سال سوم، شماره اول، تابستان ۱۳۹۵، ص ص ۲۹ - ۳۷
فصل‌نامه علمی – ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
renemag.ir

مقاله
تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۳۱

نگاهی بر سیستم‌های خنک‌کننده تبخیری مستقیم فعال و غیرفعال

امیر امیدوار[۱*]، حامد شایانی[۲]

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز
* شیراز، ۳۱۳-۷۱۵۵۵، omidvar@sutech.ac.ir

چکیده

سیستم‌های خنک کننده تبخیری به دلیل مزایای چشمگیری که دارند از دیرباز مورد توجه قرار گرفته‌اند. پایین بودن هزینه‌های اولیه جهت نصب و راه‌اندازی، کم بودن هزینه در طی دوره استفاده، نگهداری آسان و ارزان و تأمین هوای تازه در ساختمان از جمله مهمترین مزایای اینگونه سیستمهاست. مصرف آب نسبتاً زیاد و عدم امکان استفاده از این سیستمها در اقلیمهای مرطوب از جمله معایب سیستمهای تبخیری است. هدف از این مقاله آشنایی با اصول سرمایش تبخیری و معرفی انواع سیستم‌های خنک کننده تبخیری مستقیم فعال و غیرفعال است. سیستمهای فعال (مکانیکی) هوا را از طریق یک فن بر روی پد یا غشاء خیس به جریان درمی‌آورند. در ادامه چندین نمونه از سیستمهای سرمایش تبخیری فعال از جمله کولر آبی، کولر اسلینگر، هواشوی و نظایر آن معرفی و نحوه عملکرد آنها مقایسه شده است. پس از آن به بررسی سیستمهای سرمایش تبخیری مستقیم غیرفعال پرداخته شده است. سیستمهای غیرفعال دارای فن نیستند و جریان هوا در آنها یا به صورت طبیعی و یا از طریق ترکیب با برخی سامانه‌های دیگر نظیر دودکش خورشیدی، بادگیر، دیوار تهویه شونده و ... تأمین می‌گردد. در این نوع سیستمها معمولاً بخش قابل توجهی از انرژی مورد نیاز، از منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود.

کلیدواژگان: سرمایش تبخیری، مستقیم، فعال، غیرفعال

An overview of direct active and passive evaporative cooling systems

Amir Omidvar[1*], Hamed Shayani[2]

1- Departemt of Mechanical and Aerospace Engineering, Shiarz University of Technology, Shiraz, Iran
2- Departemt of Mechanical and Aerospace Engineering, Shiarz University of Technology, Shiraz, Iran
* P.O.B. 71555-313 Shiraz, Iran, omidvar@sutech.ac.ir
Received: 13 May 2016 Accepted: 21 August 2016

Abstract

Evaporative cooling systems have long been considered because of their significant advantages such as low installation and operation costs, ease of maintenance and reduction of age of air in buildings. Evaporative coolers require large amount frequent supply water. These systems also are not applicable in humid climates. The aims of this paper are familiarity with the principals of evaporative cooling and introducing the different direct active and passive evaporative cooling systems. An active (mechanical) direct evaporative cooler unit uses a fan to draw air through a pad or wetted membrane. At the following, application and the performance of some traditional active direct evaporative cooling systems such as swamp cooler, slinger cooler, air-washer and so on have been compared. After that, passive direct evaporative coolers have been considered. Passive direct evaporative cooling can occur anywhere that the evaporative cooled water can cool a space without the assist of a fan. This can be achieved through use of natural air flow or by combining the cooler with some other systems such as solar chimney, wind catcher, ventilated walls and the others. In these systems usually the significant portion of the needed energy funded through renewable resources.

Keywords: Evaporative Cooling, Direct, Active, Passive

۱-مقدمه

رشد سریع مصرف انرژی در جهان باعث نگرانی‌های جدی در زمینه‌ی کاهش منابع انرژی و تغییرات زیست محیطی ناشی از آن شده است. این افزایش مصرف انرژی در سرتاسر جهان ناشی از مواردی از قبیل افزایش جمعیت جهان، رشد اقتصادی[۱]، توسعه شبکه‌های ارتباطی و تغییر در سبک زندگی ملت‌های توسعه یافته است. در دو دهه‌ای اخیر، مصرف انرژی اولیه (سوخت فسیلی) جهان حدود ۴۹٪ و تولید دی‌اکسید کربن تقریباً ۴۳٪ افزایش یافته است[۲]. با وجود اینکه بررسی‌های اخیر از کاهش ۱.۱ درصدی مصرف جهانی انرژی در سال ۲۰۰۹، به دلیل رکود اقتصادی پیش‌بینی نشده‌ی جهانی گزارش می‌دهد، ولی مصرف انرژی در چندین کشور در حال توسعه، مخصوصاً در مناطقی از آسیا با رشد اقتصادی بالا، به شدت در حال افزایش است.

به خاطر رشد سریع جمعیت، بهبود سرویس‌های ساختمانی و افزایش مدت زمانی که در داخل ساختمان‌های سپری می‌شود، سهم مصرف انرژی در ساختمان‌ها در کشورهای توسعه یافته مثل ایالات متحده آمریکا و اروپا (بیشتر از۴۰٪-۲۰٪ از کل انرژی مصرفی) از سهمی که برای بخش‌های صنعت و حمل و نقل استفاده می‌شود پیشی گرفته است. در سال ۲۰۰۴، مصرف انرژی ساختمان‌ها در کشورهای اروپایی ۳۷٪ از کل انرژی محاسبه شده است، یعنی بیشتر از مقادیر مربوط به صنعت(۲۸٪) و حمل و نقل (۳۲٪). در انگلستان، سهم مصرف انرژی ساختمان‌ها ۳۹٪ بود که از متوسط مقدار اروپا نیز بیشتر است[۱].

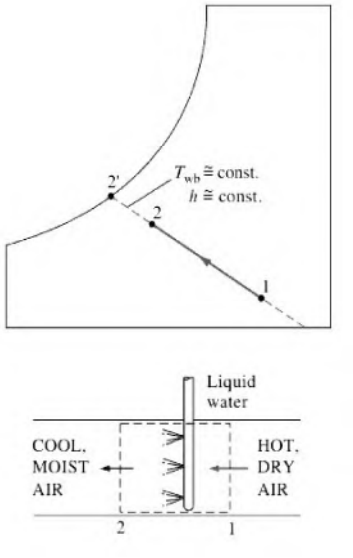
در کشورهای توسعه یافته، انرژی مصرفی در سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع، ۵۰٪ از انرژی مصرفی در ساختمان‌ها و ۲۰٪ از کل انرژی مصرفی را شامل می‌شود. در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، مثل چین، به دلیل عایق کاری ضعیف، استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع ناکارا و تبدیل بازده پایین انرژی به گرما، مصرف انرژی سیستم‌های تهویه مطبوع حدود ۷۰٪-۵۰٪ از انرژی مصرفی در ساختمان‌ها را شامل می‌شود[۲]. در ایران مصرف انرژی در واحد های تجاری و خانگی حدود ۴۰ درصد کل میزان مصرف انرژی کشور است و براساس آمارهای ارائه شده به طور متوسط سالانه ۱.۶ درصد به میزان مصرف انرژی اضافه شده است[۳]. برای برآورده کردن نیاز افزایش تجهیزات تهویه مطبوع بدون استفاده از سیستم‌های متداول قدیمی که مصرف انرژی الکتریکی بالایی دارند، لازم است از سیستم‌هایی استفاده شود که نیاز به مبردهای آلاینده (CFCها) ندارند و با منابع انرژی طبیعی و پاک کار می‌کنند.

یک نمونه از این سیستم‌ها، سیستم‌های سرمایش تبخیری است که از گرمای نهان تبخیر آب استفاده می‌کنند. مصرف انرژی در این سیستم‌ها تنها ۲۰٪ انرژی مصرفی سیستم‌های تهویه مطبوع تراکمی- بخار است و این معادل با کاهش ۴۴ درصدی دی اکسید کربن تولیده شده با سیستم‌های تهویه مطبوع تراکمی- بخار می‌باشد. یعنی این سیستم‌های سرمایشی انرژی کمتری مصرف می‌کنند و دوستدار محیط زیست هستند.

در این مقاله به معرفی انواع روش‌های سرمایش تبخیری (مستقیم، غیرمستقیم و ترکیبی) و چند نوع سیستم خنک‌کننده تبخیری مستقیم فعال(مانند کولر آبی، اسلینگر و ...) و غیر فعال (مانند سامانه پرده آبی، دیوار سرمایش و ... پرداخته شده است.

۲-سرمایش تبخیری

سرمایش تبخیری بر مبنای یک اصل ساده استوار است: با تبخیرآب، گرمای نهان تبخیر از آب و هوای اطراف جذب می‌شود، در نتیجه، آب و هوا در این فرآیند خنک می‌شود[۴].



شکل۱ سرمایش تبخیری

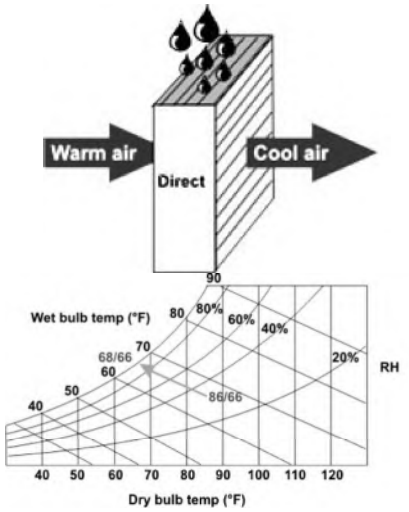
در شکل ۱ فرآیند سرمایش تبخیری به طور طرحواره و در نمودار سایکرومتریک نشان داده است. هوای گرم و خشک در حالت ۱ وارد کولر تبخیری شده و در آنجا به آن آب پاشیده می‌شود. قسمتی از این آب با جذب گرما از جریان هوا تبخیر می‌شود. در نتیجه، دمای جریان هوا کاهش و رطوبت آن افزایش می‌یابد (حالت ۲). در حالت حدی، هوا به صورت اشباع در حالت 2′ از کولر خارج می‌شود. این کمترین دمایی است که با این فرآیند می‌توان بدست آورد. فرآیند سرمایش تبخیری با فرآیند اشباع آدیاباتیک اساساً یکسان است زیرا انتقال گرما بین جریان هوا و اطراف معمولاً ناچیز است. بنابراین، فرآیند سرمایش تبخیری در نمودار سایکرومتریک از خط دمای حباب خیس ثابت پیروی می‌کند[۴].

سیستم‌های سرمایش تبخیری به سه گروه اصلی یعنی مستقیم، غیرمستقیم و ترکیبی تقسیم بندی می‌شوند. نحوی عملکرد هر کدام از این سیستمها در ادامه بیان شده است.

۲-۱-سرمایش تبخیری مستقیم

در حال حاضر این روش پر کاربردترین روش سرمایش تبخیری در ایران است. کولرهای آبی مرسوم همگی از این روش برای خنک کردن محیط استفاده می‌کنند. در این روش در یک محفظه بسته، هوا از روی یک بستر بزرگ آب عبور داده می‌شود، در اینصورت آب تبخیر شده و بخار آب وارد هوا می‌شود. آب گرمای لازم برای تبخیر شدن را از هوا می‌گیرد بنابراین تماس مستقیم آب و هوا باعث خنک شدن هوای ورودی به محیط می‌گردد. این کار تا زمانی ادامه می‌یابد تا دیگر جایی برای ورود رطوبت به هوا وجود نداشته باشد یا به اصطلاح هوا اشباع شود. محدودیت مهم این روش این است که

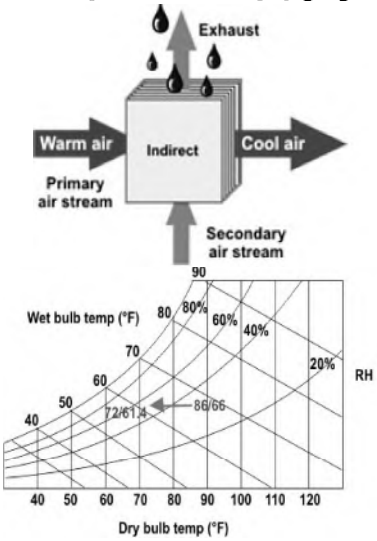
در مناطقی که رطوبت نسبی محیط بالا باشد امکان اضافه کردن رطوبت به هوا بسیار کم یا در بعضی مواقع غیر ممکن است. به طور کلی دمای هوایی که با روش تبخیری مستقیم خنک می‌شود را حداکثر می‌توان تا دمای مرطوب آن هوا پایین آورد. [۵].



شکل ۲ شماتیک سرمایش تبخیری مستقیم و نحوی عملکرد در نمودار سایکرومتریک[۵]

۲-۲-سرمایش تبخیری غیرمستقیم

در این روش دو نوع هوا وجود دارد. هوای گرم اولیه که از فضای بیرون گرفته شده است. این هوا باید خنک شود و به محیط داخل وارد شود. هوای ثانویه نیز هوای گرمی است که از محیط بیرون گرفته شده است اما پس از خنک شدن از سیستم خارج می‌شود (به فضای اتاق وارد نمی‌شود)به اینصورت که هوای ثانویه به روش مستقیم خنک می‌شود. سپس هوای گرم اولیه در مبدل حرارتی، بدون تماس مستقیم با هوای ثانویه خنک شده و سپس وارد فضای اتاق می‌گردد. نمایی کلی از این فرآیند درشکل ۳ نشان داده شده است[۵].

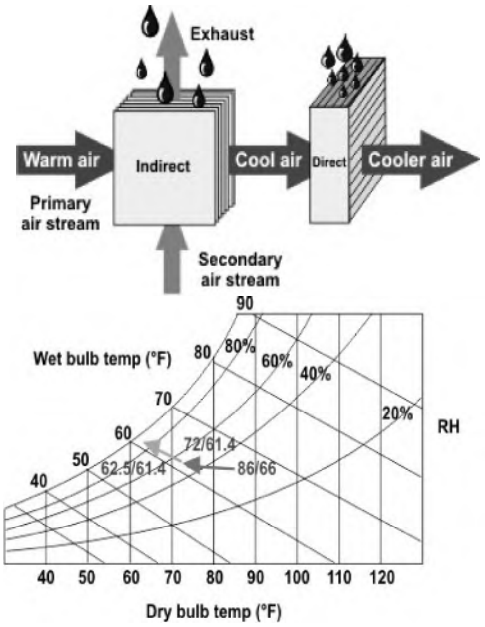


شکل ۳ شماتیک سرمایش تبخیری غیرمستقیم و نحوی عملکرد در نمودار سایکرومتریک[۵]

در روش غیر مستقیم هیچ‌گونه رطوبتی به هوا اضافه نمی‌شود. بنابراین استفاده از روش غیرمستقیم نسبت به روش مستقیم هوای مطبوع‌تری را ایجاد می‌کند.

۲-۳-سرمایش تبخیری ترکیبی

این روش ترکیبی از دو روش قبل می‌باشد. در این روش هوای اولیه که به صورت غیرمستقیم خنک شده بار دیگر به روش مستقیم خنک می‌شود. همانطور که گفته شد حداقل دمای قابل حصول روش مستقیم، دمای مرطوب هوای ورودی است، در واقع این روش با کاهش دمای مرطوب هوا، دمای خروجی از سیستم سرمایشی را کاهش می‌دهد. این فرآیند در شکل ۴ نشان داده شده است[۵].



شکل۴ شماتیک سرمایش تبخیری ترکیبی و نحوی عملکرد در نمودار سایکرومتریک[۵]

عمده‌ترین مزیت استفاده توامان از هر دو نوع سیستم‌های سرمایشی به شکل مرکب، دمای پایین هوای رفت، قابلیت اطمینان بالا و ساعات آسایش بیشتر آن است. مزیت دیگر آن، مربوط به هزینه اولیه است که شامل هزینه نصب شبکه کانال شده و برای واحد مرکب ارزان‌تر خواهد بود، زیرا این سیستم‌ها، هوای خنک‌کننده را تأمین کرده و به کانال‌های کوچک‌تری احتیاج دارند.

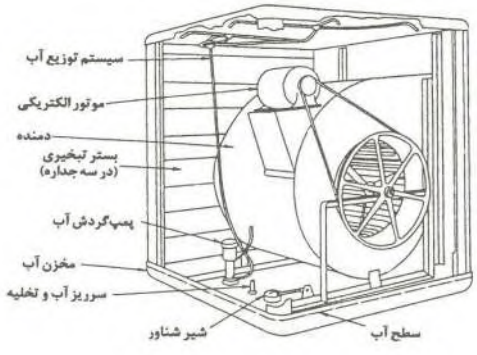
۳-سرمایش تبخیری مستقیم فعال

در این نوع سیستم ها میزان مصرف انرژی برای راه اندازی و کارکرد آنها نسبتاً زیاد می‌باشد. چند نمونه از سیستم‌های سرمایش تبخیری فعال در زیر آورده شده است.

۳-۱-کولرهای آبی(قطره‌ای)

این نوع کولرها که رایج‌ترین نوع کولرهای تبخیری است به شکل محفظه‌های فلزی یا پلاستیکی هستند که دیواره‌های آنها توسط پد پوشانده شده است. این پدها به وسیله آبی که بر روی آنها ریخته می‌شود مرطوب می‌شوند و دمنده‌ای که در داخل محفظه کولر قرار می‌گیرد موجب عبور جریان هوا

ازبین پدها و سرد و مرطوب شدن آن می‌شود. در اغلب این کولرها آب به قسمت فوقانی کولر منتقل شده و در آنجا به طور مساوی بین لوله‌های که هرکدام یکی از پدها را پوشش می‌دهند تقسیم می‌شود. اکثر کولرها دارای دو یا سه سرعت فن هستند به طوری که مصرف کنندگان می‌توانند خروجی دلخواه خود را تنظیم نمایند[۶].

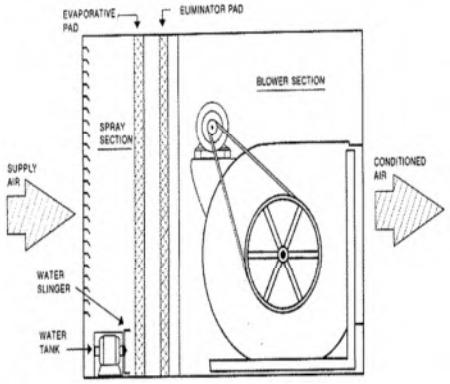


شکل ۵ شماتیکی از کولر آبی (قطره‌ای)[۶]

معمولاً انواع کوچک آن برای خنک کردن و تهویه ساختمان‌های مسکونی، دفاتر کار و فروشگاه‌های کوچک و انواع بزرگ آنها برای سرمایش و تهویه فروشگاه‌های بزرگ، مکان‌های صنعتی، مدارس، مساجد و ورزشگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این کولرها می‌توانند مستقیماً به پنجره متصل شده باشند که در این صورت نیاز به استفاده از کانال نیست. دربعضی از موارد هم کولرها در زیرزمین‌ها قرار می‌گیرند و به‌وسیله کانال هوای خنک به محل مورد نظر انتقال می‌یابد. اما اغلب کولرهای تجاری بر روی پشتبام‌ها نصب می‌شود[۶].

۳ ۲ کولرهای تبخیری اسلینگر

اگر چه این نوع خنک کننده‌ها از لحاظ میزان استفاده در دنیا در رده دوم خنک‌کننده‌های تبخیری هستند، ولی در کشور ما، چندان مورد توجه قرار نگرفته‌اند. از این نوع کولرها، کمتر در ساختمان‌های مسکونی استفاده می‌شود و بیشتر آنها در کارگاه‌ها، کارخانه‌ها و مکان های عمومی به کار می‌روند (در واقع بیشتر کاربرد تجاری دارند). از این کولرها در پکیج‌های سرمایش- گرمایش نیز استفاده می‌شود[۶].

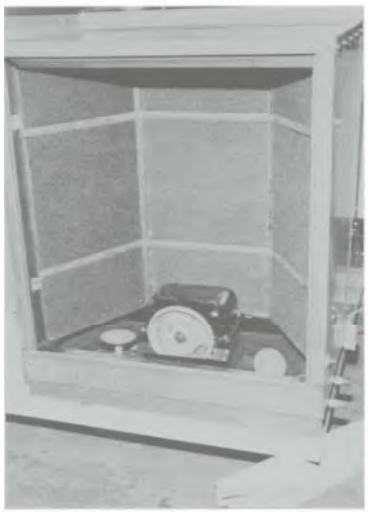


شکل ۶ شماتیک سیستم رطوبت‌زنی کولر اسلینگر[۶]

این کولرها، از سیستم رطوبت‌زنی کاملاً متفاوت نسبت به کولرهای قطره‌ای بهره می‌برند. به طور کل این نوع خنک‌کننده‌ها از فن‌های سانتریفیوژ استفاده می‌کنند که درون محفظه‌های فلزی مکعب شکل قرار می‌گیرند. دیواره‌های عقبی این محفظه‌ها معمولاً باز است یا ممکن است با پرده، پانل‌های کرکره‌ای شکل یا فیلترهای گرد و غبار پوشانده شود تا باعث تمیز شدن هوای ورودی گردد. فن‌ها هوای ورودی را به سمت پدهای بزرگ خیس اشباع شده هدایت می‌کنند. این پدها به صورت عمودی در اطراف کفه‌هایی که تا ارتفاع کمی از آب پرشده‌اند قرار می‌گیرند[۶].

در برخی از مدل‌ها از دو چرخ در دو وجه کولر استفاده می‌شود. برخی از چرخ‌های اسلینگر نیز دارای دو تیغه هستند که بدین ترتیب دو لایه موازی در مسیر عبور هوا ایجاد می‌کنند. با توجه به ساختار کولرهای اسلینگر، هوای ورودی حداقل سه بار با آب در تماس خواهد بود (شکل ۶):

۱- یک بار در تماس با ورق آب تشکیل شده توسط چرخ
۲- مرحله دوم، در پدها که در پشت چرخ قرار گرفته اند.
۳- در مرحله سوم نیز با فیلترهای خشک کن یا قطره‌گیرها

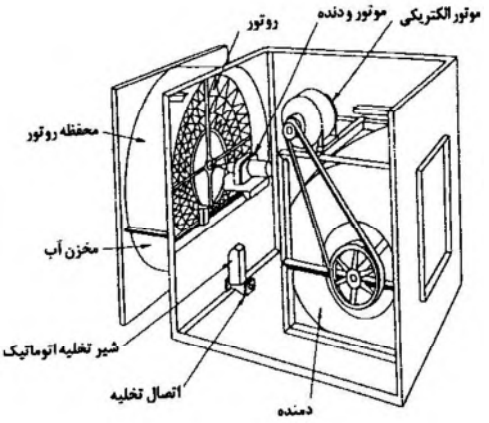


شکل۷ نمای داخلی کولر اسلینگر[۶]

کولرهای اسلینگر نه تنها قیمتی نزدیک به دو برابر کولرهای قطره‌ای دارند، بلکه توان مصرفی فن آنها نیز بیشتر است. همچنین کولرهای اسلینگر، برای مرطوب سازی نیز توان بیشتری مصرف می‌کنند چرا که اتمیزه کردن وزن بیشتری از آب مستلزم صرف توان بیشتر خواهد بود. مطالعات نشان می‌دهد که در توان‌های مساوی، حجم هوای خروجی از کولرهای اسلینگر ۳۷.۴ درصد کمتر از کولرهای قطره‌ای است. با وجود این کولرهای اسلینگر دارای عمر طولانی و قابلیت اطمینان بالایی هستند و تقریباً می‌توان گفت که این نوع کولرها به نگهداری نیاز ندارند. کارکرد این کولرها طولانی مدت و یکنواخت است، مشکل تولید بو ندارد و هوا را از تمامی آلودگی‌های معلق در آن پاک می‌کنند. سازگاری بیشتر نسبت به کولرهای قطره‌ای داشته و به صورت پکیج و به همراه واحدهای دیگر سرمایش و گرمایش در تمامی مصارف تجاری و صنعتی قابل استفاده می‌باشند[۶].

۳-۳ کولرهای تبخیری با پد چرخان

این نوع کولرهای مستقیم (شکل۷) از لحاظ هزینه اولیه، گرانترین و از لحاظ توان مصرفی بر واحد خروجی پرمصرف‌ترین تلقی می‌شوند. این کولرها بیشتر در مصارف نظامی به خصوص برای سرمایش ساختمان‌ها، کارگاه‌های بزرگ و آشیانه هواپیما به کار می‌روند. همچنین در دنیا از کولرهای با پد چرخان برای خنک‌کردن کارخانه‌ها، ساختمان‌های عمومی، فروشگاه‌های زنجیره‌ای و آزمایشگاه‌های تحقیقاتی نیز استفاده می‌شود. عمر طولانی، هزینه نگهداری پایین و ظرفیت‌های بالا از جمله عواملی هستند که موجب ترجیح دادن آنها بر انواع دیگر کولرها می‌شود[۶].



شکل۷ کولر تبخیری مستقیم با پد چرخان[۶]

این کولرها از فیلترهای گرد و غبار، پد چرخان و فن گریز از مرکز تشکیل شده‌اند که همگی در یک محفظه فلزی قرار می‌گیرند. پدها بر روی شافت‌های افقی از جنس فولاد ضد زنگ سوار می‌شوند به طوری که یک سوم پایین پد در درون مخزن آب غوطه‌ور می‌باشد. با چرخیدن پد (سرعت معمول چرخیدن حدود ۲ rpm است) همه نقاط پد خیس شده و هوایی که از خلال صفحات خیس عبور می‌کند مرطوب و خنک می‌شود. این نوع ساختار راندمان اشباعی بالایی دارد (حداقل ۸۰ درصد) و طبیعت آن به صورتی است که خود قابلیت تمیز کردن خود را دارد بنابراین خطر انسداد به طور کامل رفع گردیده و نرخ انباشتگی مواد خورنده بسیار پایین خواهد بود[۶].

استفاده کنندگان از کولرهای با پد چرخان از مزایایی بسیار برخوردار هستند:

۱- تقریباً عاملی در جهت خوردگی یا تخریب در این کولرها وجود ندارد.

۲- راندمان کارکرد در آنها بسیار یکنواخت است و در کل سیستم، پمپ، لوله یا افشانک وجود ندارد، بنابراین مشکل گرفتگی آنها نیز وجود نخواهد داشت.

۳- پدها مادام‌العمر هستند و دچار نشست و پوسیدگی نمی‌شوند.

۴- نصب این نوع کولرها به راحتی انجام می‌پذیرد و نیاز به تعویض سالانه هیچ قسمتی به جز فیلترهای گرد و غبار نیست.

۵- بسیاری از قسمت‌ها به جای تعویض قابل شستشو هستند.

۶- به دلیل استفاده از سیستم تخلیه اتوماتیک آب مخزن، کولرهای با پد چرخان در بعضی موارد موجب صرفه جویی در مصرف آب نیز می‌شوند.

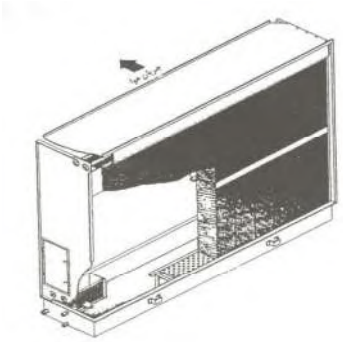
عیب اصلی این نوع کولرها، هزینه اولیه بالا و مصرف بالای انرژی فن‌ها (در مقایسه با سایر انواع کولرهای تبخیری) است.

۳-۴-کولرهای تبخیری با پد صلب

در این کولرها(شکل ۸) از صفحات صلب و موج دار به عنوان بستر مرطوب استفاده می شود. این سطوح می توانند از جنس سلولز و فایبرگلاس باشند. سوراخهای موجود بر روی بسترها در یک امتداد نیستند تا اختلاط آب و هوا تا حد امکان افزایش یابد. عمق بستر مرطوب در امتداد جریان هوا معمولاً ۱۲ in است ولی می تواند بین ۴ تا ۲۴ in تغییر کند. معمولاً سرعت هوا بر روی بستر صلب را ۴۰۰ تا ۶۰۰ rpm انتخاب می کنند[۶].

بازده اشباع این کولرها با توجه به عمق بستر و سرعت هوا می تواند بین ۷۰ تا ۹۵ درصد باشد. جریان هوا افقی و جریان آب عمودی است.

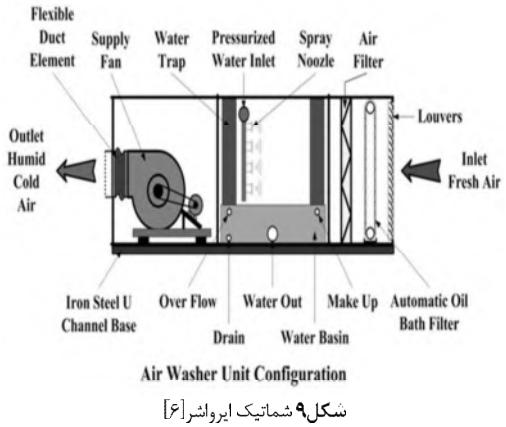
به طور کلی پدهای صلب موجب پیشرفت قابل ملاحضه‌ای در صنعت سرمایش تبخیری شده‌اند و به شیوه‌های مختلف از آنها در کاربردهای خاص، مانند صنایع کشاورزی و دامداری استفاده می‌شود.



شکل۸ کولر تبخیری مستقیم با بستر صلب[۶]

۳-۵-ایرواشرها

اغلب سیستم‌های سرمایش تبخیری شامل قطره‌ای، اسیلنگر، پد چرخان و غیرمستقیم، تنها به منظور سرمایش طراحی شده‌اند. ولی نوع دیگری از سیستم‌های تبخیری وجود دارند که علاوه بر تأمین سرمایش، جهت کنترل رطوبت و تمیز کردن هوا به کار می‌رود. برای کنترل دمای آب به منظور گرمایش، سرمایش، رطوبت‌زنی و فیلتراسیون، ایرواشرها مورد استفاده قرار می‌گیرند[۶].



شکل۹ شماتیک ایرواشر[۶]

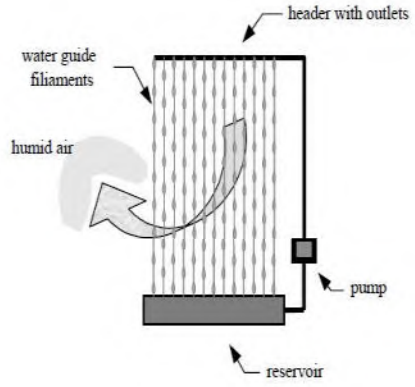
ایرواشرها به ندرت در ساختمان‌های کوچک یا مسکونی مورد استفاده قرار می‌گیرند چرا که بهترین کاربرد آنها، کنترل رطوبت فضای داخل و تمیزکاری هوا می‌باشد. در گذشته از آنها به عنوان سیستم‌های سرمایش استفاده می‌شد، اما با توسعه سیستم‌های دیگر، استفاده از ایرواشرها پایه علمی و اقتصادی خود را از دست داده است. امروزه، قیمت، وزن، سر و صدا، مصرف انرژی و هزینه‌های نگهداری باعث گردیده که از آنها کمتر به عنوان تجهیزات تأمین آسایش انسان استفاده شود، بیشتر برای منظورهای خاص به کار می‌روند. این سیستم‌ها، نه تنها گرد و خاک، دوده، پرز و دیگر ذرات جامد را در حین گرم یا سرد کردن هوا حذف می‌کنند، بلکه رنگ اسپری شده و اغلب بخارات بدون روغن و گازه و دودها را نیز فیلتر می‌کنند. از همین رو، از آنها در بسیاری از بیمارستان‌ها، کارخانه‌ها (به خصوص نساجی)، خطوط شیمیایی، نیروگاه‌ها، آزمایشگاه‌ها و چاپخانه‌ها استفاده می‌شود[۶].

۴- سرمایش تبخیری غیرفعال

سیستمهای غیرفعال دارای فن نیستند و جریان هوا در آنها یا به صورت طبیعی و یا از طریق ترکیب با برخی سامانه‌های دیگر نظیر دودکش خورشیدی، بادگیر، دیوار تهویه شونده و ... تأمین می‌گردد. در این نوع سیستمها معمولاً بخش قابل توجهی از انرژی مورد نیاز، از منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود. در ادامه به چند نمونه از این سیستم‌ها اشاره می‌گردد.

۴-۱- سامانه پرده آبی

در سامانه‌ی مورد نظر، آب از طریق لوله‌ی افقی فوقانی، همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، به صورت قطره قطره از ریسمان‌های عمودی موازی (در سه ردیف) جاری می‌گردد. چسبندگی آب به ریسمان‌ها موجب عدم پراگندگی آب هنگام عبور جریان هوا می‌شود. این سامانه بصورت پرده‌ای بر سر مسیر جریان هوا قرار گرفته و هوایی که از لابه‌لای آن عبور کرده مرطوب و خنک شده، آنگاه وارد فضای داخل ساختمان می‌گردد. ضروری است که سامانه در مسیر جریان هوای غالب تابستانی منطقه‌ی مورد نظر قرار گیرد. براساس این طرح، شرایط آسایش در اقلیم‌های گرم و خشک از طریق جریان هوا فراهم می‌گردد. آب جمع شده در منبع تحتانی توسط یک پمپ بسیار کوچک که انرژی آن را می‌تواند از طریق سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی تأمین شود مجدداً به جریان می‌افتد[۷-۸].



شکل۱۰ طرح شماتیک از نما پرده آبی[۷-۸]

فواید سیستم:

۱- سازگار با محیط زیست
۲- ارزان
۳- قابلیت استفاده در نمای ساختمان
۴- قابلیت استفاده از انرژی تجدید پذیر

۴-۲- سرمایش با حفره خنک‌کننده و دودکش خورشیدی

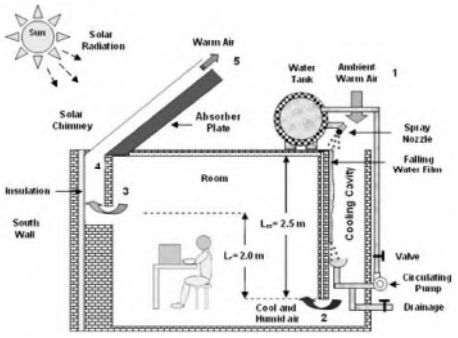
شماتیکی از سامانه مورد نظر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این سامانه از یک دودکش خورشیدی و حفره خنک‌کننده تشکیل شده است که دودکش خورشیدی که دودکش خورشید از شیشه متمایل به سمت جنوب که تابش خورشید رو از خود عبور و بوسیله دیوار جاذب جذب می‌شود تشکیل شده است ودمای هوا را بالا می‌برد[۹].

در حفره خنک کننده آب در بالای دیوار پاشش می‌شود و یک لایه نازک از آب بر روی سطح دیوار ایجاد می‌شود که با عبور هوا از روی دیواره هوا خنک می شود. هوای نزدیک لایه آب دارای میانگین دما آب پاشش شده است. فشار جزئی بخار آب در سطح مشترک از فشار هوا بیشتر است و یک انتقال جرم ناشی از بخار آب به درون هوا وجود دارد. این آمیزش با انتقال گرمای نهان و بخار آب صورت می‌گیرد، در همان زمان انتقال حرارت جابجایی وجود دارد که علت آن تغییر دمای بین سطح آب و هوا می‌باشد. در پایان فرآیند تبخیر آب به داخل ظرف سقوط کرده و بوسیله پمپ کوچکی با مصرف انرژی کم دوباره به مخزنی که روی بام است پمپ می‌شود[۹].

عملکرد سیستم به صورت زیر است:

انرژی خورشید سبب گرم شدن هوای درون دودکش خورشیدی و ایجاد یک مکش طبیعی می‌شود، که این مکش، هوای کل سیستم که شامل دودکش خورشیدی، اتاق و حفره خنک‌کننده است را مکش می‌کند. دودکش باعث می‌شود هوا از حفره خنک کننده بر روی سطح آب گذر کرده و خنک شود و آنرا حفره به اتاق منتقل می‌کند.

۱- از مزایای این سیستم می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
۲- سازگار با محیط زیست
۳- مصرف انرژی کم
۴- برای شدت تابش خورشید کم نیز مناسب است.



شکل۱۱ شماتیکی از سامانه سرمایش با حفره خنک‌کننده و دودکش خورشیدی[۹]

۴-۳- دیوار سرمایش

سامانه دیگر، متشکل است از یک دیوار آجری با اجرای ویژه که بین دو سطح شیشه (پنجره) محصور شده است. یک لوله آب به صورت افقی روی بالاترین ردیف آجرها قرار می‌گیرد تا عمل رطوبت‌زنی از طریق نازل‌های روی لوله‌ی بصورت قطره‌ای و یا اسپری روی آجرها انجام پذیرد. آب اضافی که با تنظیم

صحیح، بسیار ناچیز خواهد بود، در کف سامانه داخل یک منبع جمع شده و می‌تواند به مصارف دیگر (از قبیل آبیاری فضای سبز و یا فلاش تانک‌های سرویس بهداشتی) رسیده ویا اینکه توسط یک پمپ بسیار کوچک دوباره روی دیوار ریخته شود. البته قابل ذکر است که میزان مصرف انرژی پمپ مذکور بسیار ناچیز است که آن هم می‌تواند از طریق سامانه‌های برق خورشیدی (فتوولتاییک‌ها) تأمین شود. شکل ۱۲ شماتیکی از مقطع و پرسپکتیو دیوار سرمایشی را ارایه می‌کند[۸-۱۰].

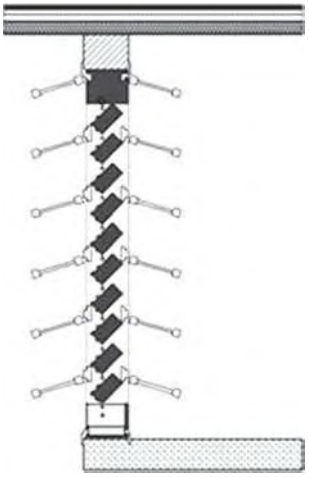
شکل ۱۲ شماتیکی از مقطع و پرسپکتیو دیوار سرمایشی[۸-۱۰]

مهمترین ویژگی این سامانه، سادگی اجرا، کم هزینه بودن و پر بازدهی آن است.

شکل ۱۳ یک روش استفاده از این سامانه را در فصل تابستان نشان می‌دهد. در روزهای تابستانی به دلیل بیشتر شدن زاویه‌ی خورشید، وجود یک پیش‌آمدگی ساده بالای دیوار موجب آن می‌گردد که تشعشات خورشید به پنجره نتابد. با باز کردن دریچه‌ی بالای پنجره‌ی بیرونی هوای خشک وارد سامانه شده و پس از عبور از لابه‌لای منافذ دیوار، مرطوب شده و از طریق دریچه‌ی پایینی هوای خنک و مرطوب وارد فضای داخل می‌گردد. این امر مستلزم آن است که پنجره‌ای از سمت دیگر ساختمان باز باشد تا تهویه عبوری به راحتی صورت پذیرد[۸-۱۰].

شکل ۱۳ عملکرد سامانه در شب و روز تابستان (حالت اول)[۸-۱۰]

شکل ۱۴ روش دیگر خنک کردن در فصل گرما را نشان می‌دهد. در این روش هر دو پنجره‌های بیرونی و درونی به صورت همزمان کاملاً در وضعیت باز قرار می‌گیرند تا تهویه‌ی طبیعی به صورت تهویه‌ی عبوری انجام پذیرد. بدیهی است که در این‌صورت نیز هوای گرم و خشک بیرون در تماس با مصالح خنک و مرطوب حرارت خود را از دست داده و هوای مرطوب وارد فضای داخل خواهد شد.



شکل ۱۴ عملکرد سامانه در شب و روز تابستان (حالت دوم)[۸-۱۰]

مهمترین دستاوردهای چنین سامانه‌ای را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود [۹-۱۰]:

۱- با در نظر گرفتن مسائل سلامت فیزیولوژیکی، این سامانه می‌تواند محیط راحت از جهت حرارت و رطوبت ایجاد نماید.

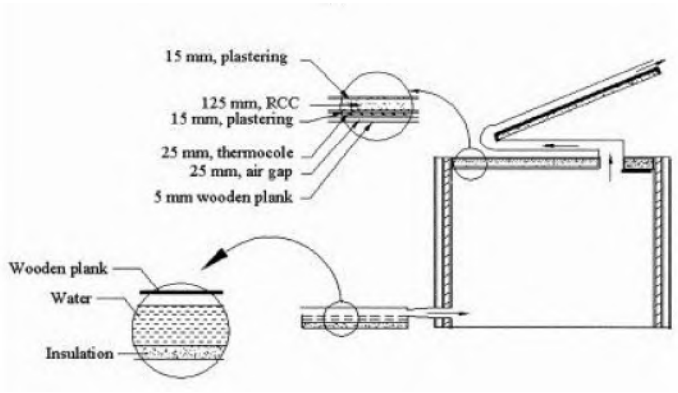
۲- قابل اجرا برای ساختمانهای آموزشی، اداری و مسکونی

۳- کاهش هزینه الکتریسیته از طریق استفاده از نور طبیعی که موجب کاهش هزینه‌ی خنک‌سازی نیز خواهد شد.

۴- بهرمندی از منابع پاک و رایگان تجدید شونده که هیچگونه اثر تخریبی بر محیط زیست ندارند.

۴ ۴-سرمایش با دو کلکتور خورشیدی

این سامانه غیر فعال که در شکل ۱۵ نشان داده شده است از دو کلکتور خورشیدی با جریان طبیعی تشکیل شده است. مکان یکی از کلکتورها روی سقف و دیگری روی زمین است. دودکش(کلکتور) روی بام به مانند فن خروجی عمل می‌کند و مکش و تهویه هوا اتاق را در مدت تابش آفتاب انجام می‌دهد.کلکتور پائینی به عنوان یک گرمکن هوا در زمستان و کولر آبی در طول تابستان با تغییرات کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد.کلکتور پایینی تشکیل می‌شود از یک فلز مستطیل شکل که در پایین و کنارها عایق شده است و دارای ورودی با سطح مقطع مستطیل است که یک انتها آن با اتاق در ارتباط و انتهای دیگر در اتمسفر است. در طول زمستان مسیر از آب خالی و با یک پوشش شیشه پوشانده شده است و کلکتور به مانند یک گرمکن هوا عمل می کند. در تابستان پوشش شیشه‌ای حذف شده و یک سایه(پوشش) برای جلوگیری از جذب تابش‌های خورشیدی ارائه شده است. پر از آب است به گونه ای که کاملا در آب غوطه‌ور است. در نقطه اتصال بین کلکتورها و اتاق درب‌های چوبی تعبیه شده تا در صورت نیاز اتاق کاملاً عایق گردد بیشتر برای شب های زمستان است[۱۱].



شکل۱۵ شماتیکی از سامانه غیر فعال با دو کلکتور خورشیدی درفصل زمستان[۱۱]

از مزایای این سامانه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

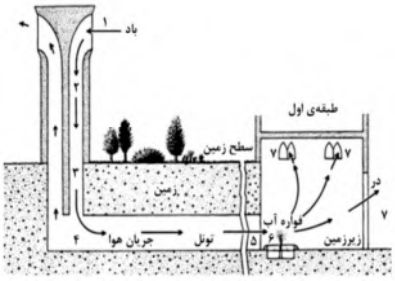
۱- سازگار با محیط زیست
۲- قابل استفاده برای سرمایش و گرمایش
۳- بدون استفاده از هیچگونه دستگاه مکانیکی

از معایب این سیستم می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- برای شب قابل استفاده نیست.
۲- در زمان‌های که شدت تابش کم است ضریب عملکرد پایین دارد.
۳- برای ساختمان‌های یک طبقه مناسب است.

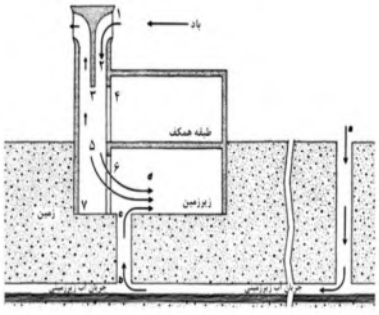
۴-۵-بادگیر با سرمایش تبخیری در گذشته

ابتدا به چندنمونه از سیستم های خنک‌کننده تبخیری مستقیم با بادگیر در گذشته اشاره می‌شود.



شکل۱۶ شماتیک بادگیری در بم[۱۲]

به عنوان مثال در شهر بم بادگیری وجود دارد که از ساختمان حدود ۵۰ متر فاصله دارد و با یک کانال زیر زمینی به آن مرتبط است. محل قرار گیری این کانال، زیر حیاط و باغچه‌هایی است که هم زمان با آبیاری گل و گیاهان، آب به داخل آن نفوذ کرده و همواره خیس می‌ماند. هوای خروجی از بادگیر با عبور از این کانال خیس زیرزمینی، به صورت محسوس، خنک شده و سپس وارد فضای مسکونی می‌شود. شکل ۱۶ تصویری از این بادگیر را نشان می‌دهد. این طرح مستلزم وجود یک حیاط نسبتاً بزرگ و قرار دادن بادگیر در گوشه انتهایی حیاط و مقابل فضای مسکونی است. نمونه دیگری از بادگیر اینگونه است که در صورت وجود جریان‌های آب زیرزمینی در فضای زیرین ساختمان، طراحی بادگیرها متناسب با بهره‌گیری از این آب‌های سرد، انجام می‌شود. شکل ۱۷ شماتیکی از چنین ساختاری را نشان می‌دهد. در این نمونه فضای مسکونی به وسیله یک چاه با جریان آب زیرزمینی ارتباط دارد و بادگیر طوری ساخته شده است که هوای خروجی از آن روی دهانه این چاه می‌گذرد. در اثر جریان هوای خروجی بادگیر، بخشی از هوایی که از روی آب بسیار سرد زیرزمینی عبور کرده و سرد شده از طریق چاه به بالا کشیده می‌شود و پس از مخلوط شدن با هوای خروجی، وارد فضای مسکونی می‌گردد[۱۲].

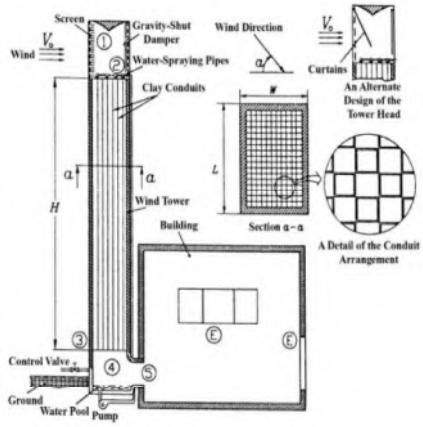


شکل۱۷ مقطع یک بادگیر و جریان آب زیر زمینی[۱۲]

۴-۶-بادگیر با سرمایش تبخیری مدرن

در زیر به چند نمونه از بادگیرها با سرمایش تبخیری مدرن اشاره می‌شود.

۴-۶-۱-بادگیر با ستون خیس شونده

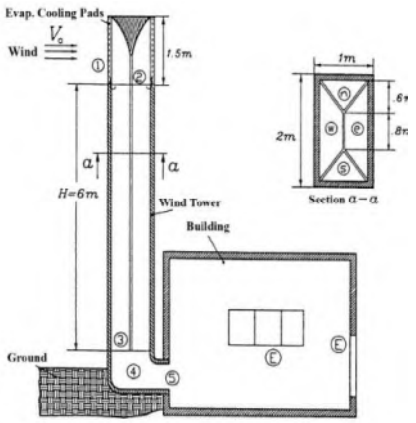


شکل۱۸ مقطع یک بادگیر با ستون خیس شونده[۱۲]

در بادگیر نوع ستون خیس شونده، آب را از بالای بادگیر توسط فواره‌هایی بر روی یک شبکه سفالی یا چند پرده ضخیم که در داخل ستون بادگیر نصب شده‌اند، پاشیده می‌شود. آب اضافی در حوضچه‌ای در زیر بادگیر جمع آوری و توسط پمپی به بالای ستون بادگیر هدایت می‌شود. هوای گرم و خشک بیرون در حین عبور از این ستون به صورت تبخیری خنک می‌گردد[۱۲].

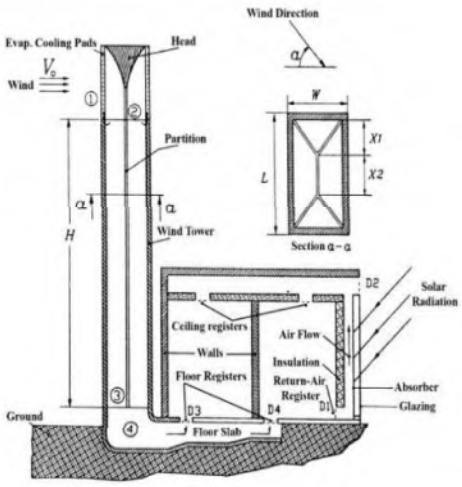
۴-۶-۲- بادگیر با سطوح خس‌شونده

در مناطقی که سرعت باد کم است، از بادگیر با سطوح خیس شونده استفاده می‌شود. این سطوح از یک سری پوشال یا سطوح سلولزی که به نام پد خوانده می‌شوند، تشکیل شده است که در بالایی برج نصب می‌شوند و توسط آب خیس می‌گردند. هوا ضمن عبور از لای این پوشال‌ها به طور تبخیری خنک شده و چگالی آن افزایش می‌یابد و به علت سنگین‌تر شدن این هوا نسبت به هوای محیط یک جریان هوا رو به پایین برقرار می‌شوند و هوا به صورت تبخیری خنک می‌شود[۱۲].



شکل۱۹ مقطع یک بادگیر با سطوح خیس شونده[۱۲]

۴ ۶ ۳ بادگیر با سطوح خس شونده همراه با دودکش خورشیدی



شکل۲۰ مقطع یک بادگیر با سطوح خیس شونده همراه با یک دودکش خورشیدی[۱۲]

در شکل ۲۰ بادگیر با سطوح خیس شونده با یک هوا گرمکن یا دودکش خورشیدی تلفیق شده است. در این طرح هوای خروجی از بادگیر از در و پنجره‌های اتاق و دودکش خورشیدی به بیرون هدایت می‌شود. در زمستان بادگیر فعال نبوده (دریچه‌های D_2، D_3 و D_4) و در عوض دودکش خورشیدی می‌تواند به طور طبیعی اتاق را گرم نماید[۱۲].

۵-نتیجه‌گیری

به کمک سیستم‌های تبخیری فعال و غیرفعال می‌توان میزان استفاده از CFCها را کاهش داد. هزینه اولیه در سیستم‌های تبخیری غیرفعال نسبت به سیستم‌های فعال بالاتر است اما با توجه به میزان صرفه جویی که در مصرفی انرژی به همراه دارد می‌تواند این هزینه اولیه بالا را جبران کند. اکثر سیستم‌های فعال از انرژی‌های تجدید پذیر و سازگار با محیط زیست کار می‌کنند.

۵ مراجع

[1] Perez-Lombard, L., Ortiz, J., et al. "A review on buildings energy consumption information." *Energy and Buildings*, vol. 40, 2008, pp. 394-398.

[۲] ص. قربانی فعال؛ م. یاری و م. افتخاری یزدی. "بررسی امکان استفاده از کولر تبخیری میوتسنکو در شهرهای مختلف ایران". *کنفرانس ملی علوم مهندسی، ایده های نو*؛ تنکابن؛ موسسه آموزش عالی آیندگان تنکابن،۱۳۹۳.

[۳] م. امیدی آوج و ا. نبی. " بررسی میزان مصرف انرژی در ساختمان و ارائه راه حل‌های معماری در راستای توسعه‌ی پایدار". *اولین کنفرانس تخصصی معماری و شهرسازی ایران*، شیراز؛ موسسه عالی علوم و فناوری حکیم عرفی شیراز،۱۳۹۴.

[4] Çengel, Yunus A., Michael A. Boles. *Thermodynamics: an engineering approach*. Ed. Mehmet Kanoğlu. McGraw-Hill Education, 2015.

[5] Palmer, James D., CEM PE. *Evaporative cooling design guidelines manual*. JD Palmer, PE, CEM–United States Department of Energy,2002.

[۶] ق. حیدری نژاد؛ *اصول و کاربرد خنک‌کننده‌های تبخیری*؛ انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن تهران؛۱۳۸۶، چاپ اول.

[7] Ghiabaklou, Z. "Thermal comfort prediction for a new passive cooling system." *Building and environment* ,38, 2003, pp. 883-891.

[۸] ز. قیابکلو، *مبانی فیزیک ساختمان ۴: سرمایش غیرفعال*، نشر جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۳، چاپ دوم.

[9] Maerefat, M., A. P. Haghighi. "Natural cooling of stand-alone houses using solar chimney and evaporative cooling cavity." *Renewable energy* ,35, 2010, pp. 2040-2052.

[10] Ghiabaklou, Zahra. "A new Thermal wall." *International Conference on Innovations in Engineering and Technology*, 2013, Bangkok (Thailand).

[11] Raman, P., Sanjay Mande, V. V. N. Kishore. "A passive solar system for thermal comfort conditioning of buildings in composite climates." *Solar Energy*, 2001,pp. 319-329.

[۱۲] م. بهادری نژاد، *تهویه و سرمایش طبیعی در ساختمان*؛ مرکز نشر دانشگاهی تهران؛ ۱۳۸۶، چاپ اول.