

Research Paper

Case study and modeling of energy consumption of buildings on an urban scale using MATLAB software

Rahim Zahedi¹, Arash Gitifar², Abolfazl Ahmadi^{3*}

¹ PhD Candidate, Energy Systems Engineering, Department of Renewable Energies and Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

² BSc Student, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Energy Systems Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 12 January 2022

Revised 29 January 2022

Accepted 27 March 2022

Keywords:

Solar energy
urban data
residential building
urban model
energy management

ABSTRACT

Currently, the development of energy modeling on an urban scale is the goal of many types of research. These energy models are useful for understanding the amount of energy consumption. This research presents a dynamic energy modeling based on energy balance. Building specifications are taken from urban data. This model has been calibrated, optimized, and validated by considering Ardabil's climatic conditions and morphological parameters. The results of this work show that this model can be used with reasonable accuracy for old buildings. These data need to be improved for urban-scale analysis of new buildings. Based on field and statistical research conducted in Ardabil, Iran, which is the main focus of this report, this city's energy consumption during the past years can be achieved. The basis of this work is through statistics and the implementation of heat transfer equations in the form of electrical modeling. This modeling is done in MATLAB / Simulink software. The model is then optimized after simulation.

1. Introduction

This research is based on research and fieldwork based on calculating energy consumption in old buildings. In general, reducing energy consumption in buildings can be one of the main reasons for using this model(3). The goal is to create a platform that may be used by stakeholders of energy production and distributors in the urban area and legislators to manage energy consumption intelligently. This engineering model can calculate energy consumption, production, and emission(7). This research introduces an hourly model instead of a monthly model for residential buildings.

2. Methodology

A common problem with estimating the energy consumption of a building is that the weather conditions occur randomly and what is obtained is necessarily different from reality, But the weather can be predicted to minimize this error. This can be done by referring to climate resources defined in climatic conditions in a given area. In this case, the

amount of energy consumption is calculated. Figure (1) shows how to close the electrical circuit in MATLAB software. The proposed Simulink has four identical circuits for different years, the parameters of which have changed.

3. Results and Discussion

By entering the values into Simulink from the data acquired from building specifications before consolidation, building specifications after consolidation, heat capacity of each building component, building specifications and the extracted data from the standard and the diagrams of Figures (2) to (5), the diagrams of Figures (6) to (9) can be reached. As can be seen, the temperature difference between outside and inside air in the diagrams (6) to (9) is 1.7, 4.3, 8.7 and 12.5 ° C, respectively.

* Corresponding Author, Email: a_ahmadi@iust.ac.ir

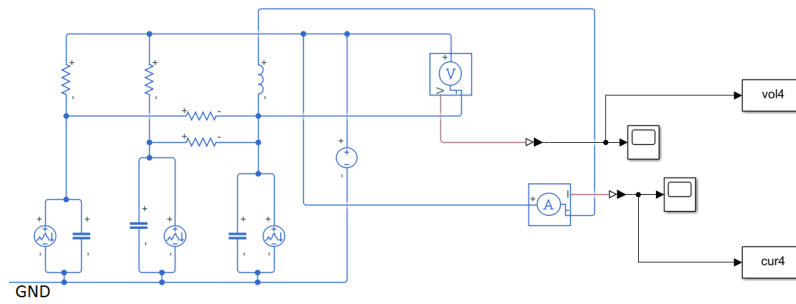


Figure 1. Electrical modeling of thermal currents in Simulink

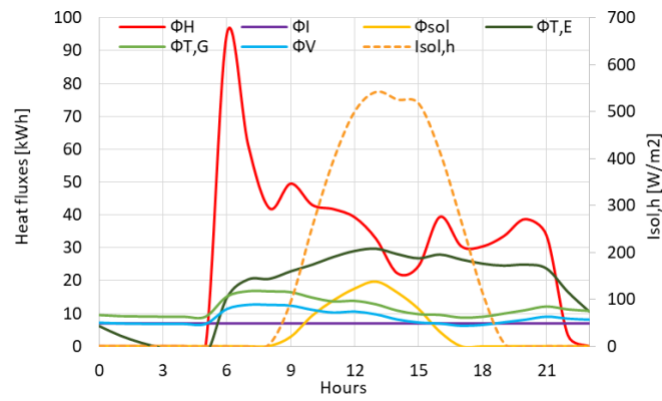


Figure 2. Day and night heat flows in the years 1924-1950

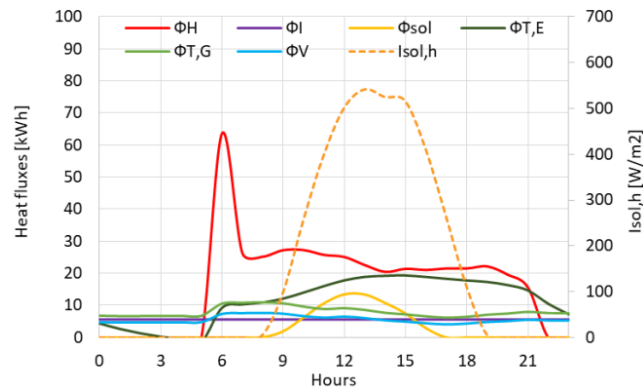


Figure 3. Day and night heat flows in the years 1951-1965

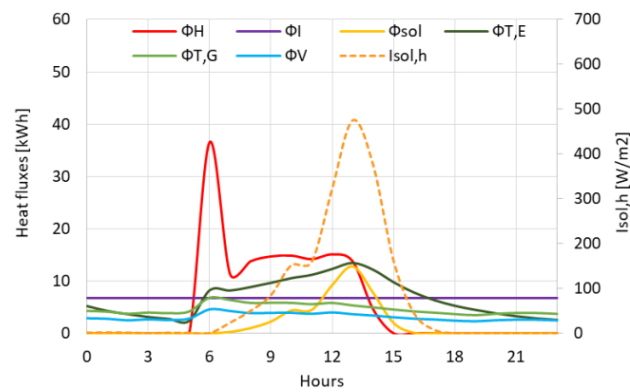


Figure 4. Day and night heat flows in the years 1966-1975

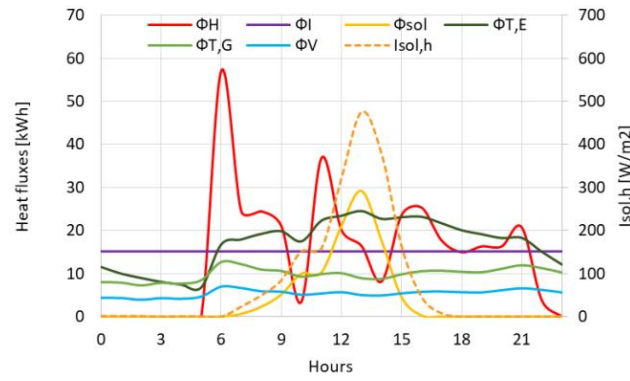


Figure 5. Day and night heat flows in the years 1976-1985

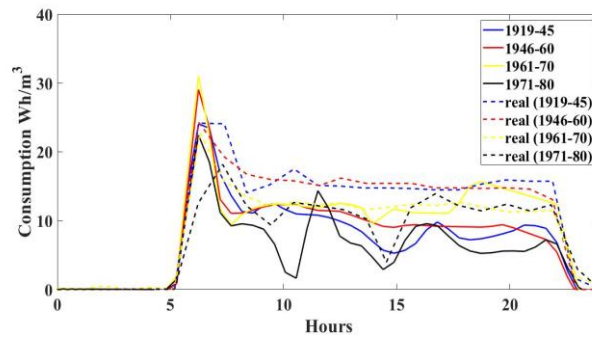


Figure 6. Energy consumption diagram with $T_{ae} = 1.7$

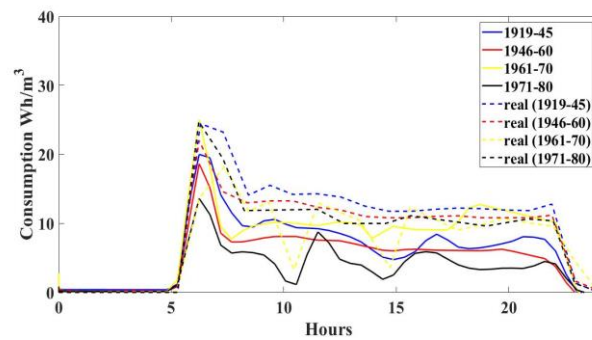


Figure 7. Energy consumption diagram with $T_{ae} = 4.3$

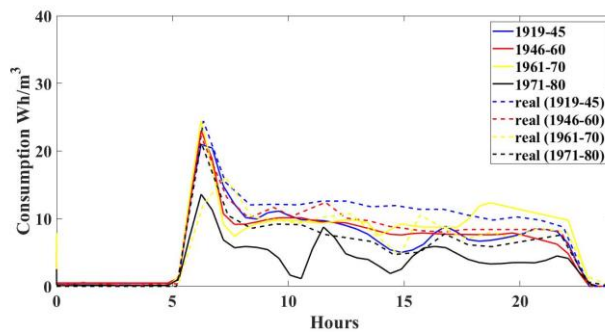


Figure 8. Energy consumption diagram with $T_{ae} = 8.7$

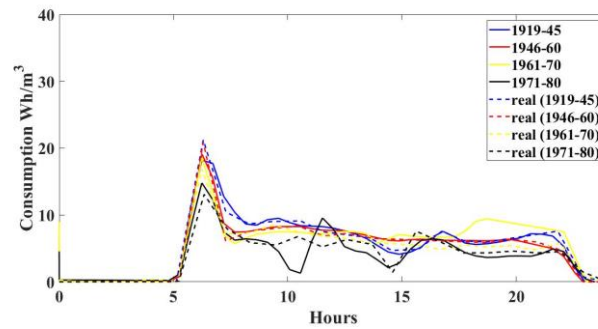


Figure 9. Energy consumption diagram with $T_{ae} = 12.5$

4. Conclusions

This research was done to develop an engineering model that could quantify the thermal energy consumption of buildings in European cities. This model can use geography, meteorology, GIS tools, and Google Earth. This model started from the scale of buildings. To calculate the energy consumption and energy balance equation, a series of data must be received from different databases. The target area was a city in Iran with variables that can be calculated. These urban parameters are, in fact, geographical location, metropolitan area, climatic

conditions, and other things mentioned. The energy balance model was first performed for a group of buildings in a spreadsheet file and a thermal-electric model with a numerical calculation in MATLAB software. The analysis shows that this model is more accurate in buildings with high energy consumption. The accuracy of this model is reduced for new buildings because there are few buildings with these specifications. This model needs to be improved for new buildings. The thermal, electrical analysis is suitable for evaluating system components.

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

مقاله پژوهشی

مطالعه موردی و مدل‌سازی مصرف انرژی ساختمان‌ها در مقیاس شهری در نرم‌افزار متلب

رحیم زاهدی^۱، آرش گیتی‌فر^۲، ابوالفضل احمدی^{۳*}

^۱ دانشجوی مقطع دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشگاه تهران

^۲ دانشجوی مقطع کارشناسی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

^۳ استادیار گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

چکیده

امروزه، توسعه مدل‌های انرژی در مقیاس شهری از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است و از این‌رو مورد توجه بسیاری از محققان قرار دارد. از جمله فواید این مدل‌ها می‌توان به درک میزان انرژی مصرفی اشاره کرد. این پژوهش به ارائه یک مدل‌سازی انرژی پویا براساس تعادل انرژی برای ساختمان‌هایی که مشخصات آن‌ها از داده‌های شهری موجود در پژوهش‌های پیشین گرفته شده است، می‌پردازد. مدل ارائه‌شده با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و پارامترهای مورفولوژیکی در شهر اردبیل کالیبره، بهینه‌سازی و اعتبارسنجی شده است. براساس تحقیق میدانی و آماری صورت‌گرفته در شهر اردبیل ایران که محوریت اصلی این پژوهش است، می‌توان به میزان مصرف انرژی در این شهر طی سال‌های گذشته دست یافت. اساس این کار از طریق آمار و پیاده‌سازی معادلات انتقال حرارت به صورت مدل‌سازی الکتریکی است. این مدل‌سازی در نرم‌افزار متلب/سیمولینک صورت گرفته است و در ادامه پس از شبیه‌سازی، مدل بهینه‌سازی می‌شود. نتایج حاصل از این مدل‌سازی نشان می‌دهد این مدل می‌تواند با دقت خوبی برای ساختمان‌های قدیمی به کار برود، اما این داده‌ها برای تجزیه و تحلیل در مقیاس شهری برای ساختمان‌های جدید نیاز به بهبود دارند.

اطلاعات مقاله

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۲۲

تاریخ بازنگری ۱۴۰۰/۱۱/۰۹

تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۱/۰۷

کلیدواژه:

انرژی خورشیدی

داده‌های شهری

ساختمان مسکونی

مدل شهری

مدیریت انرژی

۱. مقدمه

اصلی جهت استفاده از این مدل قلمداد شود [۳]. از جمله کاربردهای این مدل، می‌توان به بررسی مصرف، تولید و بهره‌وری ساختمان‌ها در مقیاس شهری اشاره کرد [۴]. همچنین به کمک این مدل می‌توان مدیریت میزان انرژی مصرفی، امکان تأمین انرژی مورد نیاز از منابع تجدیدپذیر و چگونگی مصرف (الگوی مصرف) را تعیین کرد. به خلاف مدل‌سازی‌های محققان پیشین که محدود به چندین پارامتر ساده مؤثر بر مصرف بود، در مدل ارائه‌شده در این پژوهش پارامترهای بسیاری در نظر گرفته شده است، از جمله: در معرض نور خورشید بودن، دره شهری، آب‌وهوا و وجود مراتع طبیعی [۵]. این مدل مهندسی‌شده و

انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ حدود ۷۰ درصد از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی کنند [۱]. از آنجا که شهرها از بزرگ‌ترین مصرف‌کننده‌های انرژی و انتشاردهنده‌های گازهای گلخانه‌ای هستند، تحلیل انرژی ساختمان‌ها در مقیاس شهری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲]. این پژوهش براساس یک کار تحقیقاتی و میدانی برای محاسبه میزان انرژی مصرفی در ساختمان‌های قدیمی صورت گرفته است. در نگاه کلی، کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها می‌تواند یکی از دلایل

* نویسنده مسئول

Email: a_ahmadi@iust.ac.ir

خواهد شد. در بخش مواد و روش‌ها مدل‌سازی جدیدی نسبت به پژوهش‌های پیشین ارائه خواهد شد که در این بخش، چگونگی مدل انرژی، اجزای ساختمان، جریان حرارتی خورشید، جریان حرارتی اجزای داخلی، جریان تهویه توضیح داده خواهد شد و پس از آنالیز حرارتی-الکتریکی به صحت‌سنجی پارامترها پرداخته می‌شود. در بخش یافته‌ها به تحلیل نمودار ساعتی استخراج‌شده از مدل طراحی‌شده و بهینه‌سازی نتایج پرداخته خواهد شد و در انتها به بحث و نتیجه‌گیری پرداخته خواهد شد.

۲. مواد و روش‌ها

در این بخش به طراحی مدل جدیدی پرداخته می‌شود که شامل مدل‌سازی انرژی، اجزای ساختمان، جریان حرارتی حاصل از خورشید، جریان حرارتی و جریان تهویه برای جامعه آماری بررسی‌شده در این پژوهش است.

۱.۲. مدل انرژی

در این پژوهش به معرفی یک مدل ساعتی به جای مدل ماهانه که در پژوهش‌های پیشین برای ساختمان‌های مسکونی استفاده شده بود، خواهیم پرداخت. اطلاعات داخل مدل‌سازی الکتریکی-حرارتی براساس استاندارد ایزو ۵۲۰۱۶:۲۰۱۷ و ایزو ۵۲۰۱۷:۲۰۱۷ مشخص می‌شوند. استفاده از این پایگاه داده می‌تواند یک نقشه تکنیکال ارائه دهد که مرجع این نقشه‌های محیطی یک مدل دیجیتال است. در این مدل یک سطح دیجیتال و داده‌هایی که از جمعیت و محیط‌های مسکونی در سال ۲۰۱۱ به دست می‌آیند، قرار دارند و اطلاعات آن قابل استخراج است. اطلاعات به‌دست‌آمده از محیط جی‌آی‌اس^۲ تأثیر زیادی روی اطلاعات مصرف انرژی در فضای باز دارد. مدل حرارتی-الکتریکی مدل‌سازی‌شده در نرم‌افزار متلب می‌تواند میزان مصرف انرژی را در شرایط اقلیمی متفاوت و انواع مختلف ساختمان که در دوره‌های متفاوتی ساخته شده است، محاسبه کند [۶] که دقت این مدل تعادل انرژی اعتبارسنجی شده و از طریق مدل اندازه‌گیری‌شده بررسی می‌شود. مدل حرارتی روی ۱۰۰ خانه در اردبیل برای سال ۱۳۹۷ - ۱۳۹۸ و ۱۳۹۸ - ۱۳۹۹ بررسی شده است. در این محاسبات دمای راحتی انسان در محدوده دمای ۲۰ درجه

توسعه‌یافته با پشتیبانی اطلاعات جغرافیایی و گوگل ارث^۱ برای شهر اردبیل شکل گرفته است. هدف از این کار، ایجاد یک پلتفرم برای ذی‌نفعان تولیدکنندگان انرژی و توزیع‌کنندگان آن در محیط‌های شهری و قانون‌گذاران به منظور مدیریت مصرف انرژی به صورت هوشمندانه است، زیرا بهره‌وری، یک اصل بسیار مهم برای سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری در بخش انرژی است. با استفاده از این مدل مهندسی می‌توان مصرف انرژی، تولید و انتشار آن را محاسبه کرد [۶-۹]. مدل‌های انرژی در مقیاس شهری امکان تخمین‌های قابل اعتماد از مصرف انرژی ساختمان‌ها را فراهم می‌سازند که به نوبه خود می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای برنامه‌ریزی شهری منظم و بهبودپذیر استفاده شود. انرژی می‌تواند یک عنصر کلیدی در تعیین برنامه‌ریزی‌های بهبودپذیر آینده یک شهر باشد، زیرا تحت هر شرایطی انرژی لازم برای فعالیت‌های انسانی باید تضمین شود. این موضوع با توجه به توسعه شهرها در کنار افزایش تقاضای انرژی و محدودیت دسترسی به منابع انرژی تجدیدپذیر جدی‌تر خواهد بود [۱۰-۱۲].

مصرف انرژی ساختمان‌ها به عوامل متعددی از جمله ساختار و ویژگی‌های هندسی [۱۳]، جنبه‌های اقتصادی-اجتماعی (مثلاً رشد اقتصادی) [۱۴]، شرایط اقلیمی و ریزاقلیمی [۱۵]، تابش خورشیدی و مورفولوژی شهری وابسته است، در حالی که تعامل بین ساختمان‌ها و بافت شهری اطراف نیز باید در نظر گرفته شود [۴ و ۱۶].

در مطالعات پیشین یانگ و همکاران (۲۰۱۸) [۱۷] عملکرد انرژی پوسته‌های ساختمانی در مناطق اقلیمی چین را از طریق مقایسه میزان مصرف انرژی ساختمان‌های بلندمرتبه با استانداردهای موجود در چین و استاندارد اشتر بررسی کرده و به ارائه راهکار در این خصوص پرداخته است. ژو و همکاران (۲۰۱۹) [۱۸] روشی برای تخمین انرژی ساختمان در یک منطقه مسکونی شامل هشت ساختمان را با استفاده از مدلی برای صرفه‌جویی در انرژی ساختمان‌های شهری توسعه دادند و بررسی کردند.

در ادامه، به بررسی و مطالعه موردی ۱۰۰ خانه در شهر اردبیل ایران بین سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ پرداخته

2. GIS

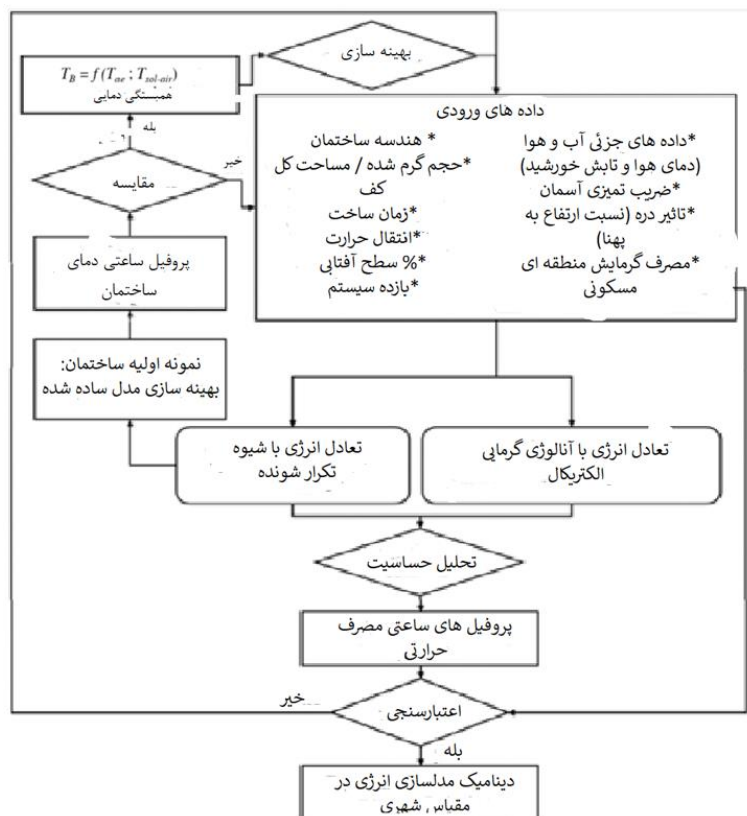
1. Google earth

بلوک بهینه ساز استفاده می کند و ضرایب تصحیح در داخل بلوک بهینه ساز نهفته است که بر اساس شرایط اقلیمی این ضرایب تعیین می شود و تعیین شدن این ضرایب به طور کلی به شرایط اقلیمی در هر منطقه بستگی دارد.

شکل ۱ در واقع کلیات مدل تعادل انرژی را نشان می دهد. در این شکل، بعد از داده های ورودی، این پروسه به دو قسمت تقسیم می شود. یکی از پروسه ها پروسه بازگشتی و دیگری پروسه تعادل انرژی است که توسط آنالیز الکتریکی- حرارتی است. هر دو پروسه در نهایت در آنالیز حساسیت وارد می شود و سپس، وارد پروفیل مصرف انرژی بر اساس ساعت می شوند که نیاز به اعتبارسنجی دارد. اگر این اعتبارسنجی بر اساس داده های آزمایشی صحیح باشد، در نهایت به اتمام این فلوجارت ختم می شود. اتمام این فلوجارت به معنای رسیدن به یک مدل دقیق دینامیکی حرارتی در مقیاس شهری است. اگر این اعتبارسنجی صحیح نباشد، در یک پروسه تکرارشدنی قرار می گیرد که توسط ضرایب بهینه گر به میزان قابل قبول تبدیل شود. در بلوک بهینه ساز ضرایبی وجود دارد که بتواند مدل محاسبه شده با مدل آزمایشی به هم دیگر نزدیک شود.

سانتی گراد با تلورانس ۲ درجه سانتی گراد به عنوان دمای مرجع برای ساختمان ها در نظر گرفته شده است.

برای به دست آمدن یک مدل دقیق تر، دمای محاسبه شده برای ساختمان، با استفاده از یک ضریب تصحیح، اصلاح می شود که با این کار می توان اختلاف بین مدل محاسبه شده و مدل اندازه گیری شده را کاهش داد. به این ترتیب، باید مدل اندازه گیری شده با مدل محاسبه شده با یکدیگر زاویه ۴۵ درجه داشته باشند. این ضرایب تصحیح بر اساس محیط های جغرافیایی متفاوت است تا خطای این مدل محاسباتی، حداقل شود. دقت این مدل با بهینه سازی ارتقا می یابد. شکل ۱ نشان می دهد این روش برای طراحی یک مدل شهری پویا استفاده می شود که قسمت اصلی آن ورودی داده است و مرحله تکرار پذیری دارد که این تکرار پذیری موجب کاهش این خطا می شود و بعد از آن مدل مشخصات ساختمان است که توسط بازه ساخت آن تعریف می شود؛ همچنین آنالیز ساعتی دما در این شکل وجود دارد. این مدل یک بلوک بهینه ساز دارد که شامل ضریب تصحیح است تا بتواند مدل محاسبه شده را به مدل اندازه گیری شده نزدیک تر کند. مدل ارائه شده از



شکل ۱. فلوجارت روش کار

۲.۲. اجزای ساختمان

در این مدل، ساختمان به سه قسمت ترمودینامیکی تقسیم می‌شود: قسمت اول شامل هوای داخل، پارتیشن‌بندی‌ها، اثاثیه و ساکنان است. قسمت بعدی اجزای خارجی ساختمان است که با محیط بیرون در ارتباط است و قسمت سوم محیط‌های شفاف مانند شیشه‌های ساختمان هستند که نور را از خود عبور می‌دهند. سه حالت در نظر گرفته شده برای ساختمان با یکدیگر در تبادل دمایی قرار دارند. در معادله ۱ توازن دمایی برای حالت کلی ساختمان در نظر گرفته می‌شود و با تغییر دادن اندیس دمایی آن می‌توان ارتباط آن با بخش‌های مختلف ساختمان را تعیین کرد. در معادله ۱ ضریب C به معنای ظرفیت گرمایی است و با ضرب شدن در نرخ تغییر دما (T) یا به بیانی دیگر با مشتق گرفتن از زمان (t) با مجموع چندین جریان حرارتی از قبیل: نور خورشید (Φ_{sol})، اجزای درونی (Φ_I)، وسایل گرمایشی (Φ_H)، رسانش‌های گرمایی (Φ_T) و ایجاد گرما توسط تهویه (Φ_V) برابر می‌شود. این مدل همانند مدل‌های دیگر نیاز به فرضیه دارد که در ادامه آورده شده است.

$$C_{TS} \frac{dT_{TS}}{dt} = \Phi_{sol} + \Phi_I + \Phi_H - (\Phi_T + \Phi_V) \quad (1)$$

فرضیه اول در مورد ساختمان‌هایی است که ناحیه دمایی آن‌ها به صورت یکنواخت است. فرضیه دوم مربوط به جریان انرژی است که به صورت یک‌سو در حال منتشر شدن است. تأثیرات بخارزایی و بخارگیری در این مدل حذف شده که جزء فرضیه سوم است، زیرا این سیستم بخشی از سیستم حرارتی ایرانی‌ها است و نیاز به بررسی جداگانه نیست. در ضمن طی روز کنترل رطوبت نسبی هوا وجود ندارد. فرضیه چهارم آن است که طی روز، ساختمان‌ها به دمای راحتی انسان می‌رسند. در ادامه مشخصات دقیق از جریان‌های حرارتی در حالتی که در ابتدا جریان خورشید وجود دارد، مورد بحث قرار می‌گیرد.

۳.۲. جریان حرارتی خورشیدی

قسمت اول، آنالیز مدل تعادل انرژی ورودی است که برای ساختمان‌های مسکونی در محیط شهری در دسترس است. برخی متغیرهای از دست‌رفته مانند انرژی خورشیدی و غیره تأثیر زیادی بر مصرف انرژی ساختمان‌ها دارد.

بنابراین، در مصرف انرژی ساختمان‌ها به صورت یک ضریب تصحیح اثر داده می‌شود. این ضریب تصحیح وابسته به زاویه تابش خورشید در شهر است که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

در شکل ۱ ابتدا بلوک داده ورودی وجود دارد که در این بلوک اطلاعات ساختمان مانند هندسه، سطح و حجم، دوره ساخت، انتقال حرارت، درصد آفتاب‌گیری و بازدهی سیستم منظور شده است و در طرف دیگر، اطلاعات هواشناسی وجود دارد. این اطلاعات شامل محیط‌های اقلیمی مانند تشعشع خورشیدی، دمای هوا، دمای آسمان و ضریب وضعیت هوا است. این ضریب در واقع شدت نور خورشید را مشخص می‌کند؛ به صورتی که اگر هوا ابری باشد، این ضریب بسیار کم و در صورتی که هوا آفتابی باشد، این ضریب به ۱ نزدیک است. پارامتر بعدی دره‌شهری است. دره‌شهری به معنای ایجاد حالت دره در شهر توسط ساختمان‌های بلند است. این دره‌های مصنوعی در واقع محیطی هستند که نور خورشید را مسدود می‌کنند و اجازه نمی‌دهند نور خورشید وارد برخی ساختمان‌ها شود. این دره‌شهری تأثیر زیادی در مصرف انرژی دارد. این پارامتر از تقسیم ارتفاع ساختمان را بر عرض خیابان بین دو ساختمان به دست می‌آید.

جریان خورشید وابسته به مشخصاتی از جمله جذب، بازتاب و عبور نور خورشید، ضریب کدر بودن یا شفاف بودن اجزای ساختمان‌ها و محیطی که خورشید در آن می‌تابد، است. جریان نور خورشید می‌تواند به دو قسمت جذب‌شده و عبوردهنده تقسیم شود. این ضرایب بستگی به شفافیت یا کدر بودن مواد ساختمان دارد که در دو قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرد. قسمت اول که در رابطه ۲ به آن اشاره شده، مربوط به ضریب جذب است. در واقع در رابطه ۲ انتگرال سطح است، که این سطح دقیقاً اجزای ساختمان هستند که قابلیت جذب دارند. پارامترهای موجود در رابطه ۲ به ترتیب ضریب جذب ضریب تشعشع (α_k)، توان دریافتی از نور خورشید (I_{sol})، ضریب سایه بر اثر دره‌شهری (ξ)، ضریب تصحیح آسمان (F_k) و المان سطح (A_k) است. این پارامترها به همین ترتیب در رابطه ۳ نیز وجود دارد با این تفاوت که در رابطه ۳ ضریب عبور (τ_G) مطرح است. برای محاسبه ضریب تصحیح که در رابطه ۶ رابطه آن بیان شده است؛ باید به ترتیب از رابطه ۴

$$\Phi_I = q_{int} \cdot S_f \cdot n \quad (7)$$

$$\Phi_H = \Phi_{S,H} \cdot \eta_H \quad (8)$$

۵.۲. جریان حرارتی تهویه

در محاسبه دبی از استاندارد بریتانیایی استفاده می شود که در آن با در نظر گرفتن محیط، تعداد در و پنجره های بازشونده و نوع کاربری ساختمان، ضریبی بین ۰/۳ تا ۰/۵ به هوای جابه جاشده برحسب ساعت اختصاص می یابد؛ به عنوان مثال این ضریب برای بیمارستان و ساختمان مسکونی متفاوت است.

۶.۲. آنالیز حرارتی الکتریکی

برای محاسبه پارامترها می توان از مدل حرارتی- الکتریکی استفاده کرد. این مدل در بیشتر موارد قابل استفاده است. در این سیستم دو قسمت محرک و جریان حائز اهمیت است. اولین قسمت از این سیستم، محرک نام دارد که امکان تبدیل سیستم ها به یکدیگر را فراهم می سازد. محرک در واقع عامل به حرکت درآورنده جریان است و همانند ولتاژ عمل می کند. ایجاد ولتاژ در الکتریسیته در واقع معادل اختلاف دما در سیستم های حرارتی و اختلاف فشار در سیستم های هیدرولیکی و منبع نیرو در سیستم های دینامیکی است. در سیستم های مکانیکی فنر همانند خازن عمل می کند، زیرا می تواند انرژی را در خود ذخیره کند و هنگام تخلیه، انرژی را به سیستم اعمال کند و این دقیقاً طرز کار خازن است.

دمپر در سیستم دینامیکی همانند مقاومت در سیستم الکتریکی عمل می کند. در واقع دمپر ها در برابر جریان حساسیت مقاومت از خود نشان می دهند. در سیستم های الکتریکی نیز به همین ترتیب است و جرم در سیستم مکانیکی، همانند سلف در سیستم الکتریکی است که در سیستم حرارتی این کار توسط سیستم تهویه صورت می پذیرد. توجه شود که در این تحقیق، انرژی مصرف شده توسط سلف به عنوان تابع هدف به شمار می رود و انرژی مصرف شده در تهویه به عنوان هدف اصلی این مقاله مورد بحث قرار گرفته و نمودارهای آن ترسیم شده است. توجه شود که سلف یک پارامتر مصرفی است، اما مقاومت اتلاف ولتاژ انجام می دهد و خازن انرژی را در خود ذخیره می کند. مصالح ساختمان همانند خازن نور خورشید را در

تا ۶ محاسبه انجام گیرد. در رابطه ۴ ارتفاع خورشید محاسبه می شود که در آن پارامترهای عرض جغرافیایی (φ)، زاویه خورشید (β) و درجه ساعت (Z) تأثیرگذارند. در رابطه ۵ زاویه خورشید محاسبه می شود که در آن d شماره روز در تاریخ میلادی است. در محاسبه ضریب تصحیح در صورتی که ضریب رسانش (h) کمتر از معیار دره شهری ($\arctan(\frac{H}{W})$) باشد، ضریب تصحیح از عبارت اول محاسبه می شود و در غیر این صورت ضریب تصحیح برابر با ۱ است. ($\frac{H}{W}$) در واقع نسبت ارتفاع ساختمان ها به عرض جاده است.

$$\Phi_{sol,\alpha} = \sum \alpha_k \cdot I_{sol} \cdot \xi \cdot F_k \cdot A_k \quad (2)$$

$$\Phi_{sol,\tau} = \sum \tau_G \cdot I_{sol} \cdot \xi \cdot F_k \cdot A_k \quad (3)$$

$$\psi = \sin^{-1} \cdot (\sin \varphi \cdot \sin \beta + \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos Z) \quad (4)$$

$$\beta = \sin^{-1} \cdot \{0.398 \cdot \sin [0.9863 \cdot (d - 82)]\} \quad (5)$$

$$\xi = \begin{cases} \frac{\tan \psi}{H/W} & \text{if } h < \arctan(\frac{H}{W}) \\ 1 & \text{if } h \geq \arctan(\frac{H}{W}) \end{cases} \quad (6)$$

۴.۲. جریان حرارتی اجزای داخلی

در ادامه، به بررسی جریان حرارتی اجزای داخلی که از دستگاه های تولیدکننده حرارت نشئت می گیرد، خواهیم پرداخت. این دستگاه ها می توانند خود اجزای حرارت یا برقی باشند. به دلیل استهلاك اجزای برقی و ایجاد حرارت، این اجزا شامل دو قسمت می شوند: قسمت اول شامل ساکنان داخل خانه که ایجاد حرارت می کنند و قسمت دوم شامل وسایل داخل خانه می شود. در رابطه ۷ ضریب ایجاد حرارت توسط انسان (q_{int}) مطرح شده است و در تعداد افراد (n) و تراکم (S_f) ضرب می شود. در محاسبه این ضریب از استاندارد UNI/TS 11300-1:2014 و ISO 13790:2008 استفاده می شود. حرارت ایجاد شده توسط اجزای خانه از ضرب دو عبارت که به ترتیب استاندارد حرارتی ($\Phi_{S,H}$) و بازدهی (η_H) است، محاسبه می شود. این استاندارد به صورت ساعتی تعریف شده و نشان دهنده چگونگی توزیع حرارت در ساختمان از ساعت ۵ صبح تا ۱۰ شب است.

$$Y_{G,ae} = \sum \frac{A_G}{0.5R_G + R_{se}} \quad (10)$$

$$Y_{G,B} = \sum \frac{A_G}{0.5R_G + R_{si}} \quad (11)$$

$$Y_{G,ae} = \sum \frac{A_G}{0.5R_G + R_{se}} \quad (12)$$

$$I_E = \sum \alpha_E \cdot I_{sol} \cdot \xi \cdot F \cdot A_E - \sum F_r \cdot R_{se} \cdot U_E \cdot A_E \cdot h_{r,E} \cdot (T_{ae} - T_{sky}) \quad (13)$$

$$Y_{E,B} = \sum \frac{A_E}{0.5R_E + R_{si}} \quad (14)$$

$$Y_{E,ae} = \sum \frac{A_E}{0.5R_E + R_{se}} b \quad (14)$$

$$I_B = \phi_H + \phi_I + \sum \tau_G \cdot I_{sol} \cdot \xi \cdot F \cdot A_G \quad (15)$$

$$Y_{B,ae} = C_a \cdot m_a \quad (16)$$

از مشکلات مرسوم در تخمین انرژی مصرفی ساختمان می‌توان به تصادفی بودن شرایط آب‌وهوایی اشاره کرد که موجب تفاوت نتایج به دست آمده و واقعیت است. این خطا را می‌توان با پیش‌بینی آب‌وهوا از طریق ارجاع به منابع آب‌وهوایی تعریف شده در شرایط اقلیمی محیط، به حداقل رساند. شکل ۳ شیوه بستن مدار الکتریکی در نرم‌افزار متلب را نشان می‌دهد. در واقع، سیمولینک ارائه شده دارای چهار مدار یکسان برای بازه سال‌های مختلف است که پارامترهای آن عوض شده است.

۴.۷. صحت‌سنجی مدل

با در نظر گرفتن روش‌های مختلف تعادل انرژی مدل ارائه شده اعتبارسنجی شد و سپس، مصرف محاسب شده با واقعیت اندازه‌گیری شده در یک ساختمان با دمای راحتی ۲۰ درجه سانتی‌گراد با تلوآنس ۲ درجه سانتی‌گراد مقایسه شد. طی روز بین ساعت‌های ۸ صبح تا ۹ شب این مصرف انرژی محاسبه می‌شود. در این حالت برای ارتقای دقت این مدل، ویژگی تابش نور خورشید در نظر گرفته می‌شود که به موقعیت جغرافیایی ارتباط دارد. در این قسمت، مطالعات محلی روی شهر اردبیل در کشور ایران انجام شده است؛ شهری که در قسمت شمال غربی ایران قرار دارد و در معرض وزش بادهای داغ است. برای بررسی دقت این مدل

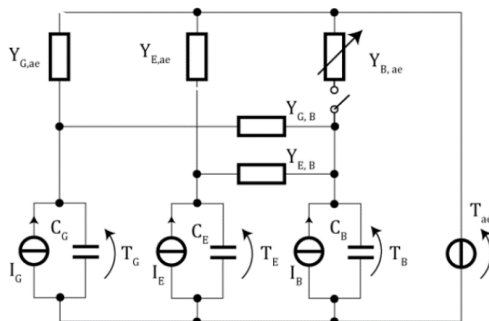
خود ذخیره می‌کند و انرژی ذخیره شده را در سرما از خود ساطع می‌کند. عایق در ساختمان‌ها همانند مقاومت‌های داخل مدار اجازه عبور گرما را از داخل مصالح نمی‌دهد. برای عبور از این عایق‌ها باید اختلاف دمای زیادی وجود داشته باشد که مشابه رفتار سیستم‌های الکتریکی است. در شکل ۲ کلیت رفتار جریان حرارتی در ساختمان مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، علائم خازن، مقاومت، منبع، جریان و سلف دیده می‌شود. توجه شود که سلف در کنار کلیدی قرار دارد که در ساعت‌های ۵ صبح تا ۱۰ شب توسط استاندارد فعال و در غیر این صورت، کلید غیرفعال است که عدم مصرف انرژی توسط سلف را نشان می‌دهد که موجب می‌شود نمودارهای شکل‌های ۴ تا ۷ از ساعت ۱۰ شب تا ۵ صبح در حالت صفر باقی بمانند.

در شکل ۲ پارامترها با استفاده از روابط ۹ تا ۱۶ مقداردهی می‌شوند و سپس، مقادیر جریان و ولتاژ با استفاده از مدل الکتریکی در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب محاسبه می‌شوند. جریان به معنای عبور حرارت در واحد وات و اختلاف ولتاژ به معنای اختلاف دما در دو نقطه است. نقاط پررنگ موجود در مدار نشان‌دهنده دما است. به طور مثال، در پایین‌ترین خط این شکل دو نقطه وجود دارد که به این دلیل که هیچ عنصری در میان این نقاط وجود ندارد، دمای یکسانی با سه نقطه بالاتر از خود دارد. حال نقطه بالای سلف مد نظر قرار می‌گیرد. این نقطه به این دلیل که هیچ عنصری بین منبع ولتاژ و این نقطه وجود ندارد، دقیقاً دمای برابری با قسمت فوقانی منبع ولتاژ دارد. Tae میزان اختلاف دمای بین نقطه بالای منبع ولتاژ و نقاط پایین‌ترین خط این مدار است و این نقاط بر اساس پایین‌ترین نقاط در این مدار به عنوان مرجع محاسبه می‌شود. پارامترهای $U, T_{ae}, T_{sky}, h, R, R_{se}, R_{si}, b, C_a, m_a$ به ترتیب ضریب رسانش، دمای هوا، دمای آسمان، ضریب همرفت، مقاومت حرارتی (معرفی شده با اندیس برای هر بخش)، مقاومت جداره بیرونی ساختمان، مقاومت جداره داخلی ساختمان، ضریب تصحیح، ظرفیت گرمایی ویژه و دبی جرمی هوا است.

$$I_G = \sum \alpha_G \cdot I_{sol} \cdot \xi \cdot F \cdot A_G - \sum F_r \cdot R_{se} \cdot U_G \cdot A_G \cdot h_{r,G} \cdot (T_{ae} - T_{sky}) \quad (9)$$

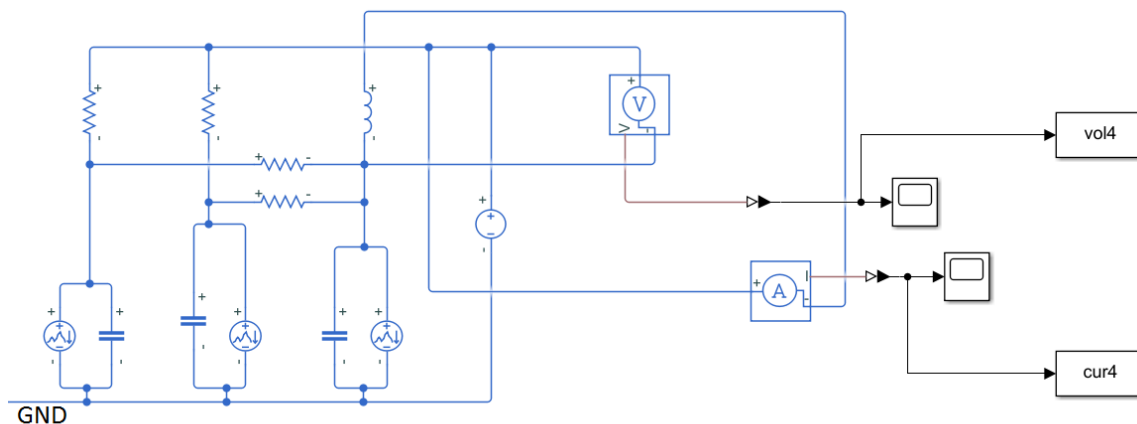
نمودارها قابل استنتاج است، استفاده شده که برخی از این مقادیر در استانداردهای نام برده وجود دارند و برخی دیگر تجربی هستند و نیاز است از نمودار استخراج شوند.

که یک مدل ساعتی است، مدل سازی روی حدود ۱۰۰ ساختمان در مناطق مسکونی انجام شده است. برای به دست آوردن مقادیر پارامترها، از داده های داخل مقاله که از



نماد ها	ولتاژ و جریان	دما جریان گرما
	مقاومت الکتریکی؛ هدایت الکتریکی ثابت در زمان	مقاومت حرارتی؛ انتقال حرارتی ثابت در زمان
	هدایت الکتریکی؛ وابسته به زمان	مقاومت حرارتی؛ انتقال حرارتی وابسته به زمان
	ظرفیت الکتریکی مستقل از زمان	ظرفیت حرارتی
	منبع ولتاژ مستقل	دما مستقل
	منبع جریان مستقل	جریان گرمایی اختصاص داده شده

شکل ۲. مدل سازی الکتریکی جریان های حرارتی



شکل ۳. مدل سازی الکتریکی جریان های حرارتی در سیمولینک

آورده شده است که در جدول ۱ وجود دارد. در جدول ۱ می توان مشاهده کرد که با گذر زمان بازدهی داخل ساختمان بهبود می یابد. نتایج این تحقیق بعد از اضافه کردن سیستم تقویتی روی ساختمان های قدیم، تغییر می کند و مقادیر آن ها

۲.۸. مقادیر پارامترها در پژوهش های گذشته که طی سال های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۹ در شهر اردبیل صورت گرفته، مقادیر میانۀ متغیرهای بازدهی وسایل، انتقال حرارت بین اجزای ساختمان و ابعاد ساختمان

مرکز شهر اردبیل که به هم پیوسته هستند، انجام شده است و شامل یک سیستم گرمایشی مرکزی هستند که روزها فعال است و شب‌ها خاموش می‌شود که همانند استفاده از کلید در مدار است که به هنگام شب خاموش است و سلف مصرف انرژی ندارد و روزها روشن می‌شود و مصرف انرژی آغاز می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های ۴ تا ۸ مشاهده می‌شود، مقادیر نمودار در شب صفر و در روز مقدار غیر صفر را اختیار می‌کند. با توجه به اینکه مدل ارائه شده براساس بازه ساخت ساختمان‌ها به دست می‌آید، پس این مشخصه فقط یک میانگین مصرف است؛

در جدول ۲ نمایش داده می‌شود که نشان می‌دهد بازدهی به چه میزان افزایش پیدا کرده است. در جدول ۳ میزان ضریب انتقال حرارت هر یک از اجزای ساختمان و در جدول ۴ مقادیر پارامترهای مربوط به ساکنان مناطق مسکونی وجود دارد و به همین ترتیب، ضرایب ظرفیت گرمایی و اشکال هندسی ساختمان‌ها بر اساس بازه ساخت ساختمان‌ها در آن آورده شده است. این مقادیر به خصوص برای ظرفیت گرمایی اجزای ساختمان‌ها در استاندارد 11552:2014 UNI/TR مشخص شده است. این گذرگاه انرژی که مقادیر آن‌ها با ظرفیت گرمایی و راندمان ارتباط دارد، بین ۹۲ ساختمان در

جدول ۱. مشخصات ساختمان قبل از استحکام‌بخشی

سال	تعداد مدارک	سطح	حجم	سطح به حجم	ضریب رسانش			بازدهی حرارتی	شاخص عملکرد انرژی حرارتی	شاخص عملکرد انرژی کل
					سقف	دیوار	کف			
< 1303	19184	53.4	220.0	0.41	1.22	3.53	3.91	0.67	176.3	214.6
1303-29	21038	52.5	213.4	0.42	1.25	3.96	4.44	0.66	187.0	226.3
1330-44	37875	57.0	219.8	0.38	1.15	4.23	4.79	0.66	173.0	215.5
1345-54	27544	65.8	249.5	0.37	1.15	4.45	5.06	0.67	167.1	209.8
1355-64	5267	76.0	289.0	0.36	1.15	4.32	4.90	0.69	159.6	200.4
1365-74	1635	75.0	267.4	0.45	1.07	3.00	3.25	0.68	149.2	180.8
1375-89	4891	71.6	255.1	0.43	0.64	2.79	2.99	0.70	104.0	131.8
1390-99	3662	62.8	239.5	0.50	0.39	1.86	1.83	0.83	59.9	82.9

جدول ۲. مشخصات ساختمان بعد از استحکام‌بخشی

سال	تعداد مدارک	سطح	حجم	سطح به حجم	ضریب رسانش			بازدهی حرارتی	شاخص عملکرد انرژی حرارتی	شاخص عملکرد انرژی کل
					سقف	دیوار	کف			
< 1303	907	79.3	342.0	0.47	1.15	2.40	2.50	0.80	126.7	157.0
1303-29	738	78.6	329.5	0.48	1.14	2.66	2.82	0.80	136.4	164.2
1330-44	1368	70.3	282.8	0.48	1.08	2.96	3.20	0.78	133.3	165.9
1345-54	803	86.0	324.0	0.44	1.15	3.25	3.56	0.79	132.5	167.1
1355-64	122	155.8	582.7	0.50	1.09	3.08	3.35	0.79	134.1	155.3
1365-74	59	133.5	454.0	0.61	0.64	2.40	2.50	0.77	126.2	147.8
1375-89	88	88.4	292.6	0.55	0.90	2.80	3.00	0.78	102.7	124.7
1390-99	54	68.1	248.9	0.74	0.32	1.77	1.71	0.87	63.5	83.0

جدول ۳. ظرفیت گرمایی هر جزء ساختمان

	< 1329	1330-44	1345-54	> 1355
بتن بالای انبار			317,867	
زیر شیروانی			434,400	
دیوار		574,560	231,000	191,520
قسمت بیرونی ساختمان	495,001	510,786	285,154	235,736
شیشه			7314	
اجزای درونی ساختمان			30,496	

جدول ۴. مشخصات ساختمان

	< 1329	1330-44	1345-54	> 1355
نسبت سطح به حجم [m ⁻¹]	0.28	0.27	0.28	0.35
حجم کل [m ³]	6,986	5,892	5,968	12,364
سطح مؤثر حرارتی [m ²]	1,559	1,284	1,322	2,965
انرژی حرارتی مصرفی [kWh/m ³ /y]	30.74	28.84	26.15	22.44
C _E [kJ/K]	779,146	659,224	380,845	839,254
C _G [kJ/K]	1,731	1,327	1,367	3,118
C _B [kJ/K]	47,539	39,158	40,325	90,406
N	20	10	14	33
S _f [m ² /dw]	77	118	97	97

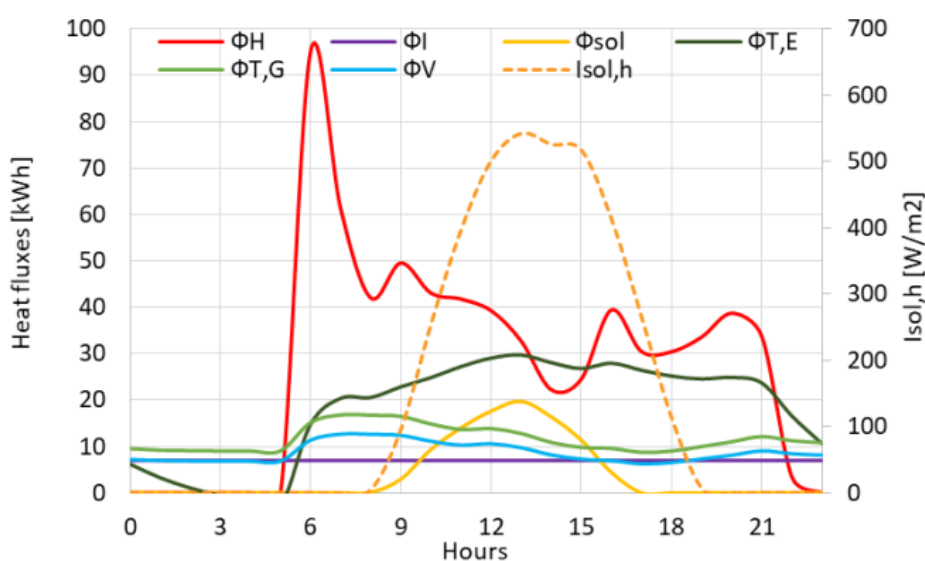
۳. نتایج

در این بخش با توجه به مدل سازی انجام شده، به تحلیل نمودارهای ساعتی مصرف و بهینه سازی نتایج و تحلیل آن خواهیم پرداخت.

۳.۱. نمودار ساعتی مصرف انرژی

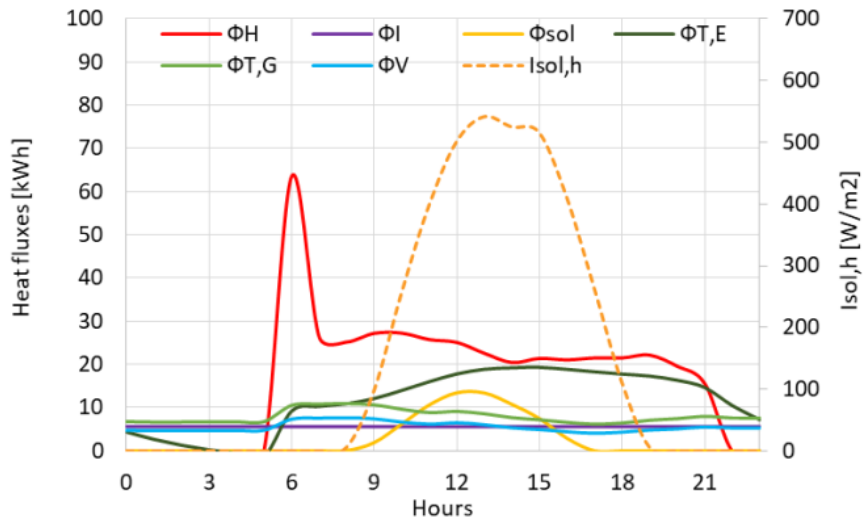
با قرار دادن مقادیر به دست آمده از جدول های ۱ تا ۴ و داده های استخراجی از استاندارد و نمودارهای شکل های ۴ تا ۷ در سیمولینک می توان به نمودارهای شکل های ۸ تا ۱۱ دست یافت. اختلاف دمای هوای بیرون و داخل در نمودارهای شکل های ۸ تا ۱۱ به ترتیب ۱/۷، ۴/۳، ۸/۷ و

۱۲/۵ درجه سانتی گراد است. در واقع، این اختلاف دما همان منبع ولتاژ مستقل در مدار الکتریکی است که این مقدار را اختیار می کند و در نهایت می توان مصرف سلف را محاسبه کرد و نمودار آن را ترسیم کرد. با افزایش بازدهی ساختمان ها در کنترل و مصرف انرژی می توان مشاهده کرد که ساختمان های جدیدتر مصرف انرژی کمتری دارند. در قسمت نتایج می توان با توجه به بازه ساخت، مصرف انرژی ۴ ساختمان انتخاب شده که سیستم تهویه با قدرت تعویض هوا در نیم ساعت دارند را مشاهده کرد.

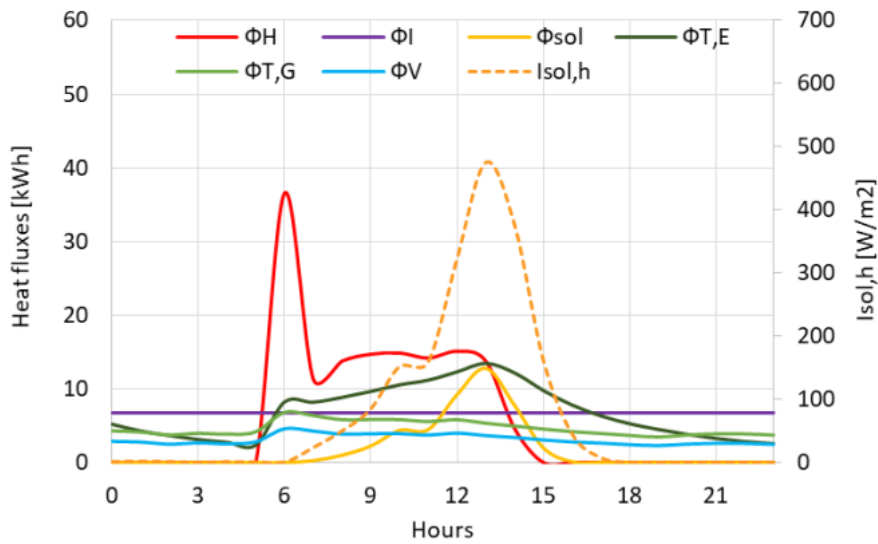


شکل ۴. جریان های حرارتی شبانه روز طی سال های ۱۳۰۳-۱۳۲۹

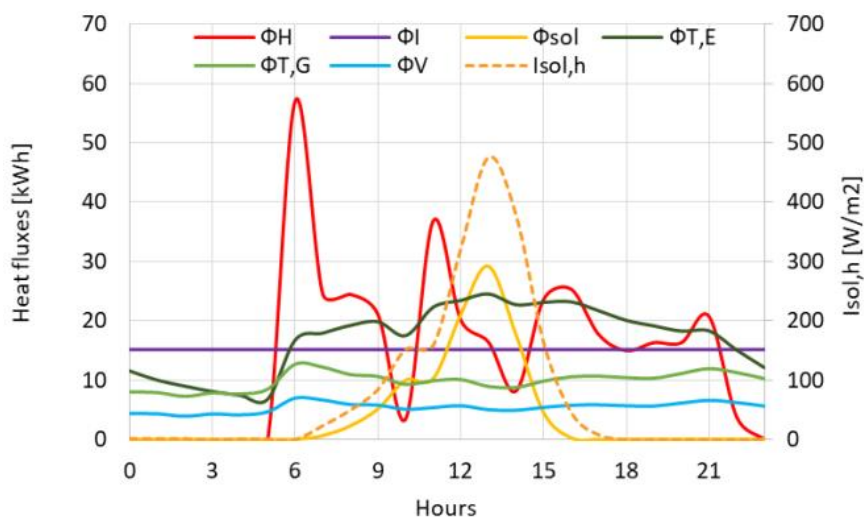
سیستم‌های انرژی پایدار، دوره ۱، شماره ۳، تابستان ۲۰۲۲



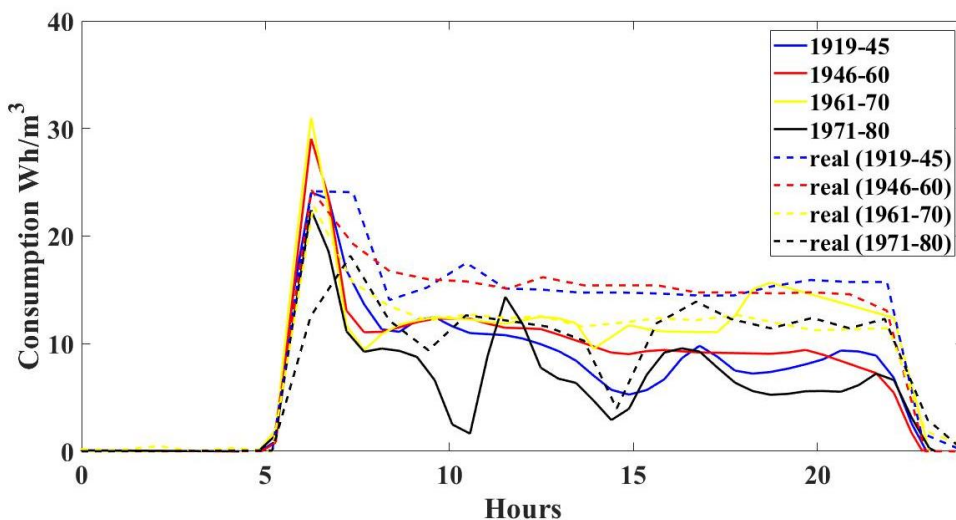
شکل ۵. جریان‌های حرارتی شبانه‌روزی طی سال‌های ۱۳۳۰-۱۳۴۴



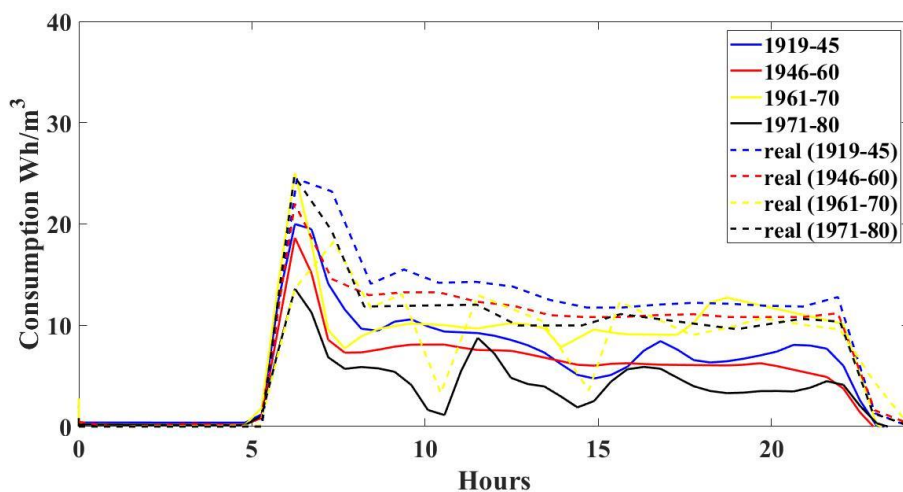
شکل ۶. جریان‌های حرارتی شبانه‌روزی طی سال‌های ۱۳۴۵-۱۳۵۴



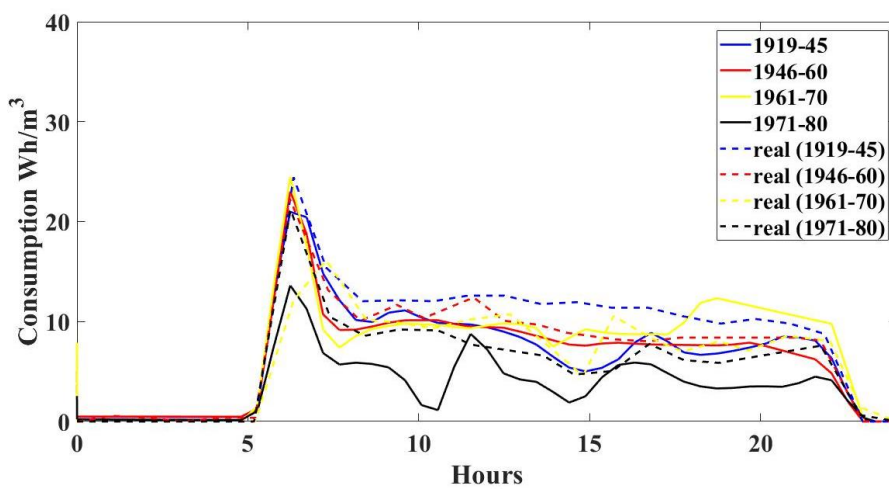
شکل ۷. جریان‌های حرارتی شبانه‌روزی طی سال‌های ۱۳۵۵-۱۳۶۴



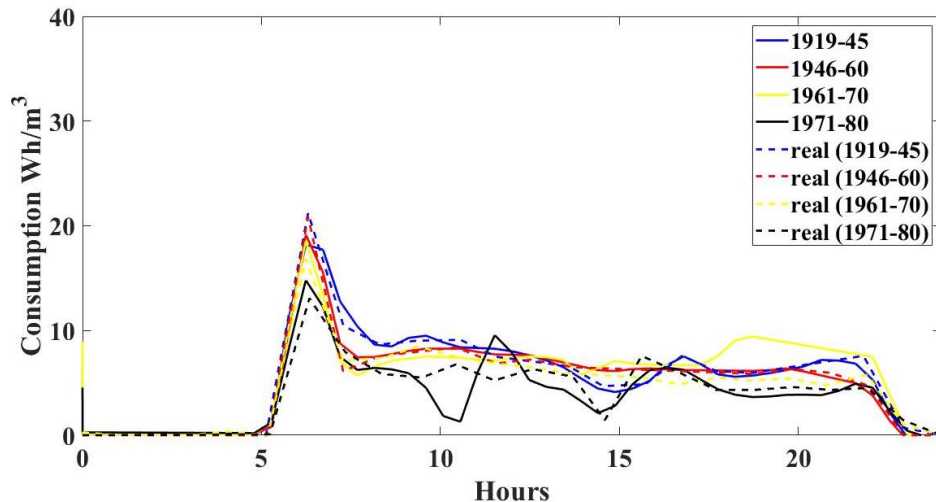
شکل ۸. نمودار مصرف انرژی با $Tae=1.7$



شکل ۹. نمودار مصرف انرژی با $Tae=4.3$



شکل ۱۰. نمودار مصرف انرژی با $Tae=8.7$



شکل ۱۱. نمودار مصرف انرژی با $T_{ae}=12.5$

مدل محاسبه شده و مدل اندازه‌گیری شده را بررسی کرد. برای بررسی این مورد می‌توان به شکل ۱۲ رجوع کرد. در این شکل می‌توان مشاهده کرد که با گذر زمان به علت تفاوت مصالح ساختمان‌های جدید، دقت مدل‌سازی کاهش می‌یابد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

این مقاله به توسعه یک مدل مهندسی شده پرداخت که با استفاده از داده‌های موجود در جغرافیا، آب‌وهواشناسی، ابزار GIS و گوگل ارث برای مقداردهی مصرف انرژی حرارتی ساختمان‌ها در شهرهای اروپایی استفاده می‌شود. آغاز این مدل‌سازی از مقیاس ساختمان‌ها بود که برای محاسبه مصرف انرژی و معادله تعادل انرژی نیاز به دریافت داده‌ها از پایگاه‌های مختلف بود. منطقه هدف شهری واقع در کشور ایران بود با متغیرهایی از جمله موقعیت جغرافیایی، دره شهری، شرایط اقلیمی و سایر موارد اشاره شده که قابل محاسبه است.

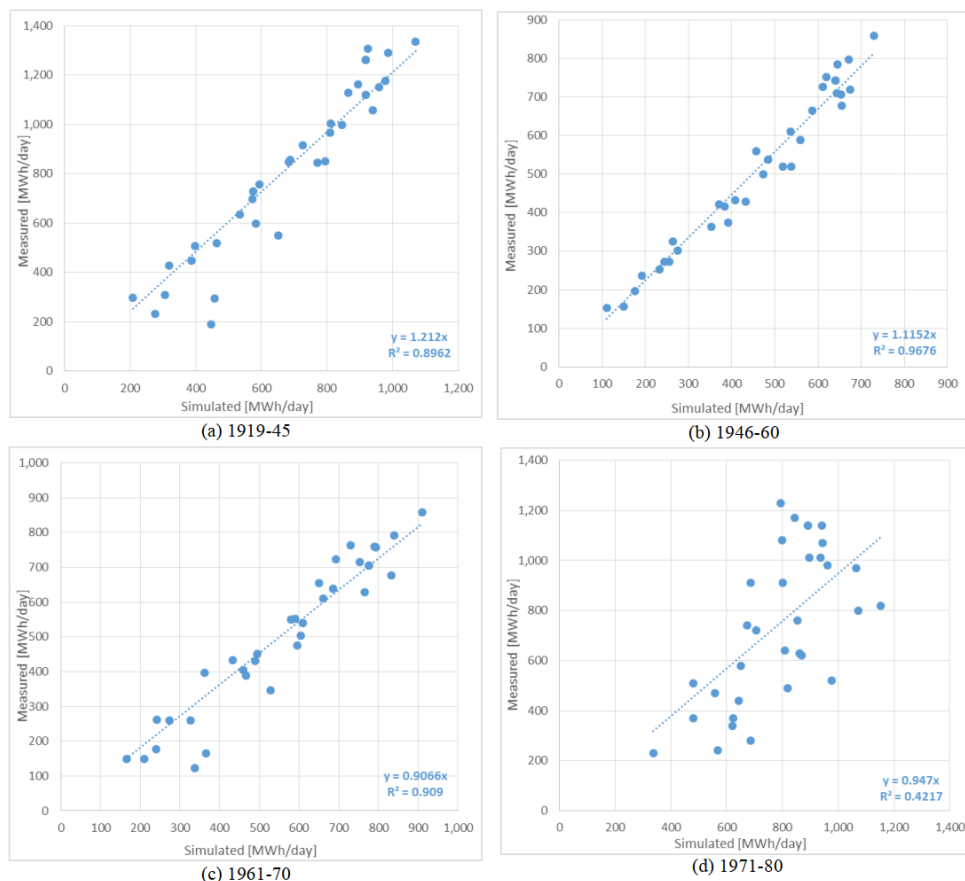
آنالیز انجام گرفته نشان می‌دهد این مدل در ساختمان‌های با مصرف انرژی بالا دقت بیشتری دارد و دقت آن به علت کمبود ساختمان‌های با این مشخصات کاهش می‌یابد و برای ساختمان‌های جدید نیاز به بهبود دارد. آنالیز الکتریکی حرارتی برای ارزیابی کردن اجزای سیستم مناسب است.

همان‌طور که در شکل‌های ۸ تا ۱۱ مشاهده می‌شود؛ می‌توان دریافت که تفاوت اندکی با مدل اصلی به علت عدم قطعیت‌ها، کمبود اطلاعات کافی از میزان برخی پارامترها و نبود مقادیر تجربی برای بهبود بخشی ضرایب بهینه‌ساز وجود دارد.

جریان‌های آورده شده در بازه‌های متفاوت نشان دهنده چگونگی تغییر مقادیر در بازه‌های زمانی متفاوت است. همچنین، از پروفیل تابش خورشید می‌توان دریافت که بسته به موقعیت شهری و داده‌های هواشناسی، مقدار آن در روز تغییر می‌کند، اما در شب مقداری ندارد که می‌توان این مقدار را از داده‌های هواشناسی استخراج کرد. میزان جریان درون خانه که از انسان‌ها تشعشع می‌شود، طی روز یکسان است و به صورت تابع ثابت نشان داده شده است. این مقادیر تجربی هستند و آزمایشی بوده و توسط استاندارد استخراج می‌شوند و در مدل سیمولینک به صورت دیتابیس وارد می‌شوند و در نهایت مصرف انرژی که در مدل الکتریکی گرمایی وجود دارد، محاسبه می‌شود. مدل تعادل انرژی برای تغییرات هوایی یکسان در سیستم تهویه به ازای تعویض هوا در نیم ساعت انجام شده است.

۳.۲. بهینه‌سازی نتایج مدل‌سازی

به دلیل عدم قطعیت موجود در فرمول‌ها باید از ضرایبی در شبیه‌سازی استفاده کرد که نتایج به دست آمده به نتایج آزمایشی و واقعی نزدیک‌تر شود. برای بهینه‌سازی می‌توان



شکل ۱۲. بررسی دقت مدل ساختمان های قدیمی با جدید

[6].Chen Q, Fu R-H, Xu Y-C. Electrical circuit analogy for heat transfer analysis and optimization in heat exchanger networks. Appl Energy. 2015;139:81–92 .

[7].Chen Y, Hong T, Piette MA. Automatic generation and simulation of urban building energy models based on city datasets for city-scale building retrofit analysis. Appl Energy. 2017;205:323–35 .

[8].Cowart R. Unlocking the promise of the Energy Union:“efficiency first” is key,”. Regul Assist Proj Montpellier, VT. 2014 ;

[9].Rosenow J, Bayer E, Genard Q, Toporek M, Rososińska B. Efficiency First: From principle to practice. Real world examples from across Europe. Energy Union Choices. 2016 ;

[10]. Ohshita S, Johnson K. Resilient Urban Energy: Making City Systems Energy Efficient, Low Carbon and Resilient in a Changing Climate. Eur Counc an Energy Effic Econ [https://www eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Summer_Stud](https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Summer_Stud). 2017 ;

منابع

[1].Abergel T, Dean B, Dulac J. Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector: Global Status Report 2017. UN Environ Int Energy Agency Paris, Fr. 2017;22 .

[2].Alberti M, Waddell P. An integrated urban development and ecological simulation model. Integr Assess. 2000;1(3):215–27 .

[3].Rosenow J, Cowart R, Bayer E, Fabbri M. Assessing the European Union’s energy efficiency policy: Will the winter package deliver on ‘Efficiency First’? Energy Res Soc Sci. 2017;26:72–9 .

[4].Hedegaard RE, Kristensen MH, Pedersen TH, Brun A, Petersen S. Bottom-up modelling methodology for urban-scale analysis of residential space heating demand response. Appl Energy. 2019;242:181–204 .

[5].Abbasabadi N, Ashayeri M. Urban energy use modeling methods and tools: A review and an outlook. Build Environ. 2019;161:106270 .

- [11]. Sharifi A, Yamagata Y. Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review. *Renew Sustain Energy Rev.* 2016;60:1654–77 .
- [12]. Sharifi A, Yamagata Y. A conceptual framework for assessment of urban energy resilience. *Energy Procedia.* 2015;75:2904–9 .
- [13]. Rodrigues E, Fernandes MS, Gaspar AR, Gomes Á, Costa JJ. Thermal transmittance effect on energy consumption of Mediterranean buildings with different thermal mass. *Appl Energy.* 2019;252:113437 .
- [14]. Wu W. Economic analysis of energy consumption based on thermoeconomic cost analysis model. *Int J Heat Technol.* 2019;37(2):620–4 .
- [15]. Wang Y, Ni Z, Chen S, Xia B. Microclimate regulation and energy saving potential from different urban green infrastructures in a subtropical city. *J Clean Prod.* 2019;226:913–27 .
- [16]. Sola A, Corchero C, Salom J, Sanmarti M. Multi-domain urban-scale energy modelling tools: A review. *Sustain Cities Soc.* 2020;54:101872 .
- [17]. Yang L, Lam JC, Tsang CL. Energy performance of building envelopes in different climate zones in China. *Appl Energy.* 2008;85(9):800–17 .
- [18]. Zhu P, Yan D, Sun H, An J, Huang Y. Building Blocks Energy Estimation (BBEE): A method for building energy estimation on district level. *Energy Build.* 2019;185:137–47.