت هوا تنها در نقاط گرم و خشک استفاده می‌شوند، سیستم‌های سرمایشی مبتنی بر چرخه‌ی مایسوتسنکو به علت ثابت نگه‌داشتن رطوبت هوا علاوه بر نقاط گرم و خشک در نقاط گرم و مرطوب نیز می‌توانند استفاده شوند. همچنین با بررسی انجام‌شده برای شهرهای مختلف ایران دریافتند که، استفاده از این سیستم در اکثر مناطق ایران (به علت پایین بودن نسبت رطوبت) می‌تواند شرایط آسایش را فراهم کند. همچنین نتایج این کار نشان می‌دهد که در شهرهای با دمای بالا و نسبت رطوبت پایین، ضریب عملکرد این سیستم بسیار بالا است. استفاده از این سیستم برای مناطق گرم



شکل ۱۱ شماتیک یک مبدل جریان متقابل بر اساس چرخه‌ی مایسوتسنکو [۲۱]

۳-۱- تحقیقات گذشته

گیلان در سال ۲۰۰۸ کارایی چرخه‌ی مایسوتسنکو را بدون استفاده از روش تحلیل اگزرژی بیان کرد. در حالت ایده‌آل این چرخه قادر خواهد بود دمای هوای ورودی را تا دمای نقطه‌ی شبنم هوای ورودی کاهش دهد [۹]. عملکرد این سیستم به پارامترهایی همچون دما و رطوبت هوا بستگی دارد. به طوری که با افزایش دمای هوای ورودی، ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایشی سیستم افزایش می‌یابد و با افزایش نسبت رطوبت هوای ورودی، ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایشی کاهش می‌یابد [۲۲]. استفاده از خنک‌کننده‌های نقطه‌ی شبنم در کاربردهای مختلفی به‌ویژه تهویه مطبوع و پیش‌سرمایش هوای ورودی به کمپرسور در واحدهای تولید توان رایج است. 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 داده و در آینده بیش‌تر از آن‌ها شنیده شود [۲۳]. گیلان و مایسوتسنکو در سال ۲۰۰۳ چرخه‌ی با خنک‌کننده‌ی نقطه‌ی شبنم را برای استفاده در یک توربین قدرت گازی مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق نشان داد که اکسیدهای نیتروژن تولیدی و هزینه‌ی تجهیزات هنگام استفاده از چرخه‌ی مایسوتسنکو نسبت به هر چرخه قدرت دیگری کم‌تر است [۲۴]. مایسوتسنکو و ری زین در سال ۲۰۰۵ عملکرد مبدل‌های حرارتی موجود در وسایل سرمایشی الکترونیکی را هنگام استفاده از چرخه‌ی مایسوتسنکو، مورد بررسی قرار دادند. نتایج این کار نشان می‌دهد محدوده‌ی وسیعی از ظرفیت سرمایشی در بازه‌ی ۱۰ وات تا ۵۰ کیلووات یا حتی بیش‌تر با استفاده از این چرخه برای وسایل سرمایشی قابل دست‌یافتن است [۲۵]. ژان و همکاران در سال ۲۰۱۱ تحلیلی عددی از کاربرد چرخه‌ی مایسوتسنکو را در یک مبدل حرارتی جریان متقاطع برای به‌دست‌آوردن کارایی ترمودینامیکی این چرخه بدون تحلیل اگزرژی انجام دادند. در این تحلیل نتایج روش المان محدود با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که شرایط اقلیمی تأثیر بسزایی بر عملکرد این سیستم دارد [۶]. کالیسکان و همکاران [۲۶] تحقیقی در مورد استفاده از این سیستم‌ها در ساختمان‌ها انجام

- ۳- استفاده از این سیستم در مناطق گرم و خشک با تولید کمترین میزان آلاینده‌گی همراه است و کارایی بسیار بالایی دارد [۲۲].
- ۴- به علت ثابت نگه‌داشتن رطوبت هوا علاوه بر نقاط گرم و خشک در نقاط گرم و مرطوب نیز می‌توانند استفاده شوند [۲۲].
- ۵- استفاده از این سیستم در مناطق گرم و خشک نیاز به مصرف آب کمتری نسبت به مناطق معتدل یا مرطوب دارد [۲۶]. این امر استفاده از این سیستم برای کشور ایران را مناسب‌تر می‌کند.
- ۶- استفاده از چرخه‌ی مایوسوتسنکو در مقایسه با راه‌حل‌های سنتی می‌تواند مصرف انرژی را تا ۹۰ درصد کاهش دهد [۳۱].
- ۷- علاوه بر سیستم‌های تهویه مطبوع، چرخه‌ی مایوسوتسنکو می‌تواند برای آب‌شیرین‌کن‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرد و باعث افزایش کارایی توربین‌های گازی و پنل‌های فتوولتائیک شود [۳۱].
- ۸- بازدهی حباب خیس این چرخه حداکثر ۱/۸ است درحالی‌که برای سایر سیستم‌های سرمایشی تبخیری غیرمستقیم این عدد ممکن است نهایتاً به عدد ۱ برسد [۱۷].
- ۹- مبدل گرمایی جریان متقاطع این چرخه در مقایسه با مبدل گرمایی سرمایش تبخیری غیرمستقیم معمولی، دارای بازدهی تولید سرمایش بالاتری هست، اما هنوز با محدودیت‌های زیادی روبرو است که برخی از این موارد عبارت‌اند از:

الف) باتوجه‌به اینکه درصد زیادی از هوای موجود در کانال خشک به کانال‌های مرطوب مجاور تغییر مسیر می‌دهد، کاملاً خشک نمی‌شود [۳۲].

ب) باتوجه‌به ساختار مبدل گرمایی، جریان هوای تولید شده یک جریان هوای عمودی است که برای تبادل گرمایی مناسب نیست [۳۲].

۳-۳- تحلیل انرژی

راندمان حباب خیس را به‌عنوان یکی از معیارهای کارایی این چرخه، می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد [۳۳]:

$$\eta_{wb} = \frac{t_{in} - t_{out}}{t_{in} - t_{wb,in}} \quad (4)$$

باتوجه‌به راندمان بالای چرخه‌ی مایوسوتسنکو، این چرخه قابلیت کاهش دمای هوای ورودی تا زیر دمای حباب خیس با کمترین افزایش رطوبت در هوای ورودی را دارد [۳۳]. همچنین راندمان نقطه‌ی شبنم می‌تواند برای محاسبه‌ی توانایی این چرخه در سردسازی دمای هوای ورودی تا دمای نقطه‌ی شبنم هوای ورودی به‌صورت رابطه‌ی زیر مورد استفاده قرار گیرد [۳۳]:

و خشک در مقایسه با سایر سیستم‌های تبرید با تولید کمترین میزان آلاینده‌گی همراه است و کارایی بسیار بالایی نیز دارد. فراستی و همکاران [۳۰] استفاده از مبدل‌های مبتنی بر چرخه‌ی مایوسوتسنکو برای خنک‌سازی هوای ورودی به کمپرسور توربین گاز را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد برای شرایط آب‌وهوایی تهران در صورتی‌که این سیستم برای دمایی بالای ۱۵ درجه‌ی سلسیوس شروع به کار کند، راندمان حرارتی مجموعه را ۴/۰۵ درصد افزایش می‌دهد. همچنین استفاده از این مبدل به‌عنوان سیستم سرمایش هوای ورودی توربین گاز نسبت به حالتی که هیچ‌گونه تجهیزات سرمایشی استفاده نشده است، توان توربین را چیزی نزدیک به ۱۰ درصد افزایش می‌دهد.

۳-۲- کاربردها و مزایا

به دلیل نحوه‌ی عملکرد چرخه‌ی مایوسوتسنکو، این چرخه در صنایع بسیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۱۲ می‌توان به‌صورت جامع کاربردهای این چرخه را مشاهده کرد [۱۷].



شکل ۱۲ طیف گسترده‌ای از کاربردهای چرخه‌ی مایوسوتسنکو [۱۷] از مزایای استفاده از این سیستم‌ها به‌طور کلی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- در این سیستم‌ها از دو جریان هوا به‌جای یک جریان می‌توان استفاده‌ی مفید برد.
- ۲- در این سیستم‌ها هیچ‌گونه رطوبتی به هوای ورودی اضافه نمی‌شود.

علاوه بر این بازدهی انرژی و ضریب عملکرد انرژی به ترتیب به صورت رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ تعریف می‌شوند [۳۶]:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}X_{out}}{\dot{E}X_{in}} = \frac{e_{total}}{e_{da} + w_{in}e_{water}} \quad (12)$$

$$COP_{ex} = COP \left(1 - \frac{t_{ds}}{t_{in}}\right) \quad (13)$$

۴- بررسی استفاده از چرخه‌ی مایسوتسنکو در اقلیم

ایران

برای بررسی امکان استفاده از سیستم سرمایشی مبتنی بر چرخه‌ی مایسوتسنکو ابتدا جغرافیای ایران بر اساس شرایط آب‌وهوایی به اقلیم‌های مختلف تقسیم می‌شود. سپس با توجه به مشخصات دمایی شهرهای مهم هر اقلیم، معیار استفاده از این چرخه در نواحی مختلف بررسی می‌شود. مطابق با مرجع [۳۶] معیار مشخص‌کننده برای قابلیت استفاده از این چرخه مرتبط با اختلاف دمایی بین حباب خشک و نقطه‌ی شبنم است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$FI_{dp} = t_{db} - t_{dp} \quad (14)$$

باتوجه به این معیار، برای استفاده از این چرخه، اختلاف دمایی بیان شده همواره باید مقداری بیش‌تر از ۶ درجه‌ی سلسیوس داشته باشد. همچنین مصرف آب این سیستم را نیز می‌توان به عنوان یکی از معیارهای دیگر این سیستم در نظر گرفت. در شرایط مشابه مقدار اختلاف دمایی (FI_{dp}) کم‌ترین میزان تبخیر آب (به دلیل کم‌ترین میزان مصرف انرژی) ترجیح داده می‌شود. ایران در نیم‌کره شمالی بین عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه قرار داشته و بیش‌تر مناطق آن در ارتفاع بالاتر از ۴۵۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است. این شرایط جغرافیایی لزوماً به ایجاد شرایط آب و هوایی معتدل برای ایران منجر می‌شود، اما به دلیل وجود کوه‌های البرز و زاگرس، منطقه‌ی خشک و بایر در مرکز و شرق ایران ایجاد می‌شود. تفاوت عرض جغرافیایی ۱۵ درجه و بیش از ۲۵۰۰ متر اختلاف ارتفاع بین نقاط مختلف ایران منجر به ایجاد شرایط مختلف آب و هوایی در ایران می‌شود [۳۶]. به‌طور کلی با توجه به این توضیحات جغرافیای ایران به ۱۱ اقلیم در جدول ۱ تقسیم می‌شود.

$$\eta_{dp} = \frac{t_{in} - t_{out}}{t_{in} - t_{dp,in}} \quad (5)$$

در این رابطه $t_{dp,in}$ دمایی نقطه‌ی شبنم هوای ورودی است. دمایی حباب خشک، دمایی است که یک دماسنج استاندارد در معرض جریان هوا نشان می‌دهد. دمایی حباب خیس، نوعی از اندازه‌گیری دما است که مشخصه‌های فیزیکی یک سیستم مخلوط متشکل از هوا و بخار آب را نشان می‌دهد که مقدار آن با کم‌ترین دمایی که هوا می‌تواند فقط به وسیله‌ی تبخیر آب به دست آورد، برابر است [۳۴]. دمایی حباب خشک و دمایی حباب خیس برای به‌دست آوردن مقدار رطوبت هوا به کار می‌روند. دمایی نقطه‌ی شبنم، دمایی هوایی است که در حال تغییر فاز از بخار به مایع است. دمایی نقطه‌ی شبنم، پایین‌ترین دما بین سه دمایی گفته‌شده است [۳۵].

نرخ ظرفیت سرمایشی سیستم را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد [۳۳]:

$$\dot{Q}_{cooling} = \dot{m}_{out}(h_{in} - h_{out}) \quad (6)$$

نسبت گرمای گرفته‌شده از مخزن سرد به کار ورودی را ضریب عملکرد این سیستم خنک‌کننده گویند [۳۳]:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{cooling}}{\dot{W}_{blower}} \quad (7)$$

۳-۴- تحلیل انرژی

تبادل انرژی برای چرخه‌ی مایسوتسنکو در یک حجم کنترل به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳۳]:

$$\dot{E}X_{in} = \dot{E}X_{out} + \dot{E}X_{dest} + \dot{E}X_{loss} \quad (8)$$

جایی که نرخ انرژی ورودی به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۳]:

$$\dot{E}X_{in} = \dot{E}X_{in,da} + \dot{E}X_{in,water} \quad (9)$$

باتوجه به روابط ۸ و ۹ رابطه‌ی مربوط به تعادل انرژی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۳۶]:

$$\dot{m}_{da}e_{da} + \dot{m}_{da}w_{in}e_{water} = \dot{m}_{da}e_{total} + \dot{E}X_{dest} + \dot{Q}_{cooling} \left(1 - \frac{t_{ds}}{t_{in}}\right) \quad (10)$$

همچنین نرخ تولید آنتروپی از رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود [۳۶]:

$$\dot{S} = \frac{\dot{E}X_{dest}}{t_{ds}} \quad (11)$$

جدول ۱ اقلیم‌های دسته‌بندی شده ایران [۳۶]

شماره‌ی اقلیم	موقعیت	دمای متوسط سالیانه °C
۱	منطقه‌ی بین کوه‌های البرز و دریای خزر	۱۵-۱۸
۲	شمال استان خراسان و قسمت‌هایی از سمنان و استان گلستان	۱۲-۱۵
۳	شمال غربی ایران شامل اردبیل، آذربایجان شرقی و غربی	۱۱-۱۳
۴	غرب ایران، ارتفاعات غربی رشته‌کوه‌های زاگرس شامل استان‌های چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد و قسمت‌هایی از استان خوزستان	۱۱-۱۷
۵	جنوب غربی ایران شامل استان‌های خوزستان و ایلام که تحت تأثیر هوای گرم و خشک عربستان سعودی هستند.	۱۹-۲۵
۶	قسمت‌های نزدیک دریای جنوب ایران شامل استان‌های بوشهر، هرمزگان، جنوب سیستان و بلوچستان	۲۳-۲۸
۷	استان سیستان و بلوچستان به جز قسمت‌های جنوبی و جنوب استان کرمان	۱۸-۲۷
۸	جنوب استان خراسان و قسمت‌هایی از استان سمنان با بارش کم و دمای تقریباً بالا	۱۴-۱۷
۹	استان‌های سمنان، تهران، قزوین، زنجان، مرکزی، اصفهان و چهارمحال و بختیاری که در جنوب رشته‌کوه‌های البرز و شرق رشته‌کوه‌های زاگرس قرار گرفته‌اند.	۱۲-۱۸
۱۰	غرب، شمال و جنوب صحرا که دارای اقلیم بسیار گرم و خشک است.	۱۶-۲۰
۱۱	کفه‌های نمکی مرکزی ایران که دارای شرایط آب‌وهوایی خشک است.	۱۹-۲۳

جدول ۲ اطلاعات آب‌وهوایی برخی از شهرهای مهم ایران [۳۶]

شماره-ی شهر	رطوبت نسبی %	t_{db}	t_{wb}	t_{dp}
۵ آبادان	۶۱	۴۷/۷	۲۸	۲۳/۹
۹ اصفهان	۲۵	۳۸/۳	۱۹/۷	۵/۷
۵ اهواز	۲۴	۴۸/۵	۲۸/۴	۱۲/۶
۶ بندرعباس	۶۸	۳۹/۸	۳۰	۲۷/۱
۹ تهران	۲۶	۳۹	۱۸/۹	۷/۴
۳ تبریز	۳۶	۳۶/۵	۱۸/۹	۸/۲
۴ شهرکرد	۳۱	۳۴/۸	۱۶/۸	۵/۸
۴ شیراز	۲۴	۳۹/۱	۱۹/۵	۵/۸
۷ زاهدان	۲۱	۳۹/۵	۱۹/۷	۳/۴
۱۰ کرمان	۱۹	۳۸	۱۷/۹	۱/۱
۴ کرمانشاه	۲۳	۳۹/۸	۱۸/۸	۳/۶
۲ گرگان	۶۵	۳۶	۲۴	۲۰
۲ مشهد	۳۵	۳۷/۳	۱۸/۸	۸/۷
۵ ایلام	۱۹	۳۰/۳	۱۷	۲/۹
۱ ساری	۷۵	۲۶/۴	۲۴	۲۱/۳
۴ سمنان	۲۵	۲۷/۸	۱۸	۴/۶
۴ یاسوج	۲۵	۲۷/۱	۱۶	۴/۶
۹ اراک	۲۸	۲۷/۵	۱۷	۶
۳ ارومیه	۴۸	۲۳/۹	۱۸/۳	۱۱/۲
۳ اردبیل	۶۸	۱۹	۱۸	۱۲/۲
۸ بیرجند	۲۲	۲۸/۵	۱۶/۳	۳/۷
۹ زنجان	۴۱	۲۴/۴	۱۷/۸	۸/۷
۱۱ سمنان	۲۶	۳۲	۲۰	۹/۹
۹ قزوین	۳۸	۲۷/۳	۱۹	۱۰
۹ قم	۲۳	۳۲/۲	۱۸/۴	۷
۴ همدان	۳۶	۲۵/۵	۱۷/۳	۷/۸
۱ رامسر	۸۰	۲۵/۳	۲۴/۱	۲۱/۴
۱ رشت	۷۶	۲۵/۹	۲۴	۲۰/۷

با کمک اطلاعات جدول ۱، میزان تبخیر آب و شاخص امکان-سنجی چرخه‌ی مایسوتسنکو در جدول ۳ آمده است.

همچنین شرایط آب‌وهوایی برخی از شهرهای مهم ایران در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۳ نتایج مقدار آب تبخیری و شاخص چرخه‌ی مایوسنسکو [۳۶]

شماره اقلیم	شهر	V_{water} Lit/h	Fl_{dp}
۵	آبادان	۰/۶۶	۲۳/۸
۹	اصفهان	۰/۴۶	۳۲/۶
۵	اهواز	۰/۶۶	۳۵/۹
۶	بندرعباس	۰/۴۴	۱۲/۷
۹	تهران	۰/۴۴	۳۱/۶
۳	تبریز	۰/۲۹	۲۸/۳
۴	شهرکرد	۰/۳۲	۲۹
۴	شیراز	۰/۳۴	۳۳/۳
۷	زاهدان	۰/۳۴	۳۶/۱
۱۰	کرمان	۰/۳۳	۳۶/۹
۴	کرمانشاه	۰/۳۳	۳۶/۲
۲	گرگان	۰/۲۹	۱۶
۲	مشهد	۰/۳	۲۸/۶
۵	ایلام	۰/۲۱	۲۷/۴
۱	ساری	۰/۲	۵/۱
۴	سنندج	۰/۲۱	۲۴/۲
۴	یاسوج	۰/۲	۲۲/۵
۹	اراک	۰/۲	۲۱/۵
۳	ارومیه	۰/۱۴	۱۲/۷
۳	اردبیل	۰/۲۱	۶/۸
۸	بیرجند	۰/۱۴	۲۴/۸
۹	زنجان	۰/۲۱	۱۵/۷
۱۱	سمنان	۰/۲۲	۲۲/۱
۹	قزوین	۰/۲۳	۱۷/۳
۹	قم	۰/۲۲	۲۵/۲
۴	همدان	۰/۲۳	۱۷/۷
۱	رامسر	۰/۲۳	۳/۹
۱	رشت	۰/۲۲	۵/۲

از سرمایش این چرخه دارند. همان‌طور که قبلاً گفته شد، میزان تبخیر آب به عنوان معیاری برای عملکرد بهتر این چرخه در نظر گرفته می‌شود. در شرایط آب و هوایی با میزان قابل قبول معیار این چرخه، استفاده از این سیستم عملکرد خوبی در آب و هوای دارای میزان تبخیر آب کم‌تر دارد [۳۶].

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله نحوه‌ی عملکرد انواع سیستم‌های سرمایشی تبخیری مستقیم و غیرمستقیم بررسی شد. در این میان چرخه‌ی جدیدی به نام چرخه‌ی مایوسنسکو وجود دارد که قادر است در حالت ایده‌آل دمای هوای ورودی را تا دمای نقطه‌ی شبنم هوای ورودی کاهش دهد. نحوه‌ی عملکرد، معرفی انواع این سیستم و همچنین امکان استفاده از آن برای شهرهای مختلف ایران بررسی شد. استفاده از چرخه‌ی جدید مایوسنسکو به دلایل زیادی اعم از استفاده‌ی مفید از دو جریان هوا به‌جای یک جریان، ثابت نگه‌داشتن رطوبت هوا که می‌تواند برای کاربردهای مخصوص خود استفاده شود، استفاده در مناطق گرم و خشک با تولید کم‌ترین میزان آلاینده‌ی و کارایی بسیار بالا، استفاده در نقاط گرم و خشک علاوه بر نقاط گرم و مرطوب، نیاز به مصرف آب کم‌تر برای مناطق گرم و خشک نسبت به مناطق معتدل یا مرطوب (که این امر استفاده از این سیستم برای کشور ایران را مناسب‌تر می‌کند) کاهش مصرف انرژی تا ۹۰ درصد در مقایسه با راه‌حل‌های سنتی، کاربردهای گسترده‌ی این چرخه در صنایع مختلف که باعث افزایش کارایی سیستم‌هایی مانند توربین‌های گازی، پنل‌های فتوولتائیک و ... می‌شود و میزان بالاتر بازدهی حباب خیس نسبت به سایر سیستم‌های سرمایشی تبخیری غیرمستقیم، توصیه می‌شود. همچنین استفاده از این چرخه برای اقلیم ایران با دسته‌بندی آب‌وهوایی جغرافیای ایران مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه گرفته شد که استفاده از این سیستم برای اکثر شهرهای ایران مناسب می‌باشد.

فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی	
COP	ضریب عملکرد
C_p	حرارت مخصوص (kJ/kg.K)
e	انرژی مخصوص (kJ/kg)
EER	نسبت بازدهی انرژی
$\dot{E}X$	نرخ انرژی (kW)
Fl_{dp}	معیار نقطه‌ی شبنم (K or °C)
h	آنتالپی مخصوص (kJ/kg)
\dot{m}	نرخ جریان جرمی (kg/s)
Q	انرژی، حرارت (kJ/kg)
\dot{Q}	نرخ ظرفیت سرمایشی (kW)
\dot{S}	نرخ تولید آنتروپی (kW/K)
t	دما (K)

استفاده از سیستم سرمایشی مبتنی بر چرخه‌ی مایوسنسکو برای شهرهای رامسر، رشت، ساری و اردبیل به دلیل رطوبت نسبی بسیار بالا (تقریباً ۸۰ درصد) و اختلاف دمای زیاد بین حباب خشک و نقطه‌ی شبنم (کم‌تر از ۶ درجه‌ی سلسیوس) مناسب نیست، از طرفی شهرهای آبادان، اصفهان، اهواز، تهران، تبریز، شهرکرد، شیراز، کرمان، کرمانشاه، مشهد، ایلام، سنندج، یاسوج، اراک، بیرجند، سمنان و قم از شرایط مناسبی برای استفاده از این سیستم برخوردار هستند. شهرهای گرگان، ارومیه، زنجان و قزوین در برخی ساعات روز شرایط مناسبی برای استفاده

A new approach to analysis and optimization of evaporative cooling system I: Theory, Energy, Vol. 35, No. 6, pp. 2448-2454, (2010).

[9] Gillan, L., Maisotsenko cycle for cooling processes, International Journal of Energy for a Clean Environment, Vol. 9, No. 1-3, (2008).

[10] Cui, X., Chua, K. J., Yang, W. M., Ng, K. C., Thu, K., Nguyen, V. T., Studying the performance of an improved dew-point evaporative design for cooling application, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 63, No. 2, pp. 624-633, (2014).

[۱۱] نوری، س.، نوری، س.، فرایند انتقال جرم و حرارت در چرخه مایسوتسنکو، مجموعه مقالات دومین همایش ملی تکنولوژی‌های نوین در شیمی پتروشیمی، مرکز پژوهش‌های صنعتی و معدنی هم‌اندیشان چرخه علم و صنعت، تهران، ایران، اردیبهشت ماه ۱۳۹۵.

[12] Kavaklioglu, K., Koseoglu, M. F., Caliskan, O., Experimental investigation and radial basis function network modeling of direct evaporative cooling systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, pp. 139-150, (2018).

[13] Porumb, B., Ungureşan, P., Tutunaru, L. F., Serban, A., Balan, M., A review of indirect evaporative cooling technology, *Energy Procedia*, Vol. 85, pp. 461-471, (2016).

[14] Kumar, M., Sharma. A., Evaporating Cooling System: A Review, *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, Vol. 6, (2018).

[15] Rogdakis, E. D., Koronaki, I. P., Tertipis, D. N., Experimental and computational evaluation of a Maisotsenko evaporative cooler at Greek climate, *Energy and Buildings*, Vol. 70, pp. 497-506, (2014).

[16] Dhamneya, A. K., Rajput, S. P. S., Singh, A., Thermodynamic performance analysis of direct evaporative cooling system for increased heat and mass transfer area, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 9, No. 4, pp. 2951-2960, (2018).

[17] Mahmood, M. H., Sultan, M., Miyazaki, T., Koyama, S., Maisotsenko, V. S., Overview of the Maisotsenko cycle—A way towards dew point evaporative cooling, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 66, pp. 537-555, (2016).

[۱۸] ذوالفقاری، ح.، تحلیل سیکل میسوتسنکو و امکان‌سنجی آن برای اقلیم ایران، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۲.

[19] Maisotsenko, V., Gillan, L., The Maisotsenko cycle for air desiccant cooling & The 4th international Symposium on HVAC, Beijing, China, Vol. 9, No. 11, (2003).

V میزان تیخیر آب (Lit/h)
 \dot{W} توان دمنده (kW)

علائم یونانی

η بازده
 ω میزان رطوبت

زیرنویس‌ها

amb محیط
 da هوای خشک
 dc کانال خشک
 $dest$ نابودی
 dp نقطه‌ی شبنم
 ds حالت مرده
 ex آگزرژی
 in ورودی
 $loss$ تلفات
 out خروجی
 s محسوس
 $Water$ آب
 WC کانال خیس (تر)

مراجع

[1] Perez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C., A review on buildings energy consumption information, *Energy and buildings*, Vol. 40, No. 3, pp. 394-398, (2008).

[۲] قربانی، م.، اهمیت و کاربردهای آب خاکستری در مدیریت مصرف آب، مجموعه مقالات اولین همایش ملی مدیریت مصرف و هدر رفت آب، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، آذر ماه ۱۳۹۶.

[3] Petroleum, B., BP statistical review of world energy, June, London, UK, (2009).

[4] Yi, J., Chinese building energy consumption situation and energy efficiency strategy, *New architecture*, (2008).

[5] Pandelidis, D., Anisimov, S., Worek, W. M., Performance study of the Maisotsenko Cycle heat exchangers in different air-conditioning applications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 81, pp. 207-221, (2015).

[6] Zhan, C., Zhao, X., Smith, S., Riffat, S. S. B., Numerical study of a M-cycle cross-flow heat exchanger for indirect evaporative cooling, *Building and Environment*, Vol. 46, No. 3, pp. 657-668, (2011).

[7] Duan, Z., Investigation of a novel dew point indirect evaporative air conditioning system for buildings (Doctoral dissertation, University of Nottingham), (2011).

[8] Chen, Q., Yang, K., Wang, M., Pan, N., Guo, Z. Y.,

- [28] Zhao, X., Li, J. M., Riffat, S. B., Numerical study of a novel counter-flow heat and mass exchanger for dew point evaporative cooling, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, No. 14-15, pp. 1942-1951, (2008).
- [29] C. Zhan, X. Zhao, S. Smith, S. B. Riffat, Numerical study of a M-cycle cross-flow heat exchanger for indirect evaporative cooling, *Building and Environment*, Vol. 46, No. 3, pp.657-668, (2011).
- [۳۰] فراسی، ی.، سوهانی، ع.، و صیادی، ح.، استفاده از مبدل های نقطه شبنم مایوسنسکو در راستای خنک سازی هوای ورودی به کمپرسور توربین گاز، مجموعه مقالات سومین کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین علوم و تکنولوژی، مرکز مطالعات و تحقیقات اسلامی سروش حکمت مرتضوی، قم، ایران، دی ماه ۱۳۹۵.
- [31] Pandelidis, D., Pacak, A., Anisimov, S., Energy Saving Potential by Using Maisotsenko-Cycle in Different Applications, *International Journal of Earth & Environmental Sciences*, (2018).
- [۳۲] م. ابراهیمی، م. بشیرنژاد ک.، و ابراهیمی، ا.، بررسی انواع سیستم‌های سرمایش تبخیری مستقیم و غیرمستقیم، مجموعه مقالات دومین کنفرانس سراسری دانش و فناوری مهندسی مکانیک و برق ایران، موسسه برگزار کننده همایش‌های توسعه محور دانش و فناوری سام ایرانیان، تهران، ایران، شهریور ماه ۱۳۹۵.
- [33] Caliskan, H., Hepbasli, A., Dincer, I., Maisotsenko, V., Thermodynamic performance assessment of a novel air cooling cycle: Maisotsenko cycle, *international journal of refrigeration*, Vol. 34, No. 4, pp. 980-990, (2011).
- [34] Hosoz, M., Ertunc, H. M., Ozguc, A. F., Modelling of a direct evaporative air cooler using artificial neural network, *International Journal of Energy Research*, Vol. 32, No. 1, pp. 83-89, (2008).
- [35] Qiu, G. Q., Riffat, S. B., Novel design and modelling of an evaporative cooling system for buildings, *International Journal of Energy Research*, Vol. 30, No. 12, pp. 985-999, (2006).
- [36] Rezaee, V., Houshmand, A., Feasibility study of Maisotsenko indirect evaporative air cooling cycle in Iran, *GeoScience Engineering*, Vol. 61, No. 2, pp. 23-36, (2015).
- [20] Zhan, C., Duan, Z., Zhao, X., Smith, S., Jin, H., Riffat, S., 2011. Comparative study of the performance of the M-cycle counter-flow and cross-flow heat exchangers for indirect evaporative cooling—paving the path toward sustainable cooling of buildings, *Energy*, Vol. 36, No. 12, pp. 6790-6805, (2011).
- [21] Cui, X., Chua, K. J., Yang, W. M., 2014. Numerical simulation of a novel energy-efficient dew-point evaporative air cooler, *Applied energy*, Vol. 136, pp. 979-988, (2014).
- [۲۲] قربانی فعال، ص.، یاری، م.، و افتخاری یزدی، م.، بررسی امکان استفاده از کولر تبخیری میسوتسنکو در شهرهای مختلف ایران، مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی علوم مهندسی، ایده‌های نو، موسسه آموزش عالی آیندگان تنکابن، مازندران، ایران، اردیبهشت ماه ۱۳۹۳.
- [۲۳] سوهانی، ع.، صیادی، ح.، معرفی سیستم‌های سرمایش تبخیری نقطه شبنم و کاربردهای آن‌ها، مجموعه مقالات مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران، دوره ۲۷، شماره ۱- شماره پیاپی ۱۱۸، صفحه ۶-۳، ایران، فروردین و اردیبهشت ماه ۱۳۹۷.
- [24] Gillan, L., Maisotsenko, V., Maisotsenko open cycle used for gas turbine power generation. In ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference, pp. 75-84, (2003).
- [25] Maisotsenko, V., Reyzin, I., The Maisotsenko cycle for electronics cooling, In ASME 2005 Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Integration and Packaging of MEMS, NEMS, and Electronic Systems collocated with the ASME 2005 Heat Transfer Summer Conference, pp. 415-424, (2005).
- [26] Caliskan, H., Dincer, I., Hepbasli, A., A comparative study on energetic, exergetic and environmental performance assessments of novel M-Cycle based air coolers for buildings, *Energy Conversion and Management*, Vol. 56, pp. 69-79, (2012).
- [27] Saghafifar, M., Gadalla, M., Analysis of Maisotsenko open gas turbine bottoming cycle, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 82, pp. 351-359, (2015).