

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

عنوان

بررسی الگوریتم کنترل یک سیستم سرمایه‌گذاری گرمایش تجاری جهت
رسیدن به نقطه بهینه اقتصادی

نگارش

ابراهیم غلامی روچی

استاد راهنما

دکتر سیدمجید هاشمیان

بهمن ۱۳۹۶

ب

شماره: ۱۷۷/۲۹۲/۱۳
تاریخ: ۱۳۹۶/۱۲/۱۳

باسم تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای ابراهیم غلامی روچی با شماره دانشجویی ۹۳۱۲۷۴۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان بررسی الگوریتم کنترل یک سیستم سرمایش گرمایش تجاری جهت رسیدن به نقطه بهینه اقتصادی که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۰۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۸۸/۹۰/۹۰/۹۰) درجه بسیار خوب ☒ مردود ☐

نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر سید مجید هاشمیان	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محسن نظری	دانشیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر محمود چهارطاقی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر محمود فرزانه گرد	استاد	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاهمردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می‌نمایم به

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم
و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه
هستی‌ام بوده‌اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و
نشیب به من آموختند.

شکر و قدردانی

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین؛ برحسب وظیفه و از باب " من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عز و جلّ: "

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر سیدمجید هاشمیان که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛

و همچنین دوستان گران مایه‌ام که مرا صمیمانه و مشفقانه یاری داده‌اند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم، باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

ابراهیم غلامی روحی

بهمن ۱۳۹۶

اینجانب ابراهیم غلامی روحی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی الگوریتم کنترلی یک سیستم سرمایش گرمایش تجاری جهت رسیدن به نقطه بهینه اقتصادی تحت راهنمایی دکتر سیدمجید هاشمیان متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام "دانشگاه صنعتی شاهرود" و یا "Shahrood University of Technology" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد

چکیده

آمارها حاکی از آن است که ساختمان‌های مسکونی و تجاری بیشترین سهم مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهند، به‌طوری‌که در کشورهای توسعه یافته تقریباً ۵۰ درصد از کل انرژی تولیدی، در ساختمان‌ها مصرف می‌شود. در این میان، سیستم‌های تهویه مطبوع مهم‌ترین مصرف‌کننده انرژی در ساختمان‌ها هستند. با توجه به مصرف بالای انرژی در ساختمان‌ها، نیاز به تحلیل عملکرد ساختمان و طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی حاکم بر سیستم‌های تهویه مطبوع به‌منظور کاهش مصرف انرژی احساس می‌شود. اصلاح و بهبود این سیستم‌ها به‌غیر از کاهش مصرف انرژی، باعث افزایش بهره‌وری اقتصادی و تأمین آسایش افراد داخل ساختمان می‌شود. در این پایان‌نامه به بررسی الگوریتم کنترلی یک پمپ حرارتی گازسوز جهت رسیدن به سطح آسایش و کاهش هزینه‌های سوخت پرداخته شد. برای این کار یک ساختمان با زیربنای ۶۴ مترمربع در شهر تهران، با روش موازنه حرارتی و حل فضای حالت سیستم با استفاده از زبان برنامه‌نویسی متلب، مدل‌سازی شد. دو الگوریتم کنترلی خاموش-روشن و تناسبی بر روی مدل پیاده‌سازی گردید. الگوریتم کنترلی خاموش-روشن که در واقع الگوریتم کنترلی ترموستاتی است به محض فراهم کردن شرایط تنظیمی کاربر، سیستم تهویه مطبوع را خاموش کرده و با انحراف از حالت تنظیمی کاربر سیستم تهویه مطبوع با حداکثر توان کار می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که هزینه‌های جاری استفاده از الگوریتم کنترلی خاموش-روشن به ازای کارکرد ۲۴ ساعت (۱۶ ساعت روشن و ۸ ساعت خاموش) معادل ۱۶۴۹۴ ریال است. الگوریتم کنترلی تناسبی با توجه به اختلاف دمای تنظیمی کاربر و دمای اندازه‌گیری شده، فرمان تغییر دور موتور و دور فن را صادر می‌کند و با تنظیم این دو پارامتر تلاش می‌کند تا دمای ساختمان را به دمای تنظیمی کاربر نزدیک کند. نتایج نشان می‌دهد که هزینه‌های جاری استفاده از الگوریتم کنترلی تناسبی به ازای کارکرد ۲۴ ساعت معادل ۱۲۳۷۴ ریال است. درنهایت استفاده از الگوریتم کنترلی تناسبی ۴۴/۴۳٪ صرفه‌جویی در مصرف گاز و ۲۵٪ صرفه‌جویی در هزینه‌های جاری فراهم می‌کند.

واژگان کلیدی: پمپ حرارتی با موتور گازسوز، کنترل فیدبک حالت، الگوریتم کنترل، بهینه‌سازی

اقتصادی

فهرست مطالب

ک	فهرست شکل‌ها
م	فهرست جداول
ن	فهرست نشانه‌ها
۱	فصل ۱ مقدمه
۲	۱-۱- اهمیت بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها
۵	۲-۱- مدل‌سازی ساختمان
۸	۳-۱- سیستم‌های سرمایشی مورد استفاده در ایران
۸	۱-۳-۱- سیستم تبرید تبخیری
۹	۲-۳-۱- سیستم تبرید جذبی
۱۱	۳-۳-۱- سیستم تبرید تراکمی
۱۲	۴-۳-۱- پمپ حرارتی با موتور گازسوز
۱۶	۴-۱- سیستم‌های کنترلی
۱۷	۱-۴-۱- کنترل حلقه- بسته
۲۱	۵-۱- مروری بر فصل‌های پایان‌نامه
۲۳	فصل ۲ مطالعات پیشین
۲۴	۱-۲- مقدمه
۲۴	۲-۲- مروری بر مطالعات پیشین
۳۱	۳-۲- تحقیق حاضر
۳۳	فصل ۳ معادلات حاکم و مدل‌سازی ریاضی
۳۴	۱-۳- مقدمه
۳۵	۲-۳- قانون اول ترمودینامیک
۳۶	۳-۳- مدار حرارتی معادل
۴۲	۴-۳- معادلات حاکم
۴۲	۱-۴-۳- مدل حرارتی ساختمان
۴۸	۲-۴-۳- مدل ترمودینامیکی پمپ حرارتی
۵۰	۵-۳- نمایش فضای حالت سیستم
۵۳	۶-۳- خطی‌سازی ژاکوبین
۵۵	۷-۳- کنترل فیدبک حالت

۵۶	۸-۳- الگوریتم ازدحام ذرات
۶۱	فصل ۴ نتایج
۶۲	۱-۴- مقدمه
۶۲	۲-۴- مشخصات اتاق‌های مدل‌سازی شده
۶۳	۳-۴- اعتبارسنجی
۶۹	۴-۴- الگوریتم کنترلی
۷۱	۱-۴-۴- منطق کنترلی
۷۳	۲-۴-۴- الگوریتم کنترلی روشن-خاموش
۷۶	۳-۴-۴- الگوریتم کنترلی تناسبی
۸۰	۵-۴- مقایسه الگوریتم‌های کنترلی استفاده شده
۸۳	فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۸۴	۱-۵- بحث و نتیجه‌گیری
۸۶	۲-۵- پیشنهادها
۸۷	پیوست
۱۱۰	مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: میزان مصرف انرژی بخش‌های مختلف در ایران ۲
- شکل ۲-۱: سهم بخش‌های مختلف یک ساختمان از مصرف انرژی ۴
- شکل ۳-۱: طرز کار کولر آبی ۹
- شکل ۴-۱: سیکل تبرید جذبی ۱۱
- شکل ۵-۱: سیکل تبرید تراکمی ۱۲
- شکل ۶-۱: طرح ترسیمی عملکرد پمپ حرارتی گازسوز ۱۳
- شکل ۷-۱: فرآیند تبدیل انرژی در پمپ حرارتی گازسوز ۱۵
- شکل ۸-۱: کنترل فیدبک ۱۸
- شکل ۱-۳: انتقال حرارت از یک دیوار مسطح و مدار حرارتی معادل ۳۸
- شکل ۲-۳: مدار معادل حرارتی یک دیوار خارجی ۴۰
- شکل ۳-۳: ساختمان تک اتاقه ساده ۴۳
- شکل ۴-۳: تحلیل گره‌ای دیوارها و اتاق ۴۵
- شکل ۵-۳: کنترل فیدبک حالت ۵۶
- شکل ۶-۳: نمایش نحوه حرکت یک ذره در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ۵۹
- شکل ۷-۳: فلوچارت روش حل الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ۶۰
- شکل ۱-۴: پلان اتاق‌های استفاده شده (الف) بدون پنجره و (ب) با پنجره ۶۳
- شکل ۲-۴: تغییرات دمای اتاق در چند روز ۶۵
- شکل ۳-۴: نتایج مربوط به بار برودتی در تابستان برای اتاق اول ۶۶
- شکل ۴-۴: نتایج مربوط به بار حرارتی در زمستان برای اتاق اول ۶۶

- شکل ۴-۵: نتایج مربوط به بار برودتی در تابستان برای اتاق دوم ۶۸
- شکل ۴-۶: نتایج مربوط به بار حرارتی در زمستان برای اتاق دوم ۶۸
- شکل ۴-۷: تغییرات بار برودتی ساختمان ۷۰
- شکل ۴-۸: تغییرات دمای هوای داخل ساختمان ۷۰
- شکل ۴-۹: نقشه کنترلی دمای ساختمان ۷۲
- شکل ۴-۱۰: تغییرات دمای هوای ساختمان ۷۳
- شکل ۴-۱۱: دبی هوای ورودی به ساختمان ۷۴
- شکل ۴-۱۲: میزان مصرف گاز و مصرف برق پمپ حرارتی گازسوز ۷۵
- شکل ۴-۱۳: تغییرات دمای هوای ساختمان ۷۷
- شکل ۴-۱۴: دبی هوای ورودی به ساختمان ۷۷
- شکل ۴-۱۵: میزان مصرف گاز و مصرف برق پمپ حرارتی گازسوز ۷۹
- شکل ۴-۱۶: مقایسه دبی هوای ورودی در الگوریتم‌های کنترلی ۸۰
- شکل ۴-۱۷: مقایسه دمای هوای داخل ساختمان در الگوریتم‌های کنترلی ۸۰

فهرست جداول

- جدول ۴-۱: مشخصات لایه‌های مختلف دیوارها و سقف ۶۴
- جدول ۴-۲: خطای مربوط به بار برودتی و بار حرارتی اتاق اول (برحسب وات) ۶۷
- جدول ۴-۳: خطای مربوط به بار برودتی و بار حرارتی اتاق دوم (برحسب وات) ۶۷
- جدول ۴-۴: مشخصات پمپ حرارتی گازسوز [۵۶] ۷۲
- جدول ۴-۵: هزینه پمپ حرارتی گازسوز ۷۵
- جدول ۴-۶: هزینه پمپ حرارتی گازسوز ۷۹
- جدول ۴-۷: مقایسه هزینه‌های جاری در الگوریتم‌های کنترلی در یک ۲۴ ساعت ۸۱
- جدول ۴-۸: مقایسه مصرف سوخت (انرژی) در الگوریتم‌های کنترلی در یک ۲۴ ساعت ۸۱

فهرست نشانه‌ها

N_{wi}	گره‌های همسایه با گره دیوار i	A_{wi}	مساحت دیوار شماره i
$\dot{Q}_{con}$	نرخ انتقال حرارت در کندانسور	A_{win}	مساحت پنجره اتاق
$\dot{Q}_{eva}$	نرخ انتقال حرارت در اواپراتور	C_{pa}	ظرفیت گرمایی ویژه هوا
q_{LHV}	ارزش حرارتی پایین سوخت	C_{r_i}	ظرفیت گرمایی اتاق شماره i
$\dot{q}_{rad_i}$	شار تشعشعی تابیده‌شده به گره i	C_{wi}	ظرفیت گرمایی دیوار شماره i
$\dot{q}_{int}$	حرارت تولیدی داخلی در اتاق	d	ورودی مزاحم به سیستم
$R_{i,j}$	مقاومت حرارتی بین گره i و j	e	خطای سیستم
R_w	مقاومت حرارتی دیوار	g	ضریب بهره سیستم
R_{win}	مقاومت حرارتی پنجره	h	آنتالپی مخصوص
T_{r_i}	دمای هوای اتاق i	h_i	ضریب انتقال حرارت جابجایی داخلی
T_s	دمای هوای ورودی به اتاق	h_o	ضریب انتقال حرارت جابجایی خارجی
T_{sp}	دمای هوای مطلوب (تنظیمی کاربر)	k	ضریب انتقال حرارت هدایتی
T_{wi}	دمای دیوار i	K_d	ضریب بهره مشتق‌گیر
T_{∞}	دمای هوای بیرون	K_i	ضریب بهره انتگرالی
u	ورودی به سیستم	K_p	ضریب بهره تناسبی
V_a	حجم هوای اتاق	L	ضخامت دیوار
V_{com}	حجم جابجایی کمپرسور	m_a	جرم هوای داخل اتاق
$\dot{V}_{fuel}$	دبی حجمی سوخت	$\dot{m}_a$	دبی جرمی هوای ورودی به اتاق
V_{wi}	حجم دیوار شماره i	$\dot{m}_r$	دبی جرمی مبرد
w_{com}	کار کمپرسور	m_{wi}	جرم دیوار i
$\dot{W}_{com}$	توان مصرفی کمپرسور	N_{com}	دور کمپرسور
$\dot{W}_{engin}$	توان مصرفی موتور	N_{r_i}	گره‌های همسایه با گره اتاق i

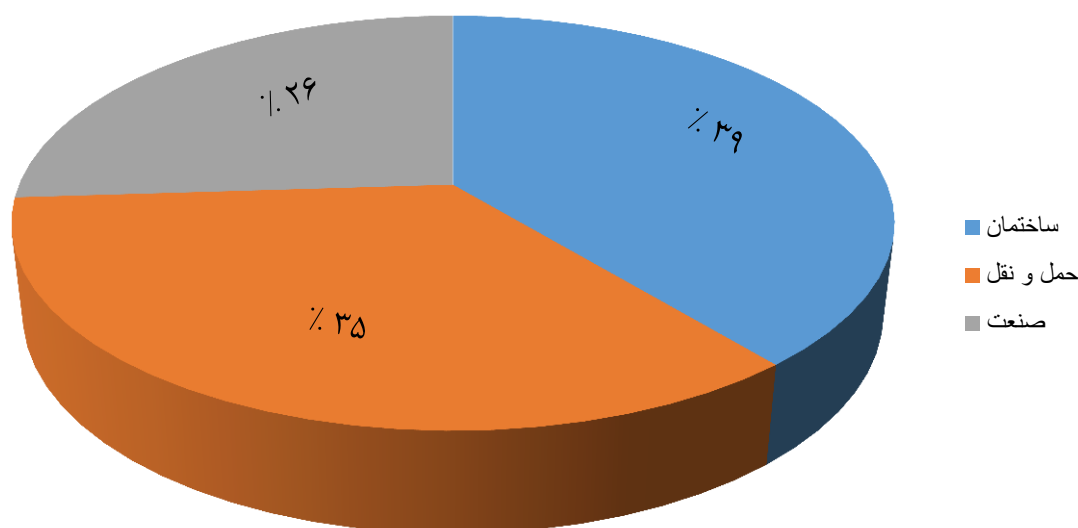
x	متغیر حالت سیستم
α_{w_i}	ضریب جذب سطح دیوار i
ρ_a	چگالی هوا
ρ_{w_i}	چگالی دیوار شماره i
η_{belt}	راندمان انتقال قدرت
η_{comb}	راندمان احتراق
η_m	راندمان مکانیکی موتور
η_s	راندمان آیزنتروپیک
τ_{win}	ضریب عبور تشعشع خورشیدی از پنجره

فصل ۱ مقدمه

۱-۱- اهمیت بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها

با رشد آگاهی‌های زیست‌محیطی و عدم ثبات در بازارهای انرژی جهان، طراحی ساختمان‌های کارآمد به لحاظ انرژی^۱، به مصرف‌کننده‌ها، شرکت‌ها و سازمان‌های دولتی توصیه شد. آمارها حاکی از آن است که ساختمان‌های مسکونی و تجاری بیشترین سهم مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهند، به‌طوری‌که در کشورهای توسعه‌یافته تقریباً ۵۰ درصد از کل انرژی تولیدی، در ساختمان‌ها مصرف می‌شود و همچنین ساختمان‌ها مسئول انتشار حدود ۴۰ درصد از گازهای گلخانه‌ای هستند. در سایر کشورها سهم مصرف انرژی ساختمان‌ها از کل انرژی تولیدی در حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد است [۱].

طبق آمارهای به‌دست‌آمده از سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت، ۳۹ درصد از کل انرژی تولیدی در ایران در بخش ساختمان‌های تجاری و مسکونی مصرف می‌شود. در شکل ۱-۱ سهم بخش‌های مختلف در مصرف انرژی در ایران قابل مشاهده است [۲].



شکل ۱-۱: میزان مصرف انرژی بخش‌های مختلف در ایران

¹ energy-efficient buildings

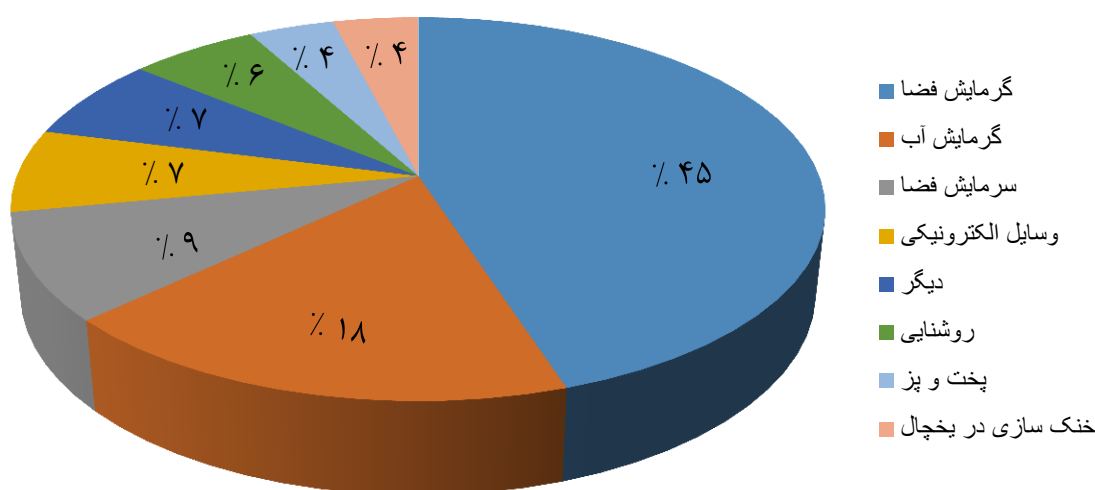
با توجه به مصرف بالای انرژی در ساختمان‌های ایران، غیراصولی بودن شرایط طراحی ساختمان‌ها، استفاده از مصالح کاربردی غیراستاندارد در آن‌ها و تأثیر ساختمان‌ها در افزایش آلودگی محیط‌زیست، نیاز به تحلیل عملکرد ساختمان و طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های کنترلی به‌منظور کاهش مصرف انرژی احساس می‌شود. اصلاح و بهبود این سیستم‌ها به‌غیراز کاهش مصرف انرژی، باعث افزایش بهره‌وری اقتصادی، تأمین آسایش افراد داخل ساختمان و همچنین کاهش هزینه‌های درمانی به دلیل بهبود کیفیت محیط زندگی انسان‌ها می‌شود [۳].

در کشورهای توسعه‌یافته، انسان‌ها حدود ۹۰ درصد از زمان خود را در داخل ساختمان‌ها سپری می‌کنند و این در حالی است که هزینه‌هایی که بابت کیفیت پایین هوای داخل ساختمان متحمل می‌شوند مانند هزینه‌های درمانی، تقریباً با هزینه مصرف انرژی برای داشتن هوای باکیفیت مطلوب برابر است [۴].

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، ساختمان‌ها در حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد از انرژی تولیدی سالیانه را مصرف می‌کنند. در این میان سیستم‌های تهویه مطبوع مهم‌ترین مصرف‌کننده انرژی در ساختمان‌ها هستند. در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود که حدود ۵۰ درصد از سهم مصرف انرژی در ساختمان‌ها، به‌طور مستقیم مربوط به سیستم‌های گرمایش سرمایش و تهویه مطبوع^۱ است [۵].

از آنجایی که انرژی موردنیاز برای سیستم‌های تهویه مطبوع و سوخت مصرفی آن‌ها تأثیر مستقیمی بر روی هزینه‌های عملیاتی ساختمان و تأثیرات غیرمستقیم بر روی محیط‌زیست می‌گذارد، طراحان و مهندسان ساختمان توجه خاصی بر روی بهینه‌سازی این سیستم‌ها معطوف داشته‌اند. برای این منظور باید سیستم‌های تهویه مطبوع با تمام تأثیرات محیط اطراف آن از قبیل ساختار ساختمان، آب‌وهوای خارج، تشعشعات خورشیدی، حضور ساکنین و غیره به‌طور کامل شبیه‌سازی شود [۳].

¹ Heating, ventilation and air conditioning (HVAC)



شکل ۱-۲: سهم بخش‌های مختلف یک ساختمان از مصرف انرژی

راه‌حل ایده‌آل مسئله طراحی سیستم‌های گرمایش و سرمایش، ایجاد کردن تأسیساتی است که حداکثر ظرفیت خروجی آن برابر با مقدار بار گرمایش و سرمایش موردنیاز در بدترین شرایط آب‌و-هوایی منطقه باشد. درعین‌حال این راه‌حل اقتصادی نیست زیرا آمارهای هواشناسی نشان می‌دهند که این شرایط در تمام سال‌ها و تمام ایام سال اتفاق نمی‌افتد و اگر سیستم‌های تهویه مطبوع بر مبنای این شرایط طراحی شوند در بخش اعظم دوران کار و عمر مفید سیستم، تجهیزات دارای ظرفیت بیش‌ازحد مجاز خواهند بود. هدف اصلی از به کار بردن سیستم‌های تهویه مطبوع، تأمین شرایط آسایش انسان است. شرایط آسایش انسان طبق استاندارد انجمن مهندسان گرما و سرما و تهویه مطبوع آمریکا^۱، به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن ۸۰ درصد از افراد ساکن یا دارای فعالیت کم، احساس آسایش و رضایت کنند. احساس آسایش متأثر از ناهمگونی محیط، شرایط هوای خارج، سن، جنسیت و پوشاک افراد است [۶].

¹ American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE)

با شروع دهه ۱۹۹۰ میلادی و افزایش توجه جهانی به حفاظت محیط‌زیست، کاهش مصرف بیهوده سوخت‌های فسیلی به‌عنوان یکی از چالش‌های محققان درآمد. امروزه در تمام نقاط جهان بحث انرژی و مصرف منطقی انرژی از اهمیت بالایی برخوردار است و همه کشورها در تلاش هستند تا با ارائه راهکاری مناسب، مصرف انرژی را در بخش‌های مختلف بهینه سازند. از زمان اجرای دستورالعمل عملکرد انرژی ساختمان‌ها^۱ برای اولین بار در تاریخ، کشورهای عضو اتحادیه اروپا تصمیم گرفتند تا با کاهش تقاضای انرژی به سمت آینده‌ای با کربن کمتر و به تبع آن به سمت ساختمان‌هایی با انتشار آلودگی کمتر گام بردارند [۷]. برای اینکه سیاست کاهش مصرف انرژی مؤثر واقع شود، توجه ویژه به ساختمان‌های جدید و ساختمان‌های موجود به‌عنوان نسخه تجدیدنظر به دستورالعمل عملکرد انرژی ساختمان‌ها اضافه شد [۸]. در بخش ساختمان، سعی بر ایجاد فضاهایی با آسایش بالا و سالم با کمترین میزان مصرف انرژی و کاهش تأثیرات منفی ساختمان بر محیط‌زیست شد. تقاضا برای ساختمان‌های سبز، کاربرد شبیه‌سازی ساختمان را، از یک نیاز به یک الزام مبدل کرد؛ بنابراین، برنامه‌های شبیه‌سازی ساختمان به‌عنوان ابزاری برای تحلیل و طراحی، جایگاه ویژه‌ای یافتند. همچنین این دهه سرآغازی برای خروج برنامه‌های شبیه‌سازی از جامعه تحقیقاتی و ورود آن به بازار عملی به شمار می‌رود. انرژی که در ساختمان‌ها مصرف می‌شود اکثراً از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود و لذا مصرف انرژی در ساختمان‌ها می‌تواند به‌طور مستقیم در مسائل زیست‌محیطی تأثیرگذار باشد؛ بنابراین پرداختن به بحث بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها برای کاهش مصرف انرژی و آلودگی‌های زیست‌محیطی در سراسر جهان از اهمیت بالایی برخوردار است [۳].

۱-۲- مدل‌سازی ساختمان

بخش مهمی از هر مسئله کنترلی، مدل‌سازی فرآیند آن است. هدف، به دست آوردن ساده‌ترین بیان ریاضی است که پاسخ سیستم فیزیکی را به تمام ورودی‌های موردنظر به‌طور مناسب پیش‌بینی کند.

¹ Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)

به منظور بهینه سازی انرژی باید مشخصات و پارامترهای مؤثر را شناسایی و مقادیر مناسب را برای آن ها انتخاب کرد. برای این کار ابتدا باید مدل مناسبی از ساختمان طراحی شود که تأثیر پارامترهای مختلف را شناسایی کند و همچنین این توانایی را داشته باشد که بتوان برای دستیابی به هدف مطلوب، مقادیر بهینه را انتخاب کرد. به هر حال انرژی که توسط سیستم های تهویه مطبوع در داخل ساختمان ها مصرف می شود کمتر مورد توجه قرار گرفته و پراکندگی این مصرف انرژی، شامل بخش های مسکونی، تجاری و صنعتی است. مدل سازی که برای تحلیل و ارزیابی مصرف انرژی در ساختمان ها کاربرد دارد، مدل سازی انرژی است [۳].

برای مدل سازی انرژی باید معادلات بسیاری به طور هم زمان حل گردد. در گذشته، محاسبات طراحی سیستم های تهویه مطبوع، برای تخمین بار حداکثر، با محاسبات دستی یا روش های ساده محاسباتی انجام می گرفت. ولی با پیشرفت روزافزون کامپیوترها و استفاده آن ها در بخش طراحی ساختمان، این معادلات را می توان به طور دقیق حل کرده و نتایج نزدیک به واقعیت را دریافت کرد [۳].

امروزه بسته های نرم افزاری زیادی در این زمینه به بازار آمده است ولی هر یک از این برنامه های نوشته شده با توجه به معیارهای خاص مربوط به مکانی است که این برنامه در آنجا نوشته شده است و به دلیل حساسیت بالایی که این محاسبات به داده های ورودی مانند آب و هوای ناحیه مورد نظر، مصالح به کار رفته در ساختمان، ابعاد ساختمان و نوع سیستم مورد استفاده در ساختمان دارد، هر ناحیه ای نیاز به کد مخصوص به خود دارد. مدل های حرارتی ساختمان که امروزه استفاده می شود تنوع بسیاری دارند، این گستره از مدل های ساده مانند محاسبات دستی تهویه مطبوع تا مدل های حل کامل و فیزیکی دینامیک سیالات محاسباتی^۱ را شامل می شود. مدل های دقیق فیزیکی برای تحلیل، بسیار زمان بر و پرهزینه هستند و برای تحلیل های طولانی و چندروزه مناسب نیستند، به طور مثال در سیستم هایی که دارای قابلیت ذخیره حرارت هستند، پیش بینی رفتار حرارتی ساختمان در طول یک بازه ی زمانی ۲۴ ساعته ی پیش رو، برای کنترل بهینه سیستم تهویه مطبوع، مفید و یا حتی ضروری

¹ Computational Fluid Dynamics (CFD)

است [۳].

از روش‌های مدل‌سازی بار حرارتی و برودتی ساختمان می‌توان به روش توابع انتقالی^۱ و روش موازنه حرارتی^۲ اشاره کرد. روش توابع انتقالی در سال ۱۹۶۷ توسط میتالاس^۳ و استفنسون^۴ ارائه شد، در مفهوم تابع انتقال، میتالاس و استفنسون از فاکتورهای پاسخ حرارتی اتاق استفاده کردند [۹].

روش دوم، روش موازنه حرارتی^۵ است که یک روش دینامیکی محاسبه‌ی بار بوده و در دهه‌ی ۱۹۹۰ توسط پدرسون^۶ و همکاران ابداع شد [۱۰، ۱۱]. روش موازنه حرارتی برای محاسبه بارهای محسوس فضا بر پایه قانون اول ترمودینامیک (بقای انرژی) است. این روش نسبت به روش تابع انتقالی بسیار بنیادی‌تر است و نیاز به فرضیات کمتری دارد، اگرچه روش موازنه حرارتی نیاز به محاسبات بیشتری در هر گام شبیه‌سازی دارد که زمان محاسباتی بیشتری را می‌طلبد [۱۰].

فاکتورهای وزنی که در روش تابع انتقالی استفاده می‌شوند از روی معادلات موازنه حرارتی به دست می‌آیند. روش موازنه حرارتی گرمایش مخصوص خالص لحظه‌ای و یا بار سرمایشی را برای فضای موردنظر محاسبه می‌نماید. معمولاً یک معادله موازنه حرارتی برای هر یک از سطوح احاطه‌کننده فضا و یکی برای دمای هوای اتاق نوشته می‌شود [۳].

مدل توابع انتقالی در حقیقت حد واسطی میان روش‌های ساده که اثرات جرم را نادیده می‌گیرند و روش‌های پیچیده مانند محاسبات کامل موازنه‌ی حرارتی بوده و در بعضی از نرم‌افزارهای تجاری مانند کریر^۷ به کار گرفته شده است [۹، ۱۲]. البته روش موازنه‌ی حرارتی خود انواع مختلف دارد، در بعضی از این روش‌ها کل اتاق را هم‌دمای فرض می‌کنند و در بعضی دیگر، گرادیان دمایی و در نتیجه گردش هوا نیز در نظر گرفته می‌شود [۱۳].

¹ Transfer Function Method

² Heat Balance Method

³ Mitalas

⁴ Stephenson

⁵ Heat Balance Method

⁶ Pedersen

⁷ Carrier HAP

در مطالعه حاضر، مدل سازی به صورت موازنه‌ی حرارتی و در نتیجه کاملاً دینامیکی و گذرا بوده و کلیه ی معادلات بقای انرژی برای دیوارها و اتاق حل می شود. مدل فوق در فصل سوم، به طور کامل تشریح شده است.

۱-۳- سیستم های سرمایشی مورد استفاده در ایران

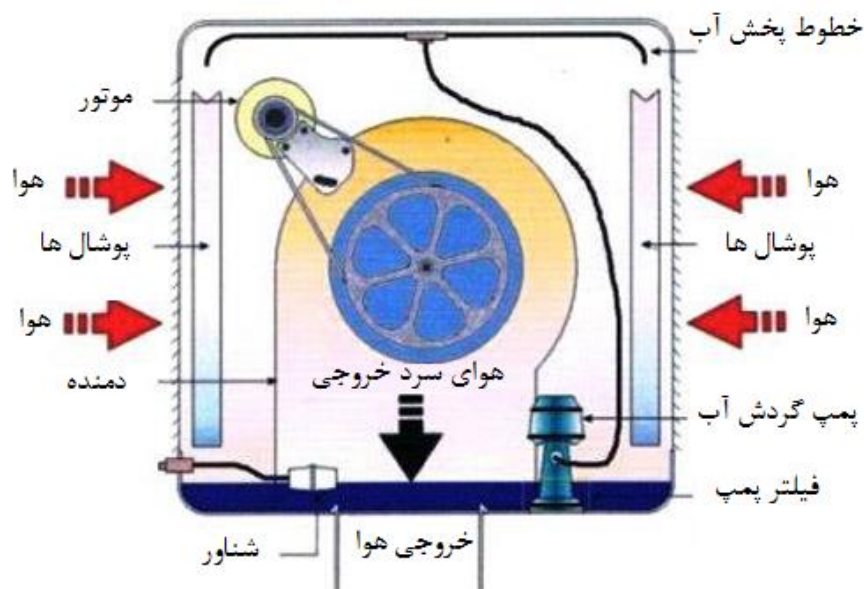
به منظور تأمین سرمایش، گرمایش و تهویه مطبوع مجتمع های مسکونی و تجاری روش های مختلفی به کار گرفته می شود که هر کدام از آنها جهت تأمین آسایش حرارتی نیاز به سازگاری با شرایط خاص آب و هوایی آن منطقه دارند که در ادامه به معرفی برخی از متداول ترین آنها پرداخته شده است:

- سیستم تبرید تبخیری
- سیستم تبرید جذبی
- سیستم تبرید تراکمی با موتور الکتریکی یا موتور گازسوز

۱-۳-۱ سیستم تبرید تبخیری

آب برای تبخیر شدن نیازمند حرارت است و این حرارت را از محیط اطراف خود می گیرد، سیستم های سرمایشی تبخیری بر اساس همین اصل طراحی شده اند. مایع برای تبخیر شدن نیازمند جذب حرارت است مقدار حرارت لازم برای تبخیر مایع، گرمای نهان تبخیر آن مایع نام دارد. بهترین مایع برای استفاده به عنوان مایع تبخیر شونده آب است. دلایل این برتری، غیر سمی بودن، فراوانی در طبیعت و قابلیت تبخیر در شرایط معمولی است. در سرمایش تبخیری میزان ایجاد سرمایش به نرخ تبخیر آب در هوا بستگی دارد. میزان تبخیر آب در هوا نیز به میزان رطوبت نسبی هوا بستگی دارد. بدین صورت که هرچه رطوبت نسبی کمتر باشد میزان تبخیر بیشتر شده و به دنبال آن سرمایش بیشتری ایجاد می شود. به همین دلیل در دمای یکسان، هوای با رطوبت نسبی کم تر، خنک تر از هوای مرطوب است. سیستم سرمایش تبخیری در صنعت تأسیسات و سرمایش ساختمان کاربرد گسترده ای دارد. در

ساختمان‌های مسکونی کولر آبی به عنوان یک دستگاه سرمایش تبخیری و در کارخانجات از ایرواشر^۱ به عنوان یک دستگاه سرمایش تبخیری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۱-۳ طرز کار یک کولر آبی نشان داده شده‌است. دلیل استقبال از سیستم‌های سرمایش تبخیری هزینه اولیه پایین و هزینه مصرف انرژی پایین‌تر نسبت به سایر دستگاه‌های سرمایش می‌باشد. یکی از محدودیت‌های کولر آبی ناکارآمدی این دستگاه در آب و هوای مرطوب است [۱۴].



شکل ۱-۳: طرز کار کولر آبی

۱-۳-۲ سیستم تبرید جذبی

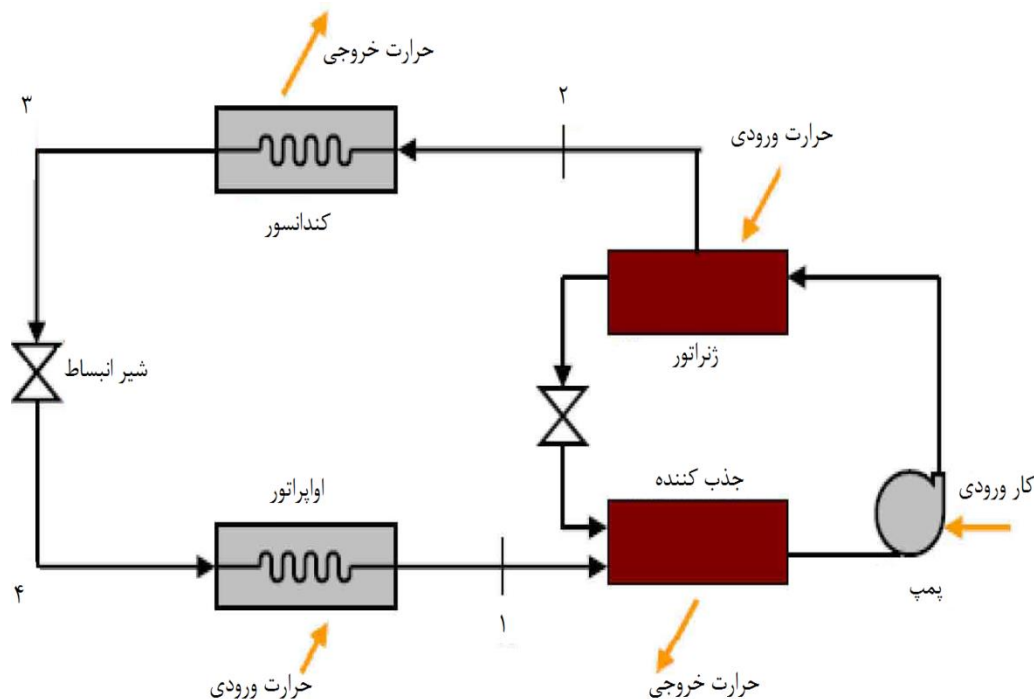
چیلرهای جذبی از انرژی حرارتی به عنوان منبع اصلی برای ایجاد سرمایش استفاده می‌کنند. ویژگی برجسته سیستم چیلر جذبی این است که این سیستم تبرید، فقط به مقدار اندکی کار نیازمند است، زیرا فرآیند پمپ کردن فقط برای مایعات صورت می‌گیرد. به دلیل وجود قطعات متحرک کم‌تر در چیلرهای جذبی نسبت به چیلرهای تراکمی و با توجه به ماهیت چرخشی کار پمپ‌های مورد استفاده

¹ Airwasher

در آن‌ها، میزان خرابی و هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری آنها کم‌تر و همچنین ارتعاش آنها بسیار کم‌تر از چیلرهای تراکمی است و تقریباً بدون لرزش هستند. علاوه بر موارد ذکر شده، با توجه به هزینه‌های جانبی از جمله هزینه مربوط به خرید امتیاز برق و همچنین هزینه‌های جاری چیلر تراکمی، چیلرهای جذبی از نظر اقتصادی نیز دارای مزیت قابل توجهی هستند. چیلرهای جذبی از چهار قسمت اصلی اواپراتور، جذب کننده^۱، ژنراتور و کندانسور تشکیل گردیده است. در شکل ۱-۴ سیکل مربوط به چیلرهای جذبی نشان داده شده است. مایع مبرد (آب) در قسمت اواپراتور تبخیر شده و باعث سرد شدن محیط اطراف می‌گردد، بخار خارج شده از اواپراتور در جذب کننده توسط محلول غلیظ لیتیوم بروماید^۲ جذب می‌گردد و محلول با جذب آب رقیق گشته و توسط پمپ کوچکی به قسمت فوقانی چیلر یعنی ژنراتور منتقل می‌گردد. در ژنراتور تغلیظ محلول لیتیوم بروماید رقیق صورت می‌گیرد. محلول لیتیوم بروماید رقیق، داغ شده و آب آن تبخیر می‌گردد و به این ترتیب تغلیظ محلول لیتیوم بروماید انجام می‌شود، سپس لیتیوم بروماید غلیظ شده به قسمت جذب کننده بازگشت داده می‌شود. همچنان که غلظت تغییر می‌کند، فشار نیز در اجزای مختلف چیلر تغییر می‌کند. این اختلاف فشار باعث گردش مبرد در سیستم می‌گردد. بخارات آب تبخیر شده در ژنراتور توسط لوله‌های کندانسور تقطیر گشته و پس از عبور از شیر انبساط مجدداً وارد اواپراتور شده و سیکل تکرار می‌شود [۱۵].

¹ Absorber

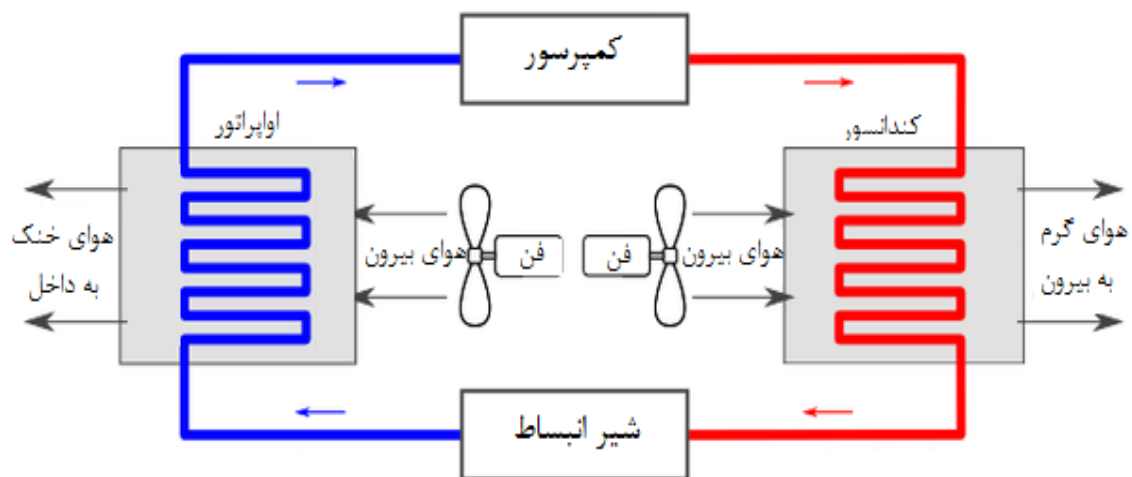
² Lithium Bromide



شکل ۱-۴: سیکل تبرید جذبی

۳-۳-۱ سیستم تبرید تراکمی

سیستم‌های سرمایش تراکمی یک سیکل ساده تبرید با چهار بخش اصلی کمپرسور، کندانسور، واپراتور و شیر انبساط می‌باشد. در این نوع خنک کننده، کمپرسور، گاز را از واپراتور مکیده و دما و فشار آن را به حدی افزایش می‌دهد که بتواند با عامل تقطیر معمولی تقطیر شود سپس این گاز توسط لوله تخلیه از خروجی کمپرسور به کندانسور هدایت می‌شود. گاز فشرده شده در کندانسور به کمک آب یا هوای محیط خنک شده و به مایع تبدیل می‌شود. این مایع فشار بالا پس از گذشتن از شیر انبساط، فشار آن طوری کاهش یافته که مایع بتواند در دمای پایین مورد نظر با گرفتن گرما از محیط اطراف در واپراتور تبخیر شده و به گاز فشار پایین تبدیل شود. سپس گاز فشار پایین توسط لوله مکش مجدداً وارد کمپرسور شده و سیکل تکرار می‌گردد. در شکل ۱-۵ سیکل مربوط به سیستم‌های تبرید تراکمی نشان داده شده است [۱۶].



شکل ۱-۵: سیکل تبرید تراکمی

این سیستم‌های تبریدی بر اساس نوع محرک کمپرسور آن‌ها به دو دسته پمپ‌های حرارتی الکتریکی^۱ (EHP) و پمپ‌های حرارتی با موتور گازسوز^۲ (GEHP) تقسیم‌بندی می‌شوند.

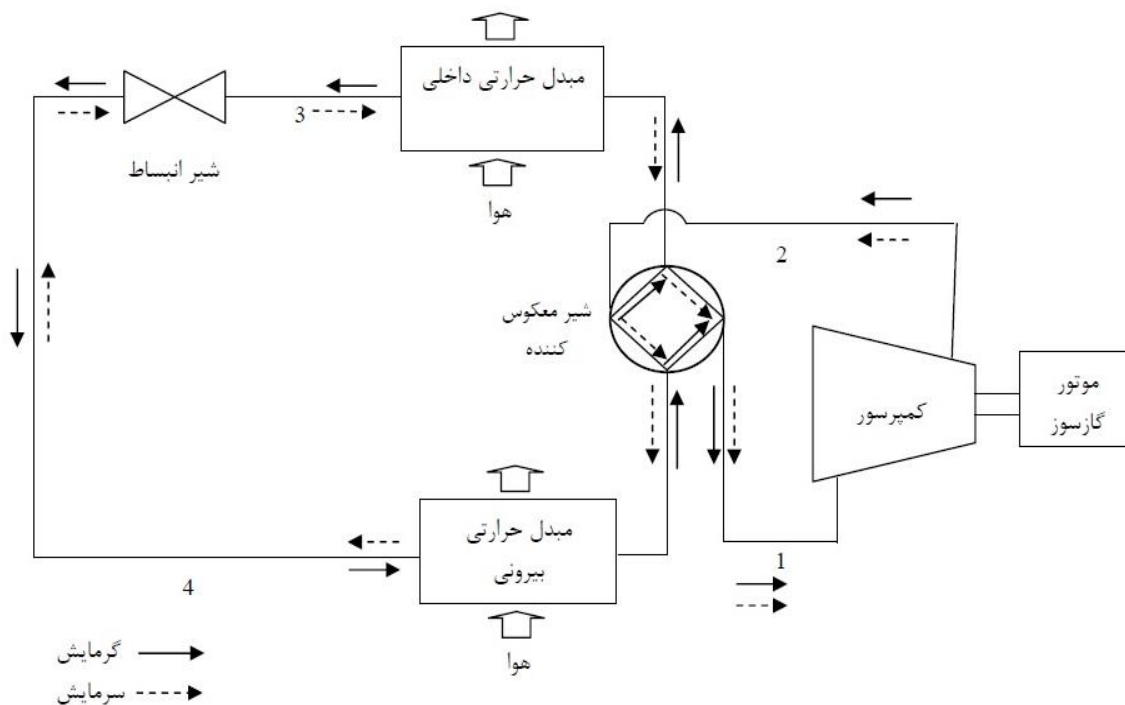
۱-۳-۴ پمپ حرارتی با موتور گازسوز

در این نوع از پمپ‌های حرارتی انرژی لازم جهت حرکت کمپرسور، توسط یک موتور احتراق داخلی گازسوز تأمین شده و در نتیجه برخلاف کمپرسورهای الکتریکی نیازی به مصرف برق برای تراکم ندارد. پمپ‌های حرارتی با موتور گازسوز دارای دو مبدل حرارتی در داخل و خارج فضای مسکونی بوده که می‌تواند نیازهای مختلف گرمایش و سرمایش را از طریق تغییر در شرایط عملیاتی موتور تحقق بخشد. در وضعیت سرمایشی، مبدل داخلی اوپراتور و مبدل بیرونی کندانسور است و در حالت گرمایشی، مبدل داخلی کندانسور و مبدل بیرونی اوپراتور می‌باشد. تغییر کارکردی وضعیت از حالت سرمایش به گرمایش و یا بالعکس توسط یک شیر معکوس شونده صورت می‌گیرد. شکل ۱-۶ عملکرد یک پمپ حرارتی گازسوز را در دو حالت سرمایشی و گرمایشی نشان می‌دهد. این سیستم شامل

¹ Electrical Heat Pump

² Gas Engine Heat Pump

کمپرسور، کندانسور، اواپراتور، شیر انبساط، شیر معکوس‌کننده (چهارراهه) و موتور احتراق داخلی می‌باشد که فلش‌های خط‌چین نشان‌دهنده حالت کارکردی سرمایشی و فلش‌های خط‌صاف وضعیت گرمایشی را نشان می‌دهد که این تغییر وضعیت از سرمایشی به گرمایشی و یا بالعکس توسط شیر معکوس‌کننده انجام می‌شود [۱۷].



شکل ۱-۶: طرح ترسیمی عملکرد پمپ حرارتی گازسوز

گاز طبیعی که به عنوان سوخت در موتور احتراق داخلی پمپ‌های حرارتی گازسوز استفاده می‌شود، در میان سوخت‌های فسیلی کمترین میزان تولید آلاینده‌ها را دارا است. افزایش استفاده از سیستم‌های گرمایش و سرمایش با سوخت گاز طبیعی می‌تواند جایگزین خوبی برای تولید و مصرف انرژی‌هایی مانند الکتریسیته که نیازمند سوزاندن سوخت‌هایی مانند گازوئیل، نفت یا ذغال‌سنگ است، باشد. همچنین به دلیل اینکه احتراق در خارج از محیط خانه و ساختمان صورت می‌گیرد محصولات حاصل از احتراق در فضای خارج از محیط داخلی آزاد می‌شود بنابراین در فضای داخلی ساختمان، آلودگی ناشی از گازهای تولید شده بر اثر احتراق به وجود نمی‌آید [۱۷].

از مزایای پمپ حرارتی با موتور گازسوز نسبت به پمپ‌های حرارتی الکتریکی، به موارد زیر اشاره شده-

است:

- ایجاد آسایش و کارکرد یکنواخت: به دلیل کارکرد موتور با سرعت‌های متغیر، برخلاف یک پمپ حرارتی الکتریکی که هنگام رسیدن به دمای تنظیمی کاربر، به کمک ترموستات خاموش می‌شود، پمپ حرارتی با موتور گازسوز در سرعت کم‌تری کار می‌کند و این باعث می‌شود دمای محیط داخل یکنواخت‌تر گردد [۱۸].

- آلودگی کم‌تر: سوخت مصرفی در موتور احتراق داخلی پمپ حرارتی با موتور گازسوز، گاز طبیعی است. گاز طبیعی در میان سوخت‌های فسیلی کم‌ترین میزان تولید آلاینده را دارد، با توجه به اینکه پمپ‌های حرارتی الکتریکی، از برق به عنوان محرک کمپرسور استفاده می‌کنند، استفاده از پمپ حرارتی با موتور گازسوز می‌تواند جایگزین مناسبی برای پمپ‌های حرارتی الکتریکی باشند زیرا که مصرف برق در آن‌ها نیازمند سوزاندن سوخت‌هایی مانند گازوئیل، نفت یا زغال‌سنگ است که آلودگی آن‌ها بیشتر از گاز طبیعی است [۱۹].

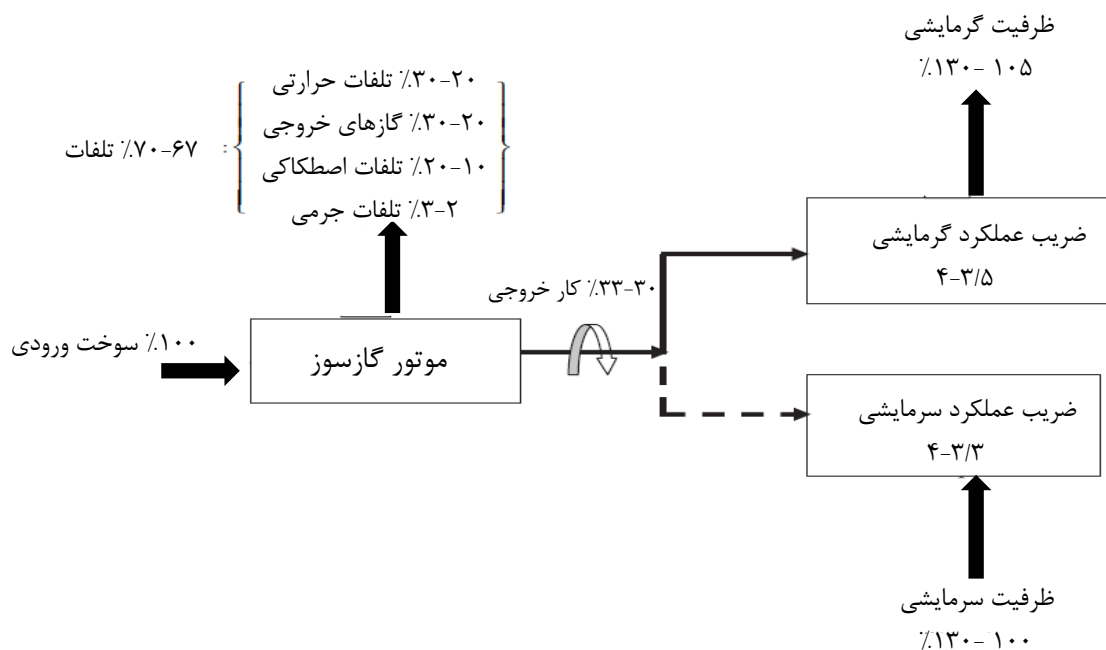
- امکان تهویه چندین فضا با یک واحد خارجی^۱ در حالی که تهویه هر واحد داخلی^۲ به طور مستقل انجام می‌شود.

بدین ترتیب پمپ حرارتی با موتور گازسوز به دلیل کارکرد موتور در سرعت‌های متغیر بر خلاف سایر سیستم‌های حرارتی، این قابلیت را دارد تا الگوریتم‌های کنترلی متنوعی بر روی آن پیاده‌سازی شود که هر یک اهداف خاصی مانند سرمایش و گرمایش اقتصادی و رسیدن به دمای مطلوب در کمترین زمان را بسته به نوع نیاز کاربر تأمین می‌نماید و همچنین قابلیت ایجاد سرمایش و گرمایش هم‌زمان را دارد که سایر سیستم‌های تهویه مطبوع چنین امکانی را ندارند، به همین دلیل در این مطالعه بر روی این سیستم حرارتی تأکید شده است و به بررسی الگوریتم کنترلی بر روی این سیستم‌ها پرداخته شده است.

^۱ Outdoor Unit

^۲ Indoor Unit

شکل ۷-۱ فرآیند تبدیل انرژی سوخت مصرفی به کار مفید و همچنین درصد تلفات انرژی را به منظور تولید بار حرارتی در یک پمپ حرارتی با موتور گازسوز در دو وضعیت سرمایشی و گرمایشی نشان می‌دهد. در این نمودار، ضریب عملکرد چرخه پمپ حرارتی به صورت نسبت بار سرمایشی و یا گرمایشی (بسته به وضعیت عملکرد پمپ) به توان مصرفی کمپرسور تعریف می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، بخشی از انرژی سوخت مصرفی به صورت تلفات حرارتی و اصطکاک در موتور هدر می‌رود. کار مفید خروجی موتور باعث به حرکت درآمدن کمپرسور و ایجاد سرمایش یا گرمایش در پمپ حرارتی می‌گردد. تقریباً از هر ۱۰۰ واحد انرژی ورودی (سوخت) حدود ۱۳۰ واحد بار سرمایشی یا گرمایشی به دست می‌آید [۱۷].



شکل ۷-۱: فرآیند تبدیل انرژی در پمپ حرارتی گازسوز

یک روش کارآمد برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها طراحی سیستم‌های کنترلی^۱ و پیاده‌سازی آن بر روی یک مدل ساختمان است. هدف در این مطالعه، تضمین حفظ بهترین نقطه اقتصادی است که از طریق طراحی الگوریتم کنترلی حاکم بر یک ساختمان صورت می‌گیرد. بدین منظور از یک منطق کنترلی به نام زمان-واقعی^۲ استفاده می‌شود. این منطق سازگاری سیستم با محیط را بیان می‌کند و کوچکترین تغییراتی در محیط، توسط سنسورهای سنجش اندازه‌گیری و برای صدور فرامین مناسب به مرکز کنترل ارسال می‌شود. در نتیجه چون منطق کنترلی اندازه‌گیری پارامترها براساس منطق زمان-واقعی و استفاده از سنسورهای سنجش بنا نهاده شده‌است، لذا نیازی به ارائه مدل پیچیده‌ای از ساختمان نیست. چرا که مدل‌سازی پیچیده، پیچیدگی‌ها و دشواری‌های پیاده‌سازی الگوریتم کنترلی را چند برابر می‌کند.

۱-۴- سیستم‌های کنترلی

در جامعه صنعتی و پیشرفته امروز، سیستم‌های کنترلی جزء جدایی‌ناپذیری از زندگی روزمره به شمار می‌آیند. اگرچه سابقه اولین سیستم کنترلی ساخت بشر را به چند صدسال قبل از میلاد نسبت می‌دهند، اما تحول اساسی درزمینه‌ی طراحی و ساخت سیستم‌های کنترل اتوماتیک، در دوران انقلاب صنعتی رخ داده است. امروزه اکثر وسایل خانگی مانند لباس‌شویی، آبگرمکن، خشک‌کن، سیستم‌های تهویه مطبوع و یا در اتومبیل‌ها، هواپیماهای مسافربری و جنگنده، کشتی‌های بزرگ و کوچک، ربات‌ها وسایل پیشرفته مهندسی و پزشکی و غیره همگی از نوعی سیستم کنترلی بهره‌مند هستند و عملکرد آن‌ها بدون سیستم کنترل، به کلی مختل و یا بسیار ضعیف می‌شود. مهندسين کنترل به اعمال کنترل در سیستم‌های مهندسی می‌پردازند. این سیستم‌ها و یا فرآیندهای صنعتی می‌توانند موشک‌های پیشرفته‌ی هدایت‌شونده، سفینه‌های فضایی، نیروگاه‌های قدرت، پالایشگاه‌های نفت، موتورهای الکتریکی و یا دیزلی، ربات‌ها، آنتن‌های ردیاب و یا بسیاری از ماشین‌ها و فرآیندهای دیگر باشند

¹ Control Systems

² Real-Time

[۲۰].

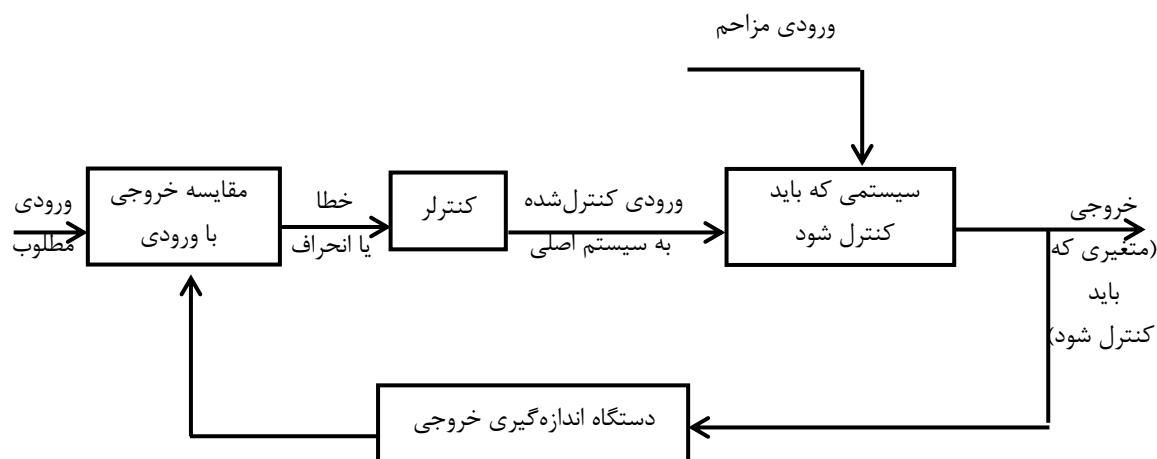
ساختمان‌ها سیستم‌های دینامیکی با مشخصه‌های غیرقطعی و متغیر بازمان هستند. پارامترهای مربوط به انتقال حرارت در ساختمان وابستگی زیادی به شرایط محیط خارج از آن دارند. برای مثال پارامترهای مربوط به انتقال حرارت مانند ضریب انتقال حرارت جابجایی دیوارهای پیرامونی به دمای هوای بیرون و سرعت و جهت وزش باد بستگی دارد [۲۱]. مشخصات دینامیکی از ساختمان که مدل-سازی نمی‌شوند، تابعی از عوامل خارجی و داخلی متعددی می‌باشند. عوامل خارجی مانند، وضعیت‌های آب و هوایی خارجی، شار حرارتی تشعشعی وارد بر دیوارها و شیشه‌ها و همچنین ابری شدن آسمان و عوامل داخلی همچون، تجمع انسانی در ساختمان، تولید حرارت داخلی ناشی از روشنایی‌ها و کامپیوترها است [۲۲].

۱-۴-۱ کنترل حلقه - بسته

کنترل پیش‌خور تنها در صورتی یک استراتژی کنترل کننده‌ی عملی است که اغتشاشات کم و یا معینی وجود داشته باشد و بتوان آن‌ها را به راحتی اندازه گرفت. اما اگر تعداد اغتشاشات بسیار زیاد باشد و یا اینکه زمان وقوع و ماهیت آن‌ها نا معلوم باشد، آن‌گاه از استراتژی کنترلی پیش‌خور نمی‌توان استفاده کرد. در این حالت از استراتژی سوم کنترل استفاده می‌شود. در این استراتژی کنترل کننده با مشاهده خروجی، انحراف رفتار کلی سیستم از رفتار مطلوب را در نظر گرفته و برای اصلاح این انحراف عمل می‌کند [۲۰].

اساس این استراتژی در شکل ۸-۱ نشان داده شده است. باید دقت شود در این‌جا نیز اغتشاشات خارجی وجود دارند و بر رفتار سیستم اثر می‌گذارند. اگر خروجی سیستم با مشخصه‌ها و اهداف تعیین شده، مطابقت نداشته باشد، خطایی به وجود می‌آید و این خطا یا انحراف، به سیستم کنترل اعمال می‌گردد و سیستم کنترل با توجه به خطا، فرمان کنترلی مناسبی را صادر می‌کند. همانطور که در شکل ۸-۱ مشاهده می‌شود در این سیستم کنترلی، خروجی سیستم اندازه‌گیری شده و توسط یک

مقایسه کننده با اهداف سیستم یا مشخصه‌های عملکرد تعیین شده مقایسه می‌شود. خطای ایجاد شده از این مقایسه به سیستم کنترل برای صدور فرامین کنترلی مناسب، اعمال می‌گردد. عبارت کنترل فیدبک^۱ برای توصیف این استراتژی به کار گرفته می‌شود. کنترل فیدبک انواع مختلفی دارد از جمله کنترل فیدبک خروجی و کنترل فیدبک حالت که نمای شماتیک کنترل فیدبک خروجی در شکل ۸-۱ نمایش داده شده است [۲۰].



شکل ۸-۱: کنترل فیدبک

در کنترل فیدبک، فرمان‌های کنترلی اعمال شده به سیستم براساس مقدار و میزان خطای موجود در پاسخ سیستم محاسبه می‌شوند. بدین معنی که پس از مشاهده و اندازه‌گیری خروجی سیستم، این خروجی با مقدار مطلوب آن مقایسه می‌گردد و اختلاف آن به سیستم کنترل ارائه می‌شود. به‌جای عبارت کنترل فیدبک از عبارت کنترل حلقه - بسته نیز استفاده می‌شود، در واقع عبارت حلقه - بسته در مقابل عبارت حلقه - باز به کار گرفته می‌شود. در استراتژی کنترل حلقه - بسته برخلاف کنترل حلقه - باز و پیش‌خور، اطلاع از یک مدل کاملاً دقیق از سیستم الزامی نیست. زیرا خطاهای ایجاد شده در خروجی سیستم، به دلیل اطلاعات ناکافی از مدل سیستم، با تصحیح کنترل کننده کاهش پیدا می‌کند، مانند مواقعی که سیستم تحت اغتشاش قرار می‌گیرد [۲۰].

¹ Feedback Control

طرح شماتیک شکل ۸-۱ در تحلیل سیستم‌ها و فرآیندهای مهندسی دارای کاربرد گسترده‌ای است. در این سیستم‌ها هدف آن است که خروجی سیستم، یعنی متغیری که باید کنترل شود، حتی‌المقدور به ورودی مبنا که مقدار مطلوب و مورد نظری است، نزدیک باشد. چنین سیستم مدار بسته‌ای تا حد زیادی به این هدف نزدیک خواهد بود. باید در نظر داشت که سیستم کنترل فیدبک شکل ۸-۱ وقتی فعال می‌شود که خروجی یا عکس‌العمل سیستم به عللی از مقدار مطلوب و مورد نظر خود دور شود. در این صورت سیستم کنترل فیدبک خود به خود آن را به حالت مطلوب برمی‌گرداند، از این‌رو به آن سیستم کنترل خودکار یا اتوماتیک هم گفته می‌شود. به طور کلی دو عامل می‌تواند باعث تغییرات نامطلوب در خروجی سیستم شود، که این عوامل عبارتند از [۲۰]:

- تغییر پارامترهای اصلی سیستم

- تاثیر ورودی مزاحم

ویژگی مهم کنترل فیدبک آن است که با وجود چنین تغییراتی، این سیستم کنترلی با استفاده از مدار فیدبک با کم و زیاد کردن ورودی کنترل‌شده به سیستم اصلی، خروجی سیستم را به مقدار مطلوب آن بازمی‌گرداند. در سیستم کنترلی مدار بسته علاوه بر خودکار بودن کنترل خروجی، دو مزیت عمده دیگر نسبت به سیستم کنترلی مدار باز وجود دارد که عبارتند از [۲۰]:

- اثر ورودی‌های مزاحم در سیستم کنترلی مدار بسته بسیار کمتر از اثر آن‌ها در سیستم

کنترلی مدار باز است.

- حساسیت سیستم کنترلی مدار بسته نسبت به تغییرات پارامترهای اصلی سیستم خیلی کمتر

از سیستم کنترلی مدار باز است.

تکنیک‌های کنترلی فیدبک با توجه به مکانیزم عمل آن‌ها به روش‌هایی شناخته می‌شوند که کمترین حساسیت را به تغییرات در پارامترهای سیستم دارند. رویکردهای مختلفی در زمینه استراتژی کنترل

فیدبک وجود دارد. این رویکردها شامل، کنترل خطی فیدبک حالت^۱، کنترل تطبیقی^۲، کنترل مقاوم^۳، کنترل پیش‌بین^۴ و کنترل منطق فازی^۵ می‌باشد. کنترل خطی فیدبک حالت، یک روش ساده برای کنترل فیدبک سیستم‌ها به‌خصوص سیستم‌هایی با چند ورودی است. معمولاً ضرایب بهره^۶ در موضوع کنترل فیدبک حالت، با استفاده از حل معادله ریکاتی^۷ یا روش استقرار قطب‌ها^۸ بدست می‌آید. به هر حال این رویکردها همچنان براساس روش‌های سعی و خطا^۹ استوار هستند. یکی از روش‌هایی که می‌توان از آن برای به حداقل رساندن تلاش‌ها در روش سعی و خطا برای بدست آوردن ضرایب بهره استفاده نمود، به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی هوشمند مانند الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۱۰} است، که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌است [۲۳].

پمپ حرارتی با موتور گازسوز به دلیل کارکرد موتور در سرعت‌های متغیر بر خلاف سایر سیستم‌های سرمایشی، این قابلیت را دارد تا الگوریتم‌های کنترلی متنوعی بر روی آن پیاده‌سازی شود که هر یک اهداف خاصی مانند سرمایش و گرمایش اقتصادی و رسیدن به دمای مطلوب در کمترین زمان را بسته به نوع نیاز کاربر تأمین می‌نماید. همچنین از مزایای دیگر این سیستم‌ها می‌توان به قابلیت ایجاد سرمایش و گرمایش هم‌زمان اشاره کرد که سایر سیستم‌های تهویه مطبوع چنین امکانی را ندارند.

بدین ترتیب پمپ‌های حرارتی گازسوز به دلیل پتانسیل بالا در صرفه‌جویی انرژی و همچنین حفظ محیط‌زیست، انتخابی مناسب جهت تأمین سرمایش و گرمایش محیط و همچنین تأمین آب‌گرم مصرفی در ساختمان‌های مسکونی و تجاری می‌باشند.

¹ linear state feedback control

² adaptive control

³ robust control

⁴ predictive control

⁵ Fuzzy logic control

⁶ Gain

⁷ Riccati equation

⁸ pole placement method

⁹ Trial and Error

¹⁰ Particle swarm optimization (PSO)

۱-۵- مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

این پایان‌نامه از یک فصل به عنوان مقدمه (فصل حاضر)، ۴ فصل اصلی، یک بخش به عنوان پیوست و همچنین یک بخش جهت معرفی مراجع مورد استفاده، تشکیل شده است. در فصل دوم به مروری بر مطالعات و تحقیقات پیشین پرداخته شده است. در فصل سوم با استفاده از روش ظرفیت لامپ^۱ (فشرده)، معادلات دیفرانسیلی حاکم بر توزیع دما بر دیوارها و اتاق‌های ساختمان استخراج شده است. سپس معادلات دیفرانسیلی حاکم، به فضای حالت منتقل شده و حالت‌ها و ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم تعریف شده و به منظور استفاده از الگوریتم‌های کنترلی خطی، سیستم فضای حالت که یک سیستم غیرخطی است با روش خطی‌سازی ژاکوبین به یک سیستم خطی تبدیل شد. در ادامه این فصل، به طراحی کنترل‌کننده فیدبک حالت پرداخته شده است و برای محاسبه ضرایب بهره کنترل فیدبک حالت از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. در فصل چهارم ابتدا اعتبارسنجی مدل با نتایج حاصل از نرم‌افزار کریر ارائه شده و سپس نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی مختلف بر روی مدل، ارائه می‌گردد و در نهایت فصل پنجم به معرفی نتایج این

¹ lumped capacitance method

فصل ۲ مطالعات پیشین

۲-۱- مقدمه

امروزه در تمام نقاط جهان بحث انرژی و مصرف منطقی انرژی از اهمیت بالایی برخوردار است و همه کشورها در تلاش هستند تا با ارائه راهکاری مناسب، مصرف انرژی را در بخش‌های مختلف بهینه سازند. از زمان اجرای دستورالعمل عملکرد انرژی ساختمان‌ها^۱ برای اولین بار در تاریخ، کشورهای عضو اتحادیه اروپا تصمیم گرفتند تا با کاهش تقاضای انرژی به سمت آینده‌ای با کربن کمتر و به تبع آن به سمت ساختمان‌هایی با انتشار آلاینده‌گی کمتر گام بردارند [۷]. برای اینکه سیاست کاهش مصرف انرژی مؤثر واقع شود، توجه ویژه به ساختمان‌های جدید و ساختمان‌های موجود به‌عنوان نسخه تجدیدنظر به دستورالعمل عملکرد انرژی ساختمان‌ها اضافه شد [۸].

طبق مطالعات و پیش‌بینی‌های صورت گرفته، روند رو به رشدی برای بارهای سرمایشی مورد نیاز ساختمان‌ها با توجه به تغییرات آب‌وهوایی آینده ترسیم شده است. لذا کارآمدتر شدن تجهیزات حرارتی و یروودی، استفاده از سوخت‌های پاک یا کم‌ضرتر، به کارگیری سیستم‌هایی با تکنولوژی پیشرفته و جدید مانند پمپ حرارتی با موتور گازسوز از جمله موضوعاتی است که در حال حاضر توجه بیشتری به آن‌ها شده است.

۲-۲- مروری بر مطالعات پیشین

در سال ۱۹۸۳ جرو^۲ و همکاران [۲۴] جزء اولین کسانی بودند که مدل‌سازی چندهدفه^۳ را برای ایجاد تعادل، میان عملکرد حرارتی ساختمان و معیارهای دیگر مانند سطح آسایش و مصرف انرژی در فرایند طراحی ساختمان پیشنهاد کردند. در سال‌های اخیر، محققان دیگری نیز از روش‌های چند-معیاره برای مسائل مشابه استفاده کرده‌اند. در سال ۲۰۰۰ جگس^۴ و پالمر^۵ [۲۵] و در سال ۲۰۰۲

¹ Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)

² Gero

³ multi-criterion

⁴ Jaggs

⁵ Palmar

فلورتزو^۱ و رولت^۲ [۲۶] پیشنهاد روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی چند معیاری را برای ارزیابی سناریوهای بهینه‌سازی ساختمان‌ها ارائه دادند. در تحقیقی که در سال ۲۰۰۴ توسط ری^۳ [۲۷] انجام شد، امکان بررسی استراتژی‌های بهینه‌سازی یک ساختمان اداری به‌وسیله‌ی توسعه یک روش ارزیابی چندهدفه که به‌طور هم‌زمان به معیارهای زیست‌محیطی، فرهنگی، اجتماعی و اقتصادی می‌پردازد، مورد مطالعه قرار گرفت. در این بررسی مشخص شد، این روش امکان نشان دادن سودمندی طرح پیشنهادی را فراهم کرده است و انتخاب استراتژی بهینه‌سازی بر اساس اولویت‌بندی معیارها متفاوت است [۲۸].

در سال ۲۰۰۲ بلوندئو^۴ [۲۹] و همکاران از تجزیه و تحلیل چندمعیاره برای تعیین مناسب‌ترین رویکرد، برای سیستم تهویه مطبوع یک ساختمان دانشگاهی استفاده کردند. هدف از این روش، اطمینان پیدا کردن آن‌ها از بهترین کیفیت ممکن برای هوای داخل اتاق و آسایش حرارتی ساکنین و کاهش مصرف انرژی بود. در همین زمینه تلاش‌هایی توسط سایر محققین انجام گرفته است، از جمله رایت^۵ و همکاران [۳۰] در سال ۲۰۰۲ با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک چندمعیاره به طراحی حرارتی و کنترل یک ساختمان پرداختند [۲۸].

هو^۶ و همکاران [۳۱] عملکرد پمپ حرارتی با موتور گازسوز را در شرایط کاری مختلفی مورد بررسی قرار دادند و به نتایج زیر دست یافتند:

- با افزایش سرعت موتور ظرفیت گرمایش زیاد شده درحالی‌که نسبت انرژی اولیه کاهش یافته است.
- با کاهش دمای هوای محیط بیرون، هم ظرفیت گرمایشی و هم نسبت انرژی اولیه کاهش یافته است.

¹ Flourentzou

² Roulet

³ Rey

⁴ Blondeau

⁵ Wright

⁶ Hu

- دمای آب ورودی تأثیر کمی بر ظرفیت گرمایشی دارد در حالی که بر انرژی اولیه سیستم تأثیر زیادی داشته و با افزایش دمای آب ورودی، نسبت انرژی اولیه کاهش می‌یابد.

- برای کاهش مصرف انرژی پمپ حرارتی، موتور گازسوز باید با کمترین سرعت متناسب با بارهای گرمایشی مورد نیاز فعالیت کند.

صنایع و همکاران [۳۲] به مقایسه هزینه‌های مصرف انرژی پمپ حرارتی گازسوز با پمپ حرارتی الکتریکی و همچنین به مقایسه این دو سیستم در تأمین بارهای جزئی مورد نیاز پرداخته‌اند. با توجه به هزینه‌های متفاوت انرژی الکتریکی و سوخت گاز طبیعی، هزینه‌های جاری کارکرد هر یک از این سیستم‌ها تعیین شده و به نتایج زیر رسیده‌اند:

- با توجه به فراوانی گاز طبیعی در ایران و قیمت پایین این سوخت در ایران، استفاده از پمپ-های حرارتی گازسوز می‌تواند بسیار سودمند باشد. هزینه‌های جاری استفاده از پمپ حرارتی گازسوز در ایران در مقایسه با پمپ حرارتی الکتریکی مشابه، به مراتب حدود ۳۰ درصد پایین‌تر و کاربرد آن اقتصادی‌تر است، هرچند باید در نظر داشت که با توجه به هزینه‌های متفاوت گاز و برق در سایر نقاط دنیا، ارزیابی فنی و اقتصادی مربوط به هر منطقه باید صورت بگیرد.

- با توجه به سیستم بازبازی گرما در پمپ‌های حرارتی گازسوز، عملکرد آن‌ها نسبت به پمپ-های حرارتی الکتریکی بیشتر بوده و مانند پمپ‌های حرارتی الکتریکی تحت تأثیر شرایط طراحی و آب و هوایی نیستند.

صنایع و چهارطاقی [۳۳] به مدل‌سازی و بهینه‌سازی حرارتی و اقتصادی پمپ حرارتی با موتور گازسوز با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. پارامترهای تابع هدف در این بررسی، هزینه کل سالانه (مجموع هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری) بوده که از دیدگاه اقتصادی و فنی بهینه‌سازی صورت گرفته‌است. هشت پارامتر طراحی سیستم از قبیل: فشار کندانسور و اواپراتور در حالت سرمایش و

گرمایش، جریان جرمی هوای ورودی به مبدل‌های حرارتی داخلی و خارجی و سرعت چرخش موتور در حالت سرمایش و گرمایش انتخاب شده است. نتایج بدست آمده از این تحقیق به صورت زیر است:

- مقادیر پارامترهای طراحی شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی برای یک مطالعه موردی با هدف حداقل نمودن آن‌ها، هر کدام به ترتیب ۶۴/۲۳ درصد و ۳۵/۶۷ درصد از کل هزینه‌ها بدست آمد.

- ضرایب عملکرد موتور پمپ حرارتی گازسوز در حالت سرمایش ۱/۶۱ و در حالت گرمایش ۱/۶۴ بوده است.

- در تحلیل حساسیت پارامترها، با افزایش ۵۰ درصد قیمت سوخت و هزینه اولیه، هزینه کل به ترتیب ۱۱/۲۸ درصد و ۳۱/۹۶ افزایش یافته که این میزان بستگی به هزینه انرژی و سوخت در منطقه مورد مطالعه دارد.

با توجه به اینکه بخش ساختمان، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده انرژی در میان تمام بخش‌های اقتصادی است، مصرف انرژی آن باید کاهش یابد. یک‌راه برای انجام این کار و یک موضوع تحقیق محبوب، استفاده از استراتژی‌های کنترلی متداول است. مدل دینامیکی که برای پیاده‌سازی این استراتژی‌های کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد، اهمیت زیادی دارد. به‌طور کلی رویکردهایی که درزمینه‌ی مدل-سازی موردتوجه است شامل سه تکنیک زیر می‌شود [۳۴]:

- مدل‌های جعبه سفید که بر اساس داده‌های فیزیکی سیستم و روابط تعادل حرارتی هستند. این مدل‌ها اغلب از طریق نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی مانند انرژی پلاس^۱ (کراولی^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۱ [۳۵]) و ترنسیس^۳ (کلین^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۳۶]) به دست می‌آیند.

¹ EnergyPlus

² Crawley

³ TRNSYS

⁴ Klein

• مدل‌های جعبه سیاه که تنها از داده‌های ورودی یا خروجی اندازه‌گیری شده و روش‌های برآورد آماری استفاده می‌کنند، مانند سیگلر و پریوارا^۱ که در سال ۲۰۱۰ از این روش برای مدل‌سازی سیستم خود استفاده کردند [۳۷].

• مدل جعبه خاکستری که ترکیبی از دودسته اول است. بدین معنی که در مدل‌سازی جعبه خاکستری از داده‌های ورودی و خروجی و همچنین از برخی از اطلاعات و مشخصات فیزیکی سیستم استفاده می‌شود. یک مدل‌سازی جعبه خاکستری محبوب، استفاده از شبکه‌ی مدار معادل خازن – مقاومت است که در مقالات متعددی از جمله تحقیقات وانگ و ژو^۲ در سال ۲۰۰۶ [۳۸] و تحقیقات باچر و مادسن^۳ در سال ۲۰۱۱ [۳۹] استفاده شده است.

بنابراین یکی از روش‌های مفید و کاربردی برای مدل‌سازی حرارتی ساختمان، استفاده از مدار معادل حرارتی یا روش شبکه‌بندی مقاومت – خازن^۴ است که در آن شبکه به یک مدار الکتریکی شبیه می‌شود و از طریق آن رفتار دینامیکی سیستم توصیف می‌شود و اغلب به آن مدل‌سازی جعبه‌خاکستری گفته می‌شود. این تکنیک در مدل‌سازی ساختمان در مقالات بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۱ سایروکی^۵ و همکاران از این روش برای به دست آوردن مدل یک ساختمان از دانشکده فنی شهر پراگ در جمهوری چک استفاده کردند [۴۰].

علی^۶ و همکاران [۴۱] به تجزیه و تحلیل اگزرژی پمپ‌های حرارتی در یک مطالعه مقایسه‌ای جامع پرداختند. ایشان با در نظر گرفتن اثرات زیست‌محیطی و استفاده از برق در برابر گاز طبیعی و با تحلیل انرژی و اگزرژی کار خروجی از این دو موتور به نتایج زیر رسیدند:

• موتور حرارتی به طور پیوسته حرارت را به کار مکانیکی تبدیل می‌کند و در صورت افزایش بار عملیاتی، این موتور توانایی انتقال قدرت به پمپ حرارتی را دارد در حالی که موتور الکتریکی

¹ Cigler and Privara

² Wang and Xu

³ Bacher and Madsen

⁴ Resistance Capacitance (RC)

⁵ Siroky

⁶ Ally

در این زمینه عملکرد مطلوبی ندارد.

- در حالت کلی موتور الکتریکی قوی تر بوده اما موتور حرارتی در برابر نوسانات عملکرد بهتری دارد.

مجموع برگشت ناپذیری‌ها برای موتور الکتریکی و موتور حرارتی به ترتیب ۲۲/۷ کیلووات و ۶۷/۸۹ کیلووات در راندمان ۰/۷ بوده است.

زو و یانگ^۱ [۴۲] در پژوهش خود با بهره‌گیری از گرمای بازیافتی حاصل از موتور گازسوز و با بررسی دماهای مختلف محیط اطراف و میزان رطوبت در تابستان و زمستان به این نتیجه رسیدند که پمپ‌های حرارتی گازسوز نسبت به پمپ‌های حرارتی با موتور الکتریکی در فصل تابستان ۶۰/۵ درصد و در فصل زمستان ۷۰ درصد انرژی بیشتری را ذخیره کرده و به طور کلی عملکرد بهتری خواهند داشت.

در زمینه‌ی مطالعه ساختمان‌ها و بحث‌های مربوط به انرژی در آن‌ها هم یک روش کارآمد برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها، طراحی سیستم‌های کنترلی و پیاده‌سازی آن بر روی یک مدل ساختمان است. در سال‌های اخیر تحقیقات متنوعی در زمینه‌ی بهینه‌سازی انرژی و پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی در ساختمان‌ها انجام شده است که در ادامه بیان خواهد شد.

در سال ۲۰۱۰ مدل حرارتی از ساختمان توسط دنگ^۲ و همکاران فراهم آمده که بر اساس شبکه‌های مدار معادل مقاومت - خازن^۳، با تعداد زیادی معادلات دیفرانسیل کوپل شده استوار است. سپس محققان مرتبه مدل را با تجمیع متغیرهای حالت کاهش دادند [۴۳].

در سال ۲۰۰۱ مندس^۴ و همکاران یک مدل دینامیکی غیرخطی بر اساس روش لامپ برای توصیف یک ساختمان با در نظر گرفتن انتقال حرارت از نوع هدایت، ظرفیت حرارتی، بارهای مربوط به

¹ Xu, Yang

² Deng

³ Resistor-Capacitor (RC)

⁴ Mendes

روشنایی و حضور انسان در ساختمان با استفاده از محیط سیمولینک^۱ در نرم‌افزار متلب پیشنهاد کردند [۴۴]. در سال ۲۰۰۲ یک کنترل‌کننده فیدبک از متغیرهای حالت با عامل مزاحم غیرخطی برای یک سیستم تهویه مطبوع توسط آرگوئل سرانو^۲ پیشنهاد شد [۴۵].

ریان^۳ و همکاران [۴۶] مطالعاتی تحت عنوان دستاوردهای جدید در زمینه سرمایش با سوخت گاز طبیعی انجام داده و به این نتیجه رسیده‌اند که در آب و هوای گرم، پمپ حرارتی با موتور گازسوز، دما و همچنین رطوبت ساختمان را در تمام مدت سال توسط یک ترموستات قابل کنترل، به میزان مطلوبی رسانده و هزینه‌های تولید سرمایش در این سیستم نسبت به سیستم‌های الکتریکی تهویه مطبوع، تا بیش از ۷۰٪ کاهش یافته است. همچنین سرعت متغیر پمپ حرارتی گازسوز، سبب فراهم شدن جریان یکنواخت از هوا و حصول بازده بزرگتر شده‌است، که این ویژگی‌ها تنها در برخی پمپ‌های حرارتی با موتور الکتریکی با بازده بالا مشاهده می‌شود.

هپباسلی^۴ و همکاران [۴۷] در مطالعه خود، تاریخچه کاملی در مورد استفاده از سیستم پمپ‌های حرارتی با موتور گازسوز و در رابطه با عملکرد آن ارائه نمود. به منظور تحلیل عملکرد سیستم، پارامترهایی نظیر ظرفیت مبدل‌های حرارتی و ضریب عملکرد سیستم پمپ‌های حرارتی با موتور گازسوز، با استفاده از روابط بقای جرم و انرژی مدل‌سازی شد. نتایجی که به‌طور کلی از این پژوهش به دست آمده به شرح زیر است:

- بازیابی حرارت می‌تواند حدود ۳۰٪ از ظرفیت گرمایش کل برای سیستم پمپ‌های حرارتی با موتور گازسوز را تأمین نماید.
- بهره‌وری انرژی سیستم پمپ‌های حرارتی با موتور گازسوز را می‌توان با کم نمودن سرعت موتور احتراق داخلی متصل به کمپرسور به حداکثر رساند.

¹ simulink

² Arguello Serrano

³ Ryan

⁴ Hepbasli

- هنگامی که درجه حرارت محیط کم است، ذخیره انرژی توسط سیستم پمپ‌های حرارتی با موتور گازسوز افزایش می‌یابد.
 - سیستم پمپ‌های حرارتی با موتور گازسوز زمانی که برای هر دو کاربرد گرمایش آب مصرفی و گرمایش فضای داخل ساختمان استفاده می‌شود، کارآمدتر است.
- صنایع و چهارطاقی [۴۸] به بررسی تجربی اثر دمای محیط بر پمپ حرارتی گازسوز پرداختند. بدین منظور یک نمونه پمپ حرارتی گازسوز با دستگاه‌ها و سنسورهای اندازه‌گیری در یک آزمایشگاه تحقیقاتی نصب نموده و به بررسی مشخصه‌های عملکردی پمپ حرارتی گازسوز پرداختند. نتایج نشان داد:
- در حالت سرمایشی با افزایش دمای محیط از ۲۶ درجه سانتی‌گراد به ۳۸ درجه سانتی‌گراد، نسبت فشار کمپرسور و توان مصرفی آن افزایش می‌یابد و در نتیجه مصرف سوخت به اندازه ۲۳/۵۵٪ افزایش و ضریب عملکرد به اندازه ۲۰/۲٪ کاهش می‌یابد.
 - در حالت گرمایشی با افزایش دمای محیط از ۳ درجه سانتی‌گراد به ۱۸ درجه سانتی‌گراد، نسبت فشار کمپرسور و توان مصرفی آن کاهش می‌یابد و در نتیجه مصرف سوخت به اندازه ۲۵٪ کاهش و ضریب عملکرد به اندازه ۲۱/۱٪ افزایش می‌یابد.
 - حداکثر خطای مربوط به نتایج تجربی برای ظرفیت سوخت مصرفی در حالت سرمایش و گرمایش به ترتیب ۲/۷۵٪ و ۵٪ می‌باشد و همچنین حداکثر خطای مربوط به نتایج تجربی برای ضریب عملکرد ۵/۷٪ حاصل شده‌است.

۳-۲- تحقیق حاضر

با توجه به تحقیقات و مطالعات صورت گرفته در زمینه پمپ‌های حرارتی گازسوز و همچنین مزایایی که این نوع از سیستم‌های حرارتی نسبت به سایر سیستم‌ها دارند که در فصل اول به تفصیل به آن

پرداخته شد، چنین به نظر می‌رسد که با بهره‌گیری از منطق کنترلی مناسب در ساختمان‌ها می‌توان به حفظ بهترین نقطه از لحاظ مصرف انرژی و به تبع آن حفظ بهترین نقطه اقتصادی دست یافت. بدین منظور در پژوهش حاضر با استفاده از ویژگی کارکرد موتور یک پمپ حرارتی با موتور گازسوز در سرعت‌های متغیر که منجر به پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی متنوعی بر روی آن می‌شود به بررسی امکان ایجاد سرمایش و گرمایش اقتصادی در یک ساختمان پرداخته شده است. از این‌رو برای پیاده‌سازی اهداف خاص کنترلی، از الگوریتم کنترلی روشن - خاموش^۱ و همچنین تناسبی^۲، با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شد.

^۱ On-Off

^۲ Proportional (P)

فصل ۳ معادلات حاکم و مدل سازی ریاضی

۳-۱- مقدمه

برای ارزیابی و کاهش مصرف انرژی در فاز طراحی ساختمان و همچنین ارتقای سیستم‌های موجود در ساختمان از مدل سازی انرژی استفاده می‌شود. برای مدل سازی باید معادلات بسیاری به‌طور هم‌زمان حل گردد. درحالی‌که سابقه‌ی محاسبات ساده و دستی برای بار حرارتی و برودتی ساختمان، به بیش از یک قرن پیش بازمی‌گردد، ولی تولید اولین مدل‌های شبیه‌سازی در دهه‌ی ۱۹۶۰ به وقوع پیوسته است [۳].

مدل سازی به‌صورت موازنه‌ی حرارتی و در نتیجه کاملاً دینامیکی و گذرا بوده و کلیه‌ی معادلات بقای انرژی برای دیوارها و اتاق حل می‌شود. ظرفیت ذخیره سازی گرما و توانایی انتقال حرارت، دو ویژگی اساسی المان‌های ساختمان در بحث مدل سازی حرارتی است. دیوارها، سقف‌ها، کف ساختمان و هوای دورن فضاها، داخلی ساختمان از جمله اجزایی هستند که می‌توانند انرژی را در خود ذخیره کنند.

ظرفیت این اجزا در ذخیره‌سازی انرژی تابعی از جرم و ظرفیت گرمایی ویژه آن‌ها می‌باشد. نه تنها حرارت ذخیره می‌شود بلکه آن می‌تواند از طریق اجزای ساختمان به روش‌های مختلف هم انتقال پیدا کند. یک نمایش کاربردی از یک شبکه حرارتی از ساختمان، یک مدار آنالوگی است که در آن ذخیره-سازی حرارت با خازن‌ها و انتقال حرارت با مقاومت‌ها مدل سازی شود. در این فصل اجزای حرارتی ساختمان، مانند اتاق‌ها و دیوارها با روش ظرفیت فشرده^۱ (لامپ) مدل سازی شدند. برای اینکه طراحی کنترل‌کننده کاربردی‌تر باشد از فرض‌های ساده‌سازی برای مدل به نحوی استفاده شد که رفتار دینامیکی اجزای حرارتی ساختمان، با دقت خوبی انجام شود.

¹ lumped capacitance method

۳-۲- قانون اول ترمودینامیک

با توجه به قانون اول ترمودینامیک، انرژی در اثر اندرکنش‌های یک سیستم با محیط اطرافش انتقال می‌یابد که این اندرکنش‌ها کار و گرما نام دارند. گرما یا حرارت به دلیل انتقال انرژی به سیستم یا از سیستم است که ناشی از اختلاف دمای سیستم با پیرامون است. هدف از مطالعه و تحقیق در انتقال حرارت، بررسی شیوه‌های انتقال گرما و بدست آوردن روابطی برای محاسبه نرخ انتقال گرما است. قبل از هرگونه تحلیل باید قانون اول ترمودینامیک که به قانون بقای انرژی معروف است در نظر گرفته شود. رابطه بقای انرژی به صورت زیر نوشته می‌شود [۴۹]:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE_{in}}{dt} \quad (1-3)$$

در این رابطه $\dot{Q}$ نرخ انتقال حرارت خالص به سیستم (ورودی و خروجی)، $\dot{W}$ توان خالص سیستم (در مسایل انتقال حرارت کمتر مطرح می‌شود) و dE_{in}/dt نرخ تغییرات انرژی داخلی در سیستم است که به دو شکل $mC \frac{dT}{dt}$ (نرخ تغییرات انرژی محسوس سیستم) و $\dot{m}h_{fg}$ (نرخ تغییرات انرژی نهان سیستم یا تبدیل فاز) است. با توجه به اینکه در بحث انتقال حرارت و تهویه مطبوع یک ساختمان، سیستم هوای داخل اتاق است، با صرف نظر از ترم‌های توان خالص سیستم و نرخ تغییرات انرژی نهان سیستم (تبدیل فاز)، قانون بقای انرژی به صورت زیر نوشته می‌شود [۴۹]:

$$\sum q = mC \frac{dT}{dt} \quad (2-3)$$

در رابطه بالا $\sum q$ شامل سه ترم نرخ حرارت ورودی به سیستم، نرخ حرارت خروجی از سیستم و نرخ حرارت تولیدی در سیستم است. یکی از روش‌های مفید و کاربردی برای مدل سازی حرارتی ساختمان، استفاده از مدار معادل حرارتی یا روش شبکه بندی مقاومت - خازن^۱ است که در آن شبکه به یک مدار الکتریکی شبیه می‌شود و از طریق آن رفتار دینامیکی سیستم توصیف می‌شود. مدل سازی

¹ Resistance Capacitance (RC)

به روش مقاومت - خازن بر مبنای توصیف انتقال حرارت بین گره‌هایی که نشان دهنده دما هستند، استوار است. قاعده کلی مدل سازی حرارتی به راحتی می تواند با مثالی که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است، توضیح داده شود. یک اتاق را می توان به صورت شبکه ای از سیستم های مرتبه اول، که در آن گره ها حالت های سیستم هستند در نظر گرفت و این حالت های سیستم نشان دهنده دمای اتاق یا درجه حرارت در دیوارهای اتاق است.

۳-۳- مدار حرارتی معادل

به طور خاص یک شباهتی میان نفوذ حرارت و بار الکتریکی وجود دارد. در حالت پایا می توان برای حالت های مختلف انتقال حرارت مانند هدایت و جابجایی، مقاومت های حرارتی تعریف کرد. بر این اساس می توان یک مدار حرارتی معادل برای تحلیل رفتار حرارتی سیستم ایجاد کرد. همان طور که مقاومت الکتریکی با انتقال الکتریسیته همراه است، در یک مقاومت حرارتی هم ممکن است انتقال حرارت مطرح شود. با تعریف مقاومت به عنوان نسبتی از اختلاف پتانسیل به نرخ انتقال مربوط به آن، مقاومت حرارتی برای انتقال حرارت از نوع هدایت در یک دیوار مسطح به صورت زیر است [۴۹]:

$$R_{T,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (3-3)$$

به طور مشابه برای هدایت الکتریکی در سیستم یکسان، قانون اهم^۱ یک مقاومت الکتریکی را به صورت زیر تشکیل می دهد:

$$R_E = \frac{E_{s,1} - E_{s,2}}{I} = \frac{L}{\sigma A} \quad (4-3)$$

شباهت رابطه (۳-۳) و (۴-۳) آشکار است.

¹ Ohm's law

برای انتقال حرارت از نوع جابجایی هم می تواند مقاومت حرارتی تعریف شود. با توجه به قانون سرمایش نیوتن، مقاومت حرارتی برای انتقال حرارت جابجایی به صورت زیر است [۴۹]:

$$R_{T,conv} = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \quad (۵-۳)$$

مدار معادل یک ابزار مفید برای مسائل مفهومی و عددی انتقال حرارت است. مدار حرارتی معادل برای یک دیوار مسطح با شرایط مرزی انتقال حرارت جابجایی در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. نرخ انتقال حرارت با بررسی جداگانه هر بخش از دیوار، تعیین می شود. از آنجایی که در سرتاسر شبکه q ثابت است، نرخ انتقال حرارت برای این دیوار به صورت زیر است:

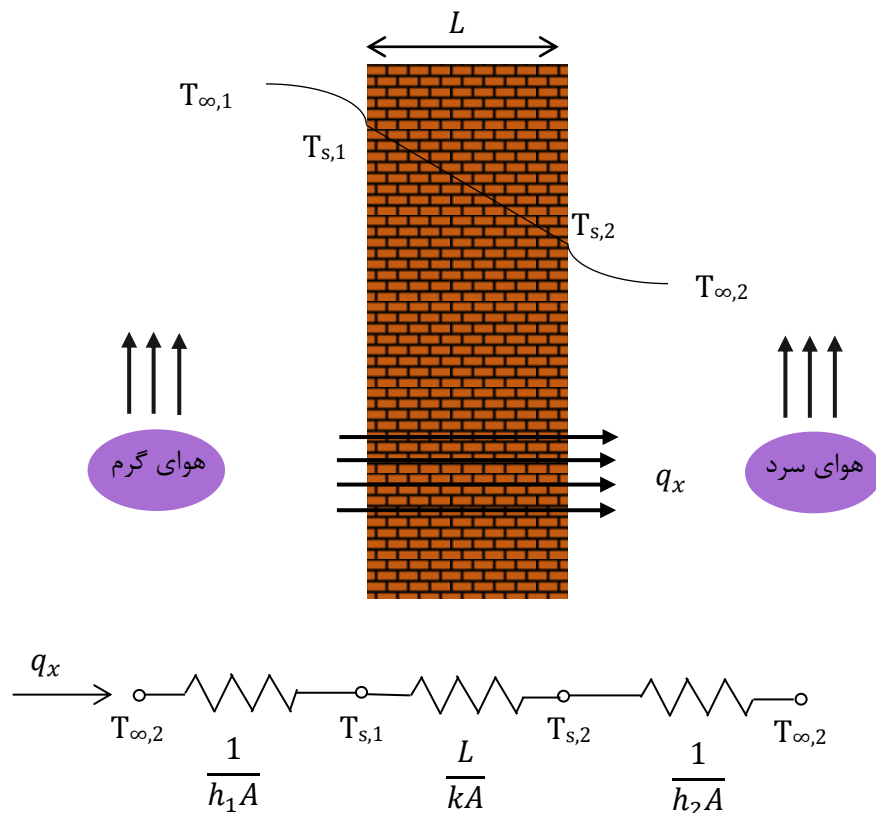
$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{s,1}}{1/h_1A} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{L/kA} = \frac{T_{s,2} - T_{\infty,2}}{1/h_2A} \quad (۶-۳)$$

می توان رابطه (۶-۳) را به صورت زیر براساس اختلاف دمای کلی و مقاومت حرارتی کلی بازنویسی کرد:

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} \quad (۷-۳)$$

چون مقاومت های هدایت و جابجایی به صورت سری بسته شده اند، باهم جمع می شوند و مقاومت کلی به صورت زیر به دست می آید:

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2A} \quad (۸-۳)$$



شکل ۳-۱: انتقال حرارت از یک دیوار مسطح و مدار حرارتی معادل

به منظور مشخص شدن سیر تدریجی دمای اتاق و دیوارها، با زمان، یک خازن با ظرفیت حرارتی C ، در هر گره از مدار حرارتی ساختمان اختصاص داده شده است. باید توجه داشت که جرم‌های توزیع شده در مدل، مانند دیوارها و هوا، به عنوان گره در مدل حرارتی اتاق در نظر گرفته شده است. این تقریب براساس برخی از فرضیات ساده‌سازی که در بخش ۳-۴-۳ ارائه شده است، در نظر گرفته می‌شود.

یک دیوار خارجی (دیواری که یک طرف آن در معرض هوای بیرون و تشعشعات خورشید و طرف دیگر آن در معرض هوای داخل است)، در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. دیوار دارای یک پنجره به مساحت A_w ، ضخامت t و ضریب انتقال حرارت k_w است. A مساحت کلی دیوار بدون در نظر گرفتن مساحت پنجره است. مدل‌سازی براساس مدار معادل حرارتی برای این دیوار، از سه گره با پتانسیل

حرارتی T_1 و T_2 و T_3 تشکیل شده است که به ترتیب مربوط به دمای هوای بیرون، دمای هوای داخل و دمای دیوار است. گره ها توسط خازن هایی با ظرفیت حرارتی $C_1 = m_{a1}c_a$ برای هوای بیرون، $C_2 = m_{a2}c_a$ برای هوای داخل و $C_3 = m_w c_w$ برای دیوار، به زمین متصل شده اند.

m_{a1} و m_{a2} و m_w ، جرم هر المان و c_a و c_w ظرفیت گرمایی ویژه هوا و مواد تشکیل دهنده دیوار است. گرما از طریق دو مسیر موازی از خارج به سمت داخل منتقل می شود، یکی از طریق دیوار و دیگری از طریق پنجره. مسیر انتقال حرارت مربوط به دیوار با دو مقاومت حرارتی از نوع جابجایی، یکی میان هوای بیرون و دیوار R_1 و دیگری میان هوای داخل و دیوار R_2 و یک مقاومت حرارتی از نوع هدایت برای دیوار R_3 ، به صورت زیر مدل سازی شده است:

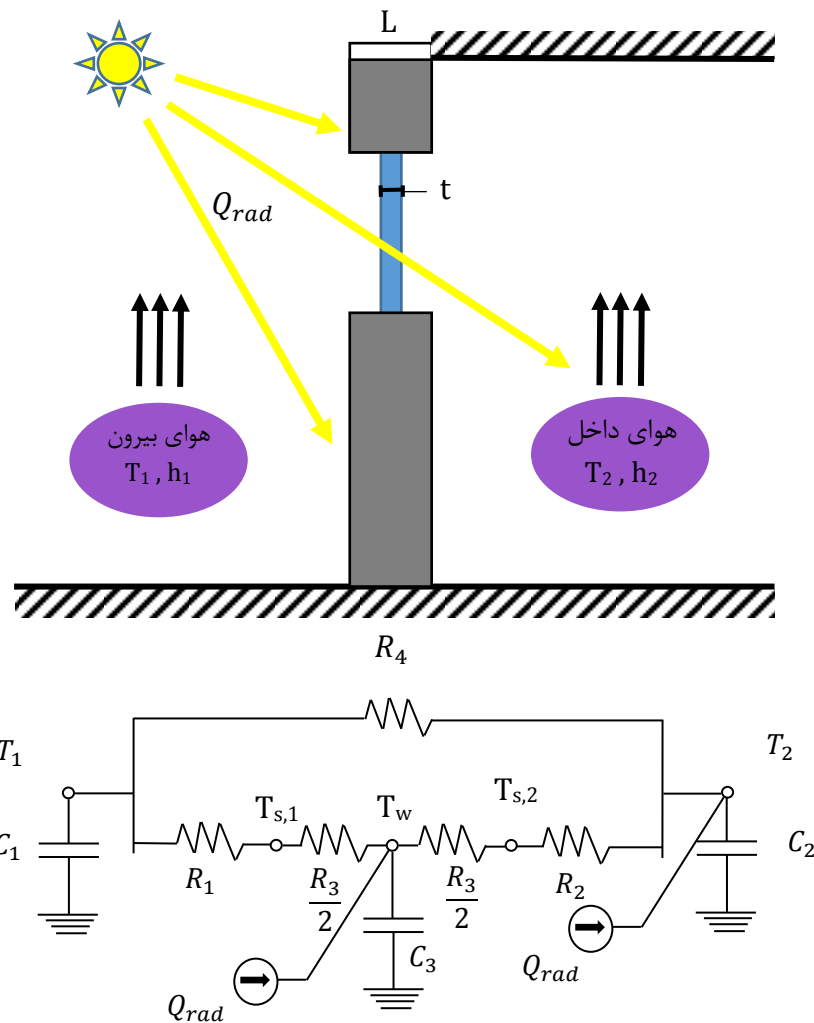
$$R_1 = \frac{1}{h_1 A} \quad (9-3)$$

$$R_2 = \frac{1}{h_2 A} \quad (10-3)$$

$$R_3 = \frac{L}{kA} \quad (11-3)$$

مسیر انتقال حرارت از طریق پنجره نیز با یک مقاومت به صورت زیر مدل سازی می شود:

$$R_4 = \frac{1}{h_1 A_w} + \frac{t}{k_w A_w} + \frac{1}{h_2 A_w} \quad (12-3)$$



شکل ۳-۲: مدار معادل حرارتی یک دیوار خارجی

Q_{rad} گرمای تابشی است که از طرف خورشید به سیستم وارد می شود. این تشعشع توسط یک منبع جریان متغیر^۱، در مدار حرارتی معادل نشان داده شده است. خروجی که منبع جریان آن را محاسبه می کند مربوط به میزان تشعشع خورشید است که خود تابعی از ارتفاع و عرض جغرافیایی مکان ساختمان، جهت جغرافیایی دیوار یا پنجره مدنظر، شرایط آب و هوایی بیرون، روز از سال و اینکه چه زمانی از روز باشد، بستگی دارد. البته تابش خورشیدی کلی از طلوع خورشید تا غروب خورشید که در بالای جو زمین می تابد تابعی از عرض جغرافیایی است و برحسب $\frac{J}{m^2}$ می باشد که از طریق روابط زیر

¹ Variable current source

به دست می آید [۵۰]:

$$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360N}{365}\right) \right] \left[\cos(L) \cos(\delta) \sin(h_{ss}) + \left(\frac{\pi h_{ss}}{180}\right) \sin(L) \sin(\delta) \right] \quad (۱۳-۳)$$

در رابطه بالا G_{sc} ثابت خورشیدی است که آهنگ انرژی خورشیدی دریافت شده روی یک متر مربع از سطح عمود بر جهت پرتو مستقیم در خارج از جو است، که مقدار آن ۱۳۵۰ تا ۱۳۶۷ وات بر مترمربع گزارش شده است. N روز از سال نسبت به اول ژانویه است. L عرض جغرافیایی و δ زاویه انحراف خورشید است که از طریق رابطه زیر بدست می آید [۵۰]:

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(284 + N)\right] \quad (۱۴-۳)$$

h_{ss} ساعت غروب خورشید بر حسب درجه است که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود [۵۰]:

$$\cos(h_{ss}) = -\tan(L) \tan(\delta) \quad (۱۵-۳)$$

به دلیل وجود پدیده‌هایی مانند پخش و جذب اتمسفری، قسمتی از تابش خورشیدی مستهلک می شود. به خصوص زمانی که آسمان ابری و یا میزان ذرات هوا بالا باشد. بنابراین مقدار تابش وارد شده به یک سطح افقی، در زمان‌های مختلف و به خصوص با تغییر شرایط اتمسفر متفاوت می باشد. در این مطالعه از داده‌های هواشناسی و میانگین تابش‌های خورشیدی در هر ساعت که به دیوارها می تابد در روابط و مدل سازی ساختمان استفاده شده است. یکی از مزیت‌های این مدل سازی این است که پارامترهایی که در آن استفاده شده است دارای معانی و تعبیر فیزیکی هستند. این ویژگی باعث می شود مدل به آسانی برای ساختمان‌های دیگر هم اصلاح شود و مورد استفاده قرار بگیرد. به عنوان مثال وقتی پوشش شیشه‌ای پنجره تعویض شود، به راحتی، فقط با اصلاح ضریب انتقال حرارت مربوط به پنجره، بدون اینکه دیگر پارامترها تغییر کنند می توان مدل سازی جدید را به روز کرد.

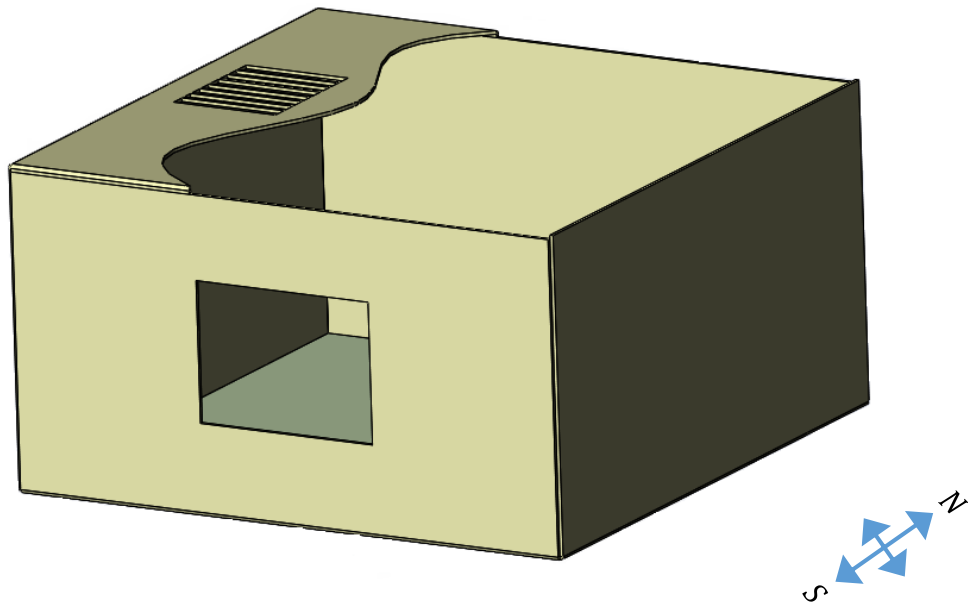
۳-۴- معادلات حاکم

۳-۴-۱ مدل حرارتی ساختمان

با استفاده از روابط انتقال حرارت که در بخش ۳-۳- مشاهده شد می توان روابط انتقال حرارت حاکم را برای توزیع دما در دیوارها و اتاق های یک ساختمان ساده استخراج کرد. ساختمانی که بدین منظور در نظر گرفته شده یک اتاق با ابعاد مشخص است که به وسیله نرم افزار سالدورکز رسم شده و در شکل ۳-۳ نمایش داده شده است. در مطالعه حاضر، مدل سازی به صورت موازنه ی حرارتی و در نتیجه کاملاً دینامیکی و گذرا بوده و کلیه ی معادلات بقای انرژی برای دیوارها و اتاق حل می شود.

فرض های ساده سازی که در استخراج روابط انتقال حرارت حاکم برای توزیع دما در دیوارها و اتاق های یک ساختمان ساده استفاده شده به شرح ذیل است:

- هوای داخل اتاق در تمام حجم خود، یک دما دارد و فرض می شود با میانگین دمای اتاق برابر است. یک مدل دمایی دقیق تر به طور قابل توجهی پیچیده تر است و استخراج قوانین کنترلی از این طریق آسان نخواهد بود [۵۱].
- ظرفیت گرمای ویژه هوا C_p ، به طور ثابت $\frac{J}{kg.K}$ ۱۰۱۲ در نظر گرفته شده است.
- حرارت تابشی (تشعشعی) به هر وجه اتاق (شمال، جنوب، شرق، غرب) به عنوان یک ورودی مزاحم به مدل در نظر گرفته شده است.
- چون محدوده دمایی هوای داخل ساختمان کم است (۱۸-۲۶ درجه سانتیگراد)، از اثرات انتقال حرارت تابشی بین دیوارهای داخلی ساختمان، چشم پوشی شده است.
- دمای دیوار در سرتاسر حجم خود با دمای خط تقارن اش تخمین زده شده است.
- چون جرم پنجره ها در برابر جرم دیوار ناچیز است از ذخیره سازی حرارت به عنوان خازن در پنجره ها صرف نظر شده است.



شکل ۳-۳: ساختمان تک اتاقه ساده

مدل سازی برای یک ساختمان تک اتاقه ساده، با استفاده از فرضیات ساده سازی عنوان شده در بالا، منجر به یک مدار حرارتی به شیوه ای که در شکل ۳-۴ ارائه شده است، می شود. دمای اتاق T_1 و ظرفیت حرارتی یا جرم حرارتی هوای اتاق با C_r مشخص شده است، که به صورت زیر بدست می آید:

$$C_r = m_a C_{pa} \quad (۱۶-۳)$$

C_{pa} ظرفیت گرمایی ویژه هوا با واحد $\frac{J}{kg.k}$ و m_a جرم هوای داخل اتاق بر حسب kg است که به صورت زیر بدست می آید:

$$m_a = \rho_a V_a \quad (۱۷-۳)$$

که در آن ρ_a چگالی هوا ($\frac{kg}{m^3}$) در دمای اتاق و V_a حجم اتاق بر حسب kg است.

به غیر از اتاق، دیوارها نیز از عناصر اصلی در رفتار حرارتی یک ساختمان هستند. این مدل شامل چهار دیوار شمالی، جنوبی، شرقی و غربی است که مساحت آن ها با A_i ، دمای هر یک با T_i و ظرفیت گرمایی آن ها با C_{wi} نام گذاری شده است که به صورت زیر بدست می آید:

$$C_{wi} = m_{wi} C_{pwi} \quad (۱۸-۳)$$

C_{pwi} ظرفیت گرمایی ویژه دیوار i با واحد $\frac{J}{kg.k}$ و m_{wi} جرم دیوار i بر حسب kg است که به صورت زیر بدست می آید:

$$m_{wi} = \rho_{wi} V_{wi} \quad (۱۹-۳)$$

که در آن ρ_{wi} چگالی دیوار i و V_{wi} حجم دیوار i ، بر حسب kg است.

به این ترتیب با توجه به شکل ۳-۴، یک گره برای هوای داخل اتاق و چهار گره برای دیوارها در دسترس است. این گره ها باید با مقاومت های حرارتی که در بخش ۳-۳- تعریف شده است، مرتبط شوند. به دلیل اینکه دمای خط تقارن دیوار به دمای دیوار اختصاص داده شده است، دیوار ها به دو قسمت جدا از هم تقسیم می شوند (طرف داخلی و طرف خارجی)، که می توان برای هر طرف از دیوار، مقاومت حرارتی از نوع هدایت تعریف کرد. بنابراین مقاومت حرارتی از نوع هدایت، برای هر طرف از دیوار به صورت زیر بدست می آید:

$$R_{Cond,half} = \frac{R_w}{2} \quad (۲۰-۳)$$

که R_w مقاومت حرارتی دیوار بر حسب $\frac{K}{W}$ است که می تواند به صورت زیر بیان شود [۴۹]:

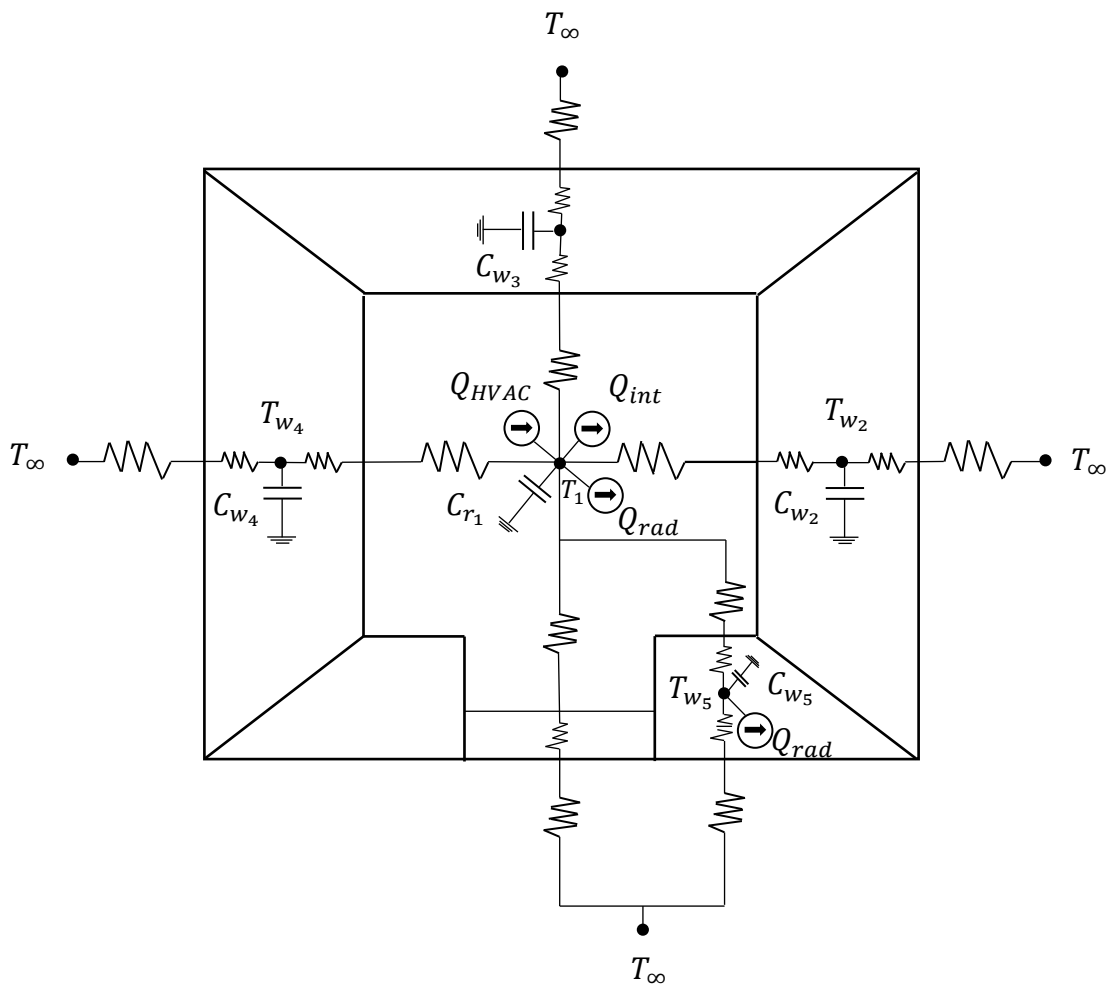
$$R_w = \frac{L}{kA} \quad (۲۱-۳)$$

که L ضخامت دیوار (m)، k ضریب هدایت حرارتی ماده استفاده شده در دیوار ($\frac{W}{m.K}$) و A مساحت دیوار (m^2) است. به طریقه مشابه می توان برای هر دو طرف دیوار، با استفاده از روابط ارائه شده در بخش ۳-۳، مقاومت حرارتی از نوع جابجایی را تعریف کرد. از آنجاییکه ضریب انتقال حرارت جابجایی به نوع سیال، خواص جریان و دمای هوا بستگی دارد. این ضریب برای دو طرف دیوار مقادیر متفاوتی دارد که به عوامل اشاره شده در بالا برای هر طرف دیوار بستگی دارد [۵۲]. در این مطالعه برای سادگی فقط دو ضریب انتقال حرارت جابجایی مختلف، یکی برای طرف داخلی دیوارها و دیگری

برای طرف خارجی دیوارها در نظر گرفته شده است. ضریب انتقال حرارت جابجایی برای سمت داخلی دیوارها با h_i و ضریب انتقال حرارت جابجایی برای سمت خارجی دیوارها با h_o نام گذاری شده است. به این ترتیب مقاومت حرارتی از نوع جابجایی برای سمت های داخلی و خارجی دیوارها که به ترتیب با R_o و R_i نشان داده شده است به صورت زیر بدست می آید:

$$R_i = \frac{1}{h_i A} \quad (22-3)$$

$$R_o = \frac{1}{h_o A} \quad (23-3)$$



شکل ۳-۴: تحلیل گره های دیوارها و اتاق

اکنون می توان با استفاده از مقاومت ها و خازن هایی که در بالا تعریف شده است، معادلات حاکم بر توزیع دما در اتاق و دیوارهای ساختمان را استخراج کرد. با توجه به رابطه بقای انرژی برای یک دیوار یک بعدی یعنی رابطه (۳-۲) و در نظر گرفتن شکل ۳-۴ و در نهایت انجام تحلیل گره ای^۱ [۴۴] برای گره های مربوط به دیوار و هوای اتاق، می توان روابط زیر را برای دمای اتاق و دیوارها بدست آورد. باید توجه داشت که گره ۱ مربوط به هوای داخل اتاق، گره ۲ مربوط به دیوار شرقی، گره ۳ مربوط به دیوار شمالی، گره ۴ مربوط به دیوار غربی و گره ۵ مربوط به دیوار جنوبی است. بدین ترتیب توزیع دما برای دیوار شرقی به صورت زیر بدست خواهد آمد [۵۳]:

$$C_{w_2} \frac{dT_{w_2}}{dt} = \frac{T_{r_1} - T_{w_2}}{R_{1,2}} + \frac{T_{\infty} - T_{w_2}}{R_{\infty,2}} + \alpha_{w_2} A_{w_2} \dot{q}_{rad_2} \quad (24-3)$$

توزیع دما برای دیوار شمالی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$C_{w_3} \frac{dT_{w_3}}{dt} = \frac{T_{r_1} - T_{w_3}}{R_{1,3}} + \frac{T_{\infty} - T_{w_3}}{R_{\infty,3}} + \alpha_{w_3} A_{w_3} \dot{q}_{rad_3} \quad (25-3)$$

توزیع دما برای دیوار غربی از طریق رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$C_{w_4} \frac{dT_{w_4}}{dt} = \frac{T_{r_1} - T_{w_4}}{R_{1,4}} + \frac{T_{\infty} - T_{w_4}}{R_{\infty,4}} + \alpha_{w_4} A_{w_4} \dot{q}_{rad_4} \quad (26-3)$$

و در نهایت توزیع دما برای دیوار جنوبی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$C_{w_5} \frac{dT_{w_5}}{dt} = \frac{T_{r_1} - T_{w_5}}{R_{1,5}} + \frac{T_{\infty} - T_{w_5}}{R_{\infty,5}} + \alpha_{w_5} A_{w_5} \dot{q}_{rad_5} \quad (27-3)$$

در روابط بالا، ترم اول، انتقال گرما از هوای اتاق به دیوار را نشان می دهد و ترم دوم گرمایی که از محیط بیرون به دیوار منتقل شده را محاسبه می کند. ترم سوم روابط بالا نیز قسمتی از حرارت تابشی از طرف خورشید را که توسط دیوار جذب شده است، محاسبه می کند. که α ضریب جذب دیوار و

¹ nodal analysis

$\dot{q}_{rad}$ گرمای تابشی کلی است که به دیوار می‌رسد و T_{∞} نیز به دمای بیرون اشاره دارد.

و در نهایت توزیع دما برای هوای داخل اتاق به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$C_{r1} \frac{dT_{r1}}{dt} = \frac{T_{w2} - T_{r1}}{R_{1,2}} + \frac{T_{w3} - T_{r1}}{R_{1,3}} + \frac{T_{w4} - T_{r1}}{R_{1,4}} + \frac{T_{w5} - T_{r1}}{R_{1,5}} + \frac{T_{\infty} - T_{r1}}{R_{win}} \quad (28-3)$$

$$+ \dot{m}_a C_{pa} (T_s - T_{r1}) + \tau_{win} A_{win} \dot{q}_{rad5} + \dot{q}_{int}$$

در رابطه بالا، $\dot{m}$ $\left(\frac{kg}{s}\right)$ دبی جرمی هوای ورودی به اتاق از طریق مجراهای تهویه مطبوع است. C_p ظرفیت گرمایی ویژه هوا، T_s (K) دمای هوای سرد شده یا گرم شده‌ای است که از طریق مجراهای تهویه مطبوع به داخل اتاق می‌آید و در نهایت $\dot{q}_{int}$ (W) گرمای تولیدی در داخل اتاقها است که می‌تواند به دلیل وجود لامپها یا دستگاههای الکتریکی مانند کامپیوترها و یا به دلیل حضور انسان در اتاق باشد.

می‌توان روابط مربوط به توزیع دما در اتاق و دیوارها را به یک حال کلی تعمیم داد. در آن صورت شبکه دمایی ساختمان دارای دو نوع گره خواهد بود: یکی مربوط به دیوارها و دیگری مربوط به اتاقها. در مجموع n گره در مدار حرارتی وجود دارد که m گره دمای دیوارها را مشخص می‌کند و $n - m$ گره نمایش دهنده دمای اتاقها است. به این ترتیب، توزیع دمای دیوار نام با رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C_{wi} \frac{dT_{wi}}{dt} = \sum_{j \in N_{wi}} \frac{T_j - T_{wi}}{R_{ij}} + r_i \alpha_i A_i \dot{q}_{rad_i} \quad (29-3)$$

در رابطه بالا، T_{wi} دمای دیوار i ، C_{wi} ظرفیت گرمایی دیوار i ، α_i ضریب جذب دیوار i و A_i مساحت دیوار i را نشان می‌دهند. R_{ij} مقاومت حرارتی کلی میان دیوار i و گره j است. $\dot{q}_{rad_i}$ شار حرارتی تابشی از طرف خورشید به دیوار i است. N_{wi} هم مجموع همه گرههایی است که با دیوار i همسایه هستند. r_i برای دیوارهای داخلی که در معرض تابش خورشید نیستند مساوی صفر است و برای دیوارهای پیرامونی که در معرض تابش خورشید هستند مساوی یک است. به طریقه مشابه، توزیع

دمای اتاق i ام با رابطه زیر بدست می آید:

$$C_{r_i} \frac{dT_{r_i}}{dt} = \sum_{j \in N_{r_i}} \frac{T_j - T_{r_i}}{R_{ij}} + \dot{m}_a C_{p_a} (T_{s_i} - T_{r_i}) + \omega_i \tau_{win_i} A_{win_i} \dot{q}_{rad_i} + \dot{q}_{int} \quad (3-30)$$

در رابطه (۳-۳۰) C_{r_i} و $\dot{m}_a$ به ترتیب دمای اتاق i ، ظرفیت گرمایی هوای اتاق i و دبی جرمی هوای ورودی از مجرای تهویه مطبوع به اتاق i را نشان می دهد. C_{p_a} ظرفیت گرمایی ویژه هوا، A_{win_i} مجموع مساحت پنجره در دیوارهای پیرامونی اتاق i ، τ_{win_i} ضریب انتقال شیشه‌ای استفاده شده در پنجره i ، $\dot{q}_{rad_i}$ شار حرارتی تابشی از طرف خورشید که از طریق پنجره وارد اتاق i می شود. اگر دیوارهای اتاق پنجره نداشته باشد ω_i مساوی صفر و اگر حتی یک دیوار از اتاق i پنجره داشته باشد ω_i مساوی یک است. N_{r_i} مجموعه همه گره‌هایی است که با اتاق i همسایه هستند و $\dot{q}_{int}$ گرمای تولیدی داخلی در اتاق i است.

۳-۴-۲ مدل ترمودینامیکی پمپ حرارتی

سیکل کارکرد پمپ حرارتی گازسوز شامل سیکل پمپ حرارتی و موتور گازسوز است که در واقع سیکل کارکردی پمپ حرارتی همان سیکل تبرید تراکمی بخار می باشد. همان طور که در شکل ۱-۶ نشان داده شده است، اجزای یک پمپ حرارتی که شامل کمپرسور، کندانسور، اواپراتور و شیر انبساط است، به صورت زیر مدل سازی شده است:

- کمپرسور: کمپرسور وظیفه انجام تراکم مبرد را به عهده دارد، توان مصرفی آن را از رابطه زیر محاسبه می شود [۱۷]:

$$\dot{W}_{com} = \dot{m}_r w_{com} = \dot{m}_r (h_2 - h_1) = \dot{m}_r \left(\frac{h_{2s} - h_1}{\eta_s} \right) \quad (3-31)$$

که در آن نرخ جرمی مبرد به شکل زیر محاسبه می شود [۱۷]:

$$\dot{m}_r = \eta_s \rho_1 \frac{V_{com} N_{com}}{60} \quad (32-3)$$

• کندانسور: کندانسور یک مبدل حرارتی است که ظرفیت حرارتی آن از روابط زیر بدست می-

آید [۱۷]:

$$\dot{Q}_{con} = \dot{m}_r q_{con} = \dot{m}_r (h_2 - h_3) \quad (33-3)$$

$$\dot{Q}_{con} = \dot{m}_a (h_{a,o} - h_{a,i}) \quad (34-3)$$

• اواپراتور: اواپراتور دیگر مبدل حرارتی است که ظرفیت حرارتی آن از روابط زیر بدست می آید

[۱۷]:

$$\dot{Q}_{eva} = \dot{m}_r q_{eva} = \dot{m}_r (h_1 - h_4) \quad (35-3)$$

$$\dot{Q}_{eva} = \dot{m}_a [(h_{i,o} - h_{a,o}) - (\omega_i - \omega_o) h_w] \quad (36-3)$$

• شیر انبساط: شیر انبساط وظیفه کاهش فشار مبرد را به عهده دارد و براساس فرآیند اختناق

یا خفگی در یک شیر انبساط داریم [۱۷]:

$$h_3 = h_4 \quad (37-3)$$

همچنین می توان میان توان مصرفی کمپرسور و توان تولیدی موتور از طریق رابطه زیر ارتباط برقرار

کرد [۱۷]:

$$\dot{W}_{com} = \dot{W}_{engin} \eta_m \eta_{belt} \quad (38-3)$$

که در آن η_m بازده مکانیکی موتور گازسوز و η_{belt} بازده انتقال قدرت موتور گازسوز است.

ضریب عملکرد پمپ حرارتی برای حالت سرمایش نیز از رابطه زیر بدست می آید [۱۷]:

$$COP_c = \frac{\dot{Q}_{eva}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{Q}_{eva}}{\dot{V}_{fuel} q_{LHV} \eta_{comb}} \quad (39-3)$$

در رابطه بالا q_{LHV} ارزش حرارتی پایین سوخت، η_{comb} راندمان احتراق موتور احتراق داخلی و $\dot{V}_{fuel}$ نرخ حجمی سوخت مصرفی موتور در پمپ حرارتی گازسوز است.

۳-۵- نمایش فضای حالت سیستم

با نوشتن روابط انتقال حرارت برای هر دیوار و اتاق در ساختمان، برای سیستمی که n تا متغیر حالت، r تا ورودی و m تا خروجی دارد، نمایش روابط در سیستم فضای حالت به صورت زیر خواهد شد [۲۰]:

$$\dot{x} = Ax + f(x, u, d) \quad (40-3)$$

$$y = Cx + Du \quad (41-3)$$

که x بردار متغیر حالت است با ابعاد $n \times 1$ که دمای گره‌ها را در شبکه مدار حرارتی نشان می‌دهد، u بردار ورودی است با ابعاد $r \times 1$ که در این مطالعه دبی جرمی هوای ورودی به اتاق در نظر گرفته شده است و y بردار خروجی سیستم است با ابعاد $m \times 1$ که دمای هوای اتاق را در خود ذخیره می‌کند. A یک ماتریس مربعی با ابعاد $n \times n$ است و ماتریس C با ابعاد $m \times n$ که نشان دهنده این است که کدام متغیر حالت به عنوان خروجی سیستم در نظر گرفته شده است. ماتریس D با ابعاد $m \times r$ ماتریس انتقال مستقیم نام دارد که با نوشتن روابط انتقال حرارت به فرم فضای حالت، مقدار آن صفر می‌شود. بردار $f(x, u, d)$ با ابعاد $n \times 1$ ، تابعی از متغیرهای حالت، ورودی و ورودی‌های مزاحم به سیستم است.

ماتریس‌های A و C و بردار x و بردار $f(x, u, d)$ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$x = [T_{r_1} \quad T_{w_2} \quad T_{w_3} \quad T_{w_4} \quad T_{w_5}]^T \quad (42-3)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_{r_1}} \left(\frac{1}{R_{1,2}} + \frac{1}{R_{1,3}} + \frac{1}{R_{1,4}} + \frac{1}{R_{1,5}} + \frac{1}{R_{win}} \right) & \frac{1}{C_{r_1} R_{1,2}} & \frac{1}{C_{r_1} R_{1,3}} & \frac{1}{C_{r_1} R_{1,4}} & \frac{1}{C_{r_1} R_{1,5}} \\ \frac{1}{C_{w_2} R_{1,2}} & \frac{-1}{C_{w_2}} \left(\frac{1}{R_{1,2}} + \frac{1}{R_{\infty,2}} \right) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{w_3} R_{1,3}} & 0 & \frac{-1}{C_{w_3}} \left(\frac{1}{R_{1,3}} + \frac{1}{R_{\infty,3}} \right) & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{w_4} R_{1,4}} & 0 & 0 & \frac{-1}{C_{w_4}} \left(\frac{1}{R_{1,4}} + \frac{1}{R_{\infty,4}} \right) & 0 \\ \frac{1}{C_{w_5} R_{1,5}} & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{C_{w_5}} \left(\frac{1}{R_{1,5}} + \frac{1}{R_{\infty,5}} \right) \end{bmatrix} \quad (۴۳-۳)$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (۴۴-۳)$$

$$D = [0] \quad (۴۵-۳)$$

$$f(x, u, d) = \begin{bmatrix} \frac{T_{\infty}}{C_{r_1} R_{win}} + \frac{1}{C_{r_1}} \dot{m} C_p (T_s - T_{r_1}) + \frac{1}{C_{r_1}} \tau_{win} A_{win} \dot{q}_{rad_5} + \frac{1}{C_{r_1}} \dot{q}_{int} \\ \frac{T_{\infty}}{C_{w_2} R_{\infty,2}} + \frac{1}{C_{w_2}} \alpha_{w_2} A_{w_2} \dot{q}_{rad_2} \\ \frac{T_{\infty}}{C_{w_3} R_{\infty,3}} + \frac{1}{C_{w_3}} \alpha_{w_3} A_{w_3} \dot{q}_{rad_3} \\ \frac{T_{\infty}}{C_{w_4} R_{\infty,4}} + \frac{1}{C_{w_4}} \alpha_{w_4} A_{w_4} \dot{q}_{rad_4} \\ \frac{T_{\infty}}{C_{w_5} R_{\infty,5}} + \frac{1}{C_{w_5}} \alpha_{w_5} A_{w_5} \dot{q}_{rad_5} \end{bmatrix} \quad (۴۶-۳)$$

ماتریس $f(x, u, d)$ بخش غیرخطی سیستم را تشکیل می‌دهد. زیرا همانطور که در ماتریس $f(x, u, d)$ مشخص است، پارامتر کنترلی ورودی یعنی $\dot{m}$ در متغیر حالت T_{r_1} ضرب شده است که ضرب ورودی در متغیر حالت، دینامیک غیر خطی سیستم را ایجاد می‌کند. در واقع بردار f تابعی از متغیرهای حالت، ورودی و ورودی‌های مزاحم به سیستم است. برای مطالعه دینامیک سیستم با دقت بیشتر، بردار f به دو بردار ورودی و بردار اختلال به صورت زیر تجزیه شده است:

$$f(x, u, d) = g(x, u) + d(t) \quad (۴۷-۳)$$

بردار $g(x, u)$ که شامل ترم های ورودی است، به صورت زیر نوشته می شود:

$$g(x, u) = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_{r1}} \dot{m} C_p (T_s - T_{r1}) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (48-3)$$

بردار $d(t)$ هم که شامل ترم های مربوط به اختلال و ورودی های مزاحم است به صورت زیر خواهد بود:

$$d(t) = \begin{bmatrix} \frac{T_\infty}{C_{r1} R_{win}} + \frac{1}{C_{r1}} \tau_{win} A_{win} \dot{q}_{rad5} + \frac{1}{C_{r1}} \dot{q}_{int} \\ \frac{T_\infty}{C_{w2} R_{\infty,2}} + \frac{1}{C_{w2}} \alpha_{w2} A_{w2} \dot{q}_{rad2} \\ \frac{T_\infty}{C_{w3} R_{\infty,3}} + \frac{1}{C_{w3}} \alpha_{w3} A_{w3} \dot{q}_{rad3} \\ \frac{T_\infty}{C_{w4} R_{\infty,4}} + \frac{1}{C_{w4}} \alpha_{w4} A_{w4} \dot{q}_{rad4} \\ \frac{T_\infty}{C_{w5} R_{\infty,5}} + \frac{1}{C_{w5}} \alpha_{w5} A_{w5} \dot{q}_{rad5} \end{bmatrix} \quad (49-3)$$

ترم غیرخطی در سیستم به فرم $x \times u$ (حاصل ضرب متغیر حالت در ورودی) است و فقط در بردار g دیده می شود. روش های زیادی برای خطی سازی روابط در فضای حالت وجود دارد از جمله روش خطی سازی فیدبک^۱ برای ورودی/خروجی غیرخطی یا ورودی/متغیر حالت غیرخطی، که می توان از آن ها برای مقابله با ترم های غیرخطی سیستم استفاده کرد. در این مطالعه از روش مرسوم خطی سازی ژاکوبین برای انتقال دینامیک سیستم به فضای خطی استفاده شده است. چون محدوده دمایی هوای داخل ساختمان کوچک است (۲۶-۱۸ درجه سانتیگراد)، خطی سازی ژاکوبین که حول یک نقطه مشخص (نقطه کار) انجام می شود، برای اهداف کنترلی دقت قابل قبولی دارد. این کار باعث می شود که

¹ Feedback linearization

به طور چشم گیری حجم محاسبات کاهش پیدا کند و همچنین مزیت دیگر خطی سازی مدل این است که امکان استفاده از تکنیک های کنترل خطی را می دهد.

۳-۶- خطی سازی ژاکوبین^۱

در سیستم های مدل سازی شده می توان همواره شاهد این نکته بود که تقریباً تمام سیستم ها غیرخطی هستند و در واقع روابط دیفرانسیلی حاکم بر دینامیک و متغیرهای سیستم غیرخطی است. اما با این وجود اغلب نظریه هایی توسعه داده شده اند بر روی سیستم های خطی متمرکز شده است. بنابراین تبدیل یک سیستم غیرخطی به یک سیستم خطی کاری مرسوم در این زمینه است. در قسمت زیر خطی سازی یک سیستم غیرخطی حول یک نقطه عملکردی خاص که نقطه تعادل^۲ نامیده می شود، به روش ژاکوبین توضیح داده شده است. برای یک سیستم غیرخطی مانند $\dot{x} = f(x, u)$ یک نقطه ای مانند $\bar{x}$ یک نقطه تعادل برای سیستم نامیده می شود، اگر یک ورودی تعادلی مانند $\bar{u}$ وجود داشته باشد، به طوری که رابطه زیر ارضا شود [۵۴]:

$$f(\bar{x}, \bar{u}) = 0 \quad (۵۰-۳)$$

با استفاده از بسط تیلور برای سیستم غیرخطی و صرف نظر کردن از مرتبه مشتق ۲ و بالاتر، سیستم غیرخطی $\dot{x} = f(x, u)$ را می توان با سیستم خطی $\dot{x} = Ax + Bu$ به صورت زیر تقریب زد [۵۴]:

^۱ Jacobian Linearization
^۲ equilibrium point

$$A = \frac{\partial f}{\partial x} \bigg|_{\substack{x = \bar{x} \\ u = \bar{u}}} \rightarrow A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} & \frac{\partial f_1}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} & \frac{\partial f_2}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} & \frac{\partial f_3}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} & \frac{\partial f_4}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_5}{\partial x_1} & \frac{\partial f_5}{\partial x_2} & \frac{\partial f_5}{\partial x_3} & \frac{\partial f_5}{\partial x_4} & \frac{\partial f_5}{\partial x_5} \end{bmatrix}$$

(۵۱-۳)

$$B = \frac{\partial f}{\partial u} \bigg|_{\substack{x = \bar{x} \\ u = \bar{u}}} \rightarrow B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} \\ \frac{\partial f_3}{\partial u_1} \\ \frac{\partial f_4}{\partial u_1} \\ \frac{\partial f_5}{\partial u_1} \end{bmatrix}$$

به این ترتیب سیستم غیرخطی به یک سیستم خطی تبدیل می شود. برای پیاده سازی این روش ابتدا باید نقاط تعادل سیستم پیدا شود. نقاط تعادل سیستم با ثابت نگهداشتن u و حل روابط برای محاسبه $\bar{x}$ بدست می آیند. در این سیستم بی نهایت نقطه تعادل وجود دارد که می توانند با ورودی های مختلفی که به سیستم اعمال می شود بدست بیایند. اما از میان این نقاط تعادل، نقطه تعادلی مورد نظر است که سیستم بیشتر زمان کاری اش را در آن نقطه تعادل باشد که به آن اصطلاحاً نقطه کار^۱ هم گفته می شود. این نقطه کار از مساوی قرار دادن دمای اتاق با دمایی که توسط کاربران یا ساکنین در ساختمان تنظیم می شود بدست می آید، در این مرحله از ترم های اختلال صرف نظر شده است.

به این ترتیب سیستم غیرخطی در رابطه (۴۰-۳) با ارزیابی ماتریس های A و B در رابطه (۵۱-۳) منجر به یک سیستم فضای حالت خطی شده به صورت زیر می گردد:

1 operating point

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + d(t) \quad (۵۲-۳)$$

$$y = Cx(t) \quad (۵۳-۳)$$

که در آن ماتریس A و B به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_{r1}} \left(\frac{1}{R_{1,2}} + \frac{1}{R_{1,3}} + \frac{1}{R_{1,4}} + \frac{1}{R_{1,5}} + \frac{1}{R_{win}} + \bar{u}C_p \right) & \frac{1}{C_{r1}R_{1,2}} & \frac{1}{C_{r1}R_{1,3}} & \frac{1}{C_{r1}R_{1,4}} & \frac{1}{C_{r1}R_{1,5}} \\ \frac{1}{C_{w2}R_{1,2}} & \frac{-1}{C_{w2}} \left(\frac{1}{R_{1,2}} + \frac{1}{R_{\infty,2}} \right) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{w3}R_{1,3}} & 0 & \frac{-1}{C_{w3}} \left(\frac{1}{R_{1,3}} + \frac{1}{R_{\infty,3}} \right) & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{w4}R_{1,4}} & 0 & 0 & \frac{-1}{C_{w4}} \left(\frac{1}{R_{1,4}} + \frac{1}{R_{\infty,4}} \right) & 0 \\ \frac{1}{C_{w5}R_{1,5}} & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{C_{w5}} \left(\frac{1}{R_{1,5}} + \frac{1}{R_{\infty,5}} \right) \end{bmatrix} \quad (۵۴-۳)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_{r1}} C_p (T_s - T_{sp}) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۵۵-۳)$$

در رابطه بالا T_s دمای هوای سرشده یا گرم شده ای است که از طریق مجراهای تهویه مطبوع وارد اتاق می شود و ثابت در نظر گرفته شده است. T_{sp} دمای هوای مطلوب اتاق است که توسط کاربران یا ساکنین ساختمان تنظیم می گردد.

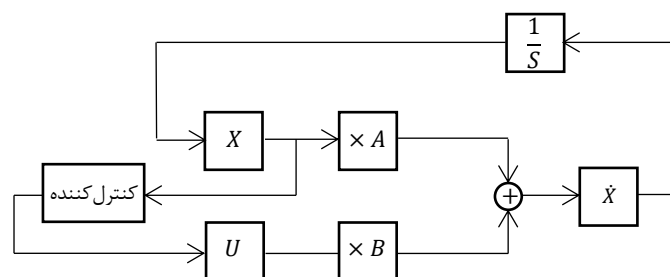
۳-۷- کنترل فیدبک حالت

در بحث کنترل فیدبک حالت، ورودی به کنترل کننده، متغیرهای حالت سیستم هستند و خروجی کنترل کننده، ورودی مطلوبی است که به سیستم وارد می شود تا اهداف کنترلی را ارضا کند. شکل

۵-۳ شماتیک عملکرد یک کنترل کننده فیدبک حالت را نشان می دهد که قانون کنترل آن به صورت زیر است [۲۰]:

$$u(t) = \sum_{i=1}^n g_i \times x_i \quad (۵۶-۳)$$

g_i ضرایب بهره کنترل کننده فیدبک حالت هستند که با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات به نحوی محاسبه می شوند تا بهترین ضرایب برای دستیابی به هدف کنترلی باشند.



شکل ۵-۳: کنترل فیدبک حالت

۳-۸- الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات^۱ از یک روش جستجوی غیر قطعی برای بهینه سازی تابع هدف استفاده می کند. این الگوریتم از حرکت دسته جمعی پرندگانی که به دنبال غذا هستند الهام گرفته شده است. به این ترتیب که گروهی از پرندگان در فضایی به صورت تصادفی دنبال غذا میگردند. تنها یک تکه غذا در فضای مورد بحث وجود دارد. هیچ یک از پرندگان محل غذا را نمی دانند. یکی از بهترین استراتژی ها می تواند دنبال کردن پرنده ای باشد که کمترین فاصله را تا غذا داشته باشد. این استراتژی در واقع ماهیت اصلی الگوریتم ازدحام ذرات است.

¹ Particle Swarm Optimization

شکل کلی یک مسئله بهینه سازی از نوع کمینه سازی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad f(x) \\ & \text{Subject to} \quad : \begin{cases} g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (۵۷-۳)$$

که در آن، $f(x)$ تابع هدف یا تابع موردنظر است که بر روی x کمینه می شود. $g(x)$ و $h(x)$ ناحیه شدنی مسئله را مشخص می کنند و در واقع به ترتیب محدودیت نامساوی و محدودیت تساوی مسئله نامیده می شود. در الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات هر راه حل که به آن یک ذره گفته می شود، معادل یک پرنده در حرکت جمعی پرندگان است. هر ذره یک مقدار برازندگی دارد که توسط یک تابع برازنده محاسبه می شود. هرچه ذره در فضای جستجو به هدف (غذا در مدل حرکت پرندگان) نزدیک تر باشد، برازندگی بیشتری دارد. همچنین هر ذره دارای یک سرعت است که هدایت حرکت ذره را بر عهده دارد. هر ذره با دنبال کردن ذرات بهینه در حالت فعلی، به حرکت خود در فضای مساله ادامه می دهد. الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات به این شکل است که در ابتدا گروهی از ذرات به صورت تصادفی به وجود می آیند و سپس با به روز کردن جمعیت، برای یافتن راه حل بهینه تلاش می کند. مفاهیم اولیه الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات را می توان به شرح زیر نام برد:

- هر ذره در حال جستجو برای نقطه بهینه است
- هر ذره در حال جابجایی در فضای جستجو است
- به دلیل این جابجایی، دارای سرعت است
- بهینه سازی ازدحام ذرات بر مبنای حرکت و هوش ذرات کار می کند
- بهینه سازی ازدحام ذرات مفهوم تعامل اجتماعی را برای حل مسائل بهینه سازی به کار می

گیرد

در هر گام، هر ذره با استفاده از دو مقدار به روز می شود. اولین مورد، بهترین موقعیتی است که تاکنون ذره موفق شده است به آن برسد که اصطلاحاً به آن $Pbest$ گفته می شود. موقعیت مذکور شناسایی و ذخیره می شود. مقدار دیگری که در الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات مورد استفاده قرار می گیرد، بهترین موقعیتی است که تاکنون توسط جمعیت ذرات بدست آمده است. این موقعیت با $Gbest$ نمایش داده می شود.

برای کدنویسی الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات در ابتدا، یک جمعیت تصادفی از ذرات در فضای n بعدی (بستگی به متغیرهای مسئله دارد) ایجاد می شود. در این حالت ذره نام با بردار زیر نمایش داده می شود:

$$x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}] \quad (58-3)$$

مقدار ارزیابی تابع معیار برای هر ذره $Pbest$ ، در بردار زیر ذخیره می شود:

$$P_i = [P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in}] \quad (59-3)$$

بهترین مقدار گروه $Gbest$ ، توسط یک ذره در کل جمعیت بدست می آید. در واقع در هر تکرار بهترین $Pbest$ همان $Gbest$ برای کل جمعیت است. سرعت ذره نام توسط بردار زیر نمایش داده می شود:

$$V_i = [V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in}] \quad (60-3)$$

به این ترتیب تغییرات سرعت هر ذره از طریق رابطه زیر محاسبه می شود:

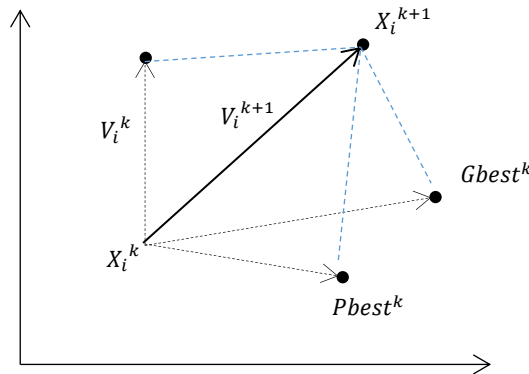
$$\Delta V_{k+1} = C_1 \cdot rand. (x_{Pbest} - x_k) + C_2 \cdot rand. (x_{Gbest} - x_k) \quad (61-3)$$

تابع $rand$ اعداد تصادفی هستند که از توزیع یکنواخت بین صفر و یک به دست می آیند که معادل همان دستور $rand$ در نرم افزار متلب است و ماهیت تصادفی الگوریتم را تضمین می کند. ضرایب C_1 و C_2 به ترتیب ضریب تاثیردهی هوش فردی و هوش جمعی است که در پیاده سازی ها معمولاً $C_1 + C_2 = 4$ در نظر می گیرند. متغیرهای x_k ، x_{pbest} و x_{gbest} به ترتیب موقعیت ذرات و موقعیت بهترین تجربه هر ذره و موقعیت بهترین تجربه تمام ذرات در تکرار k ام است. با توجه به روابط بالا بردار سرعت ذرات به صورت زیر به روزرسانی می شود:

$$V_{k+1} = V_k + \Delta V_{k+1} \quad (۶۲-۳)$$

پس از به روزرسانی سرعت هر ذره، موقعیت جدید هر ذره از رابطه زیر به دست می آید:

$$x_{k+1} = x_k + V_{k+1} \quad (۶۳-۳)$$

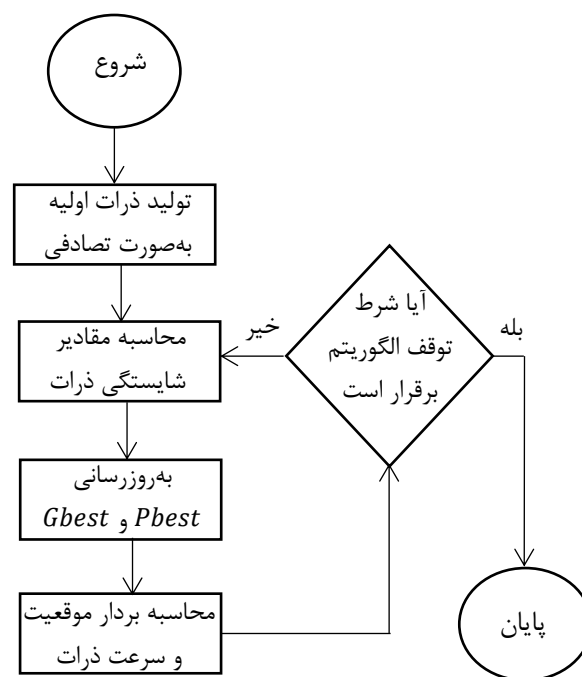


شکل ۶-۳: نمایش نحوه حرکت یک ذره در الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

شکل ۶-۳ نحوه جستجوی ذرات را در الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات نمایش می دهد و در شکل ۷-۳ فلوچارت نحوه کار الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات نشان داده شده است. همان طور که قبلاً اشاره شد، فرآیند جستجو به صورت تکراری ادامه می یابد تا زمانی که معیار همگرایی حاصل شود.

الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات مزایای بسیاری نسبت به دیگر روش های بهینه سازی دارد. در زیر به چند مورد اشاره شده است:

- یک روش مرتبه صفر است و نیازی به عملیات سنگین ریاضی مثل گرادیان گیری ندارد
- یک روش مبتنی بر جمعیت است (استفاده از محاسبات توزیع شده)
- همگرایی نسبتاً سریعی دارد



شکل ۳-۷: فلوچارت روش حل الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

فصل ۴ نتایج

۴-۱- مقدمه

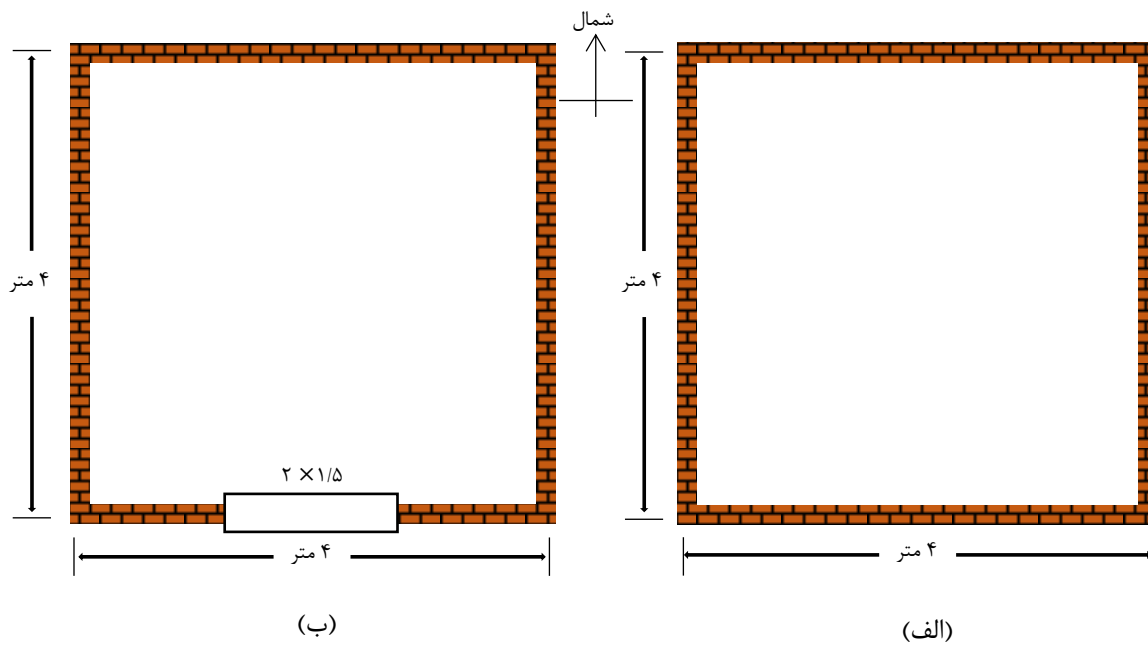
در فصل چهارم ابتدا اعتبارسنجی مدل اتاق با نتایج حاصل از نرم‌افزار کریر^۱، برای بیشینه بار برودتی در فصل تابستان و بار حرارتی در فصل زمستان، ارائه شده و سپس در ادامه نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی مختلف بر روی ساختمان و همچنین تحلیل اقتصادی مربوط به آن، ارائه گردیده است.

برای اعتبارسنجی مطالعه انجام شده، در فاز مدل‌سازی ابتدا بار برودتی و بار حرارتی یک اتاق با نتایج حاصل از نرم‌افزار کریر مقایسه می‌شود. نرم‌افزار کریر از معروف‌ترین و در عین حال معتبرترین نرم‌افزارهای محاسبه ساعت به ساعت بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان‌ها جهت طراحی و تخمین سیستم‌های تهویه مطبوع و تأسیسات مکانیکی ساختمان است. طبق تحقیقات صورت گرفته نتایج محاسبات مربوط به بارهای سرمایشی و گرمایشی در نرم‌افزار کریر نسبت به نتایج آزمایشگاهی حدود ۲ الی ۱۰ درصد خطا را نشان می‌دهد. در نتیجه نتایج حاصل از این نرم‌افزار قابل استفاده در تحلیل‌های مورد نظر در این مطالعه می‌باشد.

۴-۲- مشخصات اتاق‌های مدل‌سازی شده

برای این بخش، دو اتاق مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. یکی اتاق بدون پنجره و دیگری اتاق با پنجره در ضلع جنوبی. اتاق‌های انتخاب شده کاملاً ساده بوده و دیوارهای خارجی آن‌ها با محیط بیرون در ارتباط است. اتاق‌ها مربعی شکل و مساحت آن‌ها ۱۶ مترمربع است. پلان دو اتاق مذکور در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. مشخصات دیوارها و سقف استفاده شده در مدل نیز در جدول ۴-۱ ارائه شده است.

¹ Carrier HAP



شکل ۴-۱: پلان اتاق‌های استفاده شده (الف) بدون پنجره و (ب) با پنجره

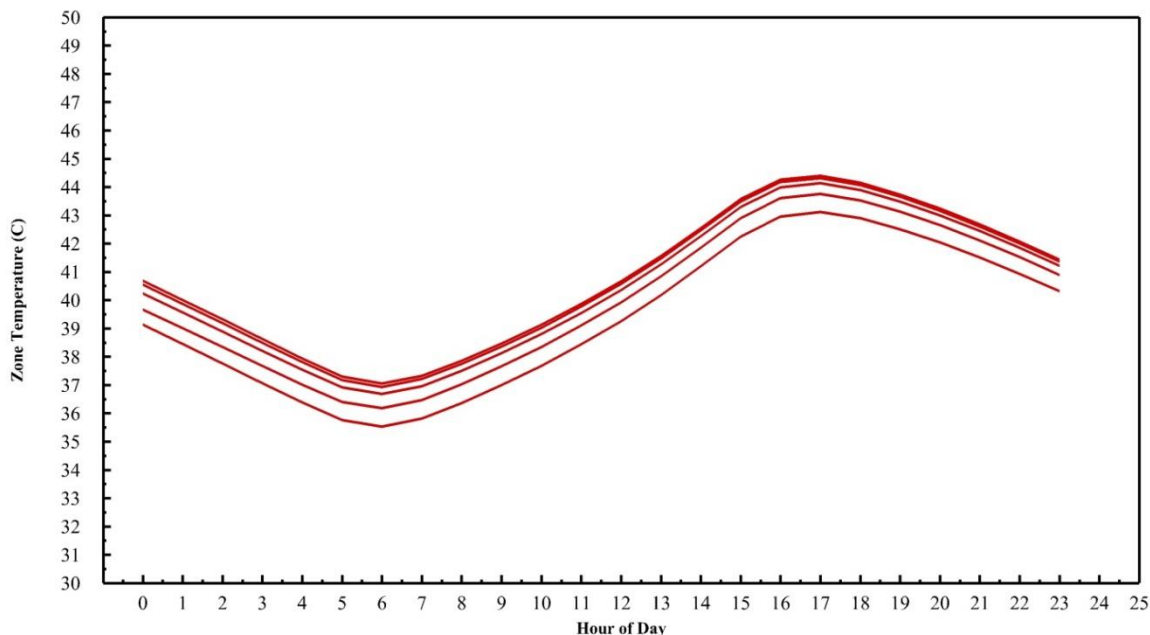
۴-۳- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی مطالعه انجام شده، نتایج مربوط به محاسبه حداقل و حداکثر خطای مربوط به بار برودتی و بار حرارتی برای دو اتاق مذکور واقع در شهر تهران، در جدول ۴-۲ و جدول ۴-۳ نشان داده شده است. همچنین برای بررسی بیشتر، نمودار تغییرات بار برودتی و بار حرارتی اتاق‌های مذکور در طول یک شبانه‌روز در فصل تابستان و فصل زمستان مطالعه شده است، نمودار تغییرات بار برودتی و بار حرارتی در طول این مدت برای اتاق اول به ترتیب در شکل ۴-۳ و شکل ۴-۴ و برای اتاق دوم به ترتیب در شکل ۴-۵ و شکل ۴-۶ ارائه شده است.

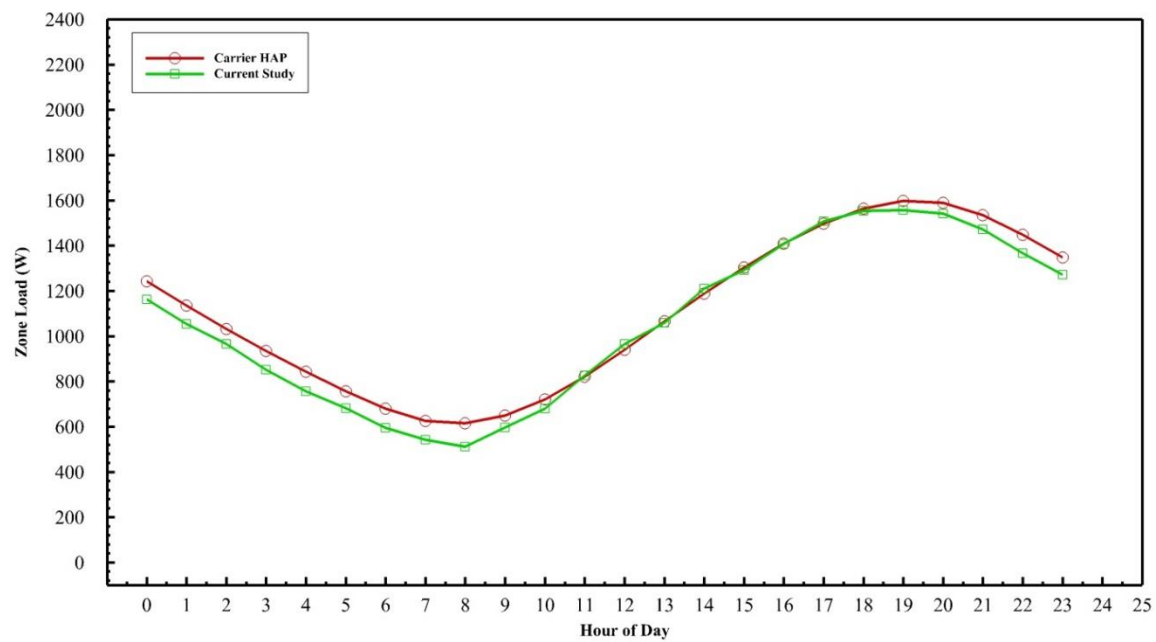
جدول ۱-۴: مشخصات لایه‌های مختلف دیوارها و سقف

نوع سازه	تعداد لایه	ضخامت (mm)	چگالی (kg/m^3)	گرمای ویژه (J/kgK)	مقاومت حرارتی (m^2K/W)
دیوار شمالی	۳	۱۵	۸۰۰/۹	۱۰۹۰	۰/۰۹۳۱۹
		۱۰۰	۶۰۸/۷	۸۴۰	۰/۲۶۲۶۳
		۱۰۰	۲۰۰۲/۳	۹۲۰	۰/۰۷۵۰۴
دیوار شرقی	۳	۱۵	۸۰۰/۹	۱۰۹۰	۰/۰۹۳۱۹
		۱۵۰	۶۰۸/۷	۸۴۰	۰/۳۹۳۹۵
		۱۰۰	۲۰۰۲/۳	۹۲۰	۰/۰۷۵۰۴
دیوار جنوبی	۳	۱۵	۸۰۰/۹	۱۰۹۰	۰/۰۹۳۱۹
		۱۰۰	۶۰۸/۷	۸۴۰	۰/۲۶۲۶۳
		۱۰۰	۲۰۰۲/۳	۹۲۰	۰/۰۷۵۰۴
دیوار غربی	۳	۱۵	۸۰۰/۹	۱۰۹۰	۰/۰۹۳۱۹
		۱۵۰	۶۰۸/۷	۸۴۰	۰/۳۹۳۹۵
		۱۰۰	۲۰۰۲/۳	۹۲۰	۰/۰۷۵۰۴
سقف	۳	۱۰۰	۲۰۰۲/۳	۹۲۰	۰/۰۷۵۰۴
		۲۵	۳۲	۹۲۰	۱/۲۰۳۷۳
		۱۰	۱۱۲۱/۳	۱۴۷۰	۰/۰۶۱۴۷

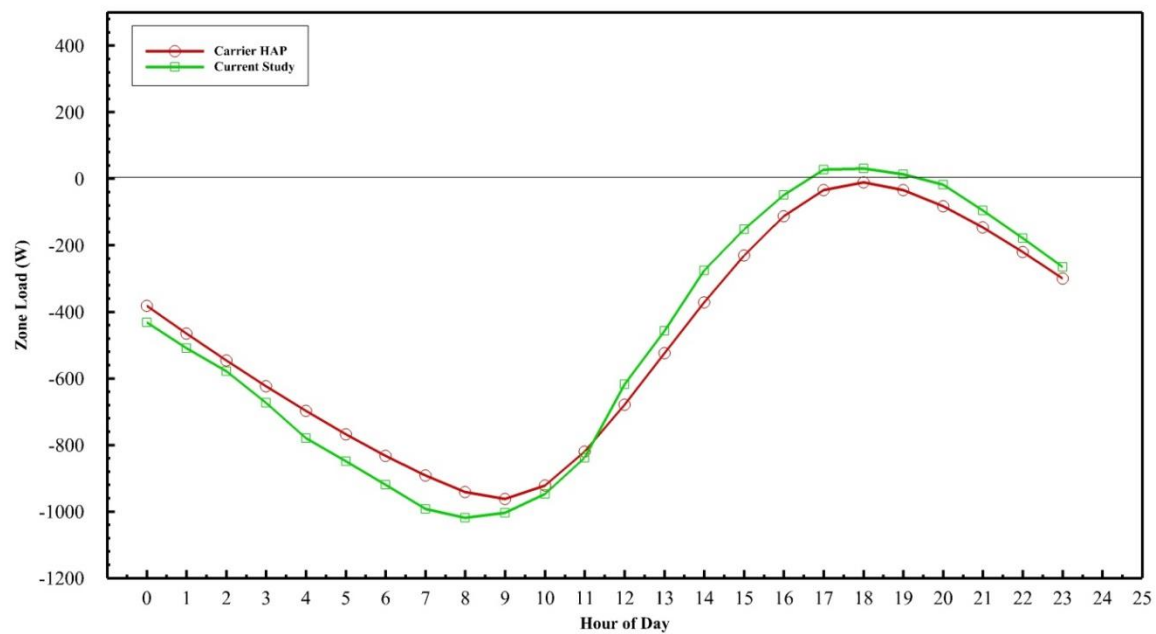
مدل استفاده شده در این مطالعه، معادلات موجود را به طور کامل و به صورت گذرا حل می‌کند. جواب‌های یک معادله گذرا، تابعی از شرایط اولیه آن می‌باشد. این موضوع در مورد اتاق نیز وجود دارد. شرایط اولیه شامل نحوه توزیع دما در دیوارها و پنجره‌ها است. با استفاده از شرایط اولیه موجود، می‌توان معادلات را برای مدت زمان دلخواه، مثلاً برای ۱۰ روز حل کرد و جواب را به صورت تابعی از زمان محاسبه کرد. حال اگر فرض شود شرایط آب‌وهوایی یعنی دمای بیرون و شدت تشعشع خورشید، در طول این ۱۰ روز ثابت باشد، در طول روز دهم، تغییرات دما در طول روز تابع بسیار ضعیفی از شرایط اولیه استفاده شده در حل مسئله می‌شود. بدین معنی که در عین حال که در طول یک روز تغییرات دمایی و بار حرارتی داریم، ولی الگوی این تغییرات برای روزهای مختلف یکسان خواهد بود. این مفهوم در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. در واقع می‌توان فرض کرد که جواب کلی ترکیبی از دو جواب گذرا و پایدار می‌باشد که با گذشت زمان کافی، پاسخ پایدار که خود تابعی از زمان است باقی می‌ماند. کلیه نتایج ارائه شده، نتایج حالت پایدار هستند. این بدین علت است که نرم‌افزار کریر، نتایج حالت پایدار را ارائه می‌کند لذا برای مقایسه و اعتبارسنجی نتایج، به اطلاعات حالت پایدار نیاز است.



شکل ۲-۴: تغییرات دمای اتاق در چند روز



شکل ۳-۴: نتایج مربوط به بار برودتی در تابستان برای اتاق اول



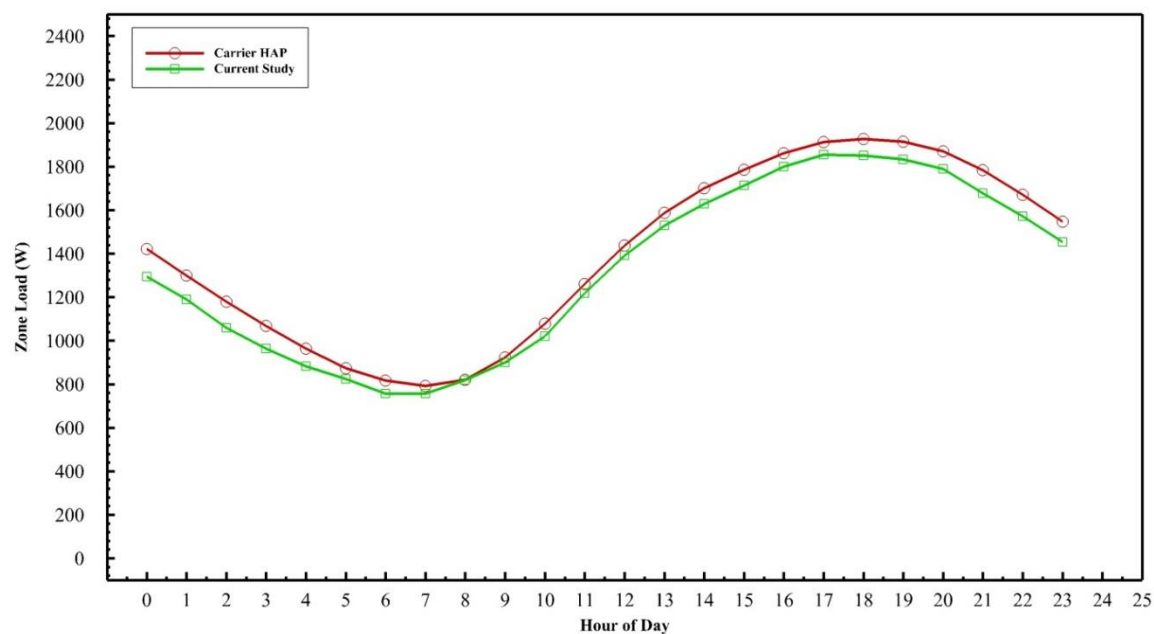
شکل ۴-۴: نتایج مربوط به بار حرارتی در زمستان برای اتاق اول

جدول ۲-۴: خطای مربوط به بار برودتی و بار حرارتی اتاق اول (برحسب وات)

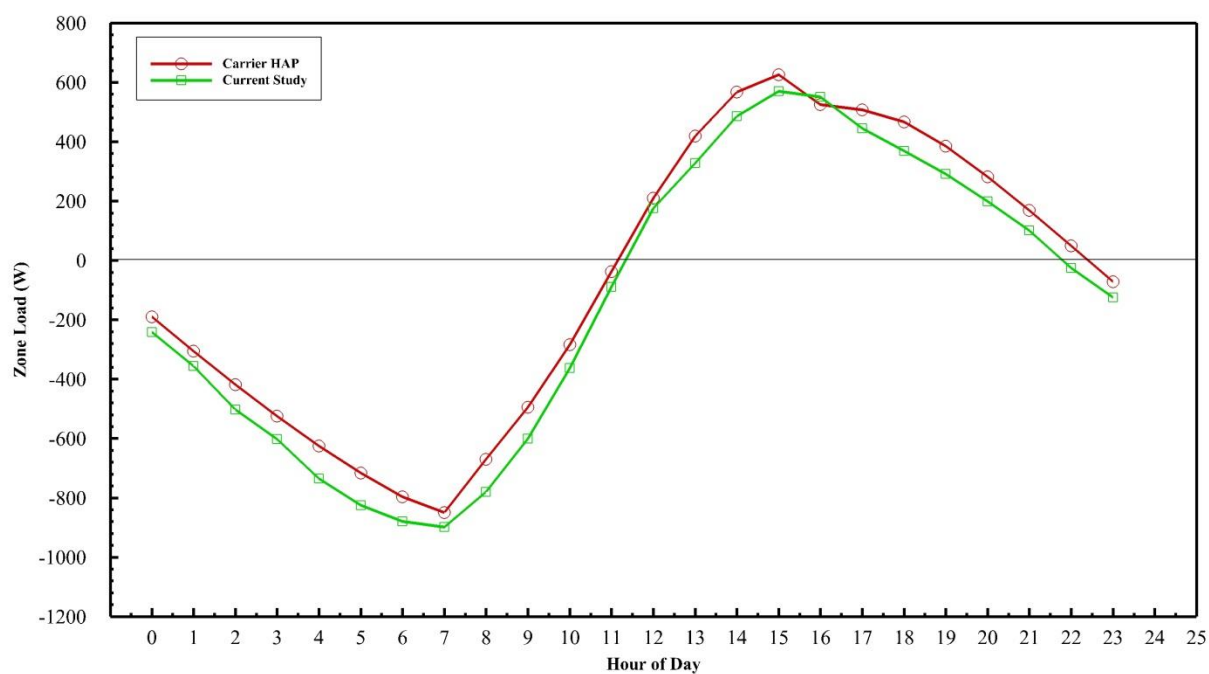
کریر	تحقیق حاضر	درصد خطا	
حداکثر خطا	۶۷۹/۶	۵۷۴/۷	٪ ۱۵/۴۳
تابستان (تیرماه)			
حداقل خطا	۱۴۰۹/۱	۱۴۰۷/۷	٪ ۰/۰۹
حداکثر خطا	-۸۹۲/۱	-۱۰۱۷/۳	٪ ۱۴/۰۳
زمستان (دیماه)			
حداقل خطا	-۸۱۹/۷	-۸۳۹/۱	٪ ۲/۴

جدول ۳-۴: خطای مربوط به بار برودتی و بار حرارتی اتاق دوم (برحسب وات)

کریر	تحقیق حاضر	درصد خطا	
حداکثر خطا	۱۷۸۴/۷	۱۶۷۷/۷	٪ ۵/۹۹
تابستان (تیرماه)			
حداقل خطا	۸۲۰/۲	۸۱۹	٪ ۰/۱۵
حداکثر خطا	-۶۲۵/۴	-۷۶۵/۳	٪ ۲۲/۳
زمستان (دیماه)			
حداقل خطا	۵۲۵/۵	۵۵۰/۳۱	٪ ۴/۷۶



شکل ۴-۵: نتایج مربوط به بار برودتی در تابستان برای اتاق دوم



شکل ۴-۶: نتایج مربوط به بار حرارتی در زمستان برای اتاق دوم

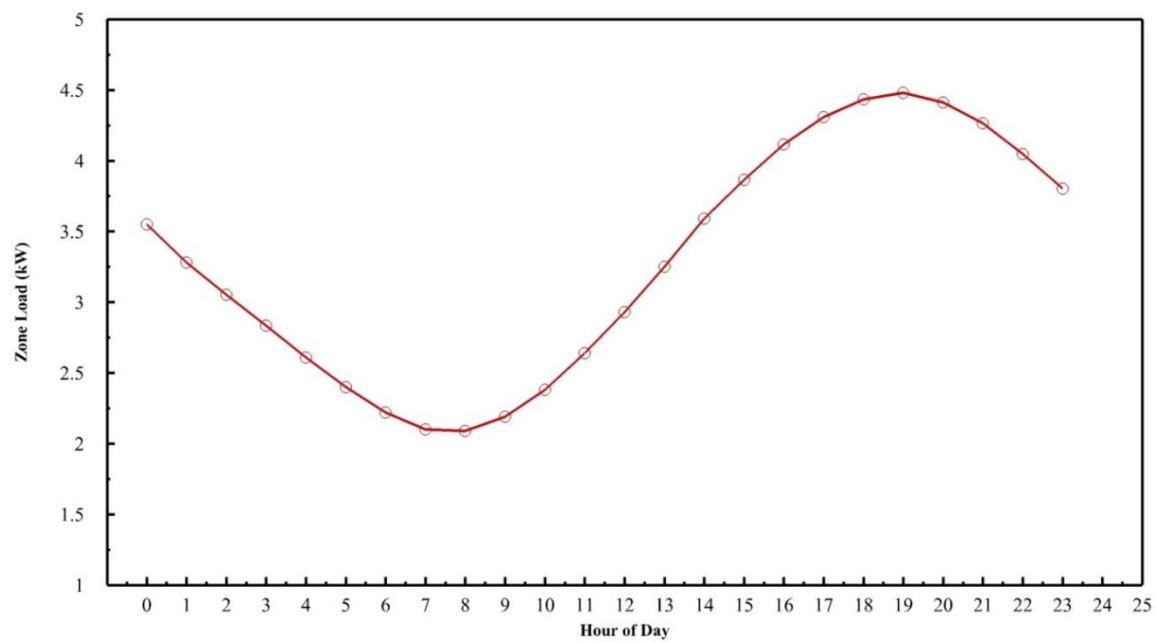
نتایج ارائه شده در شکل‌ها و جداول فوق نشان می‌دهد که بار برودتی و بار حرارتی، هم‌خوانی بسیار خوبی با نتایج نرم افزار کریر دارد. البته این اختلاف‌ها در ساعاتی از روز کم و زیاد می‌شود. این اختلاف‌ها در نمودارهای شکل ۳-۴، شکل ۴-۴، شکل ۵-۴ و شکل ۶-۴ که مربوط به بار برودتی و بار حرارتی ۲۴ ساعته برای هر دو اتاق با پنجره و بدون پنجره است، بیشتر نمود پیدا می‌کند.

۴-۴- الگوریتم کنترلی

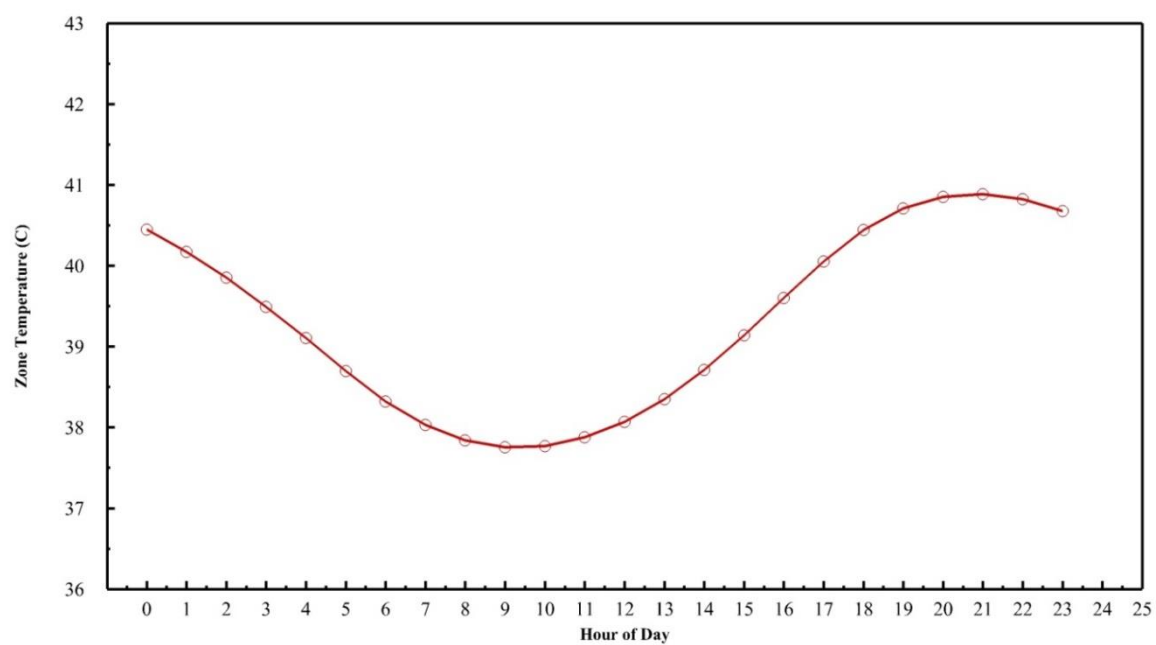
برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی ترموستاتی یا خاموش-روشن و کنترل هوشمند، یک ساختمان به مساحت زیربنای ۶۴ مترمربع، در شهر تهران را در نظر گرفته شده است. مشخصات لایه‌های مختلف دیوارها و سقف در جدول ۴-۱ آورده شده است. مشخصات دمای هوای بیرون و همچنین شدت تشعشع خورشید برای شهر تهران از داده‌های سازمان هواشناسی و به شیوه متوسط‌گیری استخراج شده است. نمودار تغییرات بار برودتی و همچنین تغییرات دمای ساختمان در طول ۲۴ ساعت از فصل تابستان به ترتیب در شکل ۴-۷ و شکل ۴-۸ نشان داده شده است. لازم به توضیح است که با توجه به این‌که میزان بار برودتی ساختمان ارتباط مستقیمی با دمای مطلوب انسان یا دمای تنظیمی کاربر^۱ در ساختمان دارد، در این بخش برای محاسبه بار برودتی ساختمان دمای مطلوب کاربر ۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. که این دما در محدوده آسایش حرارتی انسان قرار دارد. طبق استانداردهای اشری^۲، آسایش حرارتی هر شخص، یک نوع شرایط ذهنی است که میزان آسایش و رضایتمندی از شرایط دمایی آن محیط را بیان می‌کند. این محدوده آسایش برای شهرها و اقلیم‌های مختلف متفاوت است و برای شهر تهران محدوده دمایی ۱۸-۲۳ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است [۵۵].

¹ Set Point

² American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE)



شکل ۴-۷: تغییرات بار برودتی ساختمان



شکل ۴-۸: تغییرات دمای هوای داخل ساختمان

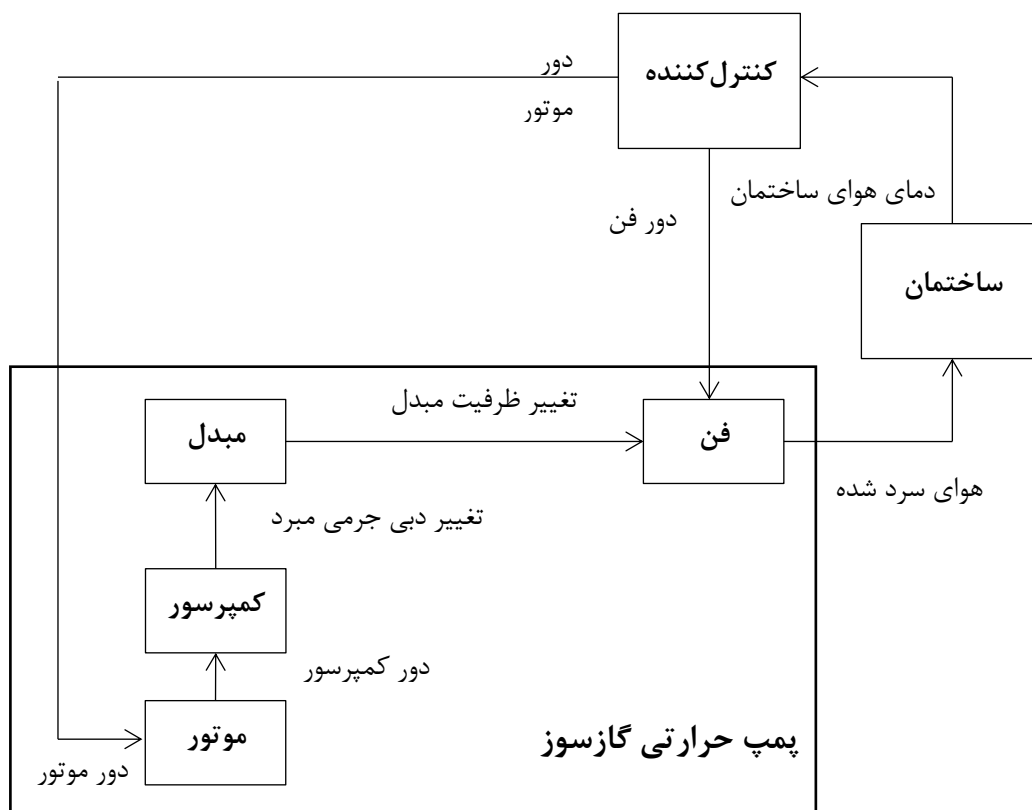
۴-۴-۱ منطق کنترلی

به طور کلی پارامترهای موثر بر دمای هوای یک ساختمان به دو دسته‌ی پارامترهای غیرقابل کنترل و پارامترهای قابل کنترل (پارامترهای طراحی) تقسیم می‌شوند. پارامترهای غیر قابل کنترل در واقع پارامترهایی هستند که به صورت عامل مزاحم وارد سیستم می‌شوند و مقدار آن‌ها قابل کنترل نیست. مانند دمای هوای بیرون، شدت تشعشع خورشید، ابری یا صاف بودن آسمان، شاخص حضور افراد و حرارت تولیدی ناشی از وسایل الکتریکی داخل ساختمان و غیره.

پارامترهای قابل کنترل که به آن پارامترهای طراحی نیز گفته می‌شود، پارامترهایی هستند که می‌توان با تنظیم آن‌ها به اهداف کنترلی مورد نظر دست یافت، مانند دور موتور که منجر به تغییر در دور کمپرسور می‌شود (تغییر در دور کمپرسور، دبی جرمی مبرد را تغییر می‌دهد) و دور فن که منجر به تغییر در حجم هوای ورودی به ساختمان می‌شود.

در کنار این دو گروه از پارامترها، پارامترهایی هستند که اهداف کنترلی مورد نظر را مشخص می‌کنند، که به آن‌ها پارامترهای هدف گفته می‌شود، مانند هزینه‌های ناشی از سوخت و رسیدن به سطح آسایش حرارتی. در شکل ۴-۹ نقشه کنترلی ارتباط بین مدل حرارتی ساختمان، پمپ حرارتی و پردازشگر کنترل‌کننده^۱ نشان داده شده است.

^۱ CPU



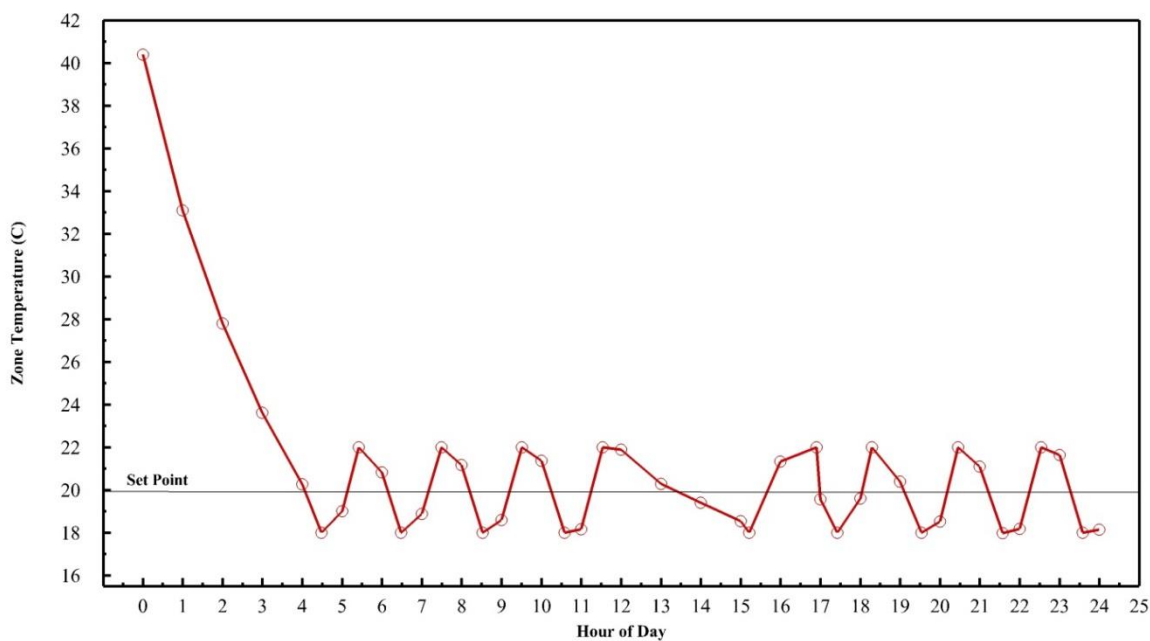
شکل ۴-۹: نقشه کنترلی دمای ساختمان

جدول ۴-۴: مشخصات پمپ حرارتی گازسوز [۵۶]

مقدار	واحد	مشخصه	مقدار	واحد	مشخصه
۰/۹۵	—	بازده احتراق	۴/۵	kW	ظرفیت سرمایش
۳۶۲۰۰	kJ/m^3	ارزش حرارتی پایین سوخت	۳/۵۸	kW	مصرف گاز
۰/۹۵	—	بازده انتقال قدرت	۰/۱۶	kW	مصرف برق
۱۲	—	نسبت تراکم موتور	۱/۲۰	—	ضریب عملکرد
۱/۹	—	دور کمپرسور به دور موتور	۰/۸۲	—	بازده مکانیکی

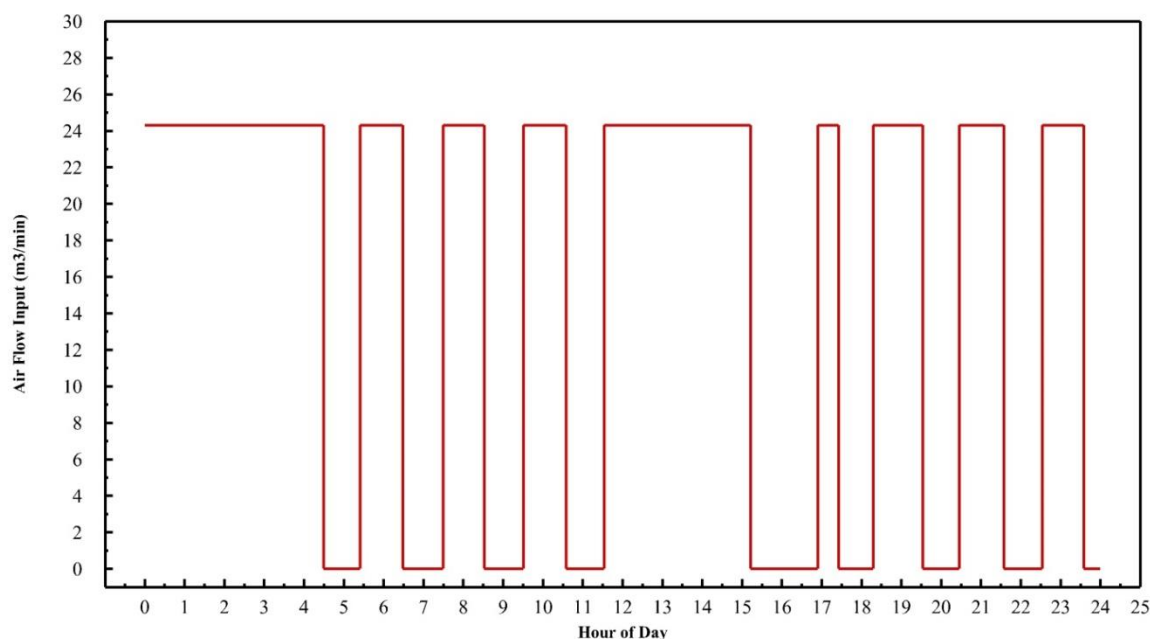
۴-۴-۲ الگوریتم کنترلی روشن-خاموش^۱

با پیاده‌سازی این الگوریتم بر روی مدل شبیه‌سازی شده، سنسور درون ساختمان دمای هوا را می‌سنجد، به محض این‌که دمای هوای درون ساختمان از دمای تنظیمی کاربر بیشتر شود موتور روشن شده و با تمام ظرفیت شروع به سرد کردن فضای داخل ساختمان می‌کند تا دمای هوا را به دمای تنظیمی کاربر نزدیک کند. بعد از این‌که دمای هوا به دمای تنظیمی کاربر رسید، ترموستات عمل کرده و موتور سیستم تهویه مطبوع را خاموش می‌کند. این روند به طور مداوم تکرار می‌شود. در شکل‌های زیر نتایج حاصل از پیاده‌سازی این نوع از الگوریتم کنترلی روی مدل شبیه‌سازی شده، نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۰: تغییرات دمای هوای ساختمان

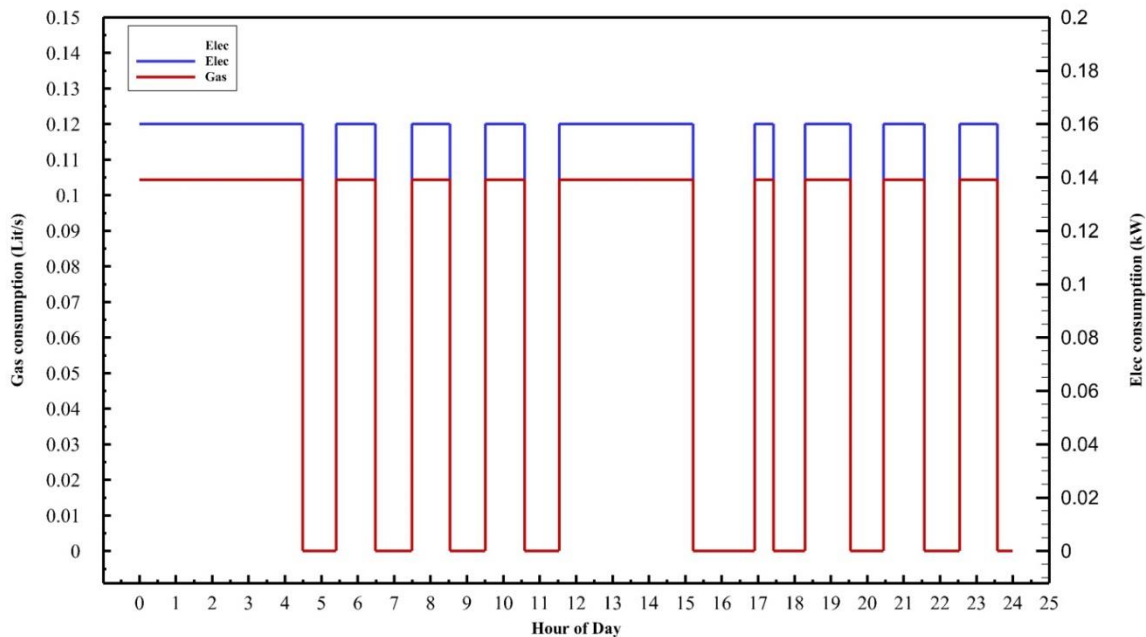
¹ On-Off



شکل ۴-۱۱: دبی هوای ورودی به ساختمان

برای این حالت، دمای تنظیمی کاربر ۲۰ درجه سانتی‌گراد و محدوده عملکرد ترموستات ۱۸-۲۲ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. بیشترین حجم هوادهی فن‌ها ۲۴/۳ مترمکعب در دقیقه و بیشترین ظرفیت سرمایش پمپ حرارتی گازسوز ۴/۵ کیلووات است. همان‌طور که در شکل ۴-۱۰: تغییرات دمای هوای ساختمان و شکل ۴-۱۱: دبی هوای ورودی به ساختمان مشاهده می‌شود، مطابق انتظار سیستم پمپ حرارتی گازسوز بعد از گذشت حدود ۴ ساعت دمای هوای داخل ساختمان را از حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد به ۱۸ درجه سانتی‌گراد می‌رساند. در این لحظه ترموستات عمل کرده و موتور پمپ حرارتی گازسوز خاموش می‌شود. در نتیجه دمای هوای داخل ساختمان روند صعودی می‌گیرد. بعد از گذشت حدود یک ساعت، دمای هوای داخل ساختمان به حد بالای دمای تعریف شده، یعنی ۲۲ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و مجدداً موتور پمپ حرارتی گازسوز روشن شده تا دمای هوای داخل ساختمان را به حد پایین دمای تعریف شده، یعنی ۱۸ درجه سانتی‌گراد برساند. در بعضی از ساعات که بار حرارتی ساختمان زیاد است، زمان کارکرد پمپ حرارتی گازسوز زیاد می‌شود و برعکس، ساعاتی که بار حرارتی ساختمان پایین است، محدوده کارکردی پمپ حرارتی گازسوز کمتر

می‌شود که این مفاهیم در شکل ۴-۱۰ و شکل ۴-۱۱ مشخص است.



شکل ۴-۱۲: میزان مصرف گاز و مصرف برق پمپ حرارتی گازسوز

با در نظر گرفتن متوسط تعرفه مصرف گاز تجاری به ازای هر متر مکعب ۱۵۰ تومان و متوسط تعرفه مصرف برق تجاری به ازای هر کیلو وات ساعت ۲۵۰ تومان، هزینه مصرف گاز و هزینه مصرف برق پمپ حرارتی گازسوز برای کارکرد ۲۴ ساعته (۱۶ ساعت روشن + ۸ ساعت خاموش) در جدول ۴-۵ استخراج شده است.

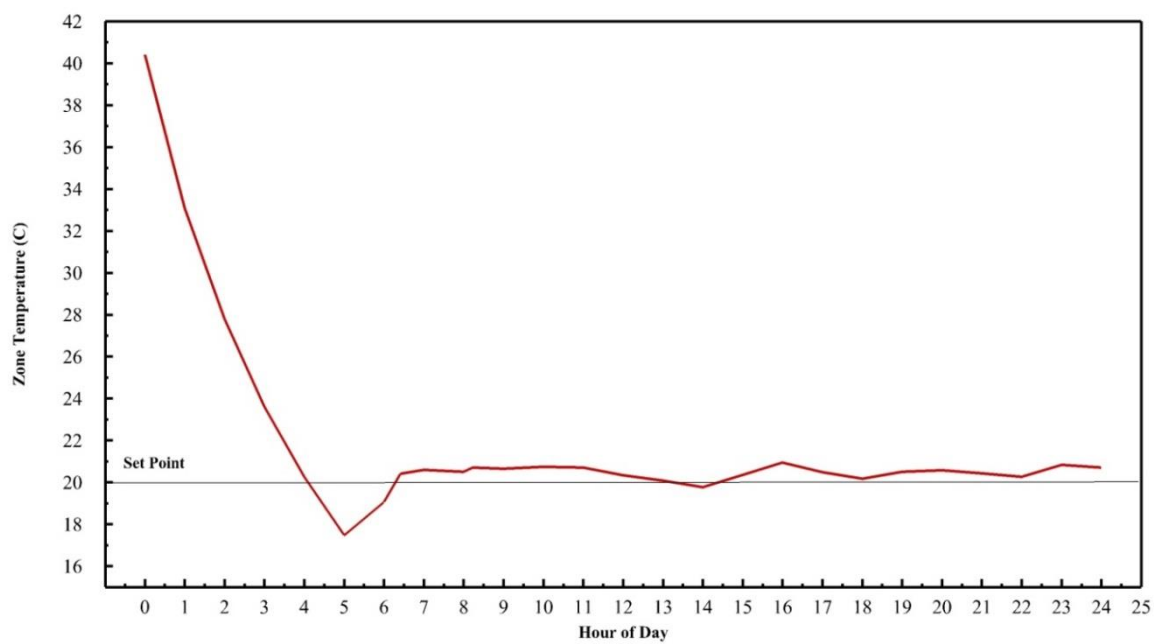
جدول ۴-۵: هزینه پمپ حرارتی گازسوز

هزینه‌های مصرفی	یک روز	یک ماه
	ریال	ریال
هزینه گاز	۹۲۲۴	۲۷۶۷۲۰
هزینه برق	۶۴۸۴	۱۹۴۵۲۰
هزینه تعمیر و نگهداری	۷۸۶	۲۳۵۸۰
جمع کل	۱۶۴۹۴	۴۹۴۸۲۰

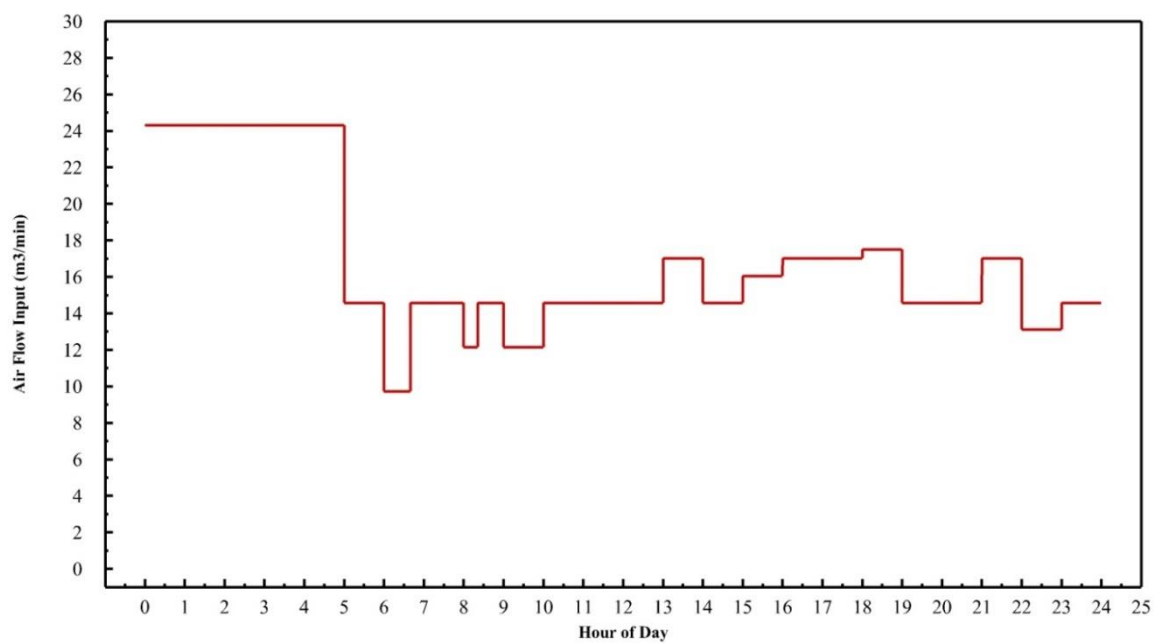
۴-۴-۳ الگوریتم کنترلی تناسبی

این الگوریتم کنترلی برخلاف الگوریتم خاموش-روشن، منطق کنترلی پیچیده‌تری دارد. سنسور درون ساختمان، دمای هوای داخل ساختمان را اندازه‌گیری می‌کند. سپس این دما را به مرکز کنترل می‌فرستد. در مرکز کنترل براساس اختلاف دمای تنظیمی کاربر با دمای اندازه‌گیری شده توسط سنسور، تصمیم‌گیری صورت می‌گیرد. پردازشگر کنترلی با توجه به اختلاف دمای تنظیمی کاربر با دمای اندازه‌گیری شده توسط سنسور، فرمان تغییر دور موتور و تغییر دور فن را می‌دهد. در پمپ‌های حرارتی گازسوز، موتور که به کمپرسور دور متغیر متصل است، این امکان را فراهم می‌کند تا با توجه به نیاز سرمایشی ساختمان، هوای تهویه شده را برای ساختمان فراهم کند. با تغییر دور موتور و به تبع آن، تغییر دور کمپرسور، نسبت فشار مبرد در ورودی و خروجی کمپرسور و یا دبی جرمی مبرد تغییر می‌کند. در نتیجه‌ی این تغییر، دمای نقطه میعان مبرد در کندانسور یا دمای نقطه تبخیر مبرد در اواپراتور تغییر می‌کند که سبب می‌شود دمای هوای عرضه شده توسط پمپ حرارتی گازسوز تغییر کند و در نتیجه ظرفیت سرمایش اواپراتور یا ظرفیت گرمایش کندانسور با توجه به نیاز سرمایشی یا گرمایشی ساختمان تغییر می‌یابد. تغییر دور فن هم باعث می‌شود تا حجم هوای ورودی سرد شده یا گرم شده توسط پمپ حرارتی گازسوز تغییر یابد. مجموعه این تغییرات و تصمیم‌ها در نهایت بر پارامترهای طراحی یعنی دمای هوای عرضه شده^۱ به اتاق و حجم هوای عرضه شده به اتاق تأثیر می‌گذارد. لازم به ذکر است در این مطالعه برای یافتن مقادیر مناسب برای دما و دبی حجمی هوای عرضه شده توسط پمپ حرارتی گازسوز، در کنار مدل‌سازی ریاضی انجام شده، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. در شکل‌های زیر نتایج حاصل از پیاده‌سازی این نوع از الگوریتم کنترلی روی مدل شبیه‌سازی شده، نشان داده شده است.

¹ Supply



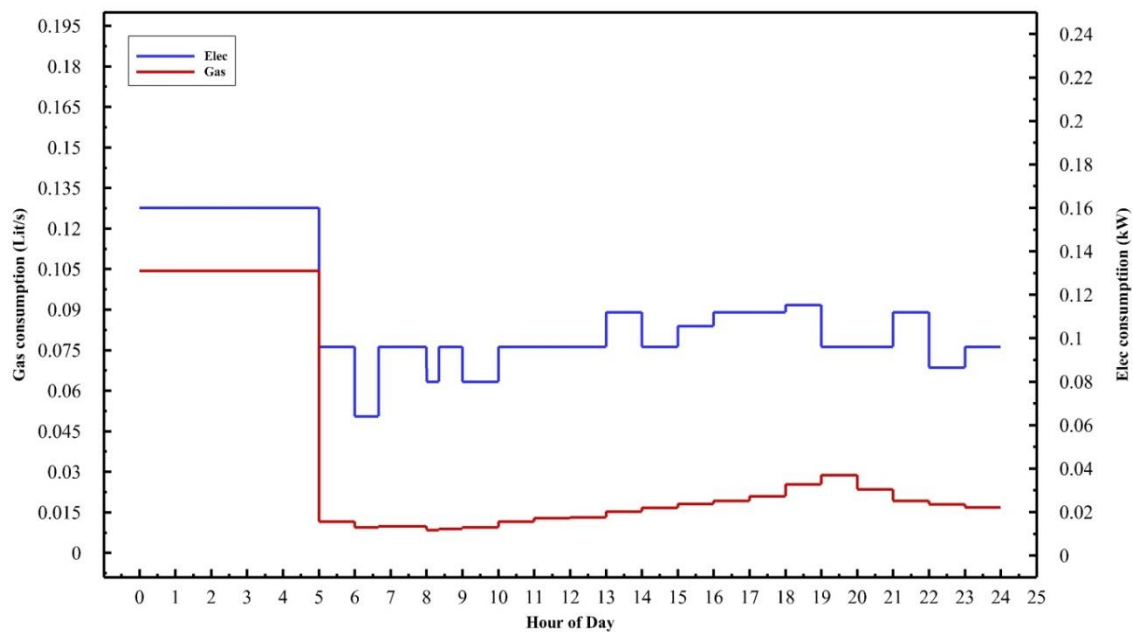
شکل ۴-۱۳: تغییرات دمای هوای ساختمان



شکل ۴-۱۴: دبی هوای ورودی به ساختمان

برای پیاده‌سازی این الگوریتم کنترلی، دمای تنظیمی کاربر ۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. بیشترین حجم هوادهی فن‌ها ۲۴/۳ مترمکعب در دقیقه و بیشترین ظرفیت سرمایش پمپ حرارتی گازسوز ۴/۵ کیلووات است. همان‌طور که در شکل ۴-۱۳: تغییرات دمای هوای ساختمان و شکل ۴-۱۴: دبی هوای ورودی به ساختمان مشاهده می‌شود، مطابق انتظار وقتی سنسور، دمای هوای داخل ساختمان را حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری می‌کند، این داده را به پردازشگر کنترلی ارسال می‌کند. در آن‌جا با توجه به اختلاف حدود ۲۰ درجه‌ای دمای هوای داخل ساختمان با دمای هوای تنظیمی توسط کاربر، پردازشگر کنترلی به موتور و فن دستور کارکرد با حداکثر توان را می‌دهد تا اختلاف دمای هوای داخل ساختمان با دمای هوای تنظیمی توسط کاربر، به حداقل برسد.

سیستم پمپ حرارتی گازسوز بعد از گذشت حدود ۵ ساعت دمای هوای داخل ساختمان را از حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد به ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد می‌رساند. در این لحظه چون اختلاف دمای هوای داخل ساختمان با دمای هوای تنظیمی توسط کاربر، به ۲/۵ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است، پردازشگر کنترلی به موتور پمپ حرارتی گازسوز و فن دستور کاهش دور را می‌دهد. در نتیجه دمای هوای داخل ساختمان روند صعودی می‌گیرد. بعد از گذشت حدود یک ساعت، دمای هوای داخل ساختمان به حدود ۲۲/۱۹ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و مجدداً پردازشگر کنترلی دستورات مناسب را به موتور پمپ حرارتی گازسوز و فن ارسال می‌کند، تا دمای هوای داخل ساختمان را در حدود دمای تعریف شده، یعنی ۲۰ درجه سانتی‌گراد نگاه‌دارد طوری که به لحاظ اقتصادی هم بهینه باشد. که این مفاهیم در شکل ۴-۱۳ و شکل ۴-۱۴ مشخص است.



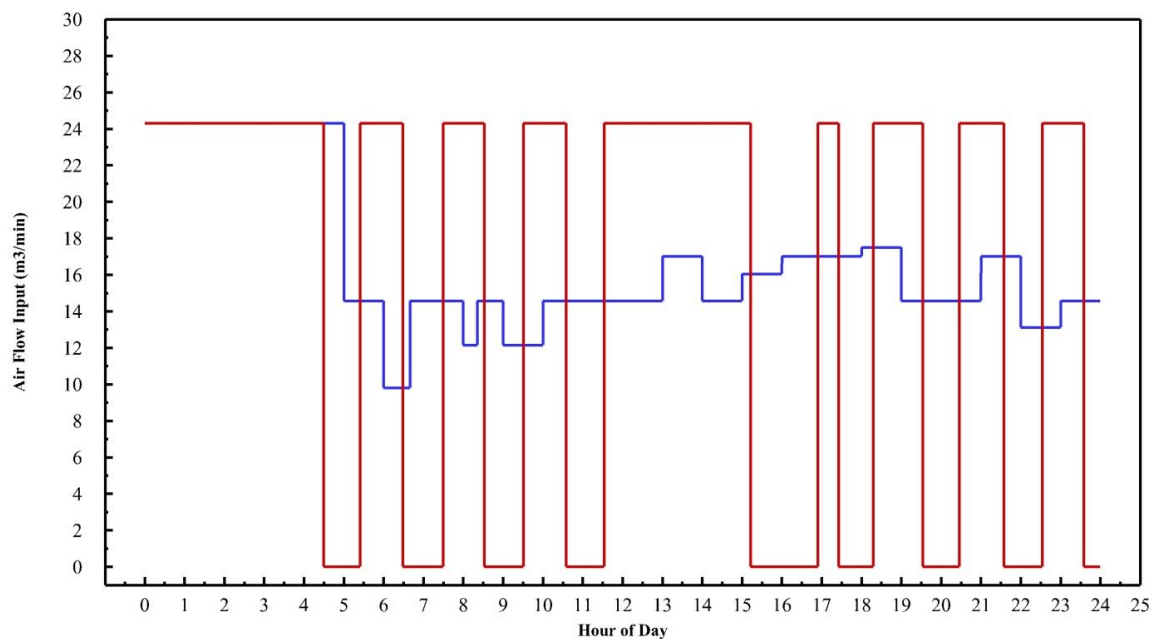
شکل ۴-۱۵: میزان مصرف گاز و مصرف برق پمپ حرارتی گازسوز

با در نظر گرفتن متوسط تعرفه مصرف گاز تجاری به ازای هر متر مکعب ۱۵۰ تومان و متوسط تعرفه مصرف برق تجاری به ازای هر کیلو وات ساعت ۲۵۰ تومان، هزینه مصرف گاز و هزینه مصرف برق پمپ حرارتی گازسوز برای کارکرد ۲۴ ساعته با الگوریتم کنترلی هوشمند در جدول ۴-۵ استخراج شده است.

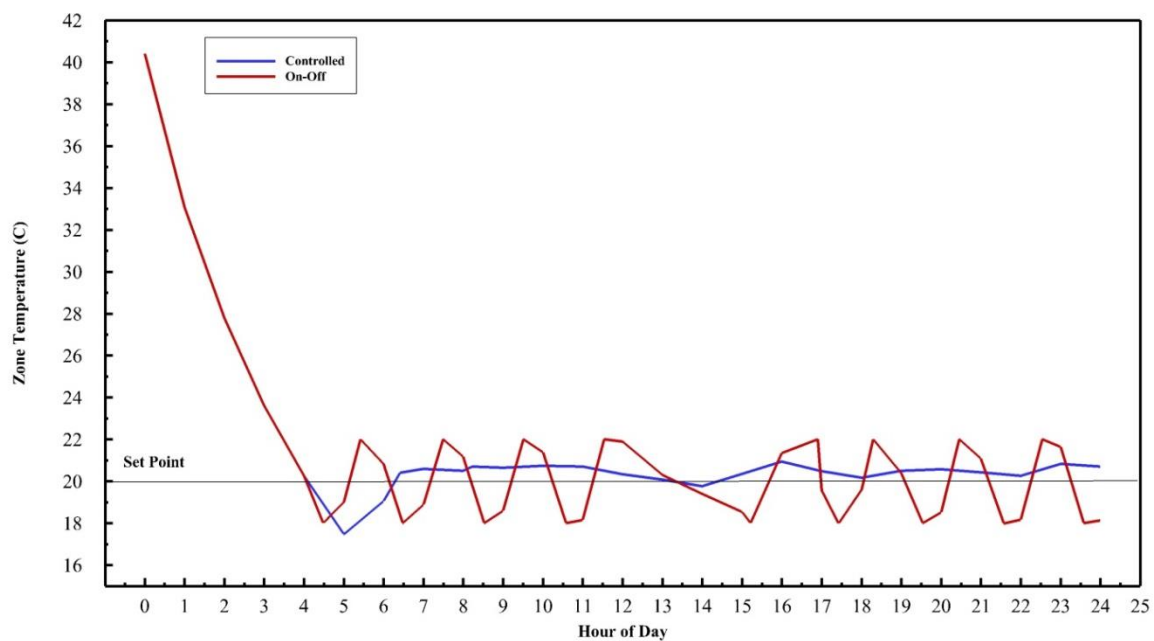
جدول ۴-۶: هزینه پمپ حرارتی گازسوز

هزینه‌های مصرفی	یک روز	یک ماه
	ریال	ریال
هزینه گاز	۵۱۲۴	۱۵۳۷۲۰
هزینه برق	۶۶۶۱	۱۹۹۸۳۰
هزینه تعمیر و نگهداری	۵۸۹	۱۷۶۷۰
جمع کل	۱۲۳۷۴	۳۷۱۲۲۰

۴-۵- مقایسه الگوریتم‌های کنترلی استفاده شده



شکل ۴-۱۶: مقایسه دبی هوای ورودی در الگوریتم‌های کنترلی



شکل ۴-۱۷: مقایسه دمای هوای داخل ساختمان در الگوریتم‌های کنترلی

جدول ۴-۷: مقایسه هزینه‌های جاری در الگوریتم‌های کنترلی در یک ۲۴ ساعت

الگوریتم کنترلی	هزینه جاری (ریال)	درصد کاهش هزینه
ترموستاتی	۱۶۴۹۴	-
کنترل هوشمند	۱۲۳۷۴	٪ ۲۴/۹۷

جدول ۴-۸: مقایسه مصرف سوخت (انرژی) در الگوریتم‌های کنترلی در یک ۲۴ ساعت

الگوریتم کنترلی	مصرف گاز m^3	مصرف برق kWh	درصد کاهش مصرف گاز	درصد کاهش مصرف برق
ترموستاتی	۶/۱۴۹	۲/۵۹۴	-	٪ ۲/۶۳
کنترل هوشمند	۳/۴۱۷	۲/۶۶۴	٪ ۴۴/۴۳	-

همان‌طور که در شکل ۴-۱۶ و شکل ۴-۱۷ و جدول ۴-۷ مشاهده می‌شود، الگوریتم کنترلی خاموش-روشن، نه تنها آسایش حرارتی مناسب را ایجاد نمی‌کند بلکه هزینه‌های ناشی از سوخت آن نیز بیشتر می‌باشد. به عبارت دیگر با بهره‌گیری از الگوریتم کنترلی هوشمند نه تنها حدود ۲۵٪ در هزینه‌های روزانه کاهش نشان می‌دهد بلکه دمای هوای داخل ساختمان نیز پایدارتر خواهد بود. علت اصلی این کاهش در هزینه‌ها تفاوت در عملکرد کمپرسور است که در حالت الگوریتم کنترلی روشن-خاموش به دلیل ۹ مرتبه تلاش برای روشن شدن موتور در طول ۲۴ ساعت هزینه راه‌اندازی کمپرسور بیشتر می‌-

شود. زیرا در زمان راهاندازی و شروع به کار موتور و کمپرسور باید به نیروی اینرسی حرکتی غلبه کند که این کار مستلزم صرف انرژی بیشتر نسبت به زمان کارکرد موتور و کمپرسور است. همین موضوع باعث افزایش انرژی مصرفی در زمان راهاندازی موتور و کمپرسور می‌شود. علاوه بر این این روشن و خاموش شدن مکرر باعث افزایش استهلاک موتور و کمپرسور و سایر تجهیزات مکانیکی پمپ حرارتی گازسوز می‌شود. همچنین با افزایش یافتن دمای هوای داخل ساختمان به حدود ۲۲ درجه سانتی‌گراد، انرژی بیشتری باید تا صرف شود تا مجدداً دمای هوای داخل ساختمان را به ۲۰ درجه سانتی‌گراد برگرداند، درحالی‌که به کمک الگوریتم کنترلی دمای هوای داخل ساختمان همواره در حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد ثابت می‌ماند و اجازه‌ی افزایش بیشتر دما را نمی‌دهد. درنتیجه به کمک الگوریتم کنترلی هوشمند و کارکرد موتور احتراق داخلی با سرعت متغیر، می‌توان سرمایه‌ی بر اساس نیاز ساختمان تأمین نمود.

در واقع پمپ حرارتی گازسوز پس از نزدیک شدن به دمای تنظیمی کاربر خاموش نمی‌شود بلکه با تغییر سرعت موتور و به تبع آن تغییر سرعت کمپرسور، گردش بار برودتی ایجاد شده را کاهش می‌دهد. این کار باعث به وجود آمدن یک توازن انرژی در ساختمان می‌شود. یعنی گرمای ایجاد شده در محیط داخلی ساختمان با گرمایی که توسط پمپ حرارتی گازسوز جذب می‌شود، برابر شده و دیگر لزومی به کارکرد پمپ حرارتی گازسوز با حداکثر توان وجود ندارد. این امر باعث می‌شود تا دمای محیط داخل ساختمان، یکنواخت‌تر گردد. همچنین قابلیت تغییر دور موتور و تغییر دور فن، باعث کاهش سروصدا و نویز مربوط به کمپرسور و فن می‌گردد.

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این فصل خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده در این پایان‌نامه ارائه می‌گردد و در نهایت موضوعاتی جدید و مکمل در راستای موضوع پایان‌نامه، پیشنهاد می‌گردد.

۵-۱- بحث و نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، ابتدا به مدل‌سازی حرارتی مستقیم یک ساختمان نمونه در شهر تهران با زیربنای ۶۴ مترمربع با روش موازنه حرارتی و استفاده از مدار معادل حرارتی به زبان برنامه‌نویسی متلب^۱ پرداخته شد. در این برنامه عددی، الگوریتم بر اساس روش تقریب تفاضل پیشرو پایه‌ریزی و از روش صریح^۲ استفاده شده است. بدین ترتیب که از مدل موجود بتوان برای تحلیل بار حرارتی و برودتی ساختمان و دمای هوای داخل ساختمان، استفاده کرد. در ادامه تکنیک‌های کنترلی خاموش-روشن^۳ و الگوریتم کنترلی فیدبک حالت (هوشمند) بر روی سیستم مدل‌سازی شده، پیاده‌سازی شد. ضرایب بهره تناسبی در الگوریتم فیدبک حالت از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۴ استخراج گردید و نتایج حاصل از پیاده‌سازی این دو الگوریتم کنترلی بر روی ساختمان مدل‌سازی شده جمع‌آوری گردید.

از مهم‌ترین نتایج و دستاوردهای این پایان‌نامه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- کد برنامه‌نویسی نوشته شده قابلیت محاسبه بار حرارتی و برودتی و همچنین تغییرات دمای هوای داخل یک ساختمان را دارد.
- کد برنامه‌نویسی نوشته شده این قابلیت را دارد تا برای ساختمان‌های با ابعاد مختلف و جنس دیوارهای مختلف خود را تطبیق دهد و بار حرارتی و برودتی و همچنین تغییرات دمای هوای داخل یک ساختمان را محاسبه کند.
- طبق نتایج بدست آمده برای فضای داخلی به زیربنای ۱۶ مترمربع در شهر تهران بیشینه بار

¹ Matlab

² Explicit

³ On-Off

⁴ Particle swarm optimization (PSO)

حرارتی ساختمان در فصل تابستان ۱۸۵۶ وات و بیشینه بار برودتی ساختمان در فصل زمستان ۸۹۹ وات محاسبه شد.

- حداکثر خطای بار حرارتی در فصل تابستان برای فضای داخلی به زیربنای ۱۶ مترمربع در شهر تهران ۵/۹۹٪ و حداقل خطا ۰/۱۵٪ محاسبه شد.
- حداکثر خطای بار برودتی در فصل زمستان برای فضای داخلی به زیربنای ۱۶ مترمربع در شهر تهران ۲۲/۳٪ و حداقل خطا ۴/۷۶٪ محاسبه شد.
- هزینه‌های جاری یک پمپ حرارتی گاز سوز شامل هزینه گاز مصرفی و هزینه برق مصرفی و همچنین هزینه ناشی از تعمیر و نگهداری، برای حالت کارکرد با کنترل روشن-خاموش به ازای کارکرد ۲۴ ساعت (۱۶ ساعت روشن و ۸ ساعت خاموش) معادل ۱۶۴۹۴ ریال محاسبه شد.
- هزینه‌های جاری یک پمپ حرارتی گاز سوز شامل هزینه گاز مصرفی و هزینه برق مصرفی و همچنین هزینه ناشی از تعمیر و نگهداری، برای حالت کارکرد با کنترل تناسبی یا هوشمند به ازای کارکرد ۲۴ ساعت (۲۴ ساعت روشن اما دور موتور و دور فن پایین است) معادل ۱۲۳۷۴ ریال محاسبه شد.
- مقایسه هزینه‌های مصرفی یک پمپ حرارتی گازسوز در دو حالت کنترل خاموش-روشن و کنترل تناسبی هوشمند، حدود ۲۵٪ صرفه‌جویی در هزینه‌های جاری این پمپ حرارتی گازسوز را نشان می‌دهد.
- مقایسه انرژی مصرفی یک پمپ حرارتی گازسوز در دو حالت کنترل خاموش-روشن و کنترل تناسبی هوشمند، که شامل مصرف گاز و مصرف برق است، حدود ۴۴/۴۳٪ صرفه‌جویی در مصرف گاز در حالت کنترل تناسبی هوشمند و حدود ۲/۶۳٪ صرفه‌جویی در مصرف برق در حالت کنترل خاموش-روشن را نشان می‌دهد.

۵-۲- پیشنهادها

به‌منظور ارتقای سطح کیفی تحقیق حاضر و انجام مطالعه‌ی جامع‌تر در راستای موضوع این پایان‌نامه، پیشنهادها و توصیه‌هایی به شرح زیر مطرح می‌گردد:

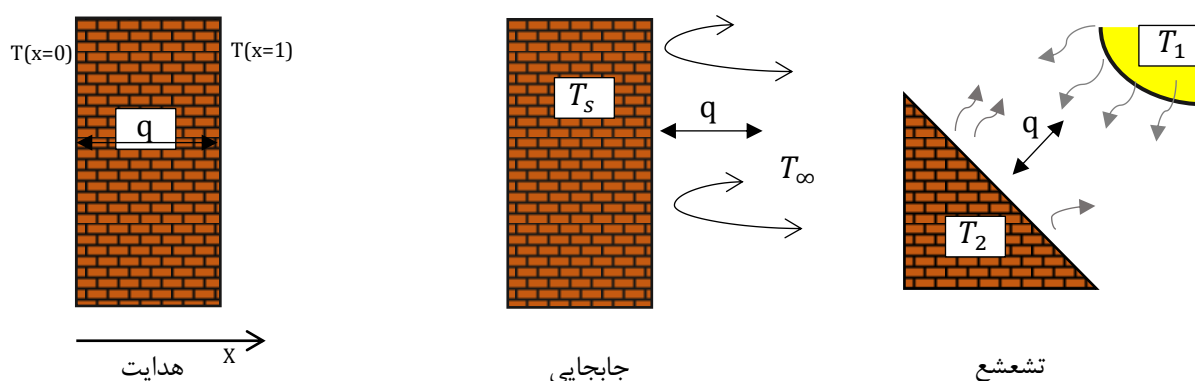
- مدل‌های ساختمانی با جزئیات بیشتر می‌تواند توسعه داده شود که از سایر منظرها مانند جدول هفتگی شاخص حضور و میزان تولید حرارت داخلی به صورت هوشمند خود را تطبیق دهد.
- تحلیل اگزرژی-اقتصادی بر روی پمپ‌های حرارتی گازسوز صورت گیرد و برای یک دوره مشخص شاخص سطح آسایش و شاخص هزینه‌های مصرفی پمپ حرارتی گازسوز استخراج شود.
- پیاده‌سازی منطق کنترلی الگوریتم تشخیص خطا در مدل‌سازی حرارتی ساختمان
- استفاده و پیاده‌سازی سایر رویکردهای استراتژی کنترل فیدبک مانند کنترل تطبیقی، کنترل مقاوم، کنترل پیش‌بین و کنترل منطق فازی برای رسیدن به دمای مطلوب و کاهش هزینه‌های ناشی از سوخت در پمپ‌های حرارتی با موتور گازسوز.
- حل و مدل‌سازی ساختمان به صورت غیر خطی و پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی غیر خطی مانند تحلیل پایداری لیاپونوف و روش بهره کوچک.
- مقایسه اقتصادی و فنی پمپ‌های حرارتی گازسوز با نسل جدید پمپ‌های حرارتی الکتریکی اینورتر.
- تحقیق بر روی یک مورد مطالعاتی آزمایشگاهی و مقایسه نتایج حاصل با نتایج مدل‌سازی عددی ساختمان.

پیوست

در این بخش بعضی از تعاریف و مفاهیم اولیه که برای مدل سازی و همچنین استخراج معادلات حاکم مفید است، جمع آوری گردیده است. به دلیل اینکه تحقیق حاضر یک موضوع میان رشته ای بین رشته های مهندسی مکانیک و مهندسی برق است سعی شده است تا به مفاهیم پایه و اساسی از هر دو رشته در این بخش پرداخته شود. به عنوان مثال، در بحث انتقال حرارت در یک ساختمان، انرژی حرارتی هم می تواند از طریق یک دیوار منتقل شود و هم می تواند به وسیله دیوار جذب شود. این مفهوم طبق اصطلاحات رایج در مهندسی برق، به این صورت بیان می شود که حرارت از طریق مقاومت ها منتقل می شود و در خازن ها ذخیره می شود. در این بخش، معادلات پایه ای که انتقال و ذخیره سازی حرارت را توصیف می کند توضیح داده شده است و در ادامه به بیان تئوری های کنترلی و مفاهیم آنها، می پردازد.

انتقال حرارت

گرما یا حرارت، ناشی از انتقال انرژی به سیستم یا از سیستم است که این انتقال انرژی ناشی از اختلاف دمای سیستم با پیرامون است. همان طور که شکل زیر در نشان داده شده است انتقال حرارت به شکل های هدایت^۱، جابجایی^۲ و تشعشع^۳ اتفاق می افتد [۵۷].



¹ Conduction

² Convection

³ Radiation

هدایت

وقتی که یک گرادیان دمایی در یک محیط ثابت وجود داشته باشد، از ترم هدایت برای اشاره به انتقال حرارتی که در سرتاسر محیط رخ می‌دهد، استفاده می‌شود. به بیان دیگر، هدایت به عنوان انتقال انرژی از ذرات پرنرژی‌تر به ذرات کم انرژی‌تر در یک جسم تعریف می‌شود. برای محاسبه مقدار انرژی منتقل شده در واحد زمان از رابطه‌ای که به قانون فوریه^۱ معروف است استفاده می‌شود. برای دیوار مسطح یک بعدی که در شکل بالا نشان داده شده است، قانون فوریه توسط رابطه زیر بیان می‌شود [۵۷]:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx}$$

$q_x(w)$ نرخ انتقال حرارت در جهت x را نشان می‌دهد که متناسب با گرادیان دمایی $\frac{dT}{dx}$ در همان جهت است. ثابت $k(\frac{W}{m.k})$ یک خاصیت انتقال حرارت است که به ضریب هدایت حرارتی معروف است و جزء خواص ترموفیزیکی جسم است و A هم مساحت سطح عمود بر جهت انتقال حرارت است. علامت منفی نتیجه‌ی این واقعیت است که گرما در جهت کاهش دما انتقال می‌یابد. در شرایط پایا^۲ توزیع دما خطی است و گرادیان دما به صورت زیر بیان می‌شود [۵۷]:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

در نتیجه نرخ انتقال حرارت به صورت زیر است [۵۷]:

$$q = \frac{kA}{L}(T_1 - T_2)$$

در مورد یک ساختمان، هدایت حرارتی از طریق دیوارهایی که در سطح داخلی و بیرونی در تعادل

^۱ Fourier's law

^۲ steady state

گرمایی نیستند اتفاق می افتد.

جابجایی

انتقال حرارت جابجایی از دو مکانیسم تشکیل شده است. علاوه بر انتقال انرژی به دلیل حرکت تصادفی مولکول‌ها، انرژی از طریق حرکت حجمی یا ماکروسکوپی^۱ سیال هم منتقل می‌شود. بنابراین حالت انتقال حرارت جابجایی را می‌توان به عنوان انتقال حرارت رخ داده در میان یک سیال به علت اثرات ترکیبی هدایت و حرکت حجمی سیال توصیف کرد. با استفاده از آزمایش‌های مختلف، رابطه میان مقدار انتقال حرارت جابجایی q ، سطح انتقال حرارت A و اختلاف دمای سطح و سیال $T_s - T_\infty$ به صورت زیر بیان می‌شود [۵۷]:

$$q = hA(T_s - T_\infty)$$

این بیان به قانون سرمایش نیوتن^۲ معروف است و ثابت تناسب ضریب انتقال حرارت جابجایی نامیده می‌شود. این ضریب به شرایط در لایه مرزی بستگی دارد که تحت تأثیر هندسه سطح، ماهیت حرکت سیال و خواص ترمودینامیکی سیال است. بدیهی است اگر حرارت از سطح انتقال پیدا کند ($T_s > T_\infty$)، جریان انتقال حرارت جابجایی مثبت و اگر انتقال حرارت به سطح انجام شود ($T_s < T_\infty$)، جریان انتقال حرارت جابجایی منفی است [۵۷].

تشعشع

در این گونه انتقال گرما، حرارت از یک جسم به جسم دیگر توسط امواج الکترومغناطیس منتقل می‌شود و بنابراین نیازی به محیط مادی نیست. در این حالت، انتقال حرارت یک تابع غیرخطی از دما بوده و با ازدیاد اختلاف دما، بیش از گونه‌های دیگر سبب افزایش میزان انتقال حرارت می‌شود. تشعشعی که از یک سطح ساطع می‌شود در واقع از انرژی گرمایی جسمی که توسط سطح احاطه شده

¹ macroscopic

² Newton's law of cooling

است سرچشمه می گیرد. نرخ انرژی آزادشده از سطح را توان صدور سطح می نامند و با E نمایش می دهند. یک حد بالا برای توان صدور اجسام وجود دارد که توسط قانون استفان - بولتزمن^۱ تعیین شده است. به جسمی که تمام انرژی واردشده به سطح خود را جذب می کند، جسم سیاه گفته می شود که رابطه آن به صورت زیر است [۵۷]:

$$E_b = \sigma T_s^4$$

که در آن T_s دمای سطح برحسب کلوین و σ ثابت استفان - بولتزمن است. ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$) میزان انرژی گسیل شده از سطح یک جسم واقعی از شاری که توسط جسم سیاه در دمای یکسان ساطع می شود کمتر است و از طریق رابطه زیر به دست می آید [۵۷]:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

که در آن، ε یک خاصیت تابشی سطح به نام ضریب صدور است که تابع دما و ماهیت جسم است. این خاصیت این را می سنجد که یک سطح به طور مؤثر، نسبت به جسم سیاه چه مقدار انرژی ساطع می کند. تشعشع همچنین روی سطح از طرف محیط اطراف اتفاق می افتد که ممکن است از یک منبع خاصی مثل خورشید و یا سایر سطوحی که در معرض است سرچشمه بگیرد. تابش ورودی به یک سطح به ازای واحد سطح، شدت تشعشع G نامیده می شود. تمام یا بخشی از تشعشع می تواند توسط سطح جذب شود در نتیجه انرژی حرارتی جسم افزایش می یابد. نسبت میزان تابش جذب شده G_{abs} ، به کل تابش ورودی به سطح جسم را ضریب جذب α ، می نامند که به صورت زیر تعریف می شود [۵۷]:

$$G_{abs} = \alpha G$$

برای جسم کدر، محدوده ضریب جذب بین صفر تا یک است و قسمتی از تابش در جسم کدر منعکس می شود. اگر نیمه شفاف باشد بخشی از تابش نیز عبور می کند. به هر حال وقتی که تابش جذب می شود

¹ Stefan-Boltzmann law

انرژی حرارتی ماده افزایش و وقتی تابش منعکس می‌شود انرژی گرمایی جسم کاهش می‌یابد و تابش عبوری از جسم هیچ تأثیری در این انرژی ندارد. مقدار ضریب جذب به ماهیت تابش و سطح جسم بستگی دارد. به عنوان مثال، ضریب جذب برای سطحی که در معرض تابش خورشید است با ضریب جذب همان سطح که در معرض تشعشعات دیوارهای کوره است متفاوت است. یک مورد خاص که غالباً اتفاق می‌افتد تبادل تشعشع میان یک سطح کوچک با دمای T_s و یک سطح بزرگ‌تر که کاملاً سطح کوچک‌تر را احاطه می‌کند، است. محیط اطراف که به طور مثال می‌تواند دیوارهای اتاق یا دیوارهای یک کوره در دمای T_{sur} باشد که این دما با دمای سطح محصور شده متفاوت است. با فرض اینکه سطح خاکستری است ($\alpha = \epsilon$)، نرخ خالص انتقال حرارت تشعشعی بر واحد سطح، به صورت زیر بیان می‌شود [۵۷]:

$$\dot{q}_{rad} = \frac{q}{A} = \epsilon E_b - \alpha G = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4)$$

این عبارت تفاوت میان انرژی حرارتی که به دلیل انتشار تشعشعات آزاد می‌شود و آن انرژی حرارتی که به دلیل جذب تشعشعات به دست می‌آید را شامل می‌شود. در زمینه‌ی آنالیز حرارتی ساختمان، از انتقال حرارت تابشی در میان دیوارهای داخلی ساختمان به دلیل پایین بودن نسبی محدوده دماهای داخل ساختمان صرف نظر می‌شود [۵۷]. در این مطالعه نیز از این مورد برای سطوح داخلی دیوارها چشم‌پوشی شده است، اما تابش خورشید به سطوح بیرونی دیوارها را در استخراج معادلات دیفرانسیل مربوط به توزیع دماهای دیوارها و اتاق‌های ساختمان در نظر خواهیم گرفت.

مدار حرارتی معادل

مقاومت حرارتی

به طور خاص یک شباهتی میان نفوذ حرارت و بار الکتریکی وجود دارد. در حالت پایا می‌توان برای حالت‌های مختلف انتقال حرارت مانند هدایت و جابجایی، مقاومت‌های حرارتی تعریف کرد. بر این

اساس می‌توان یک مدار حرارتی معادل برای تحلیل رفتار حرارتی سیستم ایجاد کرد. همان‌طور که مقاومت الکتریکی با انتقال الکتریسیته همراه است، در یک مقاومت حرارتی هم ممکن است انتقال حرارت مطرح شود. با تعریف مقاومت به عنوان نسبتی از اختلاف پتانسیل به نرخ انتقال مربوط به آن، مقاومت حرارتی برای انتقال حرارت از نوع هدایت در یک دیوار مسطح به دست می‌آید.

پتانسیل حرارتی

همان‌طور که در بالا ذکر شد در حالت پایا می‌توان برای حالت‌های مختلف انتقال حرارت مانند هدایت و جابجایی، مقاومت‌های حرارتی تعریف کرد. بر این اساس می‌توان یک مدار حرارتی معادل برای تحلیل رفتار حرارتی سیستم ایجاد کرد. همچنین نشان داده شد که معادلات استخراج شده در بحث مدار حرارتی معادل، مشابه با روابط مربوط در یک مدار الکتریکی است. شباهت دیگری که وجود دارد مفهوم پتانسیل حرارتی یا درجه حرارت در مدارهای حرارتی است که مشابه مفهوم پتانسیل الکتریکی در مدارهای الکتریکی است. در انتقال حرارت حالت پایا، پتانسیل حرارتی یا درجه حرارت یک نقطه از جسم با زمان ثابت است و تغییر نمی‌کند در حالی که در انتقال حرارت گذرا^۱ یا حالتی که ذخیره‌سازی حرارت در جسم وجود دارد، درجه حرارت ثابت نیست و با زمان تغییر می‌کند [۴۹].

خازن حرارتی

یک ویژگی اساسی از مواد، ظرفیت گرمایی ویژه C_p است که به معنای مقدار انرژی حرارتی یا گرمایی مورد نیاز برای افزایش یک واحد از دمای جسمی به وزن یک کیلوگرم است. به عبارت دیگر گرمای بیشتری مورد نیاز است تا دمای جسمی که ظرفیت گرمایی بالایی دارد را نسبت به جسمی که ظرفیت گرمایی پایینی دارد، افزایش داد. برای یک جسم با جرم m و ظرفیت گرمایی ویژه C_p ، یک نرخ تغییرات دمایی $\dot{T}$ ، وجود دارد که به جریان حرارت عبوری از جسم Q ، مربوط می‌شود که این رابطه به صورت زیر است [۴۹]:

¹ transient

$$Q = mC_p T$$

به منظور تحلیل رفتار حرارتی گذرا از یک مدل ساختمان، به معرفی خازن حرارتی نیاز است. در طول انتقال حرارت گذرا، انرژی داخلی و به تبع آن درجه حرارت مواد با زمان تغییر می‌کند. خازن حرارتی یا ظرفیت گرمایی، ظرفیت یک جسم برای ذخیره گرما است. ظرفیت گرمایی یک جسم در واحدهای $\frac{J}{K}$ یا $\frac{J}{C}$ اندازه‌گیری می‌شود که آن‌ها معادل یکدیگر هستند. اگر جسم از مواد همگن با خصوصیات فیزیکی معلوم، تشکیل شده باشد ظرفیت حرارتی آن به آسانی از ضرب جرم ماده در ظرفیت گرمایی ویژه آن ($C = mC_p$) بدست می‌آید. برای جسم‌هایی که از مواد مختلفی ساخته شده‌اند، مجموع ظرفیت گرمایی برای اجزای خالص آن‌ها در محاسبات استفاده می‌شود [۴۹].

در زمینه طراحی ساختمان، جرم حرارتی در برابر نوسانات دمایی، شرایط اینرسی یا ثابتی را فراهم می‌کند که در بعضی متون، به عنوان اثر چرخ‌لنگر^۱ حرارتی شناخته می‌شود. به عنوان مثال، زمانی که دمای خارج از ساختمان در طول روز نوسان می‌کند، یک جرم حرارتی بزرگ در داخل دیوارها می‌تواند نوسانات دمایی روزانه را به سمت میرایی در داخل ساختمان سوق دهد. وقتی که محیط داغ‌تر از جسم باشد جرم حرارتی گرما را جذب می‌کند و زمانی که محیط سردتر باشد گرما را پس می‌دهد. این ویژگی با خاصیت عایق بودن یک ماده که رسانندگی حرارتی ساختمان را کاهش می‌دهد متمایز است و هوای داخل ساختمان را به طور نسبی گرم یا سرد می‌کند. در این مطالعه، به منظور مشخص شدن سیر تدریجی دمای دیوارها و اتاق با زمان، یک خازن با ظرفیت حرارتی C ، در هر گره از مدار حرارتی ساختمان اختصاص داده شده است. باید توجه داشت که جرم‌های توزیع شده در مدل، مانند دیوارها و هوا، به عنوان گره در مدل حرارتی اتاق در نظر گرفته شده است. این تقریب براساس برخی از فرضیات ساده‌سازی که در فصل سوم ارائه شده است، در نظر گرفته می‌شود [۴۹].

¹Flywheel effect

سیستم‌های کنترل در فضای حالت

بعضی مواقع لازم است برخلاف تابع تبدیل که فقط رابطه ورودی و خروجی در یک سیستم را مشخص می‌کند، از درون سیستم هم اطلاع داشت، که این امر با نمایش فضای حالت سیستم محقق می‌شود. نمایش یک سیستم در فضای حالت، نوعی نمایش یا مدل ریاضی برای یک سیستم است که در آن به جای نمایش سیستم به وسیله یک معادله دیفرانسیل از مرتبه n ، سیستم را با n معادله دیفرانسیل خطی مرتبه یک، و یا یک معادله دیفرانسیل خطی مرتبه یک برداری، نمایش می‌دهند. انتقال سیستم به فضای حالت بدین منظور انجام می‌شود که بتوان از توصیفی از سیستم استفاده کرد که متغیرهایی از داخل و ساختار داخلی سیستم را نیز شامل شود، این چنین امکانی با استفاده از مدل‌سازی فضای حالت به دست خواهد آمد. در حالت کلی، حالت یک مجموعه از مقادیر است که اگر همراه با ورودی سیستم معلوم باشد (مقادیر آن‌ها در دسترس باشد)، آن‌گاه می‌توان از رفتار و تغییرات حالت‌های آینده و خروجی به طور دقیق اطلاع حاصل کرد.

داشتن مدل ریاضی سیستم در فضای حالت به دلایل زیر مناسب است [۲۰]:

- دیدگاه فضای حالت را می‌توان به سیستم‌های چند ورودی - چند خروجی اعمال کرد، در حالی که در سیستم‌های خطی که در حوزه لاپلاس بررسی می‌شوند، روش لاپلاس فقط برای سیستم‌های یک ورودی - یک خروجی استفاده می‌شود.
- دیدگاه فضای حالت برای سیستم‌های خطی و غیرخطی کاربرد دارد در صورتی که تحلیل در حوزه لاپلاس فقط برای سیستم‌های خطی کاربرد دارد.
- در دیدگاه فضای حالت نیاز به تبدیل لاپلاس نیست و از حوزه زمان برای بررسی سیستم استفاده می‌شود در حالی که در روش لاپلاس از حوزه فرکانس برای بررسی سیستم استفاده می‌شود.
- دیدگاه فضای حالت برای سیستم‌های متغیر با زمان کاربرد دارد در صورتی که روش لاپلاس

فقط برای سیستم‌های غیر متغیر با زمان قابل استفاده است.

- در روش فضای حالت، می‌توان معادلات حالت را به معادلات مرتبه اول تبدیل کرد و برای محاسبات عددی و استفاده از کامپیوتر و متلب سهولت زیادی ایجاد می‌شود.

متغیر حالت

متغیرهای حالت یک سیستم دینامیکی، متغیرهایی هستند که کوچکترین مجموعه متغیرها را تشکیل داده و حالت سیستم دینامیکی را تعیین می‌کنند. در واقع وضعیت هر سیستم معمولاً به وسیله‌ی یک سری متغیرهای دینامیکی که متغیرهای حالت نامیده می‌شوند مشخص می‌گردد. به عبارت دیگر متغیرهای حالت متغیرهایی هستند که با دانستن مقادیر آن‌ها در هر لحظه‌ی مشخص، بتوان وضعیت و رفتار سیستم را در آن لحظه مشخص کرد [۲۰].

ورودی

آنچه از خارج سیستم، بر سیستم اثر می‌گذارد و باعث تغییر در متغیرهای حالت سیستم می‌شود، ورودی سیستم نامیده می‌شود [۲۰].

خروجی

آنچه را که تعیین تغییراتش در یک سیستم مورد توجه باشد خروجی سیستم نامیده می‌شود [۲۰].

سه استراتژی اساسی اعمال کنترل

سه استراتژی اساسی اعمال کنترل که کلیه روش‌های کنترلی به نحوی جزء یکی از آن‌ها هستند، عبارتند از: کنترل حلقه - باز^۱، کنترل پیش‌خور^۲ و کنترل پس‌خور یا حلقه - بسته^۳ [۲۰].

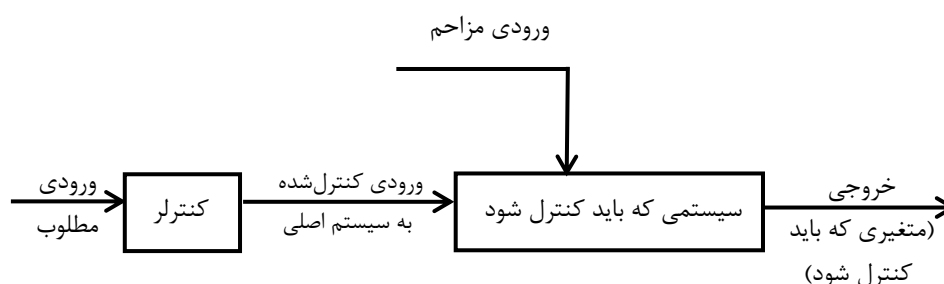
^۱ Open-Loop Control

^۲ Feedforward Control

^۳ Feedback control (Close-Loop)

کنترل حلقه - باز

اگر هدف تعیین شده برای یک مدیر کارخانه، بهینه کردن سطح تولید کارخانه‌ی تحت نظر او باشد، براساس عملکرد گذشته کارخانه و مدلی که از آن در دسترس دارد، یک برنامه معین برای عملیات کارخانه جهت رسیدن به هدف مشخص شده، تعیین می‌کند. این برنامه به صورت دستورات کنترلی به سیستم تحت کنترل (کارخانه و اجزاء آن) اعمال می‌گردد. موفقیت این استراتژی به دقت و صحت مدل و اطلاعات موجود در رابطه با عملکرد سیستم بستگی دارد و کنترل‌کننده فرض می‌کند که عوامل خارجی اثر چندانی بر عملکرد سیستم ندارند و هیچگونه بررسی در حین عمل از رفتار سیستم به عمل نمی‌آورد. اساس این استراتژی در زیر نشان داده شده است [۲۰].

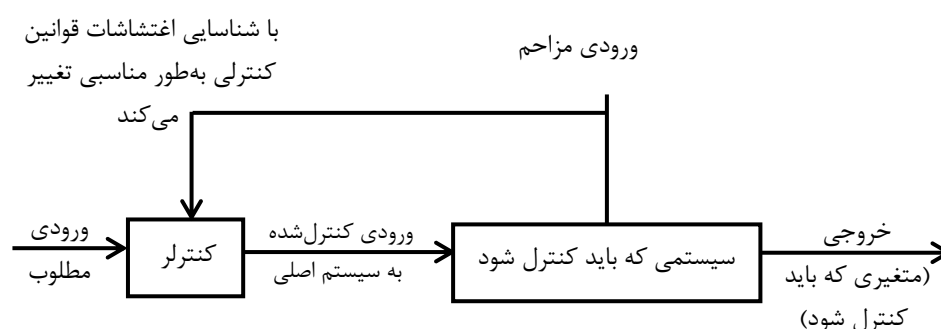


در واقع استراتژی کنترلی که در آن خروجی هیچ نقشی بر روی عمل کنترل ندارد، سیستم‌های کنترلی حلقه- باز نامیده می‌شود، به عبارت دیگر، در کنترل حلقه- باز خروجی سیستم برای مقایسه با اهداف و مشخصه‌های مطلوب، به کار گرفته نمی‌شود.

کنترل پیش‌خور

بدیهی است اگر عوامل خارجی بر سیستم تحت کنترل اثر قابل توجهی بر روی سیستم داشته باشد، نادیده گرفتن آن‌ها توسط طراح سیستم کنترلی، به اختلال در عملکرد سیستم منجر می‌گردد. ممکن است در شرایط خاصی، بتوان این عوامل خارجی را از بین برده و یا آن‌ها را تضعیف کرد، در غیر اینصورت برای اجتناب از اختلال در عملکرد سیستم، باید استراتژی کنترل را عوض کرد. در واقع با

تغییر و بهبود مدل، اثر این عوامل خارجی یا اغتشاشات را پیش‌بینی و با در نظر گرفتن آن‌ها قوانین کنترلی دوباره بررسی می‌شود. در این بررسی‌ها، فرمان‌های کنترلی به گونه‌ای طراحی خواهند شد تا اثر این اغتشاشات را به حداقل برساند. به چنین استراتژی کنترلی که در آن عوامل خارجی در نظر گرفته شده، و اعمال کنترلی برای مقابله با آن‌ها طراحی می‌شوند، کنترل پیش‌خور گفته می‌شود. شکل زیر نحوه عملیات در استراتژی کنترل پیش‌خور را نشان می‌دهد [۲۰].

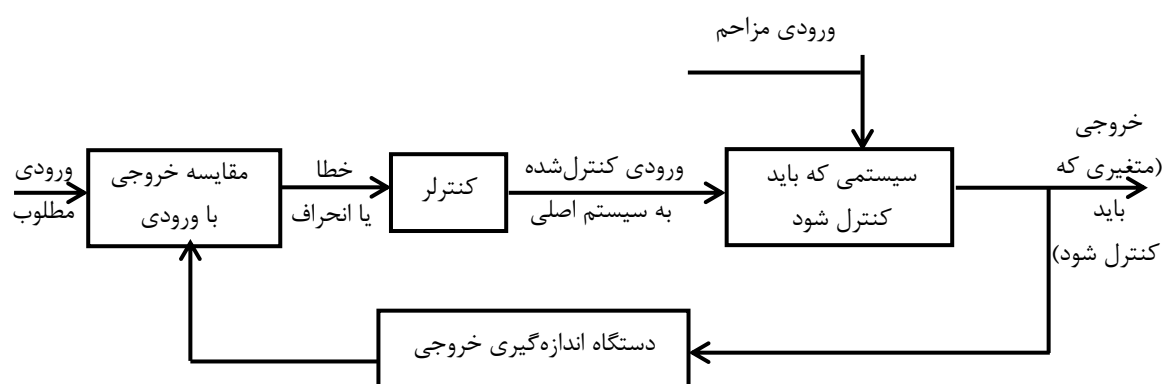


کنترل حلقه - بسته

کنترل پیش‌خور تنها در صورتی یک استراتژی کنترل‌کننده‌ی عملی است که اغتشاشات کم و یا معینی وجود داشته باشد و بتوان آن‌ها را به راحتی اندازه گرفت. اما اگر تعداد اغتشاشات بسیار زیاد باشد و یا اینکه زمان وقوع و ماهیت آن‌ها نا معلوم باشد، آن‌گاه از استراتژی کنترلی پیش‌خور نمی‌توان استفاده کرد. در این حالت از استراتژی سوم کنترل استفاده می‌شود. در این استراتژی کنترل‌کننده با مشاهده خروجی، انحراف رفتار کلی سیستم از رفتار مطلوب را در نظر گرفته و برای اصلاح این انحراف عمل می‌کند [۲۰].

اساس این استراتژی در شکل زیر نشان داده شده است. باید دقت شود در این‌جا نیز اغتشاشات خارجی وجود دارند و بر رفتار سیستم اثر می‌گذارند. اگر خروجی سیستم با مشخصه‌ها و اهداف تعیین شده، مطابقت نداشته باشد، خطایی به وجود می‌آید و این خطا یا انحراف، به سیستم کنترل اعمال می‌گردد و سیستم کنترل با توجه به خطا، فرمان کنترلی مناسبی را صادر می‌کند. همانطور که در

شکل زیر مشاهده می‌شود در این سیستم کنترلی، خروجی سیستم اندازه‌گیری شده و توسط یک مقایسه کننده با اهداف سیستم یا مشخصه‌های عملکرد تعیین شده مقایسه می‌شود. خطای ایجاد شده از این مقایسه به سیستم کنترل برای صدور فرامین کنترلی مناسب، اعمال می‌گردد. عبارت کنترل فیدبک^۱ برای توصیف این استراتژی به کار گرفته می‌شود. کنترل فیدبک انواع مختلفی دارد از جمله کنترل فیدبک خروجی و کنترل فیدبک حالت که نمای شماتیک کنترل فیدبک خروجی در شکل زیر نمایش داده شده است [۲۰].



در کنترل فیدبک، فرمان‌های کنترلی اعمال شده به سیستم براساس مقدار و میزان خطای موجود در پاسخ سیستم محاسبه می‌شوند. بدین معنی که پس از مشاهده و اندازه‌گیری خروجی سیستم، این خروجی با مقدار مطلوب آن مقایسه می‌گردد و اختلاف آن به سیستم کنترل ارائه می‌شود. به جای عبارت کنترل فیدبک از عبارت کنترل حلقه - بسته نیز استفاده می‌شود، در واقع عبارت حلقه - بسته در مقابل عبارت حلقه - باز به کار گرفته می‌شود. در استراتژی کنترل حلقه - بسته برخلاف کنترل حلقه - باز و پیش‌خور، اطلاع از یک مدل کاملاً دقیق از سیستم الزامی نیست. زیرا خطاهای ایجاد شده در خروجی سیستم، به دلیل اطلاعات ناکافی از مدل سیستم، با تصحیح کنترل کننده کاهش پیدا می‌کند، مانند مواقعی که سیستم تحت اغتشاش قرار می‌گیرد [۲۰].

طرح شماتیک بالا در تحلیل سیستم‌ها و فرآیندهای مهندسی دارای کاربرد گسترده‌ای است. در این

¹ Feedback Control

سیستم‌ها هدف آن است که خروجی سیستم، یعنی متغیری که باید کنترل شود، حتی‌المقدور به ورودی مبنا که مقدار مطلوب و مورد نظری است، نزدیک باشد. چنین سیستم مدار بسته‌ای تا حد زیادی به این هدف نزدیک خواهد بود. باید در نظر داشت که سیستم کنترل فیدبک وقتی فعال می‌شود که خروجی یا عکس‌العمل سیستم به عللی از مقدار مطلوب و مورد نظر خود دور شود. در این صورت سیستم کنترل فیدبک خود به خود آن را به حالت مطلوب برمی‌گرداند، از این‌رو به آن سیستم کنترل خودکار یا اتوماتیک هم گفته می‌شود. به طور کلی دو عامل می‌تواند باعث تغییرات نامطلوب در خروجی سیستم شود، که این عوامل عبارتند از [۲۰]:

- تغییر پارامترهای اصلی سیستم

- تاثیر ورودی مزاحم

ویژگی مهم کنترل فیدبک آن است که با وجود چنین تغییراتی، این سیستم کنترلی با استفاده از مدار فیدبک با کم و زیاد کردن ورودی کنترل‌شده به سیستم اصلی، خروجی سیستم را به مقدار مطلوب آن بازمی‌گرداند. در سیستم کنترلی مدار بسته علاوه بر خودکار بودن کنترل خروجی، دو مزیت عمده دیگر نسبت به سیستم کنترلی مدار باز وجود دارد که عبارتند از [۲۰]:

- اثر ورودی‌های مزاحم در سیستم کنترلی مدار بسته بسیار کمتر از اثر آن‌ها در سیستم کنترلی مدار باز است.

- حساسیت سیستم کنترلی مدار بسته نسبت به تغییرات پارامترهای اصلی سیستم خیلی کمتر از سیستم کنترلی مدار باز است.

تکنیک‌های کنترلی فیدبک با توجه به مکانیزم عمل آن‌ها به روش‌هایی شناخته می‌شوند که کمترین حساسیت را به تغییرات در پارامترهای سیستم دارند. رویکردهای مختلفی در زمینه استراتژی کنترل فیدبک وجود دارد. این رویکردها شامل، کنترل خطی فیدبک حالت^۱، کنترل تطبیقی^۱، کنترل مقاوم^۲،

^۱ linear state feedback control

کنترل پیش‌بین^۳ و کنترل منطق فازی^۴ می‌باشد. کنترل خطی فیدبک حالت، یک روش ساده برای کنترل فیدبک سیستم‌ها به‌خصوص سیستم‌هایی با چند ورودی است. معمولاً ضرایب بهره^۵ در موضوع کنترل فیدبک حالت، با استفاده از حل معادله ریکاتی^۶ یا روش استقرار قطب‌ها^۷ بدست می‌آید. به هرحال این رویکردها همچنان براساس روش‌های سعی و خطا^۸ استوار هستند. یکی از روش‌هایی که می‌توان از آن برای به حداقل رساندن تلاش‌ها در روش سعی و خطا برای بدست آوردن ضرایب بهره استفاده نمود، به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی هوشمند مانند الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۹ است، که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌است [۲۳].

الگوریتم‌های کنترل‌کننده

الگوریتم کنترلی تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر^{۱۰} از رایج‌ترین نمونه‌های الگوریتم کنترل فیدبک است که در بسیاری از فرآیندهای کنترلی نظیر کنترل سرعت موتور DC، کنترل فشار، کنترل دما و ... کاربرد دارد. هدف از به کار بردن الگوریتم تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر در کنترل حلقه بسته، کنترل دقیق و سریع خروجی سیستم تحت شرایط متفاوت و بدون دانستن دقیق رفتار سیستم در پاسخ به ورودی است. الگوریتم تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر از سه قسمت مجزا تشکیل شده که هر کدام از آنها سیگنال خطا را به عنوان ورودی گرفته و عملیاتی را روی آن انجام می‌دهند و در نهایت خروجی آن‌ها با هم جمع می‌شود. خروجی این مجموعه که همان خروجی الگوریتم کنترلی تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر است برای اصلاح خطا به سیستم فرستاده می‌شود [۵۸].

در بسیاری از کنترل‌کننده‌ها به علت حساسیت عبارت مشتق نسبت به نویز و اجرای دشوار آن، از

¹ adaptive control

² robust control

³ predictive control

⁴ Fuzzy logic control

⁵ Gain

⁶ Riccati equation

⁷ pole placement method

⁸ Trial and Error

⁹ Particle swarm optimization (PSO)

¹⁰ Proportional- Integrator-Derivative (PID)

عبارت مشتق‌گیر صرف نظر کرده و کنترل را به صورت تناسبی-انتگرالی پیاده‌سازی می‌کند. سیگنال ورودی سیستم یا همان خروجی الگوریتم کنترلی بر اساس نسبتی از خطای کنونی سیستم (عملکرد حاضر)، به اضافه مجموع خطاهای سیستم (رفتار گذشته)، به اضافه مشتق خطای کنونی (تخمین خطی رفتار آینده) محاسبه می‌شود و برای اصلاح خطا به سیستم اعمال می‌گردد. ضرایب بهره‌ای که در این الگوریتم وجود دارند نیز می‌توانند با تکنیک‌های شناخته شده‌ای مانند تابع انتقال و یا استفاده از روش‌های بهینه‌سازی به صورت بهینه محاسبه شوند. اگرچه در کاربردهای عملی، به‌طور رضایت‌بخشی می‌توانند با سعی و خطا و مشاهده رفتار سیستم به‌طور تقریبی تعیین گردند [۵۸].

الگوریتم کنترلی تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر همان‌طور که در بالا شرح داده شد، از حاصل جمع سه کنترل‌کننده تناسبی، انتگرالی، مشتق‌گیر تشکیل شده است. به عنوان مثال اگر هدف تثبیت دمای هیتر روی ۵۰ درجه سانتیگراد باشد، پس مقدار مطلوبی که تلاش کنترلی در جهت رسیدن به آن انجام می‌شود ۵۰ درجه سانتیگراد است. حال اگر سیگنالی به هیتر اعمال شود و دمای هیتر به ۵۰ درجه سانتیگراد برسد یعنی این‌که سیگنال خطا برابر با صفر شده، پس فقط کنترل‌کننده تناسبی وارد عمل می‌شود و پروسه را کنترل می‌کند و قسمت انتگرالی و مشتق‌گیر مقدار صفر را خواهند داشت [۵۸].

اگر دمای اندازه‌گیری شده بیشتر یا کمتر از مقدار مطلوب شود آن‌گاه کنترل‌کننده انتگرالی و مشتق‌گیر وارد عمل خواهند شد تا پروسه را به مقدار مطلوب برسانند. زمانی این دو کنترل‌کننده وارد عمل خواهند شد که سیگنال خطا داشته باشیم (صفر نباشد) آنگاه قسمت انتگرالی از سیگنال خطا انتگرال می‌گیرد و قسمت مشتق‌گیر هم از سیگنال خطا مشتق می‌گیرد که حاصل جمع این سه عمل‌گر، خروجی الگوریتم کنترلی تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر می‌باشد. روشن است که الگوریتم کنترلی تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر چه کاربرد مهمی در پروسه‌ها مخصوصاً پروسه‌های غیر قابل پیش‌بینی دارد. الگوریتم کنترلی تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر با استفاده از خطاهای قبلی و خطاهای حال،

آینده را پیش بینی کرده و تدابیری برای کنترل هر چه بهتر سیستم ایجاد می کند [۵۸].

مسئله بهینه سازی

مسئله بهینه سازی به شکل زیر می تواند ارائه شود:

با فرض تابع $f: A \rightarrow R$ که در آن R مجموعه اعداد حقیقی است، یافتن عنصری از A که تابع f را کمینه می کند، یک مسئله بهینه سازی یا مسئله برنامه ریزی ریاضی نامیده می شود. A زیرمجموعه ای از فضای اقلیدسی R^n است که اغلب با مجموعه ای از قیود، یعنی معادلات و نامعادلاتی که اعضای A باید آن ها را ارضا کند، مشخص می شود. دامنه f مجموعه انتخاب یا فضای جستجو خوانده می شود، درحالی که عناصر A جواب های ممکن یا قابل دستیابی نامیده می شوند. تابع f عموماً تابع هدف خوانده می شود. جواب قابل دستیابی یا شدنی که تابع هدف را مینیمم کند و یا اگر هدف ماکزیمم سازی باشد، آن را ماکزیمم کند، جواب بهینه مسئله است [۵۹].

برنامه ریزی محدب^۱

برنامه ریزی محدب به بررسی حالتی می پردازد که تابع هدف از نوع محدب است و اگر در مسئله قیدی وجود داشته باشد یک مجموعه محدب را شکل می دهد. می توان آن را حالت خاصی از برنامه ریزی غیرخطی یا تعمیمی از برنامه ریزی درجه دوم محدب در نظر گرفت. برنامه ریزی خطی نوعی از برنامه ریزی محدب است که به بررسی مواردی می پردازد که در آن تابع هدف خطی است و مجموعه قیود با استفاده از معادلات و نامعادلات خطی مشخص می شود. چنین مجموعه ای اگر کراندار باشد چندوجهی یا کثیرالوجه خوانده می شود. برنامه ریزی مخروط مرتبه دوم نیز نوعی از برنامه ریزی محدب است که شامل انواع خاصی از برنامه های درجه دوم است. برنامه ریزی شبه معین نوعی از برنامه ریزی محدب و تعمیمی است از برنامه ریزی خطی و درجه دوم که متغیرهای تحت بررسی آن، ماتریس های شبه معین است. برنامه ریزی مخروطی شکل عمومی برنامه ریزی محدب است. در واقع برنامه ریزی خطی، برنامه -

¹ Convex

ریزی مخروط مرتبه دوم و برنامه ریزی شبه معین را می توان به عنوان حالت خاصی از برنامه ریزی محدب در نظر گرفت [۲۰].

برنامه ریزی عدد صحیح به بررسی آن دسته از برنامه ریزی های خطی می پردازد که در آن همه و یا برخی از متغیرها، تنها مقادیر صحیح اتخاذ می کنند. برنامه ریزی درجه دوم در تابع هدف آن جملات از مرتبه دو ظاهر می شوند، در حالی که مجموعه مقادیر ممکن به وسیله معادلات و نامعادلات خطی مشخص می شود. حالات خاصی از تابع هدف را می توان تحت برنامه ریزی محدب بررسی کرد. برنامه ریزی غیرخطی به بررسی مواردی می پردازد که در آن تابع هدف یا قیود و یا هر دوی آن ها حاوی بخشی غیرخطی هستند. برنامه ریزی تصادفی به بررسی مواردی می پردازد که در آن برخی قیود یا پارامترها به متغیرهای تصادفی بستگی دارند. برنامه ریزی ترکیباتی مسائلی را مدنظر دارد که مجموعه جواب های ممکن گسسته اند و یا می توانند به شکل گسسته تبدیل شوند [۲۰].

انواع مسائل بهینه سازی

در ریاضیات، مسئله بهینه سازی، مسئله یافتن بهترین جواب از تمام جواب های ممکن است. برای هر مسئله بهینه سازی، یک مسئله تصمیم متناظر وجود دارد که در پی یافتن جوابی ممکن، برای یک اندازه خاص از متغیرهای مسئله است. در الگوریتم های تخمین، الگوریتم ها برای یافتن جواب های نزدیک به بهینه برای مسائل پیچیده طراحی می شود. اگرچه در این مسائل هم می توان مسائل تصمیم متناظر تعریف کرد، ولی عموماً آن را با مسائل بهینه سازی مشخص می کنند که طبیعی تر هم هست. در زیر یک تقسیم بندی از مسائل بهینه سازی مشاهده می شود [۵۹]:

- بهینه سازی تک بعدی و بهینه سازی چند بعدی: اگر تنها یک متغیر در مسئله بهینه سازی وجود داشته باشد، مسئله بهینه سازی تک بعدی و در غیر این صورت چند بعدی خوانده می شود.
- بهینه سازی پویا و بهینه سازی ایستا: اگر تابع هزینه مسئله بهینه سازی تابعی از زمان نباشد، با یک مسئله بهینه سازی ایستا سر و کار داریم؛ ولی اگر زمان نیز وارد تابع هزینه شود مسئله

بهینه‌سازی پویا می‌شود.

- بهینه‌سازی مقید^۱ و نامقید: اگر متغیرهای مسئله بهینه‌سازی به مجموعه و یا قید خاصی محدود شده باشند، با یک مسئله بهینه‌سازی مقید سروکار داریم و در غیر این صورت مسئله بهینه‌سازی نامقید است.
- بهینه‌سازی پیوسته و بهینه‌سازی گسسته: یک مسئله بهینه‌سازی گسسته مسئله‌ای است که در آن مقادیر متغیرهای مسئله از یک مجموعه معین گسسته هستند. در حالی که در یک مسئله پیوسته، مقادیر متغیرها از یک مجموعه پیوسته هستند.
- بهینه‌سازی تک‌معیاره^۲ و بهینه‌سازی چندمعیاره^۳: یک مسئله بهینه‌سازی تک‌معیاره دارای تنها یک تابع هدف می‌باشد اما در یک مسئله چند معیاره تعداد تابع هدف‌هایی که به‌طور هم‌زمان بهینه می‌شوند بیش از یکی است. معمولاً در یک مسئله بهینه‌سازی چند معیاره، با دادن اهمیتی وزنی به هریک از توابع هدف و جمع بستن آن‌ها، مسئله را تبدیل به یک مسئله تک معیاره می‌کنند. حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، به تنهایی مبحث مستقل و مهمی از حوزه بهینه‌سازی است.

روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی

برای حل مسائل بهینه‌سازی از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. تقسیم بندی کلی این روش‌ها بدین ترتیب می‌باشد که روش‌های موجود را به دو دسته تقسیم بندی می‌کنند که این دو دسته عبارتند از:

- روش‌های کلاسیک یا روش‌های ریاضی (بر پایه‌ی محاسبات گردیان)
- روش‌های هوشمند یا فراابتکاری (بر پایه‌ی تشکیل جمعیت)

دسته‌ی اول روش‌ها یعنی روش‌های کلاسیک یا ریاضی، به مجموعه روش‌هایی اطلاق می‌شود که بر

¹ Constrained Optimization

² Single Objective

³ Multi Objective

پایه‌ی محاسبات گرادیان و مشتق تابع، به جواب بهینه می‌رسند. دسته‌ی دوم روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی روش‌های هوشمند می‌باشند که به الگوریتم‌های فرا ابتکاری نیز معروف می‌باشند. این الگوریتم‌ها با الگو گیری در رفتار طبیعت، یک روشی مبتنی با جمعیت (متشکل از ذرات) دارند به طوری که با تشکیل جمعیت و جستجوی آن در مجموعه جواب‌های مسئله، به سمت جواب بهینه رفته و آن را پیدا می‌کند. این الگوریتم‌ها ماهیتی تصادفی دارند و به همین دلیل جواب قطعی به ما نمی‌دهند. ولی از آنجاکه در جستجوی بهینه‌ی سراسری بهتر از روش‌های کلاسیک عمل می‌کنند و دچار بهینه محلی نمی‌شوند، همواره در مسائل غیر محدب از آن‌ها استفاده می‌شود. در ادامه به تشریح هر یک از این روش‌ها پرداخته شده و چند نمونه از این روش‌ها معرفی شده است [۵۹].

روش‌های کلاسیک

همان‌طور که در بالا گفته شد، دسته‌ی اول روش‌های حل مسئله‌ی بهینه‌سازی که به روش‌های کلاسیک یا ریاضی شهرت دارند، به مجموعه روش‌هایی اطلاق می‌شود که بر پایه‌ی محاسبات گرادیان و مشتق تابع، به جواب بهینه می‌رسند. این روش‌ها چون بر پایه‌ی محاسبات ریاضی قطعی عمل می‌کنند همواره به یک جواب یکتا می‌رسند ولی محدودیت این روش‌ها در آن است که قادر به پاسخ‌گویی مسائل غیر محدب نمی‌باشند. در زیر چند نمونه از روش‌های پرکاربرد این دسته توضیح داده شده است [۵۹]:

- ضرایب لاگرانژ: هنگامی که با قیود به شکل معادله (تساوی) سر و کار داریم، این روش بهینه‌سازی بسیار کارا خواهد بود. به علاوه، هنگامی که مقادیر ثابت قیود تغییر می‌کند، اطلاعات با ارزشی از مقدار بهینه تابع هدف در اختیار می‌گذارد.
- شرایط کاروش-کان-تاکر^۱: در ریاضیات، شرایط کاروش-کان-تاکر و یا کان-تاکر، شرایط لازم برای جواب بهینه در برنامه‌ریزی غیرخطی می‌باشد، مشروط بر آن که برخی شرایط ارضا

¹ Karush-Kuhn-Tucker

شود. کان- تاکر در واقع تعمیمی است بر روش ضرایب لاگرانژ که در آن قیود نامساوی هم در نظر گرفته شده است.

- کنترل بهینه: نظریه کنترل بهینه، یک روش بهینه‌سازی ریاضی برای به دست آوردن قوانین کنترلی و همچنین یک حالت تعمیم یافته از حساب تغییرات است. این روش به وسیله پونتریاگین^۱ و همکارانش در شوروی و نیز ریچارد بلمن^۲ در آمریکا ابداع شد. نظریه کنترل بهینه در پی یافتن قانون کنترل برای یک سیستم مشخص است به شکلی که معیار بهینگی معینی به دست آید.

روش‌های هوشمند

در کنار روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر گرادیان، روش‌های بهینه‌سازی دیگری نیز معرفی شده اند که به حل مسائل مختلف در این حوزه کمک می‌کنند. این روش‌ها در بسیاری از دسته‌بندی‌ها تحت عنوان روش‌های بهینه‌سازی هوشمند، روش‌های بهینه سازی و محاسبات تکاملی و یا جستجوی هوشمند شناخته می‌شود. این روش‌ها این‌مزیت را دارند که بدون نیاز به مشتق تابع هزینه به یافتن نقطه بهینه آن می‌پردازند و همچنین در مقایسه با روش‌های مبتنی بر گرادیان، کمتر مشکل افتادن در دام کمینه محلی را دارند. در مقابل اگر هدف، رسیدن به یک جواب بهینه‌ی محلی باشد، این روش‌ها بسته به کاربرد، ممکن است سرعت کمتری در مقایسه با روش‌های مبتنی بر گرادیان داشته باشند. از میان این روش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۵۹]:

- الگوریتم ژنتیک^۳
- الگوریتم ازدحام ذرات^۴
- الگوریتم کلونی مورچه‌ها^۱

¹ Pontryagin

² Richard Bellman

³ Genetic Algorithm

⁴ Particle Swarm Optimization

- جستجوی تابو^۲

- تبرید شبیه‌سازی شده^۳

- تکامل تفاضلی^۴

در طراحی سیستم‌های مهندسی، طرحی مقبول‌تر است که علاوه بر تامین تمامی نیازها و شرایط خواسته شده، هزینه کمتری نیز داشته باشد. بنابراین جستجوی روش‌هایی کارا برای کمینه کردن هزینه و بهینه‌سازی طرح‌های مهندسی از دیرباز در علوم مهندسی مورد توجه قرار گرفته است. بسته به اهمیت و مسائل امنیتی سیستم، هزینه می‌تواند در اولویت اول یا اولویت دوم قرار بگیرد.

بهینه کردن تابع هدف در بیشتر روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی، توالی معینی از محاسبات را دارا می‌باشند. این روش‌ها یک نقطه از فضای جستجو را برای شروع در نظر می‌گیرند و به تدریج در میان صعودی‌ترین یا نزولی‌ترین ناحیه‌ها بهبود می‌یابند. این شیوه نقطه به نقطه، مشکل اساسی قرار گرفتن در یک نقطه بهینه محلی را به وجود می‌آورد. ساده‌ترین راه برای بدست آوردن یک جواب محلی بهتر، این است که بهینه‌سازی از نقاط اولیه متفاوتی که به شکل تصادفی انتخاب شده اند، تکرار شده، تا جواب‌های دیگر نیز بررسی و مقایسه شوند. با این وجود، برای مسائلی که تعداد زیادی متغیر دارند امکان عدم دستیابی به مینیمم فراگیر زیاد است مگر آنکه فرآیند جستجو از نقاط اولیه متفاوت، در تعداد دفعات زیادی انجام شود.

یکی از تفاوت‌های اصلی روش هوشمند با روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی، در این است که در روش هوشمند، جمعیت یا مجموعه‌ای از نقاط در یک لحظه خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد، در صورتی که در روش‌های کلاسیک، بهینه‌سازی تنها برای یک نقطه خاص اعمال می‌گردد. این بدان معناست که روش هوشمند تعداد زیادی از طرح‌ها را در یک زمان مورد پردازش قرار می‌دهد. الگوریتم هوشمند با

¹ Ant Colony

² Tabu search

³ Simulating annealing

⁴ Differential evolution

یک مجموعه ابتدایی از راه حل‌های تصادفی که جمعیت اولیه نامیده می‌شود آغاز می‌شود. هر انتخاب در جمعیت مورد نظر یک ذره نامیده می‌شود که نشان دهنده یک راه حل برای مسئله است. یک ذره، رشته‌ای از نمادها یا اعداد صفر و یک است و از طریق تکرارهای متوالی که نسل‌ها نامیده می‌شوند تکامل می‌یابد. در هر نسل ذره‌ها با استفاده از معیارهای برازندگی ارزیابی می‌شوند و پس از چند نسل، الگوریتم به سمت بهترین ذره همگرا می‌شود، که راه حل بهینه یا نزدیک به بهینه‌ای را ارائه می‌کند [۵۹].

مراجع

- [1] A. Novoselac, "Combined airflow and energy simulation program for building mechanical system design," 2004.
- [2] سایت شرکت بهینه سازی مصرف سوخت
http://www.ifco.ir/building/building_index.asp
- [3] س. نیکوفرد، "محاسبه مصرف انرژی تجهیزات گرمایشی مختلف جهت طراحی بهینه تجهیزات مصرف انرژی ساختمان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۵.
- [4] P. Tuomaala, Implementation and evaluation of air flow and heat transfer routines for building simulation tools: VTT Technical Research Centre of Finland, 2002.
- [5] V. Harish and A. Kumar, "A review on modeling and simulation of building energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 1272-1292, 2016.
- [6] م. ک. حصار، تأسیسات مکانیکی ساختمان: انتشارات جهان فردا، ۱۳۸۵.
- [7] C. Petersdorff, T. Boermans, and J. Harnisch, "Mitigation of CO2 emissions from the EU-15 building stock. beyond the EU directive on the energy performance of buildings (9 pp)," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 13, pp. 350-358, 2006.
- [8] F. Ascione, N. Bianco, C. De Stasio, G. M. Mauro, and G. P. Vanoli, "Simulation-based model predictive control by the multi-objective optimization of building energy performance and thermal comfort," *Energy and Buildings*, vol. 111, pp. 131-144, 2016.
- [9] D. G. Stephenson and G. Mitalas, "Cooling load calculations by thermal response factor method," *ASHRAE Trans. (United States)*, vol. 73, 1967.
- [10] C. Pedersen, D. Fisher, and R. Liesen, "A heat balance based cooling load calculation procedure," *ASHRAE Transactions*, vol. 103, pp. 459-468, 1997.
- [11] C. S. Barnaby, J. D. Spitler, and D. Xiao, "The Residential Heat Balance Method for Heating and Cooling Load Calculations," *ASHRAE Transactions*, vol. 111, 2005.
- [12] X. Chen, "Addition of annual building energy analysis capability to a design load calculation program," Oklahoma State University, 1996.
- [13] B. T. Griffith, "Incorporating nodal and zonal room air models into building energy calculation procedures," Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [14] J. Watt, *Evaporative air conditioning handbook*: Springer Science & Business Media, 2012.
- [15] R. C. Arora, *Refrigeration and air conditioning*: PHI Learning Pvt. Ltd., 2010.
- [16] D. Wirz, *Commercial refrigeration for air conditioning technicians*: Cengage Learning, 2017.
- [17] S. Sanaye and M. Chahartaghi, "Thermal modeling and operating tests for the gas engine-driven heat pump systems," *Energy*, vol. 35, pp. 351-363, 2010.
- [18] H. Kasahara, R. Morishima, A. Yoshimura, and H. Iwata, "High-performance, high-reliability gas heat pump," *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, vol. 39, pp. 62-66, 2002.

- [19] Natural Gas Heat pumps, Minnesota Blue Flame Gas Association, 2003.
- [20] D. E. Kirk, *Optimal control theory: an introduction*: Courier Corporation, 2012.
- [21] O. G. Santin, L. Itard, and H. Visscher, "The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock," *Energy and buildings*, vol. 41, pp. 1223-1232, 2009.
- [22] H.-x. Zhao and F. Magoulès, "A review on the prediction of building energy consumption," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 3586-3592, 2012.
- [23] M. I. Solihin and R. Akmeliawati, "PSO-based optimization of state feedback tracking controller for a flexible link manipulator," in *Soft Computing and Pattern Recognition, 2009. SOCPAR'09. International Conference of*, 2009, pp. 72-76.
- [24] J. S. Gero, N. D'Cruz, and A. D. Radford, "Energy in context: a multicriteria model for building design," *Building and Environment*, vol. 18, pp. 99-107, 1983.
- [25] M. Jaggs and J. Palmer, "Energy performance indoor environmental quality retrofit—a European diagnosis and decision making method for building refurbishment," *Energy and buildings*, vol. 31, pp. 97-101, 2000.
- [26] F. Flourentzou and C.-A. Roulet, "Elaboration of retrofit scenarios," *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 185-192, 2002.
- [27] E. Rey, "Office building retrofitting strategies: multicriteria approach of an architectural and technical issue," *Energy and Buildings*, vol. 36, pp. 367-372, 2004.
- [28] C. Diakaki, E. Grigoroudis, and D. Kolokotsa, "Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 40, pp. 1747-1754, 2008.
- [29] P. Blondeau, M. Spérandio, and F. Allard, "Multicriteria analysis of ventilation in summer period," *Building and Environment*, vol. 37, pp. 165-176, 2002.
- [30] J. A. Wright, H. A. Loosemore, and R. Farmani, "Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm," *Energy and buildings*, vol. 34, pp. 959-972, 2002.
- [31] B. Hu, C. Li, X. Yin, F. Cao, and P. Shu, "Thermal modeling and experimental research of a gas engine-driven heat pump in variable condition," *Applied Thermal Engineering*, vol. 123, pp. 1504-1513, 2017.
- [32] "صنایع سپهر؛ محمود چهارطاقی؛ بهزاد نیرومند و رسول آخرتی، ۱۳۸۵، پمپ حرارتی گازسوز و مقایسه هزینه های مصرف انرژی آن با پمپ حرارتی الکتریکی، پنجمین همایش بین المللی بهینه سازی مصرف سوخت در ساختمان، تهران، سازمان بهینه سازی مصرف سوخت کشور."
- [33] S. Sanaye and M. Chahartaghi, "Thermal—economic modelling and optimization of gas engine-driven heat pump systems," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 224, pp. 463-477, 2010.
- [34] S. Royer, S. Thil, T. Talbert, and M. Polit, "Black-box modeling of buildings thermal behavior using system identification," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, pp. 10850-10855, 2014.
- [35] D. B. Crawley, L. K. Lawrie, F. C. Winkelmann, W. F. Buhl, Y. J. Huang, C. O. Pedersen, *et al.*, "EnergyPlus: creating a new-generation building energy

- simulation program," *Energy and buildings*, vol. 33, pp. 319-331, 2001.
- [36] S. Klein, W. Beckman, J. Mitchell, J. Duffie, N. Duffie, and T. Freeman, "TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.," 2010.
- [37] J. Cigler and S. Prívará, "Subspace identification and model predictive control for buildings," in *Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), 2010 11th International Conference on*, 2010, pp. 750-755.
- [38] S. Wang and X. Xu, "Simplified building model for transient thermal performance estimation using GA-based parameter identification," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 45, pp. 419-432, 2006.
- [39] P. Bacher and H. Madsen, "Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 1511-1522, 2011.
- [40] J. Široký, F. Oldewurtel, J. Cigler, and S. Prívará, "Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system," *Applied energy*, vol. 88, pp. 3079-3087, 2011.
- [41] M. R. Ally, V. Sharma, and O. Abdelaziz, "Exergy analysis of electrically-and thermally-driven engines to drive heat pumps: An exhaustive comparative study," *International Journal of Refrigeration*, vol. 76, pp. 313-327, 2017.
- [42] Z. Xu and Z. Yang, "Saving energy in the heat-pump air conditioning system driven by gas engine," *Energy and buildings*, vol. 41, pp. 206-211, 2009.
- [43] K. Deng, P. Barooah, P. G. Mehta, and S. P. Meyn, "Building thermal model reduction via aggregation of states," in *American Control Conference (ACC), 2010*, 2010, pp. 5118-5123.
- [44] N. Mendes, G. H. Oliveira, and H. X. De Araújo, "Building thermal performance analysis by using matlab/simulink," in *Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil*, 2001, pp. 473-480.
- [45] B. Arguello-Serrano and M. Velez-Reyes, "Nonlinear control of a heating, ventilating, and air conditioning system with thermal load estimation," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 7, pp. 56-63, 1999.
- [46] W. Ryan, "New developments in gas cooling," *ASHRAE journal*, vol. 44, p. 23, 2002.
- [47] A. Hepbasli, Z. Erbay, F. Icier, N. Colak, and E. Hancioglu, "A review of gas engine driven heat pumps (GEHPs) for residential and industrial applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 85-99, 2009.
- [48] "صنایع، سپهر و محمود چهارطاقی، ۱۳۸۹، بررسی تجربی اثر دمای محیط بر عملکرد پمپ حرارتی گازسوز، دومین کنفرانس بین المللی گرمایش، سرمایش، و تهویه مطبوع، تهران."
- [49] J. Holman, "Heat transfer, 9th," ed: McGraw-Hill, 2002.
- [50] S. A. Kalogirou, *Solar energy engineering: processes and systems*: Academic Press, 2013.
- [51] F. Felgner, R. Merz, and L. Litz, "Modular modelling of thermal building behaviour using Modelica," *Mathematical and computer modelling of dynamical systems*, vol. 12, pp. 35-49, 2006.
- [52] S. F. Larsen, C. Filippín, and G. Lesino, "Thermal behavior of building walls in summer: Comparison of available analytical methods and experimental results for a case study," in *Building Simulation*, 2009, pp. 3-18.
- [53] S. Bertagnolio and J. Lebrun, "Simulation of a building and its HVAC system with an equation solver: application to benchmarking," in *Building*

- Simulation*, 2008, pp. 234-250.
- [54] R. M. Murray and J. E. Hauser, *A case study in approximate linearization: The acrobat example*: Electronics Research Laboratory, College of Engineering, University of California, 1991.
- [55] ش. حیدری, "دمای آسایش حرارتی مردم شهر تهران", نشریه هنرهای زیبا- معماری و شهرسازی, vol. 1, pp. 5-14, 2009.
- [56] "Arora C. P., "Refrigeration and Air Conditioning", Tata-McGraw-Hill, 2000."
- [57] F. P. Incropera and D. P. Dewitt, "Introduction to Heat Transfer (1996)," *John WHey & Sons. New York. NY*.
- [58] A. O'Dwyer, *Handbook of PI and PID controller tuning rules*: World Scientific, 2009.
- [59] G. Venter, "Review of optimization techniques," *Encyclopedia of aerospace engineering*, 2010.

Abstract

Statistics indicate residential and commercial buildings and departments have the biggest contribution of using energy whether in developed countries, almost 50 percent of whole produced energy is used in buildings meanwhile Air conditioning systems are the most important energy consumers in buildings. Due to high energy consumption in buildings, it needs to analysis of building's operation and designing and implementation of control algorithm on Air conditioning systems, in the way of decreasing energy consumption. Modification and developing of these systems, except to decreasing the energy consumption, causes the economic efficiency and providing a comfort level for building's resident. In this thesis, a controlling algorithm of a gas engine heat pump to achieve the comfort level and decreasing fuel costs. For this reason, a building with foundation of 64 square meters in Tehran has been simulated by using of thermal equilibrium and solving the state space of system in MATLAB. Two algorithm of On-Off and proportional implemented on model. Algorithm of On-Off, which is in fact a thermostat control algorithm, switches off the air conditioner as soon as it reaches the setpoint, and switches on the air conditioner with maximum power when it deviates from the setpoint. The results show that the current cost of using the On-Off control algorithm is 16494 Rls per 24 hours (16 hours on and 8 hours off). The proportional control algorithm, due to the difference between the user's temperature and measured temperature, the command changes the engine speed and fan speed, and by setting these two parameters, it tries to close the building's temperature to the user's adjustable temperature. The results show that the current cost of using the proportional control algorithm is 12374 Rls per 24 hours. Ultimately, the use of the control algorithm provides 44.43% savings in gas consumption and 25% savings in current costs.

Keywords: Gas engine heat pump, control of feedback state, controlling algorithm, economic efficiency



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

**Investigating control algorithm of a Commercial heating and
cooling system to achieve economical optimal point**

**By
Ebrahim Gholami Roochi**

**Supervisor
Dr. Majid Hashemian**

January 2018