

تحلیل انرژی و اگزرزی-اقتصادی سیستم گرمایش ساختمان به منظور بهینه‌سازی مصرف و مدیریت انرژی

سید مسعود سیدی^{*}، مهدی خلیلی^۲، مهدی هاشمی تیله نویی^۳

چکیده

تاریخ دریافت:
۱۳۹۵ / ۱۰ / ۰۷

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۸ / ۰۲ / ۰۲

كلمات کلیدی:

در مطالعه حاضر، تحلیل انرژی و اگزرزی-اقتصادی برای تمامی سیستم‌های انتقال انرژی از منبع انرژی اولیه تا انتقال انرژی از پوشش ساختمان برای ساختمانی سه طبقه با کاربری آموزشی ارائه شده است. در مرحله اول تقاضای انرژی یا به عبارتی بار گرمایشی مورد نیاز به کمک نرم‌افزار کریر برای تمامی فضاهای محاسبه می‌گردد. با نوشتן معادلات انرژی و اگزرزی در قسمتهای مختلف اتلاف انرژی و اگزرزی به دست آمده و همچنین هزینه هر یک از اجزای سیستم گرمایشی محاسبه می‌شود. مرحله دوم شناسایی فرآیندهای نامطلوب ترمودینامیکی سیستم بر پایه تعیین اتلافات اگزرزی و محاسبه پارامتر R_{ex} به عنوان نرخ اتلافات ترمودینامیکی بر هزینه می‌باشد. مرحله سوم، تعیین بیشترین اصلاحات قابل پیاده‌سازی بر پایه مفاهیم اگزرزی-اقتصادی است بطوریکه پارامتری به نام ECE به عنوان اثربخشی هزینه اگزرزی برای تمامی سیستم‌های انتقال انرژی از منبع انرژی اولیه تا انتقال انرژی از پوشش‌های ساختمان محاسبه می‌گردد. نتیجتاً بیشترین اتلاف انرژی و اگزرزی مربوط به مرحله تولید و به ترتیب $295/42$ ، $188/80$ کیلو وات می‌باشد. همچنین با محاسبه R_{ex} و مشخص می‌شود که دیگ آب گرم و مرحله تولید انرژی نیاز بیشتری به بهینه‌سازی و اصلاح دارد.

سیستم گرمایش ساختمان

۱. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد علی آباد کتول، دانشگاه آزاد اسلامی، علی آباد کتول، ایران (نویسنده مسئول)
s.masoud_seyedi@aliabadiau.ac.ir
۲. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد علی آباد کتول، دانشگاه آزاد اسلامی، علی آباد کتول، ایران
kmehdii555@gmail.com
۳. باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد علی آباد کتول، دانشگاه آزاد اسلامی، علی آباد کتول، ایران
mehdi.hashemi.t@aliabadiau.ac.ir

۱. مقدمه

از گذشته مرسوم بوده است که سیستم‌های حرارتی فقط از لحاظ قانون اول ترمودینامیک مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گرفته‌اند. مطالعات در زمینه سرمایش و گرمایش ساختمان‌ها براساس قانون بقای انرژی پایه‌گذاری شده است. همان‌طور که می‌دانیم قانون اول ترمودینامیک در حقیقت قانون بقای انرژی بوده و در طی این تحلیل فقط کمیت انرژی مورد بحث قرار می‌گیرد و از کیفیت انرژی که در حقیقت پارامتری است که در طی فرآیندهای ترمودینامیکی از بین می‌رود، بحثی به میان نمی‌آید. تحلیل اگررژی، با کمک قوانین بقای جرم و قانون اول ترمودینامیک و بر پایه قانون دوم ترمودینامیک از اوایل قرن گذشته مورد توجه واقع شده و با شروع بحران انرژی در دهه ۷۰ میلادی تحلیل اگررژی در رأس تحقیقات ترمودینامیکی قرار گرفت.

بر طبق قانون دوم ترمودینامیک در هر فرآیند واقعی، آنتروپی تولید شده متناسب با از دست رفتن اگررژی و نابودی آن در طی فرآیند می‌باشد. بنابراین هدف اصلی آنالیز اگررژی یافتن و برآوردن میزان نواقص ترمودینامیکی در سیستم‌ها در اثر فرآیندهای شیمیایی و حرارتی و یافتن راه حل‌هایی برای از بین بردن یا کاهش آنها می‌باشد به‌طوری که نهایتاً منجر به افزایش راندمان سیستم می‌گردد. در حال حاضر با توجه به رشد جمعیت جهان و استفاده از سوخت‌های فسیلی در تأمین گرمایش ساختمان‌ها جهت کاهش مصرف انرژی، بهینه‌سازی و مدیریت انرژی بایستی از تحلیل انرژی، اگررژی و اگررژی-اقتصادی به صورت تواماً استفاده گردد. با توجه به هدف کلی اشاره شده آنالیز انرژی، اگررژی و اگررژی-اقتصادی در ساختمان، در این زمینه مطالعات متعددی در خارج از کشور و تعداد محدودی در داخل کشور انجام شده است.

أوتلوا و هپباسلى^۱ (۲۰۰۳) مطالعه‌ای برای ارزیابی بهبود راندمان انرژی در بخش ساختمان‌های مسکونی و تجاری ترکیه توسط آنالیز انرژی و اگررژی انجام دادند. نویسنده‌گان بر اهمیت آنالیزهای ارائه شده در سیاست‌های کلان انرژی در ترکیه تأکید کردند. [۹] به‌طوری که در راستای تحقیق فوق در

1. Utlua and Hepbasli

سطح ملی و کلان در کشور ترکیه تحقیقی دیگری بر روی ساختمان‌های مسکونی و تجاری انجام شد. و راندمان بهره‌وری انرژی و اگزرزی به ترتیب حدود ۵۶ درصد و ۱۰ درصد گزارش شده است [۱۰]. ساکولپیپاتسین^۱ (۲۰۰۸) تحقیقات گسترده‌ای در رساله دکتری خود بر روی کاربرد آنالیز اگزرزی در طراحی بهینه ساختمان ارائه داد. یکی از نکاتی این نویسنده بر روی آن بسیار تأکید داشته و تحقیقات خود را در این زمینه ادامه داده است درخصوص تعاریف مرتبط با هوای محیط و هوای مرجع است. [۸] البته یکی از جنبه‌های بحث برانگیز در رویکرد اگزرزی در ساختمان، انتخاب حالت مرجع برای پارامترهای اساسی مانند دما، فشار، و آنتالپی مخصوص می‌باشد. انتخاب حالت مرجع نادرست می‌تواند در نتایج آنالیز ساختمان‌ها در جایی که درجه حرارت گرمایش و سرمایش محدود به دمای محیط است بسیار اثرگذار باشد. این موضوع با ارائه مثالی در تحقیق روسن و دینسر^۲ (۲۰۰۴) با عنوان اثرات متغیر خواص حالت مرده در آنالیز انرژی و اگزرزی سیستم‌های حرارتی شرح داده شده است. [۷]

علاوه بر محققین ترکیه آنالیز انرژی در ساختمان‌ها توسط محققین ایرانی نیز انجام شده است. (موسوی و غبی، ۱۳۹۶) [۲]، (اسکندری و دیگران، ۱۳۹۶) [۱]. البته آنالیزهای انجام شده بدون درک مفهوم اگزرزی و پارامترهای اقتصادی بوده است. تحقیقات حول آنالیزهای مرتبط با اگزرزی از منبع انرژی تا پوشش ساختمان به عنوان موارد تحقیقاتی با اگزرزی پایین توسط بالتا و همکاران^۳ (۲۰۰۸) [۵]، یلدیز و گونگور^۴ (۲۰۰۴) [۱۱] انجام شده است. باید توجه داشت که تحقیقات انجام شده در اتفاق یا محیطی با بعد محدود انجام شده است. نمونه مشابه این تحقیق در ایران توسط فلاح (۱۳۸۹) برای یک دفتر کار برای سه سیستم گرمایشی شامل بویلهای معمولی و چگالشی و پمپ گرمایی انجام شده و این سیستم‌ها بطور کمی و کیفی مقایسه شده است. [۳] اگرچه تحلیل اگزرزی در ساختمان در ایران در مرحله توسعه قرار دارد اما تحلیل اگزرزی-اقتصادی همچنان مغفول افتاده است. جزئیات تحلیل اگزرزی-اقتصادی به عنوان یکی از زنجیره‌های رسیدن به توسعه پایدار را می‌توان در مراجع یافت

2. Sakulpipatsin

3. Rosen and Dincer

4. Balta et al.

5. Yildiz and Güngör

6. Acikkalp et al.

7. Yucer C.T. and Hepbasli

(آسیکالپ و دیگران، ۲۰۱۵) [۴]، (بیچر و هپیاسلی، ۲۰۱۲) [۱۲]. با مطالعه تحقیقات انجام شده داخلی و خارجی در حوزه آنالیز انرژی، اگررژی و اگررژی-اقتصادی تحقیق حاضر از دو جنبه دارای نوآوری بوده و می‌تواند سرلوحه تحقیقات داخل باشد. از نوآوریهای مطالعه حاضر، مطالعه ساختمانی با فضاهای زیاد و ثانیاً بررسی همزمان جنبه اقتصادی با مباحث انرژی و اگررژی است.

۲. مواد و روش‌ها

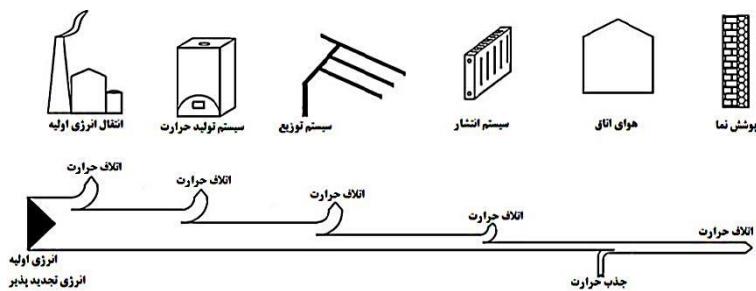
در این بخش، ابتدا به معرفی ساختمان و تشریح روش اجرای کار پرداخته، سپس آن را بر روی ساختمان مورد مطالعه پیاده‌سازی می‌نماییم.

۲-۱. مشخصات ساختمان مورد مطالعه

ساختمان مورد بررسی یک مجتمع دانشگاهی دارای سه طبقه هر یک به ارتفاع ۴ متر واقع در شهرستان علی‌آباد کتول از توابع استان گلستان می‌باشد. مرزهای سیستم مورد بررسی عبارتند از حجم کل فضای داخل ساختمان ۱۲۳۶۰ متر مکعب، مساحت کل کف ساختمان ۳۳۷۸ متر مربع، دمای هوای داخل 23°C دمای هوای خارج 0°C است. مصالح دیوارهای خارجی به ترتیب سنگ نما، پلاستر سیمان، آجر سفالی و عایق حرارتی و گچ کاری می‌باشد و شیشه پنجره‌ها از نوع دو جداره با ضریب هدایت حرارتی $0.65\text{W/m}^2\text{K}$ می‌باشد و مصالح ساختمانی با توجه به استحکام و نوع عایق کاری سطوح انتخاب شده‌اند. انتخاب عایق با توجه به مقاومت حرارتی، رطوبت و صوت در نظر گرفته شده است.

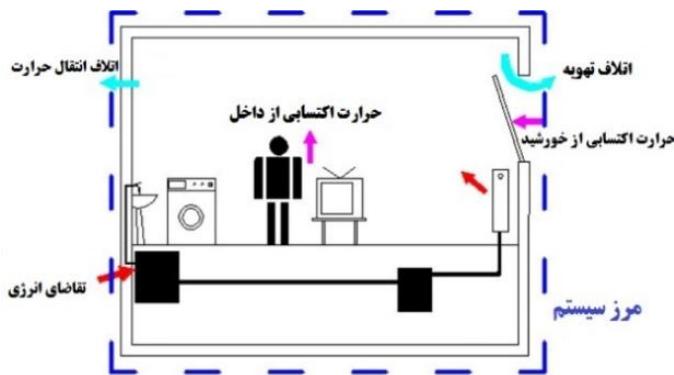
۲-۲. تعیین نیاز انرژی در ساختمان‌ها

جهت تحلیل بار اگررژی ساختمان باید میزان تقاضای انرژی ساختمان محاسبه گردد. اتفاقات انرژی از منبع انرژی اولیه تا انتقال/اتفاق حرارت از پوشش نمای ساختمان در شکل (۱) ارائه شده است. (در این شکل مرحله ذخیره‌سازی انرژی در نظر گرفته نمی‌شود).



شکل ۱. جریان انرژی از منبع انرژی اولیه تا اتلاف حرارت از پوشش نمای ساختمان

برای تخمین بار حرارتی در یک ساختمان، ابتدا باید اتلافات حرارتی به وسیله انتقال و تهویه محاسبه شود. اتلاف حرارتی از ساختمان‌ها توسط دیوارهای خارجی، سقف، پنجره‌ها و زیر زمین و نفوذ هوا نیز از طریق درز پنجره‌ها و درها اتفاق می‌افتد. شکل (۲) نشان‌دهنده اتلاف و هدر رفت انرژی و جذب انرژی از مرز یک اتاق است. براساس جریان‌های ورودی و خروجی انرژی و اگررژی بایستی حرارت اکتسابی و اتلاف‌های مختلف محاسبه شود.



شکل ۲. جریان‌های انرژی/اگررژی از مرز یک اتاق

اتلاف گرمایی کل که عبارت است از مجموع انتقال حرارت از سطوح مختلف توسط معادله زیر محاسبه می‌شود. [۱۱]

$$\dot{Q}_T = \sum (U_i \times A_i \times (1 - b)) \times (T_i - T_e) \quad (1)$$

که در آن $(W) \dot{Q}_T$ کل تلفات گرمایی انتقال و $(W/m^2 K) U_i$ ضریب انتقال حرارت سطح i و $(m^2) A_i$ مساحت سطح انتقال i می‌باشد. b ضریب دمایی برای مصالح ساختمانی می‌باشد و چون دمای سطح خارجی مصالح یک ساختمان می‌تواند متفاوت با دمای خارجی باشد لذا در نظر گرفته می‌شود. اتلاف گرمایی ناشی از تهویه را نیز می‌توان توسط معادله زیر محاسبه کرد. [۱۱]

$$\dot{Q}_V = (c_p \times \rho \times n_d \times (1 - \eta_v)) \times (T_i - T_e) \quad (2)$$

که در آن n_d نرخ تعویض هوا است که $1/5$ در نظر گرفته شده، c_p گرمای ویژه هوا در فشار ثابت و ρ چگالی هوا و η_v بازده مبدل‌های حرارتی است که به دلیل استفاده از تهویه اجباری $95/0$ درصد در نظر گرفته شده است. دو پارامتر \dot{Q}_T و \dot{Q}_V که عبارتند از اتلاف حرارتی (ناشی از انتقال حرارت از سطوح و انتقال حرارت ناشی از تهویه) توسط نرمافزار کریر محاسبه می‌شوند. همان‌طور که از شکل (۲) مشخص است، گرمای اکتسابی که باعث افزایش بار حرارتی اتاق می‌شود به دو بخش گرمای اکتسابی از خورشید و گرمای اکتسابی از کارکرد تجهیزات داخل اتاق تقسیم می‌شود. گرمای اکتسابی از خورشید از رابطه زیر بدست می‌آید. [۱۱]

$$\dot{Q}_s = \sum (I_{sj} \times (1 - f_f)) \times (A_{w,j} \times g_i \times f_{sh} \times f_{no}) \quad (3)$$

که در فرمول بالا $(W) \dot{Q}_s$ حرارت اکتسابی از خورشید و $(W/m^2) I_{sj}$ ضریب انتقال گرمای تابشی با توجه به موقعیت پنجره می‌باشد که برای پنجره جنوی می‌توان آن را $44(W/m^2)$ در نظر گرفت. f_f کسر چار چوب پنجره، $(m^2) A_{w,j}$ سطح کلی پنجره و g_i انتقال انرژی کلی از جدار شیشه که می‌توان آن را $75/0$ برای پنجره با شیشه‌های دو جداره تخمین زد f_{sh} تأثیر سایه‌افکنی برای ساختمان‌های اطراف و f_{no} ضریب تصحیح برای تشعشعات غیرقائم روی شیشه پنجره است و هر دو مورد $9/0$ در نظر گرفته شد و همچنین گرمای اکتسابی داخلی ناشی از ساکنین از رابطه زیر بدست می‌آید. [۱۱]

$$\dot{Q}_{i,o} = \dot{Q}_{i,o} \times no_o \quad (4)$$

در رابطه بالا $\dot{Q}_{i,o}$ حرارت اکتسابی از هر نفر می‌باشد که $(W) 80$ در نظر گرفته می‌شود و no_o تعداد نفرات موجود در طبقات ساختمان در ساعت پیک است بطوریکه، طبقه همکف ۳۲۲ نفر، طبقه اول ۲۶۸ نفر، طبقه دوم ۲۶۸ نفر و تعداد افراد موجود در طبقه سوم با توجه به ساعت اداری و کلاس‌ها ۱۳۲ نفر در نظر گرفته شده است. همچنین حرارت اکتسابی از تجهیزات نیز از رابطه زیر بدست می‌آید. [۱۱]

$$\dot{Q}_{i,e} = \sum_{l=1}^m \dot{Q}_{l,e} \times n_i e_o \quad (5)$$

که در رابطه بالا $\dot{Q}_{i,e}$ حرارت اکتسابی از تجهیزات و e_0 تعداد تجهیزات مورد استفاده در طبقات است. تعداد تجهیزات حرارتی و حرارت اکتسابی هر یک در ساختمان و طبقات مورد بررسی در جدول (۱) جهت استفاده در محاسبات آورده شده است.

جدول ۱. حرارت اکتسابی تجهیزات موجود در ساختمان در ساعت پیک

ردیف	نام تجهیز	تعداد همکف	تعداد طبقه اول	تعداد طبقه دوم	تعداد طبقه سوم	جمع کل	حرارت اکتسابی هر جزء (وات)	حرارت اکتسابی کل (وات)
۱	لامپ	۱۰۲	۱۱۳	۱۱۸	۱۱۱	۴۴۴	۲۰	۸۸۸۰
۲	تلوزیون	۵	۴	۵	۳	۱۷	۷۵	۱۲۷۵
۳	چاپگر	۷	۹	۶	۹	۳۱	۱۱۰	۳۴۱۰
۴	فتوكوبی	۱	۱	۱	۱	۴	۲۰۰	۸۰۰
۵	کامپیووتر	۳۶	۱۵	۲۴	۲۷	۱۰۲	۷۵	۷۶۵۰
۶	ماشین لباسشویی	۱	۰	۰	۰	۱	۱۷۰	۱۷۰
۷	یخچال	۰	۰	۱	۱	۲	۱۵۰	۳۰۰

مأخذ: یافته‌های تحقیق

تقاضای انرژی حرارتی یا نیاز حرارتی مورد نیاز در طبقات و کل ساختمان طبق قانون اول ترمودینامیک به صورت اختلاف حرارت‌های اتلافی و حرارت‌های اکتسابی محاسبه می‌گردد.

$$\dot{Q}_h = (\dot{Q}_T + \dot{Q}_V) - (\dot{Q}_s + \dot{Q}_{i,o} + \dot{Q}_{i,e}) \quad (6)$$

۲-۳. مراحل تحلیل اگزرزی ساختمان مورد مطالعه

با توجه به شکل (۱) به دلیل وجود اختلاف دما بین مراحل مختلف فرایند انتقال حرارت، همواره برگشت‌ناپذیری و تولید آنتروپی در سیستم وجود دارد. به منظور محاسبات انرژی و اگزرزی، محاسبات از قسمت پایانی چرخه انتقال حرارت مورد بررسی تا قسمت تولید و تبدیل انرژی انجام می‌شود. بنابراین در این قسمت روابط مربوط به محاسبات اگزرزی به ترتیب شامل پوشش نمای ساختمان،

سیستم هوای اتاق، سیستم انتشار انرژی گرمایی، سیستم توزیع، سیستم ذخیره‌سازی، سیستم مولد حرارت و تأمین انرژی اولیه به صورت تجدیدپذیر یا تجدیدناپذیر است.

۲-۳-۱. سیستم پوشش نمای ساختمان

با انتخاب پوشش ساختمان به عنوان سیستم ابتدا مقدار بار حرارتی خروجی از اتاق با معادله (۶) به دست می‌آید و سپس بار اگزرزی مورد نیاز اتاق توسط معادلات زیر محاسبه می‌گردد.

$$\dot{E}x_{room} = \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \times \dot{Q}_h \quad (6)$$

T_0 و T_i دمای مرجع و دمای اتاق هستند و به ترتیب برابر با ${}^{\circ}\text{C}$ و ${}^{\circ}\text{C}$ در نظر گرفته شدند (بلدیز و گونگور، ۲۰۰۴).

۲-۳-۲. سیستم هوای اتاق

با توجه به گرمایش اتاق بوسیله سطح داغ (فنکویل) بار اگزرزی ناشی از انتقال گرمای هوای اتاق که به عنوان حجم کنترال انتخاب گردیده است قابل محاسبه می‌باشد. اثرات شکل سطوح مختلف و اختلاف دمای هوا و فرایند انتقال گرمای جابه‌جایی و تابشی بین سطوح نادیده گرفته شده‌اند. دمای سطح گرم کن را می‌توان با معادله (۷) محاسبه نمود. [۱۱]

$$T_{heat} = \left(\frac{T_{in} - T_{ret}}{2 \ln \left(\frac{T_{in} - T_i}{T_{ret} - T_i} \right)} + T_i \right) \quad (7)$$

T_{ret} و T_{in} دمای رفت و دمای برگشت سیستم توزیع انرژی (فنکویل) می‌باشد که به ترتیب برابر با ${}^{\circ}\text{C}$ و ${}^{\circ}\text{C}$ است. مقدار اگزرزی قابل حصول توسط انتقال حرارت از سطح فنکویل از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\dot{E}x_{heat} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{heat}}\right) \times \dot{Q}_h \quad (8)$$

۲-۳-۳. سیستم انتشار انرژی گرمایی

سیستم انتشار انرژی گرمایی با واحدهای فنکویل زیر مجموعه سیستم توزیع انرژی می‌باشد. این زیر سیستم باید طوری طراحی شود که انرژی و بار اگزرزی لازم در سیستم هوای اتاق را تأمین نماید. η_E بازده گرمایی و $p_{aux,E}$ توان کمکی لازم برای هر سیستم انتشار انرژی گرمایی نظیر

فن کویل است که در محاسبات راندمان تجهیزات مورد مطالعه ۹۵ درصد و توان ویژه کمکی آن [۱۱] ۰/۸۱ (W/kW) است. اتلاف حرارتی سیستم پخش انرژی گرمایی از معادله زیر به دست می‌آید.

$$\dot{Q}_{loss,E} = \dot{Q}_h \times \left(\frac{1}{\eta_E} - 1 \right) \quad (10)$$

میزان انرژی یا توان انرژی الکتریکی کمکی مورد نیاز برابر است با:

$$P_{aux,E} = P_{aux,e} \times \dot{Q}_h \quad (11)$$

بار اگزرزی سیستم پخش انرژی گرمایی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\dot{E}\chi_{emis} = \dot{E}\chi_{heat} + \Delta\dot{E}\chi_{emis} \quad (12)$$

که در آن افت اگزرزی، $\Delta\dot{E}\chi_{emis}$ در سیستم انتشار از رابطه زیر به دست می‌آید (یلدیز و گونگور، ۲۰۰۴).

$$\Delta\dot{E}\chi_{emis} = \frac{\dot{Q}_h + \dot{Q}_{loss,E}}{T_{in} - T_{ret}} \left[(T_{in} - T_{ret}) - T_0 \ln \left(\frac{T_{in}}{T_{ret}} \right) \right] \quad (13)$$

۴-۳-۲. سیستم توزیع

از مشخصه‌های سیستم توزیع، بازده حرارتی η_D و ضریب انرژی کمکی $p_{aux,D}$ می‌باشد. بازده حرارتی سیستم توزیع مورد بررسی و ضریب انرژی کمکی به ترتیب ۰/۹۴ و ۹/۳۱ (W/kW) به دست آمد. سیستم توزیع باید اگزرزی لازم برای افتهای اگزرزی (تقاضای انرژی) ایجاد شده در سیستم توزیع و اگزرزی مورد نیاز سیستم انتشار گرما را تأمین نماید.

$$\dot{E}\chi_{dis} = \dot{E}\chi_{emis} + \Delta\dot{E}\chi_{dis} \quad (14)$$

که در آن افت اگزرزی (تقاضای اگزرزی) در سیستم توزیع از رابطه به دست زیر می‌آید.

$$\Delta\dot{E}\chi_{dis} = \frac{\dot{Q}_{loss,D}}{\Delta T_{dis}} \left[(\Delta T_{dis} - T_0) \times \ln \left(\frac{T_{dis}}{T_{dis} - \Delta T_{dis}} \right) \right] \quad (15)$$

دمای سیستم توزیع T_{dis} و اختلاف دما در سیستم توزیع ΔT_{dis} به ترتیب ۳۰۸ و ۵ درجه کلوین در نظر گرفته شده است. [۱۱] همچنین اتلاف گرمایی در سیستم توزیع برابر است با:

$$\dot{Q}_{loss,D} = (\dot{Q}_h + \dot{Q}_{loss,E}) \times \left(\frac{1}{\eta_D} - 1 \right) \quad (16)$$

توان الکتریکی مورد نیاز سیستم توزیع با دانستن مقدار ضریب انرژی الکتریکی پمپ سیستم توزیع از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$P_{aux,D} = p_{aux,D} \times (\dot{Q}_h + \dot{Q}_{loss,E}) \quad (17)$$

۲-۳-۵. سیستم تولید

سیستم تولید باید انرژی لازم برای تمام سیستم‌های گفته شده به همراه اتلافات موجود را تأمین نماید. مقدار نرخ انتقال حرارتی که باید توسط سیستم تولید پوشش داده شود عبارت است از: [۱۱]

$$\dot{Q}_{Ge} = (\dot{Q}_h + \dot{Q}_{loss,E} + \dot{Q}_{loss,D}) \times (1 - F_s) \times \frac{1}{\eta_G} \quad (۱۸)$$

که در رابطه بالا η_G برابر با $۰/۹$ و F_s کسری از انرژی است که توسط انرژی خورشید تأمین می‌شود البته در این مطالعه صفر در نظر گرفته شده است. انرژی مورد نیاز سیستم تولید توان از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$P_{aux,G} = p_{aux,G} \times \dot{Q}_{Ge} + p_{aux,G,const} \quad (۱۹)$$

$p_{aux,G}$ انرژی ثابت و متغیر است که به ترتیب (۲۰ W) و ($۱/۸$ kW_{heat}) می‌باشد و از مرجع [۱۱] خوانده می‌شود. بار اگر انرژی سیستم تولید توان از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\dot{Ex}_{Ge} = \dot{Q}_{Ge} \times F_{q,s} \quad (۲۰)$$

فاکتور کیفیت برای بویلهای معمولی و چگالشی می‌باشد و برابر $۹۵/۰$. البته فاکتور کیفیت برای پمپ حرارتی ۱ می‌باشد. [۱۱] مقدار انرژی و اگر انرژی کل ساختمان براساس انرژی و اگر انرژی ورودی اولیه بیان می‌شود. مقدار انرژی اولیه حاصل از سوختهای فسیلی و تجدیدپذیر از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\dot{E}_{prim,tot} = \dot{Q}_{Ge} \times F_p + (P_1 + P_V + P_{aux,G} + P_{aux,D} + P_{aux,E}) \times F_{P,Electricity} \quad (۲۱)$$

در رابطه بالا F_p فاکتور انرژی اولیه می‌باشد که برابر با $۱/۳$ است. P_1 و P_V به ترتیب انرژی مخصوص برای روشناجی و تهویه می‌باشد که در این مطالعه صفر در نظر گرفته می‌شود. [۱۱] فاکتور انرژی اولیه الکتریسیته می‌باشد که ۳ در نظر گرفته شده است. اگر از منابع تجدیدپذیر یا انرژی محیط برای تأمین انرژی استفاده شود، مانند آنچه در پمپ گرمایی اتفاق می‌افتد مقدار انرژی تجدیدپذیر اضافه شده از رابطه زیر به دست می‌آید. [۱۱]

$$\dot{E}_{renew} = \dot{Q}_{Ge} \times F_{renew} + \dot{E}_{env} \quad (۲۲)$$

در این بررسی وقتی از پمپ‌های گرمایی برای تولید انرژی گرمایی استفاده می‌شود F_{renew} برابر $۲/۲$ و در مورد بویلهای حرارتی صفر در نظر گرفته می‌شود. [۱۱] نهایتاً بار اگر انرژی کل ساختمان از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\dot{E}x_{tot} = \dot{E}_{prim,tot} \times F_{q,s} + \dot{E}_{renew} \times F_{q,renew} \quad (23)$$

۳-۶-۵. دیگ آب گرم

دیگ آب گرم یکی از تجهیزاتی است که آب گرم مورد نیاز برای گرمایش فضاهای و مصارف بهداشتی را در فشار، دما و مقدار مناسب تأمین می‌کند و به عنوان یک سیستم ترمودینامیکی باز در نظر گرفته می‌شود بطوریکه ورودی شامل سوخت، هوا و آب سرد است و خروجی آب گرم و دود است. دیگ آب گرم در سیستم گرمایش از نقطه نظر اگزرزی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ظرفیت حرارتی دیگ آب گرم متناسب با بار حرارتی مورد نیاز برای تأمین اتلاف انرژی فضاهای (kW) ۶۸۲ با دمای رفت 80°C و دمای برگشت 60°C می‌باشد و نوع سوخت مصرفی گاز با حرارت پایین $(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} 50,000)$ می‌باشد.

برطبق قانون اول ترمودینامیک راندمان دیگ آب گرم از رابطه زیر بدست می‌آید: [۱۳]

$$\eta = \frac{\dot{m}_{wa} \times c_p (T_{wa,in} - T_{wa,out})}{\dot{m}_f \times H_u} \quad (24)$$

\dot{m}_f نرخ جریان جرمی آب گرم و \dot{m}_u نرخ جریان جرمی سوخت و H_u حرارت پایین سوخت می‌باشد. آنالیز اگزرزی بوسیله نرخ بالانس اگزرزی ورودی و خروجی در حجم کنترل بدست می‌آید. در این مطالعه اگزرزی هوای مصرفی در فرایند اشتعال در نظر گرفته نشده است. نرخ اگزرزی گازهای خروجی و اتلاف حرارتی سطوح به صورت اگزرزی تخریب بیان شده است. بالанс اگزرزی در دیگ آبگرم می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$\dot{E}x_{des} = \dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} \quad (25)$$

$$\dot{E}x_f = \Delta \dot{E}x_{wa} + \dot{E}x_{ef} + \dot{E}x_{l,pet} + \dot{E}x_{d,b} \quad (26)$$

در روابط بالا، $\dot{E}x_{in}$ نرخ اگزرزی ورودی به حجم کنترل، $\dot{E}x_{out}$ نرخ اگزرزی خروجی از حجم کنترل، $\dot{E}x_{des}$ نرخ اگزرزی تخریب، $\dot{E}x_{wa}$ نرخ اگزرزی سوخت، $\Delta \dot{E}x_{wa}$ نرخ تغییرات اگزرزی آب گرم، $\dot{E}x_{l,pet}$ مشخص شده است. نرخ اگزرزی حاصل از آب گرم در دیگ می‌تواند بوسیله رابطه زیر تعیین شود: [۱۳]

$$\Delta \dot{E}x_{wa} = \dot{m}_{wa} [(h_{out} - h_{in}) - T_0 (S_{out} - S_{in})] \quad (27)$$

که در آن h_{in} و h_{out} آنتالپی مخصوص آب گرم خروجی و ورودی و S_{in} و S_{out} آنتروپی مخصوص خروجی و ورودی می‌باشد. جزئیات مربوط به پارامترهای روابط فوق در مرجع [۱۳] موجود است. راندمان اگزرژی دیگ آب گرم از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\psi = \frac{\Delta \dot{E}x_{wa}}{\dot{E}x_f} \quad (28)$$

۷-۳-۲. لوله‌های آب گرم

لوله‌های آب گرم واسطه انتقال حرارت از منبع تولید حرارت به فضای نیازمند به گرمایش هستند. با توجه به این که انتقال حرارت از سطح لوله‌ها به عنوان اتلاف امری اجتناب‌ناپذیر است سطح لوله‌ها را عایق‌کاری می‌کنند. نرخ اتلاف اگزرژی از لوله‌ها عبارت است از:

$$\dot{E}x_{l,p} = \frac{T_S - T_0}{T_S} \times \dot{Q}_{l,p} \quad (29)$$

که در آن T_0 دمای سطح لوله و فضای بیرون و $\dot{Q}_{l,p}$ نرخ اتلاف حرارت است. [۱۳]

۸-۳-۲. فن کویل‌ها

فن کویل را می‌توان یک نوع مبدل حرارتی آب - هوا در نظر گرفت که در این سیستم انرژی حرارتی آب گرم به هوای اتاق منتقل می‌شود. دمای آب ورودی و خروجی به ترتیب به هر واحد فن کویل ۷۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد می‌باشد و توان الکتریکی فن ۵۵ وات می‌باشد. [۴] آنالیز انرژی بر طبق جرم و بالانس انرژی به صورت زیر می‌باشد.

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (30)$$

نرخ تغییرات اگزرژی آب در گردش در فن کویل از فرمول زیر محاسبه می‌شود: [۴]

$$\Delta \dot{E}x_{wa,fc} = \dot{m}_{wa,fc} [(h_{in} - h_{out}) - T_0(S_{in} - S_{out})] \quad (31)$$

نرخ جریان جرمی آب در گردش، h و S به ترتیب شامل آنتالپی و آنتروپی ورودی و خروجی است. رابطه بالانس اگزرژی برای فن کویل به صورت زیر می‌باشد.

$$\Delta \dot{E}x_{wa,fc} = \dot{E}x_{fc} + \dot{E}x_{des.fc} \quad (32)$$

در رابطه بالا $\Delta \dot{E}x_{wa,fc}$ نرخ اگزرژی حرارتی تحويل داده شده بوسیله آب در حال گردش به فن کویل، نرخ اگزرژی تحويل داده شده به اتاق و بازگشت‌ناپذیری‌ها به صورت $\dot{E}x_{des.fc}$ تعریف می‌شود. و راندمان اگزرژی فن کویل بوسیله رابطه زیر تعریف می‌شود: [۴]

$$\psi = \frac{\dot{E}_{x_{fc}}}{\Delta \dot{E}_{x_{wa,fc}}} \quad (33)$$

۲-۴. پارامترهای کلیدی برای بهبود و ارزیابی عملکرد تجهیزات گرمایش ساختمان‌ها

در اینجا تعدادی از پارامترهای اساسی جهت مقایسه عملکرد سیستم گرمایش ساختمان‌ها، ارزیابی راندمان و کیفیت اگزرزی ساختمان‌ها بررسی می‌شود. راندمان انرژی کل سیستم از رابطه زیر محاسبه می‌شود: [۶]

$$\eta_{sys} = \frac{\dot{E}_{building}}{\dot{E}_{tot}} \quad (34)$$

و راندمان اگزرزی کل سیستم از رابطه زیر محاسبه می‌شود: [۶]

$$\psi = \frac{\dot{E}_{x_{building}}}{\dot{E}_{x_{tot}}} \quad (35)$$

۲-۴-۱. آنالیز EXCEM

آنالیز EXCEM مرتبط با معادله بالانس جرم، انرژی، اگزرزی و هزینه است. اتلافات اگزرزی با تعریف اتلاف اگزرزی خارجی (اتلاف مرتبط با اگزرزی خارج شده از سیستم) و اتلاف اگزرزی داخلی (اتلاف اگزرزی توسط بازگشت ناپذیری‌ها و یا اگزرزی مصرف شده) به دست می‌آید. با حاصل جمع این دو نوع اتلاف اگزرزی، اتلاف اگزرزی کل به دست می‌آید.

$$\text{نرخ مصرف اگزرزی} + \text{نرخ اگزرزی هدررفته خروجی} = \dot{L}_{ex} \quad (36)$$

پارامتر دیگر \dot{R}_{ex} می‌باشد که نشان‌دهنده نرخ اتلاف ترمودینامیکی بر هزینه است.

$$\dot{R}_{ex} = \frac{\dot{L}_{ex}}{K} \quad (37)$$

۲-۴-۲. اثر بخشی هزینه اگزرزی (ECE)

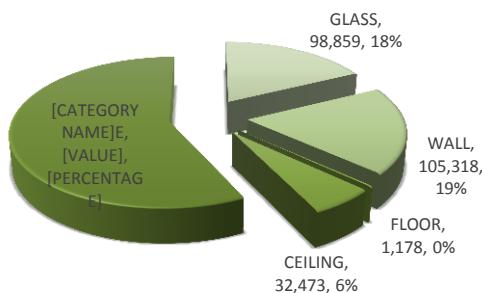
پارامتر بی بعد (ECE) با عنوان اثربخشی هزینه اگزرزی اثر اگزرزی تخریب تجهیزات و هزینه آنها را در کل سیستم نشان می‌دهد.

$$ECE = \frac{\text{اگزرزی تخریب مراحل یا تجهیزات}}{\text{کل اگزرزی تخریب سیستم}} \times \frac{\text{هزینه مراحل یا تجهیزات}}{\text{کل هزینه سیستم}} \quad (38)$$

۳. نتایج و بحث‌ها

۳-۱. محاسبه اتلافات حرارتی یا بار حرارتی ساختمان

اتلافات ناشی از انتقال حرارت و تهویه توسط نرم‌افزار کریر محاسبه شده است و در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. اتلافات حرارتی ناشی از انتقال و تهویه در ساختمان

بیشترین اتلاف حرارتی در ساختمان مورد بررسی توسط نفوذ هوا از طریق درز پنجره‌ها و درها اتفاق می‌افتد که ۵۷ درصد سهم اتلافات کل را شامل می‌شود. سرعت باد موجب ایجاد فشار در سمتی از ساختمان می‌شود که باد به آن می‌وزد و خلاء به وجود آمده در داخل ساختمان سبب نفوذ هوای خارج از درزها به داخل می‌شود. اختلاف دمای بین هوای داخل و خارج از ساختمان سبب ایجاد اختلاف چگالی می‌شود. این اختلاف چگالی باعث خروج هوای گرم داخل ساختمان از طریق راهپله‌ها، دودکش‌ها و ورود هوای سرد از پایین ساختمان می‌شود.

مقدار نفوذ هوا بستگی به آببند بودن درها و پنجره‌ها، ارتفاع ساختمان، سرعت و جهت وزش باد و مقدار هوایی که برای تهویه در نظر گرفته شده دارد. همچنین به کار بردن چهار دستگاه هوا رسان باعث خروج هوا از ساختمان یا ورود هوای بیرون به درون ساختمان شده و مقداری از گرمای ساختمان خارج یا وارد می‌شود و اتلاف حرارتی صورت می‌گیرد. بنابر این استفاده از عایق حرارتی با مقاومت حرارتی بیشتر می‌تواند سهم قابل توجهی را در کاهش مصرف انرژی ساختمان داشته باشد. استفاده از عایق حرارتی در دیوارها باعث کاهش تلفات حرارتی شده با این وجود، دیوارها سهم ۱۹ درصدی را در تلفات انرژی دارا می‌باشند که بندکشی و بتن کاری و همچنین گچ کاری و سفید کاری بر روی دیوارها تا حدودی آنها را در مقابل نفوذ هوا حفظ می‌نماید، اما چون در اثر خشک شدن مصالح ساختمانی، و در

اثر انقباض و انبساط سازه و سایر مصالح ترک‌هایی در آنها به وجود می‌آید لذا جهت جلوگیری از عبور هوا و بخار و ایجاد یک عایق مطمئن برای عبور هوا و یک سد برای بخار ضرورت دارد و توصیه می‌شود از مصالحی استفاده شود که خود قابلیت انعطاف داشته و در اثر عوامل مختلف در آنها ترک یا پارگی به وجود نیاید. در حال حاضر بهترین نتیجه از غشاها می‌مثل ایزوگام به دست آمده است.

بخش بعدی که ۱۸ درصد از اتفاقات را شامل می‌شود پنجره‌ها هستند، با توجه به اینکه پنجره‌های به کار برده شده در ساختمان از نوع دوجداره می‌باشند، در صورت استفاده از پنجره عمومی اتفاقات حرارتی دو برابر می‌گردد. برای کاهش مشکلات ناشی از پنجره‌ها، می‌توان از راههای مختلف یک لایه هوایی ساکن بین فضای داخل یا خارج پنجره ایجاد کرد. به طور مثال در بیرون پنجره پوششی مثل حصیر و یا سایبان‌های کرکره‌ای نصب کرد و یا از داخل ساختمان با استفاده از پرده‌های عمودی یا افقی این فضای خالی را ایجاد کرده تا بتوان تلفات حرارتی را کاهش داد.

قسمت بعدی که ۶ درصد از اتفاقات حرارتی کل را شامل می‌شود سقف ساختمان می‌باشد که برای جلوگیری در اتفاق در سقف‌ها می‌توانیم از عایق‌های حرارتی در زیر و روی سقف استفاده کنیم. از سقف‌های دو پوششی با لایه هوا در وسط آن استفاده کنیم و بهتر است که عایق‌بندی قسمت‌های بالایی ساختمان را بیشتر از قسمت‌های پایینی آن در نظر بگیریم.

بخش آخر که کمترین تلفات را شامل می‌شود کف ساختمان می‌باشد که فقط ۰/۲ درصد از اتفاقات کل را شامل می‌شود که مقدار قابل توجهی نمی‌باشد ولی در ساختمان‌هایی با زیر بنای بزرگ مقدار زیادی از انرژی را تلف خواهد نمود برای جلوگیری از تبادل حرارتی کف ساختمان می‌توان یک عایق حرارتی سخت در کف ساختمان قرار داد که این نوع عایق باید فشرده‌گی زیادی داشته باشد تا به مرور زمان باعث نشست در کف ساختمان نشود تا بتواند از این نوع اتفاق جلوگیری نماید. البته بالا آوردن کف ساختمان و ایجاد یک لایه هوا در زیر ساختمان نقش بهسزایی در کاهش تلفات از کف را دارد و این فضا را می‌توان به وسیله پشم شیشه یا پشم سنگ فله پر کرد. با مقایسه اتفاق حرارتی طبقات نیز مشخص می‌گردد با افزایش ارتفاع، اتفاق حرارتی افزایش می‌باید به طوریکه با هر یک متر افزایش ارتفاع نیاز به ۱۵ درصد انرژی بیشتر می‌باشد. با افزایش ارتفاع ساختمان به علت وزش باد بیشتر میزان انتقال حرارت افزایش می‌باید. جهت در معرض خورشید قرار گرفتن ساختمان نیز در میزان تلفات حرارتی و برودتی مؤثر است. می‌دانیم هر چه نسبت حجم به سطح یک ساختمان بیشتر باشد

طراحی ساختمان کارآمدتر است. مانند ساختمان‌هایی به شکل کره، نیم کره، و نیم مکعب. از طرفی هرچه نسبت مساحت به محیط ساختمان بالاتر باشد بازده مصرفی انرژی ساختمان بیشتر است. مانند ساختمان‌های گرد و مکعبی شکل. مطابق با مراجع با افزایش ارتفاع ساختمان هزینه ساخت و استقرار تجهیزات افزایش می‌یابد.

۲-۳. تعیین هزینه اجزای سیستم گرمایش ساختمان

مصالح به کار برده شده و تجهیزات سیستم گرمایش به همراه تعداد و قیمت آن با توجه به معترضین سایتهاي تأسیساتی استعلام گرفته شده است. سیستم گرمایش مورد بررسی دارای سه مرحله اساسی تولید، توزیع و انتشار می‌باشد. با توجه به محاسبات بار حرارتی و برودتی توسط نرم‌افزار کریم در مرحله تولید دو عدد دیگ آبگرم ۹ پرهای از نوع توربو هر یک با ظرفیت حرارتی ۲۹۴۰۸۲ کیلوکالری برای تأمین نیاز حرارتی فضاها و تأمین آبگرم مصرفی در نظر گرفته شده است. در هر طبقه یک هوارسان با توجه به تعداد نفرات جهت تأمین هوای تازه وجود دارد که بار حرارتی و برودتی آن برای طبقه همکف برابر ۲۲۳۷۸۴ (BTU/h) و طبقه اول ۲۰۲۲۳۹ و ۱۶۵۹۴۰ (BTU/h) و طبقه دوم ۱۸۶۲۵۴ و ۱۵۲۸۲۴ (BTU/h) و همچنین طبقه سوم ۹۱۷۳۸ و ۷۵۲۷۲ (BTU/h) است.

برای هر دیگ آبگرم یک مشعل دوگانه سوز با کاربری سوخت گاز طبیعی و گازوئیل در نظر گرفته شده که راندمان هر مشعل ۰/۷۵ و ظرفیت حرارتی هر یک (BTU/h) ۱۵۶۸۴۳۶ است. جهت تأمین آبگرم مصرفی یک دستگاه مبدل آبگرم کوئل دار به ظرفیت ۵۰۰ لیتر و ظرفیت حرارتی (BTU/h) ۱۰۲۹۵۹ نیز مورد نیاز می‌باشد. در مرحله توزیع، انرژی حرارتی بوسیله لوله‌ها از مرکز تولید به فضاها نیازمند به گرمایش انتقال می‌یابد و برای کاهش اثلاف حرارتی لوله‌ها عایق‌کاری شده‌اند و نوع عایق‌ها از نوع فوم لوله‌ای می‌باشند و قطر لوله‌های مورد استفاده از ۱/۲ تا ۵ اینچ می‌باشد و لوله‌های رفت و برگشت از نوع فولادی سیاه از نوع DIN2440 می‌باشند.

همچنین سه دستگاه الکتروپمپ زمینی که هر یک ۵۰ درصد ظرفیت کل را دارا باشد مورد نیاز است که یک دستگاه از آن به صورت کمکی است. دبی پمپ‌های سیرکولاتور آب ۵۴ مترمکعب در ساعت و هد آنها ۲۰/۴ متر می‌باشد. در مرحله انتشار ۱۵۶ عدد فن کویل سقفی جهت گرمایش فضاها مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به محاسبات بار حرارتی مورد نیاز فضاها توسط نرم‌افزار کریم و

ظرفیت حرارتی هر یک از اجزای سیستم گرمایش هزینه هر یک از اجزاء محاسبه گردید و جهت انجام محاسبات اگررژی اقتصادی در جدول (۲) قرار داده شده است.

جدول ۲. کمیت و قیمت تجهیزات سیستم گرمایش و مصالح به کار برده شده در دیوارهای خارجی

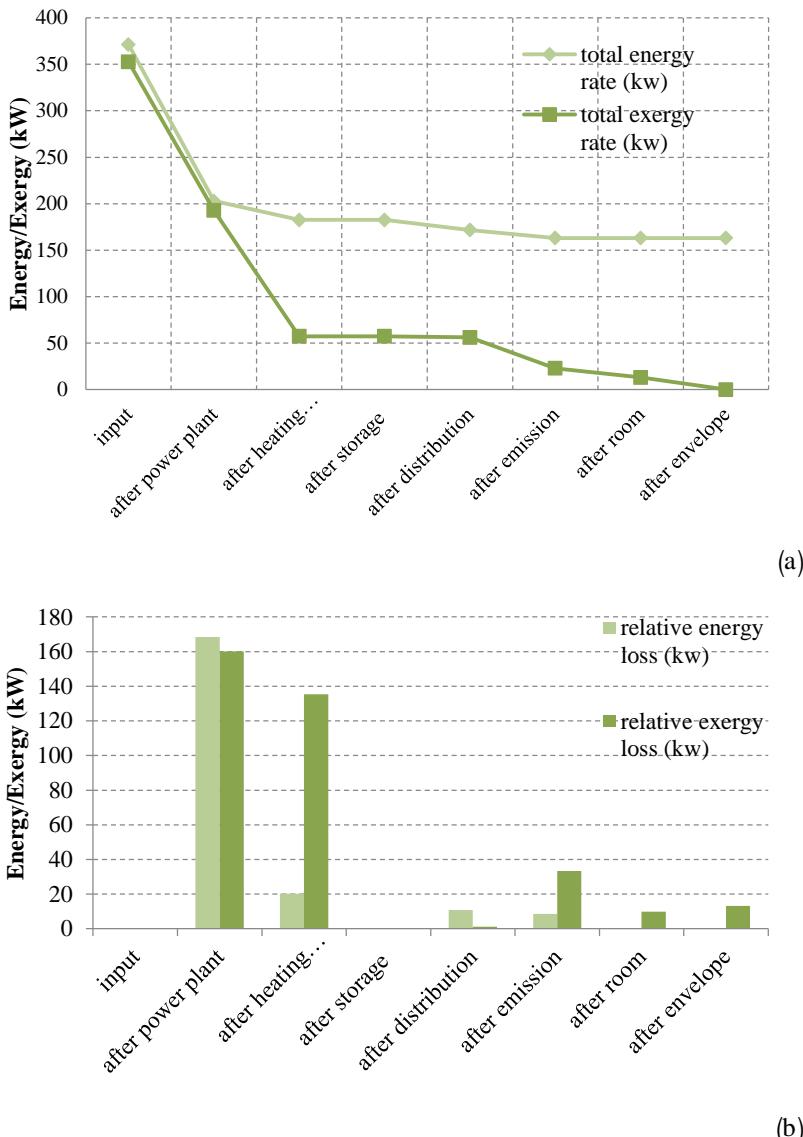
نام تجهیزات	دلار* به ازای تعداد/متر/سطح	قیمت (ریال)
لوله رفت فن کویل	(\$/m) ۷۸۱/۵۲	۱۲۱۱۵۰۳۹۴
لوله برگشت فن کویل	(\$/m) ۷۸۱/۵۲	۱۲۱۱۵۰۳۹۴
فن کویل	(\$/piece) ۱۵۶	۱۱۹۲۹۳۹۹۲۳
دیگ آب گرم چدنی	((\$/piece) ۲	۱۲۹۹۹۳۳۳۴
مشعل دوگانه سوز	(\$/piece) ۲	۱۰۷۴۵۰۰۰
الکترو پمپ زمینی	(\$/piece) ۲	۳۷۱۴۳۹۹۹
فوم لوله‌ای	(\$/m) ۱۵۶۳	۴۵۸۸۸۱۴۱
عایق حرارتی دیوارها و سقف	(\$/m ²) ۳۶۶۰	۲۵۶۲۰۰۰۰
بتن پاشی	(\$/m ²) ۳۶۶۰	۳۲۹۴۰۰۰۰
سنگ نما	(\$/m ²) ۲۶۰۷	۱۰۴۲۸۰۰۰۰
گچ و خاک	(\$/m ²) ۲۶۰۷	۱۳۰۳۵۰۰۰

مأخذ: نتایج تحقیق

* مبنای تبدیل ارز براساس میانگین تغییرات نرخ ارز از بانک مرکزی ایران در سال ۹۴ به دست آمده و ارزش آن ۳۰۱۸۰ ریال به ازای هر دلار است.

۳-۳. نتایج تحلیل اگررژی سیستم‌ها

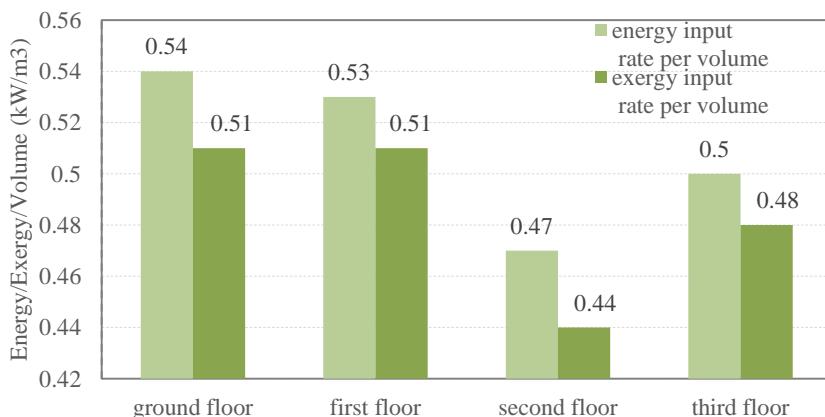
براساس روند محاسبات گفته شده جزئیات نتایج جریان انرژی و اگررژی برای تمام مراحل زنجیره حرارتی در ساختمان از مرحله تولید توان تا پوشش نمای ساختمان و میزان اتلافات انرژی و اگررژی در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴. (a) مقایسه جریان انرژی و اگزرسی کل (b) میزان اتلافات انرژی و اگزرسی در مراحل مختلف (kW)

نتایج نشان می‌دهد که نرخ انرژی پس از مرحله تولید توان افزایش یافته که قابل توجه می‌باشد همچنین در حالی که بخشی از انرژی از پوشش نمای ساختمان خارج شده ولی هنوز بخش قابل

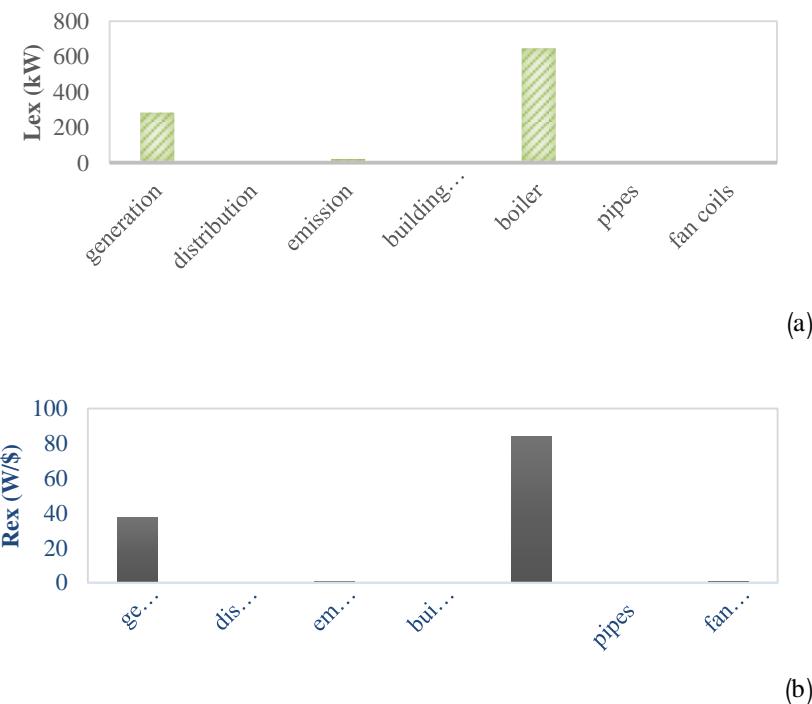
توجهی از آن باقی مانده است. درنتیجه از آنجایی که در محیط، انرژی پتانسیل انجام کار ندارد در نتیجه همه اگررژی مصرف می‌شود. کاهش مرحله به مرحله اگررژی نشان می‌دهد که اگررژی در هر مرحله مصرف شده تا به حالت مرده محیط برسد در حالی که انرژی خارج شده از پوشش نمای ساختمان مقدار قابل توجهی می‌باشد. با مقایسه میزان اتلافات انرژی و اگررژی مشخص می‌شود بیشترین اتلافات انرژی و اگررژی در انتقال انرژی اولیه رخ می‌دهد و پس از آن بیشترین اتلافات اگررژی در مرحله تولید توان اتفاق می‌افتد که به دلیل مصرف اگررژی زیاد در فرایند احتراق می‌باشد. با وجود پتانسیل بالقوه بالاتر تولید انرژی در بویلرها، فرایندهای برگشت‌ناپذیر موجود در احتراق باعث اتلافات انرژی زیادی می‌شود. کاهش اتلافات در مرحله توزیع نشان می‌دهد که استفاده از عایق مرغوب و طراحی مناسب و کاهش مسیر لوله‌کشی نقش مؤثری را در کاهش اتلافات داشته است و همچنین جهت افزایش اتلاف اگررژی در مراحل انتشار و پوشش نما استفاده از فن کویل‌ها با راندمان بهتر، انتخاب نوع مصالح و عایق بهتر را در پوشش نمای ساختمان طلب می‌کند. برای رتبه‌بندی مقادیر خاص ساختمان‌ها از نظر کیفیت بهینه‌سازی اگررژی و ارزیابی موفق بهینه‌سازی نتایج محاسبه مقادیر انرژی و اگررژی بر واحد حجم در شکل (۵) ارائه گردیده است.



شکل ۵. مقادیر انرژی و اگررژی بر واحد حجم به تفکیک طبقات

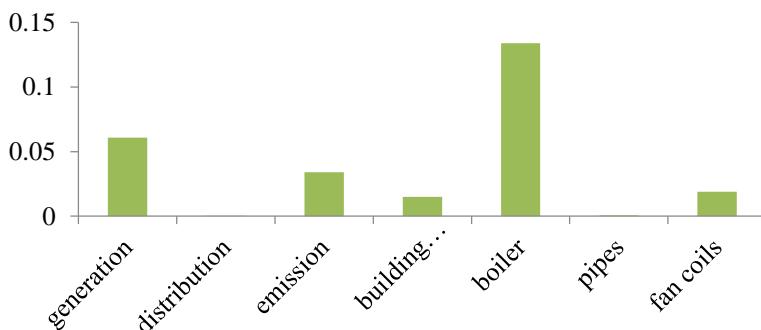
شکل نشان می‌دهد کم کردن ارتفاع دیوارها و کاهش حجم اتاق می‌تواند تأثیر قابل توجهی را در کاهش مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های سیستم گرمایش داشته باشد. همچنین مقادیر محاسبه شده

راندمان انرژی کل ۴۴ درصد و مقدار آن برای راندمان اگزرزی کل ۵/۶ درصد می‌باشد. با آنالیز EXCEM پارامتر \dot{L}_{ex} که حاصل جمع نرخ مصرف اگررژی و نرخ اگزرزی هدر رفته خروجی می‌باشد برای کل مراحل از مرحله تولید تا پوشش نمای ساختمان و تجهیزات محاسبه گردید و در شکل (۶) الف قابل مشاهده می‌باشد. همچنین پارامتر دیگری به نام \dot{R}_{ex} معروفی می‌شود که نشان‌دهنده نرخ اتلاف ترمودینامیکی بر هزینه است. مقادیر \dot{R}_{ex} در طول دوره‌های زمانی که هزینه‌های منابع انرژی افزایش می‌یابد کاهش می‌یابد که ممکن است این سرمایه‌گذاری به منظور کاهش تلفات صورت پذیرفته باشد و بهترین راندمان برای سیستم گرمایش ساختمان زمانی اتفاق می‌افتد که ترکیب بهینه‌ای از نظر اتلافات ترمودینامیکی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری داشته باشیم تا با کمترین هزینه بیشترین اصلاحات در سیستم صورت گیرد و اتلافات به حداقل برسد. شکل (۶) ب نشان‌دهنده مقادیر \dot{R}_{ex} است.



شکل ۶. نرخ اتلاف ترمودینامیکی برای مراحل و تجهیزات (a) \dot{L}_{ex} (b) \dot{R}_{ex}

نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تخریب اگررژی و در نتیجه بیشترین بازگشت‌نایابی‌ها مربوط به مرحله تولید توان با 42 kW و دیگ آبگرم 659 kW می‌باشد که به منظور افزایش راندمان نیازمند بیشترین اصلاحات ممکن می‌باشد. مقادیر پارامتر \dot{R}_{ex} برای مراحل و تجهیزات مختلف نشان می‌دهد که افزایش مقادیر در مرحله تولید توان با $83\text{ W}/\$$ و دیگ آب گرم با $33\text{ W}/\$$ نشانه افزایش اتفاقات ترمودینامیکی بر هزینه در آنها می‌باشد و افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری در این قسمت‌ها می‌تواند ترکیب بهینه‌تری را فراهم سازد. به کمک پارامتر ECE تمامی مراحل و تجهیزات سیستم گرمایش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و اثر اگررژی تخریب تجهیزات و هزینه آنها در کل سیستم محاسبه شد و نرخ اتفاقات ترمودینامیکی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نتایج اگررژی-اقتصادی بدست آمد. شکل (۷) نشان‌دهنده اثر بخشی هزینه ECE است.



شکل ۷. اثر بخشی هزینه ECE

نتایج نشان می‌دهد بویلر با 97 درصد بیشترین سهم اتفاق اگررژی را در بین تجهیزات به خود اختصاص داده است و لوله‌ها نزدیک به صفر درصد کمترین سهم اتفاق را دارا می‌باشند و این بیان‌گر این است که فرایند احتراق و بازگشت‌نایابی‌ها درصد قابل توجهی از اگررژی ورودی را تخریب نموده است. مقادیر کم ECE مقرنون به صرفه بودن و کارآمدتر بودن مراحل و یا تجهیزات را نشان می‌دهد و افزایش ECE بر افزایش هزینه و اگررژی تخریب بیشتر دلالت دارد.

پارامتر ECE مقداری بین صفر و یک دارد و ECE صفر نشان‌دهنده این است که تجهیز هیچ اثری بر هزینه و یا اگررژی تخریب ندارد و ECE یک بیان می‌کند که دیگر تجهیزات هیچ اثری بر هزینه و اگررژی تخریب ندارند. این پارامتر دارای واحد خاصی نمی‌باشد. در واقع این پارامتر به ما نشان می‌دهد که حساسیت کدام یک از اجزا و یا مراحل نسبت به هزینه و تخریب اگررژی بیشتر می‌باشد و

به ما کمک می‌کند بیشترین اصلاحات را در بخشی انجام دهیم که اثر بخشی بیشتری را داشته باشد. یا به کمک این پارامتر می‌توانیم اولویت‌بندی مناسبی در خرید لوازم و تجهیزات سیستم گرمایش ساختمان داشته باشیم در بسیاری از ساختمان‌ها از مرحله پیش طراحی تا ساخت بیشتر سرمایه به سمتی می‌رود که ممکن است نقش کمی در اتفاقات انرژی داشه باشد مثلاً ممکن است بیشتر هزینه صرف خرید رادیاتور و یا فن کویل مرغوب شود ولی اگر این هزینه در بهبود راندمان دیگ آبرگرم انجام بگیرد میزان تخریب اگررژی کل به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه به تعدادی از جنبه‌های کیفیت انرژی و کاربرد آن در ساختمان‌ها پرداخته شد و مشخص گردید که همیشه کم کردن تقاضای انرژی تنها راه برای صرف‌جویی در مصرف انرژی نمی‌باشد و بهینه‌سازی مصرف با استفاده از مفهوم کیفیت انرژی یا راندمان اگررژی می‌تواند نقش مهمی را ایفا کند و نشان می‌دهد که اگررژی می‌تواند به عنوان یک شاخص در انتخاب اجزا و درک رفتار هزینه‌ای آنها، عملکرد بهتر سیستم‌های انرژی را فراهم کند و توسعه سیستم‌های انرژی را بهبود بخشد. در حال حاضر مفهوم اگررژی به سختی در دستور کار مشاوران انرژی در ساختمان‌ها قرار می‌گیرد و مفهوم اگررژی به عنوان یک اصل کلی در بهینه‌سازی نسبتاً ناشناخته مانده است که علت کاهش سهم اگررژی در صرف‌جویی هزینه‌ها نیز می‌تواند همین موضوع باشد.

در این مطالعه جریان انرژی و اگررژی از مرحله تولید توان تا پوشش نمای ساختمان مورد محاسبه قرار گرفت. نتایج نشان داد بیشترین اتلاف انرژی مربوط به نفوذ هوا به ساختمان می‌باشد که عوامل متعددی نظیر عایق‌کاری و استفاده از روش‌های نوین طراحی نمای ساختمان و جهت قرارگیری ساختمان‌ها با توجه زاویه تابش خورشید از جمله روش‌هایی است که به منظور کاهش اتلافات توصیه می‌شود. همچنین مقایسه اتلافات حرارتی طبقات بیانگر این موضوع است که کاهش ارتفاع طبقات و افزایش نسبت حجم به سطح ساختمان می‌تواند هزینه‌های ساخت را کاهش و بازده مصرف انرژی را افزایش دهد. تحلیل اگررژی در تجهیزات سیستم گرمایش مشخص نمود که خرید دیگ آبرگرم با راندمان بالاتر و سطح مقطع کمتر جهت کاهش تلفات سطحی و تشعشی توصیه می‌گردد. و البته در بخش انتشار نیز استفاده از فن کویل‌ها با راندمان بالا و پرهای مناسب از الزامات اساسی در کاهش انرژی مصرفی در ساختمان مورد بررسی می‌باشد.

آنالیز (EXCEM) به ما نشان داد که بیشترین اصلاحات ممکن باید در مراحل و قسمت‌های انجام بگیرد که بیشترین بازگشت‌ناپذیری‌ها را دارا می‌باشد. اما تصمیم‌گیری درباره مراحل و یا تجهیزاتی که نیاز به بهینه‌سازی دارند باید از هر دو نقطه نظر هزینه و اتفاقات ترمودینامیکی مورد بررسی قرار گیرد. در این مطالعه بیشترین اصلاحات با توجه به تمامی موارد ذکر شده باید در مرحله تولید توان و دیگ آبگرم و پس از آن فن کویل‌ها صورت پذیرد. همچنین به کمک این پارامتر می‌توانیم هزینه‌های سرمایه‌گذاری را بیشتر در جهتی انجام دهیم که کمترین اتفاقات را در مراحل و تجهیزات داشته باشیم. بنابراین تحلیل اگزرژی-اقتصادی این دیدگاه را به طراحان و سرمایه‌گذاران در بخش ساختمان می‌دهد که بیشتر هزینه خود را در بخشی انجام دهند که اثرگذاری بیشتری هم در کاهش اتفاقات و هم هزینه‌ها داشته باشد.

منابع

- [۱] اسکندری، هادی؛ مداعی، محمدحسین و بهرام خسروزاد (۱۳۹۶)، "ارزیابی اثر عایق‌های ساختمانی بر میزان مصرف انرژی با توجه به هزینه در اقلیم‌های مختلف ایران"، نشریه انرژی ایران، (۲۰)، صص ۱۸-۵.
- [۲] غیبی، فرشاد؛ موسوی، روح الله و حمید اسکندری (۱۳۹۶)، "بررسی عددی و تجربی برآفروختگی نماهای شیشه‌ای در ساختمان‌های اداری در اقلیم گرم و خشک"، نشریه انرژی ایران، (۴)، صص ۲۵-۵.
- [۳] فلاح، محسن (۱۳۸۹)، "تحلیل انرژی و اگزرژی سیستم گرمایش ساختمان به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی"، دومین کنفرانس بین‌المللی گرمایش، سرمایش، و تهویه مطبوع، تهران: خرداد ۱۳۸۹.
- [4] Acikkalp E., Hepbasli A., Yucer C.T and T.H. Karakoc (2015). "Advanced Exergoenvironmental Assessment of a Building from the Primary Energy Transformation to the Environment". *Energy and Buildings*, vol.89, pp.1-8.
- [5] Balta M.T., Kalinici Y. and A. Hepbasli (2008). "Evaluating a low Exergy Heating System from the Power Plant through the Heat Pump to the Building Envelope". *Energy and Buildings*, vol.40, No.10, pp.1799-1804.
- [6] Hepbasli A. (2012). "Low Exergy (LowEx) heating and cooling systems for Sustainable Buildings and Societies". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.16, No.1, pp.73-104.

-
- [7] Rosen M.A. and I. Dincer (2004). "Effect of Varying dead-state Properties on Energy and Exergy Analyses of Thermal Systems". *International Journal of Thermal Sciences*, vol.43, No.2, pp.121-133.
 - [8] Sakulpipatsin P. (2008). Exergy Efficient Building Design (Doctoral dissertation, TU Delft, Delft University of Technology).
 - [9] Utlu Z. and A. Hepbasli (2003). "A Study on the Evaluation of Energy Utilization Efficiency in the Turkish Residential-commercial Sector using Energy and Exergy Analyses". *Energy and Buildings*, vol.35, No.11, pp.1145-1153.
 - [10] Utlu Z. and A. Hepbasli (2006). "Estimating the Energy and Exergy Utilization Efficiencies for the Residential-commercial Sector: an application". *Energy Policy*, vol.34, No.10, pp.1097-1105.
 - [11] Yildiz A. and A. Güngör (2009). "Energy and Exergy Analyses of space heating in Buildings". *Applied Energy*, vol.86, No.10, pp.1939-1948.
 - [12] Yucer C.T. and A. Hepbasli (2012). "Exergoeconomic Analysis of a Central heating system from the Generation stage to the Building Envelope". *Energy and Buildings*, vol.47, pp.592-599.
 - [13] Yucer C.T. and A. Hepbasli (2013). "Exergoeconomic Analyses of an Energy supply Chain for Space heating in a Building". *Energy and Buildings*, vol.62, pp.343-349.