



تحلیلی بر ساختمان‌های مسکونی تحت تاثیر تغییرات اقلیمی در دهه‌های آینده (نمونه - موردی: ساختمان‌های مسکونی شهرک ارم تبریز)

پریا سعادت‌جو^{1*}، علی علیزاده²، سعید جهانبخش اصل³، علی محمد خورشیددوست³، بهروز ساری
صراف³

1- استادیار، گروه معماری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

2- دانشجوی دکتری، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

3- استاد، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

* تبریز، 5166616471، paria.saadatjoo@tabrizu.ac.ir

چکیده

در حال حاضر ساختمان‌ها در حدود 30٪ از انرژی جهان را مصرف می‌کنند که پیش‌بینی می‌شود این مقدار تحت تاثیر تغییرات اقلیمی در آینده به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. هدف این پژوهش بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر مصرف انرژی سالانه و مقایسه عملکرد راهکارهای کاهش مصرف انرژی طی شش دهه آتی می‌باشد. داده‌های آب‌وهوایی شهر تبریز مبتنی بر فایل ده ساله موجود و با استفاده از نرم‌افزار CCWorldWeatherGen برای سال‌های 2050 (2070-2041) و 2080 (2100-2071) تولید شده و نتایج حاصله با استفاده روش‌های آماری اعتبارسنجی شد. پس از شناسایی تیپ غالب مسکونی در شهرک ارم تبریز، شبیه‌سازی‌های انرژی با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر 7.0.0.096 برای وضعیت موجود و 60 سال آینده انجام گرفت. سپس با اعمال راهکارهای کاهش مصرف انرژی، عملکرد حرارتی بنا برای شرایط کنونی و آینده مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی‌ها نشان داد در تمامی مدل‌ها، میزان انرژی گرمایشی در سال 2020 بیشترین مقدار را دارد و انرژی سرمایشی در سال 2050 و 2080 نسبت به سال 2020 به میزان حداکثر 28/69٪ و 63/34٪ افزایش می‌یابد. مدل WI با عایق‌بندی حرارتی و شیشه‌های دوجداره، دارای کمترین نوسان انرژی سرمایشی به میزان 66/66٪ در مقایسه با سایر مدل‌ها می‌باشد. مدل‌های گروه COM با بهره‌گیری از راهکارهای ترکیبی، در سال‌های 2020، 2050 و 2080 به ترتیب با کاهش 8/24٪، 11/95٪، 12/83٪ انرژی، بهترین عملکرد را دارند. مقایسه عملکرد راهکارهای مختلف نشان داد که دو مدل با راهکار ترکیبی COM و عایق‌بندی حرارتی WI باعث بهبود عملکرد ساختمان در سال‌های 2020، 2050 و 2080 می‌شوند.

کلیدواژه‌گان: تغییرات اقلیمی، ساختمان مسکونی، مصرف انرژی، سرمایش، گرمایش، تبریز

An Analysis of Residential Buildings under the Influence of Climate Change in the Coming Decades (Case Study: Residential Buildings of Eram, Tabriz)

Paria Saadatjoo^{1*}, Ali Alizadeh², Saeed Jahanbakhsh Asl³, Ali Mohammad Khorshiddoust³, Behrouz Sari Sarraf³

1- Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Ph.D. Candidate, Department of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Professor, Department of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* P.O.B. 5166616471 Tabriz, Iran, paria.saadatjoo@tabrizu.ac.ir

Received: 19 October 2023 Accepted: 17 February 2024

Abstract

Buildings presently use 30% of global energy, set to rise due to climate change. This study assesses climate change's impact on energy consumption, heating/cooling loads in Tabriz over six decades. It also compares the effect of several energy efficient solutions in buildings. Future weather data for 2050 and 2080 was generated by CCWorldWeatherGen based on existing files. Identifying the prevalent housing type in Eram, energy simulations for the current and next 60 years used Design Builder 7.0.0.096. Applying energy reduction strategies, the study evaluates thermal performance, energy consumption, and environmental impact.

In all models, heating peaks in 2020, and cooling surges by 28.69% and 63.34% in 2050 and 2080 versus 2020. Model WI shows the lowest cooling energy variation at 66.66%. COM models rank as the most efficient in 2020, 2050, and 2080, cutting energy consumption by 8.24%, 11.95%, and 12.83%.

Climate change raises annual energy consumption by 4% in the current building model. Comparing strategies, two models—COM and thermal insulation WI—enhance building performance in 2020, 2050, and 2080. These findings stress the urgency of implementing strategies to mitigate climate-induced escalation in building energy consumption.

Keywords: Climate Change; Residential Building; Energy Consumption; Cooling; Heating.

1- مقدمه

موضوع تغییرات اقلیمی یکی از دغدغه‌های اساسی طی چند دهه گذشته می‌باشد. بر اساس گزارش AR5 هیئت بین‌الدول تغییرات اقلیمی (IPCC)، اگر انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان با همین روند ادامه یابد، متوسط دمای جهانی تا انتهای قرن 21 به میزان 4/8-2/6 درجه سانتیگراد افزایش خواهد یافت [1]. موج گرمایی و دامنه‌های شدید تغییرات دمایی در سال‌های گذشته منجر به مرگ‌ومیر بسیاری از انسان‌ها [2] و تغییر عملکرد و شرایط حاکم بر محیط‌های مصنوع شده‌است. ساختمان‌ها یکی از اصلی‌ترین مصرف‌کننده‌های انرژی هستند که در حدود 36٪ از انرژی کل جهان را مصرف و 40٪ از گاز دی‌اکسیدکربن را تولید می‌کنند. امروزه در حدود 60٪ از انرژی الکتریکی در جهان در بخش ساختمان مصرف می‌شود [3]. این مقدار از مصرف انرژی تحت تاثیر عوامل مختلف از جمله رشد تکنولوژی، سبک زندگی و بخصوص تغییرات اقلیمی به شدت در حال افزایش است [4و5] طبق گزارشات منتشرشده توسط آژانس بین‌المللی انرژی، افزایش دمای جهانی مصرف انرژی در بخش ساختمان در کشورهای توسعه‌یافته را به میزان 3٪ افزایش داده‌است [6-8]. بر اثر تغییرات اقلیمی و افزایش دمای کره زمین در سال‌های اخیر، دمای زمستان‌ها در مناطق سردسیر کاهش یافته‌است و این عامل نیاز انرژی برای گرمایش ساختمان‌ها را تقلیل داده‌است [5]. از سویی دیگر، افزایش متوسط دمای هوا در مناطق گرمسیر منجر به افزایش بار سرمایشی ساختمان‌های این مناطق در سال‌های اخیر شده‌است [9]. با توجه به تغییرات اقلیمی ایجاد شده، پیش‌بینی می‌شود که این روند با سرعت بیشتری در دهه‌های آینده ادامه داشته‌باشد که نتیجه آن تغییرات چشمگیر مصرف انرژی در حوزه‌های مختلف از جمله صنعت ساختمان خواهد بود [10-12].

هدف این تحقیق اعمال استراتژی‌های انرژی کارآمد بر روی بنا و مقایسه کارایی این راهکارها با در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی در آینده است. پس از بررسی پیشینه پژوهش و مطالعات انجام‌گرفته در این حوزه، داده‌های آب‌وهوایی با استفاده از ابزارهای مناسب برای سال‌های 2050 و 2080 تولید می‌شوند. در ادامه پس از بررسی تیپولوژی پلان‌های ساختمان‌های مسکونی شهرک ارم و انتخاب یک بنا به عنوان نمونه پایلوت، مشخصات آن به همراه شرایط شبیه‌سازی به طور کامل ارائه می‌شود. در مرحله بعدی، استراتژی‌های

کاهش مصرف انرژی و آلاینده‌های محیطی بر روی بنا اعمال شده و بر اساس داده‌های اقلیمی موجود و داده‌های تولید شده با نرم‌افزار، تغییرات رفتار حرارتی و مصرف انرژی و میزان کارایی استراتژی‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در شرایط کنونی و 6 دهه آتی مشخص می‌شود.

2- پیشینه پژوهش

یکی از اصلی‌ترین مشکلات ناشی از تغییرات اقلیمی، بحث گرمایش بیش از حد در ساختمان‌ها است که منجر به افزایش شدید بار سرمایشی و میزان مصرف انرژی در ساختمان می‌گردد [13-15]. تاکنون پژوهش‌های متعددی به بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر عملکرد حرارتی ساختمان و مصرف انرژی آن پرداخته‌اند. شن (2017)، از روش مورفینگ برای تبدیل داده‌های اقلیمی آینده با مقیاس بزرگ به داده‌هایی با مقیاس کوچکتر استفاده کرده و با اتکا به داده‌های حاصل، میزان مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی و اداری چهار شهر را با یکدیگر مقایسه نمود. بر اساس نتایج این پژوهش، تغییرات اقلیمی طی سال‌های آتی منجر به افزایش بار سرمایشی و کاهش بار گرمایشی در ساختمان‌های مسکونی و اداری هر چهار شهر مورد مطالعه می‌گردد [16]. شن و لوکز (2015)، با استفاده از نرم‌افزارهای ترنسیس¹ و ایکوئست² به بررسی میزان کارایی پمپ‌های زمین‌گرمایی تحت تاثیر تغییرات آب‌وهوایی پرداختند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، تغییرات اقلیمی به واسطه افزایش دمای آب ورودی و خروجی از پمپ گرمایی، منجر به کاهش کارایی این سیستم می‌گردد [17]. براردی و جعفرپور (2020) نیاز سرمایشی و گرمایشی 16 مدل ساختمانی اشرفی³ در کانادا بر مبنای داده‌های اقلیمی پیش‌بینی شده برای آینده را بررسی کردند. در این پژوهش از دو نرم‌افزار سی‌سی‌ورلد و درجین⁴ و ودرشیفت⁵ برای تولید داده‌های آب‌وهوایی آینده از سال 2041 تا 2070 استفاده گردید. به‌منظور شبیه‌سازی مصرف انرژی ساختمان از نرم‌افزار این استودیو 2.8.0⁶ استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، نیاز سرمایشی ساختمان‌ها در آینده به میزان 126٪ افزایش و نیاز گرمایشی آن‌ها به اندازه 33٪ کاهش خواهد یافت [18]. لارسن و همکاران (2019)، یک مدل ساختمان مسکونی رایج در آرژانتین را بر اساس تغییرات اقلیمی میان مدت و بلند مدت مبتنی بر سناریو A2 در مدل تغییرات آب‌وهوایی هدرسی‌ام⁷ 3

5 WeatherShift
6 OpenStudio 2.8.0
7 HadCM3

1 TRANSYS
2 eQUEST
3 ASHRAE
4 CCWorldWeatherGen

را بررسی کرده و ثابت نمودند که نیاز انرژی گرمایشی و سرمایشی، به ترتیب تا سال 2035، 19/8-15٪ کاهش و 21/23-11/26٪ افزایش خواهد یافت [29]. گلکار و همکاران (1401) با مطالعه تأثیر تغییرات اقلیمی بر بار سرمایشی و گرمایشی یک ساختمان در ۱۰۰۰ نقطه مختلف در سراسر ایران، ثابت کردند که بازه تغییر بار سرمایشی در نقاط مورد بررسی نسبت به بار گرمایشی بیشتر است [30].

اگرچه تاکنون مطالعات فراوانی در دنیا در ارتباط با مصرف انرژی بر اثر تغییرات اقلیمی انجام گرفته است، اما تعداد مطالعات صورت گرفته در اقلیم ایران بسیار محدود است. معدود تحقیقات انجام شده در این حوزه عموماً تغییرات اقلیمی در کوتاه مدت (20 سال) را مورد بررسی قرار داده‌اند. تاکنون پژوهشی که به تاثیر تغییرات اقلیمی و کارایی استراتژی‌های کاهش انرژی در شهر تبریز بپردازد، انجام نشده است. این مقاله با بررسی تغییرات اقلیمی شهر تبریز طی شش دهه آینده با کمی‌سازی و آنالیز مصرف انرژی راهکارهای مختلف در ساختمان اعم از عایق‌بندی، تعبیه سایبان، استفاده از متریاال‌های تغییر فاز دهنده و... تغییر عملکرد و میزان کارایی این تمهیدات تحت تاثیر تغییرات اقلیمی در یک بازه زمانی 60 ساله را مورد بررسی قرار می‌دهد و کارآمدترین روش‌ها به منظور تاب‌آوری ساختمان‌های شهر تبریز در برابر تغییرات اقلیمی را ارائه می‌نماید.

3- ابزارها و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش، شهرک ارم واقع در شمال غرب شهر تبریز است که از سمت شمال به دامنه‌های کوه عون‌بن‌علی و از سمت جنوب به یکی از محلات قدیمی و تاریخی به نام امیرخیز محدود است [31]. در مرحله اول پژوهش، با بررسی تیپ غالب ساختمان‌های شهرک ارم بر مبنای مساحت، جهت‌گیری، جزئیات اجرایی و مصالح به کاررفته در ساختمان، یک بنا به عنوان نمونه پایلوت انتخاب شد. این نمونه بر اساس وضعیت موجود بنا و بر مبنای داده‌های اقلیمی کنونی شبیه‌سازی شد و میزان مصرف انرژی، رفتار حرارتی و انتشار آلاینده‌ها در آن مورد بررسی قرار گرفت. پس از تولید داده‌های آب‌وهوایی آینده با استفاده از ابزارهای مناسب بر مبنای داده‌های فعلی، وضعیت مصرف انرژی و رفتار حرارتی این ساختمان طی سال‌های آتی (2080 و 2050) محاسبه شد. در مرحله بعدی، به منظور ارتقا عملکرد مدل مینا، راهکارهای کاهش مصرف انرژی و آلاینده‌های محیطی بر روی آن اعمال و بر مبنای داده‌های اقلیمی فعلی و آینده، شبیه‌سازی شد. بر این اساس تغییرات رفتار حرارتی، مصرف انرژی و میزان کارایی استراتژی‌های انرژی کارآمد در بنا تحت تاثیر تغییرات اقلیمی مشخص گردید.

1-3- اعتبارسنجی

در این پژوهش برای ارزیابی و اعتبارسنجی پیش بینی های انجام شده برای دوره آینده 2050 و 2080 از معیارهای ضریب تعیین R^2 ، مجذور میانگین مربعات خطا⁴ و میانگین انحراف مطلق⁵ استفاده خواهد شد. رابطه‌های مربوط به این آماره‌ها به صورت زیر می‌باشد [32]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{si} - E_{oi})^2}{n}} \times 100 \quad (1)$$

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |E_{oi} - E_{si}|}{n} \quad (2)$$

در چهار شهر مختلف شبیه‌سازی کردند. در این پژوهش داده‌های آب‌وهوایی آینده با استفاده از نرم‌افزار سی‌سی‌ورلد و درجین 1.9 تولید گردید. برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی و مصرف انرژی در این پژوهش از نرم‌افزار انرژی‌پلاس¹ استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که بار سرمایشی این ساختمان در سال 2080 به میزان 790-360٪ افزایش و بار حرارتی آن به میزان 59٪ کاهش خواهد یافت [19]. دینو و آنگول (2019)، با استفاده از نرم‌افزارهای ودرشیفت و انرژی‌پلاس به بررسی تغییرات اقلیمی بر روی یک ساختمان مسکونی مبتنی بر سه سناریو سرمایشی ساختمان در چهار شهر ترکیه پرداختند و ثابت کردند ساکنین ساختمان‌هایی با تهویه طبیعی، در معرض خطر بیشتری از گرمای بیش از اندازه قرار دارند [20]. آندرو و همکاران (2018)، میزان مصرف انرژی یک ساختمان مسکونی در شهر والنسیا را بر مبنای سناریوهای متفاوت پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در اواسط و اواخر قرن 21 بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که انرژی موردنیاز گرمایشی تحت تاثیر تغییرات اقلیمی در آینده کاهش و انرژی موردنیاز سرمایشی افزایش خواهد یافت [21]. رودریگوس و فرناندز با استفاده از نرم‌افزار سی‌سی‌ورلد و درجین داده‌های آب‌وهوایی آینده را تولید کرده و با بهره‌گیری از نرم‌افزار انرژی‌پلاس، آنالیزهای انرژی بر روی مدل‌های ساختمانی ایجاد شده با استفاده از نرم‌افزار اسپاس² در 16 شهر مدیترانه‌ای را انجام دادند. نتیجه پژوهش‌ها نشان داد که میزان انرژی مورد نیاز سرمایشی در آینده بسته به موقعیت ساختمان متفاوت خواهد بود [22]. محققان در سال 2020 با بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی در سال‌های 2050 و 2080 بر روی یک ساختمان صفر انرژی ثابت کردند که نصب تجهیزات تولید انرژی با ابعاد مناسب در ساختمان‌ها به منظور دستیابی به تعادل انرژی صفر در ساختمان حیاتی است [23]. پژوهش انجام شده توسط اتیا و گوپین (2020) برای یک ساختمان صفر انرژی در بلژیک نشان داد که تا اواخر قرن 21، میزان گرمای بیش از حد در ساختمان به حدود 43.5٪ خواهد رسید [24]. پژوهش انجام شده در سال 2021 بر روی ساختمان‌های مسکونی واقع در زون‌های اقلیمی متفاوت در کشور چین نشان داد که ساختمان‌های واقع در اقلیم گرم طی دهه‌های آتی به انرژی سرمایشی بیشتری نیاز خواهند داشت. اما ساختمان‌های واقع در مناطق سردسیر، با توجه به افزایش دمای هوا، میزان مصرف انرژی پایین‌تری خواهند داشت [25]. باگلیوو و همکاران در سال 2022 با مدل‌سازی حرارتی پویای چند ساختمان مسکونی واقع در ایتالیا با استفاده از نرم‌افزار ترمولوگ³ 11 و تولید داده‌های آب‌وهوایی سال‌های 2020، 2050 و 2080 با استفاده از نرم‌افزار سی‌سی‌ورلد و درجین ثابت کردند که با گذر زمان، ساختمان‌های واقع در این مناطق با گرمای بیش از حد مواجه خواهند شد که این مسئله منجر به افزایش چشمگیر استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده می‌گردد [26]. لارسن و همکاران (2019)، در تحقیق خود بر روی ساختمان‌های کشور آرژانتین ثابت کردند که طی سال‌های آینده نیاز به انرژی سرمایشی به شدت افزایش و نیاز به انرژی گرمایشی به طور قابل‌ملاحظه کاهش می‌یابد [27]. بر اساس پژوهش انجام شده توسط ژای و هلمان (2019)، مجموع انرژی مصرفی در سال‌های آینده به دلیل افزایش قابل توجه انرژی سرمایشی، افزایش می‌یابد [28]. عباسی‌زاده و همکاران تاثیر جهت‌گیری ساختمان، نوع مواد تغییر فاز دهنده، مساحت پنجره‌ها، زاویه سایبان و استفاده از پشت‌بام سبز در چهار اقلیم مختلف در ایران در بازه زمانی 2015-2035

4. Root Mean Square Error (RMSE)

5. Mean Absolute Deviation (MAD)

1 EnergyPlus

2 EPSAP

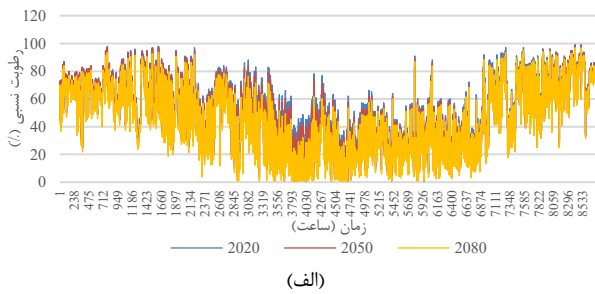
3 Termolog EpiX 11

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (E_{si} - E)(E_{oi} - E_{oi}))}{(\sum_{i=1}^n (E_{si} - E)^2 (E_{oi} - E_{oi})^2)} \quad (3)$$

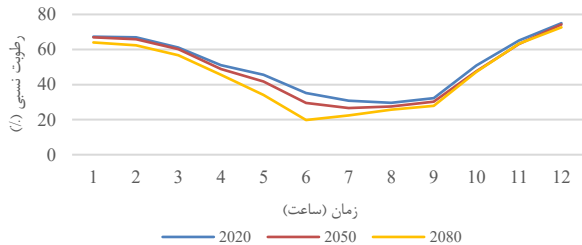
که در آن‌ها: مقادیر E_{si} و E_{oi} مربوط به دما، رطوبت و باد برآوردی توسط نرم‌افزار سی‌سی‌ورلد و درجین می‌باشد.

3-1- تولید داده‌های آب‌وهوایی آینده

تاکنون ابزارها و روش‌های متعددی برای تولید داده‌های اقلیمی آینده به صورت ساعتی و سالانه توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته‌است. نرم‌افزار سی‌سی‌ورلد و درجین که توسط دانشگاه ساوت همپتون توسعه یافته است، امکان محاسبه داده‌های آب‌وهوایی در بازه زمانی گسترده مبتنی بر داده‌های ورودی ارائه شده توسط انرژی‌پلاس و با استفاده از روش مورفینگ را فراهم می‌آورد [33-34]. این نرم‌افزار می‌تواند فایل‌های آب‌وهوایی آینده (این داده‌ها شامل اطلاعات ساعتی از قبیل دما، رطوبت، بارش، سرعت و جهت باد، تابش خورشیدی و... هستند) برای هر موقعیت تعریف‌شده در جهان در سه بازه زمانی 2020 (2011-2040)، 2050 (2041-2070) و 2080 (2100-2071) را تولید نماید [35-36]. در این نرم‌افزار با استفاده از داده‌های آماری موجود، یک مدل آماری از آب‌وهوا در منطقه مورد نظر ایجاد می‌شود، داده‌های آب و هوایی مصنوعی تولید می‌شوند. در این پژوهش، داده‌های آب‌وهوایی شهر تبریز مبتنی بر فایل ساعتی آب و هوایی موجود¹ و با استفاده از نرم‌افزار سی‌سی‌ورلد و درجین برای دهه‌های 2050 و 2080 تولید شد (شکل 3-1).

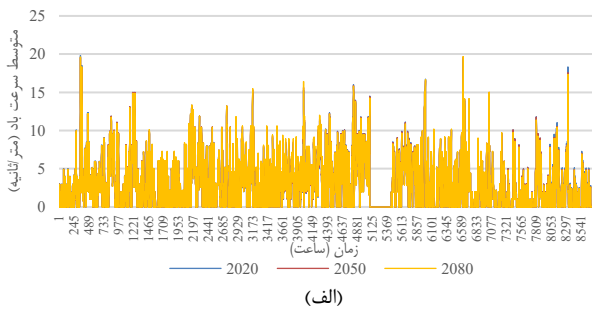


(الف)

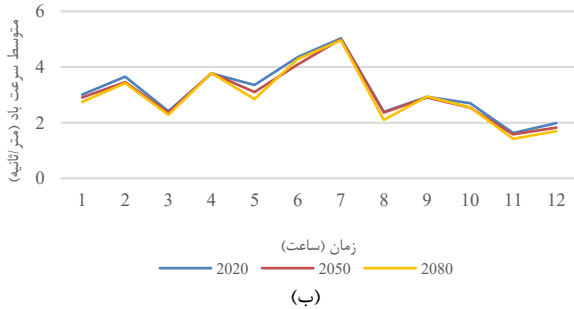


(ب)

شکل 2 الف: نمودار ساعتی رطوبت نسبی هوا برای دهه 2020 بر اساس داده‌های پایگاه آب‌وهواشناسی فرودگاه تبریز و دهه‌های 2050 و 2080 حاصل از نرم‌افزار سی‌سی‌ورلد و درجین 2080. ب: مقایسه میانگین رطوبت نسبی ماهانه هوا برای دهه 2020 بر اساس داده‌های پایگاه آب‌وهواشناسی فرودگاه تبریز و دهه‌های 2050 و 2080 حاصل از نرم‌افزار سی‌سی‌ورلد و درجین



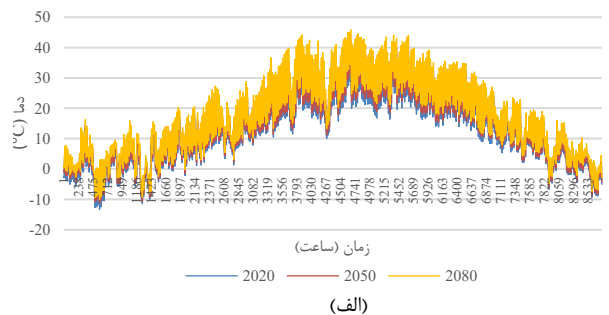
(الف)



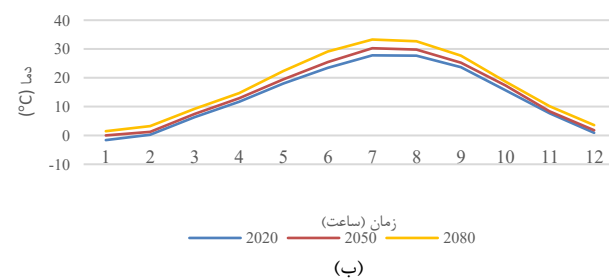
(ب)

شکل 3 الف: نمودار ساعتی متوسط سرعت باد برای دهه 2020 بر اساس داده‌های پایگاه آب‌وهواشناسی فرودگاه تبریز و دهه‌های 2050 و 2080 حاصل از نرم‌افزار سی‌سی‌ورلد و درجین، ب: مقایسه میانگین سرعت باد ماهانه برای دهه 2020 بر اساس داده‌های پایگاه آب‌وهواشناسی فرودگاه تبریز و دهه‌های 2050 و 2080 حاصل از نرم‌افزار سی‌سی‌ورلد و درجین.

داده‌های آب‌وهوایی به دست‌آمده برای سال‌های 2050 و 2080، نشان می‌دهد که متوسط دمای سالانه در سال 2050 و 2080 نسبت به سال 2020 به ترتیب به میزان 10/91٪ و 27/61٪ افزایش یافته‌است. به دلیل افزایش دما طی گذر زمان، رطوبت نسبی هوا در سال‌های 2050 و 2080



(الف)



(ب)

شکل 4 الف: نمودار میانگین دمای ساعتی برای دهه 2020 بر اساس داده‌های پایگاه آب‌وهواشناسی فرودگاه تبریز و دهه‌های 2050 و 2080 حاصل از نرم‌افزار سی‌سی‌ورلد و درجین ب: مقایسه میانگین ماهانه دما برای دهه 2020 بر اساس داده‌های پایگاه آب‌وهواشناسی فرودگاه تبریز و دهه‌های 2050 و 2080 حاصل از نرم‌افزار سی‌سی‌ورلد و درجین

که توسط بخش انرژی آمریکا در سال 2011 توسعه یافته و به عنوان یکی از معتبرترین نرم‌افزارهای مدل‌سازی انرژی شناخته شده است. اعتبار نرم‌افزار انرژی پلاس که موتور شبیه‌سازی دیزاین‌بیلدر است، بر اساس استانداردهای بست تست¹ و اشری¹⁴ تایید شده است [38]. مدل مورد مطالعه در این پژوهش بر اساس مطالعات و برداشتهای میدانی از ساختمان‌های مسکونی شهرک ارم تبریز انجام شد. در این راستا، پلان‌های 40 واحد مسکونی جمع-آوری گردید و تمامی مشخصات آن‌ها اعم از مترژ، سرانه، مصالح به کاررفته و جزئیات اجرایی گردآوری شد. بر اساس فراوانی داده‌های حاصل، یک واحد مسکونی دو خوابه با مساحت 133 مترمربع در طبقه سوم یک آپارتمان پنج-مرتبه به عنوان نمونه پایلوت انتخاب گردید. این مدل در مجموع از 9 زون حرارتی تشکیل یافته است. این واحد مسکونی شامل 5 سکنه می‌باشد که پوشش متداول تابستانی با ضریب 0/5clo و پوشش زمستانی با ضریب 1clo برای آن‌ها در نظر گرفته شده است (شکل 4). سایر تنظیمات اولیه تعریف شده برای این مدل در نرم‌افزار در جدول 4 ارائه شده است. با توجه به شرایط اقلیمی حاکم در شهر تبریز و خشکی هوا، اختلاف قابل‌ملاحظه دما در فصول تابستان و زمستان و عدم آسایش حرارتی در بخش عمده‌ای از سال، از مهم‌ترین مشکلات این منطقه به شمار می‌آید که نتیجه آن افزایش قابل‌ملاحظه میزان مصرف انرژی سالانه در بخش ساختمان و به‌ویژه ساختمان‌های مسکونی می‌باشد. این پژوهش در گام نخست با هدف کاهش مصرف انرژی، تعدیل شرایط حرارتی داخلی و افزایش آسایش حرارتی در ساختمان در شرایط آب‌وهوایی کنونی، استراتژی‌هایی از قبیل استفاده از عایق حرارتی، شیشه‌های دوجداره، سایبان و استفاده از مصالح تغییر فاز دهنده را بر روی مدل واقعی اعمال و میزان تغییرات حرارتی و مصرف انرژی آن را مورد بررسی قرار می‌دهد. در گام بعدی تمامی مدل‌های مذکور با داده‌های آب‌وهوایی حاصل از مرحله پیش برای سال‌های 2050 و 2080 شبیه‌سازی و نتایج آن با شبیه‌سازی‌های سال 2020 مقایسه می‌شود. مشخصات تعریف شده برای ساختمان با وضعیت موجود (TY)، همراه با سایبان (WS)، همراه با عایق حرارتی در دیوار خارجی (WI)، همراه با مصالح تغییر فازدهنده (WPCM) و ترکیبی از این حالت‌ها (COM) در جداول 1 و 2 ارائه شده است. اگرچه طول دوره گرما در مقایسه با دوره سرما در این شهر کمتر می‌باشد، اما گرمای بسیار شدید و تابش مستقیم آفتاب در طول فصول گرم سال، بار سرمایشی قابل‌ملاحظه‌ای را به ساختمان‌ها تحمیل می‌کند. از سویی دیگر با در نظر گرفتن تغییرات دمایی در سال‌های آتی، مسلماً طول دوره گرما و نیاز به انرژی سرمایشی (حتی در اقلیم‌های سرد) نیز افزایش خواهد یافت. از این‌رو با در نظر گرفتن آسایش اقلیمی کاربران در طول سال و افزایش دمای زمین و گرمایش جهانی، در این پژوهش راهکارهای سرمایشی از جمله تعبیه سایبان در نظر گرفته شده‌اند.

نسبت به سال 2020، به ترتیب به میزان 4/63٪ و 11/39٪ کاهش خواهد یافت. این در حالیست که بر اساس داده‌های اقلیمی پیش‌بینی شده، سرعت باد در آینده تغییر قابل‌ملاحظه‌ای نخواهد داشت.

3-2- اعتبارسنجی مقادیر برآوردی

در این بخش، با استفاده از روش‌های آماری ضریب تعیین R^2 ، مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف مطلق و براساس داده‌های پایگاه آب‌وهواشناسی فرودگاه تبریز، مقادیر اقلیمی برآورد شده برای دوره آینده 2050 و 2080 از نظر اعتبار پیش‌بینی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن در جداول 1 و 2 ارائه گردید.

براساس جدول 1 که در آن مقادیر خطا و ضریب تعیین بر پایه داده‌های پایگاه آب‌وهواشناسی فرودگاه تبریز و داده‌های پیش‌بینی تا سال 2050 مورد بررسی قرار گرفته است. کمترین میزان خطا براساس مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف مطلق به ترتیب برای پارامتر باد با مقدار 0/139 و 0/108 متر بر ثانیه و بیشترین میزان خطا به ترتیب برای پارامتر رطوبت نسبی با مقدار 2/797 و 2/356 برحسب درصد می‌باشد. همچنین بیشترین میزان ضریب تعیین R^2 ، به پارامتر دما با مقدار 0/941 اختصاص دارد.

جدول 1. مقایسه مقادیر خطا و ضریب تعیین بر پایه داده‌های پایگاه آب‌وهواشناسی فرودگاه تبریز و داده‌های پیش‌بینی تا سال 2050

باد	رطوبت	دما	
0/139	2/797	1/563	RMSE
0/108	2/356	1/470	MAD
0/890	0/925	0/941	r^2

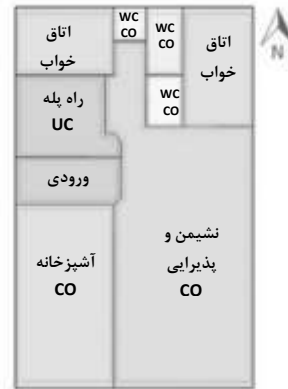
همچنین براساس جدول 2 که در آن مقادیر خطا و ضریب تعیین بر پایه داده‌های پایگاه آب‌وهواشناسی فرودگاه تبریز و داده‌های پیش‌بینی تا سال 2080 مورد بررسی قرار گرفته است. کمترین میزان خطا براساس مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف مطلق به ترتیب برای پارامتر باد با مقدار 0/229 و 0/184 متر بر ثانیه و بیشترین میزان خطا به ترتیب برای پارامتر رطوبت نسبی با مقدار 3/964 و 3/793 برحسب درصد می‌باشد. همچنین بیشترین میزان ضریب تعیین R^2 ، به پارامتر دما با مقدار 0/937 اختصاص دارد. لذا براساس مقادیر استخراجی از جداول 1 و 2 پیش‌بینی‌های انجام شده برای برای پارامترهای مورد بررسی برای دوره آینده از نتایج قابل قبولی برخوردار بوده و نتایج این بخش از پژوهش با پژوهش‌های جنس و همکاران، 2008 و منصوری و همکاران، 1397 تطابق بالایی دارد [37 و 33].

جدول 2. مقایسه مقادیر خطا و ضریب تعیین بر پایه داده‌های پایگاه آب‌وهواشناسی فرودگاه تبریز و داده‌های پیش‌بینی تا سال 2080

باد	رطوبت	دما	
0/229	3/964	2/879	RMSE
0/184	3/793	2/723	MAD
0/882	0/906	0/937	r^2

3-3- مدل‌های شبیه‌سازی شده

شبیه‌سازی انرژی در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر 7.0.0.096 انجام شده است که موتور آن انرژی پلاس می‌باشد. نرم‌افزار انرژی پلاس بوده



شکل 4 پلان مدل ساختمان شبیه‌سازی شده متشکل از 9 زون حرارتی؛ CO زون- های کنترل‌شده و UC زون‌های کنترل‌نشده می‌باشند

مدل‌های گروه TY، مدل ساختمانی مبنا بر وضعیت موجود می‌باشد که دیوارهای آن فاقد عایق‌بندی حرارتی بوده و شیشه‌های آن نیز تک‌جداره با ضخامت 3 میلیمتر می‌باشد. مدل‌های گروه دوم WS، ساختمان‌هایی با شرایط مشابه گروه مبنا (TY) می‌باشد با این تفاوت که در پنجره‌های جنوبی آن‌ها سایبان‌هایی با پیشامدگی 0/4 متر می‌باشد و دارای پوشش شبانه در پنجره‌های ضلع شمالی می‌باشند. مدل‌های گروه WI، ساختمان‌هایی متشکل از جداره‌های خارجی عایق‌بندی‌شده (پلی‌استایرن) همراه با پنجره‌های دوجداره می‌باشند که متشکل از دو لایه شیشه 3 میلیمتر با یک لایه هوای میانی 13 میلیمتر می‌باشد. دسته چهارم مدل‌ها، علاوه بر عایق حرارتی از یک لایه 7 سانتیمتری از مصالح تغییر فاز دهنده (PCM) نیز استفاده شده‌است (جدول 5). مواد تغییر فاز دهنده، موادی هستند که انرژی حرارتی محیط مازاد اطراف خود را در زمان عدم نیاز، بر پایه گرمای نهان ذوب و انجماد در خود ذخیره می‌کنند و در زمان نیاز، دوباره به محیط باز می‌گردانند [39]. جزئیات اجزای مختلف ساختمانی در مدل شبیه‌سازی‌شده در جدول 3 ارائه شده‌است.

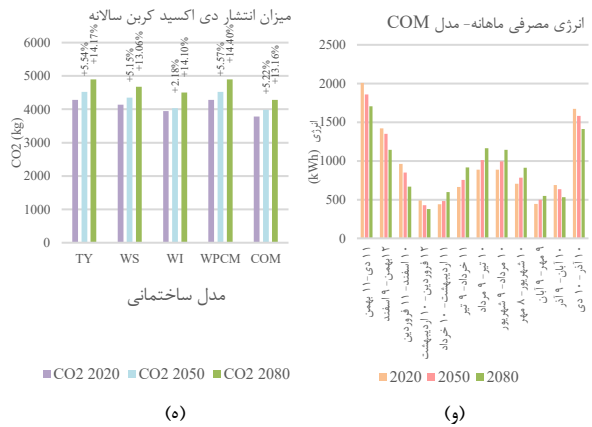
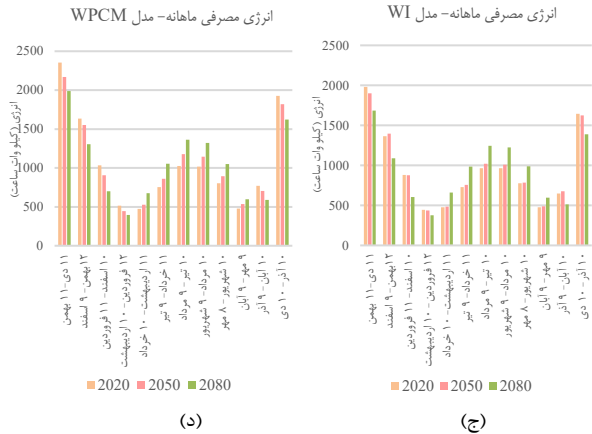
جدول 3 جزئیات اجزای مختلف ساختمانی در مدل شبیه‌سازی شده

عنصر	لایه‌ها (از خارج به داخل)	ضخامت (mm)	چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	گرمای ویژه ($\frac{J}{kg \cdot K}$)	ضریب هدایت حرارتی λ ($\frac{W}{m \cdot K}$)	ضخامت کل (mm)	ضریب انتقال حرارت U ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)
کف (سقف) DET1	سرامیک	20	1700	850	0/8	420	1/39
	ملات ماسه سیمان	20	1860	840	0/72		
	بتن پوکه	50	500	840	0/17		
	دال بتنی	300	2300	1000	2/3		
	گچ و خاک	30	1200	840	0/42		
دیوار داخلی DET2	ملات گچ و خاک (آستر و رویه)	30	1200	840	0/42	160	1/84
	آجر	100	1920	840	0/72		
	ملات گچ و خاک (آستر و رویه)	30	1200	840	0/42		
دیوار خارجی بدون عایق DET3	نمای آجری	30	1700	800	0/84	300	1/67
	ملات ماسه سیمان	30	1800	1000	1		
	دیوار آجری	210	1920	840	0/72		
	گچ و خاک (آستر و رویه)	30	1200	840	0/42		
دیوار خارجی همراه عایق DET4	نمای آجری	30	1700	800	0/84	240	0/37
	ملات ماسه سیمان	30	1800	1000	1		
	پلی‌استایرن منبسط‌شده	50	35	1400	0/03		
	بلوک بتنی AAC	100	2800	896	0/11		
	گچ و خاک (آستر و رویه)	30	1200	840	0/42		
دیوار خارجی همراه عایق و DET5 /PCM	نمای آجری	30	1700	800	0.84	310	0.32
	ملات ماسه سیمان	30	1800	1000	1		
	پلی‌استایرن منبسط‌شده	50	35	1400	0.03		
	بلوک بتنی AAC	100	2800	896	0.11		
	BIO PCM	70	235	1970	0.2		
	گچ و خاک (آستر و رویه)	30	1200	840	0/42		
شیشه تک‌جداره DET6	شیشه	3	-	-	-	3	5/8
شیشه دوجداره DET7	شیشه	3	-	-	0/9	19	2/7
	هوا	13	-	-	-		
	شیشه	3	-	-	0/9		

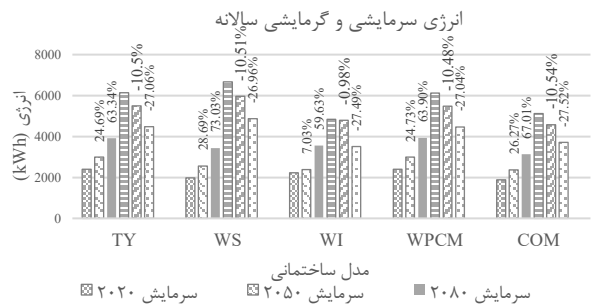
جدول 5 جزئیات مدل‌های ساختمانی با راهکارهای کاهش مصرف انرژی متفاوت

جدول 4 تنظیمات شبیه‌سازی مدل در محیط نرم‌افزار

مقادیر	تنظیمات
0.72 (l/m ² – day)	آب گرم مصرفی
21 °C	نقطه تنظیم گرمایش
25 °C	نقطه تنظیم سرمایش
12 °C	کاهش موقت گرمایش
28 °C	کاهش موقت سرمایش
10%	نقطه تنظیم رطوبت‌زنی
90%	نقطه تنظیم رطوبت‌زنی
10 (l/s – person)	حجم هوای تازه
150Lux	روشنایی مطلوب
فن کویل چهارلوله+ چیلر هوای سرد	HVAC



شکل 5 الف-: انرژی مصرفی ماهانه و: میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن سالانه



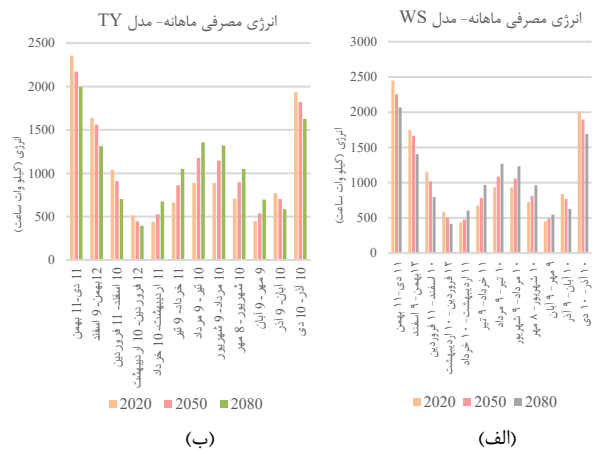
شکل 6 انرژی سرمایشی و گرمایشی سالانه در سال‌های 2020، 2050 و 2080

بررسی نتایج گام اول پژوهش نشان داد که انرژی مصرفی ماهانه در تمامی مدل‌ها تحت تاثیر تغییرات اقلیمی طی ماه‌های سرد سال روندی کاهشی و در ماه‌های گرم روندی صعودی دارد (شکل 5). بررسی انرژی مصرفی سرمایشی و گرمایشی نشان داد که در گروه‌های مختلف، انرژی سرمایشی سال 2050 نسبت به سال 2020 به میزان 7/3 تا 28/69٪ افزایش خواهد یافت. این در حالیست که میزان افزایش انرژی سرمایشی در سال 2080 نسبت به سال 2020 در بازه 73/03-63/34٪ نوسان خواهد کرد. مقایسه انرژی گرمایشی مصرفی در سال‌های 2020، 2050 و 2080 در گروه‌های مختلف حاکی از آنست که تمامی مدل‌ها در سال 2020 بیشترین میزان مصرف انرژی گرمایشی را دارند. میزان تغییرات انرژی گرمایشی در سال 2050 و 2080 نسبت به سال 2020 به ترتیب تغییراتی در بازه‌های 0/098٪- الی 10/54٪- و 27/52٪- الی 26/96٪- را تجربه خواهند نمود. میزان تغییرات انرژی سرمایشی در گروه مدل‌های WI دارای کمترین نوسان (66/66٪) نسبت به

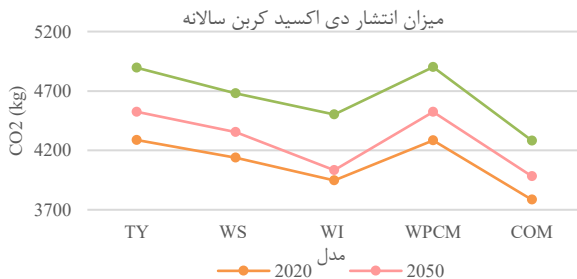
راهکار	نام مدل	جزئیات سقف و کف	جزئیات دیوار داخلی	جزئیات دیوار خارجی	پنجره	سایبان
-	TY2020/ TY2050/ TY2080	DET1	DET2	DET3	DET6	-
سایبان	WS2020/ WS2050/ WS2080	DET1	DET2	DET4	DET7	+
عایق- بندی+شیشه دوجداره	WI2020/ WI2050/ WI2080	DET1	DET2	DET4	DET7	-
مصالح تغییر فازدهنده	WPCM2020/ WPCM2050/ WPCM2080	DET1	DET2	DET5	DET7	-
ترکیبی	COM2020/ COM2050/ COM2080	DET1	DET2	DET5	DET7	+

4- یافته‌ها

به منظور بررسی رفتار ساختمان تحت تاثیر تغییرات اقلیمی، ساختمان پابلوت با داده‌های اقلیمی 2020، 2050 و 2080 شبیه‌سازی و میزان مصرف انرژی و تاثیرات آن بر روی محیط در سال‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. سپس استراتژی‌های کاهش مصرف انرژی (استفاده از عایق حرارتی، سایبان، شیشه-های دوجداره و مصالح تغییرفازدهنده) بر روی مدل پایه اعمال گردید و با انجام شبیه‌سازی‌های لازم، میزان کارایی این راهکارها تحت تاثیر تغییرات اقلیمی مشخص شد. بررسی نتایج به دست آمده در دو مرحله مورد تحلیل قرار گرفت. در گام نخست، میزان مصرف انرژی و تولید گاز دی‌اکسید کربن هر مدل به صورت مجزا در سال‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شد. نتیجه این مقایسه بیانگر تاثیر تغییرات اقلیمی بر روی هر مدل می‌باشد.

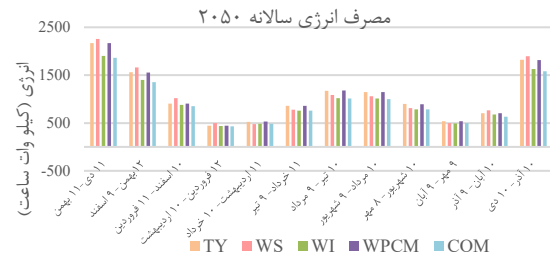


بررسی نتایج نشان داد که در مدل پایه با گذشت زمان، میزان مصرف انرژی در حدود 3/77٪ افزایش می‌یابد. کاربست استراتژی‌های کاهش مصرف انرژی باعث بهبود عملکرد ساختمان تحت تاثیر تغییرات اقلیمی می‌شود؛ به طوریکه میزان مصرف انرژی در سال 2050 نسبت به 2020 و در سال 2080 نسبت به 2050 کاهش می‌یابد. از منظر میزان کارایی مدل‌ها در سال 2020، مدل ترکیبی COM و مدل با عایق‌بندی حرارتی WI به ترتیب با کاهش میزان مصرف انرژی به مقدار 8/24٪ و 6/09٪ در مقایسه با مدل مبنا بهترین کارایی را دارند. این در حالیست که در این بازه زمانی، استفاده از سایبان و مصالح تغییرفاز دهنده باعث افزایش میزان مصرف انرژی در ساختمان نسبت به مدل مبنا شده‌است. نتایج به‌دست‌آمده برای سال 2050، نشان داد که طی سه دهه آتی، استفاده از راهکارهای ترکیبی (عایق‌بندی، سایبان، مصالح تغییر فزادنده و شیشه‌های دوجداره) می‌تواند میزان مصرف انرژی ساختمان را به اندازه 11/95٪ کاهش دهد. همچنین تعبیه عایق حرارتی و استفاده همزمان از شیشه‌های دوجداره در این بازه زمانی میزان مصرف انرژی سالانه ساختمان را به اندازه 10/14٪ کاهش می‌دهد. شبیه‌سازی انرژی ساختمان در سال 2050 نشان داد که استفاده از مصالح تغییرفازدهنده در ساختمان نقش بسیار کم‌رنگی در کاهش مصرف انرژی دارد و تغییرات حاصل‌شده در مصرف سالانه انرژی نسبت به سال 2020 به میزان 0/11٪ می‌باشد. بررسی‌ها نشان داد که استفاده از سایبان نه تنها نقشی در کاهش مصرف انرژی مجموع ندارد، بلکه باعث افزایش مصرف انرژی سالانه به میزان 0/37٪ نسبت به سال 2020 شده‌است. نتایج عددی حاصل برای سال 2080 حاکی از آنست که استفاده از استراتژی‌های ترکیبی می‌تواند مجموع انرژی مصرفی سالانه را به اندازه 83/12٪ در مقایسه با مدل مبنا در همان سال کاهش دهد. مدل WI به عنوان دومین گزینه کارآمد در این سال، مجموع انرژی مصرفی نسبت به مدل مبنا را به میزان 07/11٪ کاهش می‌دهد. استفاده از سایبان در این سال نسبت به دو بازه زمانی مورد مقایسه در این پژوهش، از عملکرد بهتری برخوردار است؛ به طوریکه به‌کارگیری سایبان مقدار انرژی مصرفی سالانه در سال 2080 نسبت به مدل مبنا در این سال را به اندازه 1/40٪ کاهش خواهد داد. استفاده از مصالح تغییر فاز دهنده در این سال تاثیر بسیار جزئی در کاهش مصرف انرژی دارد. مجموع این نتایج حاکی از آنست که اولاً در مدل ساختمانی با شرایط فعلی آن، گذر زمان و تغییرات اقلیمی باعث تضعیف عملکرد ساختمان و افزایش مصرف انرژی سالانه آن به میزان 4٪ می‌شود. ثانیاً از مقایسه عملکرد مدل‌های با راهکارهای انرژی مختلف چنین برمی‌آید که دو مدل با راهکار ترکیبی COM، و با عایق حرارتی WI باعث بهبود عملکرد ساختمان در سال‌های 2020، 2050 و 2080 می‌شوند. در این مدل‌ها با گذشت زمان شاهد کاهش مصرف مجموع انرژی سالانه در مدل‌ها هستیم (شکل 7).

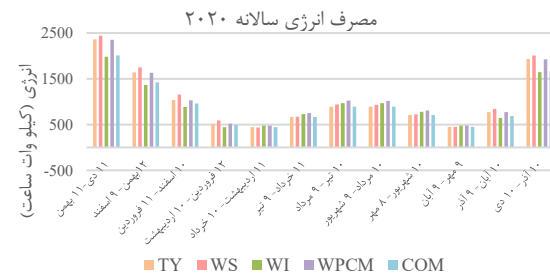


شکل 8 میزان گاز دی‌اکسید کربن منتشرشده در سال‌های 2020، 2050 و 2080 در 5 گروه از مدل‌های مورد مطالعه

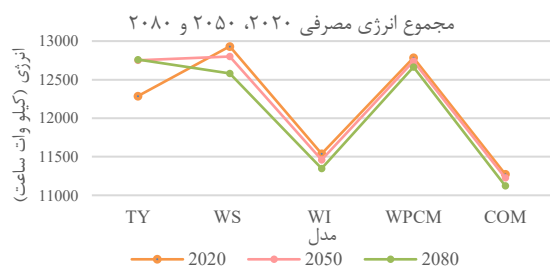
سایر گروه‌ها می‌باشد. این در حالیست که گروه مدل‌های WS بیشترین تغییرات انرژی سرمایشی به میزان 101/72٪ طی 6 دهه آتی را تجربه خواهند کرد. مدل‌های WI با نوسان انرژی گرمایشی به میزان 28/47٪ و گروه COM با 38/06٪ به ترتیب دارای کمترین و بیشترین تغییرات انرژی مصرفی گرمایشی طی شش دهه آتی در مقایسه با سایر گروه‌ها می‌باشند (شکل 6). میزان گاز دی‌اکسید کربن منتشر شده توسط ساختمان در سال 2050 نسبت به سال 2020 در گروه‌های ساختمانی متفاوت در بازه 2/18٪ تا 5/57٪ افزایش می‌یابد. میزان این تغییرات در سال 2080 در مقایسه با سال 2020 به مقدار 13/06٪ تا 14/40٪ خواهد بود (شکل 5).



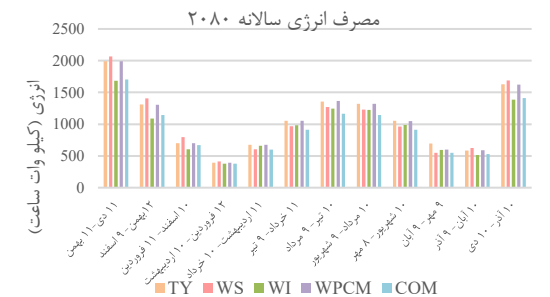
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

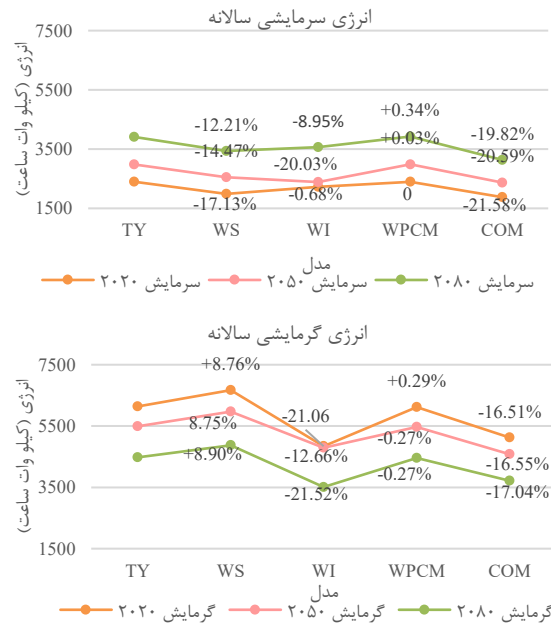
شکل 7 الف-د: مقایسه انرژی مصرفی ماهانه در مدل‌های پنج گروه ساختمانی در سال‌های 2020، 2050 و 2080، و مجموع انرژی مصرفی سالانه در پنج گروه از مدل‌های مورد مطالعه در سال‌های 2020، 2050 و 2080

2020، 2050 و 2080 را به میزان 16/51٪، 16/55٪ و 17/04٪ کاهش می‌دهد. استفاده از سایبان در جبهه جنوبی ساختمان به دلیل کاهش انرژی تابشی دریافتی بنا منجر به افزایش بار گرمایشی ساختمان در حدود 8٪ شده‌است. با این حال استفاده از مصالح تغییرفاز دهنده تغییری در میزان انرژی گرمایشی و سرمایشی ساختمان ایجاد نمی‌کند (شکل 9).

5- بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با تمرکز بر ساختمان‌های مسکونی شهرک ارم تبریز، به پیش‌بینی شرایط اقلیمی 60 سال آینده در شهر تبریز پرداخت و میزان مصرف انرژی یک ساختمان مسکونی را مورد مطالعه قرار داد. علاوه بر وضعیت موجود بنا، با اعمال راهکارهای مختلف، میزان کارایی این تمهیدات در مواجهه با شرایط اقلیمی فعلی و آتی شهر تبریز ارزیابی گردید. نتایج نشان داد تغییرات اقلیمی و گرمایش زمین در دهه‌های آینده، مجموع انرژی مصرفی ماهانه در تمامی مدل‌ها در ماه‌های گرم سال را افزایش و ماه‌های سرد سال را کاهش خواهد داد. میزان نوسانات انرژی سرمایشی در بازه زمانی مشخص شده در مدل‌های گروه WI دارای کمترین و در مدل‌های گروه WS دارای بیشترین مقدار می‌باشد. به همین ترتیب میزان تغییرات انرژی گرمایشی طی شش دهه آتی در مدل‌های گروه WI و COM دارای کمترین و بیشترین مقدار می‌باشد. تغییرات میزان گاز کربنیک منتشر شده در تمامی مدل‌ها روندی افزایشی دارد. مدل‌های گروه WPCM دارای بیشترین تغییرات از نظر میزان گاز دی‌اکسیدکربن منتشرشده طی شش دهه آتی می‌باشند. همچنین انرژی مصرفی سالانه در مدل پایه با گذشت 6 دهه به مقدار 3.77٪ افزایش می‌یابد. در سال‌های 2020 و 2050 استفاده از سایبان در پنجره‌های جنوبی و پوشش عایق شبانه در پنجره‌های شمالی و همینطور استفاده از مصالح تغییر فازدهنده به عنوان راهکارهایی ناکارآمد محسوب می‌شوند؛ چراکه مجموع انرژی مصرفی سالانه نسبت به مدل مبنا را افزایش داده‌اند. این دو راهکار با کاهش بسیار جزئی در مجموع انرژی مصرفی سالانه، راهکار مناسبی برای سال 2080 نیز محسوب نمی‌شوند. نتایج نشان داد در سال‌های 2020، 2050 و 2080 مدل‌های ترکیبی COM و مدل‌های دارای عایق‌بندی (WI)، با کمترین انرژی مصرفی سالانه بهترین گزینه‌ها به شمار می‌آیند. مجموع انرژی مصرفی سالانه در مدل‌های COM نسبت به مدل مبنا در سال‌های 2020، 2050 و 2080 به ترتیب به میزان 8/24٪، 11/95٪ و 12/83٪ کاهش می‌یابد. همچنین مجموع انرژی مصرفی در مدل‌های WI نسبت به مدل مبنا در سال‌های 2020، 2050 و 2080 به ترتیب 6/09٪، 10/01٪ و 11/07٪ کاهش می‌یابد. مقایسه عملکرد راهکارهای مختلف نشان داد که مدل‌های ترکیبی COM و عایق‌بندی - شده WI بهترین گزینه به منظور کاهش مصرفی انرژی طی دهه‌های آتی برای شهر تبریز می‌باشند. در تمامی مدل‌ها، اثرات منفی زیست‌محیطی و میزان گازکربنیک منتشر شده با گذشت زمان افزایش می‌یابد. مقایسه میزان گازکربنیک منتشر شده در سال‌های 2020، 2050 و 2080 نشان داد که دو گروه COM و WI دارای کمترین انتشار و کمترین تاثیرات مخرب زیست-محیطی هستند. مدل‌های گروه WS اولویت سوم از این منظر به شمار می‌آیند. در تمامی مدل‌ها با گذر زمان و تحت تاثیرات تغییرات اقلیمی، میزان بار سرمایشی ساختمان افزایش و میزان بار گرمایشی آن کاهش می‌یابد. در سال‌های 2020، 2050 و 2080 مدل‌های COM دارای کمترین بار سرمایشی و مدل‌های گروه WI دارای کمترین بار گرمایشی هستند. نتایج این پژوهش با

مجموع گاز دی‌اکسیدکربن منتشر شده طی سال‌های 2020، 2050 و 2080 در 5 دسته از مدل‌ها در قالب نمودار 7 مقایسه گردید. میزان گاز دی-اکسیدکربن منتشر شده در تمامی مدل‌ها با گذر زمان سیری صعودی دارد. از منظر انتشار گاز CO₂ در سال‌های 2020، 2050 و 2080 به ترتیب مدل‌های WI، COM و WS دارای بهترین عملکرد نسبت به مدل پایه هستند. این در حالیست که استفاده از مصالح تغییرفاز دهنده در ساختمان در تمامی بازه‌های زمانی مورد مطالعه تاثیر چندانی بر میزان گاز کربنیک ندارد. از این رو می‌توان ادعان نمود که در شرایط کنونی و سال‌های آتی، استفاده از عایق‌بندی، شیشه-های دوجداره و استراتژی‌های ترکیبی می‌تواند منجر به تقلیل تاثیرات منفی ساختمان بر طبیعت از طریق کاهش گاز کربنیک منتشرشده گردد (شکل 8).



شکل 9 مقایسه انرژی الف: سرمایشی و ب: گرمایشی سالانه در سال‌های 2020، 2050 و 2080 در 5 گروه از مدل‌های مورد مطالعه

نتایج نشان داد که در تمامی سال‌ها مدل‌های ترکیبی دارای کمترین بار سرمایشی هستند. استفاده از این راهکار در سال‌های 2020، 2050 و 2080 به ترتیب منجر به کاهش بار سرمایشی ساختمان به اندازه 21/58٪، 20/59٪ و 19/82٪ می‌گردد. در سال‌های 2020، 2050 و 2080 مدل‌های WS، WI و WS به ترتیب دومین اولویت از نظر میزان بار سرمایشی به شمار می‌آیند. این راهکارها به ترتیب بار سرمایشی ساختمان را به مقدار 17/13٪، 20/03٪ و 12/21٪ کاهش می‌دهند. مقایسه نمودارها نشان‌دهنده اینست که استفاده از متراپ‌های تغییر فازدهنده راهکار مناسبی برای کاهش بار سرمایشی ساختمان نمی‌باشد (شکل 9). برخلاف بار سرمایشی و با افزایش دمای تدریجی کره زمین، میزان انرژی مورد نیاز برای گرمایش طی 6 دهه آتی به تدریج کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج در نمودار 8 نشان می‌دهد که در سال‌های 2020، 2050 و 2080 به ترتیب مدل‌های WI و COM دارای کمترین انرژی مورد نیاز گرمایشی در مقایسه با مدل مبنا هستند. مدل‌های دارای عایق‌بندی، انرژی گرمایشی ساختمان طی سال‌های 2020، 2050 و 2080 را به ترتیب به میزان 21/06٪، 12/66٪ و 21/52٪ کاهش می‌دهند. به همین ترتیب استفاده از راهکارهای ترکیبی به ترتیب بار گرمایشی ساختمان طی سال‌های

- [9] C. Wang, Z.-H. Wang, K. E. Kaloush, and J. Shacat, "Cool pavements for urban heat island mitigation: A synthetic review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 146, p. 111171, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111171>.
- [10] R. Bardhan, R. Debnath, J. Gama, and U. Vijay, "REST framework: A modelling approach towards cooling energy stress mitigation plans for future cities in warming Global South," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 61, p. 102315, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102315>.
- [11] P. Saadatjoo, M. Mahdavejad, G. Zhang, and K. Vali, "Influence of permeability ratio on wind-driven ventilation and cooling load of mid-rise buildings," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 70, p. 102894, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102894>.
- [12] Elham Saligheh and P. Saadatjoo, "Impact of Building Porosity on Self-Shading and Absorbed Solar Heat Reduction in Hot and Humid Regions," *Naqshejahan-Basic Stud. New Technol. Archit. Plan.*, vol. 9, no. 4, pp. 203–217, 2020.
- [13] M. P. Tootkaboni, I. Ballarini, and V. Corrado, "Analysing the future energy performance of residential buildings in the most populated Italian climatic zone: A study of climate change impacts," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 8548–8560, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.012>.
- [14] P. Saadatjoo, "Investigating the Effect of Building Facade Recess on Urban Wind Flow Performance," *Arman. Archit. Urban Dev.*, vol. 14, no. 37, pp. 43–60, 2022.
- [15] P. Saadatjoo, M. Mahdavejad, and A. Zarkesh, "Porosity Rendering in High-Performance Architecture: Wind-Driven Natural Ventilation and Porosity Distribution Patterns," *Energy*, vol. 12, no. 26, pp. 73–87, 2019, doi: [10.22034/AAUD.2019.89057](https://doi.org/10.22034/AAUD.2019.89057).
- [16] P. Shen, "Impacts of climate change on U.S. building energy use by using downscaled hourly future weather data," *Energy Build.*, vol. 134, pp. 61–70, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.028>.
- [17] P. Shen and J. R. Lukes, "Impact of global warming on performance of ground source heat pumps in US climate zones," *Energy Convers. Manag.*, vol. 101, pp. 632–643, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.027>.
- [18] U. Berardi and P. Jafarpur, "Assessing the impact of climate change on building heating and cooling energy demand in Canada," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 121, p. 109681, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109681>.
- [19] S. Flores-Larsen, C. Filippin, and G. Barea, "Impact of climate change on energy use and bioclimatic design of residential buildings in the 21st century in Argentina," *Energy Build.*, vol. 184, pp. 216–229, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.015>.
- [20] I. G. Dino and C. Meral Akgül, "9," *Renew. Energy*, vol. 141, pp. 828–846, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.150>.
- [21] V. Andreu, C. Aparicio, A. Martínez Ibernón, and J.-L. Vivancos, "Impact of climate change on heating and cooling energy demand in a residential building in a Mediterranean climate," *Energy*, vol. 165, pp. 63–74, Dec. 2018, doi: [10.1016/j.energy.2018.09.015](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.015).
- [22] E. Rodrigues and M. S. Fernandes, "Overheating risk in Mediterranean residential buildings: Comparison of current and future climate scenarios," *Appl. Energy*, vol. 259, p. 114110, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114110>.
- [23] E. L. A. da Guarda et al., "The influence of climate change on renewable energy systems designed to achieve zero energy buildings in the present: A case study in the Brazilian Savannah," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 52, p. 101843, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101843>.
- [24] S. Attia and C. Gobin, "Climate Change Effects on Belgian Households: A Case Study of a Nearly Zero Energy Building," *Energies*, vol. 13, no. 20, 2020, doi: [10.3390/en13205357](https://doi.org/10.3390/en13205357).
- [25] Y. Zou, K. Xiang, Q. Zhan, and Z. Li, "A simulation-based method to predict the life cycle energy performance of residential buildings in different climate zones of China," *Build. Environ.*, vol. 193, p. 107663, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107663>.
- [26] C. Baglivo, P. M. Congedo, G. Murrone, and D. Lezzi, "Long-term predictive energy analysis of a high-performance building in a mediterranean climate under climate change," *Energy*, vol. 238, p. 121641, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121641>.
- [27] S. Flores Larsen, C. Filippin, and G. Barea, "Impact of climate change on energy use and bioclimatic design of residential buildings یافته‌های تحقیقات انجام‌گرفته توسط شن (2017)، براردی و جعفریور (2020)، لارسن و همکاران (2019)، آندرو و همکاران (2008)، و همکاران (2020) و Baglivo و همکاران (2022) که ثابت کردند انرژی مورد نیاز گرمایشی تحت تاثیر تغییرات اقلیمی در آینده کاهش و انرژی مورد نیاز سرمایشی افزایش خواهد یافت همسو می‌باشد. نتایج این پژوهش مغایر با دستاوردهای تحقیق انجام‌گرفته توسط ژو و همکاران (2021) است که مدعیست ساختمان‌های واقع در اقلیم سرد، با توجه به افزایش دما در آینده، میزان مصرف انرژی پایین‌تری خواهند داشت. نتایج این تحقیق با دستاوردهای پژوهش انجام‌گرفته توسط براردی و جعفریور (2020) مبنی بر اینکه استفاده از عایق حرارتی در ساختمان، می‌تواند منجر به کاهش تاثیرات منفی تغییرات اقلیمی بر روی ساختمان شود همو می‌باشد.
- از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به تعداد نمونه‌های مورد مطالعه، وسعت محدوده انتخابی، انواع انرژی‌های مصرفی در ساختمان و تعداد راهکارهای مورد مطالعه اشاره نمود. توسعه محدوده مورد مطالعه، افزایش تعداد نمونه‌ها و مطالعه دیگر راهکارهای کاهش مصرف انرژی در ساختمان جهت مواجهه با تغییرات اقلیمی آینده می‌تواند موضوع پژوهش‌های آتی باشد. می‌توان گفت که بهترین راهکارهای افزایش انرژی کارآمدی ساختمان‌های شهر تبریز برای مواجهه با تغییرات اقلیمی، استفاده از راهکارهای ترکیبی یا به کارگیری عایق‌بندی همراه با شیشه‌های دوجداره در ساختمان می‌باشد. طبق نتایج به‌دست‌آمده استفاده از سایبان در پنجره‌های جنوبی همراه با پوشش شبانه شیشه‌های شمالی به هیچ عنوان گزینه مناسبی برای شهر تبریز محسوب نمی‌شود؛ چراکه در بسیاری از موارد منجر به افزایش مصرف انرژی در مقایسه با حالت مبنا می‌شود. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان الگوی کمک‌طراحی راهنمای عمل معماران در طراحی ساختمان‌های مسکونی انرژی‌کارآمد به منظور مواجهه با تغییرات اقلیمی آتی در شهر تبریز و تمامی شهرهایی که شرایط اقلیمی مشابه با شهر تبریز دارند، مورد استفاده قرار گیرد.

6- مراجع

- [1] C. Symon, "Climate change: Action, trends and implications for business," 2013.
- [2] J. Zuo, S. Pullen, J. Palmer, H. Bennetts, N. Chileshe, and T. Ma, "Impacts of heat waves and corresponding measures: a review," *J. Clean. Prod.*, vol. 92, pp. 1–12, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.078>.
- [3] L. F. Cabeza and D. Úrge-Vorsatz, "The role of buildings in the energy transition in the context of the climate change challenge," *Glob. Transitions*, vol. 2, pp. 257–260, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.glt.2020.11.004>.
- [4] V. Ciancio, F. Salata, S. Falasca, G. Curci, I. Golasi, and P. de Wilde, "Energy demands of buildings in the framework of climate change: An investigation across Europe," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 60, p. 102213, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102213>.
- [5] P. Saadatjoo, P. Badamchizadeh, and M. Mahdavejad, "Towards the new generation of courtyard buildings as a healthy living concept for post-pandemic era," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 97, p. 104726, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104726>.
- [6] IEA, "World Energy Outlook," 2019.
- [7] N. Milojevic-Dupont and F. Creutzig, "Machine learning for geographically differentiated climate change mitigation in urban areas," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 64, p. 102526, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102526>.
- [8] M. A. D. Larsen, S. Petrović, A. M. Radoszynski, R. McKenna, and O. Balyk, "Climate change impacts on trends and extremes in future heating and cooling demands over Europe," *Energy Build.*, vol. 226, p. 110397, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110397>.

- in the 21st century in Argentina,” *Energy Build.*, vol. 184, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.12.015.
- [28] Z. J. Zhai and J. M. Helman, “Implications of climate changes to building energy and design,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 44, pp. 511–519, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.043>.
- [29] F. Abbasizade, M. Abbaspour, M. Soltanieh, and A. Haj Mulla kani, “Climate change and its impact on energy consumption in buildings,” *J. Environ. Sci. Technol.*, 2021, doi: 10.22034/jest.2021.55451.5166.
- [30] S. Golkar, H. Yousefi, M. Salehi, ا.ا. Fathi, and K. Aazadi, “The effects of climate on energy consumption of the building’s heating and cooling,” *Iran. J. Ecohydrol.*, vol. 9, no. 3, pp. 691–703, 2022, doi: 10.22059/ije.2023.350637.1694.
- [31] D. Mokhtari and V. Emami Kia, “Zoning The Application of Urban Land in Tabriz Eram Town Based on Fundamental Components of Geomorphologic Hazards,” *Geogr. Plan. Sp.*, vol. 4, no. 12, pp. 149–172, 2014, [Online]. Available: https://gps.gu.ac.ir/article_7509.html.
- [32] M. Jentsch, A. Bahaj, and P. James, “Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files,” *Energy Build.*, vol. 40, pp. 2148–2168, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.06.005.
- [33] M. F. Jentsch, P. A. B. James, L. Bourikas, and A. S. Bahaj, “Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates,” *Renew. Energy*, vol. 55, pp. 514–524, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.049>.
- [34] K.-T. Huang and R.-L. Hwang, “Future trends of residential building cooling energy and passive adaptation measures to counteract climate change: The case of Taiwan,” *Appl. Energy*, vol. 184, pp. 1230–1240, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.008>.
- [35] A. Sabunas and A. Kanapickas, “Estimation of climate change impact on energy consumption in a residential building in Kaunas, Lithuania, using HEED Software,” *Energy Procedia*, vol. 128, pp. 92–99, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.020>.
- [36] R. Dickinson, “Generating future weather files for resilience. In: Pablo La Roche MS, editor. International conference on passive and low energy architecture,” 2016.
- [37] A. H. Mansouri A, Aminnejad B, Investigating the Effect of Climate Change on Inflow Runoff into the Karun-4 Dam Based on IPCC’s Fourth and Fifth Report, *JWSS - Journal of Water and Soil Science*, Vol. 22, No. 2, 2018.
- [38] Z. S. Zomorodian and M. Tahsildoost, “Validation of Energy Simulation Programs: An Empirical and Comparative Approach,” *NECjournals*, vol. 18, no. 4, p. 0, Jan. 2016, [Online]. Available: <http://necjournals.ir/article-1-803-en.html>.
- [39] H. Nazir et al., “Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 129, pp. 491–523, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126>