Quarterly Journal of Urban and Regional Development Planning
Vol. 7, No.21, Summer 2022
urdp.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/URDP.2022.65055.1397

ATU PRESS

Original Research
Accepted: 7/2/2022
Received: 27/11/2021
ISSN: 2476-5864
eISSN: 2476-6402

Identification and Prioritizing Suitable Cities to Construct Zero Energy Buildings Using MADM Techniques (Case Study: Iran)

Aliyeh Kazemi * — Associate Professor of Industrial Management, University of Tehran, Tehran, Iran.

Parichehr Nouri — MSc. in Industrial Management, University of Tehran, Tehran, Iran.

Sara Aryaee — Ph.D. Candidate of Industrial Management, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

Increasing demand for energy due to population growth and global warming has led to numerous environmental issues such as deforestation, destruction of the ozone layer, drought, storms, and floods. These have encouraged researchers to seek new ways to use clean, renewable energies. The construction of Zero Energy buildings in Iran cities can be a significant step forward in economic development and pollution reduction in metropolitan areas. This study aims to identify and prioritize suitable cities in Iran to build Zero Energy buildings. For this purpose, the fuzzy Delphi and multi-attribute decision-making (MADM) methods have been used. The cities that are suitable for the construction of zero-energy buildings were selected through interviews with individuals who are experts in the fields of architecture, urban planning, and energy management and who are familiar with the construction of Zero Energy buildings, as well as considering the results of previous research and the characteristics of different cities. Then, with the fuzzy Delphi method, the necessary indicators for the priority of the selected cities were determined, and their weight was determined. After that, the cities were prioritized using MADM methods. The results showed that Yasuj, Shiraz, Tabriz, and Arak are suitable cities to build Zero Energy buildings in Iran.

Keywords: Zero Energy Buildings, Iran, Fuzzy Delphi Method, Multi-Attribute Decision Making Methods.

* Corresponding Author: aliyehkazemi@ut.ac.ir

How to Cite: Kazemi, A., Nouri, P., Aryaee, S. (2022). Identification and Prioritizing Suitable Cities to Construct Zero Energy Buildings Using MADM Techniques (Case Study: Iran), *Journal Urban and Regional Development Planning*, 7(21), 59-86.

مقاله پژوهشی

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۹/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸

ISSN: 2476-5864

eISSN: 2476-6402

فصلنامه برنامه‌ریزی توسعه شهری و منطقه‌ای
سال هفتم، شماره ۲۱، تابستان ۱۴۰۱، ص ۵۹ تا ۸۶
www.urdp.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/URDP.2022.65055.1397

شناسایی و اولویت‌بندی شهرهای مناسب برای ساخت خانه‌های انرژی صفر با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه (موردمطالعه: ایران)

عالیه کاظمی * دانشیار مدیریت صنعتی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

پریچهر نوری کارشناس ارشد مدیریت صنعتی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

سارا آریایی دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

افزایش جمعیت و تقاضای بیشتر در زمینه انرژی، گرم شدن کره زمین و معضلات زیست‌محیطی، جنگل‌زدایی، تخریب لایه ازون و بروز مشکلاتی همچون خشک‌سالی توجه محققان را به روش‌هایی جدید برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر جلب کرده است. احداث ساختمان‌های انرژی صفر در شهرهای ایران می‌تواند گام بزرگی در پیشروی اقتصادی و کاهش مشکلات آلودگی کلان‌شهرها باشد. هدف این پژوهش شناسایی و اولویت‌بندی شهرهای مناسب ایران برای ساخت خانه‌های انرژی صفر است. بدین منظور از روش دلفی فازی و روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه استفاده شده است. با مصاحبه با متخصصین در زمینه معماری، شهرسازی، مدیریت انرژی و آشنا به احداث ساختمان‌های انرژی صفر و با در نظرگرفتن نتایج حاصل از تحقیقات پیشین و همچنین مشخصات شهرهای مختلف، شهرهایی که برای احداث خانه‌های انرژی صفر مناسب هستند انتخاب شدند. سپس با استفاده از روش دلفی فازی، شاخص‌های لازم برای اولویت‌بندی شهرهای منتخب مشخص‌شده و وزن آن‌ها تعیین گردید. پس‌ازآن با استفاده از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندشاخصه، شهرها اولویت‌بندی شدند. نتایج نشان داد شهرهای یاسوج، شیراز و تبریز و اراک شهرهای مناسبی برای ساخت خانه‌های انرژی صفر در ایران هستند.

کلیدواژه‌ها: خانه‌های انرژی صفر، ایران، روش دلفی فازی، روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه.

*نویسنده مسئول: aliyehkazemi@ut.ac.ir

مقدمه

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌سرعت در حال افزایش است. انرژی‌هایی همچون انرژی خورشیدی، بادی و زمین‌گرمایی[۱] از عمده‌ترین منابع انرژی‌های پاک هستند. بخش ساختمان و مسکن با مصرف بیش از ۴۰ درصد انرژی، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده انرژی در ایران است (وزارت نیرو، ۱۳۹۲). میانگین مصرف انرژی ساختمان‌ها در ایران بیش از ۲/۵ برابر متوسط مصرف جهانی است (سازمان بهره‌وری انرژی ایران، ۱۳۸۹). لذا لزوم اجرای طرحی در جهت کاهش این آلایندگی‌ها همچون ساخت ساختمان‌های انرژی صفر[۲] می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش مصرف انرژی داشته باشد. در ایران وجود زمینه مناسب اقلیمی و تابش آفتاب در بیشتر مناطق و در بیشتر فصول سال، داشتن مناطق با پتانسیل بالای وزش باد و قابلیت‌های تولید انرژی زمین گرمایی، زمینه مناسبی را برای گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر فراهم آورده است که می‌توان در ساخت خانه‌های انرژی صفر از آن بهره‌مند شد (صادقی، اصفهانی و حری، ۱۳۹۲).

معماری شهری به دلیل مسائل ساخت‌وساز و مشکلات ناشی از شیوه‌های نادرست ساختمان‌سازی، سهم بسزایی در ایجاد بحران‌های زیست‌محیطی چه در زمان ساخت و چه در سال‌هایی که مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد ایفا می‌کند. ساختمان‌های سنتی درصد قابل‌توجهی از میزان مصرف انرژی در حدود ۴۰ درصد را به خود اختصاص داده‌اند (جوانشیر، ۱۳۹۴) و به همین ترتیب، شهرها بیشترین میزان تقاضای انرژی را دارند و هر چه قدیمی‌تر می‌شوند روندی صعودی را در پیش می‌گیرند (IEA: International Energy Agency, 2015). کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی به علت آلودگی‌های زیست‌محیطی و گران بودن، نیازمند تحولی اساسی در طراحی و ساخت‌وساز شهری است.

معماری پایدار ازجمله زیرشاخه‌های اقتصاد پایدار یک کشور است و لزوم تمرکز بر

---

۱. به انرژی حرارتی که در پوسته جامد زمین وجود دارد گفته می‌شود. ۲۸ ناحیه در ایران دارای این انرژی هستند که بخش اعظم آن در مشکین‌شهر است.

۲. یک ساختمان با برآیند انرژی بسیار پایین است که نیازهای انرژی را می‌توان با استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر تأمین کرد (Torcellini & Crawley, 2006).

این بخش جایگاه ویژه‌ای در تحقق حرکت به سمت توسعه پایدار خواهد داشت. مادامی‌که ساختمان‌ها به سمت پایداری و کاهش مصرف انرژی گرایش پیدا نکنند، بحران ادامه خواهد داشت. اگر انرژی به نحوی تولید و مصرف شود که توسعه انسانی را در درازمدت در تمامی ابعاد اجتماعی - اقتصادی و زیست‌محیطی تأمین نماید، مفهوم انرژی پایدار تحقق خواهد یافت. درواقع این تعریف به معنای تداوم عرضه انرژی نیست بلکه هدف آن است که تولید و مصرف منابع انرژی به طرقی صورت پذیرد که در درازمدت حیات انسان و تعادل بوم‌شناختی میسر گردد (شکارچی، ۱۳۹۴).

در طراحی ساختمان‌های انرژی صفر اصولی به شرح زیر موردتوجه قرار می‌گیرد: شناخت لازم و کافی از اقلیم، بررسی دقیق محیط اطراف ساختمان (درختان و ساختمان‌ها)، تمرکز بر طراحی غیرفعال و کاهش نیاز انرژی ساختمان (عایق‌کاری مناسب، سایبان، تهویه طبیعی و بهره‌گیری از نور روز)، بهره‌گیری از سیستم‌های کارامد (راندمان بالاتر در سیستم‌های الکتریکی و مکانیکی، چراغ‌ها و لامپ‌های پربازده) و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید انرژی (نوری، ۱۳۹۸). طراحی اصول ساختمان‌ها با توجه به شرایط اقلیمی آن منطقه و استفاده صحیح از انرژی می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی داشته باشد (خدابخشی و مفیدی، ۱۳۸۰).

اجرای ساختمان‌های انرژی صفر مزایای بسیاری دارند که می‌توان به موارد زیر در این خصوص اشاره کرد ازجمله: همساز بودن با طبیعت، بهبود آب‌وهوا، جلوگیری از اثرات منفی ساخت‌وساز بر محیط‌زیست و کاهش قابل‌توجه تخریب محیط‌زیست، تعادل مصرف انرژی با درخواست انرژی، کاهش تقاضای انرژی، صفر شدن استفاده از سوخت-های فسیلی، استفاده از انرژی‌های طبیعی در مصرف روزمره و استفاده ۱۰۰ درصدی از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید برق مصرفی، کاهش مصرف آب آشامیدنی، استفاده از ضایعات و پساب در تولید آب موردنیاز برای آبیاری فضای سبز، توجه به شرایط اقلیمی منطقه و طراحی با مصالح نزدیک به طبیعت (Deng et al., 2011).

با توجه به شرایط چهارفصل در ایران و پتانسیل بالای کشور برای احداث خانه‌های انرژی صفر، می‌توان بررسی نمود در کدام مناطق از کشور می‌توان با احداث چنین

ساختمان‌هایی، به بهره‌وری بالاتری رسید.

در پژوهش حاضر سعی بر آن است عوامل مؤثر و معیارهای تأثیرگذار در ساخت ساختمان‌های انرژی صفر مشخص شوند و بر اساس آن، پتانسیل شهرهای منتخب برای ساخت خانه‌های انرژی صفر بررسی گردد و شهرهای منتخب بر اساس معیارهای مشخص‌شده اولویت‌بندی شوند. به این منظور از روش دلفی فازی[1] برای انتخاب شاخص‌ها و از سه روش SAW[2]، TOPSIS[3] و VIKOR[4] برای اولویت‌بندی شهرها استفاده می‌شود. درنهایت نتایج سه روش با استفاده از روش Copeland ترکیب می‌شوند.

در ادامه مقاله به بررسی پیشینه پژوهش پرداخته‌شده است. سپس روش‌شناسی پژوهش توضیح داده شده است. پس‌ازآن یافته‌های پژوهش ارائه شده است و نهایتاً نتایج ذکر شده است.

پیشینه پژوهش

در این بخش به بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه ساخت ساختمان‌های انرژی صفر پرداخته شده است.

ادریس‌آبادی (۱۳۹۶) طراحی یک ساختمان انرژی صفر برای مناطق گرم و خشک و ارزیابی کاهش آلاینده‌ها را موردبررسی قرار داد. در این پژوهش به بررسی تکنولوژی سیستم‌های تولید انرژی با قابلیت ذخیره‌سازی انرژی پرداخته شد. وی به بررسی چند تکنولوژی و سیستم‌های تولید انرژی در ساخت و همچنین ساختمان‌هایی با قابلیت ذخیره‌سازی انرژی پرداخت. برای این منظور ابتدا ساختمان به لحاظ معماری طراحی شده است و پس از بررسی گزینه‌های موجود، استفاده از دیوار پیش‌ساخته به‌عنوان مصالح ساختمان به‌عنوان ماده بهینه انتخاب گردید. به لحاظ هواشناختی نیز بررسی‌هایی بر روی مشخصه‌های خورشیدی در منطقه جغرافیایی مهرآباد انجام‌شده است. انرژی برق لازم برای تأمین نیازهای داخلی ساختمان از سیستم فتوولتائیکی متصل به شبکه برای این ساختمان

1. Fuzzy delphi method (FDM)
2. Simple additive weighting (SAW)
3. Technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)
4. Vlse kriterijumsk optimizacija kompromisno resenje (VIKOR)

تأمین‌شده و محاسبات شبیه‌سازی نشان داد که با استفاده از سیستم فتوولتائیک از انتشار مقدار قابل‌توجهی دی‌اکسید کربن جلوگیری می‌شود.

پیرمحمدی و عاکف (۱۳۹۵) به بررسی میزان مصرف انرژی برای یک ساختمان مسکونی دوطبقه با زیربنای دویست مترمربع در شهر تهران پرداختند. در ابتدا فرض شد که ساختمان با مصالح متداول ساخته‌شده و سپس میزان مصرف انرژی ساختمان و همچنین هزینه مصرف سالانه انرژی ساختمان با توجه به تعرفه‌های کشور محاسبه شدند. در مرحله بعد محاسبات انرژی برای یک ساختمان انرژی صفر صورت گرفته است. در آخر به مقایسه میزان مصرف انرژی و هزینه انرژی مصرفی در هر دو ساختمان پرداخته شد. نتایج نشان داد کاهش قابل‌توجهی در مقدار مصرف انرژی سالانه ساختمان انرژی صفر و همچنین هزینه‌های مربوطه حاصل می‌شود.

جهانشیر و شقاقی (۱۳۹۶) در رابطه با احداث هتل در اقلیم سرد در شهر ارومیه و راهکارهایی برای کاهش مصرف انرژی و نیز استفاده از منابع تجدیدپذیر برای گرمایش و سرمایش در ساختمان تحقیق کردند. مهم‌ترین شاخص‌های به‌دست‌آمده در این پژوهش تمرکز بر بخش معماری بود. بر این اساس که انرژی کمتری برای گرمایش و سرمایش لازم باشد و بیشترین درصد تأمین سرمایش، گرمایش و روشنایی هتل به‌صورت طبیعی و با کمک روش‌های معماری به دست آید.

خیری، قاسمی و خدابخشیان (۱۳۹۵) نیز به شناسایی و انتخاب عوامل مؤثر در امکان احداث ساختمان‌های انرژی صفر در مناطق گرم و خشک پرداختند و شهر اصفهان را به‌عنوان موردمطالعه بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که این شهر دارای شرایط مناسب ازنظر اقلیمی برای احداث ساختمان‌های انرژی صفر است.

راسماسن، ملکویست، مانکستر، ویبرگ و برگیستدوتر (۲۰۱۸) با ارائه یک مدل جامع برای الگوبرداری در ساخت ساختمان‌های انرژی صفر، هشتاد پژوهش موردی که در آژانس بین‌المللی انرژی در مکان‌های مختلف و در مورد ساختمان‌های انرژی صفر انجام‌شده بودند را موردبررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با توسعه مدل‌هایی همچون مقررات ملّی ساختمان می‌توان به الگویی مناسب برای ارزیابی هر منطقه دست

یافت. آن‌ها بر میزان تولید انرژی‌های پاک و کاهش گازهای گلخانه‌ای تمرکز داشتند. موردهای مطالعه، کشورهای استرالیا، انگلیس، نروژ، سویس، دانمارک، آلمان، ایتالیا و ژاپن بودند. در این پژوهش تحلیل بر اساس گزینه‌های روش‌شناسی[1] و مقایسه پروژه‌های قبلی انجام شده است (Rasmussen, Malmqvist, Moncaster, Wiberg & Birgisdóttir, 2018).

اینکه آیا اجرای ساختمان‌های انرژی صفر در مقیاس بزرگ قابل‌اجرا هست یا خیر، سؤالی است که امارال، ردریگز، گسپار و گمز (۲۰۱۸)، در رابطه با مفهوم ساختمان‌های نزدیک به انرژی صفر[2] مطرح کردند. آن‌ها در مورد جنبه‌های کاربرد ساختمان‌های انرژی صفر به مقیاس متوسط شهری انتقاد کردند. انواع مختلف اجرای تأسیسات برای کاهش مصرف انرژی می‌باید با توجه به سه مقیاس شهری، محله‌ای و ساختمانی اجرا شوند که مختص آن منطقه باشد؛ زیرا برخی از روش‌ها که مناسب ساختمان‌ها هستند لزوماً در شرایط وسیع‌تر یا کوچک‌تر دیگر اثرگذار نیستند و یا تأثیر کمتری خواهند داشت و یا صرف هزینه برای آن‌ها معقول نیست (Amaral, Rodrigues, Gaspar & Gomes, 2018).

کیلی و فوکادیس (۲۰۱۵) راهکارها و پیش‌فرض‌های اجتماعی و اقتصادی تداوم و تغییرات آب و هوایی را موردبررسی قرار دادند و در خصوص احداث شهرهای هوشمند تحقیق کردند. آن‌ها روش جدید فنی برای مدیریت انرژی، تمرکز بر چرخه عمر و بازیافت انرژی ارائه دادند. در این تحقیق امکان‌سنجی اقتصادی در راستای انتقال شهرهای اروپایی به شهرهای هوشمند نیز انجام شده است (Kylili & Fokaides, 2015).

کازون، کارلوسی، پاگلینو و پیتروبون (۲۰۱۴) به بررسی ساخت ساختمان‌های انرژی صفر در شرایط آب‌وهوایی مدیترانه‌ای پرداختند. موردمطالعه، ساختمانی در جنوب ایتالیا در منطقه مدیترانه‌ای با تمرکز بر نظارت پیشرفته سیستم‌های بهینه انرژی بود. نویسندگان با اجرای شبیه‌سازی این نمونه پیشنهاد دادند که مطالعات آینده با ابعاد بزرگ‌تر تحلیل شود

1. Methodological choices
2. Nearly zero energy building

(Causone, Carlucci, Pagliano & Pietrobon, 2014).

بررسی برنامه‌ریزی شهری برای ساختمان‌های خورشیدی در سوئد توسط کانترز و وال (۲۰۱۴) انجام شد. آن‌ها به بررسی طراحی ساختمان‌های انرژی خورشیدی صفر خالص[1] پرداختند. در این پژوهش بیان می‌شود که بسیاری از تصمیمات طراحی‌شده توسط برنامه‌ریزان شهری مانند شکل، تراکم، نوع سقف و جهت‌گیری می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی بر شرایط ساخت خانه‌های انرژی صفر داشته باشند هرچند که شاید برنامه‌ریزان از اهمیت تصمیم‌هایشان غافل باشند. ازآنجاکه اکثر ساختمان‌های آینده در شهرها ساخته می‌شوند، بسیار مهم است که شرایط مناسب برای ساخت این ساختمان‌ها در طول زمان برنامه‌ریزی گردد. نتایج این مطالعه نشان داد تراکم شهری از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر شرایط ساخت خانه‌های انرژی صفر است (Kanters & Wall, 2014).

وانگ، ویلیام و جونز (۲۰۰۹) عوامل محیطی را به‌عنوان اصلی‌ترین گام برای ساخت یک ساختمان انرژی صفر نام بردند و این عوامل را به‌صورت مواردی چون باد، خورشید، دمای محیط و در زیرمجموعه آن‌ها عواملی چون سرعت باد، رشد سالانه باد، جهت وزش باد، میزان توزیع تابش مستقیم خورشید، میزان انتشار تابش خورشیدی، میزان ساعات آفتابی هرروز، میانگین درجه حرارت روزانه معرفی کردند. آن‌ها به راه‌حل‌های ممکن برای طراحی ساختمان با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی پرداختند و بیان داشتند شناسایی ابتدایی محل و شرایط آب و هوایی آن در یک دوره، شناسایی و ترکیب تکنولوژی‌های کارا در منطقه شامل توربین‌های کوچک و گرمایش از کف و انرژی خورشیدی مناسب هستند (Wang, Gwilliam & Jones, 2009).

هویی (2001) در پژوهشی با عنوان طراحی ساختمان با مصرف کم انرژی در شهرهای با تراکم بالا با مطالعه موردی هنگ‌کنگ، میزان تأثیرگذاری تراکم شهری را در چگونگی طراحی ساختمان انرژی صفر بررسی کرد. در این پژوهش ویژگی‌های توسعه ساختاری متراکم و عوامل اصلی تأثیرگذار بر ساختار مصرف کم انرژی ارزیابی شد. همچنین بیان شد در شهرهای پرجمعیت که متخصصان به سمت طراحی و ارتقاء

1. Net zero energy solar buildings

ساختمان‌های با مصرف کم انرژی می‌روند، باید با توسعه شهرک‌های متمرکز با مصرف کم انرژی به حفظ محیط‌زیست کمک کرد؛ بنابراین تراکم شهری می‌تواند عامل مؤثری در طراحی ساختمان‌های انرژی صفر باشد (Hui, 2001).

مرور ادبیات نشان می‌دهد تاکنون تحقیقی که با در نظر گرفتن شاخص‌های مؤثر برای احداث خانه‌های انرژی صفر به بررسی شهرهای مختلف ایران و بررسی پتانسیل این شهرها برای احداث چنین خانه‌هایی بپردازد انجام نشده است. با توجه به اینکه روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه[1]، روش‌های مناسبی برای تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب و اولویت‌بندی گزینه‌های مختلف تصمیم (در اینجا شهرها) هستند، از این روش‌ها استفاده شده است. در پژوهش حاضر معیارهای مختلف برای ساخت خانه‌های انرژی صفر بررسی می‌گردد تا بتوان مناسب‌ترین شهر را برای ساخت این خانه‌ها انتخاب کرد. نتیجه حاصل می‌تواند نقش بسزایی در رونق اقتصادی در جهت جذب سرمایه‌گذار در حوزه انرژی، کاهش آلودگی و آلاینده‌ها و رونق فرهنگ مصرفی مردم ایفا کند.

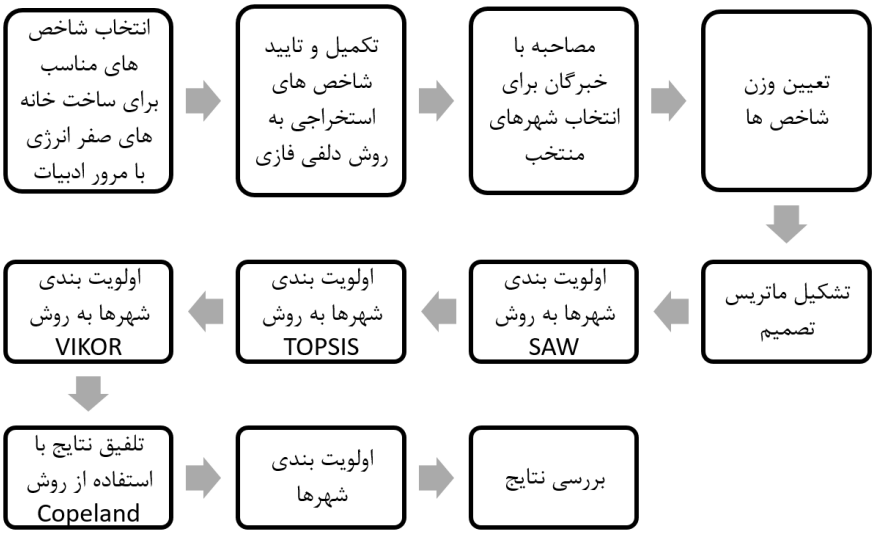
روش

در این پژوهش ابتدا شاخص‌های مؤثر برای ارزیابی شهرهای مختلف با استفاده از مرور ادبیات و روش دلفی فازی تعیین گردیدند. سپس با بررسی تحقیقات صورت گرفته قبلی و دریافت نظر خبرگان، شهرهای منتخب برای ساخت خانه‌های انرژی صفر مشخص شدند. برای اولویت‌بندی شهرهای منتخب بر اساس شاخص‌های مشخص‌شده از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندشاخصه شامل SAW، TOPSIS و VIKOR استفاده شد و نهایتاً نتایج هر سه روش با استفاده از روش Copeland ترکیب شدند و اولویت‌بندی شهرها انجام گردید. فرایند اجرای تحقیق در شکل ۱ آمده است.

داده‌های کمّی از گزارش‌های منتشرشده توسط سازمان‌ها و مؤسسات مرتبط همچون گزارش وزارت فناوری اطلاعات، سازمان هواشناسی کشور، پایگاه‌های خبری معتبر همچون روزنامه دنیای اقتصاد، پرتال ارگان‌های معتبر همچون سایت حفاظت از

1. Multiple attribute decision making (MADM)

محیط‌زیست و هواشناسی، ایستگاه‌های هواشناسی شهرهای مختلف، سایت داده‌های انرژی خورشیدی جهانی (https://solargis.com)، پایگاه اطلاع‌رسانی صنعت ساختمان، سایت آب‌وهوا شناسی جهانی، اطلس بادی جهانی (https://globalwindatlas.info)، شبکه جهانی اطلاعات انرژی و مقالات و نشریات تخصصی مختلف جمع‌آوری شده است. جامعه آماری در این تحقیق متخصصین در زمینه معماری، شهرسازی، مدیریت انرژی و آشنا به احداث ساختمان‌های انرژی صفر هستند.



شکل ۱. فرآیند اجرای تحقیق

همان‌گونه که ذکر شد در این پژوهش از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندشاخصه شامل دلفی فازی، SAW، TOPSIS، VIKOR و روش Copeland استفاده شده است. در ادامه در خصوص این روش‌ها به‌اختصار توضیح داده شده است.

روش دلفی فازی

در این پژوهش روش دلفی فازی در ۴ گام به شرح زیر انجام شده است.

گام ۱. جمع‌آوری نظران خبرگان: در این مرحله پرسشنامه‌ای برای گردآوری نظرات طراحی شد. پرسشنامه بر اساس معیارهای شناسایی‌شده مؤثر محیطی طراحی شد. این

معیارها از مرور ادبیات، بررسی پژوهش‌های انجام‌شده و مصاحبه باز با خبرگان به دست آمد. برای اجرای روش دلفی فازی از افراد خبره خواسته شد تا ارزش هر شاخص را با واژه‌های کلامی مشخص کنند. واژه‌های کلامی مطابق با جدول ۱ به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌شوند.

جدول ۱. اعداد فازی مثلثی معادل واژه‌های کلامی (Shen, Chang, Lin & Yu, 2010)

واژه کلامی	مقیاس فازی	عدد فازی مثلثی
خیلی مهم	$\tilde{9}$	(۹،۹،۷)
مهم	$\tilde{7}$	(۹،۷،۵)
متوسط	$\tilde{5}$	(۷،۵،۳)
کم‌اهمیت	$\tilde{3}$	(۵،۳،۱)
بسیار کم‌اهمیت	$\tilde{1}$	(۳،۱،۱)

گام ۲. محاسبه مقادیر ارزیابی هر معیار با توجه به اعداد فازی مثلثی: ارزش k امین شاخص که توسط i امین خبره مشخص شده است، به‌صورت اعداد فازی مثلثی و به شکل $w_{ik} = (a_{ik}, b_{ik}, c_{ik}), i = 1,2, \dots, m$ نشان داده می‌شود. بنابراین وزن؛ ازی k امین شاخص با رابطه $w_k = (\alpha_k, \beta_k, \gamma_k)$ $k = 1,2, \dots, n$ به دست می‌آید. در اینجا $\alpha_k = \min(a_{ik})$، $\beta_k = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{1} b_{ik}$ و $\gamma_k = \max(c_{ik})$ است.

گام ۳. دیفازی کردن: برای به دست آوردن وزن نهایی S_k، وزن فازی هر شاخص با استفاده از رابطه $S_k = \frac{\alpha_k + \beta_k + \gamma_k}{3}$ دی‌فازی می‌شود.

گام ۴. مشخص کردن حد آستانه: در این مرحله آستانه ρ برای مشخص کردن شاخص‌های مهم تعیین می‌شود. اگر $S_k > \rho$ باشد، k امین شاخص انتخاب می‌شود و چنانچه $S_k < \rho$ باشد، آن شاخص حذف می‌شود. در عمل چنانچه شاخص‌های بیشتری مدنظر باشد ρ بزرگ‌تری در نظر گرفته می‌شود (Zang, 2017). در این پژوهش با در نظر گرفتن حد آستانه $\rho = 5$، مهم‌ترین معیارها برای ارزیابی شهرهای منتخب برای ساخت خانه‌های انرژی صفر در میان سایر معیارها انتخاب شدند.

روش SAW

چنانچه بردار W (وزن اهمیت شاخص‌ها) مفروض باشد و مناسب‌ترین گزینه A* باشد، در این صورت A* با رابطه $A^* = \left\{A_i \middle| max \frac{\sum_{i=1}^{n} w_j r_j}{\sum_{j=1}^{n} w_j}\right\}$ به دست می‌آید (آذر و رجب‌زاده، ۱۳۸۱).

روش TOPSIS

نمادهای ریاضی مورداستفاده در این روش به‌صورت زیر هستند:

مقدار هر گزینه تصمیم با توجه به شاخص j: x_{ij}

ماتریس بی مقیاس شده: N_D

بردار وزن: W

ماتریس بی مقیاس وزن‌دار: V

گزینه ایده‌آل مثبت: A^+

گزینه ایده‌آل منفی: A^-

فاصله گزینه i ام از ایده‌آل مثبت: d_i^+

فاصله گزینه i ام از ایده‌آل منفی: d_i^-

اهمیت هر گزینه: C_i

حل مسئله به روش تاپسیس شامل ۶ مرحله به شرح زیر است (اصغرپور، ۱۳۹۴):

۱. تشکیل ماتریس نرمال

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_1^m x_{ij}^2}} \quad (۱)$$

۲. تشکیل ماتریس تصمیم نرمال موزون

$$V = N_D \times W_{n\times n} \quad (۲)$$

۳. محاسبه راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی

$$A^+ = \{V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+\} = \{(max_i V_{ij} | j \in J_1), (min_i V_{ij} | j \in J_2)| \quad i = 1,2, \dots, m\} \quad (۳)$$

$$A^- = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^-\} = \{(min_i V_{ij} | j \in J_1), (max_i V_{ij} | j \in J_2)| \quad i = 1,2, \dots, m\} \quad (۴)$$

۴. محاسبه فاصله هر گزینه تا راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (V_{ij} - V_j^+)^2}, (i = 1,2, \dots, m) \quad (۵)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (V_{ij} - V_j^-)^2}, (i = 1,2, \dots, m) \quad (۶)$$

۵. محاسبه نزدیکی نسبی به راه‌حل ایده‌آل

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, (i = 1,2, \dots, m) \quad (۷)$$

۶. رتبه‌بندی گزینه‌ها: بر اساس ترتیب نزولی نزدیکی نسبی، گزینه‌های موجود بر اساس بیشترین اهمیت رتبه‌بندی می‌شوند.

روش VIKOR

نمادهای ریاضی مورداستفاده در این روش به‌صورت زیر هستند:

بهترین مقدار از میان مقادیر موجود برای هر شاخص در ماتریس تصمیم: f_i^*

بدترین مقدار از میان مقادیر موجود برای هر شاخص در ماتریس تصمیم: f_i^-

عدد گزینه موردنظر برای هر معیار در ماتریس نرمال وزنی: f_{ij}

وزن هر شاخص: w_i

مجموع مقدار S برای هر گزینه: S_j

بزرگ‌ترین عدد شاخص S برای هر گزینه: S^-

کوچک‌ترین عدد شاخص S برای هر گزینه: S^*

مجموع مقدار R برای هر گزینه: R_j

بزرگ‌ترین عدد شاخص R برای هر گزینه: R^-

کوچک‌ترین عدد شاخص R برای هر گزینه: R^*

تابع مزیت: Q_j

الگوریتم حل این مدل تصمیم‌گیری، به‌صورت زیر است (آذر و رجب‌زاده، ۱۳۸۱):

۱. تعیین بهترین (f_i^*) و بدترین (f_i^-) مقدار از میان مقادیر موجود برای هر شاخص در ماتریس تصمیم

۲. محاسبه مقدار R_j و S_j برای هر گزینه تصمیم

$$R_j = max_i \left[w_i \times \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \right] \quad (۸)$$

$$S_j = \sum_{i=1}^{n} w_i \times \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \quad (۹)$$

۳. محاسبه مقدار Q:Q تابع مزیت نامیده می‌شود و S و R را با وزن V مطابق با معادله زیر ترکیب می‌کند. V معمولاً برابر با ۰/۵ درنظرگرفته می‌شود.

$$Q_j = V * \frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} + (1 - V) * \frac{R_j - R^*}{R^- - R^*} \quad (۱۰)$$

۴. انتخاب گزینه نهایی: گزینه a با حداقل مقدار Q بهترین گزینه است. چنانچه گزینه a' پس از a دارای حداقل مقدار Q بوده و تفاوت مقادیر Q از DQ مطابق با معادله $DQ = \frac{1}{J-1}$ کمتر باشد، a' نیز در اولویت قرار می‌گیرد. J تعداد گزینه‌های تصمیم است.

روش Copeland

در این روش تعداد بردها و باخت‌ها برای هر گزینه در شاخص‌های مختلف مشخص می‌شود. برای اجرای این تکنیک یک ماتریس فاقد قطر m*m شکل می‌گیرد. اگر تعداد بردها در تکنیک‌ها بیشتر باشد، با M کدگذاری می‌شود و در آن سطر i به ستون j

ارجحیت دارد و اگر برعکس باشد یا تعداد بردها مساوی باشد با X کدگذاری می‌شود. درنهایت مجموع بردها و باخت‌های هر گزینه مبنای رتبه‌بندی قرار می‌گیرد. هرچه تعداد بردها منهای باخت‌ها بیشتر باشد، رتبه بالاتر خواهد بود (آذر و رجب‌زاده، ۱۳۹۱).

یافته‌ها

انتخاب شهرها

شهرها بر اساس مرور ادبیات، مصاحبه با خبرگان و با توجه به خاص‌ترین ویژگی هر شهر انتخاب شده‌اند. برای انتخاب شهرها نظر خبرگان به‌صورت مصاحبه باز و به روش گلوله برفی انجام شد. خبرگان شامل متخصصین در زمینه معماری، شهرسازی، مدیریت انرژی و آشنا به احداث ساختمان‌های انرژی صفر بودند. این افراد از کارشناسان و اساتید با سابقه در حوزه انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر و معماری با میزان تحصیلات کارشناسی ارشد و دکتری و با سابقه کار بالاتر از ۵ سال بودند. تعداد خبرگان ۸ نفر بوده است. آن‌ها معیارهای مهم مربوط به خانه‌های انرژی صفر را برشمردند و شهرهایی را بر اساس معیارهای ذکر شده پیشنهاد دادند.

با توجه به نظر خبرگان نهایتاً شهرهای اصفهان، ارومیه، اراک، تهران، پرند، تبریز، زنجان، سمنان، شیراز، رودسر، قزوین، کرمان، یاسوج، مشهد، منجیل، یزد و تفتان به‌عنوان شهرهای کاندید انتخاب شدند. در جدول ۲ ویژگی‌های شهرهای ذکرشده به‌اختصار آمده است.

جدول ۲. ویژگی‌های شهرهای منتخب (نوری، ۱۳۹۸)

شهر	توضیحات
تبریز	سرد و خشک، دارای ۲۷۸۴ ساعت آفتابی در کل سال، استپی خشک، تابستان‌ها گرم و خشک، زمستان‌ها سرد، میانگین دما ۱۴ درجه سلسیوس، میانگین بارندگی سالیانه در حدود ۳۳۰٫۱ میلی‌متر، دومین شهر آلوده ایران، تعداد روزهای همراه با گردوغبار ۲۸، بیشینه سرعت وزش باد ۲۱ متر بر ثانیه، میانگین رطوبت نسبی ۵۲ درصد
کرمان	اقلیم نیمه کویری، زمستان‌های سرد، جمع ساعات آفتابی ۳۴۸۶، میانگین دما ۱۷ درجه سلسیوس، ارتفاع از سطح دریا ۱۷۶۰ متر، متوسط مقدار باران در طول سال معادل ۱۳۲٫۴ میلی‌متر، تعداد روزهای همراه با گردوغبار ۲۳، بیشینه سرعت وزش باد ۲۵ متر بر ثانیه،، میانگین رطوبت نسبی ۳۰ درصد

شهر	توضیحات
یاسوج	اقلیم مدیترانه‌ای، هوای معتدل متمایل به سرد، دارای ۲۸۵۰ ساعت آفتابی در کل سال، میانگین دمای یک‌ساله ۲۰ درجه سانتی‌گراد، محدوده آسایش (۱۸ تا ۲۴)، هزینه زمین پایین، میزان بارش برف و باران زیاد، منابع آب کافی، واقع در مسیر ابرهای باران‌زای خلیج فارس، دارای یخچال‌های طبیعی، تعداد روزهای همراه با گردوغبار ۳۴، بیشینه سرعت وزش باد ۱۴ متر بر ثانیه، میانگین رطوبت نسبی ۴۱ درصد
شیراز	گرم و خشک، ۳۳۶۰ ساعت آفتابی در سال، میانگین دما ۱۸ درجه سلسیوس، تعداد روزهای همراه با گردوغبار ۷۳، بیشینه سرعت وزش باد ۱۶ متر بر ثانیه، میانگین رطوبت نسبی ۳۸ درصد
تفتان	دو اقلیم متفاوت حوزه دهستان تفتان جنوبی و ماحول آن با آب‌وهوای کوهستانی، سرد و نیمه‌خشک واقع در موقعیت شرقی و شمال شرقی–سایر نقاط دارای آب‌وهوای گرم و نیمه‌خشک در پهنه دشتی و موقعیت شمالی –جنوبی و غربی، میانگین دمای سالانه ۲۰ درجه سانتی‌گراد، روزهای یخبندان سالانه ۲۰ روز
منجیل	دارای ویژگی‌های شبه مدیترانه‌ای، محل تلاقی سه نوع آب‌وهوای معتدل خزر، کوهستانی البرز و گرم و خشک مرکزی ایران، باد نسبتاً شدید اغلب در بهار و تابستان با شدت بیشتر و در پاییز و زمستان با شدت کمتر می‌وزد، درجه حرارت ۲۹ درجه سانتی‌گراد، میانگین دمای سالیانه ۱۸ درجه سلسیوس، میانگین رطوبت نسبی ۵۶ درصد، بیشینه سرعت باد ۲۸ متر بر ثانیه، بارش ۰/۴ میلی‌متر
ارومیه	هوا در تابستان نسبتاً گرم و در زمستان سرد، جمع ساعات آفتابی ۲۹۰۲، میانگین دما ۱۲ درجه سلسیوس، واقع در ۲۰ کیلومتری دریاچه ارومیه، تعداد روزهای همراه با گردوغبار ۱۶، بیشینه سرعت وزش باد ۲۳ متر بر ثانیه، میانگین رطوبت نسبی ۵۷ درصد
قزوین	تابستان خنک، زمستان سرد، جمع ساعات آفتابی ۳۰۱۹، میزان بارش سالیانه حدود ۳۱۸ میلی‌متر، دمای متوسط هوا ۱۴ درجه سانتی‌گراد، رطوبت حداکثر در ماه‌های زمستان و رطوبت حداقل در ماه‌های تابستان، میانگین سالانه نم نسبی ۵۱ درصد، همیشه با کمبود آب مواجه بوده، تعداد روزهای همراه با گردوغبار ۲۰، بیشینه سرعت وزش باد ۲۶ متر بر ثانیه، میانگین رطوبت نسبی ۵۱ درصد
سمنان	خشک و معتدل، در تابستان گرم و در زمستان سرد، جمع ساعات آفتابی ۳۲۰۴، میزان متوسط بارندگی سالانه ۱۴۰ میلی‌متر، میانگین دما ۱۹ درجه سلسیوس، متوسط درجه حرارت سالانه ۱۷/۰۱ درجه سانتی‌گراد (حداکثر مطلق حرارت ۵/۴۳ درجه سانتی‌گراد و حداقل مطلق ۴/۸- درجه سانتی‌گراد)، متوسط تعداد روزهای یخبندان در طول سال در حدود ۴۸ روز، تعداد روزهای همراه با گردوغبار ۲۷، بیشینه سرعت وزش باد ۱۶ متر بر ثانیه، میانگین رطوبت نسبی ۳۳ درصد
اراک	دارای ۲۹۶۸ ساعت آفتابی در کل سال، میانگین دما ۱۵ درجه سلسیوس، زمستان‌ها سرد و مرطوب، تابستان‌ها گرم و خشک، دارای ویژگی اقلیمی فلات مرکزی ایران، اقلیم بر پایه طبقه‌بندی دمارتن، نیمه‌خشک و بر پایه طبقه‌بندی آمبرژه، نیمه‌خشک و سرد، متوسط میزان بارندگی در سال حدود ۷/۳۴۱ میلی‌متر، یکی از آلوده‌ترین شهرهای ایران، تعداد روزهای همراه با گردوغبار ۸۴، بیشینه سرعت وزش

شهر	توضیحات
	باد ۲۷ متر بر ثانیه، میانگین رطوبت نسبی ۴۳ درصد
اصفهان	معتدل رو به سرد، مقدار بارش باران و برف به نسبت متوسط، جمع ساعات آفتابی ۳۴۳۰، میانگین دما ۱۷ درجه سلسیوس، حداکثر درجه حرارت در تابستان ۳۹ درجه سانتی‌گراد، تابستان‌های گرم و خشک، زمستان تا حداکثر ۱۸-درجه، میانگین سرعت باد غالب در شهر اصفهان بین ۸/۲ تا ۴/۳ متر بر ثانیه، تعداد روزهای همراه با گردوغبار ۵۰، بیشینه سرعت وزش باد ۲۲ متر بر ثانیه، میانگین رطوبت نسبی ۳۳ درصد
یزد	دارای آب‌وهوای اقلیمی ـ گرم و خشک و بیابانی، جمع ساعات آفتابی ۳۴۹۰، میانگین دما ۲۱ درجه سلسیوس، نوسان دما در تابستان و زمستان و حتی در شب و روز بالا و متغیر، بارش اندک همراه با تبخیر شدید، دور بودن از دریا، نزدیکی با کویر خشک و پهناور نمک، رطوبت نسبی کم همراه با گرمای بسیار، نوسان شدید درجه حرارت، تعداد روزهای همراه با گردوغبار ۵۳، بیشینه سرعت وزش باد ۲۴ متر بر ثانیه، میانگین رطوبت نسبی ۲۵ درصد
مشهد	دارای آب‌وهوای متغیر، معتدل و متمایل به سرد و خشک، تابستان‌های گرم و خشک، زمستان‌های سرد و مرطوب، جمع ساعات آفتابی ۳۱۰۱، میانگین دما ۱۷ درجه سلسیوس، بیشینه درجه حرارت در تابستان‌ها ۴۳ درجه بالای صفر و کمینه آن در زمستان‌ها ۲۲ درجه زیر صفر، تعداد روزهای همراه با گردوغبار ۱۱، بیشینه سرعت وزش باد ۲۵ متر بر ثانیه، میانگین رطوبت نسبی ۴۴ درصد
زنجان	نیمه‌خشک، جمع ساعات آفتابی ۲۸۵۰، متوسط بارش ۲۹۵ میلی‌متر، دما سالیانه ۱۰٫۹ درجه سلسیوس، رطوبت سالیانه ۵۴ درصد، متوسط حداقل دما در سردترین ماه ۷٫۵- و متوسط حداکثر دما در گرم‌ترین ماه ۳۲٫۱ درجه، حداکثر سرعت باد ثبت‌شده به میزان ۲۷ متر بر ثانیه ۹۷ کیلومتر بر ساعت، تعداد روزهای همراه با گردوغبار ۳۱، بیشینه سرعت وزش باد ۲۶ متر بر ثانیه، میانگین رطوبت نسبی ۵۲ درصد
پرند	میزان بارندگی بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر، دما به‌طور متوسط ۶/۱۶ درجه سانتی‌گراد، دامنه هوا (۵/۳۶ و ۲-) درجه سانتی‌گراد، رطوبت هوا بین ۲۴ تا ۶۶ درصد، بیشترین وزش باد در بهار و زمستان
تهران	اقلیم نیمه‌خشک، آب‌وهوا در مناطق کوهستانی شمال اندکی مرطوب و معتدل و با گسترش رو به جنوب گرم و خشک می‌شود، جمع ساعات آفتابی ۲۹۸۳، میانگین دما ۱۹ درجه سلسیوس، حداکثر و حداقل مطلق درجه حرارت ۴۱ تا ۶- درجه سانتی‌گراد، میزان بارندگی سالیانه در حدود ۳۲۷ میلی‌متر، تعداد روزهای همراه با گردوغبار ۲۴، بیشینه سرعت وزش باد ۲۲ متر بر ثانیه، میانگین رطوبت نسبی ۳۴ درصد
رودسر	معتدل و مرطوب، به لحاظ آب و هوایی تحت تأثیر سه بخش ساحلی، جلگه‌ای و کوهپایه‌ای، میانگین دمای سالانه ۱۵/۸ درجه سانتی‌گراد، بارش سالانه ۱۱۷۸ میلی‌متر، روزهای یخبندان سالانه ۳۶

تعیین شاخص‌ها برای ارزیابی شهرهای منتخب برای ساخت خانه‌های انرژی صفر

با توجه به‌مرور ادبیات معیارهای اولیه تأثیرگذار در ساخت خانه‌های انرژی صفر، مطابق با جدول ۳ مشخص گردید.

پس از تعیین شاخص‌های اولیه، پرسشنامه‌ای برای دریافت نظر خبرگان و تعیین شاخص‌های نهایی و یا شاخص‌هایی که در نظر گرفته نشده است طراحی و نظر خبرگان جمع‌آوری گردید.

پس از جمع‌آوری نظر خبرگان و با استفاده از روش دلفی فازی و در نظر گرفتن حد آستانه ۵، شاخص‌های زیر برای ارزیابی شهرهای منتخب برای ساخت خانه‌های انرژی صفر مشخص گردیدند.

- معیار فنی: دسترسی به فناوری ساخت پیشرفته
- معیارهای آب‌وهوا: نوع اقلیم، آلودگی هوا
- معیار برنامه‌ریزی شهری: تراکم شهری
- معیار اقتصادی: هزینه زمین
- معیار زمین‌گرمایی: نزدیک به نوار ماگما
- معیار مکان‌یابی نیروگاه بادی: سرعت باد، چگالی توان باد، شیب زمین
- معیار مکان‌یابی خورشیدی: میزان گردوغبار، ساعات آفتابی، درجه حرارت، میزان رطوبت، میزان تابش مستقیم خورشید، میزان ابرناکی

جدول ۳. شاخص‌های مؤثر انتخاب شهر برای ساخت ساختمان انرژی صفر

شاخص اصلی	شاخص فرعی
مکان‌یابی خورشیدی	میزان گردوغبار (صادقی، اصفهانی و حری، ۱۳۹۲)
	ساعات آفتابی (صادقی، اصفهانی و حری، ۱۳۹۲)
	درجه حرارت (صادقی، اصفهانی و حری، ۱۳۹۲)
	رطوبت (صادقی، اصفهانی و حری، ۱۳۹۲)
	تابش مستقیم (فرجی، پاک‌طینت، رحیمی و عشورنژاد، ۱۳۹۲)

شاخص اصلی	شاخص فرعی
	میزان ابرناکی[۱] (فرجی، پاک‌طینت، رحیمی و عشورنژاد، ۱۳۹۲)
مکان‌یابی نیروگاه بادی	سرعت باد (صادقی، اصفهانی و حری، ۱۳۹۲)
	چگالی توان باد (عزیزی، جعفری، ملک محمدی و خوش‌اخلاق، ۱۳۹۳)
	شیب (عزیزی، جعفری، ملک محمدی و خوش‌اخلاق، ۱۳۹۳)
زمین‌گرمایی	نزدیکی به نوار ماگما
فنی	دسترسی به فناوری ساخت پیشرفته
آب‌وهوا	اقلیم
	آلودگی هوا
برنامه‌ریزی شهری[۲] (Kanters & Wall, 2014)	تراکم شهری (Hui, 2001)

تعیین وزن شاخص‌ها

وزن شاخص‌ها با استفاده از روش دلفی فازی محاسبه شد. قابل‌ذکر است وزن‌ها نرمالایز شدند.

ماتریس تصمیم

ماتریس تصمیم با استفاده اطلاعات موجود و نظر متخصصین تکمیل شد.

روش SAW

با توجه به وزن محاسبه‌شده با استفاده از روش دلفی فازی و با توجه به نوع هر شاخص که مقدار بیشتر یا کمتر آن مطلوب است، ماتریس تصمیم نرمالایز شد. سپس هر بردار سطری از ماتریس به‌دست‌آمده (میزان امتیاز هر شهر در هر شاخص) در بردار وزن شاخص‌ها

---

۱. در اینجا منظور از میزان ابرناکی تعداد روزهای ابری در منطقه است. هرچقدر تعداد روزهای ابری بیشتر باشد، به دلیل به حداقل رسیدن تابش دریافتی، مقدار تولید به‌شدت افت کرده و گاهی ممکن است به صفر برسد. میانگین درصد ابرناکی در ایران حدود ۴۰ درصد است (ناسا، ۲۰۰۹).

۲. منظور از برنامه‌ریزی شهری مراقبت ویژه جهت تراکم ساختار شهری، ادغام عناصر معماری و استفاده از فضاها و همچنین هماهنگی سیستم‌های انرژی است.

ضرب شده و امتیاز مربوط به هر شهر مطابق با جدول ۴ محاسبه شده است.

جدول ٤. نتایج روش SAW

شهر	امتیاز	رتبه	شهر	امتیاز	رتبه
تبریز	۰/۰۷۵۶	۱	اراک	۰/۰۵۶۷	۱۰
کرمان	۰/۰۷۴۰	۲	اصفهان	۰/۰۵۳۵	۱۱
یاسوج	۰/۰۷۰۰	۳	یزد	۰/۰۵۳۴	۱۲
شیراز	۰/۰۶۶۵	۴	مشهد	۰/۰۵۲۹	۱۳
تفتان	۰/۰۶۴۹	۵	زنجان	۰/۰۵۱۴	۱۴
منجیل	۰/۰۶۳۶	۶	پرند	۰/۰۴۶۹	۱۵
ارومیه	۰/۰۶۲۶	۷	تهران	۰/۰۴۶۲	۱۶
قزوین	۰/۰۵۸۰	۸	رودسر	۰/۰۴۵۸	۱۷
سمنان	۰/۰۵۷۲	۹			

نتایج روش TOPSIS

پس از اجرای روش TOPSIS، رتبه‌بندی شهرها مطابق با جدول ۵ مشخص گردید. همان‌گونه که در بخش روش توضیح داده شد، شهرها بر اساس حداقل مقدار C_i رتبه‌بندی شدند.

جدول ۵. نتایج روش TOPSIS

شهر	C_i	رتبه	شهر	C_i	رتبه
تبریز	۰/۴۸۸	۴	قزوین	۰/۵۶۷	۱۲
کرمان	۰/۶۶۱	۱۷	سمنان	۰/۵۹۷	۱۴
یاسوج	۰/۳۹۱	۱	اراک	۰/۴۷۹	۳
شیراز	۰/۴۵۵	۲	اصفهان	۰/۶۰۶	۱۵
تفتان	۰/۶۳۳	۱۶	یزد	۰/۵۵۹	۱۰
منجیل	۰/۵۳۵	۸	مشهد	۰/۵۸۵	۱۳
ارومیه	۰/۵۶۶	۱۱	زنجان	۰/۵۳۶	۹
پرند	۰/۵۳۰	۷	رودسر	۰/۵۰۳	۵
تهران	۰/۵۲۰	۶			

نتایج روش VIKOR

پس از اجرای روش VIKOR، رتبه‌بندی شهرها به شرح جدول ۶ مشخص گردید. همان‌گونه که در بخش روش توضیح داده شد، شهرها بر اساس حداقل مقدار Q و همچنین باتوجه به مقدار DQ رتبه‌بندی شدند.

جدول ٦. نتایج روش VIKOR

شهر	Q_i	رتبه	شهر	Q_i	رتبه
تبریز	۰/۵۰۰	۵	اراک	۰/۱۴۸	۲
کرمان	۰/۱۷۹	۲	اصفهان	۰/۰۲۲	۱
یاسوج	۰/۲۸۹	۴	یزد	۰/۱۷۹	۲
شیراز	۰/۱۵۵	۲	مشهد	۰/۰۲۵	۱
تفتان	۰/۲۸۹	۴	زنجان	۰/۵۰۰	۵
منجیل	۰/۵۰۰	۵	پرند	۰/۱۲۴	۲
ارومیه	۰/۵۰۰	۵	تهران	۰/۲۱۸	۳
قزوین	۰/۵۰۴	۱	رودسر	۰/۵۰۰	۵
سمنان	۰/۰۰	۱			

نتایج روش Copeland

پس از رتبه‌بندی شهرهای مختلف با استفاده از سه روش SAW، TOPSIS و VIKOR از روش Copeland برای ادغام نتایج و مطابق با توضیحات ذکرشده در بخش روش استفاده شد. پس از اجرای روش Copeland شهرهای مختلف به ترتیب زیر اولویت‌بندی شدند. ۱- یاسوج،۲- تبریز و شیراز، ۳- اراک، ۴- قزوین، ۵- سمنان، ۶- کرمان، ۷- اصفهان و منجیل، ۸- یزد و مشهد، ۹- پرند و تهران، ۱۰- ارومیه و تفتان و ۱۱- زنجان و رودسر.

شهر یاسوج اولویت اول و شهرهای تبریز و شیراز اولویت دوم و شهر اراک اولویت سوم را از آن خود کرد. شهر یاسوج از استان کهکیلویه و بویراحمد دارای اقلیم خشک و نیمه بیابانی است. این شهر دارای ۲۸۵۰ ساعت آفتابی در کل سال است و جایگاه مناسبی جهت بهره‌مندی از انرژی خورشیدی دارد. نکته حائز اهمیت دیگر در شهر یاسوج، هزینه

زمین پایین به نسبت شهرهای دیگر است که معیار اقتصادی خوبی به‌خصوص برای سرمایه‌گذاری در این شهر است. میانگین دمای یک‌ساله این شهر ۲۰ درجه سانتی‌گراد است که در محدوده آسایش (۱۸ تا ۲۴) قرار دارد؛ بنابراین میزان تولید انرژی برای ایجاد سرما و گرما کاهش‌یافته و می‌توان با راندمان بالاتری از انرژی‌های تولیدشده استفاده گردد. همچنین معیار میزان توزیع تابش مستقیم خورشید که ازجمله عوامل محیطی مؤثر برای ساخت یک ساختمان انرژی صفر است؛ معیار دیگری است که در یاسوج رتبه سوم را بعد از تفتان و کرمان با اختلاف خیلی کم به خود اختصاص می‌دهد.

در مورد شهرهای رتبه دوم (تبریز و شیراز) می‌توان به اقلیم این دو شهر به ترتیب سرد و خشک و گرم و خشک اشاره کرد که جز مناسب‌ترین اقلیم‌ها برای ساخت خانه‌های انرژی صفر با راندمان بالا هستند. همان‌طور که در مرور ادبیات و مصاحبه با خبرگان مطرح گردید، شهرهایی با رطوبت بالا برای بهره‌مندی حداکثری از انرژی‌های تجدیدپذیر مناسب نیستند. همچنین شهرهای سردسیر مناسب‌تر از شهرهای گرمسیر برای ساخت خانه‌های انرژی صفر هستند زیرا تولید گرما راحت از تولید سرما است؛ بنابراین انتخاب تبریز نسبت به انتخاب یک شهر گرم جنوبی مانند بندرعباس می‌تواند انتخاب مناسب‌تری باشد. در مطالعه این دو شهر می‌توان به میزان ساعت‌های آفتابی بالای آن‌ها اشاره کرد. تبریز دارای ۲۷۸۴ ساعت آفتابی در کل سال و شیراز دارای ۳۳۶۰ ساعت آفتابی در سال است که هر دو این مقادیر می‌تواند منجر به بهره‌مندی بالایی از انرژی خورشیدی شود. میزان دستیابی به فناوری‌های پیشرفته در تبریز و شیراز به ترتیب ۳/۱۹ و ۳/۳۲ است که در مقایسه با بالاترین میزان که ۴/۰۵ است میزان قابل‌توجهی است.

شهر اراک رتبه سوم را از میان سایر شهرها به خود اختصاص داده است و از دلایل این برتری می‌توان به میزان ساعات آفتابی در کل سال اشاره کرد. این شهر دارای ۲۹۶۸ ساعت آفتابی در کل سال است. همچنین میزان دسترسی به فناوری‌های پیشرفته در این شهر ۳/۲۳ است؛ بر اساس مصاحبه با خبرگان نیز مطرح شد شهرهایی که دارای فناوری‌های پیشرفته هستند برای ساخت خانه‌های انرژی صفر مناسب‌ترند.

بحث و نتیجه‌گیری

هم‌زمان با آلودگی‌های زیست‌محیطی و تخریب و فرونشست خاک در مناطق مختلف ایران و همچنین تحریم‌های مختلف بر صنایع نفت و گاز، توجه به رونق و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر موردتوجه قرار گرفته است. شناخت مکان‌های مناسب برای بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر مسئله‌ای است که نیازمند در نظر گرفتن عوامل بسیاری است که تجزیه‌وتحلیل را مشکل می‌سازد. در شرایط نوسانات اقتصادی کشور و نوسانات انتقال انرژی‌های فسیلی همچون گاز و برق می‌توان با ساخت این ساختمان‌ها تهدیدات اقتصادی را تبدیل به فرصت نمود. در پژوهش حاضر با مطالعه منابع مرتبط و با بهره‌گیری از تجربیات و نظر خبرگان، شهرهای مناسب برای ساخت ساختمان‌های انرژی صفر معرفی و اولویت‌بندی شدند. در این راستا موارد زیر انجام شد:

– تعیین شهرهای منتخب برای ساخت ساختمان‌های انرژی صفر: برای انتخاب این شهرها مصاحبه باز با روش گلوله برفی با اساتید و متخصصان حوزه معماری و انرژی کشور انجام شد. با مطالعه معیارهای اعلام‌شده توسط خبرگان تعداد ۱۷ شهر انتخاب شدند.

– تعیین شاخص‌ها برای اولویت‌بندی شهرها برای ساخت ساختمان‌های انرژی صفر: برای انتخاب شاخص‌ها در ابتدا به مطالعه ادبیات پیشین و پژوهش‌های مشابه در حوزه ساختمان‌های انرژی صفر پرداخته شد. تعدادی از معیارها استخراج گردید و در گام بعد این معیارها به روش دلفی فازی و با دریافت نظر خبرگان مشخص گردیدند. همچنین طبق پیشنهاد و نظر خبرگان برخی دیگر از معیارها در این مرحله اضافه شدند.

– اولویت‌بندی شهرها برای ساخت ساختمان‌های انرژی صفر: برای اولویت‌بندی شهرها ابتدا ماتریس تصمیم بر اساس شهرها و معیارها تشکیل شد و پس از جمع‌آوری داده‌ها و با داشتن وزن شاخص‌ها، با استفاده از روش‌های SAW، TOPSIS و VIKOR شهرها رتبه‌بندی شدند. در آخر با استفاده از روش Copeland نتایج ادغام شدند و رتبه‌بندی نهایی مشخص شد.

نتایج نهایی نشان داد شهرهای یاسوج، تبریز، شیراز و اراک بهترین گزینه برای

احداث ساختمان‌های انرژی صفر در کشور ایران هستند. در این شهرها می‌توان به نحو مناسبی از انرژی‌های تجدیدپذیر برای ساخت خانه‌های صفر انرژی استفاده کرد.

پیشنهاد می‌شود مکان‌یابی نقطه‌ای در شهرهای منتخب برای ساخت خانه‌های انرژی صفر صورت گیرد و نیز ازنظر اقتصادی طرح ساخت شهرک انرژی صفر در شهرهای منتخب بررسی شود.

با توجه به اینکه در این پژوهش طبق نظر خبرگان برخی از شهرهای کشور انتخاب و موردبررسی قرار گرفته‌اند، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی تمام شهرهای ایران موردبررسی قرار گیرند و خبرگان از روش حذفی و یا امتیازدهی، شهرهای موردنظر را پیشنهاد دهند.

همچنین با توجه به اینکه در این پژوهش به بررسی شرایط محیطی مناسب برای ایجاد ساختمان‌های انرژی صفر پرداخته شده است، پیشنهاد می‌شود شرایط معماری همچون نوع مصالح ساخت، زاویه دریافت نور خورشید و مساحت پنجره‌ها و دیوارها برای ساخت خانه‌های انرژی صفر موردمطالعه قرار گیرد.

تعارض منافع

تعارض منافع وجود ندارد.

سپاسگزاری

نویسندگان از تمام متخصصینی که در جمع‌آوری اطلاعات لازم برای انجام این تحقیق همکاری نمودند، تشکر می‌کنند.

ORCID

Aliyeh Kazemi **http://orcid.org/0000-0002-0755-7800**
Parichehr Nouri **http://orcid.org/0000-0001-6859-2901**
Sara Aryaee **http://orcid.org/0000-0002-1825-1778**

منابع

ادریس آبادی، علی (۱۳۹۶). طراحی یک ساختمان انرژی صفر و بهینه برای مناطق گرم و خشک و ارزیابی کاهش آلاینده‌ها، کارشناسی ارشد، *پژوهشگاه مواد و انرژی*.

آذر، عادل؛ فرجی، حجت (۱۳۸۲)، *علم مدیریت فازی*، مرکز مطالعات مدیریت و بهره‌وری ایران.

اصغر پور، محمدجواد (۱۳۹۴). *تصمیم‌گیری چند معیاره*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

پیرمحمدی، محسن، عاکف، علی. (۱۳۹۵). بررسی مصرف انرژی در یک ساختمان سبز نمونه و مقایسه آن با ساختمان‌های معمولی .*دو فصلنامه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو*. ۳(۲) ۲۹-۲۴.

جهانشیر، زهرا؛ شهریار شقاقی، (۱۳۹۶). بررسی راهکارهای طراحی هتل صفر انرژیZEB در شهر ارومیه، *کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر*، تهران، دانشگاه اسوه - تهران - دانشگاه شهید بهشتی.

جوانشیر، معصومه. (۱۳۹۴). ساختمان انرژی صفر. *اولین همایش علمی پژوهشی افق‌های نوین در علوم جغرافیا و برنامه‌ریزی، معماری و شهرسازی ایران*، تهران، انجمن علمی توسعه و ترویج علوم و فنون بنیادین.

خدابخشی، شهره و مفیدی، سیدمجید (۱۳۸۰). ساخت‌وساز پایدار در ارتباط با معماری سنتی ایران. *سومین همایش ملی انرژی*، تهران، کمیته ملی انرژی جمهوری اسلامی ایران، معاونت امور برق و انرژی وزارت نیرو.

خیری، رضا؛ مریم قاسمی سیچانی و مقدی خدابخشیان کنارکی، (۱۳۹۵). طراحی خانه با تئوری انرژی صفر، نمونه موردمطالعه: شهر اصفهان، *کنفرانس دو سالانه جامعه و معماری معاصر*، اصفهان، موسسه معماری و شهرسازی سفیران راه مهرازی.

سازمان بهره‌وری انرژی ایران (۱۳۸۹). آموزش مدیریت مصرف انرژی. www.saba.org.ir/saba_content/media/image/2009/03/133_orig.pdf

شکارچی، فرناز، (۱۳۹۴). ارزیابی کیفیت دیوارهای سبز در مقایسه با دیتیل‌های صفر انرژی در کیفیت معماری پایدار، *همایش بین‌المللی معماری عمران و شهرسازی در آغاز هزاره سوم*، تهران، کانون سراسری انجمن‌های صنفی مهندسان معمار ایران.

صادقی زین‌العابدین، دلال‌باشی اصفهانی زهرا، حری حمیدرضا. (۱۳۹۲). اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر مکان‌یابی نیروگاه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر (انرژی خورشیدی و انرژی باد) استان کرمان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تکنیک‌های تصمیم‌گیری

چند معیاره. *فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی*.; ۱ (۲): ۹۳-۱۱۰.

عزیزی علی، جعفری حمیدرضا، ملک محمدی بهرام، خوش‌اخلاق فرامرز. (۱۳۹۳). مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با استفاده از مدل‌های تحلیل سلسله‌مراتب فازی و تحلیل شبکه در استان اردبیل. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*. ۱۴ (۳۴): ۱۷۵-۱۹۴.

فرجی سبکبار، حسنعلی، پاک‌طینت، هادی، رحیمی‌کیان، اشکان، عشورنژاد، غدیر. (۱۳۹۲). تناسب‌سنجی اراضی به‌منظور احداث مزارع فتوولتائیک به کمک تلفیق سیستم‌های جمع سادهٔ وزنی و استنتاج فازی در ایران .*پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، (۴)۴۵، ۴۵-۶۰.

نوری، پریچهر (۱۳۹۸). شناسایی و اولویت‌بندی شهرهای مناسب برای ساخت خانه‌های انرژی صفر در ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مدیریت دانشگاه تهران.

وزارت نیرو (۱۳۹۲). ترازنامه انرژی ایران. دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، معاونت امور برق و انرژی.

Amaral, A. R., Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2018). Review on performance aspects of nearly zero-energy districts. *Sustainable cities and society*, 43, 406-420.

Asgharpour, Mohammad Javad. (2015). *Multi-criteria decision making.* Tehran: University of Tehran Press. (In Persian)

Azar, Adel. Faraji, Hojjat. (2003), *Fuzzy Management Science*. Iran Management & Productivity Study Center (IMPSC). (In Persian)

Azizi Ali, Jafari Hamidreza, Malek Mohammadi Bahram, Faramarz. (2014). Location of wind power plants using fuzzy hierarchical analysis and network analysis models in Ardabil province. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*. 14 (34): 175-194. (In Persian)

Causone, F., Carlucci, S., Pagliano, L., & Pietrobon, M. (2014). A zero-energy concept building for the Mediterranean climate. Energy Procedia, 62, 280-288.

Deng, S., Dalibard, A., Martin, M., Dai, Y. J., Eicker, U., & Wang, R. Z. (2011). Energy supply concepts for zero energy residential buildings in humid and dry climate. *Energy conversion and management*, *52*(6), 2455-2460.

Edris Abadi, Ali. (2017). *Design of a zero and optimal energy building for hot and dry areas and assessment of pollution reduction*, M.Sc., Materials and Energy Research Institute. (In Persian)

Energy Efficiency Organization of Iran. (2010). Energy consumption management training. www.saba.org.ir (In Persian)

Faraji Sabokbar, H., Hadi, P., RahimiKian, A., Ashournejad, Q. (2014).

Suitability Assessment of Lands to Establish Photovoltaic Fields by Combining Fuzzy Inference Systems and Simple Additive Weighting in Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 45(4), 45-60. doi: 10.22059/jphgr.2014.50071. (In Persian)

Gavanshir, Massoumeh. (2015). Zero energy building. *The first scientific research conference of new horizons in geography and planning sciences, architecture and urban planning of Iran*, Tehran, Scientific Association for the Development and Promotion of Basic Sciences and Technologies. (In Persian)

https://globalwindatlas.info/

https://www.iea.org

https://solargis.com/

Hui, S.C. (2001). Low energy building design in high density urban cities. *Renewable energy*, 24(3-4), 627-640.

Jahanshir, Zahra. Shahriar Shaghaghi. (2017). Investigating the design strategies of ZEB Zero Energy Hotel in Urmia. *International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development of Contemporary Iran*, Osve Higher Education Institute and Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (In Persian)

Kanters, J., & Wall, M. (2014). The impact of urban design decisions on net zero energy solar buildings in Sweden. *Urban, Planning and Transport Research*, 2(1), 312-332.

Kylili, A., & Fokaides, P. A. (2015). European smart cities: The role of zero energy buildings. *Sustainable Cities and Society*, 15, 86-95.

Kheyri, Reza., Maryam Ghasemi Sichani and Moghadi Khodabakhshian Konaraki, (2016). *Design of a house with zero energy theory, case study: Isfahan*. Biennial Conference of Community and contemporary architecture, Isfahan, *Safiran*-e *Rah*-e *Mehrazi Institute of Architecture and Urban Development*. (In Persian)

Khodabakhshi, Shohreh and Mofidi, Seyed Majid (2001). Sustainable construction in connection with traditional Iranian architecture. *National Energy Congress*, Tehran, National Energy Committee of the Islamic Republic of Iran, Deputy Minister of Electricity and Energy of the Ministry of Energy. (In Persian)

Ministry of Energy. (2013). Iran Energy Balance. Electricity and Energy Macro Planning Office, Deputy Minister for Electricity and Energy. (In Persian)

Nouri, Parichehr. (2019). Identifying and prioritizing suitable cities to builde zero energy houses in Iran. *Master Thesis, Faculty of Management, University of Tehran.* (In Persian)

Pirmohammadi, M., Akef, A. (2016). Investigation of energy consumption in a sample green building and compare it with conventional buildings.

Journal of Renewable and New Energy, 3(2), 24-29. (In Persian)

Rasmussen, F. N., Malmqvist, T., Moncaster, A., Wiberg, A. H., & Birgisdóttir, H. (2018). Analysing methodological choices in calculations of embodied energy and GHG emissions from buildings. *Energy and Buildings*, 158, 1487-1498.

Sadeqi Z, Dalalbashi Esfahani Z, Horri H R. Prioritize the Factors Affecting the Location of Renewable Energy Plants (Solar and Wind Energy) in Kerman Province Using GIS and Multi-Criteria Decision-Making Techniques. (2013). *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*, 0 (2), 93-110. (In Persian)

Shekarchi, Farnaz. (2015). Evaluate the quality of green walls compared to zero energy details in sustainable architectural quality. International conference architectural, civil and urban development at the beginning of the third millennium, Tehran. Association of Iranian architecture. (In Persian)

Shen, Y.C., Chang, S.H., Lin, G.T.R. and Yu, H.C. (2010), A Hybrid Selection Model for Emerging Technology, *Technological Forecasting and Social Change*, 77 (1), 151-166.

Torcellini, P. A., & Crawley, D. B. (2006). Understanding zero-energy buildings. *ASHRAE journal*, 48(9), 62-69.

Wang, L., Gwilliam, J., & Jones, P. (2009). Case study of zero energy house design in UK. *Energy and buildings*, 41(11), 1215-1222.

Zhang, J. (2017). Evaluating regional low-carbon tourism strategies using the fuzzy Delphi-analytic network process approach, *Journal of Cleaner Production*, 141, 409–419.

استناد به این مقاله: کاظمی، عالیه.، نوری، پریچهر.، آریایی، سارا. (۱۴۰۱). شناسایی و اولویتبندی شهرهای مناسب برای ساخت خانههای انرژی صفر با استفاده از روشهای تصمیمگیری چندشاخصه (موردمطالعه: ایران)، *فصلنامه برنامه‌ریزی توسعه شهری و منطقه‌ای*، ۷(۲۱)، ۵۹-۸۶.

DOI: 10.22054/URDP.2022.65055.1397

Urban and Regional Development Planning is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License...