نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۲، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۱۲۰ – ۹۷

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

[۱] سید مسعود سیدی*، [۲] مهدی خلیلی، [۳] مهدی‌هاشمی تیله نویی

تاریخ دریافت:
۱۳۹۵ / ۱۰ / ۰۷

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۸ / ۰۲ / ۰۲

کلمات کلیدی:
انرژی
اگزرژی
اگزرژی اقتصادی
سیستم گرمایش ساختمان

چکیده

در مطالعه حاضر، تحلیل انرژی و اگزرژی-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 فضاها محاسبه می‌گردد. با نوشتن معادلات انرژی و اگزرژی در قسمتهای مختلف اتلاف انرژی و اگزرژی به‌دست آمده و همچنین هزینه هر یک از اجزای سیستم گرمایشی محاسبه می‌شود. مرحله دوم شناسایی فرآیندهای نامطلوب ترمودینامیکی سیستم بر پایه تعیین اتلافات اگزرژی و محاسبه پارامتر R_{ex} به عنوان نرخ اتلافات ترمودینامیکی بر هزینه می‌باشد. مرحله سوم، تعیین بیشترین اصلاحات قابل پیاده‌سازی بر پایه مفاهیم اگزرژی-اقتصادی است بطوریکه پارامتری به نام ECE به عنوان اثربخشی هزینه اگزرژی برای تمامی سیستم‌های انتقال انرژی از منبع انرژی اولیه تا انتقال انرژی از پوشش‌های ساختمان محاسبه می‌گردد. نتیجتاً بیشترین اتلاف انرژی و اگزرژی مربوط به مرحله تولید و به ترتیب ۱۸۸/۸۰، ۲۹۵/۴۲ کیلو وات می‌باشد. همچنین با محاسبه R_{ex} و ECE مشخص می‌شود که دیگ آب گرم و مرحله تولید انرژی نیاز بیشتری به بهینه‌سازی و اصلاح دارند.

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
kmehdi555@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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

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 اگزرژی، 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 اگزرژی در رأس تحقیقات ترمودینامیکی قرار گرفت.

بر طبق قانون دوم ترمودینامیک در هر فرآیند واقعی، آنتروپی تولید شده متناسب با از دست رفتن اگزرژی و نابودی آن در طی فرآیند می‌باشد. بنابراین هدف اصلی آنالیز اگزرژی یافتن و برآورد میزان نواقص ترمودینامیکی در سیستم‌ها در اثر فرآیندهای شیمیایی و حرارتی و یافتن راه‌حل‌هایی برای از بین بردن یا کاهش آنها می‌باشد به‌طوری‌که 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، اگزرژی و اگزرژی-اقتصادی به صورت تواماً استفاده گردد. با توجه به هدف کلی اشاره شده آنالیز انرژی، اگزرژی و اگزرژی-اقتصادی در ساختمان، در این زمینه مطالعات متعددی در خارج از کشور و تعداد محدودی در داخل کشور انجام شده است.

اوتلوا و هپباسلی[1] (۲۰۰۳) مطالعه‌ای برای ارزیابی بهبود راندمان انرژی در بخش ساختمان‌های مسکونی و تجاری ترکیه توسط آنالیز انرژی و اگزرژی انجام دادند. نویسندگان بر اهمیت آنالیزهای ارائه شده در سیاست‌های کلان انرژی در ترکیه تأکید کرده‌اند. [۹] به‌طوری‌که در راستای تحقیق فوق در

1. Utlua and Hepbasli

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

سطح ملی و کلان در کشور ترکیه تحقیقی دیگری بر روی ساختمان‌های مسکونی و تجاری انجام شد. و راندمان بهره‌وری انرژی و اگزرژی 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 اگزرژی 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 در خصوص تعاریف مرتبط با هوای محیط و هوای مرجع است. [۸] البته یکی از جنبه‌های بحث برانگیز در رویکرد اگزرژی 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 اگزرژی سیستم‌های حرارتی شرح داده شده است. [۷]

علاوه بر محققین ترکیه آنالیز انرژی در ساختمان‌ها توسط محققین ایرانی نیز انجام شده است. (موسوی و غیبی، ۱۳۹۶) [۲]، (اسکندری و دیگران، ۱۳۹۶) [۱]. البته آنالیزهای انجام شده بدون درک مفهوم اگزرژی و پارامترهای اقتصادی بوده است. تحقیقات حول آنالیزهای مرتبط با اگزرژی از منبع انرژی تا پوشش ساختمان به عنوان موارد تحقیقاتی با اگزرژی 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 اتاق یا محیطی با ابعاد محدود انجام شده است. نمونه مشابه این تحقیق در ایران توسط فلاح (۱۳۸۹) برای یک دفتر کار برای سه سیستم گرمایشی شامل بویلرهای معمولی و چگالشی و پمپ گرمایی انجام شده و این سیستم‌ها بطور کمی و کیفی مقایسه شده است. [۳] اگرچه تحلیل اگزرژی در ساختمان در ایران در مرحله توسعه قرار دارد اما تحلیل اگزرژی-اقتصادی همچنان مغفول افتاده است. جزئیات تحلیل اگزرژی-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. Acıkkalp et al.
7. Yucer C.T. and Hepbasli

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

(آسیکالپ و دیگران، ۲۰۱۵) [۴]، (یوچر و هپباسلی، ۲۰۱۲) [۱۲]. با مطالعه تحقیقات انجام شده داخلی و خارجی در حوزه آنالیز انرژی، اگزرژی و اگزرژی-اقتصادی تحقیق حاضر از دوجنبه 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 اگزرژی 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 می نمائیم.

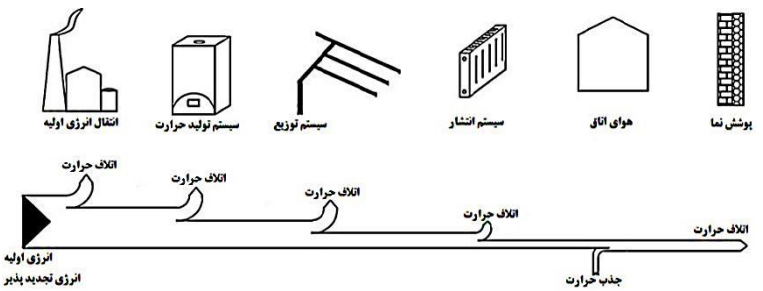
۲-۱. مشخصات ساختمان مورد مطالعه

ساختمان مورد بررسی یک مجتمع دانشگاهی دارای سه طبقه هر یک به ارتفاع ۴ متر واقع در شهرستان علی آباد 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 ۲۳ ^{o}C دمای هوای خارج ۰ ^{o}C است. مصالح دیوارهای خارجی به ترتیب سنگ نما، پلاستر سیمان، آجر سفالی و عایق حرارتی و گچ‌کاری می‌باشد و شیشه پنجره‌ها از نوع دو جداره با ضریب هدایت حرارتی ۰/۶۵ 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

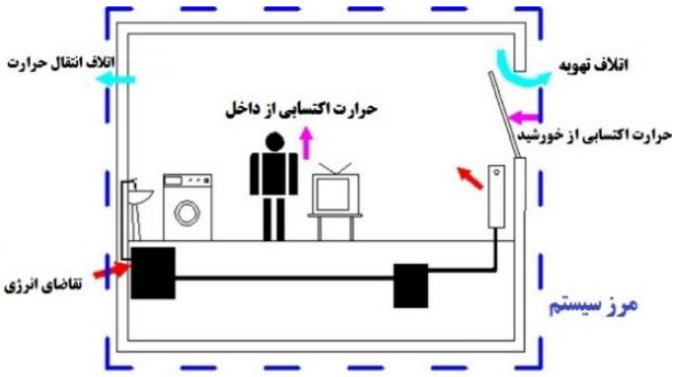
جهت تحلیل بار اگزرژی ساختمان باید میزان تقاضای انرژی ساختمان محاسبه گردد. اتلافات انرژی از منبع انرژی اولیه تا انتقال/اتلاف حرارت از پوشش نمای ساختمان در شکل (۱) ارائه شده است. (در این شکل مرحله ذخیره‌سازی انرژی در نظر گرفته نمی‌شود).

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]



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 هدررفت انرژی و جذب انرژی از مرز یک اتاق است. براساس جریان‌های ورودی و خروجی انرژی و اگزرژی بایستی حرارت اکتسابی و اتلاف‌های مختلف محاسبه شود.



شکل ۲. جریان‌های انرژی/اگزرژی از مرز یک اتاق

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

$$\dot{Q}_T = \sum \left(U_i \times A_i \times (1-b)\right) \times (T_i - T_e) \qquad (۱)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

که در آن $\dot{Q}_T$ (W) کل تلفات گرمایی انتقال و U_i (W/m² K) ضریب انتقال حرارت سطح i و A_i (m²) 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 گرفته‌می‌شود. اتلاف گرمایی ناشی از تهویه را نیز می‌توان توسط معادله زیر محاسبه کرد. [۱۱]

$$\dot{Q}_V = (c_p \times \rho \times n_d \times (1 - \eta_v)) \times (T_i - T_e) \quad (۲)$$

که در آن n_d نرخ تعویض هوا است که ۱/۵ 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 ۰/۹۵درصد 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 به‌دست می‌آید. [۱۱]

$$\dot{Q}_s = \sum (I_{Sj} \times (1 - f_f)) \times (A_{w.j} \times g_i \times f_{sh} \times f_{no}) \quad (۳)$$

که در فرمول بالا $\dot{Q}_s$ (W) حرارت اکتسابی از خورشید و I_{Sj} (W/m²) ضریب انتقال گرمای تابشی با توجه به موقعیت پنجره می‌باشد که برای پنجره جنوبی می‌توان آن را ۴۴(W/m²) در نظر گرفت. f_f کسر چار چوب پنجره، $A_{w.j}$ (m²) سطح کلی پنجره و g_i انتقال انرژی کلی از جدار شیشه که می‌توان آن را ۰/۷۵ 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 ۰/۹ در نظر گرفته شد و همچنین گرمای اکتسابی داخلی ناشی از ساکنین از رابطه زیر به‌دست می‌آید. [۱۱]

$$\dot{Q}_{i,o} = \dot{Q}_{i,o}' \times no_o \quad (۴)$$

در رابطه بالا $\dot{Q}_{i,o}$ حرارت اکتسابی از هر نفر می‌باشد که ۸۰ (W) در نظر گرفته می‌شود و no_o تعداد نفرات موجود در طبقات ساختمان در ساعت پیک است بطوریکه، طبقه همکف ۳۲۲ نفر، طبقه اول ۲۹۱ نفر،طبقه دوم ۲۶۸ نفر و تعداد افراد موجود در طبقه سوم با توجه به ساعات اداری و کلاس‌ها ۱۳۲ نفر در نظر گرفته شده است.همچنین حرارت اکتسابی از تجهیزات نیز از رابطه زیر به‌دست می‌آید. [۱۱]

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

$$\dot{Q}_{i,e} = \sum_{i=1}^{m} \dot{Q}_{i,e}^{'} \times n_i \, e_o \qquad (۵)$$

که در رابطه بالا $\dot{Q}_{i,e}^{'}$ حرارت اکتسابی از تجهیزات و $n_i \, e_o$ 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.

جدول۱. حرارت اکتسابی تجهیزات موجود در ساختمان در ساعات پیک

ردیف	نام تجهیز	تعداد در طبقه همکف	تعداد در طبقه اول	تعداد در طبقه دوم	تعداد در طبقه سوم	جمع کل	حرارت اکتسابی هر جزء (وات)	حرارت اکتسابی کل (وات)
۱	لامپ	۱۰۲	۱۱۳	۱۱۸	۱۱۱	۴۴۴	۲۰	۸۸۸۰
۲	تلویزیون	۵	۴	۵	۳	۱۷	۷۵	۱۲۷۵
۳	چاپگر	۷	۹	۶	۹	۳۱	۱۱۰	۳۴۱۰
۴	فتوکوپی	۱	۱	۱	۱	۴	۲۰۰	۸۰۰
۵	کامپیوتر	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.

$$\dot{Q}_h = (\dot{Q}_T + \dot{Q}_V) - (\dot{Q}_s + \dot{Q}_{i,o} + \dot{Q}_{i,e}) \qquad (۶)$$

۲-۳. مراحل تحلیل اگزرژی 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 اگزرژی، 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 اگزرژی به ترتیب شامل پوشش نمای ساختمان،

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

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) به‌دست می‌آید و سپس بار اگزرژی مورد نیاز اتاق توسط معادلات زیر محاسبه می‌گردد.

$$\dot{E}x_{room} = \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \times \dot{Q}_h \quad (۷)$$

T_0 و T_i دمای مرجع و دمای اتاق هستند و به ترتیب برابر با ۰ °C و ۲۳ °C در نظر گرفته شدند (یلدیز و گونگور،۲۰۰۴).

۲-۳-۲. سیستم هوای اتاق

با توجه به گرمایش اتاق بوسیله سطح داغ (فن‌کویل) بار اگزرژی ناشی از انتقال گرمای هوای اتاق که به عنوان حجم کنترل 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 (۸) محاسبه نمود. [۱۱]

$$T_{heat} = \left(\frac{T_{in} - T_{ret}}{2ln\left(\frac{T_{in} - T_i}{T_{ret} - T_i}\right)} + T_i \right) \quad (۸)$$

T_{in} و T_{ret} دمای رفت و دمای برگشت سیستم توزیع انرژی (فن‌کویل) می‌باشد که به ترتیب برابر با ۷۰ °C، ۶۰ °C است. مقدار اگزرژی قابل حصول توسط انتقال حرارت از سطح فن‌کویل از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\dot{E}x_{heat} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{heat}}\right) \times \dot{Q}_h \quad (۹)$$

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 اگزرژی لازم درسیستم هوای اتاق را تأمین نماید. η_E بازده گرمایی و $p_{aux,E}$ توان کمکی لازم برای هر سیستم انتشار انرژی گرمایی نظیر

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

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

$$\dot{Q}_{loss,E} = \dot{Q}_h \times \left(\frac{1}{\eta_E} - 1\right) \quad (۱۰)$$

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

$$P_{aux,E} = P_{aux,e} \times \dot{Q}_h \quad (۱۱)$$

بار اگزرژی سیستم پخش انرژی گرمایی از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$\dot{E}x_{emis} = \dot{E}x_{heat} + \Delta\dot{E}x_{emis} \quad (۱۲)$$

که در آن افت اگزرژی، $\Delta\dot{E}x_{emis}$ در سیستم انتشار از رابطه زیر به‌دست می‌آید (یلدیز و گونگور،۲۰۰۴).

$$\Delta\dot{E}x_{emis} = \frac{\dot{Q}_h + \dot{Q}_{loss,E}}{T_{in} - T_{ret}} \left[(T_{in} - T_{ret}) - T_0 \ ln \ (\frac{T_{in}}{T_{ret}}) \right] \quad (۱۳)$$

۲-۳-۴. 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) به‌دست آمد. سیستم توزیع باید اگزرژی لازم برای افتهای اگزرژی (تقاضای انرژی) ایجاد شده در سیستم توزیع و اگزرژی مورد نیاز سیستم انتشار گرما را تأمین نماید.

$$\dot{E}x_{dis} = \dot{E}x_{emis} + \Delta\dot{E}x_{dis} \quad (۱۴)$$

که در آن افت اگزرژی (تقاضای اگزرژی) در سیستم توزیع از رابطه به‌دست زیر می‌آید.

$$\Delta\dot{E}x_{dis} = \frac{\dot{Q}_{loss,D}}{\Delta T_{dis}} \left[(\Delta T_{dis} - T_0) \times ln \left(\frac{T_{dis}}{T_{dis} - \Delta T_{dis}}\right)\right] \quad (۱۵)$$

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:

$$\dot{Q}_{loss,D} = (\dot{Q}_h + \dot{Q}_{loss,E}) \times \left(\frac{1}{\eta_D} - 1\right) \quad (۱۶)$$

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

$$P_{aux,D} = p_{aux,D} \times (\dot{Q}_h + \dot{Q}_{loss,E}) \quad (۱۷)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

۲-۳-۵. سیستم تولید

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

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

که در رابطه بالا η_G برابر با ۰/۹ و F_S کسری از انرژی است که توسـط انـرژی خورشـید تـأمین می‌شود البته در این مطالعه صفر در نظر گرفته شده است. انرژی مورد نیاز سیستم تولید توان از رابطـه زیر به‌دست می‌آید.

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

$p_{aux,G,const}$ و $p_{aux,G}$ انرژی ثابت و متغیـر اسـت کـه بـه ترتیـب (W) ۲۰و (W/kW$_{heat}$) ۱/۸ می‌باشد و از مرجع [۱۱] خوانده می‌شود. بار اگزرژی سیستم تولید توان از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

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

$F_{q.s}$ فاکتور کیفیت برای بویلرهای معمولی و چگالشی می‌باشد و برابر ۰/۹۵ البته فـاکتور کیفیـت برای پمپ حرارتی ۱ می‌باشد. [۱۱] مقدار انرژی و اگزرژی کل سـاختمان براسـاس انـرژی و اگـزرژی ورودی اولیه بیان می‌شود. مقدار انرژی اولیه حاصل از سوختهای فسـیلی و تجدیدناپـذیر از رابطـه زیـر محاسبه می‌گردد.

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

در رابطه بالا F_P فاکتور انرژی اولیه می‌باشد که برابـر بـا ۱/۳ اسـت. P_1 و P_V بـه ترتیـب انـرژی مخصوص برای روشنایی و تهویه می‌باشد کـه در ایـن مطالعـه صـفر در نظـر گرفتـه مـی‌شـود. [۱۱] $F_{P,Electricity}$ فاکتور انرژی اولیه الکتریسیته می‌باشد که ۳ در نظـر گرفتـه شـده اسـت. اگـر از منـابع تجدیدپذیر یا انرژی محیط برای تأمین انرژی استفاده شود، مانند آنچه در پمپ گرمایی اتفاق مـی‌افتـد مقدار انرژی تجدیدپذیر اضافه شده از رابطه زیر به‌دست 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 بویلرهای حرارتی صفر در نظر گرفته می‌شود. [۱۱] نهایتاً بار اگزرژی کـل سـاختمان از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

$$\dot{E}x_{tot} = \dot{E}_{prim,tot} \times F_{q,s} + \dot{E}_{renew} \times F_{q,renew} \quad (۲۳)$$

۲-۳-۶. دیگ آب گرم

دیگ آب گرم یکی از تجهیزاتی است که آب گرم مورد نیاز برای گرمایش فضاها 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 سیتسم گرمایش از نقطه نظر اگزرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ظرفیت حرارتی دیگ آب گرم متناسب با بار حرارتی مورد نیاز برای تأمین اتلاف انرژی فضا ها (۶۸۲ (kW با دمای رفت ۸۰ ^{o}C و دمای برگشت ۶۰ ^{o}C می‌باشد و نوع سوخت مصرفی گاز با حرارت پایین $\left(\frac{\text{kj}}{\text{kg}}\right)$۵۰,۰۰۰ می‌باشد.

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

$$\eta = \frac{\dot{m}_{wa} \times c_p\,(T_{wa,in} - T_{wa,out})}{\dot{m}_f \times H_u} \quad (۲۴)$$

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

$$\dot{E}x_{des} = \dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} \quad (۲۵)$$

$$\dot{E}x_f = \Delta\dot{E}x_{wa} + \dot{E}x_{ef} + \dot{E}x_{l,pet} + \dot{E}x_{d,b} \quad (۲۶)$$

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

$$\Delta\dot{E}x_{wa} = \dot{m}_{wa}[(h_{out} - h_{in}) - T_0\,(S_{out} - S_{in})] \quad (۲۷)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

کـه در آن h_{out} و h_{in} آنتـالپی مخصـوص آب گـرم خروجـی و ورودی وS_{out} و S_{in} آنتروپـی مخصوص خروجی و ورودی می‌باشد. جزئیات مربوط به پارامترهای روابط فوق در مرجـع [۱۳] موجـود است. راندمان اگزرژی دیگ آب گرم از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\psi = \frac{\Delta \dot{E}x_{wa}}{\dot{E}x_f} \quad (۲۸)$$

۲-۳-۷. لوله‌های آب گرم

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

$$\dot{E}x_{l,p} = \frac{T_S - T_0}{T_S} \times \dot{Q}_{l,p} \quad (۲۹)$$

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

۲-۳-۸. فن‌کویل‌ها

فن‌کویل را می‌توان یک نوع مبدل حرارتی آب – هوا در نظر گرفت کـه در ایـن سیسـتم انـرژی حرارتی آب گرم به هوای اتاق منتقل می‌شود. دمـای آب ورودی و خروجـی بـه ترتیـب بـه هـر واحـد فن‌کویل ۷۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد می‌باشد و توان الکتریکی فن ۵۵ وات می‌باشد. [۴] آنالیز انـرژی بـر طبق جرم و بالانس انرژی به صورت زیر می‌باشد.

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (۳۰)$$

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

$$\Delta \dot{E}x_{wa,fc} = \dot{m}_{wa,fc}[(h_{in-} h_{out}) - T_0(S_{in-} S_{out})] \quad (۳۱)$$

$\dot{m}_{wa,fc}$ نرخ جریان جرمی آب در گردش، h و S به ترتیـب شـامل آنتـالپی و آنتروپـی ورودی و خروجی است. رابطه بالانس اگزرژی برای فن‌کویل به صورت زیر می‌باشد.

$$\Delta \dot{E}x_{wa,fc} = \dot{E}x_{fc} + \dot{E}x_{des.fc} \quad (۳۲)$$

در رابطه بالا $\Delta \dot{E}x_{wa,fc}$ نرخ اگزرژی حرارتی تحویل داده شـده بوسـیله آب در حـال گـردش بـه فن‌کویل، $\dot{E}x_{fc}$ نرخ اگزرژی تحویل داده شده به اتاق و بازگشت‌ناپذیری‌ها به صورت $\dot{E}x_{des.fc}$ تعریف می‌شود. و راندمان اگزرژی فن‌کویل بوسیله رابطه زیر تعریف می‌شود: [۴]

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

$$\psi = \frac{\dot{E}x_{fc}}{\Delta\dot{E}x_{wa,fc}} \quad (۳۳)$$

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 اگزرژی ساختمان‌ها بررسی می‌شود. راندمان انرژی کل سیستم از رابطه زیر محاسبه می‌شود: [۶]

$$\eta_{sys} = \frac{\dot{E}_{building}}{\dot{E}_{tot}} \quad (۳۴)$$

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

$$\psi = \frac{\dot{E}x_{building}}{\dot{E}x_{tot}} \quad (۳۵)$$

۲-۴-۱.آنالیز EXCEM

آنالیز EXCEM مرتبط با معادله بالانس جرم، انرژی، اگزرژی و هزینه است. اتلافات اگـزرژی بـا تعریف اتلاف اگزرژی خارجی (اتلاف مرتبط با اگزرژی خارج شده از سیستم) و اتلاف اگـزرژی داخلـی (اتلاف اگزرژی توسط بازگشت ناپذیری‌ها و یا اگزرژی مصرف شده) به‌دست می‌آید. با حاصل جمع این دو نوع اتلاف اگزرژی، اتلاف اگزرژی کل به‌دست می‌آید.

$$\dot{L}_{\mathrm{ex}} = \text{نرخ مصرف اگزرژی} + \text{نرخ اگزرژی هدررفته خروجی} \quad (۳۶)$$

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

$$\dot{R}_{ex} = \frac{\dot{L}_{ex}}{K} \quad (۳۷)$$

۲-۴-۲. اثر بخشی هزینه اگزرژی (ECE)

پارامتر بی بعد (ECE) با عنوان اثربخشی هزینه اگزرژی اثر اگزرژی تخریـب تجهیـزات و هزینـه آنها را در کل سیستم نشان می‌دهد.

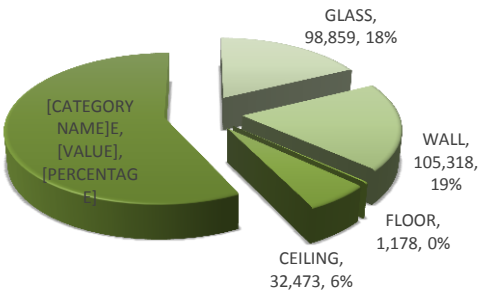
$$\mathrm{ECE} = \frac{\text{هزینه مراحل یا تجهیزات}}{\text{کل هزینه سیستم}} \times \frac{\text{اگزرژی تخریب مراحل یا تجهیزات}}{\text{کل اگزرژی تخریب سیستم}} \quad (۳۸)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

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 می افتد 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 دیوار ها باعث کاهش تلفات حرارتی شده با این وجود، دیوار ها سهم ۱۹ درصدی را در تلفات انرژی دارا می‌باشند که بندکشی و بتن‌کاری و همچنین گچ‌کاری و سفیدکاری بر روی دیوارها تا حدودی آنها را در مقابل نفوذ هوا حفظ می‌نماید، اما چون در اثر خشک شدن مصالح ساختمانی، و در

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

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 غشاهایی مثل ایزوگام به دست آمده است.

بخش بعدی که ۱۸ درصد از اتلافات 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 معمولی اتلافات 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 اتلافات حرارتی کل را شامل می‌شود سقف ساختمان می‌باشد که برای جلوگیری در اتلاف 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 اتلافات 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 فشردگی زیادی داشته باشد تا به مرور زمان باعث نشست در کف ساختمان نشود تا بتواند از این نوع اتلاف 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 اتلاف حرارتی طبقات نیز مشخص می‌گردد با افزایش ارتفاع، اتلاف حرارتی افزایش می‌یابد 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 می‌یابد. 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

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.

۳-۲. تعیین هزینه اجزای سیستم گرمایش ساختمان

مصالح به کار برده شده و تجهیزات سیستم گرمایش به همراه تعداد و قیمت آن با توجه به معتبرترین سایت‌های 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 کریر 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 و ۱۸۳۶۱۸ (BTU/h) و طبقه اول ۲۰۲۲۳۹ و ۱۶۵۹۴۰ (BTU/h) و طبقه دوم ۱۸۶۲۵۴ و ۱۵۲۸۲۴ (BTU/h) وهمچنین طبقه سوم ۹۱۷۳۸ و ۷۵۲۷۲ (BTU/h) است.

برای هر دیگ آبگرم یک مشعل دوگانه‌سوز با کاربری سوخت گاز طبیعی و گازوئیل در نظر گرفته شده که راندمان هر مشعل ۰/۷۵ وظرفیت حرارتی هر یک (BTU/h) ۱۵۶۸۴۳۶ است. جهت تأمین آبگرم مصرفی یک دستگاه مبدل آبگرم کوئل‌دار به ظرفیت ۵۰۰ لیتر و ظرفیت حرارتی (BTU/h) ۱۰۲۹۵۹ نیز مورد نیار می‌باشد .در مرحله توزیع، انرژی حرارتی بوسیله لوله‌ها از مرکز تولید به فضاهای نیازمند به گرمایش انتقال می‌یابد و برای کاهش اتلاف 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 فن‌کویل سقفی جهت گرمایش فضاها مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به محاسبات بار حرارتی مورد نیاز فضاها توسط نرم‌افزار کریر و

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

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

جدول۲. 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 فن‌کویل	($/m) ۷۸۱/۵۲	۱۲۱۱۵۰۳۹۴
لوله برگشت فن‌کویل	($/m) ۷۸۱/۵۲	۱۲۱۱۵۰۳۹۴
فن‌کویل	($/piece) ۱۵۶	۱۱۹۲۹۳۹۹۲۳
دیگ آب گرم چدنی	(($/piece ۲	۱۲۹۹۹۳۳۳۴
مشعل دوگانه‌سوز	($/piece) ۲	۱۰۷۴۵۰۰۰۰
الکترو پمپ زمینی	($/piece) ۲	۳۷۱۴۳۹۹۹
فوم لوله‌ای	($/m) ۱۵۶۳	۴۵۸۸۸۱۴۱
عایق حرارتی دیوارها و سقف	($/$m^2$) ۳۶۶۰	۲۵۶۲۰۰۰۰۰
بتن پاشی	($/$m^2$) ۳۶۶۰	۳۲۹۴۰۰۰۰۰
سنگ نما	($/$m^2$) ۲۶۰۷	۱۰۴۲۸۰۰۰۰۰
گچ و خاک	($/$m^2$) ۲۶۰۷	۱۳۰۳۵۰۰۰۰

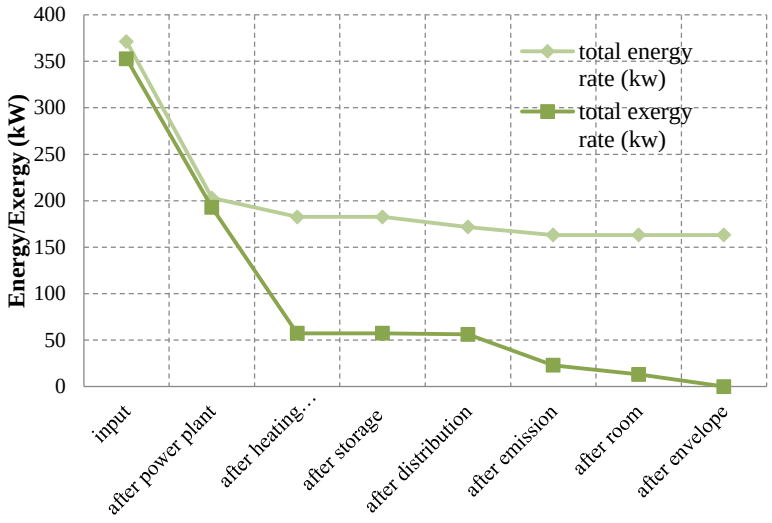
مأخذ: نتایج تحقیق

*مبنای تبدیل ارز براساس میانگین تغییرات نرخ ارز از بانک مرکزی ایران در سال۹۴ به‌دست آمده و ارزش آن ۳۰۱۸۰ ریال به ازای هر دلار است.

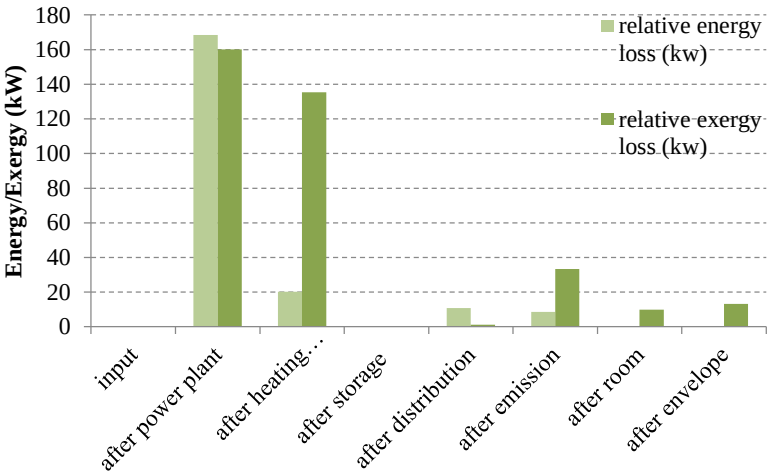
۳-۳. نتایج تحلیل اگزرژی سیستم‌ها

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]



(a)



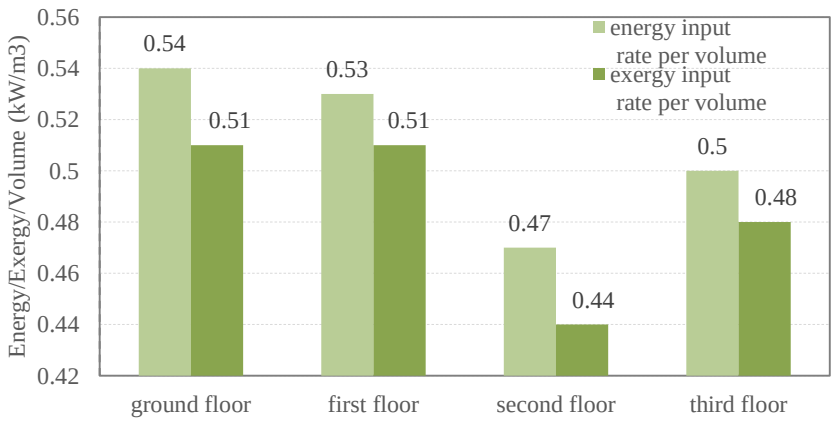
(b)

شکل۴. a) مقایسه جریان انرژی و اگزرژی کل b) میزان اتلافات انرژی و اگزرژی در مراحل مختلف (kW)

نتایج نشان می‌دهد که نرخ انرژی پس از مرحله تولید توان افزایش یافته که قابل توجه مـی‌باشـد همچنین در حالی که بخشی از انرژی از پوشش نمای ساختمان خـارج شـده ولـی هنـوز بخـش قابـل

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

توجهی از آن باقی مانده است. درنتیجه از آنجایی‌که در محیط، انرژی پتانسیل انجام کار ندارد در نتیجه همه اگزرژی مصرف می‌شود. کاهش مرحله به مرحله اگزرژی نشان می‌دهد که اگزرژی 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 اگزرژی مشخص می‌شود بیشترین اتلافات انرژی و اگزرژی در انتقال انرژی اولیه رخ می‌دهد و پس از آن بیشترین اتلافات اگزرژی در مرحله تولید توان اتفاق می‌افتد که به دلیل مصرف اگزرژی زیاد در فرایند احتراق می‌باشد. با وجود پتانسیل بالقوه بالاتر تولید انرژی در بویلر ها، 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 اگزرژی در مراحل انتشار و پوشش نما استفاده از فن‌کویل‌ها 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 اگزرژی و ارزیابی موفق بهینه‌سازی نتایج محاسبه مقادیر انرژی و اگزرژی بر واحد حجم در شکل (۵) ارائه گردیده است.

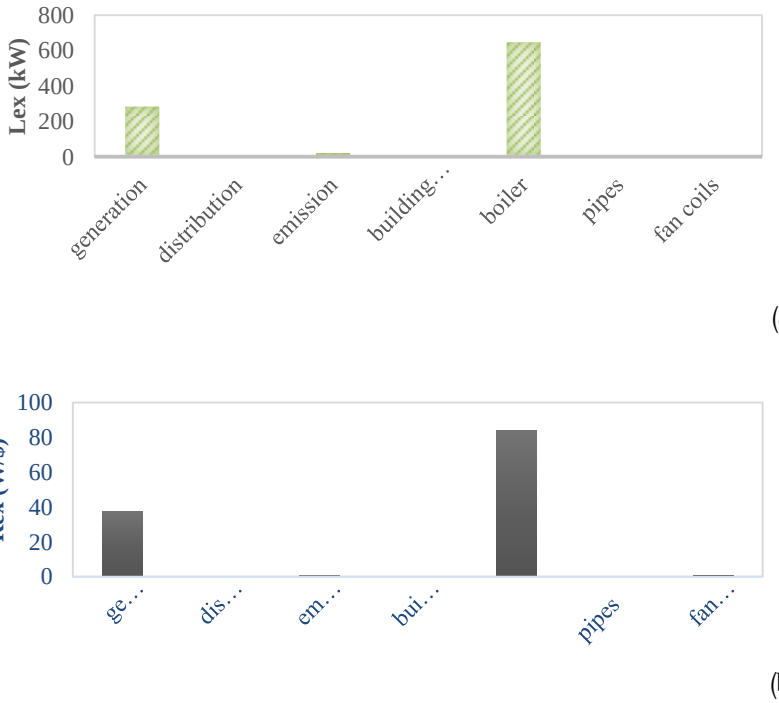


شکل ۵. مقادیر انرژی و اگزرژی بر واحد حجم به تفکیک طبقات

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

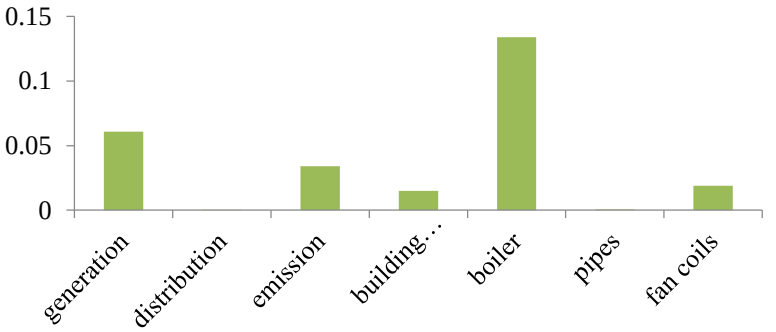
راندمان انرژی کل ۴۴ درصد و مقدار آن برای راندمان اگزرژی کل ۵/۶ درصد می‌باشد. با آنالیزEXCEM پارامتر $\dot{L}_{ex}$ که حاصل جمع نرخ مصرف اگزرژی و نرخ اگزرژی هدر رفته خروجی می‌باشد برای کل مراحل از مرحله تولید تا پوشش نمای ساختمان و تجهیزات محاسبه گردید و در شکل (۶) الف قابل مشاهده می‌باشد. همچنین پارامتر دیگری به نام $\dot{R}_{ex}$ معرفی 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 b) $\dot{L}_{ex}$ $\dot{R}_{ex}$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تخریب اگزرژی و در نتیجه بیشترین بازگشت‌ناپذیری‌ها مربوط به مرحله تولید توان با ۲۹۵/۴۲kW و دیگ آبگرم۶۵۹ kW می‌باشد که به منظور افزایش راندمان نیازمند بیشترین اصلاحات ممکن می‌باشند. مقادیر پارامتر $\dot{R}_{ex}$ برای مراحل و تجهیزات مختلف نشان می‌دهد که افزایش مقادیر در مرحله تولید توان با ۳۳/۷۵W/$ و دیگ آب گرم با ۸۳/۷۷W/$ نشانه افزایش اتلافات ترمودینامیکی بر هزینه در آنها می‌باشد و افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری در این قسمت‌ها می‌تواند ترکیب بهینه‌تری را فراهم سازد. به کمک پارامترECE تمامی مراحل و تجهیزات سیستم گرمایش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و اثر اگزرژی تخریب تجهیزات و هزینه آنها در کل سیستم محاسبه شد و نرخ اتلافات ترمودینامیکی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نتایج اگزرژی-اقتصادی به‌دست آمد. شکل (۷) نشان‌دهنده اثر بخشی هزینه ECE است.



شکل ۷. اثربخشی هزینه ECE

نتایج نشان می‌دهد بویلر با ۹۷ درصد بیشترین سهم اتلاف اگزرژی را در بین تجهیزات به خود اختصاص داده است و لوله‌ها نزدیک به صفر درصد کمترین سهم اتلاف را دارا می‌باشند و این بیانگر این است که فرایند احتراق و بازگشت‌ناپذیری‌ها درصد قابل توجهی از اگزرژی ورودی را تخریب نموده است. مقادیر کم ECE مقرون به صرفه بودن و کارآمدتر بودن مراحل و یا تجهیزات را نشان می‌دهد و افزایش ECE بر افزایش هزینه و اگزرژی 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 اگزرژی تخریب ندارد و ECE یک بیان می‌کند که دیگر تجهیزات هیچ اثری بر هزینه و اگزرژی 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 اگزرژی بیشتر می‌باشد و

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

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 اتلافات انرژی داشه باشد مثلاً ممکن است بیشتر هزینه صرف خرید رادیاتور و یا فن‌کویل مرغوب شود ولی اگر این هزینه در بهبود راندمان دیگ آبگرم انجام بگیرد میزان تخریب اگزرژی 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 صرفه‌جویی در مصرف انرژی نمی‌باشد و بهینه‌سازی مصرف با استفاده از مفهوم کیفیت انرژی یا راندمان اگزرژی می‌تواند نقش مهمی را ایفا کند و نشان می‌دهد که اگزرژی 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 اگزرژی به سختی در دستور کار مشاوران انرژی در ساختمان‌ها قرارمی‌گیرد و مفهوم اگزرژی به عنوان یک اصل کلی در بهینه‌سازی نسبتاً ناشناخته مانده است که علت کاهش سهم اگزرژی در صرفه‌جویی هزینه‌ها نیز می‌تواند همین موضوع باشد.

در این مطالعه جریان انرژی و اگزرژی 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 اگزرژی در تجهیزات سیستم گرمایش مشخص نمود که خرید دیگ آب گرم با راندمان بالاتر و سطح مقطع کمتر جهت کاهش تلفات سطحی و تشعشعی توصیه می‌گردد. و البته در بخش انتشار نیز استفاده از فن‌کویل‌ها با راندمان بالا و پره‌های مناسب از الزامات اساسی در کاهش انرژی مصرفی در ساختمان مورد بررسی می‌باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

آنالیز (EXCEM) به ما نشان داد که بیشترین اصلاحات ممکن باید در مراحل و قسمت‌هایی 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 اتلافات 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 فن‌کویل‌ها صورت پذیرد. همچنین به کمک این پارامتر می‌توانیم هزینه‌های سرمایه‌گذاری را بیشتر در جهتی انجام دهیم که کمترین اتلافات 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 اتلافات و هم هزینه‌ها داشته باشد.

منابع

[۱] اسکندری، هادی؛ مداحی، محمدحسین و بهرام خسروزاد (۱۳۹۶)، "ارزیابی اثر عایق‌های ساختمانی بر میزان مصرف انرژی با توجه به هزینه در اقلیم‌های مختلف ایران"، *نشریه انرژی ایران*، (۳)۲۰، صص ۱۸-۵.

[۲] غیبی، فرشاد؛ موسوی، روح الله و حمید اسکندری (۱۳۹۶)، "بررسی عددی و تجربی برافروختگی نماهای شیشه‌ای در ساختمان‌های اداری در اقلیم گرم و خشک"، *نشریه انرژی ایران*، (۴)۲۰، صص۲۵-۵.

[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] Acıkkalp 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., Kalinci 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

[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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]