دانشگاه تربیت مدرّس

دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک–تبدیل انرژی

سیستم ترکیب سرمایش شبانه و سرمایش تبخیری مستقیم و غیر مستقیم

نگارش:

معین فرمهینی فراهانی

استاد راهنما:

دکتر قاسم حیدری‌نژاد و دکتر مهدی معرفت

استاد مشاور:

دکتر شهرام دلفانی

زمستان ۱۳۸۸

تقدیم به:

مادرم

تشکر و قدردانی

از آقای دکتر **قاسم حیدری‌نژاد** بخاطر راهنمایی، مشاوره، هدایت و زحمات صمیمانه ایشان در راستای انجام این پایان‌نامه سپاسگذارم.

همچنین از لطف، حمایت و مشاوره آقای دکتر **مهدی معرفت** و آقای دکتر **شهرام دلفانی** در دوران تحصیل و انجام این پایان‌نامه کمال تشکر را دارم.

از تمام دوستان خوبم در دانشگاه تربیت مدرس، خصوصا آقایان مهندس **وحید خلج‌زاده** و دکتر **هادی پاسدار شهری**، که محیطی پرنشاط را برای انجام فعالیت‌های علمی به وجود آوردند، صمیمانه تشکر می‌کنم.

در آخر از تمام افراد در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، به ویژه مهندس **جعفر اسماعیلیان** و مهندس **مریم کرمی**، سپاسگزارم.

چکیده

مصرف بالای انرژی در ساختمان به ویژه برای تامین شرایط آسایش در فصل‌های گرم سال، باعث ارائه سیستم‌های نوین در جهت رفع این مشکل شده است. در این پایان نامه، با ترکیب سیستم‌های سرمایش شبانه و سرمایش تبخیری سیستم سرمایش جدیدی با کارائی بالا و مصرف کم ارائه شده است. در طول یک شب در تابستان، توسط سرمایش تشعشعی شبانه آب سرد مورد نیاز برای پیش‌سرد کردن هوا توسط یک کویل آب سرد فراهم می‌شود. آب سرد در یک مخزن ذخیره نگهداری می‌شود. در طول هشت ساعت کاری روز بعد، هوای گرم بیرون به وسیله کویل آب سرد پیش سرد شده و سپس وارد یک واحد تبخیری می‌شود. این واحد تبخیری می‌تواند سرمایش تبخیری مستقیم، غیرمستقیم و یا غیرمستقیم-مستقیم باشد. این تحقیق بر اساس متوسط دمای هوای برای دو شهر تهران و کرمان در طول مرداد ماه ۱۳۸۸ انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد تمام ترکیب‌های ممکن دارای کارائی بالاتری نسبت به استفاده جداگانه از دستگاه‌های سرمایش تبخیری بوده و همچنین به راحتی قادر به تامین شرایط آسایش می‌باشند. در دستگاه ترکیبی سرمایش شبانه و تبخیری غیرمستقیم هوای ثانویه از سه منبع هوای بیرون، هوای خروجی از کویل سرد و هوای خروجی از واحد سرمایش غیرمستقیم (احیا کننده) تامین می‌شود. با توجه به منبع تامین کننده هوای ثانویه دستگاه ترکیبی سرمایش تشعشعی شبانه و تبخیری غیرمستقیم کارائی متغییر می‌باشد، به طوریکه سیستم احیا کننده دارای بیشترین کارائی است. این سیستم ترکیبی تکمیل کننده سیستم سرمایش تبخیری می‌بوده به صورتی که با مصرف انرژی کم قادر به برآوردن شرایط آسایش است. بنابراین این سیستم پاک و پربازده می‌تواند به عنوان جانشینی مناسب برای سیستم‌های تبرید تراکمی باشد.

کلمات کلیدی: سرمایش تابشی شبانه، سرمایش تبخیری،کویل سرد، سیستم ترکیبی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... ت

فهرست اشکال ..... ج

فهرست اشکال ..... ح

۱- مقدمه ۱

۱-۱- بررسی مشکلات روبرو و ارائه راه حل ۱

۱-۲- مروری بر مطالعات گذشته ۲

۲- مفاهیم و معرفی سیستم ترکیبی ۸

۲-۱- سرمایش غیر فعال ۸

۲-۱-۱- منابع سرمایش غیر فعال ۸

۲-۱-۱-۱- آسمان ۸

۲-۱-۱-۲- اتمسفر ۸

۲-۱-۱-۳- زمین ۹

۲-۱-۲- سرمایش از طریق تابش به سمت آسمان ۹

۲-۱-۳- دمای آسمان ۱۰

۲-۱-۴- سرمایش تبخیری ۱۱

۲-۱-۴-۱- سرمایش تبخیری مستقیم ۱۲

۲-۱-۴-۲- سرمایش تبخیری غیرمستقیم ۱۴

۲-۱-۴-۳- سرمایش تبخیری غیرمستقیم-مستقیم ۱۵

۲-۲- کویل ۱۶

۲-۲-۱- انواع کویل ۱۷

۲-۲-۱-۱- کویل آب سرد ۱۷

۲-۲-۱-۲- کویل انبساط مستقیم ۱۸

۲-۲-۱-۳- کویل آب گرم ۱۸

۲-۲-۱-۴- کویل بخار گرم ۱۸

۲-۲-۲- پره های کویل ۱۹

۲-۲-۲-۱- بازده فین ها ۲۰

۲-۳- ناحیه آسایش سرمایش تبخیری ۲۰

۲-۴- معرفی سیستم ترکیبی ۲۳

۳- معادلات حاکم ۲۴
۳-۱- معادلات تشعشعگر صفحه تخت ۲۴
۳-۱-۱- توزیع دما در تشعشعگر صفحه تخت ۲۴
۳-۱-۲- اتلاف کلی تشعشعگر ۳۰
۳-۲- محاسبه دمای معادل آسمان و انرژی تابشی به آسمان ۳۱
۳-۳- فرمول بندی مخزن ذخیره ۳۳
۳-۴- کویل آب سرد ۳۵
۳-۴-۱- سرمایش محسوس در کویل ۳۵
۳-۴-۱-۱- ضریب انتقال حرارت در سمت هوا ۳۶
۳-۴-۱-۲- ضریب انتقال حرارت در سمت آب ۳۸
۳-۴-۲- کارایی کویل خشک ۳۹
۳-۴-۳- پارامترهای هندسی ۴۰
۳-۴-۳-۱- آرایش خطی ۴۰
۳-۴-۳-۲- آرایش پراکنده ۴۱
۳-۵- مدل سازی سرمایش تبخیری ۴۱
۳-۵-۱-۱- مدل سازی سرمایش تبخیری مستقیم ۴۱
۳-۵-۱-۲- مدل سازی سرمایش تبخیری غیرمستقیم ۴۳
۳-۵-۱-۳- مدل سازی سرمایش غیرمستقیم-مستقیم ۴۶
۳-۵-۱-۴- کارائی اشباع کولرهای تبخیری ۴۷
۳-۶- نحوه عملکرد برنامه کامپیوتری ۴۷

۴- بحث و نتیجه گیری ۵۰
۴-۱- اعتبار سنجی نتایج ۵۰
۴-۲- پتانسیل سنجی ۵۳
۴-۳- سیستم سرمایش شبانه ۵۹
۴-۴- سیستم ترکیبی سرمایش شبانه و سرمایش تبخیری مستقیم ۶۳
۴-۵- سیستم ترکیبی سرمایش شبانه و سرمایش تبخیری غیرمستقیم ۶۹
۴-۶- سیستم ترکیبی سرمایش شبانه و سرمایش تبخیری غیرمستقیم-مستقیم ۷۵
۴-۷- مقایسه و جمع بندی نتایج ۷۸
۴-۸- پیشنهادات ۸۰

فهرست مراجع ۸۱

واژه نامه

فهرست علایم و نشانه‌ها

علامت اختصاری	عنوان
A	مساحت سطح مرطوب (m^2)
A_f	مساحت پره (m^2)
A_i	مساحت سطح داخلی لوله (m^2)
A_o	مساحت سطح خارجی لوله (m^2)
C_p	گرمای ویژه سیال در فشار ثابت $(j/hg°C)$
D_{in}	قطر داخلی لوله (m)
D_{out}	قطر خارجی لوله (m)
F	ضریب بازده تشعشعگر (بدون بعد)
h	ضریب انتقال حرارت $(w/m^2°C)$
h_m	ضریب انتقال جرم $(kg/m^2°C)$
i	آنتالپی ویژه (j/kg)
K	هدایت حرارتی $(w/m°C)$
l	ضخامت پد مرطوب (m)
l_e	طول مشخصه پد مرطوب (m)
Le	عدد لوئیز (بدون بعد)
L_p	عرض کانال اولیه
L_s	عرض کانال ثانویه
$\dot{m}$	نرخ گذر جرمی (kg/s)
n	تعداد لوله‌های موازی در تشعشعگر
NTU	تعداد واحدهای انتقال
N_t	تعداد لوله‌ها در داخل کویل
Nu	عدد ناسلت (بدون بعد)
Pr	عدد پرانتل (بدون بعد)
Re	عدد رینولدز (بدون بعد)
R_{net}	انرژی تابشی تابیده شده به آسمان (w/m^2)
T	دما (°C)
T_f	دمای سیال داخل تشعشعگر (°C)
U_b	اتلاف حرارتی از زیر تشعشعگر $(w/m^2°C)$

U_L اتلاف حرارتی کلی تشعشعگر $(w/m^{2}\text{°C})$

U_t اتلاف حرارتی از بالای تشعشعگر $(w/m^{2}\text{°C})$

U_s اتلاف حرارتی از اطراف تشعشعگر $(w/m^{2}\text{°C})$

v سرعت باد (m/s)

W فاصله بین لوله در تشعشعگر (m)

y طول لوله در تشعشعگر (m)

حروف یونانی

δ ضخامت عایق (m)

ε_r ضریب صدور نیمکره‌ای

η بازده پره

θ کارائی تبخیری

ϕ رطوبت نسبی (بدون بعد)

ρ چگالی (kg/m^3)

σ ثابت استفان-بولتزمن $(w/m^{2}\text{°C})$

ω نسبت رطوبت (kg/kg)

زیر نویس‌ها

a هوا

i شرایط ابتدایی

in ورودی

out خروجی

p هوای اولیه

s هوای ثانویه

sky آسمان

sw اشباع

v بخار

vs بخار روی سطح

w آب

فهرست جدول ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱ ضریب های تصحیح برای تعداد ردیف کمتر از ۲۰. ..... ۳۸
جدول ۴-۱ مشخصات طول و عرض جغرافیای شهرهای مورد بررسی. ۵۴
جدول ۴-۲ مشخصات هندسی کویل آب سرد. ۶۴
جدول ۴-۳ اختلاف دمای ورودی و خروجی بعد از هر مرحله. ۷۸

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱ فرآیند سرمایش تبخیری مستقیم روی نمودار سایکرومتریک. ۱۳
شکل ۲-۲ فرآیند سرمایش تبخیری غیر مستقیم روی نمودار سایکرومتریک. ۱۵
شکل ۲-۳ فرآیند سرمایش تبخیری غیرمستقیم-مستقیم روی نمودار سایکرومتریک. ۱۶
شکل ۲-۴ ساختار یک کویل آب سرد. ۱۷
شکل ۲-۵ انواع فین در کویل. ۲۰
شکل ۲-۶ ناحیه آسایش استاندارد و سرمایش تبخیری ASHRAE. ۲۲
شکل ۲-۷ نمونه دستگاه ترکیبی سرمایش شبانه و سرمایش تبخیری. ۲۳
شکل ۳-۱ اجزاء یک تشعشعگر صفحه تخت. ۲۴
شکل ۳-۲ توزیع دما در تشعشعگر صفحه تخت. (a) شماتیک صفحه تشعشعگر، (b) نمودار توزیع حرارت. ۲۵
شکل ۳-۳ ساختار لوله و صفحه تشعشعگر. ۲۶
شکل ۳-۴ بالانس انرژی در یک المان از لوله در تشعشعگر. ۲۷
شکل ۳-۵ بالانس انرژی در یک المان سیال. ۳۰
شکل ۳-۶ شماتیکی از لایه بندی حرارتی در مخزن ذخیره. ۳۵
شکل ۳-۷ آرایش لوله ها در یک خط (a) و پراکنده (b). ۳۷
شکل ۳-۸ آرایش هندسی برای یک مبدل جریان متقاطع تک مسیر با آرایش خطی. ۴۰
شکل ۳-۹ آرایش هندسی برای یک مبدل جریان متقاطع تک مسیر با آرایش پراکنده. ۴۱
شکل ۳-۱۰ المان شماتیکی سرمایش تبخیری مستقیم. ۴۲
شکل ۳-۱۱ شماتیک کولر سرمایش تبخیری غیرمستقیم. ۴۴
شکل ۳-۱۲ المان های حل برای (a) جریان هوای اولیه (b) جریان هوای ثانویه (c) جریان آب. ۴۵
شکل ۴-۱ معتبرسازی سرمایش شبانه بوسیله مقایسه دادههای مدلسازی و آزمایش عملی Meir. ۵۱
شکل ۴-۲ معتبرسازی کویل آب سرد بوسیله مقایسه دادههای مدلسازی و آزمایش عملی. ۵۱
شکل ۴-۳ معتبرسازی واحد سرمایش تبخیری مستقیم بوسیله مقایسه دادههای مدلسازی و آزمایش عملی. ۵۲
شکل ۴-۴ معتبرسازی واحد سرمایش تبخیری غیرمستقیم و غیرمستقیم-مستقیم بوسیله مقایسه نتایج مدلسازی عددی و نتایج آزمایشگاهی. ۵۳
شکل ۴-۵ شماتیک سیستم سرمایش شبانه. ۵۴
شکل ۴-۶ تغییرات دمای آب خروجی از تشعشعگرها برای دو شهر تهران و شیراز. ۵۶
شکل ۴-۷ تغییرات دمای آب خروجی از تشعشعگرها برای دو شهر کرمان و یزد. ۵۶

شکل ۴-۸ تغییرات دمای آب خروجی از تشعشعگرها برای دو شهر بندرعباس و بوشهر.....۵۶
شکل ۴-۹ مقایسه دمای آب داخل مخزن ذخیره در شهرهای مختلف.....۵۷
شکل ۴-۱۰ انرژی انباشته شده در داخل مخزن را در طول شب برای شهرهای مختلف. ۵۸
شکل ۴-۱۱ دمای آب خروجی از تشعشعگرها، دمای هوا، دمای نقطه شبنم و سرعت باد در تهران. ۵۹
شکل ۴-۱۲ دمای آب خروجی از تشعشعگرها، دمای هوا، دمای نقطه شبنم و سرعت باد در کرمان. ۶۰
شکل ۴-۱۳ دمای متوسط آب در مخزن، دمای محیط و دمای آب خروجی از تشعشعگرها در تهران.....۶۱
شکل ۴-۱۴ دمای متوسط آب در مخزن، دمای محیط و دمای آب خروجی از تشعشعگرها در کرمان. ۶۲
شکل ۴-۱۵ شارهای حرارتی تابش، هدایت و همرفت روی تشعشعگرها در تهران. ۶۲
شکل ۴-۱۶شارهای حرارتی تابش، هدایت و همرفت روی تشعشعگرها در کرمان.....۶۲
شکل ۴-۱۷ شماتیک سیستم ترکیبی سرمایش شبانه و سرمایش تبخیری مستقیم.....۶۴
شکل ۴-۱۸ دمای هوای خروجی از سیستم ترکیبی سرمایش شبانه و سرمایش تبخیری مستقیم برای تهران. ۶۶
شکل ۴-۱۹ دمای هوای خروجی از سیستم ترکیبی سرمایش شبانه و سرمایش تبخیری مستقیم برای کرمان. ۶۶
شکل ۴-۲۰ فرآیند سرمایش سیستم ترکیبی سرمایش شبانه و سرمایش تبخیری مستقیم برای شرایط تهران و کرمان روی نمودار سایکرومتریک. ۶۷
شکل ۴-۲۱ مقایسه کارائی سیستم ترکیبی و سرمایش تبخیری مستقیم برای دو شهر تهران و کرمان. ..۶۷
شکل ۴-۲۲ تغییرات دمای آب داخل مخزن ذخیره برای شهر تهران. ۶۸
شکل ۴-۲۳ تغییرات دمای آب داخل مخزن ذخیره برای شهر کرمان.....۶۹
شکل ۴-۲۴ شماتیکی از منابع مختلف تامین هوای ثانویه برای دستگاه تبخیری غیرمستقیم.....۷۰
شکل ۴-۲۵ مقایسه تغییرات زمانی دمای هوای خروجی از سه مدل دستگاه تبخیری غیرمستقیم با دمای هوا و کویل سرد در تهران.....۷۱
شکل ۴-۲۶ مقایسه تغییرات زمانی دمای هوای خروجی از سه مدل دستگاه تبخیری غیرمستقیم با دمای هوا و کویل سرد در کرمان. ۷۲
شکل ۴-۲۷ فرآیند سرمایش سیستم ترکیبی سرمایش شبانه و سرمایش تبخیری مستقیم برای شرایط تهران و کرمان روی نمودار سایکرومتریک. ۷۲
شکل ۴-۲۸ کانتورهای دمای روی صفحه مبدل حرارتی را برای مدل B برای شرایط کرمان؛ (a) کانتور دمای هوای اولیه، (b) کانتور دمای هوای ثانویه، (c) کانتور دمای آب.....۷۳
شکل ۴-۲۹ تغییرات دمای سیالات در مبدل غیرمستقیم مدل B برای تهران. ۷۴
شکل ۴-۳۰ مقایسه کارائی سیستم ترکیبی و سرمایش تبخیری غیرمستقیم برای دو شهر تهران و کرمان. ۷۵
شکل ۴-۳۱ شماتیک سیستم ترکیبی سرمایش شبانه و سرمایش تبخیری غیرمستقیم-مستقیم.....۷۶

شکل ۴-۳۲ دمای هوای خروجی از سیستم ترکیبی سرمایش شبانه و سرمایش تبخیری غیرمستقیم-مستقیم برای تهران. ۷۷
شکل ۴-۳۳ دمای هوای خروجی از سیستم ترکیبی سرمایش شبانه و سرمایش تبخیری غیرمستقیم-مستقیم برای کرمان. ۷۷
شکل ۴-۳۴ مقایسه کارائی سیستم ترکیبی و سرمایش تبخیری غیرمستقیم-مستقیم برای دو شهر تهران و کرمان. ۷۸

۱– مقدمه

۱–۱– بررسی مشکلات روبرو و ارائه راه حل

از یک سو، تغییرات آب و هوای در اثر گرمایش زمین، مصرف سوخت‌های فسیلی و پایان یافتن این منابع و از سوی دیگر، تقاضا برای کاهش ذرات آلاینده در هوا، باعث افزایش استفاده از منابع طبیعی به جای منابع متعارف انرژی شده است. سرمایش یک موضوع بسیار مهم در تهویه مطبوع برای ساختمان‌ها به ویژه در مناطق گرم و مرطوب می‌باشد. در حقیقت، بخاطر مصرف زیاد انرژی در ساختمان‌ها، تقاضا برای طراحی و ساخت تجهیزات سرمایش، گرمایش و تهویه هوا (HVAC[1]) با بازده انرژی بالا رو به افزایش می‌باشد [۱-۵]. آمار منتشر شده نشان می‌دهد مصرف انرژی در بخش ساختمان حدود ۳۵-۴۰ درصد کل انرژی مصرفی کشور بوده که با رشد متوسط حدود ۷ درصد در حال افزایش می‌باشد [۶]. ساختمان‌های مسکونی و دولتی ۷۰ درصد مصرف این انرژی را با بهره پایینی به خود اختصاص داده‌اند. در میان تجهیزات سرمایش، گرمایش و تهویه هوا، سیستم‌های سرمایشی بیشترین مصرف انرژی را دارند. تجهیزات سرمایشی بجز افزایش میزان مصرف انرژی در ساختمان‌ها تاثیرات عمده دیگر مانند افزایش پیک بار برق مصرفی، مشکلات زیست محیطی به علت تخریب لایه ازن و گرم شدن کره زمین و مشکلات کیفیت هوای داخل ساختمان به وجود می‌آورند. آلاینده‌های مانند CFC، HCFC و CO2 مورد استفاده در تهویه مطبوع باعث تخریب لایه ازن و گرم شدن کره زمین می‌شوند. بر اساس آمار منتشر شده [۷]، ایران با مصرف روزانه ۴۲۰ میلیون لیتر انواع انرژی در ردیف سیزدهمین کشور پرمصرف جهان از این نظر قرار گرفته است. مصرف انرژی در ایران بسیار بیشتر از کشورهایی است که از نظر توسعه یافتگی در سطح بالاتری نسبت به ایران قرار دارند. دور نمای تولید و

[1] Heating, Ventilation, and Air-Conditioning

مصرف انرژی در چند دهه آینده، با چالش روبه رو شده است. منابع متداول انرژی شامل سوخت های فسیلی می‌باشد. انرژی سبز، جانشینی برای انرژی های فسیلی بوده و در قرن اخیر میزان تولید و مصرف این نوع انرژی‌ها یک پارامتر مهم توسعه اقتصادی، صنعتی، اجتماعی و تکنولوژی کشورها محسوب می‌شوند. دسترسی کشورهای در حال توسعه به انواع منابع جدید انرژی و انجام فعالیت‌های اقتصادی در جهت نیل به این هدف، برای توسعه اقتصادی آنها اهمیت اساسی دارد؛ به طوری که پژوهش‌های جدید نشان داده بین سطح توسعه و میزان مصرف انرژی کشورها رابطه مستقیمی وجود دارد [۵]. از اینرو در این پایان نامه به بررسی و امکان سنجی روشی نوین، کم مصرف، پاک و با بازده بالا برای ایجاد آسایش حرارتی در ساختمان پرداخته شده است.

استفاده از سرمایش غیرفعال[1] یک راه حل برای ایجاد سرمایش در تهویه مطبوع می‌باشد. این روش به محیط زیست آسیب نمی‌رساند و مصرف برق بسیار پایینی نسبت به دیگر روش‌های متداول دارد. به علاوه، سرمایش تبخیری[2] به عنوان یک جایگزین اقتصادی و یا به عنوان پیش‌سرد کننده در سیستم‌های متداول سرمایشی استفاده می‌شود. خنک کننده‌های تبخیری نقش ویژه‌ای در فراهم آوردن شرایط آسایش دارند. این تجهیزات نیز امکان تهویه مطبوع با هزینه پائین را فراهم نموده و به کمک آنها شرایط آسایش در برخی از مناطق حاصل می‌شود. همچنین ترکیب این دو روش می‌تواند سرمایش مورد نیاز در ساختمان را در برخی از مناطق کشور تامین نماید.

این تحقیق دارای سه بخش اصلی می‌باشد که عبارتند از : سرمایش تشعشعی شبانه[3]، کویل سرد و سرمایش تبخیری مستقیم/ غیر مستقیم؛ در بررسی مطالعات گذشته به مرور هر بخش پرداخته می‌شود.

۱-۲- مروری بر مطالعات گذشته

در زمینه سرمایش تشعشعی شبانه محققان متعددی زیر به تحقیق و بررسی این پدیده و امکان استفاده از آن پرداختند. بردهال و فرومبرگ[1] (۱۹۸۲) تشعشع با طول موج بلند را برای آسمان صاف را در ایالات

[1] Passive cooling
[2] Evaporative Cooling
[3] Nocturnal radiative cooling

متحده آمریکا اندازه گرفتند و معادله‌ای برای دمای معادل آسمان به توجه به دمای نقطه شبنم و دمای محیط بدست آوردند [۸]. و همچنین بردهال به همراه مارتین[۲] (۱۹۸۴) معادله کامل‌تری با توجه به فشار و ساعت برای دمای معادل آسمان بدست آوردند و کانتور (خطوط هم‌دما) دمای آسمان را برای ایالات متحده آمریکا رسم کردند [۹]. آرگیریو[۳] و همکاران (۱۹۹۴) پتانسیل سرمای تشعشعی را برای شهر آتن بر اساس داده‌های آب و هوای دوازده سال گذشته تخمین زدند [۱۰]. علی[۴] و همکاران (۱۹۹۵) با استفاده از دو تشعشگر شبانه موازی مدار باز به بررسی عملی و تئوری سرمایش شبانه پرداختند [۱۱]. میهالاکاکو[۵] و همکاران (۱۹۹۸) بازده پویای سیستم سرمایش تشعشعی را محاسبه کردند و همچنین برای سرد کردن هوا از یک تشعشگر فلزی سبک وزن به همراه پوشش پلی اتیلنی[۶] استفاده کردند [۱۲]. النیمر[۷] و همکاران (۱۹۹۸-۱۹۹۹) سیستم سرمایشی تشعشعی متشکل از یک پانل با پوششی پلی‌اتیلنی و یک مخزن ذخیره را به صورت عملی و تئوری بررسی کردند. در این آزمایش از هوا به عنوان ناقل حرارت استفاده شد [۱۳]. سپروکن اسمیت[۸] (۱۹۹۹) برای مشخص کردن وضعیت موقعی و تغییرات فضای دمای سطح در هنگام سرمایش تشعشعی، از مدل یک پارک شهری استفاده کرد [۱۴]. ارل و اتزیون[۹] (۱۹۹۱-۲۰۰۰) تحقیقات بسیار در زمینه سرمایش تشعشعی شبانه انجام دادند. آنها سرمایش ساختمان با روش سرمایش تشعشعی به وسیله کلکتورهای صفحه تخت را بررسی کردند و همچنین بازده ساختارهای تشعشگرهای مختلف در سرمایش شبانه مطالعه کردند [۱۵-۱۸]. میر[۱۰] و همکاران (۲۰۰۳) سیستم سرمایش تشعشعی را با استفاده از تشعشگرهای صفحه تخت پلیمری بدون پوشش شیشه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. آنها از آب به عنوان سیال ناقل حرارت استفاده کرد [۳]. باگیورگاس[۱۱] و میهالاکاکو (۲۰۰۷) در یونان به بررسی تئوری و عملی

[1] Berdhal and Fromberg
[2] Martin
[3] Argiriou
[4] Ali
[5] Mihalakakou
[6] Polyethylene
[7] Al-Nimr
[8] Spronken-smith
[9] Erell and Etzion
[10] Meir
[11] Bagiorgas

سرمایش تشعشعی شبانه برای سرمایش محیط با استفاده از تشعشعگر آلومینیوم سفیده شده پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که سیستم سرمایش تشعشعی شبانه دارای توانایی ایجاد سرمایش قابل توجهی است [۲]. بسیندوا[1] و همکاران (۲۰۰۷) یک بررسی عملی روی سرمایش تشعشعی شبانه در جدده انجام دادند و حتی در جدده با وجود رطوبت هوای بالا امکان استفاده از سرمایش شبانه وجود دارد [۱۹]. سلیم شیرازی (۲۰۰۸) در پایان نامه خود با استفاده از اختلاف دمای محیط و دمای آسمان و همچنین مدل‌سازی عملی و عددی به بررسی سرمایش تشعشعی شبانه در ایران پرداخت. او همچنین سیستم ترکیبی سرمایش تشعشعی شبانه و سقف سرد را در تهران مطالعه نمود [۲۰-۲۲].

در زمینه مخزن‌های ذخیره سیال سرد یا گرم و افراد زیر فعالیت نموده‌اند. لاوان تامسون[2] (۱۹۹۷) به صورت آزمایشگاهی مشخص نمود که لایه بندی حرارتی در مخزن استوانه‌ای آب حتی در دبی جرمی بالا به وجود می‌آید. همچنین آنها بازده را با استفاده از اعداد رینولدز، گراشوف و نسبت طول به قطر پیش‌بینی کردند [۲۳]. کریستوفری[3] (۲۰۰۳) و همکاران اثر دبی جرمی و لایه بندی حرارتی در داخل مخزن را بر روی کلکتورهای صفحه تخت بررسی کردند و متوجه شدند که مخزن با لایه بندی حرارتی دارای بازده بسیار بالاتری از مخزن‌های مخلوط کامل هستند [۲۴]. بدسکو[4] (۲۰۰۷) به کنترل بهینه جریان در سیستم‌های مدار بسته با رژیم کاملا مخلوط در مخزن آب پرداخت و طرح را بررسی کرد [۲۵]. عثمان[5] (۲۰۰۸) به صورت عددی لایه بندی حرارتی را برای مخزن ذخیره آب سرد و اثر نسبت ارتفاع به قطر و عدد رینولدز بر روی ضخامت لایه حرارتی را بررسی کرد [۲۶].

سرمایش تبخیری مستقیم افراد زیر را به خود جلب کرده است. دای و سوماتی[6] (۲۰۰۲) کولر سرمایش تبخیری مستقیم جریان متقاطع[7] با کاغذهای شانه عسلی مرطوب را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان

[1] Bassindowa
[2] Lavan and Thompson
[3] Cristofari
[4] Badescu
[5] Osman
[6] Dai and Sumathy
[7] Cross-Flow

داد با بهینه کردن پارامترهای عملکرد و طول کانال خروجی بهبود خواهد یافت [۲۷]. لیائو و چیو[1] (۲۰۰۲) یک تونل باد برای شبیه سازی سیستم پد تبخیری ساختند و دو ماده مختلف را بررسی کردند [۲۸]. السلیمان[2] (۲۰۰۲) بازده سه فیبر طبیعی (فیبر نخل خرما، کنف هندی، لوفا) به عنوان پد مرطوب در سیستم تبخیری مستقیم را سنجید [۲۹]. کمرگو[3] و همکاران (۲۰۰۵) اصول عملکرد سیستم سرمایش تبخیری مستقیم برای آرامش انسان و معادلات ریاضی برای انتقال حرارت را ارائه و اثر بخشی تبخیر را تعیین کردند [۳۰]. وو[4] و همکاران (۲۰۰۹) معادلات انتقال حرارت و جرم را در سیستم سرمایش تبخیری مستقیم به صورت عددی حل کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که یک پد مرطوب با بازده بالا در تهویه هوا بسیار موثر است [۳۱].

در زمینه سرمایش تبخیری غیر مستقیم نیز تحقیقاتی انجام شده است. مکلین-کراس و بنکس[5] (۱۹۸۱) به عنوان یکی از اولین افراد در این زمینه، انتقال حرارت تبخیری را در کولرهای غیر مستقیم تحلیل کردند. آنها یک مدل ساده شده که در آن فیلم آب ثابت و بطور پیوسته با آب در دمای ثابت جایگزین می‌شود و را ارائه دادند. نتایج با استفاده از معادلات جدا شده کانال مرطوب و کانال خشک کولر و استفاده از تعریف جدید کاهش دمای مرطوب (اختلاف بین دمای خشک و دمای حباب مرطوب) بدست آمد. از این مدل برای پیشبینی بازده کولر استفاده شد [۳۲]. کتلبروگ و هسیه[6] (۱۹۸۳) یک کولر سرمایش تبخیری غیر مستقیم جریان متقاطع با وضعیت جریان رو به بالا هوای اولیه و جریان رو به پائین جریان هوا ثانویه و آب را توضیح دادند. آنها از تحلیل عددی برای بررسی بازده حرارتی این سیستم استفاده کردند. با اعمال فاکتور (ضریب) رطوبت تطابق بهتری بین نتایج عملی و نتایج تئوری بدست آمد[۳۳]. هسو[7] و همکاران (۱۹۸۹) سه نوع از مبدل‌های حرارتی صفحه مرطوب را بررسی کردند. آنها دریافتند که بازده سرمایشی هر سیستم با افزایش واحد انتقال حرارت (NTU) افزایش می‌یابد و در یک مقدار زیاد به بیشترین مقدار خود همگرا می‌شود.

[1] Liao and Chiu
[2] Al-Sulaiman
[3] Camargo
[4] Wu
[5] Maclaine-cross and Banks
[6] Kettleborough and Hsieh
[7] Hsu

دمای آب در این بررسی از طریق معادلات جرم و انرژی بدست آمد. آنها همچنین اثر هدایت حرارتی طولی صفحات را در نظر گرفتند و به این نتیجه رسیدند که هدایت حرارتی طولی صفحات در جریان‌های مخالف و هم‌جهت اثری ندارد و در اثر کاهش دهنده بازده آن در جریان‌های متقاطع با افزایش طول کانال خشک نسبت طول کانال مرطوب افزایش می‌یابد [۳۴]. ارن و درایر[1] (۱۹۹۳) سه مدل کولر تبخیری غیر مستقیم را بررسی کردند. ۱- مدل پوپ (Poppe): با عدد لوئیز متغییر و مدل‌سازی حالت اشباع فوق اشباع در جریان ثانویه هوا. ۲- مدل مرکل (Merkel): همان مدل پوپ می‌باشد با این تفاوت که عدد لوئیز برابر یک فرض شده و اثر پاشش آب تبخیری ناچیز و هوای ثانویه هرگز فوق اشباع نمی‌شود. ۳- مدل ساده شده: دمای آب در طول کولر ثابت فرض شده است. آنها این سه مدل را در حالت جریان متقاطع بررسی کردند و مدل ساده شده را برای واحدهای کوچک و طراحی اولیه پیشنهاد دادند [۳۵]. چنگین و هنگژین[2] (۲۰۰۶) یک مدل تحلیلی برای بررسی سرمایش تبخیری غیر مستقیم جریان مخالف و جریان هم‌جهت ارائه دادند. همانند بقیه مدل‌های تحلیل، نسبت رطوبت هوا در با تقابل با سطح مرطوب با صورت خطی فرض شد. اثر تبخیر آب، تغییر دمای آب در طول مبدل حرارتی و غیر یک بودن عدد لوئیز در مدل اعمال شد. نتایج مدل تحلیلی تطابق خوبی با نتایج تحلیل عددی داشت [۳۶]. هیتیاراچچی[3] و همکاران (۲۰۰۷) اثر هدایت حرارتی طولی صفحات را در مبدل حرارتی تبخیری غیرمستقیم جریان متقاطع بررسی کردند. آنها از روش واحد انتقال حرارت و مدل سازی عددی نتایج زیر را بدست آوردند. کاهش بازده حرارتی برای برخی شرایط عملکردی ممکن است به شدت کاهش یابد ولی این کاهش در بیشتر مواقع زیر ۵٪ است [۳۷].

بطور کلی به میزان سرمایش تبخیری مستقیم و غیر مستقیم بر روی سرمایش تبخیری دو مرحله‌ای کار انجام نشده است. افراد زیر محققین شاخص در این زمینه هستند. اسکلدفیلد و دسچمپ[4] (۱۹۸۴) مشخصات دستگاه‌های سرمایش تبخیری مستقیم-غیرمستقیم دارای مبدل حرارت هوا به هوا را مطالعه کردند. اولین قسمت دستگاه شامل واحد سرمایش تبخیری غیرمستقیم با مبدل حرارت صفحه‌ای بود. در این

[1] Erens and Dreyer
[2] Chengqin and Hongxing
[3] Hettiarachchi
[4] Scofield and DesChamps

واحد، هوای محیط با دمای تر پائین همراه آب به عنوان هوای اولیه پاشش می‌شد این عمل باعث کاهش دمای هوای اولیه می‌شود. تهویه بیشتر هوا در داخل یک برج خنک کننده متعارف انجام می‌شد. عملکرد این دستگاه ذخیره ۳۰٪ در مصرف ماهانه را نسبت به سیستم‌های سرد کننده معمول نتیجه می‌داد [۳۸]. الجوایهل[1] و همکاران (۱۹۹۷) بازده سیستم سرمایش تبخیری مستقیم-غیر مستقیم و اثر جفت کردن این سیستم با یک برج خنک کننده را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیشترین بازده حرارتی برای سیستم ترکیبی شامل سرمایش تبخیری دو مرحله‌ای مستقیم-غیر مستقیم می‌باشد و کمترین بازده متعلق به واحد تبخیری مستقیم است. در سیستم ترکیبی، برج خنک کن بار حرارتی اضافه شده به سیستم در هنگام پیش-سرد کردن را حذف می‌کند و در نتیجه دارای بازده بالائی است [۳۹]. الدوسکی[2] و همکاران (۲۰۰۴) یک دستگاه سرمایش تبخیری دو مرحله‌ای در کویت ساختند و آن را امتحان کردند. این دستگاه شامل واحد سرمایش تبخیری غیرمستقیم و به دنبال آن واحد سرمایش تبخیری مستقیم بود. این دستگاه در تابستان در هوای بسیار گرم و خشک کار کرد. نتایج نشان دادند که بازده دستگاه سرمایش تبخیری دو مرحله‌ای مستقیم-غیر مستقیم بین ۹۰-۱۲۰٪ متغییر است. همچنین بازده دستگاه سرمایش تبخیری مستقیم و غیر مستقیم به ترتیب بین ۲۰-۴۰٪ و ۶۳-۹۳٪ تغییر می‌کنند [۴۰]. بزرگمهر (۲۰۰۹) به صورت تحلیل دستگاه سیستم سرمایش تبخیری دو مرحله‌ای مستقیم-غیر مستقیم را به صورت جریان‌های مختلف مخالف جهت، هم‌جهت و جریان متقاطع مدل‌سازی کرد. او همچنین بازده دستگاه را برای مناطق مختلف ایران بررسی کرد. نتایج نشان دادند که دستگاه دو مرحله‌ای دارای بازده بالای بوده و می‌تواند جایگزین سالم و بدون آلودگی محیطی برای دستگاه‌های سرمایش متعارف باشد [۴۱-۴۲].

[1] Al-Juwayhel
[2] El-Dessouky