Journal of Environmental Studies

Vol. 47, No. 2, Summer 2021

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

Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Environmental Design of Emergency Prefabricated Structures with the Approach of Reducing Energy Consumption and Pollution

Taha Sabaghian[1*], Maziar Asefi[1], Seyed Behshid Hosseini[2]

1 Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Arts University, Tabriz, Iran
2 Faculty of Architecture and Urban Planning, University of Art, Tehran, Iran

DOI: 10.22059/JES.2021.321265.1008155

Document Type
Research Paper

Received
April 7, 2021

Accepted
July 21, 2021

Abstract

Providing temporary housing has always been one of the challenges facing crisis management organizations in the aftermath of natural disasters. Therefore, prefabricated structures are usually used for this purpose. Prefabricated structures are predominantly box-shaped. Among the problems of this form is the need for more heavy vehicles for transportation, which leads to increased consumption of fossil fuels and air pollution. This study proposes a structure that is broken down into smaller parts to reduce transportation. Moreover, a set of rails and a large pin component were designed to facilitate movement and folding/unfolding, which reduces the need for specialized manpower. Rhinoceros 3D software and Grasshopper plug-in were respectively used to model the structure and make rotations. In addition, the optimal packing angle of the structure was calculated through a comparison between the Genetic algorithm and Surrogate model. The quasi-hemisphere model designed in this research can optimize more than 50% of fuel consumption due to reduced transportation and provide faster relief.

Keywords: Air pollution; Energy; New materials; Prefabrication; Transportation

*Corresponding author Email: t.sabaghian@tabriziau.ac.ir

Introduction

Population growth and, consequently, the increase in demand for housing in recent years have led many countries to adopt prefabrication as a "clean" construction strategy. Many governments incorporate the use of prefabricated buildings into their development plans to fulfill their demand. Researches show that proper adoption of prefabricated construction requires a political, economic, social, and technological analytical framework. Providing decent and affordable housing is a major challenge in emerging industrial countries, where conventional construction methods put a lot of pressure on resource costs and productivity, especially in dense metropolitan, rural or remote areas. Prefabrication can provide a good opportunity for environmental and economic activity, which makes it a fitting alternative for on-site construction.

Contrary to popular belief, prefabrication is not a new construction method; it has been widely used for years. Moreover, the method is not necessarily based on high-tech approaches, but rather is suitable for low-income societies. Research on the use of prefabrication in China, Colombia, India, Mexico, and Nicaragua has shown that under the right circumstances, the method reduces cost and creates employment opportunities for both men and women. The history of prefabrication goes back to Scotland. In 1829, the use of corrugated metal sheets in construction became highly popular. Since then, the sheets went on to significantly contribute to the development of the prefabrication industry.

Prefabricated construction is advantageous in many ways such as reducing debris and environmental degradation during the life-cycle of buildings. It is clear that with the passage of time and with the advancement of technology in the field of analysis, design and manufacture of prefabricated components, today elements and materials are used that have the least risk to the environment and bring maximum energy conservation for users. Prefabrication also saves time and money, facilitates energy optimization, and is regarded as a major solution for the dangerous and energy-consuming practices associated with conventional construction methods. To maximize the profitability of prefabrication, our future focus must be directed to financially supporting the technological development of prefabrication, structurally optimizing prefabricated buildings, and improving the prefabrication market.

The aim of this study was to explore ways to protect the environment by reducing transportation, air pollution, and the energy consumption of prefabricated houses, as well as ways to allow the assemblage without skilled workers.

Materials and methods

Rhinoceros 3D was used to model the design. Having modular components in the structure, the Grasshopper plug-in was used to make rotations. To ensure minimum space occupation by the structure, the optimal packing angle was calculated through a comparison between the Genetic algorithm and Surrogate model. The walls were made of fiberglass cladding, two-sided polyurethane insulation over an alloy steel interwoven wire mesh, and another fiberglass cladding layer from outside to inside.

Discussion of Results

Studies suggest that providing temporary housing is one of the challenges of crisis management organizations always confront with after the natural disasters such as earthquakes. To solve this issue, these organizations tend to use prefabricated structures like shipping container housing units. However, one problem with these structures is their transportation; due to their inflexibility, only a few can be packed into a truck for shipment. This immensely increases heavy-vehicle traffic which is a major contributor to air pollution. The emission of carbon monoxide, nitrogen oxides, hydrocarbons, and particles by fossil fuel-based vehicles cause air pollution. Besides, service delivery to large populations slows down which is something crisis management tries to avoid.

In general, temporary structures are two types: fragmented and integrated. All the problems mentioned above are inherent to the first type. By allowing more assemblable parts to be packed into each truck, integrated structures reduce transportation difficulties. However, they pose another problem: the need for many skilled workers to assemble the parts.

Most prefabricated structures are box-shaped which means that most of their surface becomes shaded in winter and exposed to strong sunlight in summer. It necessitates the need for cooling, heating, and ventilation systems in different seasons. However, these systems pose many issues in a temporary housing setting including heavy use of fossil fuels, the burning of which releases many pollutants into the air. The local environment of a crisis region may not be able to quickly clean the polluted air, causing breathing difficulty in small, densely-populated areas. Some heating systems, e.g. electric heaters, can also cause fires and other incidents.

On the other hand, ordinary buildings are extremely difficult, time-consuming, and costly to build in a crisis situation. Such buildings release large amounts of pollutants into the environment annually using masonry materials like cement and bricks.

Taking these factors into account, a type of prefabricated structure should be designed to be more optimal than the existing models in terms of pollution, transportation, and reliance on cooling and heating devices. One should keep in mind that because disaster survivors sometimes have to live in temporary housing for a long time before things go back to normal, architectural design values must be maintained in such settings as much as possible to improve their satisfaction.

Accordingly, after an extensive study of energy-optimal architectural forms, the quasi-hemispherical form was chosen for our proposed design. The reason behind this decision is that this shape reduces the need for cooling and heating systems becoming half-shadowed in summer and half-sunlit in winter, respectively—more shadow and sunlight than what a box receives in the same seasons. It is worth noting that the sphere has the smallest surface-to-volume ratio among basic three-dimensional shapes. It means that spherical objects have the least contact with cold or warm air and, thus, reduce heat transfer more than any other form. Furthermore, there is lesser need for additional structural preparations in spherical buildings due to their compressive behavior (load transfer is compressive in curved structures) which in turn reduces the used material. As a result, the activity of material producing factories is decreased helping to reduce air pollution.

Fragmentation of the structure into the smaller parts is a good solution for the transportation problem because it allows many more parts to be transported in each shipment. However, it also requires skilled workers for assemblage and installation. To solve this issue with our proposed model, a set of rails and a large pin component were designed for the convenient movement and folding/unfolding of the structure, respectively. Each panel of the hemisphere is designed smaller than the preceding panel to allow the structure to both fold perfectly and occupy less space. When the structure is completely unfolded and the rails are locked, a series of gaps appear where the sections meet. They will be covered by plastic sealing tape to prevent rain penetration and energy waste.

Adapting to Iran's overall hot desert climate and water scarcity, Persian architecture has historically sought to compensate for the harshness of nature., The Abbasi Great Mosque (also known as the Shah Mosque and Imam Mosque) in the Isfahan's Naqsh-e Jahan Square is a remarkable masterpiece that has been survived after many years from natural disasters in the harsh climate of the city. It attests to the efficiency of the quasi-hemispherical form in terms of energy conservation, material use reduction, and structural strength. The current design draws on and modernizes the architecture of Persian domes.

Choosing the right materials for the walls was a challenging part of this project because the optimal materials are needed to work well as thermal insulators and be structurally strong. They should also be flexible enough to be curved efficiently. Accordingly, the walls were made of fiberglass cladding, two-sided polyurethane insulation over an alloy steel interwoven wire mesh, and another fiberglass cladding layer from outside to inside.

To reduce the transportation, structure was divided the into smaller parts. In addition, a collapsible design of the structure was considered to obviate the need for skilled workers for assemblage. Transportation regulations do not allow trucks to carry loads longer than 12 m, wider than 2.60 m, and higher than 3 m. Therefore, the Genetic and Surrogate optimization algorithms were used to calculate the best packing angle. The Genetic algorithm produced a more optimal answer.

Standard shipping container housing units are 6.1 or 12.2 m (20/40 ft.) long and 2.44 m (8 ft.) wide. In each shipment, only one large-sized standard container (12.2 m × 2.44 m) can be transported which provides a living space of 29.76 m^2. Meanwhile, at least two units of our design accompanied with a "connector part," are transportable in each shipment providing a total of 65.33 m^2 living space. In

addition to energy conservation properties, the design is given architectural features that make it more comfortable to live in. Units can be joined using a connector part as a link to create larger spaces for big families. If each family is given one quasi-hemispherical unit, two displaced families will be sheltered by each shipment.

Thanks to its well-designed architectural features, the units can conveniently house families of 4 to 6 and could also be used as single-occupancy units to speed up emergency care if necessitated by the size of the affected population. The prefabricated building design discussed in this research, with a significant reduction in greenhouse gas emissions, energy consumption, transportation and pollution in order to preserve the ideals of the environment.

Conclusions

Awareness of the negative impacts construction on environment has generated public concern. Prefabrication is a method used to improve construction quality; however, there is a lack of scientific research on the instances where prefabricated structures were built for environmental protection. Many researchers have proposed ways to reduce not only the impacts of the construction industry on humans and the environment, but also all the activities that contribute to the climate change. Providing temporary housing has always been one of the challenges that crisis management organizations face in the aftermath of natural disasters, like earthquakes. To solve this issue, these organizations tend to use prefabricated structures like shipping container housing units. However, one of the difficulties these structures pose is their transportation which heavily increases the traffic of heavy vehicles. In general, an impact of inter- and intra-city transportation is the release of carbon monoxide, nitrogen oxides, hydrocarbons, and particulate matter by fossil fuel-based vehicles. The density and diffusion of these pollutants are depending on the speed, velocity, and on-site operation of vehicles. This study proposed a structure that is panelized to reduce transportation with a collapsible design to allow assemblage without skilled workers.

محیط‌شناسی، دورهٔ ۴۷، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۰، صفحهٔ ۲۰۵- ۲۲۱

طراحی زیست محیطی سازه های پیش ساخته اضطراری با رویکرد کاهش مصرف انرژی و آلودگی

طاها صباغیان*[۱]، مازیار آصفی[۱]، سید بهشید حسینی[۲]

۱ دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران
۲ دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، تهران، ایران

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۰/۱/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۴/۳۰

چکیده

پس از بلایای طبیعی یکی از مشکلاتی که همواره سازمان های مدیریت بحران با آن مواجه هستند، فراهم نمودن مکان های اسکان موقت است. برای این امر معمولا از سازه های پیش ساخته استفاده می شود. اکثر سازه های پیش ساخته فرم های مکعب مستطیلی دارند. از جمله مشکلات این فرم نیاز به تعدد ماشین‌های سنگین برای حمل و نقل است که منجر به افزایش مصرف سوخت های فسیلی و آلودگی هوا می شود. در این تحقیق برای کاهش حمل و نقل، تقسیم کل سازه به اجزای کوچکتر درنظر گرفته شد. علاوه بر آن طراحی دیتیل‌های ریلی شکل برای حرکت کردن و دیتیل پین مانند بزرگ برای باز و بسته شدن سازه، نیاز به نیروی کار متخصص را کاهش می‌دهد. جهت مدل سازی این طرح از نرم افزار Rhinoceros 3D استفاده شده و برای ایجاد دوران ها افزونه‌ی Grasshopper به کار رفته است. همچنین برای بدست آوردن زاویه بهینه برای بسته بندی سازه مورد نظر از مقایسه ی دو الگوریتم بهینه یابی Genetic و مدل Surrogate استفاده شد. مدل شبه نیم کره طراحی شده در این تحقیق می تواند بیش از ۵۰٪ میزان سوخت مصرفی در اثر کاهش حمل و نقل را بهینه سازد و همچنین امدادرسانی سریعتر انجام شود.

کلیدواژه

آلودگی هوا، انرژی، پیش ساخته سازی، حمل و نقل، مصالح نوین

سرآغاز

با توجه به رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای مسکن در سال‌های اخیر، در بسیاری از کشورها، برای رفع تقاضاهای ساخت و ساز، پیش ساخته سازی به عنوان یک استراتژی تولید «پاک» به کار گرفته شده و بسیاری از دولت‌ها، به کار بردن پیش ساخته سازی را به عنوان بخشی از برنامه ساخت و ساز قرار می‌دهند. تحقیقات نشان می‌دهد که برای دستیابی اصولی به پیش ساخته سازی باید یک چارچوب تحلیلی در زمینه‌های سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و فناوری در نظر گرفته شود(Lu et al., 2018). تأمین مسکن مناسب و مقرون به صرفه یک چالش بزرگ در کشورهای نوظهور و صنعتی است و ساخت و سازهای مرسوم، به ویژه در مراکز متراکم شهری و مناطق روستایی یا دورافتاده، فشارهای زیادی بر هزینه و بهره وری منابع

*نویسنده مسئول: Email: t.sabaghian@tabriziau.ac.ir

DOI: 10.22059/JES.2021.321265.1008155
DOR: 20.1001.1.10258620.1400.47.2.5.3

وارد می‌کند. بنابراین، پیش ساخته سازی می‌تواند فرصت خوبی را برای بهبود عملکرد محیطی و اقتصادی فراهم کند و از این رو به عنوان یک جایگزین مناسب برای ساخت و سازهای سنتی در محل در نظر گرفته شود (Dave et al., 2017).

برخلاف تصور رایج، پیش ساخته سازی فرآیندی جدید برای ساخت و ساز نیست، بلکه روشی است که سال‌ها مورد استفاده گسترده قرار گرفته است. علاوه بر این، این فرآیند منحصراً مبتنی بر رویکردهای فناوری پیشرفته نیست بلکه در واقع مناسب برای جامعه‌های کم درآمد است. با استناد به تحقیقاتی که در پیش ساخته سازی در چین، کلمبیا، هند، مکزیک و نیکاراگوئه صورت گرفته است، نشان داده شد که با توجه به شرایط مناسب، هزینه‌ها کاهش می‌یابد و فرصت‌های شغلی برای زنان نیز ایجاد می‌شود(Stallen et al., 1994). تاریخچه‌ی پیش ساخته سازی با ورق‌های فلزی شیاردار به اطراف اسکاتلند باز می‌گردد. در سال ۱۸۲۹ استفاده از ورق‌های فلزی شیاردار در ساختمان سازی گرایش بسیاری پیدا کرد. ورق‌های فلزی شیاردار نقش بسزایی در پیشرفت صنعت پیش ساخته سازی داشتند. از آن پس در بسیاری از کاتالوگ‌ها، خانه‌های پیش ساخته با انواع گوناگونی به مشتریان ارائه می‌شدند(Colombo et al., 2015). این احتمال وجود دارد که پیش ساخته سازی در صنعتی شدن پیشرفته‌ی بریتانیا و یا حتی بعد از جنگ جهانی دوم نیز گسترش یافته باشد(Agren and Wing, 2014).

شهرنشینی سریع به همراه توسعه اقتصاد مدرن منجر به تقاضای قابل توجه انرژی شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از پیش ساخته در حفاظت از انرژی در ساختمان یک راهکار اساسی برای کاهش زیان‌های زیست محیطی و تسریع در روند شهرنشینی است (Zhu et al., 2018). همچنین ساخت و سازهای پیش ساخته به عنوان یک روش مؤثر برای بهبود بهره وری در صنعت ساخت و ساز، نشان می‌دهد که جدا از استفاده مجدد، صرفه جویی در مصرف انرژی ناشی از کاهش زباله‌های ساختمانی و بهره وری بهتر در استفاده از مواد وجود دارد که موجب صرفه جویی ٪۱۴ –۴ در کل مصرف انرژی چرخه زندگی می‌شود (Hong et al., 2016; Aye et al., 2012). مطالعه‌ای در هنگ کنگ نشان داد که متوسط کاهش ضایعات در استفاده از پیش ساخته سازی در مقابل ساخت و سازهای معمولی حدود ٪۵۲ بود. این بدان معنی است که استفاده گسترده‌تر از پیش ساخته‌ها از بار مدیریت پسماند ساخت و ساز می‌کاهد (Jaillon et al., 2009).

بنابراین استفاده از پیش ساخته‌ها برای ساخت و ساز دارای مزایای بسیاری از جمله کاهش ضایعات و اثرات زیست محیطی در چرخه عمر ساختمان است (Lu et al., 2021; Tavares et al., 2019; Teng et al., 2018). از دیگر از مزایای این سیستم نصب آسان و هزینه‌ی کم‌تر است که منجر می‌شود بسیاری از مردم، خانه‌های صنعتی را به ساخت مرسوم ترجیح دهند. واضح است که با گذشت زمان و با پیشرفت تکنولوژی در زمینه‌ی تحلیل، طراحی و ساخت اجزای پیش ساخته، امروزه عناصر و مصالحی استفاده می‌شود که کم‌ترین خطر را برای محیط زیست داشته و حداکثر کاهش مصرف انرژی را برای استفاده کنندگان به ارمغان آورد(Colombo et al., 2015). در فرآیند پیش ساخته سازی کاهش اتلاف وقت و هزینه و بهسازی مصرف انرژی مطرح می‌باشد(Malacarne et al., 2016). همچنین پیش ساخته به عنوان یک راه حل مهم برای مقابله با فعالیت‌های پرخطر و پر زحمت در ارتباط با روش‌های معمول ساختمانی در نظر گرفته می‌شود. براساس یافته‌های محققان، چند توصیه برای ترویج استفاده از پیش ساخته‌ها از جمله مدیریت در زمان و افزایش اعتماد مصرف کننده ارائه شده است(Zhang et al., 2018).

یکی از روش‌ها برای کاهش تأثیرات زیست محیطی بخش ساختمان بهینه سازی مصالح ساختمانی و اجزای سازنده می‌باشد. برخی از یافته‌ها مبنی بر استفاده از پی‌های بتنی پیش ساخته تأثیرات زیست محیطی را در اکثر موارد

به ویژه بیش از ٪۴۴ برای انتشار گازهای گلخانه‌ای در گرمایش جهانی کاهش می‌دهد(Gispert et al., 2020). در کشور چین پتانسیل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از ساختارهای پیش ساخته در ایستگاه‌های مترو بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که ساخت بخش پیش ساخته ٪۱۲/۵۹ میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتری ایجاد می‌کند. به طور خاص، تولید گازهای گلخانه‌ای از مصالح ساختمانی در ساختارهای پیش ساخته ٪۱۴/۳۸ کاهش می‌یابد، که با استفاده از بهینه سازی ساختاری حاصل می‌شود(Liu et al., 2019). تحقیق دیگری در کشور چین نشان داد که پیش ساخته سازی منجر به کاهش انتشار کربن می شود(Hao et al., 2020). بنابراین برای بهینه شدن کارایی پیش ساخته سازی، مدل سازی اطلاعات ساختمان لازم می‌باشد($Li et al., 2019_a$).

هنگام استفاده مجدد از عناصر ساختاری پیش ساخته، هزینه اقتصادی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین دوام و یا عمر سرویس، مستقیماً با تأثیر بر محیط زیست مرتبط می‌باشد(Rubio et al., 2019). همه این مزایا را می‌توان به عنوان شیوه‌های مهم سازگار با محیط زیست ارائه داد که توسط ساخت و سازهای پیش ساخته انجام می‌شود(Hong et al., 2016; Aye et al., 2012). برای بدست آوردن کامل منافع اقتصادی حاصل از پیش ساخته سازی، تمرکز در آینده باید روی حمایت مالی برای ارتقا توسعه تکنولوژی پیش ساخته سازی، بهینه سازی ساختار ساختمان‌های پیش ساخته شده و بهبود پیشرفت بازار پیش ساخته سازی قرار گیرد(Hong et al., 2018).

این تحقیق برای کاهش حمل و نقل و آلودگی هوا، کاهش مصرف انرژی جهت سرمایش و گرمایش سازه‌های پیش ساخته در راستاری حمایت محیط زیست و عدم نیاز به نیروی ماهر برای سرهم کردن قطعات صورت گرفته است.

مواد و روش بررسی

در راستای مدل سازی این طرح از نرم افزار Rhinoceros 3D نسخه .6.20 از شرکت رابرت مک نیل و همکاران استفاده شد. این نرم افزار دارای قابلیت انعطاف پذیری بالایی بوده (Freitas et al., 2020) و به دلیل داشتن بستری آزاد برای گسترش یافتن و دارا بودن افزونه های مختلف، قابلیت‌های بیشماری از جمله مدل سازی و آنالیز را در خود جای داده است(Kwame et al., 2015). در روند مدل سازی، به دلیل مدولار بودن اجزا و نیاز به یک الگوریتم قابل تغییر در مدل به جای استفاده از حالت صلب از افزونه‌ی Grasshopper نسخه .1.0 شرکت مک نیل و همکاران که یک محیط برنامه نویسی بصری می باشد، استفاده شده است(Celani, and Vaz, 2012; Vantyghem et al., 2021). این افزونه در دوران اجزای مدولار و ایجاد فرایند پارامتریک در زاویه بسته بندی سازه به کار رفته است.

علاوه بر این در راستای بهینه یابی حداقل ابعاد برای بسته بندی سازه، مولفه‌ی Galapagos که یک مولفه‌ی درونی برای افزونه‌ی Grasshopper می‌باشد، استفاده شد. این مولفه از الگوریتم ژنتیک برای یافتن خروجی بهینه با توجه به داده‌های ورودی بهره می‌برد(Rutten, 2013). مدل سازی پارامتریک به این مولفه کمک می کند تا جانمایی کل سازه در بسته مورد نظر، مجدداً تولید شده و داده‌ها از طریق الگوریتم ژنتیک ارزیابی شوند (Ilbeigi et al., 2020). همچنین از افزونه‌ی Opossum به عنوان ابزاری که از مدل Surrogate برای بهینه یابی به کار می رود، استفاده گردید (Wortmann, 2017). این مدل هنگامی مورد استفاده قرار می گیرد که فرآیند الگوریتمی فشرده باشد (Li et al., 2019_b). در نهایت جواب دو روش با هم مقایسه شده و روش مناسب تر در فرایند پیدا کردن حداقل

ابعاد بسته بندی سازه برای حمل و نقل انتخاب گردید.

در ابتدا با استفاده از ترسیم دو قوس پایه به عنوان اساس کلی تولید یکی از قطاع های گنبد، ساختار پوسته مانند آن بخش حاصل شد. پس از آن برای ایجاد قابلیت جمع شدن کل نیم گنبد زیر بزرگترین قطاع، بقیه قسمت ها به طوری که تمامی پنج بخش دیگر به ترتیب در زیر هم قرار گیرند، مقیاس شده و کوچکتر شدند. لازم به ذکر است در این فرآیند مقدار کوچک شدن به نحوی تنظیم شده است که فضا دچار سرگیری و کاهش ارتفاع شدید نشود. سپس تمامی اجزای تولید شده برای سهولت در نحوه دوران به صورت پارامتریک به پلاگین Grasshopper متنقل شدند. در شکل ۱ مراحل مدلسازی به تفکیک از چپ به راست نمایش داده شده است. بعد از تولید الگوریتم مناسب برای دوران اجزا، که هر کدام به مقدار ۶۰ درجه نسبت به یکدیگر و حول محور اصلی عمودی سازه رو به داخل حرکت داده می شوند، دیتیل هایی برای ایجاد راحتی کاربرها در دوران، طراحی گشت. این جزئیات شامل یک پین بزرگ است که در بالاترین نقطه از شبه گنبد قرار گرفته است. این پین از یک استوانه متصل به بزرگ ترین قطاع و حلقه هایی که به بقیه ی قطاع ها متصل شده اند و حول استوانه می چرخند، تشکیل شده است. همچنین ریل هایی در پایین ترین نقطه ی قطاع ها قرار داده شدند که به همراه یک فرم قرقره مانند دو طرفه که خود دارای قابلیت حرکت و قفل شدن در ریل ها هستند، حرکت اجزا را تسهیل کردند. شبیه سازی موارد گفته شده برای حرکت قطاع ها در افزونه ی Bongo انجام شده است و پس از رفع درگیری های پیش آمده در حرکت، نوارهای لاستیکی جهت درزگیری نهایی میان فاصله های احتمالی پیش آمده برای جلوگیری از اتلاف انرژی و نفوذ آب باران در نظر گرفته شد. همچنین لازم به ذکر است مصالح جدارها، پوشش فایبرگلس روی شبکه‌ی میلگردهای بافته شده‌ی به شکل کره با عایق داخلی پلی اورتان می باشد. شکل ۲ چشم انداز حالت قرارگیری دو مدول در کنار هم را نشان می دهد.

شکل ۱. الف.قوس‌های پایه، ب. پوسته ی ابتدایی، پ. ضخامت دهی به پوسته، ت. تکثیر و مقیاس دهی در حالت جمع شده به همراه تولید فرم پین بزرگ و ث. خروجی دوران یافته از الگوریتم نوشته شده در Grasshopper

شکل۲. چشم انداز قرارگیری دو سازه در کنار هم به همراه رابط میانی

برای بدست آوردن زاویه‌ی بهینه جهت بسته بندی سازه، ابتدا یک مکعب مستطیل پیرامون سازه محاط شد. پس از آن مقادیر طول، عرض و ارتفاع خارج گردید و قدر مطلق اختلاف این ابعاد با ابعاد قوانین اصلی در بسته‌ی قابل انتقال به دست آمد. به دلیل نیاز بر رعایت قوانین حمل و نقل، برای

این مقادیر در روند بهینه یابی تابع جریمه در نظر گرفته شد. مجموع این مقادیر متغیر وابسته بهینه یابی را تعریف می کند. لازم به ذکر است طول بسته داری آزادی عمل بیشتری بوده و در تابع جریمه برای آن منظور نگردید. متغیرهای مستقل در روند بهینه یابی ۴ مولفه بوده که به ترتیب زاویه در دوران سه بعدی مجموعه و مولفه های x, y, z نقطه‌ی ابتدای بردار سازنده‌ی محور می‌باشند. نقطه‌ی انتهایی این بردار مرکز حجمی مکعب مستطیل پیرامونی می باشد. در جدول ۱ مقایسه‌ی الگوریتم Genetic و Surrogate آورده شده است.

جدول۱. مقایسه الگوریتم Genetic و مدل Surrogate در بهینه یابی ابعاد بسته بندی سازه برای حمل ونقل

الگوریتم بهینه یابی	نام افزونه یا مولفه‌ی استفاده شده	بهترین مقدار ارتفاع بسته بندی حاصل از بهینه یابی(m)	بهترین مقدار عرض بسته بندی حاصل از بهینه یابی(m)	بهترین مقدار طول بسته بندی حاصل از بهینه یابی(m)	تعداد تکرار
Genetic	Galapagos	۲/۹۰	۲/۶۰	۵/۲۶	۹۹
Surrogate	Opossum	۲/۹۰	۲/۶۰	۵/۲۷	۵۰۰

همان طور که نتایج جدول ۱ نشان می دهد، الگوریتم Genetic در تعداد تکرار کمتر به جواب بهینه تری نسبت به مدل Surrogate دست یافته است. در نتیجه علی رغم مزایای مطرح شده برای مدل Surrogate، در این طرح برای بسته بندی الگوریتم Genetic با حدود ۲۰ درصد تعداد تکرار در مدل Surrogate به جواب بهینه رسیده است. همچنین مشابهت جواب حاصل از دو الگوریتم بیانگر صحت جواب بهینه یابی و روند تعریف متغیرها می‌باشد.

نتایج

بر اساس مطالعات انجام شده، پس از بلایای طبیعی همچون زلزله، مهم ترین مورد فراهم نمودن محل‌های اسکان موقت می‌باشد. سازمان‌ها همواره سعی بر این دارند تا با استفاده از اجزای پیش ساخته‌ای همچون کانکس‌ها در روند برپایی اسکان موقت برای آسیب دیدگان اقدام نمایند. یکی از مشکلات این سازه‌ها، حمل و نقل آن‌ها می‌باشد که به دلیل صلب بودن ساختار معمولاً تعداد اندکی از آن‌ها در وسایل حمل و نقل جای گرفته و انتقال می‌یابند. این مورد باعث افزایش شدید عبور و مرور وسایل نقلیه سنگین می‌شود که یکی از عوامل مهم آلودگی هوا می‌باشند. آزاد شدن آلاینده‌های مونوکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن‌ها و ذرات معلق که بر اثر سوخت‌های فسیلی موتور وسایل نقلیه می‌باشد، منجر به آلودگی هوا می‌شود. از طرفی سرعت خدمات رسانی به جمعیت‌های زیاد، کاهش می‌یابد که بر خلاف خواسته‌های سیستم مدیریت بحران است.

در حالت کلی سازه‌های اسکان موقت به دو دسته‌ی سرهم شده و یا قطعه قطعه تقسیم می‌شوند که در مورد اول تمامی مشکلات نام برده وجود دارد. در حالت قطعه قطعه شده اندکی از مشکلات حمل و نقل کاهش می‌یابد، زیرا تعداد قطعات قابل سرهم بندی بیشتری در هر وسیله نقلیه جای می‌گیرد اما مشکل دیگری که ایجاد می‌کند نیاز به تعداد زیادی نیروی کاری ورزیده جهت سرهم بندی آن‌ها می‌باشد.

اکثر سازه‌های پیش ساخته فرم‌های مکعب مستطیلی دارند؛ در نتیجه در زمستان‌ها مساحت زیادی از سطح آن‌ها در سایه و همچنین در تابستان‌ها در آفتاب شدید قرار می‌گیرند. بنابراین در فصول مختلف، نیاز بیشتری به سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی و تهویه مطبوع می باشد. این سیستم‌ها در شرایط اسکان موقت مشکلات زیادی ایجاد می‌کنند. از جمله‌ی این مشکلات استفاده شدید این سیستم‌ها از سوخت‌های فسیلی جهت سرمایش و گرمایش

می‌باشند. در اثر سوختن این سوخت‌ها نیز آلودگی‌های زیادی وارد هوا می‌شود که شاید محیط زیست در منطقه‌های بحرانی توان پالایش سریع آن‌ها را نداشته باشد و از طرفی به دلیل تراکم احتمالی جمعیت در یک منطقه‌ی کوچک تنفس را برای افراد سخت کند. همچنین برخی از سیستم‌های گرمایشی از جمله بخاری‌های برقی خطراتی همچون حریق را ایجاد می‌کنند.

از طرفی ساخت ساختمان‌های معمولی در شرایط بحرانی بسیار سخت، زمان بر و پر هزینه می‌باشد و به طور کلی این ساختمان‌ها به دلیل نیاز به مصالح بنایی چون سیمان، آجر و غیره سالانه مقادیر زیادی از انواع آلاینده‌ها را وارد محیط زیست می‌کنند.

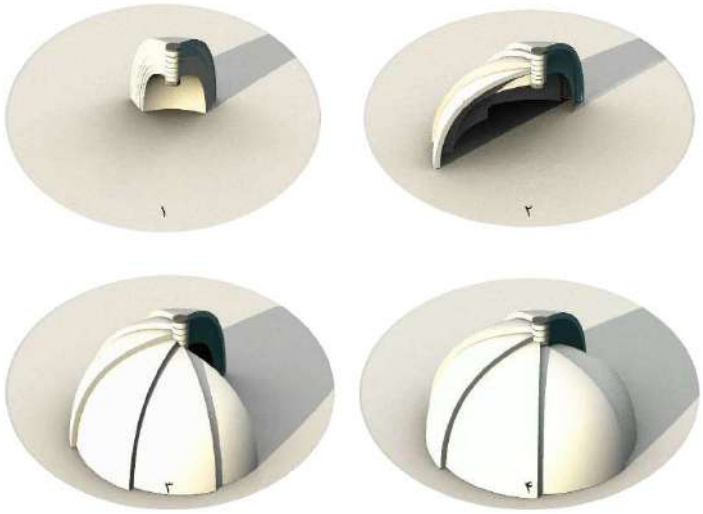
پس از در نظر گرفتن شرایط فوق باید طرحی به صورت پیش ساخته در نظر گرفته شود تا از نظر آلودگی، حمل و نقل و میزان نیاز به تجهیزات سرمایشی و گرمایشی در حالت بهینه تری نسبت به سازه‌های پیش ساخته‌ی موجود باشد. نکته‌ی قابل توجه این است که بعضاً تا فراهم آوردن شرایط عادی برای سکونت افراد آسیب دیده مدت زمانی زیادی طول می‌کشد، پس این افراد باید در این زمان بتوانند در محل اسکان‌های موقت زندگی کنند و ارزش‌های معماری در این فضا ها حفظ شود تا میزان رضایت خاطر آن‌ها افزایش یابد.

پس از مطالعات فراوان بر روی فرم‌های بهینه‌ی معماری از نظر انرژی، در این تحقیق فرم شبه نیم‌کره برای طرح پیشنهادی انتخاب گردید. دلیل انتخاب فرم مذکور این است که همواره در فصل تابستان نیمی از سطح نیم‌کره در سایه قرار می‌گیرد پس به مساحت قسمت‌های در سایه، نسبت به فرم‌های مکعب مستطیلی افزوده شده، بنابراین باعث می‌شود که نیاز به سیستم‌های سرمایشی کاهش پیدا کند. همچنین در زمستان‌ها نیز نیمی از آن در طول روز در آفتاب قرار می‌گیرد و نیاز به سیستم‌های گرمایشی کاهش می‌یابد. به هنگام بارش برف، به دلیل فرم منحنی احتمال نشستن برف روی آن کاهش یافته و همچنین مساحت برف گیر کمتری نیز دارد. نکته قابل توجه این است که در میان احجام معمولی کره‌ها کمترین نسبت سطح به حجم را دارند پس تماس کمتری با هوای سرد و گرم زمستان و تابستان دارند و در نتیجه تبادل حرارت از طریق جداره‌ها نسبت به احجام دیگر کاهش می‌یابد. علاوه بر آن از نظر سازه‌ای به دلیل رفتار فشاری (انتقال بارها در سازه‌های قوسی شکل به صورت فشاری صورت می‌گیرد) نیاز به تمهیدات سازه‌ای بیشتر در آن کاهش می‌یابد که باعث کمتر شدن مصرف مواد می شود، در نتیجه فعالیت کارخانه‌های تولید مواد و مصالح کاهش یافته و به کاهش آلودگی هوا کمک می‌کند.

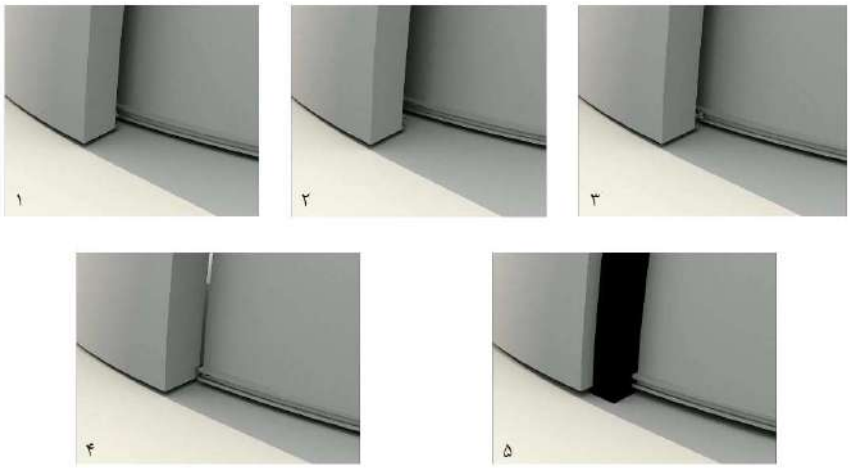
برای حل معضل حمل و نقل ایده‌ی قطعه قطعه کردن سازه، روش مناسبی می‌باشد زیرا می‌توان تعداد قطعات خیلی بیشتری را در هر سری از بارگیری به محل مورد نظر انتقال داد؛ اما نیاز به نیروی کار ماهر برای ساخت و سرهم بندی قطعات وجود دارد که این نیاز باعث افزایش جابه جایی افراد و آذوقه مدت اقامت آن‌ها در محل حادثه دیده است. در این طرح سعی شد تا با طراحی دیتیل‌های ریلی شکل برای حرکت کردن و یک دیتیل پین مانند بزرگ امکان باز و بسته شدن را برای سازه، بدون نیاز به نیروی کار متخصص فراهم آورد. همانطور که در شکل۳ مشاهده می‌شود برای جمع شدن کامل قطاع‌های نیم‌کره روی هم، هر تکه به نسبت تکه‌ی قبل از خود کوچک‌تر شده است. این مورد هم باعث کوچک‌تر شدن و به صورت کامل جمع شدن سازه می‌شود. شکل ۴ نشان می‌دهد که پس از باز شدن کامل سازه و قفل شدن ریل‌ها درزهایی در محل رسیدن قطاع‌ها به هم مشاهده می‌شود که به وسیله‌ی درزگیر نواری پلاستیکی برای عدم نفوذ آب باران و هدررفت انرژی پوشیده می‌شود.

معماری در کشور ایران به دلیل دارا بودن اقلیم کلی گرم و خشک و کمبود آب در طی تاریخ همواره سعی بر جبران ناملایمات طبیعی داشته است. شاهکار بی نظیری همچون مسجد تاریخی امام واقع در میدان نقش جهان که

پس از گذشت سالیان از تمام بلایای طبیعی نجات یافته و واقع بودن آن در اقلیم سخت گرم و خشک شهر اصفهان نشان دهده کار آمدی این فرم از نظر کاهش مصرف انرژی، کاهش مصرف مصالح و مقاومت سازه‌ای می‌باشد. طرح مذکور از معماری گنبدهای ایرانی الهام گرفته شده است و جلوه‌ای مدرن از آن‌ها است.

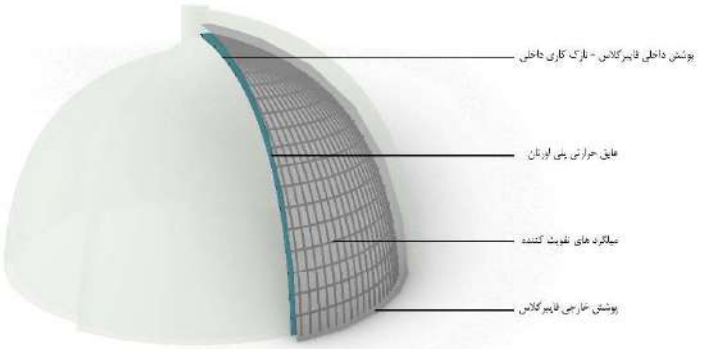


شکل ۳ . بخش‌های ۱ تا ۴ به ترتیب مراحل باز و جمع شدن سازه را نشان می‌دهد.



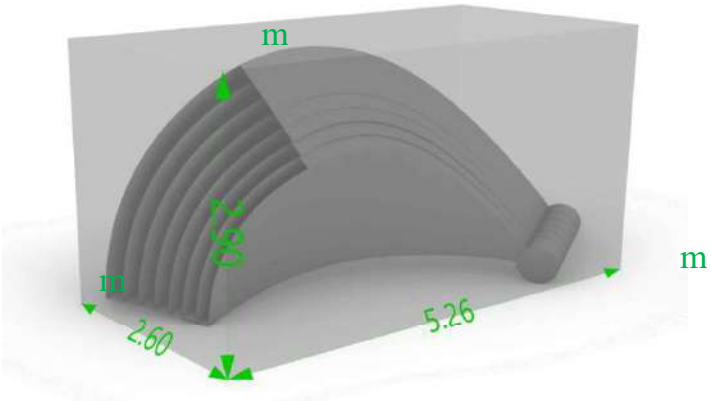
شکل۴ . بخش‌های ۱ تا ۴ نحوه‌ی باز شدن جزئیات ریل سازه نمایش داده شده است. بخش ۵ نوار عایق پلاستیکی جهت پوشاندن درزهای ایجاد شده را نشان می‌دهد.

انتخاب مصالح جداره‌ها در این طرح، از بخش‌های چالش برانگیز در روند طراحی می‌باشد؛ زیرا مصالح انتخابی باید از نظر عایق بودن به خوبی عمل کرده و از تبادلات دمایی جلوگیری به عمل آورد. نکته‌ی قابل توجه انتخاب مصالحی است که شرایط گفته شده را داشته و علاوه بر آن بتواند به خوبی به فرم منحنی تبدیل شده و از نظر سازه‌ای نیز مقاومت مطلوبی داشته باشد. بنابراین، پوشش فایبرگلس برروی شبکه‌ی میلگردهای بافته شده‌ی به شکل کره با عایق داخلی پلی اورتان انتخاب گردید که در شکل ۵ جزئیات آن نمایش داده شده است.



شکل ۵ . نمایش مصالح انتخابی برای طرح

در این تحقیق برای کاهش حمل و نقل، تقسیم کل سازه به اجزای کوچکتر درنظر گرفته شد و برای عدم نیاز به نیروی ماهر برای سرهم کردن قطعات، پروژه طوری طراحی شد که قابلیت باز و بسته شدن را توسط افراد بومی غیر متخصص به آسانی داشته باشد. همچنین، طبق محدودیت‌های موجود در حمل و نقل، باری که بر روی تریلی قرار داده می‌شود باید حداکثر طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۲ ، ۲/۶۰ ، ۳ متر را دارا باشد(Lumsden, 2004). بنابراین برای به دست آوردن بهترین زاویه بسته بندی سازه، از دو الگوریتم بهینه یابی Genetic و مدل Surrogate استفاده شد که پس از مقایسه آن‌ها الگوریتم Genetic جواب بهینه‌تری را در تعداد تکرار کمتر، حاصل نمود. نحوه‌ی بسته بندی به همراه ابعاد آن در شکل ۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۶ . نحوه ی بهینه‌ی جای گذاری سازه بر روی تریلی

در شرکت‌های کانکس سازی ابعاد کانکس‌های استاندارد دربازه‌ی رایج طول ۲۰ یا ۴۰ فوت معادل ۶/۱ یا ۱۲/۲ متر و عرض ۸ فوت معادل ۲/۴۴ متر ساخته می‌شوند(Powers et al., 2010; Wilson and Roach, 1999). اگر بزرگ‌ترین کانکس را با طول ۱۲/۲و عرض ۲/۴۴ متر در نظر بگیریم، با یک بار حمل و نقل فضای قابل سکونتی به مساحت ۲۹/۷۶ متر مربع بدست می‌آید. در صورتی که در یک بار حمل و نقل، حداقل دو سازه با طرح این پژوهش به همراه قسمت اتصال دهنده‌ی آن انتقال می‌یابد که مساحتی معادل ۶۵/۳۳ متر مربع را ایجاد می‌کند.

اگر مسافت انتقال را یک مسیر ۱۰۰ کیلومتری تصور کنیم و از ماشین های سنگین با طول ۱۲ متری استفاده

کنیم، ۴۲/۵۲ لیتر سوخت برای این انتقال مصرف می‌شود(Lumsden, 2004). اگر مقدار سوخت مصرفی را بر عدد متر مربع فضای قابل سکونت تقسیم کنیم، معیار مناسبی برای مقایسه طرح مذکور با کانتینرهای رایج حاصل می شود. جدول ۲ تفاوت میزان سوخت مصرفی به ازای فضای قابل سکونت فراهم شده برای ۱۰۰ کیلومتر انتقال بین سازه طراحی شده و کانتینر های معمول را نشان می دهد.

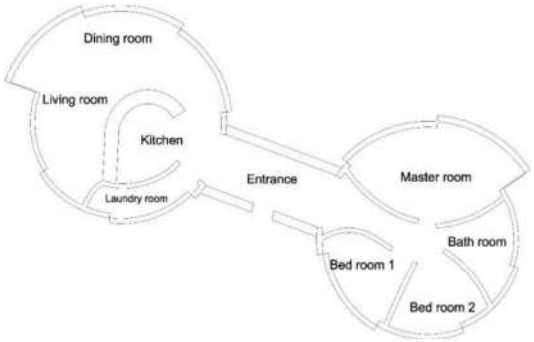
جدول ۲. بررسی تفاوت سوخت مصرفی به ازای فضای قابل سکونت فراهم شده در هر ۱۰۰ کیلومتر انتقال بین سازه طراحی شده و کانتینر های معمول

نوع سازه‌ی پیش ساخته	مساحت قابل سکونت در هر انتقال (حاصل‌ضرب مساحت در تعداد انتقال یافته) (m^2)	حداکثر تعداد جایگیری در هر تریلر ۱۲ متری	نسبت سوخت مصرفی به مساحت فراهم شده در هر ۱۰۰ کیلومتر انتقال با تریلر های رایج ۱۲ متری(L/m^2)
کانکس با طول ۶/۱ متر	۲۹/۷۶۸	دو عدد	۱/۴۲۸۴
کانکس با طول ۱۲/۲ متر	۲۹/۷۶۸	یک عدد	۱/۴۲۸۴
مدل طراحی شده شبه نیم کره	۶۵/۳۳	دو عدد به همراه فضای میانی	۰/۶۵۰۹

جدول ۲ نشان می دهد که طرح پیشنهادی در این تحقیق منجر به کاهش حمل ونقل و مصرف سوخت شده که سبب کاهش مصرف انرژی می شود. همچنین به طور استنتاجی میتوان نتیجه گرفت که در فرایند جا به جایی آلاینده های کمتری تولید می شوند و با محیط زیست سازگارتر هستند. لازم به ذکر است که می توان به جای استفاده از تریلرهای معمول ۱۲ متری از تریلرهای بزرگتر(طول بار های ۲۵ متر) که نسبت کمتری از مصرف سوخت به ازای هر ۱۰۰ کیلومتر دارند، استفاده نمود تا لطمه کمتری به محیط زیست وارد شود(Lumsden, 2004). همچنین با این روش فرآیند امداد رسانی نیز سریعتر انجام می‌گردد.

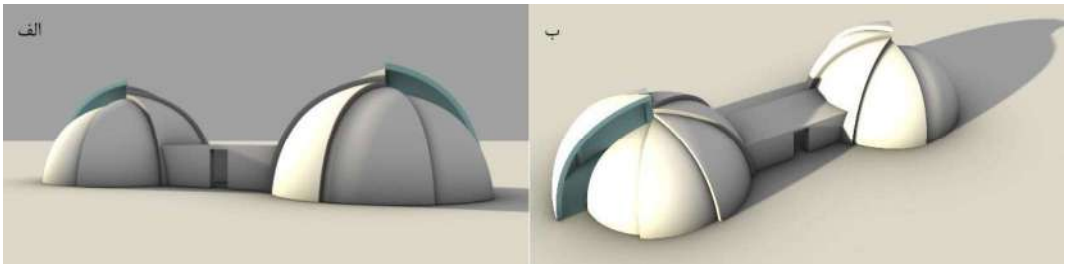
علاوه بر ویژگی‌های ذکر شده در رابطه با کاهش مصرف انرژی، ویژگی‌های معمارانه برای زندگی راحت‌تر نیز در آن در نظر گرفته شده است. همچنین می‌توان به وسیله‌ی فضای رابط متصل کننده فضاهای بزرگ‌تری برای خانواده‌های با جمعیت بیشتر نیز بوجود آورد. در صورتی که یکی از این شبه نیم کره‌ها در اختیار یک خانواده قرار گیرد، با هر بار حمل و نقل ۲ خانواده حادثه دیده دارای سرپناه می‌شوند.

پلان پیشنهادی که دارای قابلیت تغییر متناسب با تعداد افراد ساکن است، درشکل ۷ آورده شده است. شکل ۸ نمایانگر چشم اندازهای های سازه و شکل ۹ تصاویر سه بعدی اتصالات آن را نمایش می‌دهد.

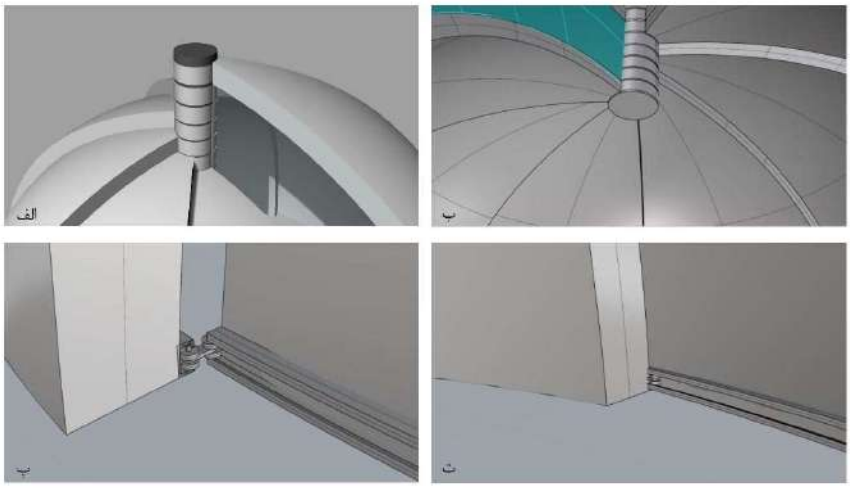


شکل ۷. پلان پیشنهادی طرح

این طرح با توجه به ویژگی‌های مناسب در طراحی معمارانه، برای یک خانواده با جمعیت ۴ تا ۶ نفر در نظر گرفته شده است که می‌تواند متناسب با گستردگی جمعیت حادثه دیده به بلوک‌های تکی جهت امداد رسانی سریعتر درنظر گرفته شود، که با کاهش قابل توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف انرژی، حمل ونقل و آلودگی، در جهت حفظ آرمان‌های محیط زیست می‌باشد.



شکل ۸ . الف: چشم انداز شماتیک دید ناظر ، ب: چشم انداز شماتیک دید پرنده



شکل ۹ . الف: تصویر سه بعدی خارجی محور دوران سازه، ب: تصویر سه بعدی داخلی محور دوران سازه، پ: تصویر سه بعدی خارجی ریل و قرقره‌ها در انتهای مسیر و قبل از بسته شدن، ت: تصویر سه بعدی داخلی ریل و قرقره‌ها در انتهای مسیر، پس از بسته شدن

بحث و نتیجه گیری

آگاهی از آثار مخرب ساخت و ساز بر محیط زیست منجر به نگرانی اذهان عمومی شده است. پیش ساخته سازی روشی است که به منظور افزایش کیفیت عملکرد ساخت و ساز به کار برده می‌شود، با این حال در تحقیقات علمی جای بررسی جزئیات نمونه‌هایی که با ظرفیت‌های بالقوه‌ی پیش ساخته‌ها برای حفظ محیط زیست ساخته شده‌اند خالی است. بسیاری از پژوهشگران تاکنون فعالیت‌هایی را جهت کاهش اثر این صنعت بر انسان و اکوسیستم و کم‌تر کردن فعالیت‌های مخرب که باعث ایجاد تغییرات آب و هوایی در کره‌ی زمین می‌شوند، مطرح کرده‌اند. یکی از مشکلات این سازه‌ها، حمل و نقل آن‌ها می‌باشد که باعث افزایش شدید عبور و مرور وسایل نقلیه سنگین می‌شود. به طور کلی یکی از آثار سیستم حمل و نقل جاده‌ای و شهری آزاد شدن آلاینده‌های مونوکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن‌ها و ذرات معلق است که بر اثر مصرف سوخت‌های فسیلی در موتور وسایل نقلیه می‌باشد و غلظت و اختلاط این مواد آلاینده بستگی به سرعت، شتاب و یا در جا کار کردن وسایل نقلیه دارد. همچنین بحث انرژی و ردپای زیست محیطی مرتبط با ساختمان‌ها نکته دیگر حائز اهمیت است. در تحقیقی که در ایتالیا به عنوان یک مطالعه موردی صورت گرفت، نشان داد که سیستم ساخت و ساز پیش ساخته، باعث کاهش ٪۸۲ تقاضای انرژی ساختمان شد (Pittau et al., 2017). در سراسر جهان، ساختمان‌ها و ساخت و سازها بیش از یک سوم از مصرف نهایی انرژی را به خود اختصاص داده‌اند (Chang et al., 2018). فناوری پیش ساخته به دلیل پتانسیل بهبود کیفیت ساخت در بسیاری از کشورها به شدت رایج

شده است. نتایج تحقیقات کائو حاکی از آن است که نمونه ساختمان مسکونی پیش ساخته در کارآیی مصرف انرژی با کاهش ٪۲۰/۴۹ در کل مصرف در مقایسه با نمونه ساختمان مسکونی سنتی کارآمدتر می‌باشد. همچنین استفاده از پیش ساخته سازی با ٪۳۵/۸۲ در کاهش منابع ، ٪۶/۶۱ کاهش در آسیب‌های سلامتی و ٪۳/۴۷ کاهش در آسیب به اکوسیستم است. بنابراین فن‌آوری پیش ساخته به دلیل کاهش آسیب به محیط زیست در مقایسه با فناوری ساخت و ساز سنتی، دوستدار محیط زیست می‌باشد (Cao et al., 2015). نکته مهم دیگر، انتشار گازهای گلخانه‌ای است که بر اثر ساخت و ساز با گذشت زمان قابل توجه خواهد بود. روش‌های مختلف ساخت و ساز بر انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیر می‌گذارد. مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۳ به بررسی تفاوت میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بین روش‌های نیمه پیش ساخته و ساخت و ساز معمولی پرداخت. نتایج نشان داد که روش نیمه پیش ساخته در مقایسه با ساخت و ساز معمولی به تولید گازهای گلخانه‌ای کمتر برای ساخت هر متر مربع منجر می‌شود. چهار مورد که به کاهش انتشار آلاینده کمک می‌کند، انتشار گازهای گلخانه‌ای از مواد ساختمانی، حمل مصالح ساختمانی، کاهش مصرف تجهیزات و تکنیک‌ها و حمل و نقل زباله و خاک می‌باشد(Mao et al., 2013). پیش ساخته‌ها اجرای معمول طراحی و ساخت و ساز ساختمان را تغییر می‌دهند (Chang et al., 2018). بنابراین باید نقاط قوت و ضعف پیش ساخته‌سازی از منظر بهره وری و منابع و پایداری محیط زیست بررسی و فرصت‌های سبز را در ساختمان‌های پیش ساخته مشخص نموده و استراتژی‌های عمده را بر اساس مزایای سبز پیش ساخته سازی مبنای سیاستگذاری و تصمیم گیری قدرتمند مقامات دولتی، تولیدکنندگان محصولات پیش ساخته و پیمانکاران قرار داد. نظر به اهمیت حمل و نقل و آلودگی های ایجاد شده حاصل از آن، در این تحقیق برای کاهش حمل و نقل و مصرف انرژی، برای طرح پیشنهادی به ترتیب تقسیم کل سازه به اجرای کوچکتر و فرم شبه نیم کره درنظر گرفته شد. برای عدم نیاز به نیروی کاری زبده برای سرهم کردن قطعات، پروژه طوری طراحی شد که قابلیت باز و بسته شدن داشته باشد. طراحی دیتیل های ریلی شکل برای حرکت کردن و دیتیل پین مانند بزرگ امکان باز و بسته شدن را برای سازه فراهم آورد.

فهرست منابع

Agren, R. & Wing, R.D. (2014). Five moments in the history of industrialized building, *Construction Management and Economics, 32(1 – 2)*, 7 – 15.

Aye, L., Ngo, T., Crawford, R.H., Gammampila, R., & Mendis, P. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules. *Energy and Buildings, 47*, 159-168.

Cao, X., Li, X., Zhu, Y., & Zhang, Z. (2015). A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China. *Journal of Cleaner Production, 109*, 131-143.

Celani, G., & Vaz, C.E.V. (2012). CAD Scripting and Visual Programming Languages for Implementing Computational Design Concepts:A Comparison From A Pedagogical Point Of View. *international journal of architectural computing, 10(01)*, 121-137.

Chang, Y., Li, X., Masanet, E., Zhang, L., Huang, Z., & Ries, R. (2018). Unlocking the green opportunity for prefabricated buildings and construction in China, Resources. *Conservation and Recycling, 139*, 259-261.

Colombo, I.G., Colombo, M., & Prisco, M. (2015). Bending behaviour of Textile Reinforced Concrete sandwich beams. *Construction and Building Materials, 95*, 675-685.

Dave, M., Watson, B., & Prasad, D. (2017). Performance and Perception in Prefab Housing: An Exploratory Industry Survey on Sustainability and Affordability. *Procedia Engineering, 180*, 676-686.

Freitas, J.D.S., Cronemberger, J., Soares, R.M., & Amorim, C.N.D. (2020). Modeling and assessing BIPV envelopes using parametric Rhinoceros plugins Grasshopper and Ladybug. *Renewable Energy, 160*, 1468-1479.

Gispert, E.P., Delmas, D.S., Fuente, A.D.L., Moonen, S.P.G., & Josa, A. (2020). Environmental analysis of concrete deep foundations: Influence of prefabrication, concrete strength, and design codes. *Journal of Cleaner Production, 244*, 118751.

Hao, J.L., Cheng, B., Lu, W., Xu, J., Wang, J., Bu, W., & Guo, Z. (2020). Carbon emission reduction in prefabrication construction during materialization stage: A BIM-based life-cycle assessment approach. *Science of The Total Environment, 723*, 137870.

Hong, J., Shen, G.Q., Li, Z., Zhang, B., & Zhang, W. (2018). Barriers to promoting prefabricated construction in China: A cost–benefit analysis. *Journal of Cleaner Production, 172*, 649-660.

Hong, J., Shen, G.Q., Mao, C., Li, Z., & Li, K. (2016). Life-cycle energy analysis of prefabricated building components: an input–output-based hybrid model. *Journal of Cleaner Production, 112(4)*, 2198-2207.

Ilbeigi, M., Ghomeishi, M., & Dehghanbanadaki, A. (2020). Prediction and optimization of energy consumption in an office building using artificial neural network and a genetic algorithm. *Sustainable Cities and Society, 61*, 102325.

Jaillon, L., Poon, C.S., & Chiang, Y.H. (2009). Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong. *Waste Management, 29(1)*, 309-320.

Kwame, S., Dzegblor, N.K., & Lodonu, J.C. (2015). The Use of Computer-Based Tutorial to Augment Teaching and Learning of Computer Software Application: A Case Study of Rhinoceros 3d Software. *International Journal OF Innovative Research & Development, 4(2)*, 209-216.

Li, X., Shen, G.Q., Wu, P., & Yue, T. (2019)$_a$. Integrating Building Information Modeling and Prefabrication Housing Production. *Automation in Construction, 100*, 46-60.

Li, S., Trevelyan, J., Wu, Z., Lian, H., Wang, D., & Zhang, W. (2019)$_b$. An adaptive SVD–Krylov reduced order model for surrogate based structural shape optimization through isogeometric boundary element method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 349*, 312-338.

Liu, M., Jia, S., & Liu, X. (2019). Evaluation of mitigation potential of GHG emissions from the construction of prefabricated subway station. *Journal of Cleaner Production, 236*, 117700.

Lu, W., Chen, K., Xue, F., & Pan, W. (2018). Searching for an optimal level of prefabrication in construction: An analytical framework. *Journal of Cleaner Production, 201*, 236-245.

Lu., W., Lee, W.M.W., Xue, F., & Xu, J. (2021). Revisiting the effects of prefabrication on construction waste minimization: A quantitative study using bigger data. *Resources, Conservation and Recycling, 170*, 105579.

Lumsden, K. (2004). *Truck masses and dimensions - impact on transport efficiency.* Department of Logistics and Transportation, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

Malacarne, G., Monizza, G.P., Ratajczak, J., Krause, D., Benedetti, C., & Matt, D.T. (2016). Prefabricated Timber Facade for the Energy Refurbishment of the Italian Building Stock: The Ri.Fa.Re. Project. *Energy Procedia, 96*, 788-799.

Mao, C., Shen, Q., Shen, L., & Tang, L. (2013). Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods: Two case studies of residential projects. *Energy and Buildings, 66*, 165-176.

Pittau, F., Malighetti, L.E., Iannaccone, G., & Masera, G. (2017). Prefabrication as Large-scale Efficient Strategy for the Energy Retrofit of the Housing Stock: An Italian Case Study. *Procedia Engineering, 180*, 1160-1169.

Powers, D.J., Scott, M.A., & Mackey, T.C. (2010). *Freight Container Lifting Standard*. Washington River Protection Solutions, LLC, RPP-40736.

Rubio, J.N., Pineda, P., & Martinez, A.G. (2019). Sustainability, prefabrication and building optimization under different durability and re-using scenarios: Potential of dry precast structural connections. *Sustainable Cities and Society, 44*, 614-628.

Rutten, D. (2013). Galapagos: On the Logic and Limitations of Generic Solvers. *Architectural Design, 83(2)*, 132-135.

Stallen, M., Chabannes, Y., & Steinberg, F. (1994). Potentials of prefabrication for self-help and mutual-aid housing in developing countries. *Habitat International, 18(2)*, 13-39.

Teng, Y., Li, K., Pan, W., & Ng, T. (2018). Reducing building life cycle carbon emissions through prefabrication: Evidence from and gaps in empirical studies. *Building and Environment, 132*, 125-136.

Tavares, V., Lacerda, N., & Freire, F. (2019). Embodied energy and greenhouse gas emissions analysis of a prefabricated modular house: The "Moby" case study. *Journal of Cleaner Production, 212*, 1044-1053.

Vantyghem, G., Ooms, T., & Corte, W.D. (2021).VoxelPrint: A Grasshopper plug-in for voxel-based numerical simulation of concrete printing. *Automation in Construction, 122*, 103469.

Wilson, I.D., & Roach, P.A. (1999). Principles of combinatorial optimization applied to container-ship stowage planning. *Journal of Heuristics, 5*, 403–418.

Wortmann, T. (2017, April). *Opossum: Introducing and Evaluating a Model-based Optimization Tool for Grasshopper*. Protocols, Flows and Glitches, Proceedings of the 22nd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), Hong Kong. 283-292.

Zhang, W., Lee, M.W., Jaillon, L., & Poon, C.S. (2018). The hindrance to using prefabrication in Hong Kong's building industry. *Journal of Cleaner Production, 204*, 70-81.

Zhu, H., Hong, J., Shen, G.Q., Mao, C., Zhang, H., & Li, Z. (2018). The exploration of the life-cycle energy saving potential for using prefabrication in residential buildings in China. *Energy and Buildings, 166*, 561-570.