





Simulation of Thermal Behavior of Green Roofs in Humid Climates (Cfa): Rasht, Durban, Tokyo, Kutaisi, Houston, Buenos Aires, Brisbane and Trieste

Najmeh Mastari Farahani^{1*}, Abdollah Baghaei Daemei², Masoumeh Mazandarani³

¹Department of Architecture and Urban Planning, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²School of Built Environment, College of Science, Massey University, Albany Campus, Auckland, New Zealand.

³PhD Student in Architecture, Kish International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article Type:

Original Research

Received: 09.23.2023

Revised: 11.20.2023

Accepted: 05.25.2024

Keyword:

Thermal Behavior

Green Roof

Humid Climate

Heat Transfer

Energy Simulation

Design Builder Software

*Corresponding Author:

Najmeh Mastari Farahani

Email: nfarahani@tvu.ac.ir

Nowadays, environmental problems have caused the authorities to pay greater attention to sustainable urban development and planning, policymaking and development based on this importance. Therefore, according to the development of urbanization and the multiplicity of urban buildings, their design based on green architectural patterns will have a significant impact on the sustainability of cities, particularly in metropolises. Part of the basic elements of bioclimatic design are passive solar systems that are placed on the body of buildings and use environmental resources to create heating, cooling and lighting in buildings. The green roof as a passive building system which has a significant effect on the microclimate and the balance between the sensible and insensible heat of the environment is also known as a bioclimatic design solution. The main goal of this study was to determine the solutions to bioclimatic architecture in the city of Rasht with a moderate and humid climate. In this way, the bioclimatic chart and the Mahoney table were used to extract the strategies. Then, to generalize these strategies in other temperate climate areas, the thermal effect of green roofs in the cities of Durban (South Africa), Tokyo (Japan), Kutaisi (Georgia), Houston (USA), Buenos Aires (Argentina), Brisbane (Australia) and Trieste (Italy) were evaluated by simulation with Design Builder software, assuming constant building specifications. The results showed that the city of Rasht with an annual heat loss of -1868 kilowatts per hour demonstrated better performance compared to other climatic areas. It was also observed that Bam Sabz was able to perform better in the first 6 months in Rasht. In the first 6 months, this amount was approximately -650 kilowatt hours and in the second 6 months it was approximately -1215 kilowatt hours.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Today, one of the biggest and most important concerns of researchers and urban designers is environmental issues at the global level, particularly the excessive consumption of fossil fuels and, as a result, the risk of climate change. Urban green space is a type of urban land use surface with man-made vegetation that has both social and ecological efficiency. Iran is one of the first countries to use renewable energy. Therefore, the question arises, what role will green roofs play in sustainable urban development in Iran as one of the solutions of sustainable architecture? In addition, what is the difference between the effect of using the green roof solution in different climates of the cities? Is this effect different in a specific climate (moderate and humid) in different cities of the world? For this purpose, the present study was carried out to provide architectural solutions to increase indoor thermal comfort by using green roofs. Using a green roof has many benefits, including reducing the urban heat island effect, reducing air pollution, preserving building energy, reducing noise pollution, creating fire resistance, and increasing property value. One of the most important effects of the green roof is the improvement of the thermal behaviour of the green roof, which was investigated in this research. In most previous research, the studies were conducted in one city and region only. Therefore, in this research, the effects of green roofs in temperate and humid climates in various cities of the world were investigated and compared, which is the distinguishing feature of this research.

Methodology

This applied research consisted of two parts. The first part included the identification and classification of passive design strategies. In this way, the city of Rasht was chosen as the selected region. Its climatic data, including temperature and humidity, were prepared for 10 years. Then, two methods were used to extract passive strategies, which included the Givoni diagram and Mahoney table. To identify the strategies, the climatic data had to be grouped in three-hourly form. Climatic data of temperature and humidity were prepared for three hours separately for each month so that they could be applied to the Givoni diagram. Then, the Mahoney table was used to determine the day and night thermal stress of each month during a year based on the average annual temperature and average relative humidity of the same month. In addition, to identify and introduce all the strategies, the Mahogany table was also used. In the process of conducting the research, the specifications of the architectural building and the characteristics of the materials used in the building were assumed to be fixed so that the results obtained from the Design-Builder software could compare the effect of the green roof in the mentioned cities more accurately regardless of the type of architecture and materials. This part of the research was carried out as a green roof simulation in 8 climatic zones in one year and different seasons. Design Builder V.7 software was used for simulation. This software uses the Energy Plus simulation engine. The climate files of the evaluated areas were selected as EPW files from the software library. For modelling, a 3D software platform was used, and the model was drawn with 3*3*3 proportions.

Results and discussion

Table 7 shows the performance of the green roof in each climate area during a one-year period and the amount of heat loss from the roof. Therefore, it can be seen that the total amount of heat loss in the areas of Rasht, Durban, Tokyo, Kutaisi, Houston, Buenos Aires, Brisbane and Trieste were approximately -1868, -2630, -2417, -4029, -1918, -1916, respectively. -1939 and -3098 kilowatts per hour. Thermal performance in this research was defined as the extent to which the green roof can reduce heat exchange in hot and cold seasons as an insulator in such a way that in the hot seasons of the year, it reduces the hot outside air inside, and does not direct the hot air from inside to the outside in the winter. The lowest amount of monthly heat transfer in Rasht was -89 for Farvardin and the highest amount was -266 kilowatts per hour. Moreover, for the other climatic zones of the compared cities, the lowest and highest monthly heat transfer values were respectively equal to -113 in Bahman and -297 in September, -110 in September and -361 in Esfand, -256 in Mehr and -489 in Esfand, -91 in Mehr and -225 in Farvardin, -114 in Esfand and -243 in Shahrivar, -117 in Tir and -204 in Mehr, -163 in Mehr and -404 in Esfand.

Table 1. One-year heat transfer value for each climate area (in kilowatt hours).

	Farvardin	Ordibehesht	Khordad	Tir	Mordad	Shahrivar	Mehr	Aban	Azar	Dey	Bahman	Esfand
Rasht	-89	-96	-101	-114	-124	-128	-130	-176	-195	-213	-236	-662
Durban	-162	-184	-215	-245	-271	-297	-255	-260	-205	-144	-113	-155
Tokyo	-302	-217	-160	-131	-115	-100	-114	-150	-215	-265	-287	-361
Kutaisi	-442	-302	-295	-307	-332	-328	-256	-282	-306	-333	-377	-489
Houston	-225	-147	-168	-155	-115	-127	-91	-131	-141	-175	-209	-234
Buenos Aires	-125	-135	-125	-163	-192	-243	-225	-179	-143	-137	-125	-114
Brisbane	-161	-153	-176	-117	-189	-200	-204	-170	-184	-136	-119	-130
Trieste	-362	-272	-199	-172	-224	-221	-163	-227	-244	-283	-327	-404

Conclusion

This research aimed to evaluate the thermal effect of the green roof in 8 temperate and humid climate areas. The chosen climate area was the city of Rasht. The city of Rasht, with its annual heat loss of 1868 kilowatts per hour, was able to show a better performance compared to other climatic areas. Furthermore, Kutaisi showed the weakest performance with an annual heat loss of -4029 kilowatt hours. Farvardin had the lowest heat loss value of -89. This value was approximately 70 kilowatt hours less than Durban in comparison with other areas. This amount was lower in other areas by approximately 210 in Tokyo, 330 in Kutaisi, 130 in Houston, 35 in Buenos Aires, 70 in Brisbane, and 270 kilowatt hours in Trieste. It was also observed that Bam Sabz had a more acceptable performance in the first 6 months in Rasht compared to the second 6 months. The heat loss value in the first 6 months was approximately -650 kilowatt hours and in the second 6 months was approximately -1215 kilowatt hours.



شبیه‌سازی رفتار حرارتی بام سبز در اقلیم‌های معتدل و مرطوب (Cfa) (مورد پژوهی: شهرهای رشت، دوربان، توکیو، کوتائیس، هیوستون، بوینوس آیرس، بریسیین و تریسته)

نجمه ماستری فراهانی^{۱*}، عبدالله بقائی دائمی^۲، معصومه مازندرانی^۳

- ۱- گروه معماری و شهرسازی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۲- دانشکده محیط زیست، کالج علوم، دانشگاه مسی، پردیس البانی، اوکلند، نیوزیلند.
- ۳- دانشجوی دکتری معماری، پردیس بین‌الملل کیش، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۰۵

کلید واژگان:

رفتار حرارتی
بام سبز
اقلیم معتدل و مرطوب
انتقال حرارت
نرم‌افزار دیزاین بیلدر

*نویسنده مسئول: نجمه ماستری فراهانی

پست الکترونیکی:

nfarahani@tvu.ac.ir

امروزه مشکلات زیست محیطی، موجب توجه بیشتر مسئولین بر توسعه پایدار شهری و برنامه‌ریزی، سیاست‌گذاری و توسعه بر اساس این مهم شده است. لذا با توجه به توسعه شهرنشینی و تعدد ساختمان‌های شهری، طراحی آنها طبق الگوهای معماری سبز تأثیر به‌سزایی بر پایداری شهرها، به‌ویژه در کلان‌شهرها خواهد داشت. بخشی از عناصر اساسی طراحی زیست‌اقلیمی، سیستم‌های خورشیدی غیرفعال هستند که بر کالبد ساختمان‌ها قرار گرفته و از منابع محیطی برای ایجاد گرمایش، سرمایش و روشنایی در ساختمان‌ها استفاده می‌کنند. بام سبز به‌عنوان یکی از سیستم‌های ساختمانی غیرفعال که بر خرد اقلیم و تعادل میان گرمای محسوس و نامحسوس محیط اثر قابل توجهی دارد به‌عنوان یک راهکار طراحی زیست اقلیمی نیز شناخته می‌شود. هدف اساسی این مطالعه در ابتدا شناخت راهکارهای معماری زیست اقلیمی در شهر رشت با اقلیم معتدل و مرطوب است. در این پژوهش برای استخراج راهبردها از نمودار زیست‌اقلیمی و جدول ماهونی بهره‌گیری شده است. پس از آن، برای تعمیم این استراتژی‌ها در سایر حوزه‌های اقلیمی معتدل، اثر حرارتی بام سبز در شهرهای، توکیو، کوتائیس، هیوستون، بوینوس آیرس، بریسیین و تریسته به‌صورت شبیه‌سازی با نرم‌افزار Design Builder با فرض ثابت بودن مشخصات بنا ارزیابی شدند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که شهر رشت با اتلاف حرارتی سالانه ۱۸۶۸- کیلووات بر ساعت توانست عملکرد مناسب‌تری را در مقایسه با سایر حوزه‌های اقلیمی از خود نشان دهد. همچنین مشاهده شد که بام سبز توانست عملکرد مناسب‌تری را در ۶ ماه اول در رشت داشته است. این مقدار در ۶ ماه اول حدود ۶۵۰- کیلووات بر ساعت و در ۶ ماه دوم حدود ۱۲۱۵- کیلووات بر ساعت است.

مقدمه

رشد صنعتی و توسعه اقتصادی در شهرها تا حد زیادی به حامل‌های انرژی بستگی دارد. سرانه مصرف انرژی و همچنین دسترسی بیشتر به تجهیزات متنوع در کشورهای توسعه‌یافته و کشورهای در حال توسعه متفاوت است. اما در سال‌های اخیر برخی رویکردها منجر به افزایش بهره‌وری در این کشورها و کاهش سرانه مصرف شده است. سرانه مصرف انرژی در ایران در بخش‌های مختلف کشاورزی، خانگی، عمومی و تجاری، حمل و نقل و صنعت به ترتیب ۳/۳۳، ۱/۹، ۱/۷ و ۱/۵ برابر میانگین جهانی است. در کشورهای در حال توسعه نظیر ایران، به دلیل استفاده از انرژی تجدید ناپذیر، افزایش مصرف انرژی سبب تولید آلودگی و گرما می‌شود که این ذرات آلاینده، خود، سبب تشدید اثرات جزایر گرمایی می‌شوند که از یک طرف به دلیل اکتساب گرما در جو از طرق مختلف، باعث مصرف بیشتر انرژی برق و سایر سوخت‌ها، به منظور تأمین سرمایه‌های مورد نیاز تابستانی ساختمان‌ها و از طرف دیگر، انسداد کریدورها، مانع جریان طبیعی هوا به دلیل تغییر الگوهای وزش باد شده است [۱]. ساختمان‌ها از انرژی برای تأمین تجهیزات برقی استفاده می‌کنند تا شرایط آسایش حرارتی را برای ساکنین فراهم نمایند. بیش از نیمی از انرژی مصرف شده توسط ساختمان‌ها برای پاسخ‌گویی به گرمایش، سرمایش، تهویه و بارهای روشنایی [۲] تخصیص داده شده است.

امروزه یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین دغدغه‌های محققان و طراحان شهری، مسائل زیست‌محیطی در سطح جهانی به‌ویژه مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی و در نتیجه خطر تغییرات آب و هوایی است. از میان روش‌های متعدد پیشنهادی توسط نهادهای جهانی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان مناسب‌ترین راهبرد در نظر گرفته شده است. تعمیم این رویکردها تحت عنوان معماری پایدار [۳]، معماری سبز [۴] ساختمان انرژی صفر [۵] طراحی غیرفعال خورشیدی [۶] و طراحی زیست‌اقلیمی [۷] مطرح می‌شود. طراحی زیست‌اقلیمی^۱ به یک رویکرد طراحی معماری اشاره دارد که از انرژی خورشیدی و سایر منابع زیست‌محیطی مرتبط برای تأمین آسایش حرارتی انسان در داخل و خارج استفاده می‌کند. طبق تعریف ارائه شده توسط استاندارد ۵۵ ASHRAE [۸] «آسایش حرارتی شرایط ذهنی است که رضایت از حرارت محیط را بیان می‌کند و به‌صورت ذهنی ارزیابی می‌شود.» آسایش حرارتی بر اساس دمای خشک سنجیده می‌شود. سطح لباس^۲ (clo)، نرخ سوخت‌وساز بدن^۳ (met)، سرعت هوا^۴، رطوبت^۵، و میانگین دمای تابشی^۶ از عوامل مؤثر در آسایش حرارتی داخلی هستند. سرمایش، گرمایش و سطح روشنایی در ساختمان‌ها توسط طراحی زیست‌اقلیمی بر اساس اقلیم محلی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود کیفیت هوای داخل ساختمان و بهینه‌سازی سطح مصرف انرژی داشته باشد [۹]. چنین استراتژی‌هایی عمدتاً از طریق روش‌های خاص از جمله نمودار زیست اقلیم گیونی [۱۰] و جدول ماهونی [۱۱]^۷، به دست می‌آیند.

برای استفاده از این روش‌ها در برنامه‌ریزی‌های شهری، داده‌های ماهانه اقلیمی منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری و سپس با روش‌های ذکر شده در بالا مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند تا ملاحظات و استراتژی‌های طراحی مربوط به اقلیم مورد نظر تعیین شود. استفاده از این استراتژی‌های غیرفعال در سطح جهانی مورد قبول واقع شده است و مطالعات گسترده‌ای روی عملکرد گرمایشی و سرمایشی آنها صورت گرفته است [۱۵-۱۲]. استانداردهای مربوط به کیفیت هوای داخل ساختمان نیز در ۵۵ ASHRAE [۸]، ۶۲ ASHRAE [۱۶] و ISO ۷۷۳۰ [۱۷] مشخص شده است. از سوی

¹ Bioclimatic design

² Clothing/PPE insulation

³ Work rate and metabolic heat

⁴ Air movement and speed

⁵ Humidity

⁶ Radiant temperature

⁷ Givoni bioclimatic chart

⁸ Mahoney table

دیگر، استراتژی‌های غیرفعال همچنین می‌توانند باعث کاهش انتشار کربن در محیط شوند [۱۸]. فضای سبز شهری، نوعی از سطوح کاربری زمین شهری با پوشش گیاهی انسان ساخت است که هم واجد بازدهی اجتماعی و هم واجد بازدهی اکولوژیکی است [۱۹]. ایران جز اولین کشورهای است که در گذشته از انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده می‌کرد [۲۰-۲۲]. لذا این سؤال پیش می‌آید که بام سبز به عنوان یکی از راهکارهای معماری پایدار چه نقشی در توسعه شهری پایدار در ایران خواهد داشت؟ همچنین تأثیر استفاده از راهکار بام سبز در اقلیم‌های مختلف شهرها، چه تفاوتی با هم دارد؟ آیا این تأثیر در یک اقلیم مشخص (معتدل و مرطوب) در شهرهای مختلف دنیا با هم متفاوت است؟

مزایای بهره‌گیری از بام‌های سبز

بام‌های سبز، به عنوان یک راهکار نوآورانه در زمینه توسعه پایدار شهرها، از مزایای فراوانی برخوردارند که بهبود اقلیم شهری، ارتقای کیفیت هوا، مدیریت بهتر آب، و افزایش زیبایی منظر شهری از جمله آنهاست. این سیستم‌های سبز، با ایجاد یک لایه گیاهی بر بام‌ها، به تولید انرژی‌های پاک، کاهش گرمایش شهری، و جلوگیری از سیلاب و کاهش آلودگی هوا کمک می‌کنند. همچنین، تأثیرات مثبت بام‌های سبز بر روی بهبود کیفیت حیات حیوانات شهری و ایجاد فضاهای زیستی متنوع نیز چشمگیر است. به علاوه، این سامانه‌ها با تأمین سایه و حفاظت از ساختمان‌ها در برابر عوامل محیطی، به بهره‌وری انرژی و ارتقای استانداردهای محیطی کمک می‌کنند. در این سیاق، استفاده از بام‌های سبز نه تنها به بهبود شرایط زیست محیطی کمک می‌کند بلکه به سازگاری شهرها با چالش‌های پدیدآمده از رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی نیز کمک می‌نماید. جدول ۱ مزایای پیاده‌سازی از این سیستم را ارائه داده است.

جدول ۱. معرفی مزایای سیستم‌های بام سبز در محیط‌های شهری.

منبع	توضیح	مزیت
[۲۴; ۲۳]	با افزایش سطح سبز در شهرها، انتقال حرارت از بین می‌رود و اثر گرمایش شهری کاهش می‌یابد.	اثر خنک‌کنندگی
[۲۵]	گیاهان بام سبز دی‌اکسید کربن را جذب کرده و اکسیژن را تولید می‌کنند، که باعث تصفیه هوای محیط می‌شود.	تصفیه هوا
[۲۶]	بام‌های سبز به عنوان یک سامانه جاذب آب عمل می‌کنند و از آب باران برای آبیاری گیاهان بهره می‌برند، که می‌تواند به مدیریت تداوم آب و جلوگیری از سیلاب کمک کند.	مدیریت منابع آب
[۲۷]	افزودن فضای سبز به بالای ساختمان‌ها به زیبایی منظر شهری افزوده و محیط‌های شهری را زیباتر می‌کند.	افزایش زیبایی منظر شهری
[۲۸]	لایه‌های گیاهی بر بام‌ها به عنوان عایق حرارتی عمل کرده و انباشت گرما در داخل ساختمان‌ها را کاهش می‌دهند.	کاهش انباشت گرما در ساختمان‌ها
[۲۹]	لایه گیاهی بر بام‌ها می‌تواند از ساختمان در برابر عوامل محیطی مانند باران و تابش نور خورشید حفاظت کند.	حفاظت از ساختمان
[۳۰]	بام‌های سبز به عنوان فضاهای زنده برای پرندگان و حشرات شهری عمل می‌کنند و کیفیت حیات حیوانات شهری را ارتقا می‌دهند.	ارتقاء کیفیت حیات حیوانات شهری
[۳۱]	تأمین سایه توسط گیاهان بر بام‌ها می‌تواند از مصرف انرژی برای خنک‌کردن ساختمان‌ها کاسته و به بهره‌وری انرژی کمک کند.	افزایش بهره‌وری انرژی
[۳۲]	افزودن گیاهان مختلف به محیط شهری، تنوع بیولوژیک را افزایش می‌دهد و به حفظ تعادل در سیستم‌های اکولوژیکی کمک می‌کند.	تنوع بیولوژیک
[۳۳]	ایجاد بام‌های سبز تبدیل به یک سرمایه‌گذاری مستقیم در تسهیلات اکولوژیک شهری می‌شود که در طولانی مدت به بهره‌مندی شهروندان و شهر منجر می‌شود.	سرمایه‌گذاری در امکانات اکولوژیک

اهداف پژوهش و فرضیه‌ها

مطالعه حاضر با هدف ارائه راهکارهای معماری برای افزایش آسایش حرارتی داخلی با بهره‌گیری از بام سبز، انجام شده است. بر این اساس، در ابتدا شهر رشت، به دلیل عدم وجود پژوهش مشابه در این زمینه، به عنوان اقلیم اصلی انتخاب شد. اطلاعات اقلیمی، نمودار زیست‌اقلیمی، جدول ماهونی و محدوده آسایش به تفکیک هر ماه مشخص گردیدند. در مرحله بعد، برای تعمیم‌دادن این راهبردها، از طریق روش طبقه‌بندی کوپن^۱ ۷ حوزه اقلیمی دیگر شامل دوربان^۲ (آفریقای جنوبی)، توکیو^۳ (ژاپن)، کوتایسی^۴ (گرجستان)، هیوستون^۵ (ایالات متحده آمریکا)، بوینوس آیرس^۶ (آرژانتین)، بریسین^۷ (استرالیا) و تریسته^۸ (ایتالیا) شناسایی شدند. در این بخش، عملکرد بام سبز هر حوزه اقلیمی در مقایسه با شهر رشت مورد ارزیابی قرار گرفته است. این حوزه‌ها بر اساس مطالعاتی که توسط بقایی دائمی و همکاران [۳۴] انجام داده شد، به دست آمدند که در آن محققان این شهرها را معرفی کردند تا تعمیم‌پذیری راهبردهای غیرفعال خورشیدی^۹ در سایر حوزه‌های اقلیمی را به نمایش گذارند. یکی از راهبردهای معرفی شده در تحقیق آنها بام سبز است که این تحقیق، در نظر دارد تا عملکرد سقف سبز را در این هشت حوزه اقلیمی مورد تجزیه و تحلیل کمی توسط شبیه‌سازی قرار دهد.

پیشینه پژوهش

یکی از مهمترین اثرات بام سبز، بهبود رفتار حرارتی بام سبز است که در این پژوهش به بررسی آن پرداخته شده است [۳۵]. استفاده از پوشش گیاهی مناسب می‌تواند در تعدیل سرعت باد و کاهش تفاوت دمایی در سطوح مختلف شهری و در نهایت کاهش تأثیر پدیده جزایر حرارتی، کمک بسیاری کند [۳۶]. در یک پژوهشی که استفاده از بام سبز در اقلیم‌های آمریکای شمالی مورد بررسی قرار گرفته بود، مشخص شد در همه اقلیم‌ها، بار سرمایشی با افزایش ارتفاع گیاه در زمانی که شاخص سطح برگ بالا بوده، کاهش و بار گرمایشی افزایش یافته است [۳۷]. در یک بررسی مشخص شد که به دلیل سایه‌اندازی و خنک‌سازی تبخیری گیاهان، بام سبز نسبت به بام معمولی، ۵۰ درصد انتقال حرارت کمتری دارد [۳۸]. در یک پژوهش مشخص شد، بام سبز در تابستان، سبب سه برابر خنک‌کنندگی غیرفعال بیشتر و در نتیجه کاهش بار سرمایش مورد نیاز و بهبود آسایش حرارتی شده است [۳۹]. در یک بررسی بر روی بام سبز یک ساختمان مسکونی در اقلیم گرم و خشک ایران، مشخص شد اگر گیاه ارتفاع کمتر، لایه بستر کشت عمیق‌تر و شاخص سطح برگ بیشتر داشته باشد، بام سبز عملکرد بهتر دارد و در این ساختمان به علت استفاده از بام سبز، ۸.۵۴ درصد در مصرف انرژی سالانه صرفه‌جویی شده است [۴۰].

در پژوهشی دیگر در یک اقلیم گرم و خشک مشخص شد که افزایش سطح برگ گیاه تأثیر مثبتی بر عملکرد حرارتی ساختمان معین و در نتیجه کاهش استفاده از وسایل خنک‌کننده را به همراه داشته است [۴۱]. در یک بررسی بر روی بام سبز ساختمانی که مطابق بحث ۱۹ مقررات ملی ساخته شده است، محقق شاهد کاهش ۹.۵ درصدی مصرف انرژی بوده است [۴۲]. در پژوهشی دیگر، مشخص شد که هرچه ارتفاع گیاهان کمتر باشد، لایه بستر عمیق‌تر و هرچه سطح برگ بیشتر، بهره‌وری انرژی بیشتر است [۴۰]. در یک بررسی اثر بام سبز بر کاهش جزیره حرارتی در شهر کرج مورد

¹ Köppen climate classification

² Durban

³ Tokyo

⁴ Kutaisi

⁵ Houston

⁶ Buenos Aires

⁷ Brisbane

⁸ Trieste

⁹ Passive solar strategies

بررسی و تأیید قرار گرفته است [۴۳]. در پژوهش دیگر بر روی یک ساختمان معین، مشخص شد استفاده از بام سبز موجب ۱۵.۱ درصد صرفه‌جویی در مصرف انرژی سالانه ساختمان شده است [۴۴]. در بررسی یک نمونه موردی بام سبز در شهر مشهد، کاهش ۱۱ درصدی بار سرمایشی در تابستان و ۱۹ درصدی نیاز گرمایشی در زمستان، به علت استفاده از بام سبز در ساختمان مورد تأیید قرار گرفت [۴۵]. در پژوهشی دیگر مشخص شد که استفاده از بام سبز گسترده در اقلیم سردسیر اردبیل نمونه مطلوبی در تعدیل جزایر حرارتی آن شهر است [۴۶]. در یک بررسی مشخص شد استفاده از حوض‌های کم عمق در بام سبز، به تعادل حرارتی داخل خانه و صرفه‌جویی در مصرف انرژی کمک می‌کند [۴۷]. در پژوهشی دیگر استفاده از بام سبز در اقلیم معتدل و مرطوب را مناسب‌تر از اقلیم گرم و خشک ارزیابی کرده است [۴۸]. در یک بررسی در اقلیم گرم و خشک، مشخص شد که محدودهٔ احداث بام سبز از نوع آن اهمیت بیشتری دارد و در این اقلیم، بام سبز در محدودهٔ کوچک، (بلوک شهری و واحد همسایگی) تأثیر کمی بر شرایط حرارتی خرداقلیم دارد [۴۹]. در پژوهشی دیگر مشخص شد که یک بام سبز طراحی شده در محیط آزمایشگاهی عملکرد حرارتی بهتری نسبت به بام سبز معمولی دارد [۵۰]. در اغلب پژوهش‌های گذشته مطالعه فقط در یک شهر و اقلیم صورت گرفته است. لذا در این پژوهش به بررسی اثرات بام سبز در اقلیم معتدل و مرطوب در شهرهای متنوعی از جهان و مقایسهٔ آنها پرداخته شده است؛ که وجه تمایز این پژوهش است.

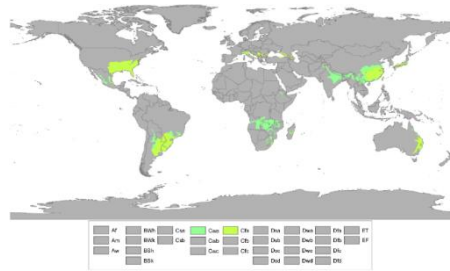
روش‌شناسی

این تحقیق کاربردی از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول شامل شناسایی و دسته‌بندی راهبردهای طراحی غیرفعال است. به این صورت که در ابتدا شهر رشت به‌عنوان اقلیم منتخب برگزیده شد. داده‌های اقلیمی آن شامل دما و رطوبت به‌صورت ۱۰ ساله تهیه گردید. سپس برای استخراج استراتژی‌های غیرفعال از دو روش استفاده شد که شامل نمودار زیست‌اقلیمی گیونی و جدول ماهونی است. برای شناسایی استراتژی‌ها داده‌های اقلیمی می‌بایستی به‌صورت سه ساعته دسته‌بندی می‌شدند. داده‌های اقلیمی دما و رطوبت به‌صورت سه‌ساعته به تفکیک هر ماه آماده شدند تا بتوان آنها در نمودار گیونی اعمال نمود. دوره زمانی این داده‌ها از سال ۱۳۸۵ تا سال ۱۳۹۴ است. برای محدوده زمانی، داده‌های دریافتی به‌صورت بیست ساله بودند.

به دلیل این که این داده‌ها را می‌بایستی مرتب‌سازی می‌شدند، به همین دلیل این بازه به‌صورت محدوده زمانی یکپارچه انتخاب گردید. سپس جدول ماهونی برای تعیین تنش حرارتی روز و شب هر ماه در طول یک سال بر اساس میانگین دمای سالانه و میانگین رطوبت نسبی همان ماه بهره‌گیری شد. در کنار آن، برای این که تمامی استراتژی‌ها شناسایی و معرفی شوند، از جدول ماهونی نیز بهره‌گیری شد. جدول ماهونی مجموعه‌ای از جداول مرجع مورد استفاده در معماری است که به‌عنوان راهنمای طراحی اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. جداول از داده‌های آب و هوایی در دسترس و محاسبات ساده برای ارائه دستورالعمل‌های طراحی استفاده می‌کنند. شش جدول وجود دارد. چهار مورد برای وارد کردن داده‌های آب و هوایی، برای مقایسه با الزامات آسایش حرارتی استفاده می‌شود و دو جدول برای خواندن معیارهای طراحی. بخش دوم شامل شبیه‌سازی بام سبز در حوزه‌های اقلیمی مشابه طبقه Cfa است.

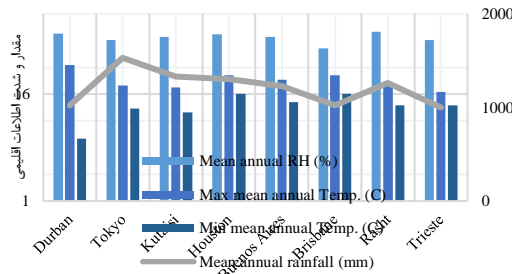
این حوزه‌ها به‌صورت نسبی دارای دما، رطوبت، سرعت باد و همچنین میانگین بارش باران در سال هستند. برای نمایش شهرهای حوزه‌های پیشنهادی از نقشه با طرح استوانه‌ای میلر^۱ استفاده شده است. آب و هوای مرطوب منطقه‌ای از آب و هوا است که با تابستان‌های گرم و مرطوب و زمستان‌های معتدل مشخص می‌شود. بر اساس طبقه‌بندی آب و هوایی کوپن، حوزه Cfa به‌عنوان آب و هوای معتدل و معتدل توصیف می‌شود [۵۱] شکل ۱ به‌صورت کلی حوزه‌های آب و هوایی Cfa جهان را بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی اصلاح شده کوپن نشان می‌دهد.

¹ Miller cylindrical projection



شکل ۱. پهنه‌بندی حوزه اقلیمی Cfa در جهان بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن [۴۱].

مطابق شکل ۱، شهرهایی با آب و هوای مرطوب عبارت‌اند از دوربان (آفریقای جنوبی)، توکیو (ژاپن)، کواتاچیسی (گرجستان)، هیوستون (ایالات متحده آمریکا)، بوئنوس آیرس (آرژانتین)، بریزبن (استرالیا) و تریست (ایتالیا). در ادامه شکل ۲ طبقه‌بندی آماری شاخص‌های اقلیمی را به ترتیب به‌صورت توضیحی و مقایسه‌ای نشان می‌دهد.



شکل ۲. موقعیت شهرهای انتخاب شده در حوزه اقلیمی Cfa (تصویر سمت چپ) و نمودار مقایسه‌ای شاخصه‌های اقلیمی شهرهای حوزه اقلیمی Cfa (تصویر سمت راست).

در فرآیند انجام پژوهش، مشخصات بنای معماری و ویژگی‌های مصالح استفاده شده در ساختمان ثابت فرض شده است تا نتایج به دست آمده از نرم افزار دیزاین بیلدر صرف نظر از نوع معماری و مصالح بتواند تأثیر بام سبز را در شهرهای مذکور به صورت دقیق‌تری مقایسه کند. رشت شهری است با وسعت ۱۸۰ کیلومترمربع که در ارتفاع منفی ۷ متری از سطح دریا واقع شده است. آمار هواشناسی مورد استفاده در این تحقیق از گزارش‌های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک رشت و سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری شده است. موقعیت جغرافیایی رشت در نقشه شکل ۴ مشخص شده است. این شهر عموماً آب و هوای مرطوبی دارد و این مقدار در تابستان بیشتر از زمستان است و به دلیل این رطوبت زیاد، اغلب

نوسانات دمایی بسیار کم در روز و شب تجربه می‌شود. ماه‌هایی که بیشترین و کمترین میانگین دما را دارند تیرماه و دی‌ماه با میانگین دمای هوا به ترتیب ۳۶ درجه سانتی‌گراد و ۳ درجه سانتی‌گراد است. بر اساس گزارش‌های سازمان هواشناسی کشور، این شهر هرساله ۱۳۵ روز بارانی با بارش بیش از ۱۰ میلی‌متر را تجربه می‌کند. میانگین رطوبت نسبی رشت طی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۴ ۸۰/۹ درصد بوده است. در این منطقه سرعت باد در تابستان کاهش می‌یابد و در پاییز دوباره افزایش پیدا می‌کند، اما میانگین سالانه سرعت باد عموماً حدود ۱/۷ متر بر ثانیه است. شکل ۳ موقعیت رشت روی نقشه و جدول ۲ آمار ۳ ساعته دما و رطوبت نسبی رشت برای دوره زمانی ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۴ را نشان می‌دهد.



شکل ۳. موقعیت رشت روی نقشه.

جدول ۲. آمار ۳ ساعته دما و رطوبت نسبی رشت برای دوره زمانی ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۴.

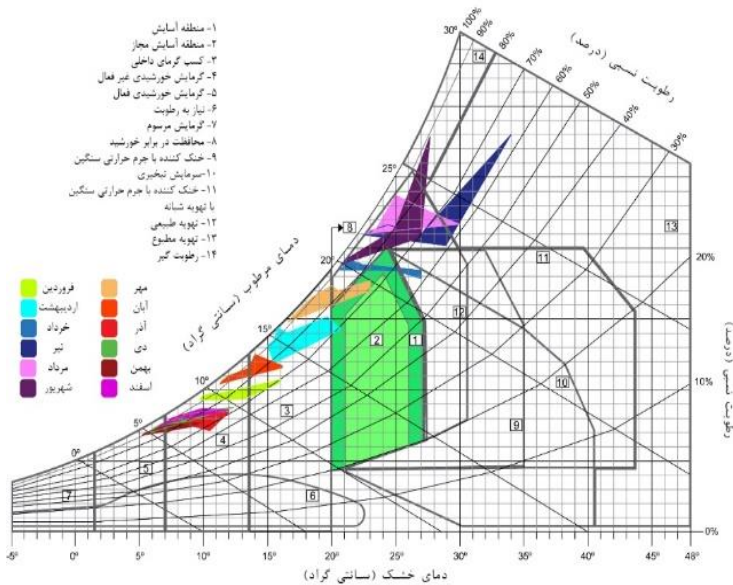
ساعت ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
دما	۶/۹	۱۰	۱۵/۸	۳۰	۲۲/۴	۲۲/۷	۲۱/۲	۱۷	۱۱/۵	۷/۵	۶/۲	۵/۱
رطوبت	۹۲/۳	۹۲/۴	۹۹/۶	۹۲	۹۱	۹۰	۹۳	۹۵/۶	۹۶	۹۳/۴	۹۳/۶	۹۲/۸
دما	۶/۶	۹/۷	۱۵	۲۰/۹	۲۲/۹	۲۳	۲۰/۹	۱۶/۷	۱۱/۳	۷/۳	۵/۹	۵
رطوبت	۹۱/۴	۹۲/۶	۹۲/۵	۸۹/۲	۸۷/۵	۸۷/۹	۹۰/۷	۹۵/۲	۹۵/۶	۹۲/۵	۹۰/۳	۹۲/۳
دما	۸/۷	۱۳/۲	۱۵/۵	۲۵	۲۶/۹	۲۷/۹	۲۵/۹	۲۰/۵	۱۳/۹	۹/۱	۸	۶/۶
رطوبت	۸۴	۷۷/۵	۷۷/۴	۶۹/۶	۷۱/۷	۷۱/۳	۷۸/۷	۸۳	۹۴/۲	۷۹/۳	۸۶	۸۶
دما	۱۱/۵	۱۶	۲۰/۷	۲۷	۲۸/۹	۳۰/۵	۲۷/۳	۲۳	۱۶/۱	۱۱/۶	۱۱/۵	۹/۲
رطوبت	۷۳/۵	۶۹/۵	۶۹/۳	۶۱/۴	۲۶/۸	۶۱/۴	۶۹	۷۲/۴	۷۶/۷	۶۸/۶	۷۶/۱	۷۶/۵
دما	۱۱/۷	۱۵/۸	۲۰/۶	۲۷	۲۹	۳۰/۵	۲۷/۲	۲۲/۶	۱۶/۱	۱۲	۱۲/۲	۹/۷
رطوبت	۷۳	۶۹/۴	۶۹/۹	۶۳	۶۴	۶۱/۷	۶۹/۸	۷۵/۸	۷۵/۶	۷۱/۶	۷۳/۴	۷۵/۵
دما	۹/۵	۱۳/۳	۱۹/۷	۲۵	۲۷	۲۸	۲۴/۹	۲۰	۱۳/۷	۹/۶	۸/۷	۷/۵
رطوبت	۸۲/۹	۷۷	۷۷	۶۸/۸	۷۰	۷۱/۹	۸۰/۲	۸۷	۸۷/۲	۷۹	۸۷/۵	۸۶/۲
دما	۸	۱۱/۷	۱۶/۶	۲۲/۴	۲۴/۳	۲۴/۹	۲۷/۷	۱۸/۵	۱۲/۶	۸/۶	۷/۳	۶/۴
رطوبت	۸۹/۲	۸۶/۹	۸۷	۸۳/۳	۸۷	۸۹	۸۹/۳	۹۲/۹	۹۲	۸۸/۴	۹۱/۷	۹۰/۸
دما	۷/۲	۱۰/۸	۱۵/۶	۲۱/۲	۲۳/۲	۲۳/۵	۲۱/۷	۱۷/۶	۱۱/۹	۷/۸	۶/۷	۵/۵
رطوبت	۹۱/۳	۹۱/۲	۹۱/۶	۹۰	۸۸/۵	۸۸/۷	۹۲/۳	۹۵	۹۴/۷	۹۲	۹۲	۹۱/۹

نتایج و بحث

نتایج حاصل از این پژوهش در ادامه ارائه شده است.

استراتژی‌های آسایش حرارتی بر اساس نمودار گیونی

برای استخراج و بررسی معیارهای آسایش حرارتی مناسب برای منطقه مورد مطالعه از نمودار گیونی استفاده شد. برای این منظور، داده‌های دما و رطوبت نسبی به داده‌های ۳ ساعته که در جدول ۲ نشان داده شده است، تجزیه شدند. این اطلاعات در نمودار زیست‌اقلیمی وارد شد و استراتژی‌های مناسب برای هر ماه با توجه به مناطق نمودار تعیین شد. شکل ۴ راهبردهای آسایش حرارتی مناسب رشت را در ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد.



شکل ۴. نمودار سایکرومتریک^۱ رشت [۱۹].

نمودار سایکرومتریک رشت (شکل ۴)، موقعیت هر ماه را بر روی مناطق نمودار نشان می‌دهد و الزامات رسیدن به محدوده آسایش حرارتی را برای اکثر روزهای ماه‌های آذر و اسفند و تقریباً نیمی از روزهای ماه‌های فروردین و آبان با استفاده از گرمایش خورشیدی غیرفعال امکان پذیر می‌داند. همچنین دست یافتن به آسایش حرارتی حدوداً در نیمی از روزهای ماه آبان، تمام روزهای ماه اردیبهشت و بخش قابل توجهی از ماه مهر از طریق کسب گرمای داخلی ساختمان قابل دستیابی است. از سوی دیگر بخش قابل توجهی از روزهای ماه‌های تیر، مرداد و شهریور با استفاده از تهویه طبیعی امکان فراهم نمودن شرایط آسایش حرارتی داخلی وجود دارد.

استراتژی‌های آسایش حرارتی بر اساس جدول ماهونی

جدول ماهونی یک جدول مرجع است که می‌تواند برای طراحی اقلیمی و به طور خاص تعیین مناطق آسایش شب و روز هر ماه با توجه به میانگین دمای سالانه و میانگین رطوبت نسبی منطقه در آن ماه استفاده شود. این جدول می‌تواند به عنوان یک راهنمای جامع برای شناسایی الزامات آسایش حرارتی ساختمان‌ها باشد [۵۲؛ ۵۳]. برای تعیین راهبردهای آسایش حرارتی مناسب رشت، ابتدا گروه اقلیمی (گروه رطوبتی) هر ماه بر اساس رطوبت نسبی آن ماه تعیین شد (جدول

¹ Psychrometric chart

۲). شاخص H_1 برای وضعیت حرارتی روزهای گرم تعریف شده است که جریان محسوس هوا می‌تواند در جهت رفع ناراحتی افراد مؤثر باشد. شاخص H_2 وضعیت حرارتی مناسب روزها را نشان می‌دهد که جریان باد می‌تواند به بهبود شرایط کمک کند. شاخص H_3 در زمان بارش باران بیش از ۲۰۰ میلی‌متر تعریف می‌گردد که مکان‌یابی و ایمن‌سازی محل از باران می‌تواند راهکار مناسبی در جهت رفع ناراحتی باشد. شاخص A_1 برای وضعیت حرارتی روزهای سرد و گرم با نوسان بیش از ۱۰ درجه تعریف شده است که استفاده از مصالح با ظرفیت گرمایی بالا راهگشا است. شاخص A_2 برای وضعیت حرارتی روزهای گرم و شب‌های گرم و مناسب در نظر گرفته شده است به طوری که با نوسان بیش از ۱۰ درجه، خوابیدن در هوای آزاد برای افراد مطلوب تلقی می‌گردد. شاخص A_3 برای وضعیت حرارتی روزهای سرد و گرم تعیین شده است که استفاده از سیستم گرمایشی مناسب برای دستیابی به آسایش حرارتی الزامی است. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، رشت با میانگین رطوبت نسبی ۷۰ تا ۱۰۰ درصد در گروه اقلیم ۴ قرار می‌گیرد. به این معنی که میانگین دمای سالانه این شهر بیش از ۲۰ درجه و دمای منطقه آسایش در روز ۲۲-۲۷ درجه سانتی‌گراد و در شب ۱۷-۲۱ درجه سانتی‌گراد است. در ادامه، وضعیت دمایی رشت مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج مطابق جدول ۳ سازماندهی شد.

جدول ۳. جدول ماهونی - منطقه راحتی در روز و شب.

میانگین سالانه دما (سانتی‌گراد)						میانگین رطوبت نسبی	گروه اقلیمی (رطوبتی)
> ۱۵ درجه		۱۵ تا ۲۰		> ۲۰ درجه			
روز	شب	روز	شب	روز	شب		
۲۱	۳۰	۲۳	۳۲	۲۵	۳۴	۳۰ تا ۰	۱
۱۲	۲۱	۱۴	۲۳	۱۷	۲۶		
۲۰	۲۷	۲۲	۳۰	۲۴	۳۱	۵۰ تا ۳۰	۲
۱۲	۲۰	۱۴	۲۲	۱۷	۲۵		
۱۹	۲۶	۲۱	۲۸	۲۳	۲۹	۷۰ تا ۵۰	۳
۱۲	۱۹	۱۴	۲۱	۱۷	۲۳		
۱۸	۲۴	۲۰	۲۵	۲۱	۲۷	۱۰۰ تا ۷۰	۴
۱۲	۱۸	۱۴	۲۰	۱۷	۲۲		

روزهایی که حداکثر دما بالاتر از منطقه آسایش است، گرم (H)، روزهایی که حداکثر دما کمتر از منطقه آسایش است، سرد (C) و روزهایی که حداکثر دما در آنها است، در نظر گرفته می‌شوند. در منطقه راحتی متوسط (O) در نظر گرفته می‌شوند؛ بنابراین دمای هوا در رشت در روزها و شب‌های دی‌ماه سرد و در روزها و شب‌های بهمن معتدل است. در روزهای اسفند گرم است؛ اما در شب‌های اسفند معتدل، روزها و شب‌ها در فروردین و اردیبهشت گرم است. همچنین در روزهای خرداد گرم اما در شب‌های خرداد معتدل، روزها و شب‌های تیرماه معتدل و در روزها و شب‌های مرداد، شهریور، مهر، آبان و آذر سرد است. جدول ۴ جدول ماهونی رشت برای سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۹ را نشان می‌دهد.

جدول ۴. جدول ماهونی رشت برای سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۹.

ایستگاه: رشت														
طول جغرافیایی: ۴۹/۶۰ شرقی														
عرض جغرافیایی: ۳۷/۲۵ شمالی														
ارتفاع از سطح دریا: ۷- متر														
دما	بیشینه	نوسان سالیانه ^۲	میانگین		دما									
			دما	دمای کمیته	تیر	خرداد	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند		
۳۳/۴		۲۸/۲	۳۱/۷	۳/۵										
دما (سانتی‌گراد)	میانگین بیشینه دمای ماهیانه	۱۳/۳	۱۷/۵	۲۸	۲	۲۸	۳۰	۳۱/۷	۲۸/۵	۲۴/۳	۱۶/۵	۱۲/۶	۱۲/۷	۱۱
الف	میانگین کمیته دمای ماهیانه	۵/۵	۸/۷	۱۴	۱۹	۲۱/۵	۲۱/۷	۲۰	۱۶	۹	۴/۶	۴	۳/۵	
	نوسانات دمایی ماهانه	۷/۸	۸/۸	۸	۹	۸/۵	۱۰	۸/۵	۸/۳	۷/۵	۸	۸/۷	۷/۵	
	بیشینه	۹۵/۴	۹۳/۶	۹۳/۷	۹۷/۱	۹۸/۲	۹۸/۸	۹۶/۹	۹۷/۹	۹۶/۷	۹۶/۵	۹۶/۵	۹۶/۵	
	کمیته	۵۶/۴	۵۹/۱	۵۴/۶	۶۶/۶	۷۰/۳	۷۴/۵	۷۰/۸	۶۵/۲	۷۰/۹	۶۶/۹	۶۰/۱۶	۶۲/۲	
ب	گروه اقلیمی (رطوبتی)	۷۶/۱	۷۶/۵	۷۴	۸۲	۸۴/۴	۸۶/۹	۸۴	۸۱/۷	۸۴/۴	۸۲	۷۸/۴	۷۹/۴	
	میزان بارش (میلیمتر)	۱۱۳	۶۲	۴۹	۴۲	۴۱	۷۱	۱۵۳	۲۱۴	۱۹۱	۱۵۳	۱۳۱	۱۱۶	
	میانگین بیشینه دمای ماهیانه	۱۳/۳	۱۷/۵	۲۲	۲۸	۳۰	۳۱/۷	۲۸/۵	۲۴/۳	۱۶/۵	۱۲/۶	۱۲/۷	۱۱	
	محدوده بیشینه	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	
	آسایش در روز	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	
ج	میانگین کمیته دمای ماهیانه	۵/۵	۸/۷	۱۴	۱۹	۲۱/۵	۲۱/۷	۲۰	۱۶	۹	۴/۶	۴	۳/۵	
	محدوده بیشینه	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	
	آسایش در شب	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	
د	وضعیت روز	گرم	گرم	گرم	گرم	معتدل	معتدل	سرد	سرد	سرد	سرد	سرد	سرد	معتدل
	گرمایی شب	معتدل	گرم	گرم	معتدل	معتدل	معتدل	سرد	سرد	سرد	سرد	سرد	سرد	معتدل

جدول ۵ نشان می‌دهد که ۴ ماه از سال (تیر، مرداد، شهریور و مهر) دارای شرایط H1، ۲ ماه از سال (خرداد و آبان) دارای شرایط H2، ۲ ماه دیگر (آبان و آذر) دارای شرایط H3، و ۶ ماه از سال (فروردین، اردیبهشت، آذر، دی، بهمن و

¹ Annual fluctuation

² Annual fluctuation

اسفند) دارای شرایط A۳ هستند. هیچ یک از ماه‌ها شرایط A۱ یا A۲ نداشتند، اما آبان و آذر با دو شرایط دمایی (به ترتیب H۲-H۳ و H۳-A۳) همراه هستند.

جدول ۵. وضعیت گرمایی رشت در ماه‌های مختلف.

سرد	گرم	گرم	گرم	شب
معتدل	گرم	روز		
		بارندگی (میلیمتر)	< ۲۰۰	
۲ و ۱	۳ و ۲، ۱	گروه اقلیمی	۴ ۴ ۳ و ۲	
۱۰ درجه <	۱۰ درجه >	میانگین نوسانات دمایی ماهانه		
A ₃	A ₂	A ₁	H ₃	H ₂
			H ₁	شاخص‌ها
				فروردین
				اردیبهشت
				خرداد
				تیر
				مرداد
				شهریور
				مهر
				آبان
				آذر
				دی
				بهمن
				اسفند

H: وضعیت مرطوب و A: وضعیت خشک

جدول ۶ استراتژی‌های طراحی برای A₃، H₃ و A₁ را نشان می‌دهد. می‌توان بیان کرد که A₁ با پنج استراتژی طراحی شامل «محور طولانی شرقی - غربی»، «تهویه تک بانکی، تهویه دائمی»، «پنجره‌های بزرگ (۴۰-۸۰٪ سطح دیوار)»، «دیوارها و کف‌های سبک» مرتبط است با ظرفیت گرمایی کم و «سقف‌های سبک و عایق‌بندی‌شده». A₃ تنها با یک استراتژی مرتبط است که «محور طولانی شرق - غرب» است که با A₁ نیز مرتبط است. H₁ با سه توصیه طراحی شامل «فاصله باز برای نفوذ نسیم»، «فاصله باز برای محافظت در برابر باد» همراه است. «لوور هوارسان تکی» با H₁-A₁ مرتبط است، و در نهایت، H₂ تنها با یک استراتژی طراحی مرتبط است که «لوور هوارسان» است.

جدول ۶. استراتژی طراحی ساختمان در جدول ماهونی.

شاخص‌ها							استراتژی طراحی
H1	H2	H3	A1	A2	A3	شناسه	
شیوه استقرار ساختمان							
			۱۰-۰			۱	کشیدگی شرقی-غربی
			۱۱ و ۱۲		۱۲-۵	۲	معماری فشرده با حیاط
					۴-۰		

شاخص‌ها					شناسه	استراتژی طراحی
H1	H2	H3	A1	A2		
طراحی فضا						
۱۲ و ۱۱					۳	فضای باز برای نفوذ نسیم خنک
۱۰-۲					۴	فواصل باز، محافظت از باد
۱ و ۰						فشرده‌گی فضا
جریان هوا						
۱۲-۳					۵	تهویه دائمی توسط بانک تهویه منفرد
			۵-۰		۶	
۲ و ۱			۱۲-۶			تهویه موقتی توسط بانک تهویه زوج
۰	۱۲-۲				۷	بدون نیاز به جریان هوا
	۱ و ۰					
اندازه بازشوها						
			۱ و ۰		۸	پنجره‌های بزرگ ۴۰ تا ۸۰ درصد مساحت دیوار
			۱۲ و ۱۱		۱ و ۰	پنجره‌های کوچک
			همه شرایط دیگر			پنجره‌های متوسط ۲۵ تا ۴۰ درصد سطح دیوار
دیوارها و کفها						
			۲-۰		۹	سبک، ظرفیت گرمایی کم
			۱۲-۲			سنگین، با بیش از ۸ ساعت تأخیر زمانی
سقفها						
			۵-۰		۱۰	سبک و عایق کاری خوب
			۱۲-۶			سنگین، با بیش از ۸ ساعت تأخیر زمانی
شرایط خواب در خارج ساختمان						
				۱۲-۲		فضایی برای خواب در فضای خارجی باز مورد نیاز است
						حفاظت در برابر باران
						محافظت در برابر باران شدید مورد نیاز است
			۱۲-۳			

شبیه‌سازی بام سبز

این بخش از تحقیق به صورت شبیه‌سازی بام سبز در ۸ حوزه اقلیمی در بازه زمانی یک‌ساله و در فصول مختلف انجام شده است. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار DesignBuilder V.7 (در ادامه دیزاین بیلدر نوشته می‌شود) بهره‌گیری شده است. این نرم‌افزار از موتور شبیه‌سازی EnergyPlus استفاده می‌کند. در نرم‌افزار دیزاین بیلدر، فرآیند شبیه‌سازی بام سبز و اتلاف حرارتی به طور کلی با وارد کردن داده‌ها، تعیین شرایط محیطی، اجرای شبیه‌سازی، تحلیل نتایج و تنظیمات پیشرفته انجام می‌شود. ابتدا، اطلاعات مربوط به ساختمان شامل مشخصات هندسی و مواد ساختمانی وارد می‌شود. سپس، ویژگی‌های بام سبز، از جمله نوع گیاهان، ضخامت خاک، و جزئیات زیرساخت بام تعیین می‌شوند. در مرحله بعد، شرایط محیطی مانند دما، رطوبت، و سرعت باد در طول زمان مشخص می‌شوند. سپس، با اجرای شبیه‌سازی، اتلاف حرارتی بام سبز در شرایط وارد شده محاسبه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی شامل داده‌های جزئیات اتلاف حرارتی در طول زمان و شرایط محیطی مختلف می‌باشد. پس از اجرای شبیه‌سازی، تحلیل نتایج انجام می‌شود و گزارش‌ها و

نمودارهای تحلیلی تولید می‌شوند. در نهایت، با انجام تنظیمات پیشرفته، می‌توان بهبودهای لازم را در نتایج حاصل اعمال کرده و بهترین عملکرد بام سبز را در شرایط مختلف دست یافت.

فایل‌های اقلیمی مناطق مورد ارزیابی به صورت فایل هواشناسی انرژی پلاس^۱ [۵۴] دریافت و در کتابخانه نرم‌افزار قرار داده شدند تا در زمان شبیه‌سازی هر شهر آنها را بتوان فراخوانی کرد. برای مدل‌سازی مدل ساختمانی مورد نظر نیز از پلتفرم سه‌بعدی سازی نرم‌افزار بهره‌گیری شد که مدل با تناسبات ۳*۳*۳ ترسیم گردید. برای این‌که شبیه‌سازی به صورت دقیق‌تری انجام شود و ضرایب هدایت حرارتی درست‌تری به دست آید، در چهار طرف مدل، به صورت آدیاباتیک^۲ (فرایندی است که در طول مدت‌زمان انجام واکنش، گرما بین سیستم و محیط مبادله نمی‌شود -Q=۰-) در نظر گرفته شد تا تبدلات حرارتی فقط از بخش بام باشد. در بخش Construction نوع مصالح بام برای مدل ساختمانی تعریف شد که خصوصیات حرارتی آن از جدول ۷ قابل استخراج است.

جدول ۷. اطلاعات ورودی خصوصیات بام سبز در نرم‌افزار.

Green roof plant	
Grass/straw materials - straw thatch (m)	۰.۱۰۰
Thermal Bulk Properties	
Conductivity (W/m-K)	۰.۴۰۰
Specific heat (J/kg-K)	۱۱.۰۰
Density (kg/m ³)	۶۴۱.۰۰
Height of plants (m)	۰.۶۰۰
Green roof thermal parameters	
LAI	۲.۷۰۰
Leaf reflectivity	۰.۲۲۰
Leaf emissivity	۰.۹۵۰
Minimum stomatal resistance (s/m)	۱۸۰.۰۰
Max volumetric moisture content at saturation	۰.۵۰۰
Min residual volumetric moisture content	۰.۰۱۰
Initial volumetric moisture content	۰.۱۵۰
Surface properties	
Thermal absorptance (emissivity)	۰.۷۸۰
Solar absorptance	۰.۶۰۰
Visible absorptance	۰.۶۰۰

نوع لایه‌بندی بام سبز بر اساس تحقیق انجام شده توسط مهری نژاد و همکاران [۵۵] می‌باشد که در آن از روش یکسان تأثیر بام سبز را در شهر رشت ارزیابی شده است. در این تحقیق نیز از همان لایه‌بندی بهره‌گیری شده است (شکل ۵). نوع پوشش گیاهی شامل هفت لایه بوده که شامل پوشش سبز خارجی، پوشش زیرین که شامل گل و ریشه خود گیاه است، قیر، ملات ماسه سیمان، سازه بتنی و آستر نهایی به ترتیب از خارج به داخل است. همین‌طور برای

¹ Energyplus weather file

² Adiabatic process

شبه‌سازی، می‌بایستی تمامی مشخصات مربوط به نوع برگ گیاه^۱، قابلیت مقاومت و انتقال حرارتی آن و سایر پارامترهای مؤثر در شبه‌سازی را دارا باشد. در شکل ۵ لایه‌های مختلف بام معمولی و بام سبز و ضخامت آنها معرفی شده است. خصوصیات حرارتی هر لایه نیز بر اساس قوانین مکانیک که در روش حل نرم افزار مشخص شده عمل می‌کنند.



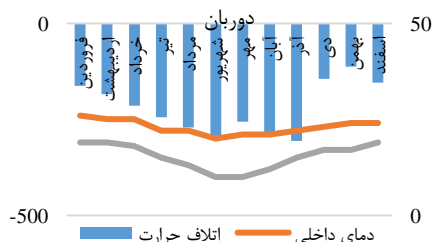
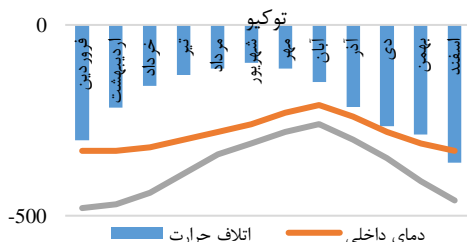
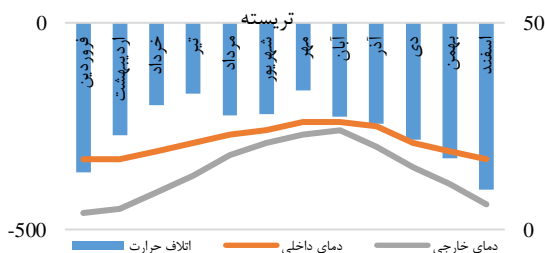
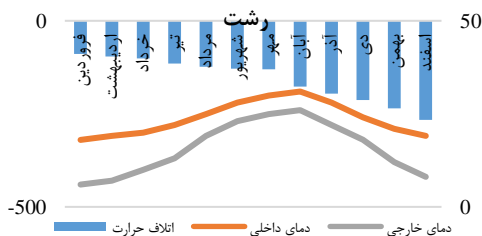
شکل ۵. معرفی لایه‌های بام سبز استفاده شده در تحقیق حاضر [۴۳].

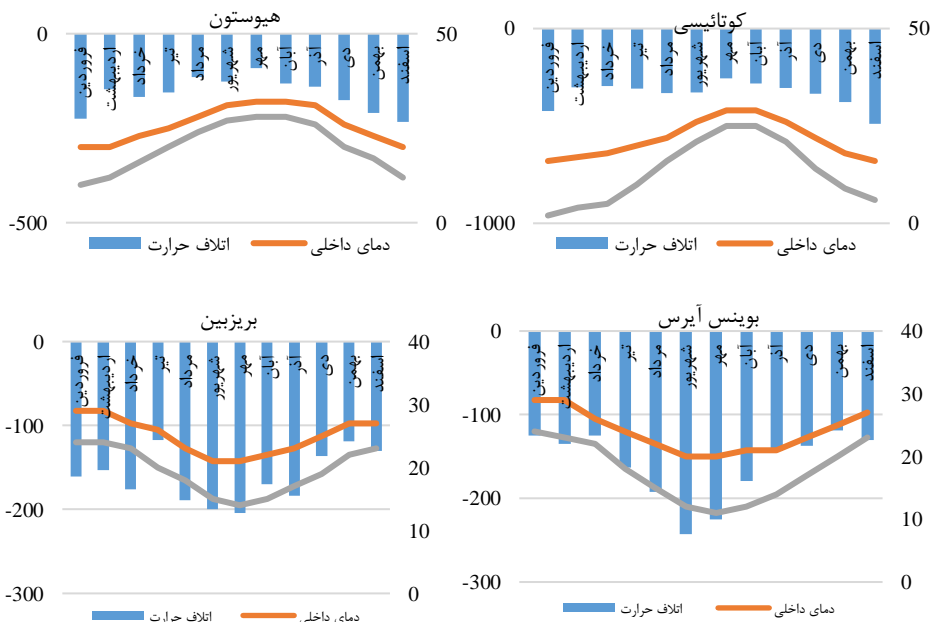
در ادامه، پس از وارد کردن اطلاعات ورودی، در ماژول Simulation، طول مدت شبه‌سازی به صورت یک‌ساله (از January ۳۱ تا December) و خروجی داده‌ها به صورت ماهیانه در نظر گرفته شد تا جزئیات دقیق‌تر و کامل‌تری را ارائه دهد. پس از شبه‌سازی، از بخش Fabric and Ventilation می‌توان مقدار انتقال حرارت در بخش‌های مختلف مدل را مشاهده کرد که در این تحقیق بخش «بام» خروجی گرفته شده است. هر حوزه اقلیمی به صورت مجزا با اطلاعات یکسان ارزیابی شده است. در طول شبه‌سازی سیستم‌های مکانیکی HVAC خاموش در نظر گرفته شد تا تأثیر حرارتی بام سبز در محیط داخلی محاسبه شود. شکل ۶ مقدار اتلاف حرارتی در هر ماه برای هر حوزه اقلیمی را نشان می‌دهد. جدول ۸ نشانگر عملکرد بام سبز در هر حوزه اقلیمی در طول دوره یک‌ساله و میزان اتلاف حرارتی از بام است. براین اساس مشاهده می‌شود که جمع مقدار اتلاف حرارت در حوزه‌های رشت، دوربان، توکیو، کوتائیسو، هیوستون، بوینوس آیرس، بریزبین و تریسته به ترتیب برابر است با حدود ۱۸۶۸-، ۲۶۳۰-، ۲۴۱۷-، ۴۰۲۹-، ۱۹۱۸-، ۱۹۱۶-، ۱۹۳۹- و ۳۰۹۸- کیلووات بر ساعت (kWh) است. عملکرد حرارتی در این تحقیق به این صورت تعریف می‌شود که بام سبز به چه میزان می‌تواند به‌عنوان یک عایق باعث کاهش تبادل حرارتی در فصول گرم و سرد شود. به این صورت که در فصول گرم سال، هوای گرم خارجی را به درون کاهش دهد و برعکس، در زمستان هوای گرم داخل را به بیرون هدایت نکند. کمترین مقدار انتقال حرارت ماهیانه رشت به مقدار ۸۹- مربوط به فروردین و بیشترین مقدار ۲۶۶- کیلووات بر ساعت است. همچنین برای حوزه‌های اقلیمی دوربان، توکیو، کوتائیسو، هیوستون، بوینوس آیرس، بریزبین و تریسته کمترین و بیشترین مقدار انتقال حرارت ماهیانه به ترتیب برابر با ۱۱۳- در بهمن و ۲۹۷- شهریور، ۱۱۰- در شهریور و ۳۶۱- در اسفند، ۲۵۶- در مهر و ۴۸۹- در اسفند، ۹۱- در مهر و ۲۲۵- در فروردین، ۱۱۴- در اسفند و ۲۴۳- در شهریور، ۱۱۷- در تیر و ۲۰۴- در مهر و ۱۶۳- در مهر و ۴۰۴- در اسفند است. در ادامه نمودارهای مقایسه‌ای دمای داخلی، دمای خارجی و اتلاف حرارت از طریق بام در دوره یک‌ساله به تفکیک هر حوزه اقلیمی ارائه شده است (شکل ۶).

¹ Plant leaf

جدول ۸. مقدار انتقال حرارت یک‌ساله برای هر حوزه اقلیمی (برحسب کیلووات بر ساعت).

فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	
-۸۹	-۹۶	-۱۰۱	-۱۱۴	-۱۲۴	-۱۲۸	-۱۳۰	-۱۷۶	-۱۹۵	-۲۱۳	-۲۳۶	-۲۶۶	رشت
-۱۶۲	-۱۸۴	-۲۱۵	-۲۴۵	-۲۷۱	-۲۹۷	-۲۵۵	-۲۶۰	-۲۰۵	-۱۴۴	-۱۱۳	-۱۵۵	دوربان
-۳۰۲	-۲۱۷	-۱۶۰	-۱۳۱	-۱۱۵	-۱۰۰	-۱۱۴	-۱۵۰	-۲۱۵	-۲۶۵	-۲۸۷	-۳۶۱	توکیو
-۴۲۲	-۳۰۲	-۲۹۵	-۳۰۷	-۳۳۲	-۳۲۸	-۲۵۶	-۲۸۲	-۳۰۶	-۳۳۳	-۳۷۷	-۴۸۹	کوتائیزی
-۲۲۵	-۱۴۷	-۱۶۸	-۱۵۵	-۱۱۵	-۱۲۷	-۹۱	-۱۳۱	-۱۴۱	-۱۷۵	-۲۰۹	-۲۳۴	هیوستون
-۱۲۵	-۱۳۵	-۱۲۵	-۱۶۳	-۱۹۲	-۲۴۳	-۲۲۵	-۱۷۹	-۱۴۳	-۱۳۷	-۱۲۵	-۱۱۴	بونیوس آیرس
-۱۶۱	-۱۵۳	-۱۷۶	-۱۱۷	-۱۸۹	-۲۰۰	-۲۰۴	-۱۷۰	-۱۸۴	-۱۳۶	-۱۱۹	-۱۳۰	بریزین
-۳۶۲	-۲۷۲	-۱۹۹	-۱۷۲	-۲۲۴	-۲۲۱	-۱۶۳	-۲۲۷	-۲۴۴	-۲۸۳	-۳۲۷	-۴۰۴	تریسته





شکل ۶. نمودارهای مقایسه‌ای دمای داخلی، دمای خارجی و اتلاف حرارت از طریق بام در دوره یک‌ساله به تفکیک هر حوزه اقلیمی.

نتیجه‌گیری

بام سبز می‌تواند به‌عنوان یک سیستم غیرفعال جهت تنظیم‌کننده گرمایی در ساختمان‌ها در نظر گرفته شود. سقف‌های معمولی دارای نوسانات قابل توجهی در دمای داخلی دارند. در تابستان، ساختمان گرم می‌شود؛ زیرا این‌گونه سقف‌ها گرمای بیشتری را از خورشید جذب می‌کند. هنگامی که از یک سیستم سقف سبز استفاده می‌شود، پوشش گیاهی نور مستقیم خورشید را به‌جای جذب آن را منعکس می‌کند. علاوه بر این، رطوبت موجود در پوشش گیاهی تبخیر می‌شود که به‌عنوان خنک‌کننده نقش آفرینی می‌کند. همه اینها تضمین می‌کنند که فضاهای داخلی گرمای کمتری از سقف دریافت می‌کنند؛ بنابراین در هزینه‌های انرژی برای سرمایش صرفه‌جویی می‌شود. این خاصیت در زمستان نیز قابل مشاهده است. به این صورت که در فصول سرد، سقف سبز به‌عنوان عایق حرارتی عمل می‌کند و باعث کاهش اتلاف حرارتی می‌شود.

هدف این تحقیق ارزیابی اثر حرارتی سقف سبز در ۸ حوزه اقلیمی معتدل و مرطوب بوده است. اقلیم منتخب شهر رشت است و شهر رشت با اتلاف حرارتی سالانه ۱۸۶۸- کیلووات بر ساعت توانست عملکرد مناسب‌تری را در مقایسه با سایر حوزه‌های اقلیمی از خود نشان دهد. همچنین کوتائیس ضعیف‌ترین عملکرد را از خود نشان داد که حدود ۴۰۲۹- کیلووات بر ساعت اتلاف حرارتی سالانه داشته است. این از طرفی است که فروردین‌ماه دارای کمترین مقدار اتلاف حرارتی ۸۹- است. این مقدار در نسبت با سایر حوزه‌ها به ترتیب حدود ۷۰ کیلووات بر ساعت کمتر از دوربان باشد. این مقدار در سایر حوزه‌ها به ترتیب حدود ۲۱۰ (توکویو)، حدود ۳۳۰ (کوتائیس)، حدود ۱۳۰ (هیوستون)، حدود ۳۵ (بوینوس آیرس)، حدود ۷۰ (بریزبین) و حدود ۲۷۰ (تریسته) کیلووات بر ساعت کمتر بوده است. در ادامه مشاهده می‌شود که بام

سبز در ۶ ماه اول در رشت در مقایسه با ۶ ماه دوم عملکرد قابل قبول تری داشته است. این مقدار در ۶ ماه اول حدود ۶۵۰- کیلووات بر ساعت و در ۶ ماه دوم حدود ۱۲۱۵- کیلووات بر ساعت است.

در ادامه این پژوهش، پیشنهاد می شود تحقیقاتی مشابه در جهت بررسی عملکرد بام سبز در سایر اقلیم ها صورت پذیرد. همچنین مقایسه نقش بام سبز در آسایش حرارتی داخلی در اقلیم های مختلف با هم، تأثیر آن در بهبود شرایط اقلیمی در فضای شهری و... می تواند در آینده مورد بررسی دقیق تر قرار گیرد.

References

- [1] Shoara, S., Mofidi Shemirani, S. M., Shahriari, S. K., & Zarabadi, Z. S. S. (2023). Investigation of the Effect of Urban Street Canyon Materials on Microclimate by CFD in Shiraz. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 19(4), 261-277. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.354640.2225>
- [2] DeKay, M., & Brown, G. Z. (2013). *Sun, Wind, and Light: Architectural Design Strategies* (3 ed.). John Wiley & Sons. https://books.google.com/books?id=vMVFP_7zlaIC
- [3] Guy, S., & Farmer, G. (2001). Reinterpreting Sustainable Architecture: The Place of Technology. *Journal of Architectural Education*, 54(3), 140-148. <https://doi.org/10.1162/10464880152632451>
- [4] Yuan, Y., Yu, X., Yang, X., Xiao, Y., Xiang, B., & Wang, Y. (2017). Bionic building energy efficiency and bionic green architecture: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 771-787. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.004>
- [5] Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A. (2011). Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 43(4), 971-979. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022>
- [6] Sodha, M. S. (1986). *Solar Passive Building: Science and Design*. Pergamon Press. <https://books.google.com/books?id=phm8AAAAIAAJ>
- [7] Jones, D. L. (1998). *Architecture and the Environment: Bioclimatic Building Design*. Laurence King. <https://searchworks.stanford.edu/view/3943427>
- [8] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2023). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (ANSI/ASHRAE Standard 55). Ashrae. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2>
- [9] De Dear, R., Xiong, J., Kim, J., & Cao, B. (2020). A review of adaptive thermal comfort research since 1998. *Energy and Buildings*, 214, 109893. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109893>
- [10] Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, 18(1), 11-23. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90047-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K)
- [11] Sealey, A. (1979). The Mahoney Tables. In *Introduction to Building Climatology*. Commonwealth Association of Architects. <https://pdfcoffee.com/introduction-to-building-climatology-chapter-10-the-mahoney-tables-pdf-free.html>
- [12] Fernandez-Antolin, M.-M., Del Río, J. M., Costanzo, V., Nocera, F., & Gonzalez-Lezcano, R.-A. (2019). Passive Design Strategies for Residential Buildings in Different Spanish Climate Zones. *Sustainability*, 11(18), 4816. <https://doi.org/10.3390/su11184816>
- [13] Liu, S., Kwok, Y. T., Lau, K. K.-L., Ouyang, W., & Ng, E. (2020). Effectiveness of passive design strategies in responding to future climate change for residential buildings in hot and humid Hong Kong. *Energy and Buildings*, 228, 110469. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110469>

- [14] Mahar, W. A., Verbeeck, G., Reiter, S., & Attia, S. (2020). Sensitivity Analysis of Passive Design Strategies for Residential Buildings in Cold Semi-Arid Climates. *Sustainability*, 12(3), 1091. <https://doi.org/10.3390/su12031091>
- [15] Wang, S., Liu, Y., Cao, Q., Li, H., Yu, Y., & Yang, L. (2021). Applicability of passive design strategies in China promoted under global warming in past half century. *Building and Environment*, 195, 107777. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107777>
- [16] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2022). *Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality* (ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022). Ashrae. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
- [17] Olesen, B. W., & Parsons, K. C. (2002). Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy and Buildings*, 34(6), 537-548. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00004-X)
- [18] Whang, S-W., & Kim, S. (2014). Determining sustainable design management using passive design elements for a zero emission house during the schematic design. *Energy and Buildings*, 77, 304-312. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.066>
- [19] Dargahi Kafshgar Kalaei, M., Ebrahimi, L., Haghzad, A., & Ramezani-pour, M. (2023). Explanation of Executive Strategies Based on the Development of Urban Green Space (A Case Study of 10th Metropolitan Area of Tehran). *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 19(4), 279-296. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.303771.1716>
- [20] Goudarzi, H., & Mostafaeipour, A. (2017). Energy saving evaluation of passive systems for residential buildings in hot and dry regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 432-446. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.002>
- [21] Harvey, L. D. D. (2009). Reducing energy use in the buildings sector: measures, costs, and examples. *Energy Efficiency*, 2(2), 139-163. <https://doi.org/10.1007/s12053-009-9041-2>
- [22] Mostafaeipour, A. (2010). Historical background, productivity and technical issues of qanats. *Water History*, 2(1), 61-80. <https://doi.org/10.1007/s12685-010-0018-z>
- [23] Dong, J., Lin, M., Zuo, J., Lin, T., Liu, J., Sun, C., & Luo, J. (2020). Quantitative study on the cooling effect of green roofs in a high-density urban Area—A case study of Xiamen, China. *Journal of Cleaner Production*, 255(8), 120152. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120152>
- [24] Jamei, E., Chau, H. W., Seyedmahmoudian, M., & Stojcevski, A. (2021). Review on the cooling potential of green roofs in different climates. *Science of The Total Environment*, 791(3), 148407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148407>
- [25] Liu, H., Kong, F., Yin, H., Middel, A., Zheng, X., Huang, J., Xu, H., Wang, D., & Wen, Z. (2021). Impacts of green roofs on water, temperature, and air quality: A bibliometric review. *Building and Environment*, 196, 107794. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107794>
- [26] Raimondi, A., & Becciu, G. (2021). Performance of Green Roofs for Rainwater Control. *Water Resources Management*, 35(1), 99-111. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02712-3>
- [27] Bakhshi, M. (2015). The position of Green Space in Improving Beauty and Quality of sustainable Space of City. *Environment Conservation Journal*, 16(SE), 269-276. <https://doi.org/10.36953/ECJ.2015.SE1631>
- [28] Bevilacqua, P. (2021). The effectiveness of green roofs in reducing building energy consumptions across different climates. A summary of literature results. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111523. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111523>

- [29] Susca, T. (2019). Green roofs to reduce building energy use? A review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate. *Building and Environment*, 162, 106273. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106273>
- [30] Knapp, S., Schmauck, S., & Zehndorf, A. (2019). Biodiversity Impact of Green Roofs and Constructed Wetlands as Progressive Eco-Technologies in Urban Areas. *Sustainability*, 11(20), 5846. <https://doi.org/10.3390/su11205846>
- [31] Borràs, J. G., Lerma, C., Mas, Á., Vercher, J., & Gil, E. (2022). Contribution of green roofs to energy savings in building renovations. *Energy for Sustainable Development*, 71(3), 212-221. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.09.020>
- [32] Wang, L., Wang, H., Wang, Y., Che, Y., Ge, Z., & Mao, L. (2022). The relationship between green roofs and urban biodiversity: a systematic review. *Biodiversity and Conservation*, 31(7), 1771-1796. <https://doi.org/10.1007/s10531-022-02436-3>
- [33] Liberalesso, T., Oliveira Cruz, C., Matos Silva, C., & Manso, M. (2020). Green infrastructure and public policies: An international review of green roofs and green walls incentives. *Land Use Policy*, 96, 104693. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104693>
- [34] Baghaei Daemei, A., Eghbali, S. R., & Mehrinejad Khotbehsara, E. (2019). Bioclimatic design strategies: A guideline to enhance human thermal comfort in Cfa climate zones. *Journal of Building Engineering*, 25, 100758. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100758>
- [35] Mohammadi, E., Mirkarimi, S. H., & Mohammadzadeh, M. (2017). Surveying Green roof's Components. *Human & Environment*, 15(1), 105-119. <https://www.magiran.com/paper/1714364>
- [36] Neshat Safavi, Seyed Hossein, Babakhani, M., & Azmoodeh, M. (2023). Comparative Comparison of the Effect of Green Roof Vegetation on the Reduction of Urban Heat Island (Case Study: Enghelab Square, City of Tehran). *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 19(4), 297-321. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.319059.1893>
- [37] Mahmoodzadeh, M., Mukhopadhyaya, P., & Valeo, C. (2020). Effects of Extensive Green Roofs on Energy Performance of School Buildings in Four North American Climates. *Water*, 12(1), 6. <https://doi.org/10.3390/w12010006>
- [38] Mahmoudi Zarandi, M., & Pakari, N. (2014). Extracting Optimized Detail of Green Roof for Decreasing Building Energy Consumption. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 6(11), 141-151. https://www.armanshahrjournal.com/article_33471.html
- [39] Jaffal, I., Ouldboukhite, S-E., & Belarbi, R. (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 43, 157-164. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.12.004>
- [40] Zarghami, E., & Adibi, E. (2016). Thermal Performance Evaluation of Green Roof on Sustainability and Energy Efficiency in Residential Buildings in Hot and Dry Climates of Iran. *Journal of Sustainable Architecture and Urban Design*, 4(1), 75-90. https://j.saud.sru.ac.ir/article_661.html?lang=en
- [41] Shyaa ali Altamemi, A., Zarkesh, A., & Yeganeh, M. (2023). Analysis of the effect of green building technique on reducing energy consumption (Green roof technique in an educational building in Wasit, Iraq). *Sustainability, Development & Environment*, 2(4), 15-37. <http://sanad.iau.ir/fa/Article/846529>
- [42] Arabi, M. S., Dehghan, M., & Ziyai Rad, S. (2022). Improving the energy performance of an existing building along with the effects of a green roof on the amount of energy consumption in the climate of Isfahan: a comparative study of issue 19 against

- ASHRAE2018-2/90 standard. *Mechanical Engineering, University of Tabriz*, 51(41), 323-330. <https://doi.org/10.22034/jmeut.2022.11528>
- [43] Khosravi, M., & Ghobadi, A. (2011). The place of green roof system in mitigation of urban heat island case study: karaj. *Journal of Urban Ecology Researches*, 2(4), 67-78. https://grup.journals.pnu.ac.ir/article_1044.html?lang=en
- [44] Karachaliou, P., Santamouris, M., & Pangelou, H. (2016). Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens. *Energy and Buildings*, 114, 256-264. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.055>
- [45] Ghalehnovi, A., Shahcheraghi, A., & Kamelnia, H. (2021). Evaluation of Green Roof System in comparison with Ordinary Roof from Energy Consumption Perspective of Energy Efficiency in line with Urban Planning (Mashhad Metropolis). *Quarterly Journal of Human Geography*, 13(3), 158-172. <https://www.magiran.com/paper/2266661>
- [46] Ali Akbarzadeh, R., & Faiz Menesh, F. (2018). Comparative study of types of green roof garden in order to adjust heat islands in Ardabil metropolis. *Green Architecture*, 4(11), 77-84. <https://www.magiran.com/paper/1885749>
- [47] Tunkabani, M., & Monajmi, S. (2019). Investigating the thermal performance of buildings benefiting from green roofs. *Green Architecture*, 5(3), 37-44. <https://civilica.com/doc/991648/>
- [48] Eghbali, S. R., Sadeghi, N., & Razagh Rostami, M. (2020). Thermal evaluation of large green roofs in comparison to other flat roofs (With the upper layer of silver and white). *Journal of Architectural Thought*, 4(8), 237-251. <https://doi.org/10.30479/at.2020.11816.1346>
- [49] Karamirad, S., & Vakilinezhad, R. (2022). Assessing the Effect of Green Roofs on Urban Microclimate, Case study: the Low-Rise Context in Hot-Dry Climate of Shiraz. *Journal of Iranian Architecture & Urbanism*, 13(2), 5-19. <https://doi.org/10.30475/isau.2022.237674.1453>
- [50] Mahmoody Zarandi, M., Pakari, N., & Bahrami, H. (2012). The effect of green roof on reducing environment temperature. *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar*, 9(20), 73-82. https://www.bagh-sj.com/article_1178.html?lang=en
- [51] Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11(5), 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- [52] Priya, R., Sundararaja, M., & Radhakrishnan, S. (2012). Evaluation of traditional architecture in the coastal region of Nagappattinam using Mahoney tables. *Journal of Applied Sciences Research*, 8(1), 582-588. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20123174103>
- [53] Xia, B. (2013). Thermal comfort and the Mahoney tables in Shanghai building bioclimatic design. *International Journal on Advances in Information Sciences and Service Sciences*, 5(9), 27-33. <https://doi.org/10.4156/AISS.VOL5.ISSUE9.4>
- [54] Climate One Building. (2023). *EnergyPlus Weather File (EPW) Data Dictionary*. https://climate.onebuilding.org/papers/EnergyPlus_Weather_File_Format.pdf
- [55] Mehrinejad Khotbehsara, E., Purshaban, F., Noormousavi Nasab, S., Baghaei Daemei, A., Eghbal Yakhdani, P., & Vali, R. (2018). Traditional climate responsible solutions in iranian ancient architecture in humid region. *Civil Engineering Journal*, 4(10), 2502-2512. <https://doi.org/10.28991/cej-03091176>