



Journal of Environmental Studies

Vol. 47, No. 1, Spring 2021

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir

Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Determination and Prioritization of Criteria for Urban Energy Resilience Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)

Document Type
Research Paper

Leila Mohaghegh¹, Madjid Abbaspour Abbaspour^{2*}, Jamal Ghodoosi³, Ayyoob Sharifi⁴

Received
January 16, 2021

Accepted
April 21, 2021

1 Department of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2 Faculty of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

3 Soil and Water Conservation Center, Tehran, Iran

4 Graduate School of Humanities and Social Sciences, Hiroshima University, Hiroshima, Japan

DOI: [10.22059/JES.2021.322334.1008167](https://doi.org/10.22059/JES.2021.322334.1008167)

Abstract:

Today, around 60% of the world's population lives in urban areas. Cities are major consumers of energy, hence the building of urban energy resiliency is essential.

Resiliency of energy supply in urban areas can be categorized in two approaches, short-term approach, the ability of coping with threats such as earthquakes, floods, etc., and long-term approach to deal with impacts of climate change and global warming on energy supply.

In this paper, using literature review, expert survey, and Fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) method, the main criteria were categorized into four themes: technical and infrastructure, built environment, governance, and socio-cultural. The sub-criteria of each group were also prioritized in both approaches. In short-term approach, the sub-criteria with high priority in energy resiliency include energy storage system, urban development pattern and population density, education planning, participatory governance, and culture building and public awareness. In the long term, they include increasing energy efficiency through innovation, producing energy from renewable sources, mitigation methods of energy consumption in buildings, Regulatory basis and executive requirements, mechanisms for attracting private sector investment in low-carbon development, culture building and public awareness.

Also, by comparing the priorities in each sector, common influential factors in both perspectives were presented that can provide a suitable tool for managers to plan for the development of low carbon and resilient communities.

Keywords: Resiliency, Urban Energy, Criteria, FAHP, Energy management

* Corresponding author

Email: abbpor@sharif.edu

Introduction

Today, around 60 % of the world population lives in urban areas and this proportion is expected to increase in the coming decades. Over 70 % of the global energy is consumed in cities, and with the increase of urbanization rate, it is predicted that cities will be the main consumers of energy carriers in the future. Increasing consumption of energy in urban areas, can be considered as one of major driver of climate change and rising concentration of carbon dioxide in the atmosphere, which in turn can threatens the security of production, transmission and energy supply. Each of these threats have significant consequences on energy security for urban communities, and due to the close relationship between energy and water, food and health, the disruption of energy supply can cause difficulties for urban system performance. Therefore, energy resiliency in urban environment can be divided in two clusters, short - term such as earthquake, flooding, etc. and long-term in order to deal with negative impact on energy sector due to global warming and climate change. By reviewing the articles about frameworks and models of resiliency, it is noted that each of these models has developed a specific part of the energy resiliency .This comprehensive study has indicated the necessity of determining the effective factors in energy resiliency and their prioritization in order to develop an integrated model to evaluate and monitor urban energy resiliency.

Material and Method

In this study, the criteria extracted from literature review on urban resiliency in general and urban energy resiliency in particular, are divided into four categories, which include criteria related to technical and infrastructure, built environment, governance and socio-cultural. Using vast literature review, a list of effective factors including criteria and sub-criteria with mentioning their frequencies in scientific resources was obtained. Then, a questionnaire including a complete list of sub-criteria consisting of 34 factors was prepared.

The survey of experts, based on Delphi method, was conducted through questionnaire, which included 33 related faculty members, specialists and governmental managers in the field of energy. After receiving the answer, the results were recorded in SPSS statistical software and the reliability of the questionnaire was measured. A questionnaire was designed to assess the importance of each of the sub-criteria in urban energy resilience in two short-term and long-term approaches. On the next steps, the sub-criteria were prioritized in each of the four categories of technical and infrastructure, built environment, governance and socio-cultural by performing pairwise comparison and using fuzzy hierarchical analytical method (FAHP) in each approach individually.

Eventually, priorities of the four main criteria was surveyed using the paired comparison questionnaire with considering the sub-criteria of each part of the results of the previous stage, and the weight of the main criteria was obtained in two approaches using FAHP method.

Discussion of Results

According to the criteria extracted from literature review, considering their frequency in sources and surveys of experts, the following results were achieved from the analysis of data by FAHP method:

The complete list includes 34 sub-criteria, of which 13 sub-criteria are related to technical and infrastructure factors, 7 sub-criteria related to built environment factors, 11 sub-criteria related to governance factors and 3 sub-criteria related to socio-cultural factors. With the analysis of

each approach separately, the weight of sub-criteria and the priorities of each group were determined and some of the sub-criteria were removed due to its insignificance in each approach. In the short-term approach, in technical and infrastructure sector, energy storage systems have the highest priority, followed by fortification, diversification of energy carriers and distributed energy generation.

In built environment criteria, urban development pattern and population density have the highest priority. Other important items are reducing the energy footprint in water production, treatment and distribution. In governance, education and communication planning to raise public awareness, participatory governance, and scenario-based energy planning and risk management are high priorities. Culture building and public awareness of energy consumption management is an important sub-criteria in the socio-cultural sector. In the long-term approach, in technical and infrastructure criteria, increasing energy efficiency through innovation and technology is the highest importance, and energy production from renewable sources and energy intensity are other important factors in this sector.

Among the high priority criteria in built environment sector, the methods of reducing energy consumption in buildings, the diversity of transportation system and the methods of adaptation in buildings can be referred, respectively. In governance criteria, legislation and law enforcement, financial and non-financial mechanisms to attract private sector investment in low-carbon development are the highest priorities, followed by funding for research and technology development and energy pricing. In the socio-cultural sector, culture building and public awareness of energy consumption management is the most important sub-criteria in urban energy resilience, and then communal solutions to save energy can be effective in increasing resiliency. Comparing the obtained results in prioritizing the four main criteria, it is observed that in both short-term and long-term approach, governance, technical and infrastructure, built environment and socio-cultural criteria have high priority respectively.

Conclusion

Since in the short term, natural and man-made disasters and in the long term, the reduction of energy resources, and climate change can disrupt the functioning of energy supply as one of the important urban infrastructure, the issue of energy resiliency is very important in urban areas. At the beginning, research carried out in recent decades in the field of energy resilience was reviewed and the influential factors were divided into four categories: infrastructure and technology, built environment, governance, and socio-cultural. By expert's survey and fuzzy hierarchical analysis, the priorities of each criteria and Sub-criteria in both Short-term and long-term were identified, separately. It is observed that, the priorities of the sub-criteria in each category are different in both short-term and long-term approaches. The common high priority in both approaches is the education and culture building of energy consumption in socio-cultural criteria. Therefore, the importance of education and awareness in developing energy resiliency is evident.

There are also some common items in both approaches (with different priorities). In the technical and infrastructure criteria, energy production from renewable sources, distributed energy generation, diversity of energy supply, diversity of energy carriers and energy storage can be emphasized. This shows the importance of using renewable energy in the urban areas, because the use of renewable resources covers many resilience characteristics such as diversity, storage and distributed generation. In built environment criteria, all seven defined

sub-criteria are affected by different priorities. Priority in both approaches are to reduce energy consumption in the building and to diversify the transportation system. In the governance sector, all sub-criteria defined with different degrees of importance are effective, and the sub-criteria that is observed in both approaches of high importance is legislation and executive requirements. It is concluded the importance of developing and implementing laws in urban society to increase resilience. The research also has shown that, the four main criteria have almost the same priority in both approaches. In the next step by using the obtained prioritization, and quantifying each criterion, a composite index can be defined to evaluate the energy resiliency in the urban areas. The composite index allows comparing the resilience in different cities. Based on this index, the resilience of world cities can be compared in both short-term and long-term approaches. Therefore, conducting this research is the first step towards developing a comprehensive evaluation and management model of urban energy resiliency.

تعیین و اولویت‌بندی معیارهای مؤثر در تاب‌آوری انرژی در محیط شهری با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)

لیلا محقق زاهد^۱، مجید عباسپور^{۲*}، جمال قدوسی^۳، ایوب شریفی^۴

۱. دانشجوی دکتری مدیریت محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

lmohaghegh@gmail.com

۲. استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

jamal_go@yahoo.com

۳. عضو هیئت مدیره مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران

۴. استادیار دانشکده تحصیلات تکمیلی علوم انسانی و اجتماعی، دانشکده تحصیلات تکمیلی علوم پیشرفته و مهندسی، دانشگاه هیروشیما، ژاپن

sharifi@hiroshima-u.ac.jp

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۲/۱

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷

چکیده

امروزه حدود ۶۰٪ جمعیت جهان در شهرها سکونت دارند. شهرها مصرف‌کننده‌های عمده انرژی بوده و لذا ایجاد تاب‌آوری شهری در حوزه انرژی امری ضروری است. تاب‌آوری انرژی در محیط شهری را می‌توان به دو دسته کوتاه مدت نظیر توان مقابله با پدیده‌هایی همچون زلزله و سیل، و بلند مدت در جهت مقابله با تأثیرات منفی ناشی از پدیده اقلیم تقسیم نمود. در این مقاله با استفاده از منابع علمی، نظرسنجی از خبرگان، و روش تحلیل عاملی فازی، معیارهای اصلی به چهار دسته فنی و زیرساختی، محیطی انسان ساخت، حکمرانی، و اجتماعی-فرهنگی تقسیم و زیر معیارهای هر یک در هر دو رویکرد اولویت بندی گردیدند. در رویکرد کوتاه مدت، عوامل مؤثر در تاب‌آوری انرژی به ترتیب شامل ذخیره سازی انرژی، الگوی توسعه شهری، برنامه‌ریزی آموزش و فرهنگ سازی و در بلند مدت شامل افزایش راندمان انرژی، کاهش مصرف انرژی در ساختمان، قانون گذاری و آگاهی عمومی می‌باشند. همچنین با مقایسه اولویت‌ها در هر بخش، عوامل مشترک تأثیرگذار در هر دو دیدگاه ارائه گردیدند که می‌توانند ابزار مناسبی را جهت مدیریت برای برنامه‌ریزی به منظور توسعه جوامع کم کربن و تاب‌آور فراهم آورند.

کلید واژه

تاب‌آوری، انرژی شهری، معیارها، تحلیل سلسله مراتبی فازی، مدیریت انرژی

سرآغاز

امروزه اکثریت جمعیت جهان در شهرها سکونت دارند و انتظار می‌رود که سهم جمعیت شهری در دهه‌های آینده رو به افزایش باشد. از این‌رو واژه تاب‌آوری در محیط شهری

از اوایل دهه ۷۰ میلادی در ادبیات مدیریت شهری مطرح گردید (Godschalk, 2003).

شهر تاب‌آور، متشکل از شبکه‌ای پایدار از سیستم‌های

بیماریهای واگیر، حکومت و کشاورزی تمرکز داشته اند. در همین حال مطالعات محدودی با تمرکز بر توسعه معیارها و شاخصها برای ارزیابی تاب‌آوری شهری در دامنه‌های مختلف صورت گرفته است (Engle et al., 2014).

تاب‌آوری انرژی یک رشته از تاب‌آوری است که در ادبیات مدیریت شهری به خوبی مطالعه نشده است. از مطالعاتی که درباره انرژی شهری صورت گرفته اند، تنها تعداد اندکی به بررسی تاب‌آوری و انرژی به صورت همزمان پرداخته اند. این موضوع به رغم این حقیقت است که حدود ۷۰ درصد انرژی جهانی در شهرها مصرف میشود و با احتساب افزایش نرخ شهرنشینی در جهان، پیش بینی میشود که شهرها مکان اصلی مصرف سوخت جهانی در آینده باشند. با تغییر غلظت دی اکسید کربن در اتمسفر و در نتیجه تشدید اثر گازهای گلخانه‌ای، افزایش مصرف انرژی در مناطق شهری منجر به افزایش گرم شدن اقلیم شده و بنابراین می‌تواند به عنوان یک محرک اصلی در تغییرات آب و هوا در نظر گرفته شود. به نوبه‌ی خود تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی می‌تواند دارای تأثیرات منفی در بخش انرژی از طریق افزایش تقاضای انرژی و تشدید حوادث گردد که موجب تهدید امنیت ساختارهای تولید، انتقال و توزیع می‌شود. اختلال در تأمین انرژی با هر کدام از این تهدیدات (با تشدید اثر در صورت ترکیب شدن تهدیدات) دارای پیامدهای قابل توجهی برای امنیت انرژی در جوامع شهری بوده و با توجه به رابطه تنگاتنگ انرژی و آب، غذا و سلامت، اختلال در تأمین انرژی می‌تواند سبب مشکلات جدی برای عملکرد سیستم‌های شهری شود. عمده تهدیدهایی که موجب اختلال در تأمین انرژی شهری می‌شوند را می‌توان در جدول ۱ خلاصه نمود.

مروری بر مطالعات گذشته

در خصوص موضوع تاب‌آوری شهری، مفاهیم و استراتژی‌ها به منظور تاب‌آوری در مواجهه با مخاطرات محیطی و تغییرات اقلیمی و برنامه‌ریزی جهت ایجاد

کالبدی و جوامع انسانی است. سیستم‌های کالبدی، مؤلفه‌های ساخته شده و طبیعی شهرند که شامل جاده‌ها، ساختمان‌ها، زیرساخت‌ها، ارتباطات و تاسیسات تأمین انرژی و همچنین مسیرهای آب، خاک، توپوگرافی، جغرافیا و سیستم‌های طبیعی هستند. در مجموع، سیستم‌های کالبدی به مثابه بدن شهر هستند. در حین حوادث، سیستم‌های کالبدی باید باقی بمانند و در فشارهای شدید نیز به عملکرد خود ادامه دهند. شهر بدون سیستم‌های کالبدی تاب‌آور در برابر حوادث بسیار آسیب پذیر خواهد بود.

جوامع انسانی، مؤلفه‌های اجتماعی و نهادی یک شهر هستند. در مجموع، جوامع به عنوان ذهن و مغز شهر عمل می‌کنند، فعالیت‌هایش را هدایت کرده و نیازهایش را بر آورده می‌کنند. در شهر تاب‌آور در حین حوادث، شبکه‌های انسانی نیز باید بتوانند عملکردهایشان را در حد قابل قبول ادامه دهند (Vale and Campanella, 2005). شهرها مصرف‌کننده‌های عمده انرژی هستند و تأمین پایدار انرژی برای عملکرد آنها امری ضروری است. افزایش جمعیت به همراه تغییر الگوی زندگی در محیط شهر، پیچیدگی‌های عرضه و تقاضای انرژی در آینده را افزون می‌نماید (Caputo et al., 2012). از سویی دیگر، افزایش مصرف جهانی انرژی باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای و تشدید پیامدهای تغییرات اقلیم خواهد شد. تغییر اقلیم عوارضی همچون تابستان‌های گرم‌تر و زمستان‌های طولانی، وقوع سیل و طوفان و حوادث غیر مترقبه دیگری را در بر خواهد داشت، در نتیجه تقاضا برای تولید انرژی گرمایشی و سرمایشی افزایش خواهد یافت، امنیت و پایداری انرژی به خطر افتاده و پیامد آن کاهش منابع ذخیره انرژی، افزایش هزینه‌های سوخت و در شرایط بحرانی، تهدید منابع تولید، عدم امکان انتقال و توزیع انرژی خواهد بود (Lloyd-Jones, 2010).

در طول چند سال گذشته حجم زیادی از پژوهش‌های شهری در باب تاب‌آوری بوده است. این مطالعات اغلب با رویکرد تک مخاطره‌ای بوده که بر موضوعاتی نظیر کاهش مخاطرات، اکولوژی، حمل و نقل، زیرساختها، اقتصاد، فقر،

شهری و آزمودن رابطه این معیارها با اجزای اصلی چارچوب مفهومی می پردازد. چارچوب مفهومی که در این مقاله پیشنهاد شده است، از سه جزء متصل به هم شامل ابعاد مرتبط با پایداری، توانایی تاب آوری و اصول تاب آوری تشکیل شده است. برای پایدار بودن در با نظر گرفتن چهار بعد در دسترس بودن، قابل دستیابی بودن، مقرون به صرفه بودن و مورد پذیرش بودن به عنوان ابعاد مرتبط با پایداری، سیستم باید آمادگی و برنامه ریزی برای جذب، بهبود و سازگاری در برابر خطرات و ریسک را نیز داشته باشد. تعدادی از اصول تاب آوری نیز تعریف شده اند. انطباق با این اصول برای افزایش تاب آوری انرژی شهری ضروری است.

شهرهای تاب آور، مطالعات گسترده ای صورت گرفته است Jabareen (۲۰۱۲)، Abhas و همکاران (۲۰۱۳)، Béné و همکاران (۲۰۱۸)، صالحی و همکاران (۱۳۹۰)، رضایی و رفیعان (۱۳۹۴). مطالعه مروری نشان داده است که در مبحث تاب آوری انرژی در محیط شهری پژوهش های کمتری صورت گرفته که به برخی از آنها اشاره می شود: در مقاله " اصول و معیارهای ارزیابی تاب آوری انرژی شهری، بررسی ادبیات موضوعی " Sharifi and Yamagata (۲۰۱۶) به بررسی ادبیات مربوط به تاب آوری انرژی برای ایجاد یک چارچوب مفهومی برای ارزیابی تاب آوری انرژی شهری، برنامه ریزی و تعیین معیارها جهت ارزیابی تاب آوری انرژی

جدول ۱. تهدیدهایی که موجب اختلال در تأمین انرژی شهری می شوند

نوع رویکرد		نوع تهدید
بلند مدت	کوتاه مدت	
	√	بلایای طبیعی مانند سیل، زلزله، طوفان (Esteban and Portugal-Pereira, 2014) (Kennedy and Corfee-Morlot, 2013; Krut et al., 2009; O .Temby, 2014)
	√	حملات تروریستی، تخریب، دزدی (O'Brien, 2009; Nik et al., 2020)
	√	اختلال فنی در سیستم های تولید، انتقال و توزیع به دلیل عدم استحکام زیرساخت (Coaffee, 2008 ; Pereira, 2014)
√		کاهش منابع انرژی فسیلی (O'Brien, 2009 ; Bostan et al., 2012; Nik et al., 2020)
√		افزایش جمعیت (Byrd and Matthewman ,2014; Perrone and Hornberger ,2014) (Elmqvist et al., 2019; Mutani and Todeschi ,2018)
√		تغییرات اقلیمی (خشکسالی، افزایش دما، ...) (Clancy ,2011) (Roeger et al., 2014; Salimi and Al-Ghamdi ,2020; Scanlon et al., 2013; Hussey and Pittock ,2012; Razmjoo et al., 2019; Perera et al., 2020)

(منبع: نگارندگان)

کربن و تاب آور در شرایط متغیر آب و هوایی " Ohshita and Johnson (۲۰۱۷) بر طیف وسیعی از ادبیات موضوعی و اقدامات انجام شده در رابطه با تغییرات آب و هوایی، تاب آوری و قدرت انطباق تمرکز می کند، که از قابلیت اطمینان منبع انرژی، مدیریت ریسک تا راندمان نهایی مصرف انرژی و برنامه ریزی زیرساخت شهری را شامل می شود. مطالعات موردی درسه شهر واشنگتن دی سی در ایالات متحده آمریکا، کپنهاگ دانمارک و گوانجو در چین انجام شده

همچنین معیارهای مختلف برنامه ریزی و طراحی از بررسی ادبیات موضوعی مقالات استخراج گردید که به شش موضوع تقسیم می شوند: زیر ساخت، منابع، کاربری زمین، وضعیت هندسی و مورفولوژی شهری، حکومت، و جنبه های جمعیت شناختی و رفتار انسانی. بررسی رابطه این معیارها با مؤلفه های پایه چارچوب مفهومی، پیچیدگی و چند وجهی بودن ماهیت تاب آوری را برجسته می کند. مقاله "تاب آوری انرژی شهری، ایجاد سیستم های انرژی شهری کارآمد، کم

استفاده از انرژی در سطوح مختلف، موضوعات جدید در مورد متابولیسم شهری را ترسیم می‌کند.

مقاله تطبیق تئوری تاب‌آوری در سیستم‌های انرژی

بررسی و چشم انداز که توسط Jesse et al در سال ۲۰۱۹ نگارش شده است، به تحقیق در مورد تاب‌آوری و کاربرد آن در سیستم‌های انرژی می‌پردازد و شباهت‌ها و تفاوت‌ها را شناسایی می‌کند.

چارچوب‌ها و مدل‌های ارائه شده

در جدول ۲ مقالاتی که در رابطه با تدوین چارچوب و مدلی برای تاب‌آوری انرژی به طور عام و تاب‌آوری در محیط شهری به صورت خاص پرداخته اند، فهرست شده است.

است تا روشن گردد که چگونه شهرها سیستم‌های انرژی خود را کارآمد، کم کربن، و تاب‌آور می‌کنند. این تجزیه و تحلیل تنوع گسترده‌ای در روش‌ها و همچنین میزان ارتباط بین شهر کم کربن و شهر تاب‌آور در ارتباط با انرژی شهری را نمایان می‌سازد. در حالی که هماهنگی نهادی چالش برانگیز است، شهرها دریافته‌اند که این عامل، هدایت کننده جهت انرژی بهتر و استراتژی‌های تغییرات اقلیمی است. استراتژی‌های سودمند در سراسر شهرها شامل: منابع انرژی (مانند میکروگریدها، سیستم‌های حرارت مرکزی و خنک‌کننده‌ها)، انرژی پسیو و سیستم‌های کارآمد انرژی در ساختمان‌ها و مشارکت آژانس‌های دولتی، کسب و کارها و جوامع هستند.

در مقاله‌ای تحت عنوان "سیستم‌های انرژی شهری در حال گذار به توسعه پایدار، تحقیقی برای متابولیسم شهری" (Carréon and Worrell ۲۰۱۸) با بررسی اجمالی در مورد

جدول ۲. چارچوب‌ها و مدل‌های ارائه شده با موضوع تاب‌آوری انرژی

نام نویسنده	عنوان	روش مطالعه و تحقیق
Roege, et al, 2014	معیارهای تاب‌آوری در انرژی	یک روش مبتنی بر ماتریس برای اندازه‌گیری تاب‌آوری انرژی پیشنهاد می‌دهد که سطرهای آن چهار بعد فیزیکی، اطلاعاتی، شناختی و اجتماعی، و ستونهای آن چهار مرحله تاب‌آوری به ترتیب آمادگی، جذب، بازیابی و انطباق می‌باشند.
Sharifi and Yamagata, 2015	ارائه چارچوب مفهومی برای ارزیابی تاب‌آوری انرژی در محیط شهری	اجزای اصلی تاب‌آوری انرژی در محیط شهری را مشخص می‌کند و چارچوبی به صورت ماتریسی. با تقسیم معیارها به دسته‌های اصلی شامل زیرساخت، کاربری زمین، مورفولوژی و هندسه شهری، مدیریت منابع، حاکمیت شهری، قوانین و مقررات، و اجتماع و رفتارهای اجتماعی و مقایسه خصوصیات تاب‌آوری مرتبط با هر یک، برای ارزیابی آن ارائه می‌دهد.
Lin and Bie, 2016	مطالعه تاب‌آوری سیستم یکپارچه انرژی (IES)	به یکپارچگی سیستم‌های انرژی در بخش برق، گاز و سیستم‌های سرمایه‌گذاری و گرمایش می‌پردازد و تاب‌آوری انرژی را از دو دیدگاه استحکام سخت افزاری و تاب‌آوری عملیاتی در برابر حوادث و بلایای طبیعی مورد بررسی قرار می‌دهد. روش خاصی برای ارزیابی پیشنهاد نمی‌کند.
Van Der Merwe, et al., 2018	چارچوبی برای ارزیابی تاب‌آوری خدمات ضروری ایجاد شده توسط سیستم‌های اجتماعی - فنی	چارچوبی برای پرداختن به مؤلفه‌های فنی و اجتماعی خدمات اساسی مانند تأمین برق را پایه ریزی می‌کند که نیاز به ملاحظات خاص و عام تاب‌آوری دارند.

ادامه جدول ۲. چارچوب‌ها و مدل‌های ارائه شده با موضوع تاب‌آوری انرژی

نام نویسنده	عنوان	روش مطالعه و تحقیق
Gasser, et al., 2020	ارزیابی جامع تاب‌آوری برای امنیت تأمین برق در ۱۴۰ کشور.	شاخصی با چهار بعد فنی، حاکمیت، ژئوپلیتیک و سازمانی برای تاب‌آوری و تأمین برق (ESRI) ارائه می‌دهد، که نشان دهنده تاب‌آوری منابع تأمین برق در یک کشور است.
Gatto and Drago, 2020	اندازه‌گیری و مدل‌سازی تاب‌آوری انرژی	تاب‌آوری انرژی را در چهار بعد پایداری (اقتصاد، جامعه، محیط زیست و حکمرانی) تعریف می‌کند و تکنیک شاخص ترکیبی شامل سه جزء اصلی دسترسی به انرژی، راندمان انرژی و انرژی تجدید پذیر برای ارزیابی تاب‌آوری انرژی پیشنهاد می‌کند.

(منبع، نگارندگان)

استخراج شده و خصوصیات هر کدام در بحث پایداری و تاب‌آوری مشخص گردید. در انتهای مقاله به این نکته اشاره شده است که چارچوب مفهومی و معیارهای ارائه شده در این مطالعه می‌تواند به عنوان گام مهم مقدماتی برای توسعه ابزارهایی برای ارزیابی تاب‌آوری انرژی شهری مورد استفاده قرار گیرد. مقاله Lin and Bie (۲۰۱۶)، به یکپارچگی سیستم‌های انرژی در بخش برق، گاز و سیستم‌های سرمایه‌گذاری و گرمایش می‌پردازد و تاب‌آوری انرژی را از دو دیدگاه استحکام سخت افزاری و تاب‌آوری عملیاتی در برابر حوادث و بلایای طبیعی مورد بررسی قرار می‌دهد. در این پژوهش مقایسه‌ای از روشهای کیفی و کمی ارزیابی تاب‌آوری انرژی انجام می‌گیرد ولی روش خاصی پیشنهاد نمی‌گردد. این مقاله با بررسی وابستگی متقابل زیر سیستم‌های انرژی، بینشی برای تحقیقات آینده در سیستم‌های یکپارچه انرژی مطرح می‌کند. مقاله Van و همکاران (۲۰۱۸)، تاب‌آوری خدمات ضروری مانند تأمین برق را در دو سیستم پیچیده اجتماعی-فنی بررسی می‌کند، چارچوب پیشنهاد شده متمرکز بر سرمایه‌گذاری در بخشهای خاص و عمومی در هریک از زیر ساخت‌های فن آوری و اجتماعی می‌باشد. این چارچوب مربع شکل، مجموعه‌ای متفاوت اما یکپارچه از استراتژی‌های تاب‌آوری و شاخص‌های ارزیابی آن ارائه می‌دهد که می‌تواند در سطوح مختلف سازمانی اعمال شود. مقاله Gasser و همکاران (۲۰۲۰)، شاخصی را تعریف می‌کند که به طور جامع نشان دهنده تاب‌آوری منابع برق در کشورهاست و

مقاله Roeye و همکاران (۲۰۱۴)، چارچوبی برای اندازه‌گیری تاب‌آوری انرژی به صورت ماتریس طراحی کرده است، که سطرهای آن چهار بعد فیزیکی، اطلاعاتی، شناختی و اجتماعی، و ستونهای آن چهار مرحله تاب‌آوری به ترتیب آمادگی، جذب، بازیابی و انطباق می‌باشند. هر سلول درون این ماتریس بیانگر آنست که چگونه می‌توان با اقدامات انجام شده در حوزه فیزیکی، اطلاعاتی، شناختی و اجتماعی توانایی سیستم را در آماده‌سازی، جذب، بازیابی و سازگاری بهبود بخشید. در انتهای مقاله به این موضوع اشاره شده است که ماتریس تاب‌آوری چندین کاربرد عملی دارد و معیارهای آن را می‌توان در سیستم‌های متعدد از طریق روش تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDA) ارزیابی کرد.

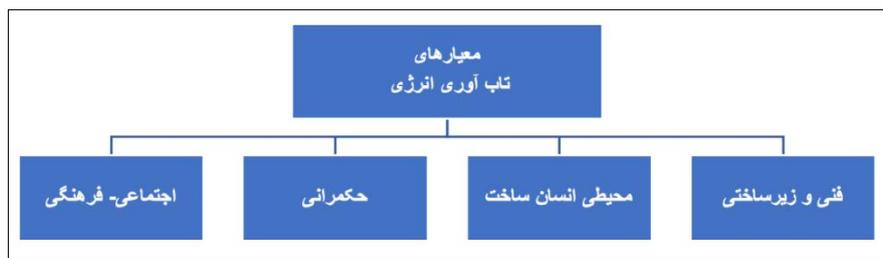
مقاله Sharifi and Yamagata (۲۰۱۵)، چارچوب مفهومی با ایجاد ماتریس شامل معیارهای مختلف برنامه‌ریزی و طراحی مرتبط با تأمین، انتقال و توزیع در محیط شهری مطرح می‌نماید. این ماتریس، معیارهای استخراج شده از منابع را به دسته‌های اصلی شامل زیرساخت، کاربری زمین، مورفولوژی و هندسه شهری، مدیریت منابع، حاکمیت شهری، قوانین و مقررات، و اجتماع و رفتارهای اجتماعی تقسیم می‌کند. هر دسته، از معیارهای مختلفی تشکیل شده است که به نوبه خود ممکن است به زیر معیارها نیز تقسیم شوند. هر معیار با اجزای تاب‌آوری انرژی و خصوصیات مختلف تاب‌آوری مرتبط است. در مقاله‌ای که Sharifi and Yamagata در سال ۲۰۱۶ به چاپ رساندند، بر پایه چارچوب ارائه شده، معیارها و زیر معیارهای مرتبط از منابع

مدل‌های تاب‌آوری انجام گرفته، ملاحظه می‌گردد که هر یک از مدل‌ها به بخش خاصی از تاب‌آوری انرژی پرداخته اند و عمده آنها بخش تأمین برق را به عنوان خدمات ضروری شهری مد نظر قرار داده اند. از مطالعات انجام شده بالا می‌توان به الزام ایجاد یک مدل جامع جهت ارزیابی میزان تاب‌آوری شهری در بخش انرژی پی برد.

مواد و روش بررسی

این پژوهش از جنبه هدف، کاربردی است و از دستاوردهای آن میتوان جهت ارزیابی تاب‌آوری انرژی در محیط شهری استفاده نمود و از نتایج آن در برنامه ریزی، جهت بهبود و مدیریت جامع تاب‌آوری شهری بهره جست. برای گردآوری داده‌ها، از ابزارهای کتابخانه‌ای، بررسی متون و محتوای مطالب و نیز روش‌های میدانی نظیر پرسشنامه استفاده می‌شود. در این پژوهش، معیارهای استخراج شده از ادبیات موضوعی تاب‌آوری به طور عام و تاب‌آوری انرژی به طور خاص، به چهار زمینه کلی تقسیم‌بندی شده‌اند که شامل معیارهای مربوط به فنی و زیرساختی، محیطی انسان ساخت، حکمرانی و فرهنگی می‌باشند (شکل ۱). هر یک از معیارها، خود شامل چندین زیر معیار می‌باشند.

دارای چهار بعد می‌باشد. این شاخص، شاخص فنی را با عوامل مربوط به حاکمیت، ژئوپلتیک و عوامل سازمانی ترکیب می‌کند. در مرحله بعد، با استفاده از روش آماری، از طریق تجزیه و تحلیل همبستگی و ارزیابی قابلیت اطمینان، همبستگی آماری مجموعه شاخص تأیید می‌گردد. پس از نرمال سازی شاخص‌ها، در نهایت، شاخص تاب‌آوری ESRI، برای ۱۴۰ کشور در سراسر جهان پیشنهاد و تعیین مقدار می‌گردد. در مقاله Gatto and Drago (۲۰۲۰)، به موضوع تاب‌آوری انرژی به طور خاص در بخش برق با تعامل بین ابعاد اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی و حاکمیتی پرداخته می‌شود و از تکنیک‌های شاخص‌های ترکیبی استفاده می‌گردد. در این پژوهش شاخص‌های ترکیبی برای کشورهای OECD و کشورهای غیر OECD تعریف شده و عوامل تعیین‌کننده در تاب‌آوری انرژی بررسی می‌گردند. اجزای شاخص ترکیبی به سه بخش اصلی دسترسی به انرژی، راندمان انرژی و انرژی تجدیدپذیر تقسیم می‌شوند که هر کدام زیر معیارهای خود را دارند. با بررسی مقالاتی که در خصوص چارچوب‌های



شکل ۱. معیارهای اصلی تاب‌آوری انرژی در محیط شهری (منبع، نگارندگان)

اصلی‌ترین متون موجود در رابطه با معیارها و ضوابط تاب‌آوری انرژی در محیط شهری، معیارهای مطرح شده در پژوهش Sharifi and Yamagata (۲۰۱۶) می‌باشد. لذا با استفاده مطالعات کتابخانه‌ای انجام شده و به روز کردن آنها با بررسی مقالات و تحقیقات جدید صورت گرفته بین سالهای ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱، لیستی از عوامل مؤثر شامل معیارها و زیر معیارهای مرتبط با ذکر میزان فراوانی آنها در منابع

معتبر علمی به دست آمد (جداول ۳ الی ۶). سپس پرسشنامه‌ای شامل لیست کاملی متشکل از ۳۴ زیر معیار بدست آمده از منابع موجود، تهیه شد و جهت نظرسنجی برای صاحب نظران و متخصصان حوزه مدیریت شهری و انرژی از طریق گوگل فرم ارسال گردید. نظرسنجی از خبرگان، مبتنی بر روش خرد جمعی (Delphi) از طریق پرسشنامه غیرحضوری صورت گرفت. که شامل ۳۳ نفر از

جداول مقایسه زوجی کمتر از ۰.۱ بدست آمد، اولویت‌های بدست آمده در روش FAHP، مورد تأیید قرار گرفت، (جداول ۸ الی ۱۳). جهت چگونگی بکارگیری این روش می‌توان به مقاله Mahad و همکاران (۲۰۱۹) مراجعه نمود. در مرحله نهایی، اولویت چهار معیار اصلی نسبت به یکدیگر با استفاده از پرسشنامه مقایسه زوجی و لحاظ نمودن زیر معیارهای هر بخش از نتایج مرحله قبل، به نظرسنجی گذاشته شد. در این مرحله ۱۰ نفر از خبرگان و مدیران در حوزه مدیریت شهری و انرژی شرکت نمودند. نتایج بدست آمده با روش FAHP تحلیل گردید و پس از محاسبه نرخ ناسازگاری و تأیید آن، وزن معیارهای اصلی نیز در دو رویکرد به تفکیک بدست آمد. (جداول ۱۴ و ۱۵) با استفاده از اولویت‌های بدست آمده در معیارهای اصلی و زیر معیارها، مدل مدیریتی جامع در هر دو رویکرد به تفکیک ارائه گردید. در شکل ۲ مراحل تحقیق به صورت خلاصه نمایش داده شده است.

اساتید، متخصصان و مدیران دولتی در حوزه انرژی بودند. پرسشنامه تهیه شده برای سنجش اهمیت هر یک از زیر معیارها در تاب‌آوری انرژی شهری در دو رویکرد کوتاه مدت و دراز مدت به تفکیک در طیف لیکرت با مقیاس پنج درجه طراحی گردید. پس از دریافت پاسخ از خبرگان، نتایج در نرم‌افزار آماری SPSS ثبت شده و پایایی پرسشنامه سنجیده شد. برآورد پایایی با استفاده از تعیین همبستگی درونی با روش آلفای کرونباخ که شایع‌ترین روش آماری برای بدست آوردن پایایی است، صورت گرفت. (جدول ۷) از آنجایی که عوامل مؤثر بر اساس میزان فراوانی در منابع معتبر استخراج گردیدند روایی آنها تا حد زیادی قابل قبول می‌باشد. سپس اولویت بندی زیر معیارها در هر یک از چهار زیرگروه فنی و زیرساختی، محیطی انسان ساخت، حکمرانی و اجتماعی - فرهنگی با انجام مقایسه زوجی و استفاده از روش FAHP به صورت جداگانه و در دو رویکرد کوتاه مدت و بلند مدت به تفکیک صورت گرفت. نرخ ناسازگاری نیز محاسبه شد و با توجه به آنکه عدد بدست آمده در هر یک از



شکل ۲. مراحل تحقیق

کتابخانه‌ای با ذکر تعداد فراوانی آنها در منابع، در جداول ۴ الی ۷ ارائه شده است.

نتایج

معیارهای استخراج شده از بررسی متون علمی و مطالعات

جدول ۳. زیر معیارهای فنی و زیرساختی

ردیف	نماد	شرح معیار	فراوانی در منابع
۱	Inf1	تنوع تأمین انرژی	۲۵
۲	Inf2	تولید پراکنده انرژی و تولید در محل مصرف	۳۲
۳	Inf3	تولید انرژی از منابع تجدید پذیر	۴۵
۴	Inf4	زیرساخت فن آوری اطلاعات و ارتباطات و امنیت سایبری	۹
۵	Inf5	ارتباط متقابل زیرساخت‌ها و شبکه‌های آنها	۸
۶	Inf6	برنامه‌ریزی برای تعمیرات دوره ای	۴
۷	Inf7	راندمان شبکه خطوط تولید، انتقال و توزیع	۵
۸	Inf8	استحکام فیزیکی	۸
۹	Inf9	سیستم‌های ذخیره سازی انرژی (حامل‌های انرژی، باتری)	۲۶
۱۰	Inf10	شدت انرژی	۷
۱۱	Inf11	شدت تولید کربن	۸
۱۲	Inf12	تنوع بکارگیری حامل‌های انرژی	۴
۱۳	Inf13	افزایش راندمان انرژی از طریق نوآوری و تکنولوژی	۲۵

جدول ۴. زیر معیارهای محیطی انسان ساخت

ردیف	نماد	شرح معیار	فراوانی در منابع
۱	Env1	ایجاد فضای سبز (پارک ها، دیوار سبز، بام سبز)	۸
۲	Env2	روش‌های کاهش انرژی (عایق کاری، ایجاد شیشه‌های دوجداره، سیستم‌های هوشمند، ساختمان صفر)	۳۲
۳	Env3	روش‌های سازگاری انرژی (موقعیت ساختمان با توجه به شرایط اقلیمی، تعیین نوع مصالح بر اساس اقلیم)	۱۵
۴	Env4	تنوع سیستم حمل و نقل	۲
۵	Env5	کاهش ردپای انرژی در تولید، تصفیه و توزیع آب	۸
۶	Env6	الگوی توسعه شهری (پراکنده، فشرده، حومه گرایی ...)	۱۱
۷	Env7	تراکم (سکونت، جمعیت)	۵

جدول ۵. زیر معیارهای حکمرانی

ردیف	نماد	شرح معیار	فراوانی در منابع
۱	Gov1	ایجاد پایگاه داده، نظارت و ارزیابی	۷
۲	Gov2	گواهینامه ها، برچسب‌ها و ابزارهای رتبه بندی	۱۱
۳	Gov3	چشم انداز دراز مدت	۳
۴	Gov4	برنامه‌ریزی انرژی مبتنی بر سناریو و مدیریت ریسک	۱۱
۵	Gov5	برنامه‌ریزی آموزش و ارتباطات برای بالا بردن سطح آگاهی	۴
۶	Gov6	حکمرانی مشارکتی	۱۱
۷	Gov7	وابستگی به واردات انرژی	۹
۸	Gov8	قانون گذاری و الزامات اجرایی آن (مقررات ملی ساختمان، کاربری زمین، توسعه فن آوری و ...)	۲۱
۹	Gov9	قیمت گذاری (مالیات بر کربن، تعرفه‌های برق، عوارض جاده‌ای و ...)	۱۳
۱۰	Gov10	تخصیص بودجه برای تحقیق و توسعه فن آوری	۱۰
۱۱	Gov11	مکانیزم‌های مالی، غیرمالی و جذب سرمایه گذاری بخش خصوصی در توسعه کم کربن	۱۵

جدول ۶. زیر معیارهای اجتماعی - فرهنگی

ردیف	نماد	شرح معیار	فراوانی در منابع
۱	Soc1	دسترسی همگانی به منابع انرژی و عدالت طبقات اجتماعی	۴
۲	Soc2	راه حل‌های مشارکتی برای صرفه جویی در انرژی	۶
۳	Soc3	فرهنگ سازی و آگاهی عمومی از مدیریت مصرف انرژی	۲۴

جدول ۷. سنجش پایایی پرسشنامه

Reliability Statistics	
Cronbach's Alpha	N of Items
.942	71

در این مرحله، اولویت‌های زیر معیارها در هر یک از چهار معیار اصلی فنی و زیرساخت، محیطی انسان‌ساخت، حکمرانی، و اجتماعی - فرهنگی پس از نظرسنجی از خبرگان، و تحلیل آن به روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در هر یک از رویکردها به شرح جداول ۸ الی ۱۳ بدست آمد:

در قدم بعدی پرسشنامه‌ای برای سنجش اهمیت هر یک از زیر معیارها در تاب‌آوری انرژی شهری در دو رویکرد کوتاه مدت و دراز مدت به تفکیک در طیف لیکرت با مقیاس پنج درجه طراحی شد. پس از دریافت پاسخ از خبرگان، نتایج در نرم افزار آماری SPSS ثبت شده و پایایی پرسشنامه سنجیده شد. از آنجایی که ضریب بالای ۰،۷ بیانگر پایایی قابل قبول است، لذا پایایی پرسشنامه با توجه به نتیجه بدست آمده در خروجی نرم‌افزار تأیید گردید.

اولویت بندی زیر معیارها در رویکرد کوتاه مدت

جدول ۸. رتبه بندی زیر معیارهای فنی و زیرساختی

رتبه	نماد	زیر معیار	وزن زیر معیار
۱	Inf9	سیستم‌های ذخیره سازی انرژی	۰.۲۱۳
۲	Inf8	استحکام فیزیکی	۰.۱۷۳
۳	Inf12	تنوع بکارگیری حامل‌های انرژی	۰.۱۴۵
۴	Inf2	تولید پراکنده انرژی	۰.۱۱۰
۵	Inf1	تنوع تأمین انرژی	۰.۰۹۶
۶	Inf3	تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر	۰.۰۸۶
۷	Inf5	ارتباط متقابل زیرساخت‌ها و شبکه‌های آنها	۰.۰۶۷
۸	Inf4	زیرساخت فن آوری اطلاعات و ارتباطات و امنیت سایبری	۰.۰۶۴
۹	Inf6	برنامه‌ریزی برای تعمیرات دوره ای	۰.۰۴۶

جدول ۹. رتبه بندی زیر معیارهای محیطی انسان ساخت

رتبه	نماد	زیر معیار	وزن زیر معیار
۱	Env6	الگوی توسعه شهری	۰.۲۲۹
۲	Env7	تراکم جمعیت	۰.۲۰۵
۳	Env5	کاهش ردپای انرژی در تولید، تصفیه و توزیع آب	۰.۱۶۷
۴	Env2	روش‌های کاهشی در ساختمان	۰.۱۳۸
۵	Env4	تنوع سیستم حمل و نقل	۰.۱۳۲
۶	Env3	روش‌های سازگاری در ساختمان	۰.۰۹۴
۷	Env1	ایجاد فضای سبز	۰.۰۳۴

جدول ۱۰. رتبه بندی زیرمعیارهای حکمرانی

رتبه	نماد	زیر معیار	وزن زیر معیار
۱	Gov5	برنامه‌ریزی آموزش و ارتباطات برای بالا بردن سطح آگاهی عمومی	۰.۱۸۱
۲	Gov6	حکمرانی مشارکتی	۰.۱۷۲
۳	Gov4	برنامه‌ریزی انرژی مبتنی بر سناریو و مدیریت ریسک	۰.۱۳۹
۴	Gov8	قانون گذاری و الزامات اجرایی آن	۰.۱۱۳
۵	Gov10	تخصیص بودجه برای تحقیق و توسعه فن آوری	۰.۱۰۸
۶	Gov7	وابستگی به واردات انرژی	۰.۰۷۶
۷	Gov9	قیمت گذاری	۰.۰۵۹
۸	Gov11	مکانیزم‌های مالی، غیرمالی و جذب سرمایه گذاری بخش خصوصی در توسعه کم کربن	۰.۰۵۷
۹	Gov2	گواهینامه ها، برچسب‌ها و ابزارهای رتبه بندی	۰.۰۴۹
۱۰	Gov1	ایجاد پایگاه‌های داده، نظارت و ارزیابی	۰.۰۴۵

جدول ۱۱. رتبه بندی زیرمعیارهای اجتماعی- فرهنگی

رتبه	نماد	زیر معیار	وزن زیر معیار
۱	Soc3	فرهنگ سازی و آگاهی عمومی از مدیریت مصرف انرژی	۰.۷۳۹
۲	Soc2	راه حل‌های مشارکتی برای صرفه جویی در انرژی	۰.۲۶۱

اولویت بندی زیر معیارها در رویکرد بلند مدت

جدول ۱۲. رتبه بندی زیرمعیارهای فنی و زیر ساختی

رتبه	نماد	زیر معیار	وزن زیر معیار
۱	Inf13	افزایش راندمان انرژی از طریق نوآوری و تکنولوژی	۰.۰۸۹
۲	Inf3	تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر	۰.۱۶۳
۳	Inf10	شدت انرژی	۰.۱۵۶
۴	Inf11	شدت تولید کربن	۰.۱۴۷
۵	Inf3	تنوع تأمین انرژی	۰.۰۸۹
۶	Inf12	تنوع بکارگیری حامل‌های انرژی	۰.۰۸۸
۷	Inf7	راندمان شبکه خطوط تولید، خطوط انتقال و توزیع	۰.۰۷۸
۸	Inf2	تولید پراکنده انرژی	۰.۰۴۲
۹	Inf3	سیستم‌های ذخیره سازی انرژی	۰.۰۳۸
۱۰	Inf4	زیرساخت فن آوری اطلاعات و ارتباطات و امنیت سایبری	۰.۰۱۵

جدول ۱۳. رتبه بندی زیر معیارهای محیطی انسان ساخت

رتبه	نماد	زیر معیار	وزن زیر معیار
۱	Env2	روش‌های کاهشی در ساختمان	۰.۲۸۴
۲	Env4	تنوع سیستم حمل و نقل	۰.۲۴۰
۳	Env3	روش‌های سازگاری در ساختمان	۰.۱۹۷
۴	Env7	تراکم جمعیت	۰.۱۰۹
۵	Env5	کاهش ردپای انرژی در تولید، تصفیه و توزیع آب	۰.۰۹۰
۶	Env6	الگوی توسعه شهری	۰.۰۵۵
۷	Env1	ایجاد فضای سبز	۰.۰۲۳

جدول ۱۴. رتبه بندی زیر معیارهای حکمرانی

رتبه	نماد	زیر معیار	وزن زیر معیار
۱	Gov8	قانون گذاری و الزامات اجرایی آن	۰.۱۸۶
۲	Gov11	مکانیزم‌های مالی، غیرمالی و جذب سرمایه گذاری بخش خصوصی در توسعه کم کربن	۰.۱۸۳
۳	Gov10	تخصیص بودجه برای تحقیق و توسعه فن آوری	۰.۱۶۲۳
۴	Gov9	قیمت گذاری	۰.۱۶۲۲
۵	Gov5	برنامه‌ریزی آموزش و ارتباطات برای بالا بردن سطح آگاهی عمومی	۰.۰۷۵
۶	Gov3	چشم انداز دراز مدت	۰.۰۶۹
۷	Gov2	گواهینامه‌ها، برچسب‌ها و ابزارهای رتبه بندی	۰.۰۶۵
۸	Gov6	حکمرانی مشارکتی	۰.۰۴۹
۹	Gov4	برنامه‌ریزی انرژی مبتنی بر سناریو و مدیریت ریسک	۰.۰۲۵
۱۰	Gov1	ایجاد پایگاه‌های داده، نظارت و ارزیابی	۰.۰۲۳

جدول ۱۵. رتبه بندی زیر معیارهای اجتماعی- فرهنگی

رتبه	نماد	زیر معیار	وزن زیر معیار
۱	Soc3	فرهنگ سازی و آگاهی عمومی از مدیریت مصرف انرژی	۰.۶۹۰
۲	Soc2	راه حل‌های مشارکتی برای صرفه جویی در انرژی	۰.۲۰۷
۳	Soc1	دسترسی همگانی به منابع انرژی و عدالت طبقات اجتماعی	۰.۱۰۲

بحث و نتیجه گیری

از آنجایی که حوادث و بلایای طبیعی و انسان ساخت در کوتاه مدت و کاهش منابع انرژی و تغییرات اقلیمی در دراز مدت می تواند باعث ایجاد اختلال در عملکرد سیستم‌های تأمین انرژی به عنوان یکی از زیرساخت‌های مهم شهری شود، مبحث تاب‌آوری انرژی در محیط شهری از اهمیت بسزایی برخوردار است.

در ابتدای پژوهش، با مرور بیش از ۱۸۰ مقاله به بررسی تحقیقات صورت گرفته در دهه‌های اخیر در زمینه تاب‌آوری انرژی پرداخته شد و از طریق شناسایی معیارهای اصلی و زیر معیارهای آنها در زمینه تاب‌آوری انرژی در محیط شهری، عوامل تأثیر گذار تعیین و به چهار دسته زیرساخت و فنی، محیطی انسان ساخت، حکمرانی، و اجتماعی- فرهنگی تقسیم گردید. در قدم بعدی اولویت بندی زیر معیارهای هریک از معیارهای اصلی با نظرسنجی از خبرگان و انجام تحلیل سلسله مراتبی فازی، اولویت‌های هر بخش به صورت مجزا و در هر یک از رویکردها، کوتاه

در مرحله نهایی، معیارهای چهارگانه اصلی نیز با نظرسنجی از خبرگان و با استفاده از روش فازی توسط نرم افزار FAHP، اولویت بندی شد و با احتساب نرخ ناسازگاری کمتر از ۰.۱ در جدول مقایسه زوجی هردو رویکرد، نتایج مورد تأیید قرار گرفتند.

جدول ۱۶. اولویت بندی معیارهای اصلی در رویکرد کوتاه مدت

رتبه	نام معیار	وزن معیار
۱	حکمرانی	۰.۲۵۵
۲	فنی و زیرساخت	۰.۲۵۱
۳	محیطی انسان ساخت	۰.۲۵۰
۴	اجتماعی- فرهنگی	۰.۲۴۳

جدول ۱۷: اولویت بندی معیارهای اصلی در رویکرد دراز مدت

رتبه	نام معیار	وزن معیار
۱	حکمرانی	۰.۲۶۱
۲	فنی و زیرساخت	۰.۲۶۰
۳	محیطی انسان ساخت	۰.۲۵۰
۴	اجتماعی- فرهنگی	۰.۲۳۰

مدت و بلند مدت، مشخص شد.

در رویکرد کوتاه مدت، در بخش فنی و زیرساخت، سیستم‌های ذخیره انرژی از بالاترین اولویت برخوردار است و پس از آن می‌توان به استحکام فیزیکی، تنوع بکارگیری حامل‌های انرژی و تولید پراکنده انرژی اشاره کرد. در زیرمعیارهای محیطی انسان ساخت، الگوی توسعه شهری و تراکم جمعیت از بالاترین اهمیت برخوردار هستند، از دیگر موارد با اولویت بالا، کاهش ردپای انرژی در تولید، تصفیه و توزیع آب می‌باشد. در بخش حکمرانی، برنامه‌ریزی آموزشی و ارتباطات برای بالا بردن سطح آگاهی عمومی، حکمرانی مشارکتی و برنامه‌ریزی انرژی مبتنی بر سناریو و مدیریت ریسک دارای اولویت بالا می‌باشند. فرهنگ سازی و آگاهی عمومی از مدیریت مصرف انرژی، زیر معیار مهم در بخش اجتماعی - فرهنگی می‌باشد. در رویکرد بلند مدت، در زیرگروه فنی و زیرساخت، افزایش راندمان انرژی از طریق نوآوری و تکنولوژی بالاترین اهمیت را دارد. پس از آن تولید انرژی از منابع تجدید پذیر و شدت انرژی از عوامل مهم در این بخش می‌باشند. از زیر معیارهای با اولویت بالا در بخش محیطی انسان ساخت، به ترتیب به روش‌های کاهش مصرف انرژی در ساختمان، تنوع سیستم حمل و نقل و روش‌های سازگاری در ساختمان می‌توان اشاره نمود. در بخش حکمرانی، قانون گذاری و الزامات اجرایی آن، مکانیزم‌های مالی و غیرمالی جهت جذب سرمایه گذاری بخش خصوصی در توسعه کم کربن در بالاترین اولویت قرار دارند، در رده بعدی تخصیص بودجه برای تحقیق و توسعه فن آوری و قیمت گذاری انرژی از اهمیت بالایی برخوردار هستند.

در بخش اجتماعی - فرهنگی، فرهنگ‌سازی و آگاهی عمومی از مدیریت مصرف انرژی مهمترین زیر معیار در تاب‌آوری انرژی در محیط شهری می‌باشد و پس از آن راه حل‌های مشارکتی برای صرفه جویی در انرژی می‌تواند در افزایش تاب‌آوری تأثیر گذار باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، اولویت‌های زیر معیارها در هر بخش در دو رویکرد

کوتاه مدت و بلند مدت متفاوت است، آنچه در هر دو رویکرد دارای اولویت بالا می‌باشد، بحث آموزش و فرهنگ سازی در مدیریت مصرف انرژی در معیارهای اجتماعی و فرهنگی است. بنابراین اهمیت آموزش و آگاه‌سازی در ایجاد تاب‌آوری انرژی مشخص می‌باشد.

همچنین به برخی اشتراکات در هر دو رویکرد (با اولویت‌های متفاوت) اشاره می‌شود:

در زیر معیارهای فنی و زیر ساخت به تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر، تولید پراکنده انرژی، تنوع تأمین انرژی، تنوع بکارگیری از حامل‌های انرژی و ذخیره سازی انرژی می‌توان تأکید کرد. این موضوع، اهمیت استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در محیط شهری را نشان می‌دهد، زیرا بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر بسیاری از خصوصیات تاب‌آوری همچون تنوع، ذخیره سازی و تولید پراکنده را در بر می‌گیرد. در زیرمعیارهای محیطی انسان ساخت، هر هفت زیر معیار تعریف شده با اولویت‌های متفاوت تأثیر گذار هستند. از مواردی که در هر دو رویکرد دارای اولویت هستند، روشهای کاهش مصرف انرژی در ساختمان و ایجاد تنوع در سیستم حمل و نقل می‌باشند.

در بخش حکمرانی نیز همه زیر معیارهای تعریف شده با درجه اهمیت متفاوت، تأثیر گذارند و زیر معیاری که در هر دو رویکرد با اهمیت نسبی بالا مشاهده می‌شود، قانون گذاری و الزامات اجرایی آن است. بنابراین می‌توان به اهمیت تدوین و اجرای قوانین در جامعه شهری جهت افزایش تاب‌آوری پی برد. در مجموع نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که اولویت معیارهای اصلی در دو رویکرد کوتاه مدت و بلند مدت از یک روند یکسان برخوردار بوده، به نحوی که در هر دو رویکرد اولویت عوامل اصلی به ترتیب حکمرانی، فنی و زیرساخت، و محیطی انسان ساخت، و اجتماعی - فرهنگی می‌باشند.

این مطالعه بیانگر آنست که برای ایجاد تاب‌آوری شهری در حوزه انرژی، تأمین سخت افزارها و زیر ساخت‌های مورد نیاز، اتخاذ سیاست‌های مناسب و همچنین آموزش و آگاه

در راستای ایجاد مدل ارزیابی و مدیریتی جامع تاب‌آوری انرژی در محیط شهری است. این مدل جامع می‌تواند برای سازمان‌ها و ارگانهای مرتبط، راهنمایی جهت برنامه ریزی‌های کوتاه مدت در راستای تأمین انرژی در هنگام وقوع بحران و بلایای طبیعی بوده، و در دراز مدت ارائه دهنده خط مشی در جهت حفظ منابع انرژی، کاهش مصرف انرژی و به تبع آن کاهش تولید کربن و اثرات نامطلوب تغییرات اقلیمی باشد.

سازی از ارکان اصلی در این زمینه به شمار می‌آیند. در ادامه این پژوهش می‌توان با استفاده از اولویت بندی بدست آمده، هر یک از زیر معیارهای بدست آمده را کمی کرده و شاخص ترکیبی را برای ارزیابی میزان تاب‌آوری انرژی در محیط شهری تعریف نمود.

بر اساس این شاخص ترکیبی می‌توان میزان تاب‌آوری شهرهای جهان را در هر دو رویکرد کوتاه مدت و بلند مدت با یکدیگر مقایسه نمود. بنابراین انجام این پژوهش گام اولیه

فهرست منابع

- رضایی، م؛ رفیعیان، م (۱۳۹۴)، سنجش و ارزیابی میزان تاب‌آوری کالبدی اجتماع‌های شهری در برابر زلزله، مطالعه موردی: محله‌های شهر تهران، پژوهش‌های جغرافیای انسانی 47، دوره ۴۷، شماره ۴، ص ۶۲۳-۶۲۶.
- صالحی، ا؛ آقابابایی، م؛ سرمدی، ه؛ بهتاش، م (۱۳۹۰)، بررسی میزان تاب‌آوری محیطی با استفاده از مدل شبکه علیت، مجله محیط شناسی، سال سی و هشتم، شماره ۵۹، ص ۹۹-۱۱۲.
- Abhas K., T. W. M. and Z. S.-G. eds. (2013). *Building urban resilience: principles, tools, and practice*. World Bank Publications, 2013.
- Béné, C., Mehta, L., McGranahan, G., Cannon, T., Gupte, J., & Tanner, T. (2018). Resilience as a policy narrative: potentials and limits in the context of urban planning. *Climate and Development*, 10(2).
- Bostan, I., Gheorghe, A. V., Dulgheru, V., Sobor, I., Bostan, V., & Sochirean, A. (2012). *Resilient energy systems: renewables: wind, solar, hydro* (Vol. 19). Springer Science & Business Media.
- Byrd, H., & Matthewman, S. (2014). Exergy and the city: the technology and sociology of power (failure). *Journal of Urban Technology*, 21(3), 85-102.
- Byrd, H., & Matthewman, S. (2014). Exergy and the City: The Technology and Sociology of Power (Failure). *Journal of Urban Technology*, 21(3). Perrone, D., & Hornberger, G. M. (2014). Water, food, and energy security: scrambling for resources or solutions? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 1(1).
- Caputo, S., Caserio, M., Coles, R., Jankovic, L., & Gaterell, M. R. (2012). Testing energy efficiency in urban regeneration. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 165(1), 69-80
- Carréon, J. R., & Worrell, E. (2018). Urban energy systems within the transition to sustainable development. A research agenda for urban metabolism. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 258-266.
- Clancy, J. S. (2011). *Energy affordability and household energy security: discussion note*.
- Coaffee, J. (2008). Risk, resilience, and environmentally sustainable cities. *Energy Policy*, 36(12), 4633-4638.
- Elmqvist, T., Andersson, E., Frantzeskaki, N., McPhearson, T., Olsson, P., Gaffney, O., Takeuchi, K., & Folke, C. (2019). Sustainability and resilience for transformation in the urban century. *Nature Sustainability*, 2(4), 267-273.
- Engle, N. L., de Bremond, A., Malone, E. L., & Moss, R. H. (2014). Towards a resilience indicator framework for making climate-change adaptation decisions. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19(8), 1295-1312.
- Esteban, M., & Portugal-Pereira, J. (2014). Post-disaster resilience of a 100% renewable energy system in Japan. *Energy*, 68, 756-764.

- Gasser, P., Suter, J., Cinelli, M., Spada, M., Burgherr, P., Hirschberg, S., Kadziński, M., & Stojadinović, B. (2020). Comprehensive resilience assessment of electricity supply security for 140 countries. *Ecological Indicators*, 110.
- Gatto, A., & Drago, C. (2020). Measuring and modeling energy resilience. *Ecological Economics*, 172.
- Godschalk, D. R. (2003). Urban hazard mitigation: creating resilient cities. *Natural Hazards Review*, 4(3), 136–143.
- Hussey, K., & Pittock, J. (2012). The energy-water nexus: Managing the links between energy and water for a sustainable future. In *Ecology and Society* (Vol. 17, Issue 1).
- Jabareen, Y. (2012). Towards a sustainability education framework: Challenges, concepts and strategies-the contribution from urban planning perspectives. *Sustainability*, 4(9), 2247–2269.
- Jesse, B. J., Heinrichs, H. U., & Kuckshinrichs, W. (2019). Adapting the theory of resilience to energy systems: A review and outlook. In *Energy, Sustainability and Society* (Vol. 9, Issue 1). BioMed Central Ltd.
- Kennedy, C., & Corfee-Morlot, J. (2013). Past performance and future needs for low carbon climate resilient infrastructure- An investment perspective. *Energy Policy*, 59, 773–783.
- Kruyt, B., van Vuuren, D. P., de Vries, H. J. M., & Groenenberg, H. (2009). Indicators for energy security. *Energy Policy*, 37(6), 2166–2181.
- Lin, Y., & Bie, Z. (2016). Study on the Resilience of the Integrated Energy System. *Energy Procedia*, 103, 171–176.
- Lloyd-Jones, T. (2010). Retrofitting sustainability to historic city core areas. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer*, 163(3).
- Mahad, N. F., Yusof, N., & Ismail, N. F. (2019). The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to solve multi-criteria decision making (MCDM) problems. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1358, No. 1, p. 012081). IOP Publishing.
- Mashima, D. C. A. A. (2012). Evaluating electricity theft detectors in smart grid networks. *International Workshop on Recent Advances in Intrusion Detection*.
- Mutani, G., & Todeschi, V. (2018). Energy Resilience, Vulnerability and Risk in Urban Spaces. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 6(4).
- Nik, V. M., Perera, A. T. D., & Chen, D. (2020). Towards climate resilient urban energy systems: a review. *National Science Review*.
- O'Brien, G. (2009). Vulnerability and resilience in the European energy system. *Energy & Environment*, 20(3), 399–410.
- Ohshita, S. J. K. (2017). Resilient Urban Energy: Making City Systems Energy Efficient, Low Carbon and Resilient in a Changing Climate. *European Council for an Energy Efficient Economy*.
- Pasimeni, M. R., Petrosillo, I., Aretano, R., Semeraro, T., De Marco, A., Zaccarelli, N., & Zurlini, G. (2014). Scales, strategies and actions for effective energy planning: A review. *Energy Policy*, 65, 165–174.
- Perera, A. T. D., Nik, V. M., Chen, D., Scartezzini, J.-L., & Hong, T. (2020). Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. *Nature Energy*, 5(2), 150–159.
- Perrone, D., & Hornberger, G. M. (2014). Water, food, and energy security: scrambling for resources or solutions? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 1(1).
- Platt, S., Brown, D., & Hughes, M. (2016). Measuring resilience and recovery. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 19, 447–460.
- Portugal Pereira, J., Troncoso Parady, G., & Castro Dominguez, B. (2014). Japan's energy conundrum: Post-Fukushima scenarios from a life cycle perspective. *Energy Policy*, 67, 104–115.
- Razmjoo, A. A., Sumper, A., & Davarpanah, A. (2019). Development of sustainable energy indexes by the utilization of new indicators: A comparative study. *Energy Reports*, 5, 375–383.
- Roege, P. E., Collier, Z. A., Mancillas, J., McDonagh, J. A., & Linkov, I. (2014). Metrics for energy resilience. *Energy Policy*, 72, 249–256.

- Salimi, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2020). Climate change impacts on critical urban infrastructure and urban resiliency strategies for the Middle East. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101948.
- Scanlon, B. R., Duncan, I., & Reedy, R. C. (2013). Drought and the water–energy nexus in Texas. *Environmental Research Letters*, 8(4), 45033.
- Sharifi, A., & Yamagata, Y. (2015). A Conceptual Framework for Assessment of Urban Energy Resilience. *Energy Procedia*, 75, 2904–2909.
- Sharifi, A., & Yamagata, Y. (2016). Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 60, pp. 1654–1677). Elsevier Ltd.
- Temby, O., Kapsis, K., Berton, H., Rosenbloom, D., Gibson, G., Athienitis, A., & Meadowcroft, J. (2014). Building-integrated photovoltaics: distributed energy development for urban sustainability. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 56(6), 4–17.
- Vale, L. J., & Campanella, T. J. (2005). *The resilient city: How modern cities recover from disaster*. Oxford University Press.
- Van der Merwe, S. E., Biggs, R., & Preiser, R. (2018). A framework for conceptualizing and assessing the resilience of essential services produced by socio-technical systems. *Ecology and Society*, 23(2).
- Mahad, N. F., Yusof, N., & Ismail, N. F. (2019, November). The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to solve multi-criteria decision making (MCDM) problems. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1358, No. 1, p. 012081). IOP Publishing.