

Lightweighting in Iranian Architecture: From Structural Solutions to Integration with Architectural Space, with an Emphasis on the Dome of Soltaniyeh

Ahad Nejad Ebrahimi¹, Ghazaleh Sarencheh², Mohammad Reza Chenaghlo³

1. Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran (Corresponding Author). **Email:** ebrahimiahad@gmail.com
2. M.A. in Architectural Technology, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.
3. Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

Article Info

Pp: 131-160

Original Article

Received: 2023/10/04

Revised: 2023/12/04

Accepted: 2024/01/25

 <https://dx.doi.org/10.66224/45.107.5>

Use your device to scan
and read the article online



Athar Journal
Journal of Cultural Heritage and
Tourism Research Institute (RICHT),
Tehran, Iran

Publisher:
Cultural Heritage and Tourism
Research Institute (RICHT).

ABSTRACT

Abstract

Iranian architects, to stabilize historical structures, opted for reducing weight and lightening the construction instead of adding complexity. Aesthetic beauty was also important to them, and in this regard, they devised solutions that, in addition to reducing weight, also preserved the beauty and functionality of the structure. Lightweighting in Iranian architecture initially was a simple structural solution, but later architects were able to combine this structural solution with architectural approaches. While lightening the load, they created beautiful architectural spaces. The mausoleum of Mohammad Khodabandeh in Soltaniyeh, as one of the largest funerary buildings of the Islamic era in Iran, is a complex structure in which combined lightweighting techniques such as boxing (sanduheh kardan), interlocking (kenobandi), and bracing (ghayd kardan) have been employed. It seems that this combined structural and architectural approach can be considered one of the most effective factors in the stability of the Dome of Soltaniyeh. This research seeks to answer the question: How were lightweighting solutions in historical structures developed in Iranian architecture, from a simple structural solution to the integration of structure and architecture for beauty while considering structural requirements? And how were these cases applied in the Dome of Soltaniyeh? This research is fundamental in its objective and has been conducted using a descriptive-analytical method. Information and data were collected through library studies in lightweighting and its types, along with field surveys in the case study. The research results showed that the use of techniques such as decreasing thickness from the base to the apex of the dome, the use of a double-shelled dome, as well as the presence of internal and external iwans, led to a reduction in the weight of the structure alongside the creation of unique architectural spaces.

Keywords: Structural Weight Reduction, Historic Building, Lightweighting of Historic Buildings, Vaulted Structure, Soltaniyeh Dome.

Copyright © 2023. This open-access journal is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the AttributionNonCommercial terms.

URL: <https://athar.richt.ir/article-2-1568-en.html>

How to Cite This Article:

Nejad Ebrahimi, A., Sarencheh, Gh. & Chenaghlo, M. R., (2025). "Lightweighting in Iranian Architecture: From Structural Solutions to Integration with Architectural Space, with an Emphasis on the Dome of Soltaniyeh". *Athar*, 107(45): 131-160. <https://dx.doi.org/10.66224/45.107.5>

Introduction

Lightweighting as a method for stabilizing historical structures in Iran has been a significant challenge for architects. They aimed to achieve not only a reduction in the structure's mass but also to ensure its apparent and structural stability. Therefore, alongside focusing on structural solutions for lightweighting, they also paid attention to aesthetic factors and visual concepts. For example, 'panam bandi' (creating intermediate layers) was used not only for thermal and acoustic insulation and to provide human-scaled spaces but also for lightening the structure. In the space of dome chambers, the dome itself, as the covering, is the first and most important element in creating this space. In the construction of domes, there were always specific reasons, such as creating a covering for large spans without columns. However, structural necessities and spatial needs, like reducing the effects of heat and cold and the efficient use of materials, could also be among the other reasons. Lightweighting was a structural solution, and architects utilized this technique in various parts, from wall construction to roofing. Architects strived to use architectural solutions in combination with lightweighting, and this lightweighting led to the formation of new architectural forms. The aim of this research is to present various lightweighting solutions based on the study of Iranian architectural examples, with an emphasis on the case study of the Mausoleum of Khodabandeh, known as the Dome of Soltaniyeh. This is to demonstrate how a structural solution was transformed in combination with architectural space in Iranian architecture. The main research question can be stated as: How have Iranian architects been able to transform lightweighting, which is a purely structural matter, into a completely architectural solution for creating beautiful architectural spaces? The architecture of the Dome of Soltaniyeh is a suitable example for this study, as its structural stability has been achieved through this very method.

Discussion

A comparative study of lightweighting techniques in Iranian architecture and those employed in the construction of the Soltaniyeh Dome demonstrates that although many of these techniques initially served purely structural purposes, in the case of the Soltaniyeh Dome, they evolved into a sophisticated combination of structural engineering and architectural design. Traditional Iranian architects, throughout history, developed lightweighting strategies primarily to reduce the dead load of massive structures, thus enhancing their stability and resistance to natural disasters such as earthquakes. These methods included the reduction of cross-sectional areas, the use of lighter materials at higher elevations, the introduction of double-shelled domes, and the application of vaulting techniques such as ribbing and coffering.

In the Soltaniyeh Dome, while these classical techniques were present, the innovative aspect lies in the architects' deliberate integration of lightweighting methods with the creation of functional and aesthetically pleasing spaces. On the first and second floors, the incorporation of recessed niches and small iwans overlooking the inner spaces not only contributed to the reduction of the wall masses but also introduced dynamic spatial experiences for users. These spaces, while maintaining the structural integrity of the dome, also reflected the aesthetic values of Iranian-Islamic architecture, where the balance between engineering and beauty was meticulously achieved.

Moreover, in the upper levels, the use of external iwans around the structure provided further opportunities for lightweighting by removing unnecessary mass while simultaneously enhancing the building's visual articulation and environmental performance, such as improved ventilation and light access. This strategy illustrates a unique architectural approach where structural necessity was seamlessly blended with spatial innovation.

The Soltaniyeh Dome, therefore, serves as a pivotal example of how lightweighting techniques transcended their initial structural purpose to become an intrinsic part of the architectural language. It showcases how Iranian architects moved beyond mere engineering solutions, using lightweighting not just for structural efficiency but also to enrich the spatial, visual, and functional qualities of monumental buildings. This holistic approach represents a milestone in the evolution of architectural and construction practices in Iran, setting a precedent for subsequent developments in Islamic architecture.

Conclusion

The principle of lightweighting holds significant importance not only in architectural construction but also in various discussions such as restoration and maintenance. This research has two main objectives. Firstly, to study and examine the various lightweighting solutions in different structural forms: flat, vaulted, and specifically domed. In the next stage, the aim was to understand the skillful combination of lightweighting solutions by re-examining the different components and elements of the Dome of Soltaniyeh. This includes how the main weight of the structure has been significantly reduced despite the presence of eight arches, and how the dome's form and the number of its shells have addressed structural issues, while simultaneously creating beautiful architectural spaces through the construction of vaults and shelves, and elegant iwans. Furthermore, the research explores how niches and arches are created in both load-bearing and non-load-bearing elements in a way that, while creating visual appeal, also contributes to the lightweighting of piers and load-bearing walls. The use of different methods significantly impacts the reduction of the structure's weight, especially when several methods are used simultaneously. In the Dome of Soltaniyeh, multiple lightweighting methods have been employed concurrently, from the dome's covering to the internal and external walls and facades. These lightweight techniques include:

1. The thickness of the dome decreases from its base to its apex.
2. The dome is constructed as a double shell.
3. The use of vaults and arches in the internal and external walls, which, in addition to enhancing the building's beauty, has helped reduce the weight of the walls.

The construction of internal and external iwans on the first and second floors not only created architectural space but also significantly contributed to reducing the overall weight of the building. Reducing the weight of the building plays a crucial role in increasing its resistance to applied forces.

Acknowledgments

The authors would like to express their gratitude to the anonymous reviewers of the journal, whose valuable comments enriched the content of this article.

Observation Contribution

The authors have contributed equally to the preparation of this research.

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest. All financial resources for this study were provided independently by the researchers.

مقاله پژوهشی

سبک‌سازی در معماری ایران از راهکار سازه‌ای تا ترکیب با فضای معماری با تأکید بر گنبد سلطانیه

احد نژادابراهیمی^۱، غزاله سارنجه^۲، محمدرضا چناقلو^۳

۱. استاد گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران (نویسنده مسئول).

Email: Ahadebrahimi@tabriziau.ac.ir

۲. کارشناس ارشد تکنولوژی معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران.

۳. استاد گروه عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران.

خلاصه

معماران ایرانی برای پایداری سازه‌های تاریخی، به جای افزودن پیچیدگی، به کاهش وزن و سبک‌سازی بنا می‌پرداختند. زیبایی ظاهری نیز برای آنان اهمیت داشت و در این راستا، راهکارهایی ابداع می‌کردند که علاوه بر کاهش وزن، زیبایی و کارایی سازه را هم حفظ کنند، و سبک‌سازی در معماری ایران ابتدا یک راهکار سازه‌ای ساده بود؛ ولی در ادامه معماران توانستند این راهکار سازه‌ای با راهکارهای معمارانه ترکیب کنند و در عین سبک‌سازی، فضاهای زیبای معماری خلق کنند و مقبره محمد خدابنده در سلطانیه به عنوان بزرگ‌ترین بنای آرامگاهی دوران اسلامی ایران عالم یکی از سازه‌های پیچیده‌ای می‌باشد که فنون سبک‌سازی ترکیبی مانند: صندوقه کردن، کنوبندی، قید کردن در آن به کار رفته است. به نظر می‌رسد این راهکار ترکیبی سازه و معماری می‌تواند یکی از مؤثرترین عوامل پایداری گنبد سلطانیه محسوب شود. این پژوهش به دنبال پاسخ به این سؤال است: راهکارهای سبک‌سازی در سازه‌های تاریخی از یک راهکار ساده سازه‌ای تا ترکیب سازه با معماری برای زیبای در عین توجه به الزامات سازه‌ای در معماری ایران چگونه بود و در گنبد سلطانیه این موارد چطور کاربست یافته است؟ این تحقیق از لحاظ هدف از تحقیقات بنیادی می‌باشد که به روش توصیفی-تحلیلی کار شده است و جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های آن از طریق مطالعات کتابخانه‌ای در حوزه سبک‌سازی و انواع آن با به همراه پیمایش‌های میدانی در نمونه مطالعاتی بود و نتایج تحقیق نشان‌داد استفاده از فونونی چون کم شدن ضخامت از پاکار تا رأس گنبد، استفاده از گنبد دو پوسته و هم‌چنین وجود ایوان‌های داخلی و خارجی، موجب کاهش وزن سازه در کنار ایجاد فضاهای معماری منحصر به فرد می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: کاهش وزن سازه، بنای تاریخی، سبک سازی بناهای تاریخی، سازه طاقی، گنبد سلطانیه.

اطلاعات مقاله

صفحات: ۱۳۱-۱۶۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۵

 <https://dx.doi.org/10.66224/45.107.5>

فصلنامه اثر

نشریه پژوهشکده ابنیه و بافت‌های تاریخی،
پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران،
ایران

ناشر:

پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری

حق کپی راییت انتشار: این نشریه دارای دسترسی باز، تحت قوانین گواهی‌نامه بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 International License منتشر می‌شود که اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی براساس محتوا) را می‌دهد.

URL: <https://athar.richt.ir/article-2-1568-fa.html>

نژادابراهیمی، احد؛ سارنجه، غزاله؛ و چناقلو، محمدرضا، (۱۴۰۳). «سبک‌سازی در معماری ایران از راهکار سازه‌ای تا ترکیب با فضای معماری با تأکید بر گنبد سلطانیه». اثر، ۱۰۷ (۴۵): ۱۶۰-۱۳۱. <https://dx.doi.org/10.66224/45.107.5>

مقدمه

سبک‌سازی از روش‌های پایدارسازی سازه‌های تاریخی در ایران یک مسئله بزرگ برای معماران بوده است برای اینکه بتوانند در بناها علاوه بر کاهش جرم سازه، به پایداری ظاهری و سازه‌ای آن توجه کنند. از این رو در کنار توجه به راهکارهای سازه‌ای جهت سبک‌سازی بنا به عوامل ظاهری و مفاهیم بصری نیز اهمیت می‌دادند. به‌طور مثال (پنم بندی)، با هدف عایق حرارتی و صوتی و تأمین فضایی با مقیاس انسانی در کنار سبک‌سازی سازه نیز به‌کار می‌رفت. در فضای گنبدخانه‌ها اولین و مهم‌ترین عامل در ایجاد این فضا پوشش آن یعنی گنبد می‌باشد. در ساخت گنبدها همواره دلایل خاص، همانند ایجاد پوشش برای دهانه‌های بزرگ بدون ستون مدنظر بود ولی ضرورت‌های ساختاری و نیازهای فضایی مانند کاهش اثر گرما و سرما و بهره‌بردای مناسب از مصالح نیز از جمله دیگر دلایل می‌توانست باشد. سبک‌سازی راهکاری سازه‌ای بود و معماران در بخش‌های مختلف از دیوارچینی تا پوشش، نسبت به‌کار بست این فن بهره برده‌اند و معماران سعی بر این داشتند که از راهکارهای معمارانه در ترکیب با سبک‌سازی استفاده کنند و این سبک‌سازی باعث شکل‌گیری فرم‌های جدید معماری نیز شده است. هدف این پژوهش ارائه انواع راهکارهای سبک‌سازی مبتنی بر مطالعه نمونه‌های معماری ایران با تأکید بر نمونه مطالعاتی مقبره خدابنده معروف به گنبد سلطانیه است تا بتواند نحوه تبدیل یک راهکار سازه‌ای در ترکیب با فضای معماری را در معماری ایران نشان دهد می‌تواند مسأله اصلی تحقیق را این طور بیان کرد که معماران ایرانی چگونه می‌توانستند سبک‌سازی که امری کاملاً سازه‌ای بوده است را به یک راهکار کاملاً معمارانه برای ایجاد فضاهای زیبای معماری تبدیل کنند و معماری گنبد سلطانیه یکی از نمونه‌های مناسب برای این مطالعه می‌باشد که پایداری سازه‌ای آن از همین روش اتفاق افتاده است.

ضرورت انجام پژوهش

این پژوهش با هدف بررسی و مستندسازی روش‌های سبک‌سازی مورد استفاده در این بنا، سعی دارد تا مسیر متفاوتی را برای شناسایی راهکارهای پایداری سازه‌های تاریخی و بهره‌برداری بهینه از فضای معماری این سازه‌ها در پیش گرفته است. با توجه به اهمیت موضوع سبک‌سازی در معماری تاریخی و نقش آن در پایداری و کارایی بناهای ایرانی، این تحقیق به دنبال یافتن راهکارهای سازه‌ای و معماری مبتنی بر روش‌های کهنی است که می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای حفاظت سازه‌های مشابه به‌کار رود.

این پژوهش به‌عنوان یک تحقیق بنیادی و نظری است که با روش توصیفی-تحلیلی انجام شده است. در این روش، ابتدا به جمع‌آوری اطلاعات از طریق منابع کتابخانه‌ای، اسناد تاریخی، و مقالات علمی معتبر پرداخته شد تا چارچوب نظری مربوط به سبک‌سازی در معماری ایرانی و تأثیر آن بر بناها مشخص شود. مطالعات کتابخانه‌ای شامل تحلیل متون تاریخی مرتبط با معماری دوران اسلامی ایران و به‌ویژه بررسی منابع مرتبط با گنبد سلطانیه است. علاوه بر این، برای بررسی تأثیرات سبک‌سازی در سازه‌های تاریخی، مطالعات میدانی انجام شده است. این مطالعات شامل بازدید از گنبد سلطانیه، بررسی عینی ساختار بنا و مستندسازی ویژگی‌های سازه‌ای آن است. همچنین، از طریق تحلیل دقیق عناصر سازه‌ای و تطبیق آن‌ها با شواهد تاریخی و متون موجود، داده‌های میدانی گردآوری و ارزیابی شده‌اند. این روش‌شناسی ترکیبی کمک می‌کند تا با استفاده از منابع معتبر تاریخی و

بررسی‌های میدانی، تصویر جامعی از سبک‌سازی و تأثیرات آن‌ها بر استحکام و پایداری سازه‌های تاریخی به‌دست آید.

پیشینه پژوهش

مطالعات محدودی در زمینه سبک‌سازی بناهای تاریخی صورت گرفته است. وفامهر (۱۳۸۴)، به توضیح فناوری در معماری اسلامی، ایرانی جهت سبک‌سازی می‌پردازد و اظهار می‌دارد که "آجر اصلی‌ترین مصالح در معماری اسلامی ایران است. مقاومت فشاری آجر، معماری دیوار باربر، طاق و گنبد ایجاد می‌کند". در ادامه این پژوهش انواع سبک‌سازی در فرم‌های گنبدی را شرح می‌دهند. در پژوهش کتابی (۱۳۹۳)، به انواع سبک‌سازی پرداخته و هندسه را مهم‌ترین عامل در ساخته شدن سبک‌سازی دانسته است. در پژوهش دیگری از گرامی (۱۳۹۳)، به سبک‌سازی در گنبدهای ایرانی پرداخته شده است و ذکر شده است که در معماری ایرانی تمام موارد ضروری و مفید اجرا می‌گردد و نمود تزئینی دارند. هوشیار (۱۳۹۹)، به بررسی سبک‌سازی در سازه‌های طاقی شکل پرداخته است و هدف از سبک‌سازی در سازه‌های طاقی شکل را ایجاد سطوحی صاف در فرم‌های منحنی که رسیدن به چنین سطوحی را ناممکن می‌سازد، دانسته است. همچنین کاهش بار مرده، افزایش ایستایی که باعث پایداری بیشتر بنا در طی زمان و نیز استحکام در برابر حوادث طبیعی به خصوص زلزله و بهبود عملکرد لرزه‌ای بنا می‌گشته و امکان استفاده از فضای پشت‌بام را داشته است. عادل (۱۳۹۰)، به بازخوانی شیوه‌ها و روش‌های سبک‌سازی در فرهنگ ساخت سنتی اراک پرداخته است. دو روش کلی سبک‌سازی اجزای باربر یا سازه ساختمان و سبک‌سازی عناصر غیرباربر ساختمان بسط داده است. تحقیقات انجام شده به بررسی سبک‌سازی به صورت محدود و در یک سری از فرم‌های رایج پرداخته شده است. در تحقیق پیش رو سعی شده است از زاویه‌های مختلف و به صورت گسترده راهکارهای سبک‌سازی را در دو دسته کلی سازه‌های تخت و سازه‌های طاقی و گنبدی شکل تقسیم‌بندی کند و در بناها و سازه‌های مختلف، پل‌ها و به خصوص با تأکید بر بنای مورد مطالعه، گنبد سلطانیه، تمامی راهکارهای به‌کار گرفته شده را مورد مطالعه قرار دهد.

مبانی نظری: سبک‌سازی از فن ساخت تا فضاسازی معماری

یکی از ویژگی‌های مهم در معماری ایرانی، توجه به اصل پرهیز از بیهودگی بوده است که در برخی از پژوهش‌ها از این اصل به عنوان پایداری اقتصادی در معماری ایران یاد شده است (Nejad Ebrahimi and ect. 2021). هدف معمار در توجه به این اصل ایجاد فضای معماری مطلوب با کمترین دخل و تصرف و استفاده از منابع طبیعی بود ولی این امر هیچ‌گاه موجب نشد تا پایداری کالبدی سازه‌ها فراموش گردد و هنرمندان توانستند تا با توجه به الزامات سازه‌ای، فضاهای معماری متنوعی به‌وجود آورند. هدف اصلی از سبک‌سازی در بناهای تاریخی، کاهش بار و جرم بنا، ایجاد عایق صوتی و حرارتی و امکان استفاده از فضاهای پشت‌بام، ایجاد سطوحی صاف در جایی که فرم منحنی طاق‌ها رسیدن به چنین سطوحی را ناممکن می‌سازد، افزایش ایستایی که باعث پایداری بیشتر بنا در طی زمان و نیز مقاومت بالا در برابر حوادث طبیعی به خصوص زلزله و بهبود عملکرد لرزه‌ای بنا می‌گشته، بوده است. کاهش وزن و سبک‌سازی در یک بنا در سه گروه از اجزای سازه قابل بررسی است:

۱. کاهش وزن اجزای باربر (استفاده از فنون سبک‌سازی)؛

۲. کاهش وزن اجزای غیرباربر (کاهش وزن اجزای جداکننده)؛

۳. سبک‌سازی پوشش‌های گنبدی.

جدول ۱. تقسیم‌بندی روش‌های سبک‌سازی (تنظیم: نگارندگان)

Table 1. Classification of lightweighting methods (by the authors)

کاهش وزن اجزای باربر	قید کردن	کنوبندی	استفاده از ظروف سفالی	دیوار به وسیله طاق و رف	سبک سازی
کاهش وزن اجزای غیرباربر	کاهش وزن مصالح	کاهش ابعاد مصالح	کاهش وزن سازه از طریق تغییر مصالح	کاهش جرم حجمی با تغییر مصالح	کاهش جرم
سبک‌سازی پوشش‌های گنبدی	فرم گنبد	دو پوسته بودن گنبد	استفاده از مصالح سبک	کم شدن ضخامت گنبد	گوشه سازی
				ساخت گنبد ترکیب	سبک‌سازی دور ساقه گنبد

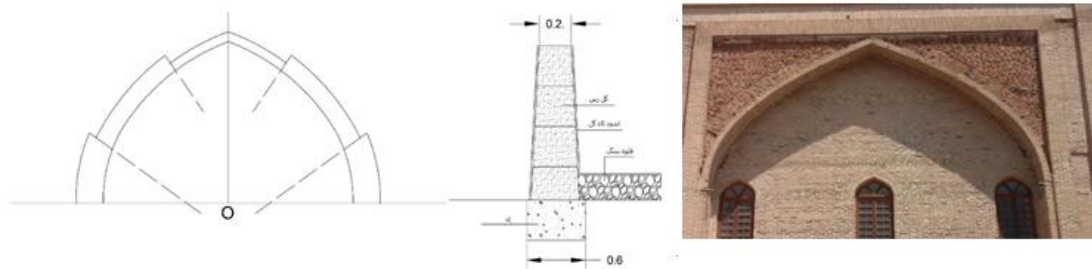
سبک‌سازی بناهای تاریخی: سازه و معماری

برخی از پژوهشگران آثار تاریخی اعتقاد دارند بناهای تاریخی سازه‌های سنگینی هستند که دارای بار ثقیلی زیادی می‌باشند. «سه ویژگی عمده آسیب پذیری اینگونه بناها [بناهای تاریخی] را در برابر حوادث طبیعی نظیر زمین لرزه بالا می‌برد عبارتند از: فرسودگی مصالح، مقاوم نبودن مصالح و سنگین بودن سازه» (زریبافیان، ۱۳۸۵) همچنین افشاری (۱۳۹۶)، اسدی (۱۳۹۴) نیز نظر مشابهی را دارند؛ درحالی‌که معماران با سبک‌سازی تلاش کرده‌اند بخش زیادی از این وزن مصالح را کم کنند و با ایجاد فضاهای معماری، زیبایی ویژه‌ای را به معماری ارائه کنند. یکی از بناهایی که در آن از ایجاد فضای معماری برای سبک‌سازی و کنترل نیروهای رانشی استفاده کرده است مقبره سلطان سنجر در مرو می‌باشد که ایجاد ایوانچه‌هایی در پاکار گنبد و مشرف به فضای بیرون را می‌توان از اولین تلاش‌ها برای کم کردن وزن سازه و درعین حال پایداری آن با استفاده از فضا‌سازی معماری دانست. مسئله سبک‌سازی بنا و کاهش بار مرده ساختمان علاوه بر اینکه باعث افزایش مقاومت بنا در برابر تنش‌ها و نیروهای وارده شده، موجب کاهش وزن عناصر از طریق سبک‌سازی بوده که نیازی به جرم و وزن آن‌ها نبوده است؛ سازندگان این ابنیه با دانش به‌دست‌آمده حاصل از مشاهده، تبحر و تجربه به این نتیجه رسیده بودند که کاهش وزن ساختمان از مهم‌ترین راهکارهای مقاوم ساختن بنا در مقابل نیروهای وارد بر آن است. سبک‌سازی از طریق پنج روش عمده زیر صورت می‌گیرد:

الف. کاهش سطح مقطع، ب. سبک‌سازی از طریق استفاده از مصالح سبک، پ. تغییر فرم و شکل معماری، ج. ایجاد فضای معماری، د. کلاف‌کشی چوبی و دو جداره کردن دیوارها.

الف. **کاهش سطح مقطع:** از رایج‌ترین راهکارهای کم کردن وزن متوسط بنا، کاهش سطح مقطع با افزایش ارتفاع ساختمان می‌باشد. از آنجایی‌که مصالح بنایی مورد استفاده در سازه‌های سنتی نیروهای فشاری تحمل می‌کنند، برای آنکه نیروی فشاری مضاعف ناشی از وزن مصالح به سازه وارد نشود، با افزایش ارتفاع سطح مقطع عضو باربر را کاهش می‌دادند تا از این طریق جرم مصالح مصرفی کمتر شود. این راهکار در مناره‌ها، میل‌ها و دودکش‌های

کوره‌های آجرپزی دیده می‌شود که سطح مقطع اجرای بنا در قسمت شروع با سطح مقطع انتهای کار متفاوت می‌باشد از این کار معماران سنتی به‌عنوان سرجمع یا سرسفت هم بعضاً استفاده می‌کنند «پس رفتن ریسمان از راستای شاغولی نقش دیوار و بسته شدن درز میان شاغول و دیوار» (ماهرالنقش ۱۳۶۶: ۱۴۸) در اجرای تاق‌ها، تویزه‌ها و حتی پوش‌های میانی گنبدها رفته‌رفته برای کم کردن وزن و جرم سازه از شکل مضرس استفاده می‌کردند.



شکل ۱: تصویر راست، شیخ شهاب‌الدین اهری، تصویر وسط: کاهش سطح مقطع و سبک ساختن سازه در بخش‌های فوقانی. چپ، کاهش سطح مقطع در طاق (منبع تصویر: نگارندگان، منبع جزئیات: کتابی، ۱۳۹۳: ۴).

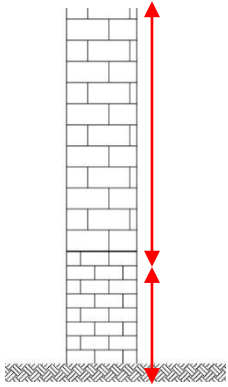
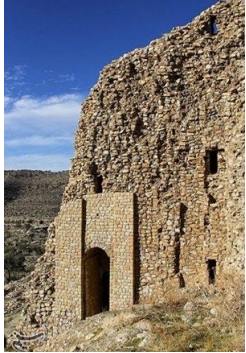
Fig. 1: Right: Sheikh Shahab al-Din Ahari; Center: Reduction of cross-sectional area and structural lightweighting in the upper parts; Left: Reduction of cross-sectional area in the arch (Image source: Authors; Detail source: Ketabi, 2014: 4)

ب. استفاده از مصالح سبک: در گذشته معماران جهت سبک‌سازی از قاعده هرم وزنی استفاده می‌کردند، به این صورت که با افزایش ارتفاع، وزن مصالح مصرفی را کاهش می‌دادند. این کار از سه روش عمده زیر صورت می‌گرفته است: ۱. کاهش ابعاد مصالح؛ ۲. کاهش وزن سازه از طریق تغییر مصالح (استفاده از مصالح سبک‌تر)؛ ۳. کاهش جرم حجمی با تغییر مصالح.

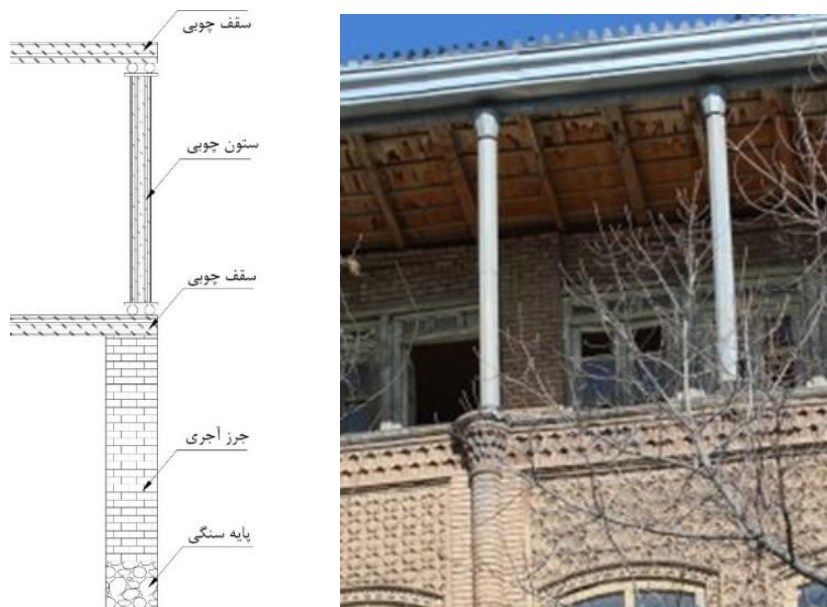
ب. ۱. کاهش ابعاد مصالح: یکی از راهکارهای مرسوم جهت سبک‌سازی بناها کاهش ابعاد مصالح است. ابعاد مصالحی که در قسمت‌های فوقانی ابنیه استفاده می‌شد که با ابعاد همان مصالح در قسمت‌های تحتانی متفاوت بوده است، که در نتیجه کاهش ابعاد مصالح، کاهش وزن کل بنا می‌باشد. کاهش ابعاد مصالح را می‌توان هم در طول و عرض و هم در ضخامت مصالح مشاهده کرد این موضوع در بناهای با مصالح سنگی بیشتر مشهود است و این روش بدین گونه بود برای اینکه لنگر وارده از نظر وزن مصالح را بتوانند کم کنند مصالح با ابعاد بزرگ‌تر را در طبقات و ردیف‌های پایین و مصالح با ابعاد بزرگ‌تر را در ردیف‌ها و طبقات بالاتر استفاده می‌کردند در قلعه دختر فیروزآباد، آتشکده آذرگشنسب در تکاب و روستای اشتبین در آذربایجان شرقی و خیلی بناهای دیگر، می‌توان این موضوع را مشاهده نمود.

جدول ۲. کاهش ابعاد مصالح با افزایش ارتفاع سازه، مصالح سنگین‌تر در قسمت تحتانی و مصالح سبک‌تر در قسمت فوقانی (نگارندگان)

Table 2. Gradual reduction in material dimensions with increasing structure height; heavier materials used in the lower parts and lighter materials in the upper parts (Authors)

مقطع از دیواری با کاهش ابعاد مصالح با افزایش ارتفاع سازه	روستای اشتبیین	آتشکده آذرگسنسب نکاب	قلعه دختر، فیروزآباد
			

ب. ۲. کاهش وزن سازه از طریق تغییر مصالح: برای تحقق یافتن قاعده هرم وزنی، در قسمت فوقانی سازه‌ها از مصالح سبک‌تر استفاده می‌شود. به‌طوری‌که در میان مصالح دیوارها و سقف‌ها تغییر مصالح آشکار است. تغییر مصالح را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد: ۱. دیوار سنگی، سقف خشتی یا آجری، ۲. دیوار خشتی، سقف آجری، ۳. دیوار خشتی یا آجری، سقف چوبی یا مشتقات گیاهی چون حصیر، گالی و غیره (عادل، ۱۳۹۰: ۵) (کتابی، ۱۳۹۳: ۳). در برخی از بناها به‌خصوص بناهای مسکونی با ایجاد ایوان‌هایی متعدد در طبقه فوقانی و استفاده از ستون‌های چوبی، معمار تلاش می‌کند تا وزن ساختمان را سبک‌تر نماید.



شکل ۲. استفاده از مصالح سبک‌تر در قسمت فوقانی سازه، خانه احمدزاده، سنندج (منبع: نگارندگان - جزئیات از کتابی، ۱۳۹۳)

Fig. 2: Use of lighter materials in the upper part of the structure, Ahmadzadeh House, Sanandaj (Authors, Details from Kababi, 2014)

ب. ۳. کاهش جرم حجمی با تغییر مصالح: مصالح بنایی که از نظر ظاهر و ابعاد یکسان هستند، لزوماً از نظر وزن برابر نیستند. نوع مواد اولیه مصرفی، نوع خاک، خصوصیات دانه‌بندی خاک، میزان پخت از عوامل تأثیرگذار بر جرم حجمی و به تبع آن وزن مصالح می‌باشد. در سبک‌سازی استفاده از مصالح با جرم حجمی متفاوت یکی از شیوه‌های سبک‌سازی می‌باشد بدین‌صورت که مصالح سنگین‌تر در قسمت‌های باربر و قسمت‌های تحتانی سازه به‌کار می‌رود و مصالح سبک‌تر در قسمت‌های فوقانی سازه مورد استفاده قرار می‌گرفته است. در واقع از مصالحی که ظاهر یکسان دارند؛ اما در وزن متفاوت هستند، استفاده می‌شود. به‌طور مثال معمولاً سنگ در همکف، آجر در طبقات میانی و غیررطوبی و خشت و چوب در طبقات بالاتر در خانه تاریخی و بازار تاریخی تبریز امری مرسوم می‌باشد یعنی شکل آجرها و خشت‌ها و آجرهای خام پخت یکسان هستند ولی لزوماً از نظر وزن کلی یکسان نیستند.

پ. تغییر فرم و شکل معماری: در این زمینه معماران از فنون و روش‌های متعدد و متنوعی چون کنوبندی، قیدبندی، صندوقه‌سازی و ایجاد اتاقک در ساخت و تولید بنا بهره گرفته‌اند. لازم به تذکر است که این روش‌ها هر چند به سبک‌شدن سازه منجر می‌گشته‌اند؛ اما در عموم موارد کاربردهای دیگری نیز داشته‌اند.

پ. ۱. قیدکردن: قیدبندی به معنای مهارکردن، روشی برای تغییر ارتفاع سقف متشکل از چند دیواره تیغه‌ای موازی و عمودی است (فلاح‌فر، ۱۳۷۹: ۱۶۷) دیوارکهای نگهدارنده پشت طاقهای قوسی را می‌گویند (فرشته‌نژاد، ۱۳۸۹) و در عمل نوعی روش سبک‌سازی است که به‌دلیل داشتن ستون مستقل، از فرم هندسی طاق زیرین خود تبعیت نمی‌کند. این روش، قابل استفاده در پوشش‌های طاقی (طاق آهنگ)، کروی (گنبد) و مخروطی (فیل‌پوش) است. قیده‌ها، شامل دو بخش دیوارها و پوشش هستند که هرکدام به روش‌های مختلفی قابل اجرا هستند و معماران، فرم‌های مختلفی از قید را با توجه به نوع آجرچینی ایجاد می‌کرده‌اند (هوشیار، ۱۳۹۹: ۱۳۴). این تفاوت -ها در نوع دیواره چینی و پوشش مشهود بوده و به شرح زیر، جدول ۲، هستند. در بعضی اوقات که خیز قوس زیاد باشد، ابتدا دیوارک‌هایی در جهت یا عمود بر طاق اصلی اجرا و سپس روی آن را چپله می‌کنند که به این روش صندوقه می‌گویند. فضاهای خالی ایجادشده باعث سبک‌شدن طاق می‌شدند. گاهی حفره‌هایی در نمای بیرونی دیوارک‌ها اجرا می‌شد که باعث گردش هوا می‌شد. فضای داخلی صندوقه‌ها غیرقابل استفاده و دسترسی به داخل آن مشکل است. این صندوقه‌ها معمولاً پس از اتمام سازه به بنا الحاق می‌شوند و جزء سازه بنا محسوب نمی‌شوند.

جدول ۳. روش‌های اجرای دیواره قیدبندی (تقسیم‌بندی از هوشیار، ۱۳۹۹: ۱۳۴-۱۳۵، ویرایش و ترسیم اشکال: نگارندگان)

Table 3. Table 3. Methods of constructing restraining walls (Classification from Hoshyar, 2020: 134-135; Figures edited and illustrated by the authors).

		در این روش در هر رج، آجرها به نحوی چیده می‌شوند که میان آنها فضای خالی ایجاد شده و در این حالت وزن دیواره بسیار کمتر می‌شود. ۱. صندوقه کردن دیوارها
		در این حالت، آجر به صورت کامل برای ساخت دیواره به کار می‌رود. این روش نسبت به روش صندوقه‌سازی از وزن بیشتری برخوردار است. ۲. اجرای دیوار توپر با استفاده از آجر کامل
		در این شیوه، آجرها به دو نیمه تقسیم شده و از نیمه آجر برای ساخت دیواره قید استفاده می‌شود. در این روش، عرض دیواره‌ها کمتر بوده و همچنین میزان آجر مصرفی برای اجرای دیوار کاهش می‌یابد. ۳. اجرای دیوار توپر با استفاده از آجر نیمه
		در این شیوه، آجرها از ضخامت و به صورت تیغه‌ای، برای ساخت دیواره‌ها به کار می‌روند. واضح است که این روش استحکام دو شیوه بالایی را ندارد. ۴. استفاده از آجر تیغه در دیواره چینی

پ. ۲. **کنوبندی:** کنوبندی نیز مانند قیدبندی، روش رایج دیگری در سبک‌سازی بناهای تاریخی بوده است. بناها در اصطلاح کنوبندی را کنوشکستن می‌گویند. کنو، نوعی طاق کوچک می‌باشد که به دو صورت ضربی یا چپپله اجرا می‌شود که الزاماً یک وجه قرارگیری آن روی طاق اصلی است، این طاق کوچک در بیشتر موارد هم‌جهت با طاق اصلی و در موارد اندکی عمود بر طاق اصلی دیده می‌شود. کنوهای عمود بر طاق اصلی به‌ندرت در ساختمان‌ها و بیشتر در پل‌های تاریخی دیده می‌شود. کنو علاوه بر آنکه جلوی رانش طاق را از دو طرف می‌گیرد، مقاومت خوبی در برابر زلزله ایجاد کرده و به علت مجوف شدن فاصله بین دو طاق، بام سبک می‌شود. روی آن را می‌توان صاف کرد و عایق خوبی از لحاظ انتقال سرما و گرماست. وقتی شیب بام را با کنوبندی حل کنند، به آن

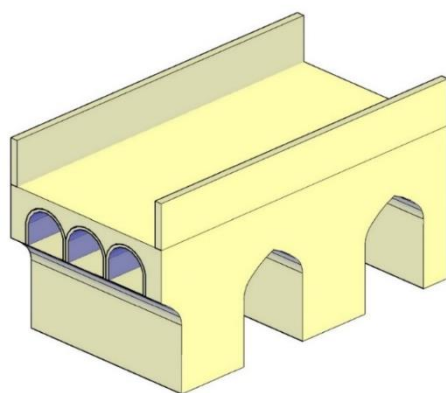
کنوشکستن می‌گویند (پیرنیا، ۱۳۷۳). در ایران اکثر پل‌های تاریخی از نوع قوسی هستند. باتوجه به دهانه‌های طویل این سازه‌ها، وزن بسیار سنگین سازه و اثرات بارهای دینامیکی متحرک وارده بر سازه مسائلی را به‌وجود می‌آورد که برای حل آن نیازمند نبوغ مهندسی، قوه ابتکار و اطلاعات و معلومات کافی می‌باشد. باتوجه به قوسی بودن اکثر پل‌های تاریخی ایران، بارهای وارده بر پایه‌هایی که قوس از آن‌ها بر می‌خیزد انتقال می‌یابند. قسمتی از سازه پل که بالاتر از حلقه پل قرار دارد، پشت بغل نامیده می‌شود (هوشیار، ۱۳۹۹: ۱۳۳). اگر پشت بغل را با خاک پر کنند باعث می‌شود سازه پل نیروی بسیار زیادی را تحمل کند که در این مواقع معماران به ساخت کنوها، چشمه طاق‌ها و احداث اتاق بر روی پل‌ها می‌پرداختند که از این طریق علاوه بر اینکه فضای معمارانه‌ای را به‌وجود می‌آوردند که قابلیت بهره‌برداری داشته باشند، سازه پل را از نظر ایستایی تقویت کرده و به سبک‌سازی آن کمک می‌کردند. کنوها در پل‌ها به دو صورت پنهان و آشکار دیده می‌شود. کنو پنهان به کنوهایی گفته می‌شود که در نمای پل‌ها قابل رؤیت نیستند که به دو صورت عمود بر طاق اصلی و هم‌جهت با طاق اصلی ساخته می‌شوند. کنوی پنهان عمود بر طاق اصلی جهت سبک‌سازی طاق‌ها ساخته می‌شود. کنوی پنهان هم‌جهت با طاق اصلی علاوه بر کاستن نیروی رانش طاق اصلی، جهت ایجاد سطح صاف عبور و مرور و همچنین جهت سبک شدن ساخته می‌شوند. کنوهای آشکار همواره هم‌جهت با قوس‌های اصلی پل ساخته می‌شوند.

جدول ۴. انواع کنوبندی (تنظیم: نگارندگان)

Table 4. Types of knubbandi (by the authors).



۱
کنوبندی در بافت تاریخی کاشان
(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۵)



۲
کنوبندی پنهان، عمود بر طاق اصلی در
پل (ترسیم: نگارندگان)



۳ کنوبندی پنهان، عمود بر طاق اصلی
پل دختر میانه (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۵)

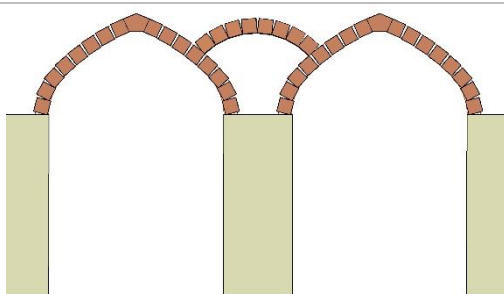


۴ کنوی آشکار، هم جهت با قوس اصلی، پل
میربهاالدین زنجان
(منبع: نگارندگان)

در ساخت کنو، محل قرارگیری طاق بسیار مهم است. معمولاً طاق‌ها در زاویه ۲۲.۵ درجه نسبت به سطح افق، شکن‌گاه، به سمت بیرون می‌شکند و در زاویه ۶۷.۵ درجه نسبت به سطح افق که به ناحیه ایوارگاه معروف است، به سمت داخل فرو می‌ریزد؛ بنابراین شکن‌گاه مناسب‌ترین مکان برای قرارگیری طاق کنو می‌باشد تا بهترین عملکرد را نسبت به نیروهای رانشی وارده از سمت طاق را نشان دهد و بتواند اثر آن را خنثی کند.

جدول ۵. نحوه آجرچینی کنو (تنظیم: نگارندگان)

Table 5. Knubbandi bricklaying techniques (by the authors).

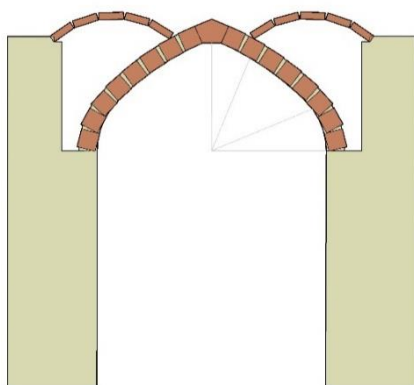


اجرای کنو به روش ضربی (ترسیم: نگارندگان)



اجرای کنو به روش ضربی (منبع: هوشیار، ۱۳۹۹)

۱ ضربی



اجرای کنو به روش چپيله (ترسیم: نگارندگان)



۲ چپيله

اجرای کنو به روش چپيله (منبع: هوشیار، ۱۳۹۹)

پ. ۳. استفاده از کوزه‌های سفال: استفاده از کوزه سفالی، نوع دیگری از سبک‌سازی در طاق‌ها می‌باشد که در شهرهای کویری مانند میبد و اردکان به دلیل تولید انبوه سفال مورد استفاده قرار می‌گرفته است.

پ. ۴. سبک‌سازی دیوارها و جرزها به وسیله طاقچه: دیوارها و جرزها به دلیل استفاده از مصالح سنگین، دارای جرم زیادی هستند. معماران با استفاده از قوس‌های متوالی و خالی کردن دیوارها از طریق قوس‌ها جرم دیوارها را کاهش می‌دادند. این قوس‌ها علاوه بر سبک‌سازی بنا، حکم تزئینات را دارند.

پ. ۵. شبکه‌سازی در پوشش‌های تخت: استفاده از فنون شبکه‌سازی، در سقف‌های تخت که انواع سقف‌های شیب‌دار را نیز در برمی‌گیرد، در معماری ایران به خصوص در مناطقی که چوب به میزان قابل قبولی در دسترس بوده، رواج داشته است. پوشاندن دهانه‌ها از طریق ایجاد شبکه‌هایی که حداکثر فضای ممکن را با کمترین میزان مصالح پوشش می‌داده‌اند از جمله راهکارهای معمول در این زمینه است. این شبکه‌ها هر چند با درگیر شدن در یکدیگر و وجود اتصالات فکر شده، مقاومت مناسبی را از خود نشان می‌دهد و در عین حال وزن بسیار اندکی را بر جداره‌های باربر بنا وارد می‌آورند. ما بین و به تعبیری دقیق‌تر روی حفره‌های خالی به وجود آمده شبکه‌های ایجاد شده با مصالح بسیار سبک چونان خرده چوب، الیاف گیاهی، تخته و توفال، حصیر و نی و مصالحی از این دست پر می‌شده است. بدین شکل ساختار سبک و در عین حال مستحکمی ایجاد می‌گشته که حداقل بار را بر عناصر باربر تحتانی خود وارد می‌آورده است.

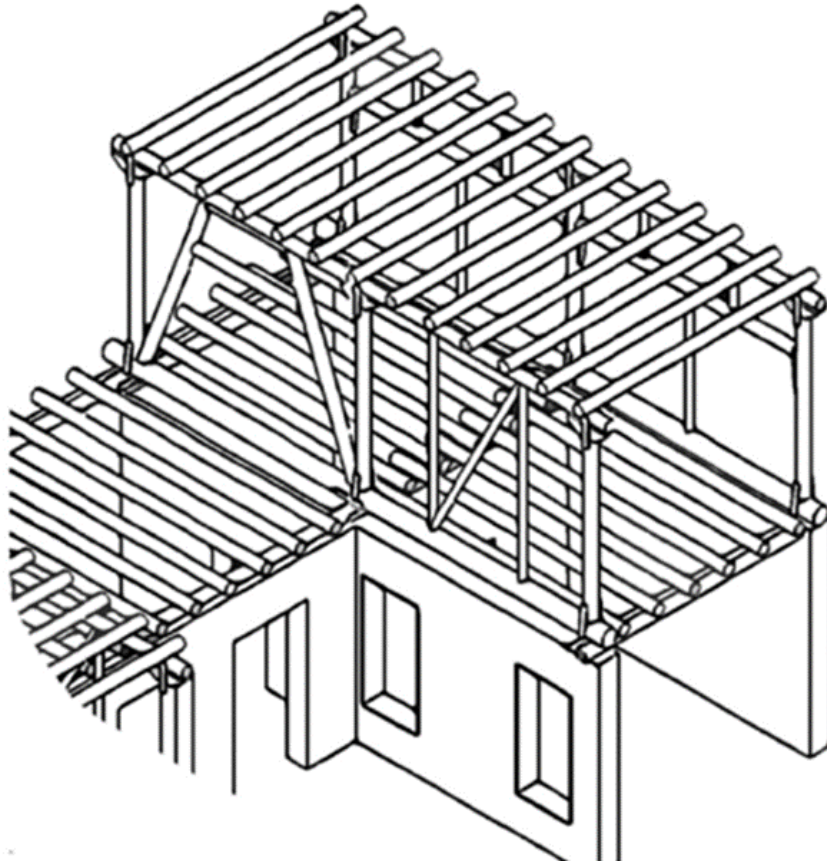
پ. ۶. ایجاد اتاقک: در برخی از بناها دیده می‌شود که معمار برای اینکه بتواند وزن سازه و جرم مصالح را کم کند اتاقک‌هایی در بخش‌هایی از بنا به خصوص در دیوارها ایجاد می‌کند که قطر ضخامت دیواره‌ها بیش از اندازه باشد یکی از بناهای مهم ایجاد اتاقک، مسجد تاج‌الدین علی‌شاه گیلانی می‌باشد که اندازه دیواره به بیش از ۱۱ متر می‌رسد در این بنا، معمار از تراز ۲۴ متری به بالا و در دو طبقه اتاق‌هایی با استفاده از پوشش تاقی شکل ایجاد کرده است این اتاقک‌ها در دو تراز می‌باشند و اتاقک تراز پایینی ۶.۵ متر ارتفاع و اتاقک تراز بالایی ۲.۵ متر ارتفاع دارد بعد از این به غلامگردها تراز سقف و پیش از اجرای تاق آهنگ اصلی می‌رسد و در این غلامگرد، اتاق‌هایی ساخته شده است که بعضاً دارای شومینه هستند ولی در اصالت آن‌ها به دوره ایلخانی تردید وجود دارد و احتمالاً مربوط به دوره قاجاریه و در زمانی است که این بنا به عنوان ارگ مورد استفاده بود. در میان تاق‌های پل‌های با

دهانه بزرگ نیز اتاقک‌هایی اجرا می‌شدند که این اتاقک‌ها برای استفاده در مواقع اضطراری بودند یا در مواقعی نگهبان پل از آن مراقبت می‌کرد.

ج. ایجاد فضای معماری: یکی از اولین بناهای فاخر و مهم در دوران اسلامی که در آن از ایجاد فضای معماری برای سبک‌سازی بهره برده شده است بنای مقبره احمد بن ملک‌شاه بن آلب ارسلان ملقب به سلطان سنجر است. این آرامگاه بخشی از مجموعه عظیمی است که کاخی داشته و مسجدی به آن متصل بوده است، بنابراین نخستین و کهن‌ترین نمونه تاریخ‌دار از ترکیب مسجد و آرامگاه است که بعدها رواج یافت (اتیگهاوزن، ۱۳۷۸: ۳۸۴). این بنا با ابعاد ۲۷ در ۲۷ بنای عظیمی بوده است و به بناهای بعد از خود نیز از منظر ایده ساخت و ساختار معماری تأثیرگذار بوده است. این بنا در قسمت فوقانی خود ایوانچه‌ای مشرف به محیط پیرامون دارد و روی آن‌ها تاق-نماهایی تعبیه شده است که علاوه بر زیبایی، کار سازه‌ای برای دفع رانش گنبد انجام می‌دهند و وزن ساختمان را هم سبک‌تر می‌کنند «یک بالاخانه به سبک آرامگاه سامانی در بخار منطقه انتقال بیرونی را پوشانده است» (اتیگهاوزن، ۱۳۷۸: ۳۸۴). این ایوانچه‌ها شروع و ایده خوبی برای استفاده از ایوانچه‌های مشابه درون و بیرون بنای گنبد سلطانی بود که به اعتقاد بسیاری مبنا ایده غازان و الجایتو برای ساخت آرامگاه آن‌ها بودند. از راهکار ایجاد فضای معماری برای سبک‌سازی در مسجد استاد شاگرد هم استفاده شده است در این بخش با حذف کردن حجم و مقدار مصالح در گوشه‌بندی‌ها و تقاطع تاق‌های داخلی با گوشه‌بندی‌های فضای اسکان برای استفاده زنان استفاده شده است همچنین مشابه این اقدام با کمی تغییرات در مسجد کبود تبریز نیز استفاده شده است.

د. کلاف‌کشی چوبی و دو جداره کردن دیوارها

یکی از روش‌های سبک‌سازی وزن ساختمان استفاده از کلاف‌کشی چوبی است استفاده از چوب در ساختار کالبدی بناهای تاریخی یکی از روش‌هایی بوده است که در مناطق کوهستانی و مکان‌هایی که استفاده از سازه‌هایی با مصالح چوبی مرسوم بوده است در این روش هنگام ساخت دیوارها، ابتدا کلاف‌کشی چوبی در بخش‌های باربر و غیرباربر انجام می‌گرفت سپس میان آن با حفظ منافذ که به صورت دوجداره بودند با مصالح پوشانده می‌شدند و در این صورت حجم مصالح بسیار کم می‌شد و درعین حال، معمار می‌توانست موارد مورد نیاز از جمله تاقچه‌بندی، قاب‌بندی و امثالهم را هم انجام دهد. این فن در ساخت بناهای تاریخی تبریز علی‌الخصوص خانه‌های تاریخی امری مرسوم بوده است.



شکل ۳. کلاف‌کشی چوبی در بناهای تاریخی تبریز (منبع: کبیرصابر، ۱۳۹۲)

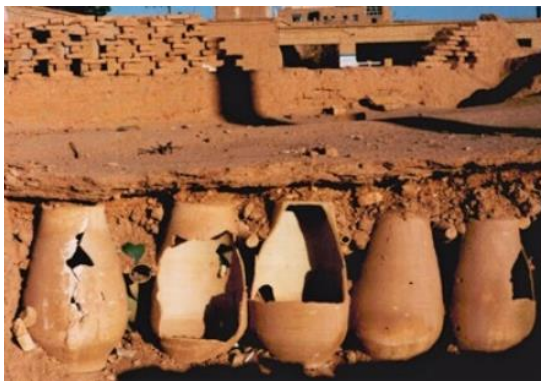
Fig.3: Timber tie-beaming in historical buildings of Tabriz (Source: Kabirsaber, 2013)

جدول ۶. انواع سبک‌سازی از طریق تغییر فرم و ریخت سازه‌ای (تنظیم: نگارندگان)

Table 6. Types of lightweighting through form and structural shape modification (by the Authors)

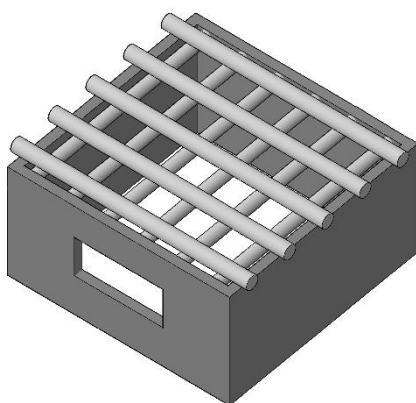


صندوقه‌سازی جهت سبک‌سازی،
در طاق‌های بقعه خانقاه شیخ شهاب -
الدین اهری (منبع: آرشیو میراث فرهنگی
استان آذربایجان شرقی)



استفاده از کوزه‌هایی سفال جهت
سبک‌سازی، به‌کار بردن خمره‌های
سفالی برای سبک‌سازی طاق (هوشیار،
۱۳۹۹)

۲



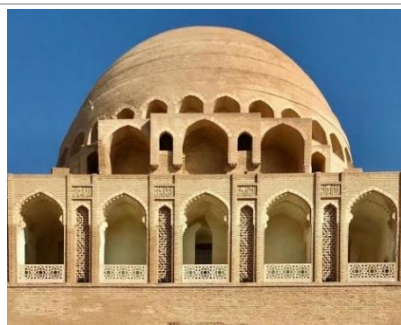
شبکه‌سازی در پوشش‌های تخت جهت
سبک‌سازی، نمونه‌ای از پلان شبکه‌های
به‌کار رفته در سقف (ترسیم: نگارندگان)

۳



ایجاد اتاقک جهت کاهش وزن سازه،
مسجد تاج‌الدین علی‌شاه گیلانی، تبریز،
(Nejad Ebrahimi and ect. 2021)

۴



ایجاد فضای معماری جهت سبک-
سازی، مقبره سلطان سنجر و ایجاد
ایوان‌های در پیرامون بخش چپیره‌سازی
گنبد که پشت بند سازه‌ای هم بودند
(کمال‌الدین حلمی، ۱۳۹۰)

۵



ایجاد فضای معماری جهت سبک-

سازی، مسجد استاد شاگرد (سمت

راست) و مسجد کبود تبریز (سمت

چپ) که با ایجاد ایوانچه‌هایی در گوشه-

سازی فضای برای اقامت زنان ایجاد شده

است (Nejad Ebrahimi and ect. 2021)

۶



کلاف‌کشی چوبی و دو جداره کردن

دیوارها جهت سبک‌سازی، کلاف‌کشی

چوبی در خانه‌های تاریخی تبریز (منبع:

دکتر تهرانی)

۷

سبک‌سازی در بناهای گنبدی

این بخش به ارائه راهکارهای سبک‌سازی گنبدها پرداخته می‌شود، که توسط استادکاران و معماران ایرانی انجام می‌شده است.

فرم گنبد: یکی از جلوه‌های متمایزکننده گنبد از طاق، بزرگی و رفعت آن است که به دلایل گوناگون چنین تمایزی اتفاق می‌افتد. اگر به سیر تاریخی بناهای بزرگ در معماری پیش از اسلام مانند دوران هخامنشی و پارتی و ساسانی نگاهی داشته باشیم، می‌بینیم که کاخ‌های بزرگ تخت‌جمشید و شوش، فضاهای پر ستونی بودند که جمعیت زیادی را برای بار عام پذیرا می‌شدند. پس از اینکه از سازه‌های طاقی بهره گرفته شد نیاز به فضای بزرگ همچنان وجود داشت. این فضاها دو شکل داشتند، نخست فضای بزرگ و نمادین و نیمه باز به نام ایوان که نمونه آن ایوان مداین بود و دوم فضاهای بزرگ مرکزی. مثال بارز برای فضای مرکزی می‌توان به تالار بار عام بیشاپور اشاره کرد. این فضای مرکزی بزرگ با تهرنگ چهارگوش می‌بایست با آسمانه‌ای منحنی پوشیده می‌شد و برای این کار، گنبد بهترین گزینه بود. گنبدی که روی تهرنگ چهارگوش بیشاپور قرار می‌گرفت، دهانه‌ای در حدود ۲۷ متر داشته است و بلندای تالار و گنبد در مجموع در حدود ۴۰ تا ۵۰ متر می‌رسد (معماریان، ۱۳۹۷، ۳۷۰). فرم گنبد علاوه بر اینکه می‌تواند دهانه‌های زیادی را بدون ستون پوشش دهد، سبب سبک‌سازی سازه نیز می‌شود چرا که نسبت جرم به حجم آن ناچیز می‌باشد.

تغییر ضخامت در پوسته گنبد: یکی از ابتکارات مهندسین معمار ایرانی در ساخت گنبدها، تغییر ضخامت دادن به پوسته آن می‌باشد. کاهش ضخامت از پاکار گنبد تا نوک آن یکی از راهکارهای سبک‌سازی می‌باشد، به این صورت که تا زاویه ۲۲.۵ درجه، ناحیه شکن‌گاه، با یک ضخامت ساخته و در ادامه ضخامت را کاهش داده و در زوایای ۶۷.۵ درجه باز هم یک آجر از ضخامت آن می‌کاستند (بابایی، ۱۳۹۳: ۳).

چپیره‌سازی در گنبد: یکی از مسائل مهم ساختمانی و نوآوری بزرگ در طول تاریخ بشری، استفاده از پوشش‌های منحنی در دهانه‌های بزرگ و گنبدها در زمینه چهارگوش می‌باشد. در واقع پوشش گنبد بر فضای مکعب شکل ارمغان ایرانیان به جهان معماری است. بدین صورت که انتقال سطح مربع به دایره در فضا به حساب می‌آمده است. زمان اختراع آن را در دوره معماری پارتی می‌دانند (پیرنیا، ۱۳۸۶). این روش در دوره ساسانی و به خصوص دوره اسلامی به تکامل خود ادامه داده است (معماریان، ۱۳۶۷، ۱۱۰). تهرنگ یا زمینه گرد در معماری ایرانی به ندرت مشاهده می‌شود و اغلب تهرنگ‌ها به شکل مربع، مستطیل یا چندضلعی می‌باشند. به همین دلیل برای ساخت گنبد بر روی چنین تهرنگ‌هایی از چپیره‌سازی استفاده می‌کردند، یعنی به این وسیله زمینه دایره ای برای سوار شدن گنبد بر روی آن ایجاد می‌نمودند (گرامی، ۱۳۹۳، ۷). در نتیجه به کمک چپیره‌سازی تهرنگ یا زمینه گنبدخانه را نخست به هشت گوش و سپس به شانزده، سی و دو و در نهایت نزدیک به دایره تبدیل می‌کردند.

سبک‌سازی دور ساقه (گریو) گنبدها: استفاده از شکنج‌ها برای انتقال از مربع به دایره و تحمل بار گنبد توسط این طاق‌ها، امکان خالی کردن و سبک کردن قسمت‌های سطح زیر طاق‌های واقع در ضلع مربع را فراهم می‌کند. نقطه اوج نور در فضاهای زیر گنبدخانه‌هاست، همان‌گونه که در قسمت قبل گفته شد، دور گردن بلند گنبدها، نورگیرها تعبیه شده‌اند که هم سنگینی بنا را متعادل می‌کنند و هم نور کافی و غیرمستقیم را به داخل هدایت می‌کنند (پیرنیا، ۱۳۸۶).

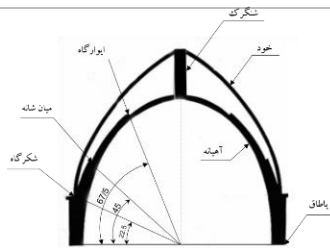
استفاده از باریکه طاق‌ها در گنبدهای ترکیب: گنبدهای ترکیب با باریکه طاق، ساختمانی انواع دیگر از گونه‌ای گنبدها می‌باشد. آغاز ساخت این نوع گنبد را می‌توان به معماران ایرانی نسبت داد. گنبدهای ترکیب از ترک‌هایی تشکیل شده‌اند که بین هر ترک، تویزه‌های گچی که بعداً به باریکه طاق تبدیل می‌شود، تعبیه شده است. از ترکیب ترک‌ها و باریکه طاق‌ها سیستم ایستایی خاص به وجود می‌آید. با قرار گرفتن ترک‌ها در میان باریکه طاق‌ها پوسته-های سبکی است ایجاد شده است (معماریان، ۱۳۶۷: ۱۸۶). برای سبک کردن گنبد و کاهش وزن آن در قسمت-های پوشاننده، می‌توان از باریکه طاق و تویزه استفاده کرد.

گنبدهای دو پوسته و سبک‌سازی بین آن: ساخت گنبدهای دوپوسته پیوسته میان تهی و گسسته علاوه بر اینکه منجر به رعایت تناسبات فضای داخلی و خارجی می‌شود، می‌تواند عایق حرارتی نیز به شمار بیاید، اما از نقطه نظر سازه‌ای به کاستن وزن گنبدها و سبک‌سازی کمک می‌کند.

جدول ۷. خلاصه‌ای از سبک‌سازی پوشش‌های گنبدی (منبع: نگارندگان)

Table 7. Summary of lightweighting in domed roofs (Source: Authors)

	فرم گنبد	۱
(ترسیم: نگارندگان)		
	تغییر ضخامت در پوسته گنبد	۲
کاهش ضخامت طاق از پا طاق تا نوک گنبد برای سبک‌سازی		
(ترسیم: نگارندگان)		
	گوشه‌سازی در گنبد	۳
گوشه‌سازی، تربت‌خانه گنبد سلطانیه، زنجان (عکس: عادل، رضا)		
	سبک‌سازی دور ساقه (گریو) گنبد	۴
گنبد مسجد جامع ارومیه، سبک‌سازی دورادور ساقه (گریو) گنبد		
(منبع تصویر: میراث فرهنگی استان)		
	استفاده از باریکه طاق در گنبدهای ترکیب	۵



(ترسیم: نگارندگان)

۶ دو پوسته ساختن گنبد

به طور خلاصه در جدول زیر انواع راهکارهای سبک‌سازی که به دو صورت پنهان و آشکار در سازه‌ها به کار می‌رود که بعضی از این روش‌های سبک‌سازی می‌توانند عملکرد معماری داشته باشند و بعضی دیگر بدون عملکرد معماری خاصی ساخته می‌شوند، آورده شده است.

گنبد سلطانیه

گنبد سلطانیه که جزو گنبدهای دو پوسته پیوسته می‌باشد، یک بنای هشت ضلعی است که هر ضلع آن دارای ۱۷ متر طول بوده و ضخامت دیوارها در حدود ۷/۴۰ متر می‌باشد. پایه‌های هشت‌گانه گنبد هر یک حدود ۵۰ مترمربع مساحت دارند. گنبد سلطانیه در سه طبقه ساخته شده است که ارتفاع بنا به ۵۰ متر می‌رسد و قطر دهانه در حدود ۲۴.۵ متر می‌باشد (اصغریان جدی، ۱۳۵۵: ۶۲). باتوجه مباحث آورده شده در بخش‌های پیشین در رابطه با مسأله سبک‌سازی، به بررسی سازه گنبد سلطانیه می‌پردازیم که به چه صورت با سبک‌سازی معمارانه معماری شده است.

مرحله اول - وجود ایوان‌های داخلی و خارجی (ایجاد طاق و رف در دیوار): ایجاد فرورفتگی در دیوارها از عوامل مهم در کاهش بار مرده ساختمان به‌شمار می‌رود. جرزها و ستون‌ها حجم و وزن عمده‌ای را به دلیل نقش سازه‌ای به خود اختصاص می‌دهند. ایجاد بازشو، طاقچه در این عناصر حجیم از راهکارهای مهم در این زمینه به‌شمار می‌رود. این فنون سبک‌سازی در دیوارهای باربر با رعایت میزان توان تحمل سازه‌ای عنصر باربر و به‌طور خاص در دیوارهای غیرباربر مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضمن آنکه این فضاهای ایجاد شده، استفاده عملکردی ویژه‌ای در شیوه زندگی ایرانی دارد. در گنبد سلطانیه نیز با رعایت اصول سازه‌ای با ایجاد طاق و فرورفتگی‌های متعددی در نمای خارجی و همچنین در نمای داخلی، وجود ایوان در طبقه اول و ایوان خارجی در طبقه دوم علاوه بر اینکه عملکرد معماری را رقم زده است، از لحاظ سازه‌ای به پایداری بنا از طریق سبک‌سازی و کاهش وزن سازه کمک بزرگی کرده است.

جدول ۸. سبک‌سازی دیوارها و جرزها به‌وسیله طاقچه در طبقات مختلف گنبد سلطانیه (تنظیم: نگارندگان)

Table 8. Lightweighting of walls and piers through niches in different levels of the Soltaniyeh Dome (by the authors)

		۱ طاق‌های طبقه همکف
		۲ طاق‌های طبقه همکف + ایوان‌های طبقه اول
		۳ طاق‌های طبقه همکف + ایوان‌های طبقه اول + ایوان‌های طبقه دوم

مرحله دوم - استفاده از باریکه طاق در ساخت گنبد: یکی از راهکارهای سبک‌سازی، استفاده از باریکه طاق در گنبدهای ترکیبی می‌باشد. گنبد سلطانیه جزو گنبدهای ترکیبی با باریکه طاق می‌باشد. این نوع از گنبدها دارای سه جزء اصلی باریکه طاق، ترک‌ها و نهبن می‌باشند. طبق تعریف معماران، باریکه طاق یک تویزه باربری‌باشد که به دودسته اصلی و فرعی تقسیم می‌شوند که باریکه طاق‌های اصلی ضخامت بیشتری نسبت به باریکه طاق‌های فرعی دارند. ترک‌ها پوسته‌هایی از جنس آجر هستند که فاصله بین باریکه طاق‌ها را پر می‌کنند و نهبن عضوی است که باریکه طاق‌ها در مرکز گنبد به آن تکیه می‌کند (معماریان، ۱۳۹۷: ۴۷۵). نحوه انتقال نیروها در این نوع

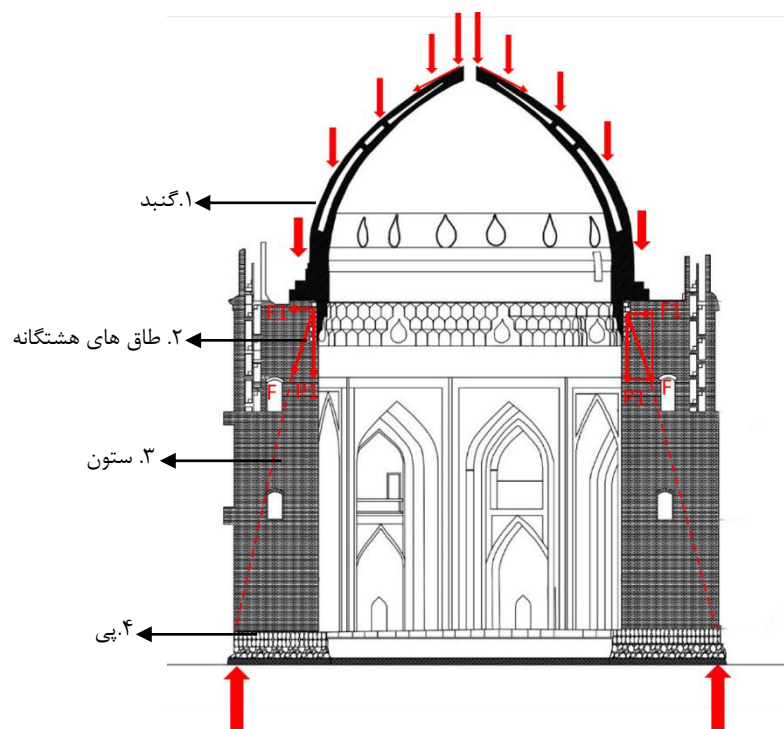
گنبدها به این صورت است که قسمتی از بار آن‌ها از طریق باریکه طاق‌ها به پایه گنبد و بخش دیگر بار مستقیماً از پوسته به قاعده گنبد منتقل می‌شود.

مرحله سوم - کم شدن ضخامت پوسته از پاکار تا راس گنبد: برای قرار دادن گنبد روی پلان هشت‌وجهی مشکل چپیره‌سازی وجود ندارد. گنبدی با منحنی چمانه بر روی بشن قرار می‌گیرد و بلندای آن تا کف زمین حدود ۵۰ متر است. این گنبد چند خصوصیت مهم دارد:

۱. گنبد دو پوسته پیوسته است.
۲. ۸ باریکه طاق اصلی و ۱۶ باریکه طاق کوچک‌تر سامانه باریکه طاق‌ها را شکل می‌دهد.
۳. باریکه طاق‌ها با پوسته درونی پیوند دارند.
۴. پوسته خارجی روی باریکه طاق‌ها قرار می‌گیرد.

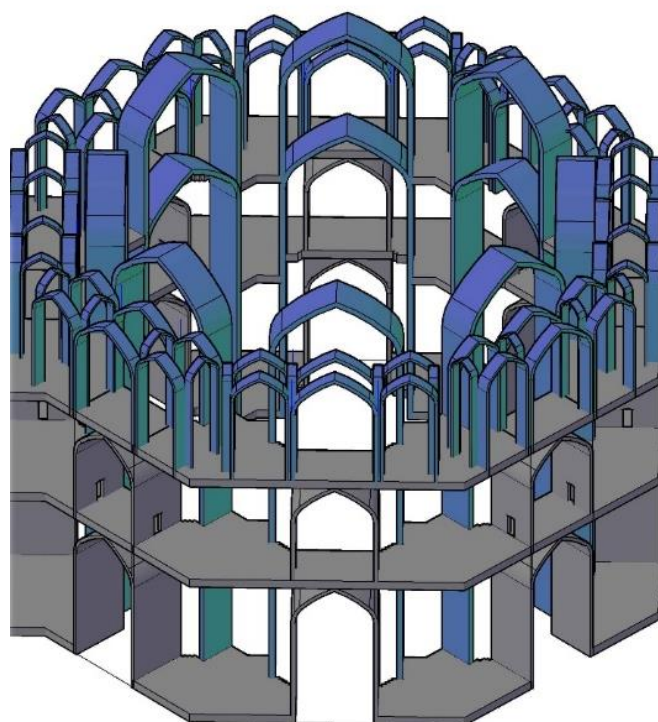
تا ارتفاع ۴ متری از پاکار، گنبد دو پوسته نمی‌باشد و در حدود ۱.۵ متر ضخامت دارد. از ارتفاع ۴ متر به بعد دو پوسته از هم جدا می‌شوند و پوسته داخلی حدود ۶۰ سانتی‌متر و پوسته خارجی ۴۰ سانتی‌متر ضخامت می‌یابد که هرچه به سمت تیزه گنبد می‌رود از ضخامت آنها کاسته می‌شود. در تکمیل توضیحات مرحله دوم، استفاده از باریکه طاق در ساخت گنبد، تعداد باریکه طاق‌های اصلی ۸ عدد است که از هر رأس ۸ ضلعی آغاز و تا نه‌بین مرکزی گنبد ادامه دارند. بین دو باریکه طاق اصلی چندین باریکه طاق کوچک‌تر وجود دارد و طراحی آن‌ها به نحوی است که در ارتفاع بالاتر تعداد آن‌ها کمتر می‌شود. از پاکار تا نیمه گنبد مجموع تعداد باریکه طاق‌های کوچک ۱۶ عدد است. پس از آن تعدادشان به ۸ می‌رسد. باریکه طاق‌های کوچک با چفدهایی به صورت مداری بهم پیوند می‌خورند (معماریان، ۱۳۹۷: ۵۰۰). استفاده از سیستم باریکه طاق و کم شدن ضخامت پوسته‌ها با زیاد شدن ارتفاع گنبد، راهکاری برای سبک شدن سازه شده است.

مرحله چهارم - سازه‌ای توأم با معماری: در رابطه با سازه اصلی بنا، واثقی اظهار می‌دارد که "اسکلت اصلی باربر ساختمان گنبد سلطانیه از هشت ستون آجری قطور تشکیل شده است. این ستون‌ها علاوه بر اینکه وظیفه انتقال نیروی وزن و رانش ناشی از گنبد را بر عهده دارند، وزن طبقات میانی و نگهداری طاق‌ها و نتیجتاً سقف‌های آن‌ها را نیز تحمل می‌کنند. با توجه به اینکه عامل مقاوم و باربر دیگری به غیر از ستون‌های آجری در نگهداری ساختمان گنبدخانه وجود ندارد همین ستون‌ها باید نیروهای جانبی حاصل از زلزله را نیز تحمل نمایند" (واثقی، ۱۳۸۳). در حالت کلی گنبد بر روی هشت طاق قرار دارد، شکل ۵، که این طاق‌ها در طبقات پایین بر روی ۸ ستون سوار شده اند که وزن گنبد از طریق هشت طاق به ستون‌ها و در آخر به پی و زمین منتقل می‌شود (شکل ۴). این هشت طاق اصلی با توجه به فرم منحنی‌ای که دارند و وزن کمتری که نسبت به ستون‌های حجیم و سنگین دارند، به سبک شدن سازه کمک شایانی کرده‌اند.



شکل ۴. نحوه انتقال نیرو در گنبد سلطانیه (ترسیم: نگارندگان)

Fig. 4: Force transfer mechanism in the Soltaniyeh Dome (Illustration by the authors)

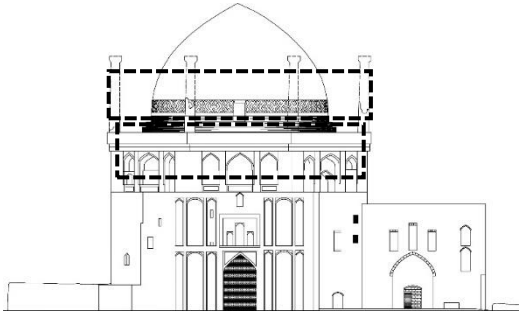
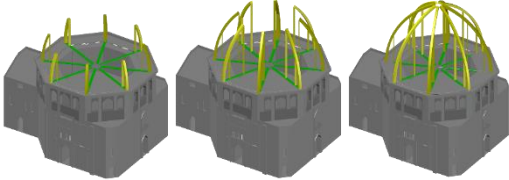
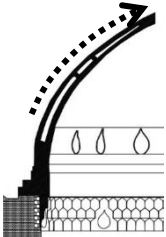
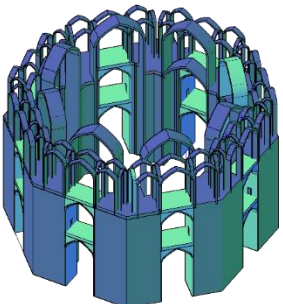


شکل ۵. طاق های هشتگانه، وجود طاق های پنهان در سازه سبب کاهش وزن سازه شده است (ترسیم: نگارندگان)

Fig. 5: Eight-part arches, the presence of hidden arches in the structure has led to weight reduction (Illustration by the authors)

جدول ۹. فنون سبک‌سازی به کار رفته در گنبد سلطانیه (تنظیم: نگارندگان)

Table 9. Lightweighting techniques used in the Soltaniyeh Dome (by the authors)

فنون سبک‌سازی معماری ایران	کاربست سبک‌سازی در مورد گنبد سلطانیه	تصویر سبک‌سازی به کار رفته در گنبد سلطانیه
ایجاد فضای معماری	سبک‌سازی دیوارها و جرزها به - وسیله طاقچه در راهروها و شاه - نشین و تربتخانه طبقه اول: کم کردن جرم و مصالح ساختمانی با ایجاد شاه‌نشین‌های هشت‌گانه مشرف به داخل طبقه دوم: ایجاد ایوان‌های مشرف به محیط پیرامون در طبقه فوقانی بنا	
استفاده از باریکه طاق - ها در گنبدهای ترکیب	کم شدن وزن گنبد به کمک هشت باریکه طاق اصلی و شانزده باریکه طاق فرعی کوچک‌تر	
فرم گنبد دو پوسته ساختن گنبد کم شدن ضخامت پوسته	- پوشش دهانه‌های زیاد بدون ستون و نسبت جرم به حجم بسیار کم گنبد - تغییر ضخامت گنبد در نواحی شکن‌گاه و ایوارگاه و شانه با کاهش ضخامت از پاکار تا راس گنبد	
سیستم سازه‌ای همراه با ایجاد فضای معماری	کم شدن وزن سازه به کمک هشت طاق اصلی ایجاد فضای معمارانه‌ای شاه‌نشین‌های طبقه اول مشرف به داخل و شاه‌نشین‌های طبقه دوم مشرف به خارج	

مطالعه تطبیقی فنون سبک‌سازی در معماری ایران با فنون به کار رفته در گنبد سلطانیه نشان می‌دهد که برخی از فنونی که در معماری ایران راهکاری کاملاً سازه‌ای هستند در گنبد سلطانیه نیز استفاده شده است ولی آنچه کاربری این فنون در معماری گنبد سلطانیه را شاخص و ویژه می‌نماید تلاش معمار برای ارتقای فنون با ایجاد فضاهای عملکردی می‌باشد که در طبقه همکف و اول مشرف به فضاهای درونی، با ایجاد شاه‌نشین و ایوانچه‌های مشرف به فضای داخلی در ترکیب با سایر فنون در عین اینکه سبک‌سازی در این بخش اتفاق افتاده فضاهای معماری زیبایی به وجود آمده است و در طبقات فوقانی با ایجاد ایوان‌های مشرف نیز این ترکیب در عالی‌ترین شکل خود به کار رفته است.

نتیجه‌گیری

اصل سبک‌سازی نه تنها در حوزه ساخت معماری بلکه در مباحث مختلفی چون مرمت و نگهداری جایگاه مهمی داشته است. این پژوهش دو هدف عمده دارد. اول، مورد مطالعه و بررسی قرار دادن انواع راهکارهای سبک‌سازی در فرم‌های مختلف سازه‌ای تخت، طاقی و به‌طور خاص گنبدی شکل می‌باشد. در مرحله بعدی تلاش بر این بود که با بازخوانی اجزا و عناصر مختلف گنبد سلطانی به نحوه ترکیب ماهرانه‌ی راهکارهای سبک‌سازی پی برده شود که در حین اینکه وزن اصلی سازه با وجود هشت طاق کاهش چشمگیری داشته و فرم گنبد و تعداد پوسته‌های گنبد مسائل سازه‌ای را برطرف کرده، چگونه فضاهای معمارانه زیبایی را از طریق ساخت طاق و رف، ایوان‌های زیبا به‌وجود بیاورند. طاقچه و قوس در اجزای باربر و غیرباربر به چه صورت ایجاد می‌شود که در کنار اینکه زیبایی بصری ایجاد می‌کند به سبک‌سازی جزرها و دیوارهای باربر کمک کند. استفاده از روش‌های مختلف در کاهش وزن سازه تأثیر چشم‌گیری دارد به‌طور خاص وقتی که از چند روش به‌طور همزمان استفاده بشود. در گنبد سلطانی از چندین روش سبک‌سازی به‌طور همزمان، از پوشش گنبدی تا دیواره و جداره‌های داخلی و خارجی به‌کار گرفته شده است، از جمله شیوه‌های سبک‌سازی به‌کار گرفته شده عبارتند از:

۱. ضخامت گنبد از پاکار تا راس گنبد کاهش پیدا کرده است.

۲. گنبد به‌صورت دو پوسته ساخته شده است،

۳. استفاده از طاق و قوس در دیوارهای داخلی و خارجی که علاوه‌بر اینکه به زیبایی بنا افزوده است به

کاهش وزن جدارها کمک کرده است،

ساخت ایوان‌های داخلی و خارجی در طبقات اول و دوم که نه تنها فضای معمارانه ایجاد کرده است، بلکه به کم شدن وزن کل بنا کمک چشم‌گیری کرده است. کاهش وزن بنا، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش مقاومت بنا در مقابل نیروهای وارده دارد.

سپاسگزاری

از داوران محترم بابت بازخوردهای ارزشمند و پیشنهادهای سازنده‌شان که به بهبود کیفیت این مقاله کمک شایانی کرد، صمیمانه تشکر می‌کنم.

درصد مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به صورت برابر در نگارش مقاله مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

در این پژوهش هیچگونه تعارض منافع وجود ندارد.

کتابنامه

- اتینگهاوزن، ریچارد و دیگران، (۱۳۸۴)، *ایخانان*، مترجم: یعقوب آزند، انتشارات موسی، تهران.
- اسدی، عیسی، (۱۳۹۴). «بحران زلزله و مقاوم‌سازی بناهای تاریخی و باستانی». *کنفرانس سالانه پژوهش‌های معماری، شهرسازی و مدیریت شهری*.
- اصغریان جدی، احمد، (۱۳۵۵)، «کلیاتی در رابطه با گنبد سلطانی»، *مجله فرهنگ معماری ایران*، ۲ و ۳، بهار.
- افشاری، محمد حسن، (۱۳۹۶)، «روش‌های بهسازی لرزه‌ای بناهای ارزشمند تاریخی در برابر زلزله»، *کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر*، تهران.
- القاشانی، ابوالقاسم عبدالله بن علی بن محمد بن ابی‌طاهر، (۱۳۴۸)، *تاریخ اوجلیاتو*، به اهتمام: مهین همبلی، تهران، بنگاه ترجمه و نشر کتاب.
- بابایی، نعیمه؛ رحیمی، محبوبه؛ قیاسوند، جواد، (۱۳۹۳)، «ارزش‌های ماندگار در گنبدهای ایرانی با تأکید بر گنبد سلطانی»، *دومین همایش ملی پژوهش‌های کاربردی در: مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری*.
- پیرنیا، کریم، (۱۳۸۶)، *سبک‌شناسی معماری ایرانی*، تهران: انتشارات سروش دانش.
- پیرنیا، کریم، (۱۹۹۴)، «طاق و قوس»، *مجله اثر*، ۲۴.
- جوادی، آسیه، (۱۳۶۳)، *معماری ایران*، ج ۲/ ج ۱: «کلیاتی درباره معماری گنبد سلطانی»، احمد اصغریان جدی).
- چینگ، د. ک. (۱۳۸۲)، *سیری در مبانی نظری معماری*. (مترجم) محمد احمدی نژاد. اصفهان؛ نشر خاک.
- حجازی، م.؛ میرقادر، ر. (۱۳۸۳)، «تحلیل لرزه‌ای گنبدهای ایرانی»، *نشریه دانشکده فنی*، ۳۸ (۶)، اسفند.
- زیربیان، امید، (۱۳۸۵)، «راهکارهای حفاظت از بناهای تاریخی در برابر زمین لرزه»، *همایش علمی منطقه ای معماری کویر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردستان*.
- سمیرا، عادل؛ عباسی‌هرفته، محسن، (۱۳۹۰)، «معماری گذشته ایران و سبک‌سازی؛ بازخوانی شیوه‌ها و مصادیق اصل سبک‌سازی در سازه‌های سنتی ایران». *دومین کنفرانس بین‌المللی معماری و سازه*.
- فرشته‌نژاد، سیدمرتضی، (۱۳۸۹)، *فرهنگ معماری و مرمت معماری* (۱)، انتشارات اردکان دانش، اصفهان.
- فلاح‌فر، سعید، (۱۳۷۹)، *فرهنگ واژه‌های معماری سنتی ایران*، انتشارات کامیاب، تهران.
- کبیرصابر، محمدباقر، (۱۳۹۲)، «رهیافت‌های معماری سنتی تبریز برای ساخت و ساز ایمن پس از زلزله (مطالعه موردی: کاربست کلاف‌های چوبی در معماری خانه‌های قاجاری)»، *مجله نامه معماری و شهرسازی*، ۱۱: ۷۰-۵۹. https://aup.journal.art.ac.ir/article_111_61904ff1e63cd03cb2ab30b3b7368a3e.pdf?lang=en
- کتابی، الناز؛ و ولی بیگ، نیما، (۱۳۹۳)، «شیوه‌های گوناگون سبک‌سازی در بناهای تاریخی راهکاری برای ساختار پایدار در معماری ایرانی»، *کنفرانس ملی معماری و منظر شهری پایدار*، مشهد.
- کمال‌الدین حلمی، احمد، (۱۳۹۰)، *دولت سلجوقیان*، پژوهشگاه حوزه و دانشگاه.
- گرامی، محسن؛ و احمدی، فرزانه، (۱۳۹۳)، *راهکارهای سبک‌سازی گنبد در معماری ایرانی - اسلامی*. همایش ملی معماری، عمران و توسعه نوین شهری
- معاریان، غلامحسین، و صفائی پور، هادی، (۱۳۹۷)، *معماری ایرانی*، نیارش، انتشارات گلجام.

- معماریان، غلامحسین، (۱۳۶۷)، *نیارش سازه‌های طاقی در معماری اسلامی ایران*. تهران: جهاد دانشگاهی دانشگاه علم و صنعت.
- مکدونالد، آنگوس، (۱۳۸۳)، *سازه و معماری*، (مترجم) محمد احمدی‌نژاد، اصفهان، نشر خاک.
- هوشیار، فریمه؛ حیدری، داریوش؛ همت‌زاده، سعید، (۱۳۹۹)، «پژوهشی در روش‌های سبک‌سازی طاق‌ها در بناهای تاریخی»، *نشریه اثر*، ۴۱ (۲: ۸۹): ۱۳۰-۱۵۵. <https://journal.richt.ir/article-2-670-fa.html>
- وفامهر، محسن، (۱۳۸۴)، «بررسی نمونه‌هایی از فنآوری در معماری اسلامی - ایرانی برای سبک‌سازی ساختمان با مصالح بومی»، *اولین همایش بین‌المللی زلزله و سبک‌سازی*، دانشگاه قم.
- وفامهر، محسن، (۱۳۸۷)، «رمزگشایی از مقاوم‌سازی لرزه‌ای در معماری ارزنده ایرانی»، *سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی مقاوم‌سازی*، تبریز.
- ولی‌بیگ، نیما؛ رهروی، ساناز؛ رحیمی، افروز، (۱۳۹۱)، «شناخت چپیره‌سازی و فنون اجرایی برای حفظ و نگهداری آن». *نخستین همایش فناوری و سازه‌های سنتی بامحور گنبد‌ها*.

- A survey of persian Art, (1967), Vol.III. Arthur Arthur Apham Pope (editor), The Asian Institute of Pahlavi University, II. Ed. (In Persian).
- Adeli, S. & Abbasi Herfateh, M., (2011). *Traditional Iranian architecture and lightweight construction: A review of lightweight techniques and applications in historical structures*. (In Persian).
- Afshari, M. H., (2017). "Seismic retrofitting methods for valuable historical buildings against earthquakes". *International Conference on Civil Engineering, Architecture, and Urban Planning of Contemporary Iran*, Tehran. (In Persian).
- Al-Qashani, A. A., (1969). *The History of Oljeitu*. (M. Hambleh, Ed.). Tehran: Publishing and Translation Organization.
- Asadi, E., (2015). *Earthquake crisis and strengthening of historical and ancient buildings*. Annual Conference on Architectural, Urban Planning, and Urban Management Research. (In Persian).
- Asgharian Jadi, A., (1976). "An overview on the Soltaniyeh Dome". *Iranian Architectural Culture Magazine*, (2-3), Spring. (In Persian).
- Babaei, N., Rahimi, M. & Ghiasvand, J., (2014). "Enduring values in Iranian domes with emphasis on the Soltaniyeh Dome". *The Second National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture, and Urban Management*. (In Persian).
- Cataldi, G., (1979), *Sistemi Static in Architettura*, Padova, Cedam.
- Ching, F. D. K., (2003). *A Visual Dictionary of Architecture*. (M. Ahmadinejad, Trans.). Esfahan: Khak Publishing. (In Persian).
- Croci, G., (1998). *The conservation and structural restoration of architectural heritage*, translated by Aytollah zadeh Bagher and Hejazi mehrdad, Cultural Research Office.
- Edward, C. & Edward, D., (1999). "The Evolution of the Shouldered Arch in Medieval Islamic Achitecture", *Architectural Histor*, 42: 68-95.
- Ettinghausen, R., et al. (2005). *The Ilkhanids*. (Y. Azand, Trans.). Tehran: Mousa Publishing.
- Falahfar, S. (2000). *Dictionary of Traditional Iranian Architectural Terms*. Tehran: Kamiab Publishing. (In Persian).
- Fereshteh Nejad, S. M. (2010). *Dictionary of Architecture and Architectural Restoration (1)*. Esfahan: Ardekan Danesh Publishing. (In Persian).
- Gerami, M. & Ahmadi, F., (2014). *Lightweighting solutions in Iranian-Islamic dome architecture*. (In Persian).
- Hamzehloo, S., (2002). *Incomplete information — please provide missing details*. (In Persian).
- Hejazi, M. & Mirghadari, R. (2005). *Seismic analysis of Iranian domes*. *Journal of the Faculty of Engineering*, 38(6): February. (In Persian).
- Helmi, A. K., (2011). *The Seljuk State*. Research Institute of Seminary and University. (In Persian).

- Heydari, D., (1999). "Hydraulic survey of historic bridges". *The Second Bam Congress*. (In Persian).
- Houshiar, F., Heydari, D., & Hematzadeh, S. (2020). *A study on lightweighting methods in historical vaults*. *Athar Journal*, 41 (2: 89): 155-130. <https://journal.richt.ir/article-2-670-fa.html>. (In Persian).
- Javadi, A. (1984). *Iranian Architecture* (Vol. 1: Overview of the Soltaniyeh Dome by Ahmad Asgharian Jadi). (In Persian).
- Kabir Saber, M. B., (2013). "Traditional architectural approaches in Tabriz for earthquake-resistant construction (Case study: Wooden tie-beams in Qajar houses)". *Journal of Architecture and Urban Planning*, (11): 59-70. (In Persian).
- Ketabi, E. & Valibeyk, N., (2014). "Various lightweighting techniques in historical buildings as a strategy for sustainable structure in Iranian architecture". *National Conference on Sustainable Urban Architecture and Landscape*, Mashhad. (In Persian).
- MacDonald, A., (2004). *Structure and Architecture*. (M. Ahmadinejad, Trans.). Esfahan: Khak Publishing. (In Persian).
- Memarian, G., (1988). *Construction principles of vault structures in Islamic Iranian architecture*. Tehran: Jihad Daneshgahi, Iran University of Science and Technology. (In Persian).
- Memarian, G. & Safaiepour, H., (2018). *Iranian Architecture: Structural Systems*. Goljam Publishing. (In Persian).
- Moin, M., (1971). *Persian Dictionary*, Tehran: Amikabir. (In Persian).
- Morgan, W., (1977). *Behaviour of components of structures*, translated by Badiee, Majid, Tehran: Tehran University. (In Persian).
- Nejad Ebrahimi, A. & Sheikhol Hokamaei, M., (2021). "The effect of hierarchy sequence in creating a sense of places Tabriz mosques". *Iran University of Science and Technology*, 9(4): 59-75. (In Persian).
- Pirnia, K., (1994). "Vaults and Arches". *Athar Journal*, (24). (In Persian).
- Pirnia, K., (2007). *Stylistics of Iranian Architecture*. Tehran: Soroush Danesh Publishing. (In Persian).
- Tehrani, F., (2008). "Weight lightening of roof in the masonry buildings", *Athar*, 19 (29-30): 232-238. (In Persian).
- Vafamehr, M., (2005). "An investigation of technologies in Islamic-Iranian architecture for lightweight construction using local materials". *The First International Conference on Earthquake and Lightweight Construction*, Qom University (In Persian).
- Vafamehr, M., (2008). *Deciphering seismic retrofitting methods in valuable Iranian architecture*. The Third National and First International Conference on Retrofitting, Tabriz. (In Persian).
- Valibeyk, N., Rahrovi, S. & Rahimi, A. (2012). *Understanding "Chopireh" construction methods for preservation and maintenance*. (In Persian).
- Zaribafian, O., (2006). "Protection strategies for historical buildings against earthquakes". *Regional Scientific Conference on Desert Architecture, Islamic Azad University, Ardestan Branch*. (In Persian).