Rahpooye Memari-o Shahrsazi
(Quarterly Journal of Architecture and Urbanism)
Vol. 4, No. 13, Spring 2025

Examining the Influence of Geometric Cognition on Extracting Structural Information in Architectural Design (Study Population: Architecture Students)[1]

Majid Ahmadnejad Karimi[2], Mahdi Mahmoudi Kamelabad[3], Maryam Azimi[4]

Received: 2025-03-08, Accepted: 2025-11-07
DOI: 10.22034/rau.2025.2058972.1191

Abstract

The present research was undertaken with the primary aim of identifying and explicating the types of structural information that can be extracted through the components of geometric cognition within the architectural design process. The central problem addressed in this study is the absence of an integrated understanding of the relationship between the conceptual tools of geometry—namely, descriptive, constructive, and stable geometry—and the structural performance of architectural designs. This lack of integration is particularly evident among architecture students, who frequently encounter difficulties in the early stages of design when attempting to reconcile geometric form-making with structural logic.

The primary objective of this research is to anticipate and propose a mechanism for extracting and articulating structural information that can be accessed through geometric cognition in the context of architectural design. Such a mechanism is intended to be both comprehensible and applicable for architecture students, thereby enabling them to bridge the conceptual divide between form and structure. The guiding research question is therefore articulated as follows: What kinds of structural information can geometric cognition provide within the conceptual stages of architectural design?

1. This article is derived from the doctoral Thesis of the first author, titled "Supporting Model of Structural Design Based on Geometric Cognition in the Architectural Design Process (Recommendations for Architecture Students)" completed under the supervision of the second author and advised by the third author at the Art University of Isfahan in winter 2020.

2. Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran (Corresponding author).
Email: m.ahmadnejad@tabriziau.ac.ir 0000-0002-9975-1108
3. Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Isfahan Art University, Isfahan, Iran.
Email: m.mahmoudi@aui.ac.ir 0000-0002-1904-0809
4. Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Isfahan Art University, Isfahan, Iran.
Email: m.azimi@aui.ac.ir 0009-0001-1654-1579

The necessity of this investigation arises from the increasing complexity of the simultaneous interplay between geometry and structure in contemporary architectural practice. As design processes become more computationally intensive and geometrically sophisticated, the challenge of understanding the integrated relationship between these two domains has intensified, particularly for students who are still developing their foundational design skills. Without a coherent framework, the risk is that geometry and structure are treated as separate domains, leading to fragmented design thinking and missed opportunities for innovation.

To address this challenge, the study employs a qualitative methodology grounded in the action research paradigm. This approach was selected because it allows for iterative cycles of experimentation, reflection, and refinement, which are particularly well-suited to the pedagogical and exploratory nature of architectural design education. Data were collected through a combination of practical design exercises, experimental workshops, and complementary qualitative methods, ensuring both depth and triangulation of insights. The research population consisted of 63 participants, including both students and recent graduates of architecture at various academic levels, thereby providing a diverse spectrum of perspectives and experiences.

The core findings of the study reveal that integrating the three components of geometric cognition—descriptive, constructive, and stable—within the conceptual design stage enables the simultaneous extraction of three distinct categories of structural information. These categories are as follows:

• **Spatial Information**: This dimension pertains to the visual and formal coordination between geometry and structure. Descriptive geometry enables students to comprehend the relationship between structural systems and architectural form, fostering an understanding of how structural logic influences a design's aesthetic and spatial qualities. For example, when students experiment with geometric projections or descriptive diagrams, they begin to see how a column grid can either harmonize with or conflict with the rhythm of a façade.

• **Scientific Information**: This category encompasses analytical insights related to equilibrium, stability, and resistance. Through stable cognition, students can begin to understand the underlying principles of load distribution, balance, and material performance, even prior to engaging in detailed structural calculations. This scientific awareness equips them with the capacity to anticipate potential structural challenges and to evaluate the feasibility of their design concepts. For instance, when a student sketches a cantilevered volume, stable cognition allows them to intuitively recognize the need for counterbalancing or reinforcement, even before numerical analysis is performed.

• **Technological Information**: This dimension involves facilitating simplification and standardization in construction processes. By employing constructive geometry, students can explore modularity, repetition, and fabrication logic, thereby linking abstract design intentions with practical considerations of construction technology. This technological perspective not only enhances con-

structability but also encourages innovation in the use of digital tools and fabrication techniques. For example, parametric modeling can reveal how a complex surface might be rationalized into planar panels for ease of fabrication.

Taken together, these findings underscore the potential of geometric cognition to serve as a mediating framework between architectural creativity and structural analysis. By linking the language of architectural imagination with the logic of structural reasoning, students and architects are empowered to make informed decisions about structural systems and to generate innovative forms even before engaging in precise numerical calculations. This integrative approach thus transforms the role of geometry from a stable representational tool into a dynamic cognitive medium that actively shapes structural understanding.

The implications of this research are multifaceted. Pedagogically, the study provides a structured pathway for architecture students to develop a more holistic understanding of the design process. Students learn geometry and structure concurrently from the beginning, fostering an integrated mindset where form and structure co-evolve. Such an approach not only enhances design quality but also reduces the likelihood of costly revisions at later stages of the design process.

From a methodological perspective, the action research framework proved particularly effective in capturing the iterative and reflective nature of design learning. By engaging students in cycles of experimentation and feedback, the study was able to document not only the outcomes of design exercises but also the evolving cognitive processes through which students internalized structural principles. This methodological choice underscores the importance of participatory and practice-based research in architectural education, where the learning process is as significant as the outcomes achieved.

In terms of disciplinary advancement, the study contributes to the ongoing discourse on the relationship between geometry and structure in architecture. While previous research has often emphasized computational tools or structural optimization techniques, this study foregrounds the cognitive dimension of geometry as a means of accessing structural knowledge. By doing so, it opens up new avenues for integrating design thinking with structural reasoning in ways that are accessible to both students and practitioners.

Furthermore, the findings have practical implications for professional practice. In an era where complex geometries and advanced fabrication technologies increasingly characterize architectural projects, the ability to grasp structural implications at the conceptual stage intuitively is invaluable. Architects who can navigate the interplay between geometry and structure are better positioned to collaborate effectively with engineers, to innovate in form-making, and to ensure the feasibility of their designs. This capacity not only enhances the efficiency of the design process but also contributes to the creation of buildings that are both aesthetically compelling and structurally sound.

The study also highlights the transformative shift in the role of the architect. Rather than functioning merely as a final delineator of form, the architect emerges as an orchestrator of latent generative logics that underpin both geometry and structure. This shift redefines the boundaries between tool, process, and meaning-making, positioning the architect as a mediator who navigates between creative expression and structural rationality. In this sense, the architect becomes less of a passive illustrator and more of an active negotiator of hidden logics that shape both form and performance.

In conclusion, the research demonstrates that integrating the descriptive, constructive, and stable components of geometric cognition within the conceptual design process enables the extraction of spatial, scientific, and technological structural information. This integrative framework not only enhances the pedagogical experience of architecture students but also contributes to the broader advancement of architectural knowledge. By bridging the gap between geometric imagination and structural analysis, the study offers a pathway toward more holistic, innovative, and feasible architectural design practices.

Ultimately, the findings affirm that geometry, when understood as a living cognitive language rather than a stable representational tool, possesses the capacity to generate structural insight and to transform the way architects and students engage with the design process. This recognition underscores the enduring relevance of geometric cognition in an era of rapid technological change, and it invites further exploration of how geometry and structure can be integrated in both educational and professional contexts. The study thus not only enriches the theoretical discourse on design cognition but also provides practical strategies for cultivating a new generation of architects who are equally fluent in the languages of form and structure.

Keywords: Geometric cognition, Structural information, Architectural conceptual design, Architecture–structure interaction, Action research

بررسی تأثیر شناخت هندسی بر استخراج اطلاعات سازه‌ای در طراحی معماری (جامعه آماری: دانشجویان معماری)[۱]

مجید احمدنژاد کریمی[۲]، مهدی محمودی کامل‌آباد[۳]، مریم عظیمی[۴]

تاریخ دریافت: ۰۶-۰۲-۱۴۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۶-۰۸-۱۴۰۴

DOI: 10.22034/rau.2025.2058972.1191

چکیده

این پژوهش به منظور شناسایی و تبیین اطلاعات سازه‌ای قابل استخراج از طریق مؤلفه‌های شناخت هندسی در فرایند طراحی معماری انجام شده است. مسئله اصلی این مطالعه، فقدان درک یکپارچه از نسبت میان ابزارهای مفهومی هندسه (توصیفی، سازنده و ایستا) و عملکرد سازه‌ای در طرح‌های معماری است؛ موضوعی که بسیاری از دانشجویان معماری در مراحل ابتدایی طراحی با آن مواجه‌اند. هدف اساسی این پژوهش، پیش‌بینی سازوکاری جهت استخراج و تبیین اطلاعات سازه‌ای است که از طریق مؤلفه‌های شناخت هندسی در بستر طراحی معماری قابل دستیابی بوده و برای دانشجویان معماری قابلیت درک و کاربرد دارد. بنابراین، سؤال محوری پژوهش این است که شناخت هندسی چه نوع اطلاعات سازه‌ای را در طراحی مفهومی معماری می‌تواند فراهم کند؟ ضرورت این تحقیق ناشی از پیچیدگی‌های فزاینده هم‌زمان هندسه و سازه در مراحل معماری است که فهم یکپارچه رابطه این دو حوزه را برای دانشجویان دشوار کرده است. این مطالعه با رویکرد کیفی و در قالب اقدام‌پژوهی طراحی شده و داده‌ها از طریق آزمون‌های عملی و روش‌های مکمل گردآوری شده است. جامعه آماری شامل ۶۳ نفر از دانشجویان و فارغ‌التحصیلان معماری در سطوح تحصیلی مختلف می‌باشد. نتیجه محوری این مطالعه نشان می‌دهد که تلفیق سه مؤلفه شناخت هندسی- توصیفی، سازنده و ایستا- در بستر طراحی مفهومی معماری، امکان برداشت هم‌زمان از سه گروه اطلاعات سازه‌ای -فضایی (هماهنگی بصری فرم و سازه)، علمی (تحلیل تعادل، پایداری و مقاومت) و فناورانه (تسهیل ساده‌سازی و استانداردسازی ساخت)- را فراهم می‌آورد؛ رویکردی که با پیوند زبان خلاقیت معمارانه و منطق تحلیل سازه، دانشجویان و معماران را قادر می‌سازد پیش از محاسبات دقیق، با درک فرصت‌ها و محدودیت‌های سازه‌ای، در انتخاب سیستم سازه‌ای و خلق فرم‌های نوآورانه تصمیم‌گیری کنند.

کلیدواژه‌ها: شناخت هندسی، اطلاعات سازه‌ای، طراحی مفهومی معماری، تعامل معماری و سازه، اقدام‌پژوهی

---

۱. این مقاله برگرفته از رساله دکتری نگارنده اول با عنوان «مدل پشتیبان طراحی سازه مبتنی برشناخت هندسی در فرایند طراحی معماری (توصیه‌ای برای دانشجویان معماری)» است، که با راهنمایی نگارنده دوم و مشاوره نگارنده سوم در زمستان ۱۳۹۹ در دانشگاه هنر اصفهان دفاع شده است.

۲. استادیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران (نویسندهٔ مسئول).
0000-0002-9975-1108 Email: m.ahmadnejad@tabriziau.ac.ir

۳. استادیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.
0000-0002-1904-0809 Email: m.mahmoudi@aui.ac.ir

۴. استادیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.
0009-0001-1654-1579 Email: m.azimi@aui.ac.ir

۱. مقدمه

با وجود انجام مطالعات گسترده در حوزه دانش سازه، یک خلأ اساسی در ادغام عملی این دانش در جریان طراحی معماری به چشم می‌خورد؛ ابزارهای موجود عمدتاً بر تحلیل و بهینه‌سازی بارها متمرکزند و نقش حیاتی فرم‌دهی سازه‌ای را تا حد زیادی کم‌رنگ می‌کنند. در مقابل، شناخت هندسی سازه با نزدیکی ساختاری به زبان طراحی، قابلیت پشتیبانی از معماران در مراحل مفهومی و انتقال مؤثر ایده‌های سازه‌ای را داراست. یکی از چالش‌های بنیادین، ناتوانی بسیاری از معماران و دانشجویان در فهم رابطه بین مؤلفه‌های شناخت هندسی و کیفیت طراحی سازه است که می‌تواند به نتایجی ناکارآمد در پروژه‌ها منجر شود. از این رو، بازشناسی دقیق این تعامل و شناسایی عوامل مؤثر بر آن، گامی ضروری در ارتقای خلاقیت و کارایی در فرایند طراحی محسوب می‌شود.

هدف این پژوهش پیش‌بینی سازوکاری جهت استخراج و تبیین اطلاعات سازه‌ای است که از طریق مؤلفه‌های شناخت هندسی در بستر طراحی مفهومی و در فضای آتلیه معماری است. این هدف با استفاده از روش اقدام‌پژوهی به انجام می‌رسد.

عبارت «اطلاعات سازه» به مجموعه‌ای از دانستنی‌های مربوط به سازه اطلاق می‌شود که شامل دانشی توأم با مهارت است؛ مهارتی که متکی بر دامنه‌ای از دانش‌های فنی و غیرفنی است (Sandaker, 2008). ازاین‌رو، در این پژوهش اطلاعات سازه‌ای به وجوه مکانیکی و فضایی سازه اشاره دارد که در فرایند طراحی مفهومی معماری استخراج می‌شوند، به‌ویژه در شرایطی که فرم در حال شکل‌گیری است و سامانه سازه‌ای هنوز تعریف دقیقی نیافته است. طراحی مفهومی، اولین مرحله از فرایند طراحی است که در آن ویژگی‌های برجسته‌ای از یک محصول تعریف می‌شود.

این پژوهش با تدوین چارچوب نظری-عملی یکپارچه بر پایه مؤلفه‌های شناخت هندسی، تعامل طراحی معماری و سازه را در بستر طراحی مفهومی تقویت می‌کند. سؤال محوری این پژوهش آن است که بهره‌گیری از مؤلفه‌های شناخت هندسی چه گونه داده‌ها و بینش‌هایی را در اختیار دانشجویان و معماران قرار می‌دهد. تشریح این اطلاعات نه‌تنها زمینه‌ساز بازنگری و غنی‌سازی محتوای آموزشی می‌شود، بلکه می‌تواند توان تحلیل سازه‌ای و خلاقیت طراحان نوپا را ارتقا دهد و فهم ما از نسبت‌های بنیادین میان اصول هندسی و طراحی سازه در معماری را عمق بخشد.

۲. پیشینه تحقیق

هندسه ساختمان شامل مجموعه‌ای بی‌پایان از الزامات مرتبط با جنبه‌های کاربردی، زیبایی‌شناختی، فنی و زیست‌محیطی است و نمایانگر یک زیبایی خاص است که نیازهای عملکردی و محدودیت‌های کارایی را منعکس می‌کند. اولویت‌های این معیارها در طول تاریخ معماری به تناسب عملکرد، ویژگی‌های فرهنگی، سبک‌های غالب، دسترسی به مصالح، سطح مهارت و فناوری و شرایط اقلیمی تغییر کرده است.

از دیرباز، هندسه به عنوان محور اصلی شکل‌یابی فرم‌های ساختاری در معماری شناخته شده است. در سده پانزدهم، لئون باتیستا آلبرتی در «درباره هنر ساختمان» بر ضرورت تدوین نظام هندسی برای تعالی فرم و ساخت تأکید کرد (Alberti, 1988). یکی از پیشرفت‌های اخیر در این زمینه، بررسی رابطه بین هندسه و مفاهیم سازه‌ای در کنفرانس بین‌المللی ریخت‌شناسی سازه در سال ۱۹۹۲ در مونپلیه فرانسه بود (Motro, 1992). نقطه عطف در تلفیق هندسه و سازه، با انتشار «فرم و سازه در معماری» اثر مینستون در سال ۲۰۰۱ رقم خورد که نقش توپوگرافی هندسی فرم‌های پوسته‌ای و قوسی را در پایداری سازه‌ای نشان داد (Mainstone, 2001). رینیه میگلیاری نیز با بررسی تاریخچه هندسه توصیفی به اهمیت نمایش گرافیکی سه‌بعدی پرداخت و بنیان روش‌های گرافیکی فرم‌یابی را تقویت کرد (Migliari, 2012).

تحقیقات در حوزه هندسه به معنای امروزی آن، با بررسی کارهای فرانک گهری، که از سطوح آزاد در پروژه‌هایی مانند موزه گوگنهایم استفاده کرده، آغاز شده است (Shelden, 2002). با ورود فناوری‌های دیجیتال، رویاپردازی‌های فرم‌یابی رایانه‌ای به‌سرعت در معماری محقق شدند. از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۳، کنفرانس‌هایی با عنوان "توسعه در هندسه معماری" برگزار شده که شامل مقالاتی در زمینه‌های هندسه کاربردی، معماری و مهندسی است (برای مثال: Pottmann *et al.*, 2008؛ Dörfler etal., 2023; Ceccato *et al.*, 2010). این مقالات چارچوبی نظری ـ ابزاری برای پیوند مؤلفه‌های هندسه عرضه کردند و ابزارهایی چون گرس‌هاپر را برای تحلیل توپولوژی فرم و مسیرهای نیرو معرفی نمودند.

DOI: 10.22034/rau.2025.2058972.1191

چالش اصلی در این رویکردها، تلفیق هم‌زمان محاسبات عددی و ساخت هندسی در مراحل مفهومی بود، تا معمار بتواند پیش از تحلیل دقیق باربری، تناسبات فضایی و رفتار بار را در مدل‌های پارامتریک بسنجد (Shea *et al.*, 2005; Leach, 2009).

از دیدگاه فناوری، آزمون‌های تجربی نشان داده‌اند که تحلیل توپولوژیک فرم‌های اولیه با ابزارهای پارامتریک، الگوهای باربری و نقاط کلیدی انتقال نیرو را آشکار می‌سازد (Adriaenssens *et al.*, 2014). اکبری و همکاران (Akbari *et al.*, 2020) با رویکرد هندسه‌محور، جریان نیروی داخلی را در سازه‌های سلولی بهینه کردند. کنستانتاتو و همکارانش نیز با استفاده از استاتیک گرافیکی، روش‌های جدیدی برای تولید الگوهای تنش در سازه‌های بتن مسلح معرفی کردند (Kon-stantatou *et al.*, 2020).

استفاده از فناوری‌های نوین و ابزارهای رایانه‌ای در طراحی و ساخت معماری، تحت عنوان هندسه دیجیتال، تحولی در روش‌های سنتی ایجاد کرده است (Pellis *et al.*, 2019; Jiang *et al.*, 2019). امروزه، تمرکز تحقیقات به سمت یکپارچه‌سازی شناخت هندسی با هوش مصنوعی و یادگیری ماشین رفته است؛ به طوری که الگوریتم‌های یادگیری عمیق می‌توانند الگوهای سازه‌ای و فضایی را از داده‌های حجیم استخراج و پیشنهادهای طراحی مبتنی بر آن ارائه دهند (To-var & Flager, 2021).

با این حال، بسیاری از پژوهش‌ها به رابطه جامع هندسه با ابعاد مختلف سازه توجه نکرده‌اند و بیشتر بر روی جنبه‌های نیروشناختی یا سیستم‌های سازه‌ای معین تمرکز کرده‌اند. لذا، پژوهش حاضر در صدد است چارچوبی یکپارچه بسازد که مؤلفه‌های شناخت هندسی را در مراحل مفهومی طراحی معماری به کار گیرد و هم‌زمان استخراج اطلاعات سازه‌ای مکانیکی و فضایی را ممکن سازد. این رویکرد، فضای نظری و فناوری پرشده از روند تاریخی هندسه در معماری را پیوند می‌زند و مسیر توسعهٔ ابزارهای میان‌رشته‌ای جدید در طراحی مفهومی سازه‌های معماری را هموار می‌کند.

۳. روش تحقیق

در این پژوهش از رویکرد کیفی با تأکید بر اقدام‌پژوهی بهره گرفته‌ایم تا بتوانیم مفاهیم کلیدی شناخت هندسی سازه و روابط میان آنها را در بستر طبیعی فعالیت معماران بازشناسایی کنیم (Denzin & Lincoln, 2003). هدف اصلی مطالعه، استخراج و سامان‌دهی چارچوب نظری شناخت هندسی سازه در فرایند طراحی معماری است و برای رسیدن به این منظور، داده‌ها به صورت کیفی گردآوری و تحلیل شده‌اند.

روش اقدام‌پژوهی، فرایندی چرخشی و پویاست که با شناسایی یک مسئله آغاز می‌شود و در گام‌های متوالی برنامه‌ریزی، اجرا، نظارت و بازاندیشی تکرار می‌گردد (Torbert, 1991). در هر چرخه، پس از طراحی و اجرای مداخله، بازخوردها سنجیده شده و در تدوین برنامه‌های بعدی تجدیدنظر می‌شود (Stringer, 2007). انجام هر چرخه منجر به گردآوری داده‌های جدید می‌شود. تحلیل این داده‌ها در چارچوب نظریه زمینه‌ای طی سه مرحله فشرده انجام می‌شود: در مرحله کدگذاری باز مفاهیم از یادداشت‌ها استخراج و نام‌گذاری می‌شوند، در کدگذاری محوری طبقه‌ها و زیرطبقه‌ها بر اساس روابط و شرایط پدیداری به هم پیوند می‌خورند، و در کدگذاری انتخابی تمام این طبقه‌ها در یک چارچوب نظری واحد ادغام و داده‌های کم‌اهمیت حذف می‌گردند.

در این مطالعه از نمونه‌گیری هدفمند با تأکید بر اشباع داده‌ها استفاده شده است. برای تعمیم‌پذیری نتایج تحقیق، نمونه‌های انتخابی از نمونه‌های نرمال جامعه دانشجویان معماری می‌باشند. جهت دستیابی به این امر، نرخ متوسط نمونه‌ها شامل ترکیبی از دانشجویان با سطوح کیفی مختلف بر اساس معدل و نتایج مطالعات مقدماتی (پایلوت) در نظر گرفته شد.

برای تضمین کفایت اطلاعات، حداقل نمونه‌گذاری در تحقیقات کیفی ۲۱ شرکت‌کننده می‌باشد (Collins *et al.*, 2007)، اما در این مطالعه ۶۳ نفر از دانشجویان و فارغ‌التحصیلان رشته معماری، شامل ۴۳ نفر در مقاطع کارشناسی و کارشناسی‌ارشد و ۲۰ نفر از فارغ‌التحصیلان معماری در آتلیه‌های مختلف سه دانشگاه شرکت کردند. انتخاب این نمونه گسترده در چهار گروه آتلیه‌ای (دو گروه ترم هفتم کارشناسی، یک گروه ترم ششم کارشناسی و یک گروه ترم دوم کارشناسی‌ارشد) تا تحقق اشباع و رضایت‌بخشی نتایج ادامه یافت. علت اصلی انتخاب دانشجویان معماری به عنوان بخش اصلی از جامعه آماری و همچنین آتلیه‌های معماری به عنوان مکان تحقیق، در دسترس بودن آن و امکان تکرار چرخهٔ روش

اقدام‌پژوهی تا زمان دستیابی به نتایج مطلوب و اشباع داده‌ها می‌باشد.

در فرایند کدگذاری، تحلیل به صورت مستمر تا زمانی ادامه یافت که تولید داده جدید متوقف شد و نشانه‌های اشباع مفاهیم پدیدار گردید. برای اعتبارسنجی این اشباع، مراحل بعدی چرخه اقدام‌پژوهی اجرا و داده‌ها با روش‌های چندگانه شامل مصاحبه، مشاهده فعال و اسکیس‌های عملی تأیید متقابل شدند.

به‌منظور افزایش اعتمادپذیری یافته‌ها، پژوهشگر زمان قابل توجهی در محیط آتلیه‌ها صرف کرده و عملکرد مشارکت‌کنندگان را از زوایای مختلف رصد نموده است. علاوه‌بر این، تحلیل نتایج و کدهای استخراج‌شده در جلسات هم‌اندیشی با همکاران خبره مورد نقد و بررسی قرار گرفت. درنهایت، صحت و دقت داده‌ها از طریق بازخورد مستقیم برخی مشارکت‌کنندگان به کمک دیگر روش‌های گردآوری داده‌ها و یادداشت‌برداری دقیق در حین فعالیت‌های عملی تضمین شد (جدول ۱).

جدول ۱. روش‌های گردآوری داده‌های پژوهش.

ابزار گردآوری داده‌ها	منابع گردآوری داده‌ها
مشاهده و ثبت رفتارها	ثبت مراحل طی شده و مشاهده تجربیاتِ مشارکت‌کنندگان در حین آزمون‌های عملی
مصاحبه نیمه‌استاندارد	مصاحبه با مشارکت‌کنندگان در مراحل تحقیق در حین ارزیابی و کرکسیون آزمون‌های عملی
پرسشنامه باز	توجه به نظریات مشارکت‌کنندگان قبل، حین و بعد از اعمال مداخله گام‌های تحقیق اقدام‌پژوهی
سنجش‌های عملی	پیاده کردن راهکارهای مدنظر در قالب اسکیس‌های هفتگی، بررسی نمونه‌های موردی و تمرین‌های طراحی و ترسیم توسط مشارکت‌کنندگان

۴. چارچوب نظری تحقیق

با توجه به عنوان پژوهش، همگرایی سه حوزه بنیادین، یعنی طراحی سازه، اطلاعات سازه‌ای و شناخت هندسی، کلید پیشبرد آن است. در ادامه، به تفکیک هر یک از این سه حوزه پرداخته و سازوکار تعامل آنها در تحقق اهداف پژوهش حاضر تشریح خواهد شد:

طراحی سازه: فرایند شکل‌گیری سازه شامل دو مرحله اصلی است: ۱) «طراحی سازه» و ۲) «تحلیل سازه» (Macdonald, 2019). این دو مرحله به عنوان دو جنبه مکمل در نظر گرفته می‌شوند که هر یک به مهارت‌ها و توانایی‌های خاصی مربوط می‌گردد. «طراحی» به معنای خلق و تدوین طرح کلی سازه است و بیشتر در حیطه فعالیت‌های معماران قرار دارد، در حالی که «تحلیل» به ارزیابی و توجیه طرح تعلق دارد و عمدتاً با وظایف مهندسان مرتبط است (احمدنژاد کریمی و دیگران، ۱۳۹۷). متأسفانه بسیاری از ابزارهای رایج، عمدتاً در دام تحلیل مکانیکی می‌افتند و سهمی اندک در خلق و غنای فرایند مفهومی اولیه دارند (محمودی، ۱۳۹۱). در این پژوهش، رویکرد «طراحی سازه» انتخاب شده که شامل بخش‌های مختلفی است و برای فعالیت‌های معماران در مراحل اولیه طراحی، به‌ویژه در مرحله طراحی مفهومی، ضروری است. بنابراین، برای رسیدن به اهداف مشخص در مرحله «طراحی سازه»، این پژوهش نیاز به نگرش عمیق‌تری به مفهوم سازه دارد.

اطلاعات سازه‌ای: اطلاعات سازه‌ای در معماری باید فراتر از تأمین صرف سختی و مقاومت تعریف شود. در برخی منابع (Millias, 2005)، سازه صرفاً به مثابه دستگاهی برای جلوگیری از گسیختگی و حفظ انسجام ساختار بررسی شده است. اما هنگام ورود سازه به بستر معماری، معیارهای عملکردی آن دامنه‌ای گسترده‌تر می‌یابند و شامل جنبه‌های زیبایی‌شناختی، تجربه فضایی و تعامل بصری نیز می‌شود (Beghini *et al.*, 2014).

رویکرد «وجوه چندگانه سازه» این گوناگونی را شفاف می‌سازد. در این مدل، سازه ابتدا در یک «بستر معماری» مجسم می‌شود که در آن وجوه علمی، فناورانه و فضایی به صورت هم‌زمان با یکدیگر تعامل دارند و تغییر در هر یک می‌تواند کل سیستم را متحول کند (Sandaker, 2008; Hadian, 2020). این نگرش به معماران و مهندسان اجازه می‌دهد تا فراتر از الگوهای باربری صرف مکانیکی، امکان‌های بصری و ساخت‌پذیری را نیز در فرایند طراحی لحاظ کنند.

ساندا‌کر در تحلیل خود سه وجه کلیدی را برای شناخت سازه در معماری معرفی می‌کند:

ـ وجه علمی: بررسی منطق باربری و معیارهای کارایی سازه (Sandaker, 2008).

ـ وجه فناوری: فرایندها و فناوری‌های ساخت که فرایندهای تولید و ساخت را در بر می‌گیرد. (Chandrasekaran *et al.*, 2021; Gharib & Bonet, 2020).

ـ وجه فضایی: کیفیات بصری و ادراکی سازه در پیوند با فرم

DOI: 10.22034/rau.2025.2058972.1191

معماری و تجربه کاربر (Moruzzi, 2020; Katona, 2020).

مطالعات اخیر نشان می‌دهند که هنگامی که این سه وجه در مرحله مفهومی تلفیق شوند، نه‌تنها عملکرد فنی سازه بهبود می‌یابد، بلکه نوآوری در فرم و کارایی اجرایی نیز هم‌زمان ارتقا می‌یابد (Pellis *et al.*, 2021; Marschner *et al.*, 2023).

شناخت هندسی: ادبیات پژوهش نشان می‌دهد دو نوع شناخت در طراحی سازه غالب‌اند: شناخت هندسی، متکی بر شهود و سازمان‌دهی شکل و شناخت عددی، متکی بر محاسبات دقیق و شبیه‌سازی‌های مهندسی (Macdonald, 2019; Main-stone, 2001). در روند طراحی سازه، مرحله «طراحی» عمدتاً بر پایه «شناخت هندسی» و سازماندهی‌های فضایی استوار است، در حالی که مرحله «تحلیل» بیشتر بر اساس «شناخت عددی» و محاسبات ریاضی توسعه می‌یابد. در مراحل مفهومی، شناخت هندسی ظرفیت بالایی برای کشف فرم‌های نوآورانه فراهم می‌کند، اما تا زمانی که نتواند وارد فرایند ساخت و تحلیل شود، کارآمدی آن محدود خواهد ماند. از سوی دیگر، شناخت عددی با تضمین عملکرد سازه و رعایت ضوابط ایمنی، معمولاً تحولی در مرحله پایانی ایجاد می‌کند ولی کمتر به شکل‌دهی مفهومی می‌پردازد (Gharib & Bonet, 2020).

برای پر کردن این خلأ، رویکرد «وجوه چندگانه شناخت هندسی» می‌تواند سه مؤلفه اصلی، هندسه توصیفی، هندسه سازنده و هندسه ایستا را در یک مدل مفهومی واحد تلفیق کند (احمدنژاد کریمی و دیگران، ۱۴۰۲).

ـ هندسه توصیفی فرم سه‌بعدی را از منظر بصری و گرافیکی توصیف می‌کند و ابزار اولیه تجسم فضایی را در اختیار معمار قرار می‌دهد (Migliari, 2012; Katona, 2020). این نوع هندسه با استفاده از رویه‌های خاص، امکان نمایش و تحلیل ویژگی‌های هندسه سه‌بعدی را فراهم می‌آورد.

ـ هندسه سازنده، شامل اطلاعاتی درباره چگونگی ساخت آنها از طریق تغییر ابعاد، زوایا و تبدیلات هندسی است. این هندسه فرایند تولید و سازه‌سازی فرم‌ها را از طریق تبدیل‌های هندسی، ترسیم مقاطع و مدیریت مصالح راهنما می‌شود (Pratt, 2003; Pellis *et al.*, 2021).

ـ هندسه ایستا پیوند هندسه سیستم سازه‌ای با مسیرهای انتقال نیرو، تنش و کرنش را مدل‌سازی می‌کند و توضیح می‌دهد که چرا و چگونه یک فرم باربری می‌کند (Macdonald, 2019; Marschner *et al.*, 2023).

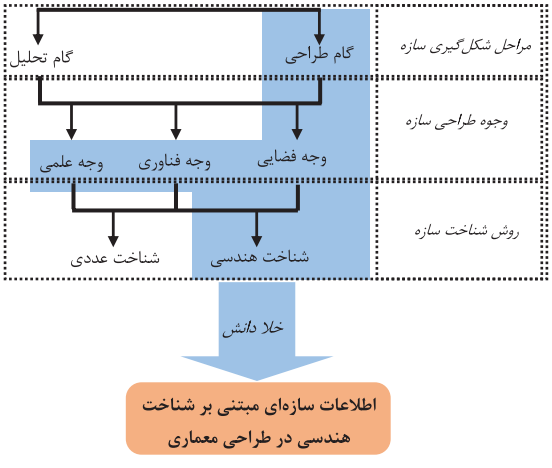
این همگرایی چارچوب روشنی در اختیار طراحان قرار می‌دهد تا از دل مؤلفه‌های شناخت هندسی، هندسه توصیفی، سازنده و ایستا، اطلاعات علمی، فناورانه و فضایی سازه را در بستر طراحی مفهومی استخراج کنند. در «تصویر ۱» نمودار چارچوب نظری تحقیق برای رسیدن به خلا دانش ارائه شده است.

۵. روش اعمال مداخله‌ها

آزمون‌های عملی و تمرین‌های طراحی با هدف استخراج دانش سازه‌ای مبتنی بر سه مؤلفه شناخت هندسی – توصیفی، سازنده و ایستا – و ارائه راه‌حل‌های هندسی برای چالش‌های سازه‌ای، در دوره‌های متوالی متناسب با مراحل پژوهش اجرا می‌شوند. در هر جلسه، آزمون و خطا و گفت‌وگوهای غیررسمی، بازخوردهایی را برای بازطراحی تدریجی روش فراهم می‌آورد و تکرار این چرخه، تسلط بر مؤلفه‌های هندسی و بهینه‌سازی مستمر روش را ممکن می‌سازد. برای سازمان‌دهی گردآوری و تحلیل داده‌ها (با توجه به آنچه در بخش روش تحقیق بیان شد)، چهار نوع تمرین با اهداف تحقیقاتی مشخص تعریف شده است که جزئیات آنها در «جدول ۲» آمده است.

هدف این بخش، بررسی و تفسیر نتایج تمرین‌های طراحی و آزمون‌های عملی اسکیس و همچنین داده‌های گردآوری‌شده از مشاهدات، پرسشنامه‌ها و گفت‌وگوهای حین کرکسیون با توجه به دیدگاه‌ها و رویکردهای مختلف مشارکت‌کنندگان از طراحی سازه مبتنی بر شناخت هندسی می‌باشد:

ـ **مصاحبه‌های کرکسیون:** مصاحبه‌ها در حین ارزیابی



تصویر ۱. نمودار چارچوب نظری تحقیق برای رسیدن به خلأ دانش.

اسکیس‌ها و ترسیم‌های شرکت‌کنندگان انجام شد. سؤال‌ها ضمنی و ساخت‌یافته طراحی شد تا برداشت‌های واقعی هر فرد از مداخلات هندسی در گام‌های مختلف طراحی به دست آید.

ـ **مشاهده فعال میدانی:** پژوهشگر در قالب مشاهده عمل‌گرایانه، رفتار و گفتار مشارکت‌کنندگان را با فرم یادداشت ثبت کرد (ستون اول: شرح عینی رویدادها؛ ستون دوم: تفسیر پژوهشگر). این سازوکار امکان مقایسه تغییرات قبل و بعد از مداخله هندسی را فراهم ساخت.

ـ **پرسشنامه:** بازخورد تجربی مشارکت‌کنندگان درباره نقاط قوت و چالش‌های مداخلات هندسی.

ـ **آزمون‌های عملی طراحی:** شرکت‌کنندگان مجموعه‌ای از تمرین‌های ترسیم دستی، تحلیل نمونه‌های موردی و اسکیس‌های کوتاه‌مدت را اجرا کردند. این آزمون‌ها با دوره‌ای از بازخورد و اصلاحات متوالی همراه بود تا تأثیر هر مداخله بر توانمندی‌های هندسی در طراحی سازه به‌دقت رصد گردد.

در طول تمرین‌ها، اطلاعات مربوط به عملکرد مشارکت‌کنندگان به‌طور دقیق از طریق این روش‌های گردآوری داده‌ها ثبت می‌شود. سپس این داده‌ها با استفاده از روش کدگذاری کیفی تحلیل می‌شوند تا الگوها و روابط بین شناخت هندسی و اطلاعات سازه‌ای استخراج گردد. این چرخه تا رسیدن به اشباع داده‌ها و نتایج مطلوب ادامه می‌یابد.

جدول ۲. روش‌های اعمال مداخله از طریق تمرین‌های عملی برای بررسی تأثیر شناخت هندسی بر استخراج اطلاعات سازه‌ای.

روش	شرح	هدف
تمرین اول: ترسیم و تفسیر هندسه سطوح و فرم‌ها	مشارکت‌کنندگان در دو مرحله سطوح و فرم‌ها را طراحی کردند: یک بار بدون مداخله و بار دیگر پس از آموزش روش هندسی.	ارزیابی توانایی در شناخت ویژگی‌های هندسی و ترسیم فرم‌ها.
تمرین دوم: ترسیم سازه پایه بر روی فرم‌ها	مشارکت‌کنندگان اجزای مختلف سازه‌ای را بر روی فرم‌های معماری طراحی و ترسیم کردند.	نمایش پیکربندی اجزا و بررسی قابلیت آنها در فرم‌دهی به معماری.
تمرین سوم: تفسیر نمونه‌های موجود	بررسی پروژه‌های معماری مختلف و تفسیر اطلاعات سازه‌ای آنها با تمرکز بر شناخت هندسی.	راهنمایی در استفاده از داده‌های هندسی و شناخت انواع سازه‌ها.
تمرین چهارم: اسکیس‌های کوتاه‌مدت	انجام آزمون‌های اسکیس به مدت ۹۰ تا ۱۲۰ دقیقه برای سنجش توانایی طراحی با دست آزاد و تحلیل داده‌های سازه‌ای.	سنجش توانایی‌های طراحی در مراحل ابتدایی و بررسی تحلیل داده‌ها با روش هندسی.

۶. یافته‌ها

۶. ۱. امکانات و فرصت‌ها

بر اساس تحلیل داده‌های گردآوری شده، تعداد دوازده یافته اصلی با عنوان امکانات و فرصت‌هایی را که شناخت هندسی در زمینهٔ طراحی سازه در اختیار مشارکت‌کننده و طراح قرار می‌دهد، استخراج گردید. همچنین در این بخش از تحقیق، برخی از یافته‌ها به صورت مشترک از تمرین‌های اسکیس و روش‌های دیگر گردآوری داده‌ها استخراج شده‌اند: ۱) یافته‌های هر تمرین ممکن است در تمرین‌های دیگر به نحوی تکرار شود و ۲) هم‌افزایی داده‌ها در تمرین‌های مختلف با یکدیگر در فرایند تحلیل داده‌ها مؤثر است. مفاهیم موجود در این یافته‌های دوارده‌گانه، در تفسیر و تحلیل داده‌ها در گام‌های بعدی پژوهش نیز استفاده شده است.

در این بخش از تحقیق، گردآوری داده‌ها حول دو محور عمده تنظیم شده است: ۱) چگونگی تأثیرگذاری روش هندسی در بخش‌های مختلف طراحی سازه و ۲) نظرات مشارکت دربارهٔ روش هندسی. برخی از نکات مهم و پرتکرار که از نظرات و تجربیات مشارکت‌کنندگان و همچنین ارزیابی نتایج سنجش‌های عملی آنها در این تحقیق به دست آمده، به منظور تبیین چگونگی شکل‌گیری مقوله‌ها و انطباق آنها با منابع موجود، در قالب «جدول ۳» ارائه شده است.

یافته ۱. تفسیر و ترسیم هندسی سطوح متنوع: پس از معرفی مفاهیم هندسه توصیفی و سازنده، مشارکت‌کنندگان توانستند در مقایسه با مرحله اولیه، سطوح و فرم‌هایی با تنوع بیشتر از جمله سطوح آزاد منحنی، مخروطی، خطدار و گسترش‌پذیر را تولید و ترسیم کنند. این پیشرفت نشان‌دهنده توانایی آنان در تحلیل هندسی اشکال با بهره‌گیری از عناصر پایه‌ای مانند نقطه، خط و سطح است.

یافته ۲. تعیین نوع سیستم سازه‌ای و پیکربندی اجزاء: ویژگی‌های هندسی فرم‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب نوع سیستم سازه‌ای دارند و امکان پیشنهاد چندین گزینه برای یک فرم واحد را فراهم می‌کنند. در تمرین دوم، مشارکت‌کنندگان با طراحی فرم‌هایی با هندسه مضاعف دوطرفه و تحلیل روابط هندسی-سازه‌ای، انواع سیستم‌ها چون چادری، کابلی، قابی و پوسته‌ای را ترسیم و سازمان‌دهی کردند (تصویر ۲). این فرایند نشان داد که هماهنگی میان هندسه سازنده، توصیفی و ایستا برای یکپارچگی معماری و سازه ضروری است.

DOI: 10.22034/rau.2025.2058972.1191

جدول ۳. تحلیل داده‌های حاصل از روش‌های مختلف گردآوری داده‌ها، از طریق کدگذاری باز و محوری، با عنوان «فرصت‌ها و امکانات مبتنی بر شناخت هندسی».

برخی از مهم‌ترین نکات و کدهای دریافتی (کدگذاری باز)	فرصت‌ها و امکانات (کدگذاری محوری)
۱) طراحی فرم‌های سازه‌ای متنوع فراتر از محدودیت ذهنی. ۲) قابلیت کاربرد توسط ابزارهای گوناگون طراحی، شامل ترسیم با دست، ماکت و نرم‌افزارهای طراحی. ۳) روشی آسان برای ترسیم فرم‌های متنوع. ۴) درک هندسی سطوح منحنی. ۵) دارای اصول و نظم در طراحی سطوح متنوع. ۶) قابلیت تولید الگوهای متنوع از سازه. ۷) ترسیم سه‌بعدی سازه‌ها.	۱. تفسیر و ترسیم هندسی سطوح متنوع
۸) چگونگی سازمان‌دهی اجزای سازه‌ای. ۹) طراحی سازه منطبق با پلان و فرم. ۱۰) هماهنگی اجزای سازه با یکدیگر	۲. تعیین نوع سیستم سازه‌ای و پیکربندی اجزاء
۱۱) توجه هم‌زمان به طراحی فرم و طراحی سازه. ۱۲) تأثیر سازه و فرم بر یکدیگر. ۱۳) درک رابطه سازه با معماری.	۳. تعیین نسبت میان سازه و معماری
۱۴) کاربرد در افزایش کیفیت طراحی نما و طراحی داخلی. ۱۵) نقش سازه در زیبایی‌شناختی فرم. ۱۶) نقش سازه در طراحی مفهومی فرم معماری. ۱۷) وجه پیکرنگاری سازه. ۱۸) نمادگرایی سازه.	۴. تعیین وجه فضایی سازه
۱۹) درک چگونگی اجرایی کردن سازه. ۲۰) ارائه پیشنهاداتی برای ساخت آسان.	۵. تعیین وجه فناوری سازه
۲۱) تعیین رابطه نیرو با فرم. ۲۲) درنظرگرفتن وجه باربری سازه.	۶. تعیین وجه علمی سازه
۲۳) مؤثر در ایده‌پردازی و طراحی کانسپت. ۲۴) نقش سازه در واقعیت بخشیدن به ایده‌ها به‌ویژه طرح‌های پیچیده. ۲۵) طراحی فرم‌های نمادین. ۲۶) نقش سازه در طراحی مفهومی فرم معماری. ۲۷) وجه پیکرنگاری سازه.	۷. تعامل وجوه منطقی و خلاقانه سازه
۲۸) افزایش توجه به طراحی سازه. ۲۹) طراحی فرم‌های نمادین. ۳۰) توجه هم‌زمان به طراحی فرم و طراحی سازه. ۳۱) کاربرد سازه در عملکرد معماری. ۳۲) تأثیر سازه و فرم بر یکدیگر. ۳۳) کاربرد در ایده‌پردازی. ۳۴) نقش سازه در طراحی مفهومی فرم معماری. ۳۵) وجه پیکرنگاری سازه. ۳۶) ترکیب سازه با دیگر عناصر معماری. ۳۷) سازه به مثابه عنصر معماری. ۳۸) طراحی فرم با محوریت سازه. ۳۹) ارائه طرح‌های معماری با نگاه فنی و سازه‌ای.	۸. همسازی طراحی معماری و طراحی سازه
۴۰) کاربرد در شناخت مفاهیم سازه. ۴۱) کاربرد در شناخت سیستم‌های سازه.	۹. درک و کاربرد دانش سازه در تفسیر و طراحی سازه
۴۲) استفاده از انحنای اصلی در طراحی فرم کلی سازه. ۴۳) استفاده از عناصر هندسی در تولید و ترسیم فرم سازه.	۱۰. قابلیت مشارکت عناصر هندسی اولیه در طراحی سازه
۴۴) ارائه پیشنهادات مختلف برای انتقال نیرو. ۴۵) درک نوع نیروهای داخلی در عناصر سازه.	۱۱. بررسی نسبت مسیر نیرو و پیکربندی سازه
۴۶) پشتیبان در طراحی فرم سازه. ۴۷) بکارگیری فرم‌های سازه‌ای گوناگون. ۴۸) ترسیم فرم سازه سقف. ۴۹) قابلیت تولید الگوهای متنوع از سازه.	۱۲. قابلیت تولید فرم‌های گوناگون سازه‌ای

یافته ۳. تعیین نسبت میان سازه و معماری: میزان هماهنگی میان هندسه ایستا (پیکربندی سازه) و هندسه توصیفی/سازنده (روش تولید فرم) می‌تواند از ادغام کامل تا تضاد هندسی متغیر باشد. هنگامی که این هماهنگی کاهش می‌یابد، پیچیدگی شکل و هندسه کلی ساختمان افزایش یافته و در مواردی که سازه صرفاً برای خلق فرم طراحی شود، نتایج غیرمنتظره‌ای پدید می‌آورد. همچنین تفاوت در هماهنگی اجزای سازه، مانند سقف و تکیه‌گاه‌های عمودی، نه ناشی از باربری، بلکه تابع رویکردهای گوناگون طراحی این المان‌ها است (تصویر ۳).

یافته ۴. تعیین وجه فضایی سازه: پس از اعمال مداخله هندسی، شرکت‌کنندگان سازه را به ابزاری برای پیکربندی نما و فرم بدل کردند و با ایجاد الگوهای متنوع، ریتم و سلسله‌مراتب بصری را تقویت نمودند. نمونه‌ها شامل بهره‌گیری از تکیه‌گاه درختی هماهنگ با هندسه موجدار سقف و گودی‌ها و بافت‌های متغیر در نما برای عمق‌بخشی و تعامل با نور طبیعی است. این پیشرفت‌ها محصول هم‌افزایی هندسه‌های توصیفی، سازنده و ایستا در فرایند طراحی سازه است.

یافته ۵. تعیین وجه فناوری سازه: یافته‌ها نشان می‌دهد که شرکت‌کنندگان از هندسه‌های خط‌دار، گسسته و مفهوم گاوسی برای تسهیل فناوری ساخت فرم‌های آزاد و پوسته‌ای بهره برده‌اند. آنها با طراحی سطوح گسترش‌پذیر و گسترش‌ناپذیر بر اساس خطوط اصلی، پیچیدگی قالب‌بندی بتن در سازه‌های منحنی را کاهش داده‌اند. همچنین، در سازه‌های چادری برش‌های کارآمدی پیشنهاد شد تا ساخت با پانل‌های مسطح آسان و کم‌هزینه شود.

یافته ۶. تعیین وجه علمی سازه: یافته ششم نشان می‌دهد که هرچند هندسه تنها راه‌حل جامع نیست، بهره‌گیری از زبان هندسی به عنوان ابزار مفهومی اشتباهات اولیه را آشکار و

درک علمی سازه را ارتقا می‌دهد. مقایسه روایت‌های پیش و پس‌مداخله گواه آن است که تمایز سطوح گسترش‌پذیر و غیرگسترش‌پذیر، که مقاومت آنها ناشی از انحنای مضاعف است، بدون نیاز به مفاهیم پیچیده قابل فهم است و ترکیب هندسه ایستا، توصیفی و سازنده در تفسیر رفتار سازه مؤثر است. بدین ترتیب، شناخت هندسی به عنوان گامی اساسی در بهبود فرایند طراحی و تحلیل علمی سازه عمل می‌کند.

یافته ۷. تعامل وجوه منطقی و خلاقانه سازه: پس از آشنایی با هندسه توصیفی و سازنده، مشارکت‌کنندگان قابلیت خلق فرم‌های متنوع را یافتند اما به دلیل غفلت از باربری، طراحی سازه برایشان دشوار شد. مفاهیم هندسه ایستا به عنوان چارچوبی منطقی وارد عمل گردید و این نقیصه را جبران کرد. در این رویکرد تعاملی، شرکت‌کنندگان با تلفیق خلاق هندسه‌های توصیفی، سازنده و ایستا، نه‌تنها راه‌حل‌های سازه‌ای کارآمدتری یافتند، بلکه با بازنگری گزاره‌های معماری، کیفیت فضایی و ابعاد انتزاعی سازه را نیز ارتقا دادند (تصویر ۴).

یافته ۸. همسازی طراحی معماری و طراحی سازه: نتایج حاکی است که در فاز مفهومی طراحی، زمانی که فرم معماری هنوز در حال بلور یافتن است، بیان دقیق گزاره‌های سازه‌ای دشوار است، زیرا نیاز به جزئیات فنی و واژگان تخصصی، تفسیرهای متعدد و صرف زمان و انرژی فراوان دارد. به دنبال این پیچیدگی، بسیاری از شرکت‌کنندگان فرم ساختمان را فارغ از سازه تعریف کرده و در نتیجه سیستم‌های سازه‌ای ناهماهنگ با عملکرد و زیبایی معماری خلق می‌کنند. اما پس از بهره‌گیری از روش مبتنی بر شناخت هندسی، طراحان دریافتند که زبان هندسی می‌تواند امکانات و محدودیت‌های سازه‌ای را به‌سادگی و شفافیتی قابل فهم ارائه کند. در این شرایط، سازه نه‌تنها به عنوان مانع، بلکه به عنوان عنصری هم‌راستا و تقویت‌کننده مفاهیم معماری عمل می‌کند.

یافته ۹. درک و کاربرد دانش سازه در تفسیر و طراحی سازه: دو دیدگاه از تجربه مشارکت‌کنندگان با روش هندسی پدید آمد: گروهی پس از تمرین، روش هندسی را زبانی شفاف برای تبدیل ایده‌های سازه‌ای انتزاعی به راه‌حل‌های عملی یافتند و تأثیر آن را در نزدیک‌تر کردن طراحی مفهومی به واقعیت ستودند. گروهی دیگر در آغاز درک تعامل میان هندسه توصیفی، سازنده و ایستا را دشوار دانستند و برای استخراج اطلاعات سازه‌ای به زمان و تمرین بیشتر نیاز داشتند. آنها دریافتند که فهم الزامات باربری و روش ساخت به تعامل چندوجهی این هندسه‌ها وابسته است. در نتیجه، اگرچه شناخت هندسی می‌تواند توانمندی طراح را در تفسیر و کاربرد دانش سازه ارتقا دهد، حصول تسلط بر آن مستلزم تجربه و تمرین مداوم است.

یافته ۱۰. قابلیت مشارکت عناصر هندسی اولیه در طراحی سازه: شناخت هندسی با تمرکز بر مؤلفه‌های باربری، امکان تبدیل عناصر اولیه هندسی شامل نقطه، خط و سطح به سازه‌های پایه را فراهم می‌آورد. مشارکت‌کنندگان با بهره از انحنای گاوسی، تیرهای خرپایی صلب خطی ترسیم کردند و نقاط را به عنوان گره‌ها و سطوح انتقال نیرو در سازه‌های پوسته‌ای به کار بردند. در یک مثال، یک طراح با تعریف دقیق نقاط و روابط میان سطوح، فرم چادری و اجزای سازه‌ای آن را بر مبنای تبدیلات هندسی تولید و تحلیل کرد.

یافته ۱۱. بررسی نسبت مسیر نیرو و پیکربندی سازه: درک هندسه ایستا، یعنی تحلیل مسیر و توزیع نیروها، به طراحان امکان می‌دهد پیکربندی‌های سازه‌ای متنوعی را عملی کنند. برای مثال، در پروژه یک سازه چادری مخروطی، یکی از شرکت‌کنندگان با جایگزینی دکل معلق به‌جای دکل سرتاسری و افزودن کابل‌های کششی زیر آن، ضمن جلوگیری از قطع دید در فضای آمفی‌تئاتر، عملکرد فضایی و باربری سازه را به‌طور هم‌زمان بهبود بخشید (تصویر ۵). این نمونه گویای تأثیر مستقیم تغییر هندسه نیروها بر ابعاد علمی و کالبدی طرح است.

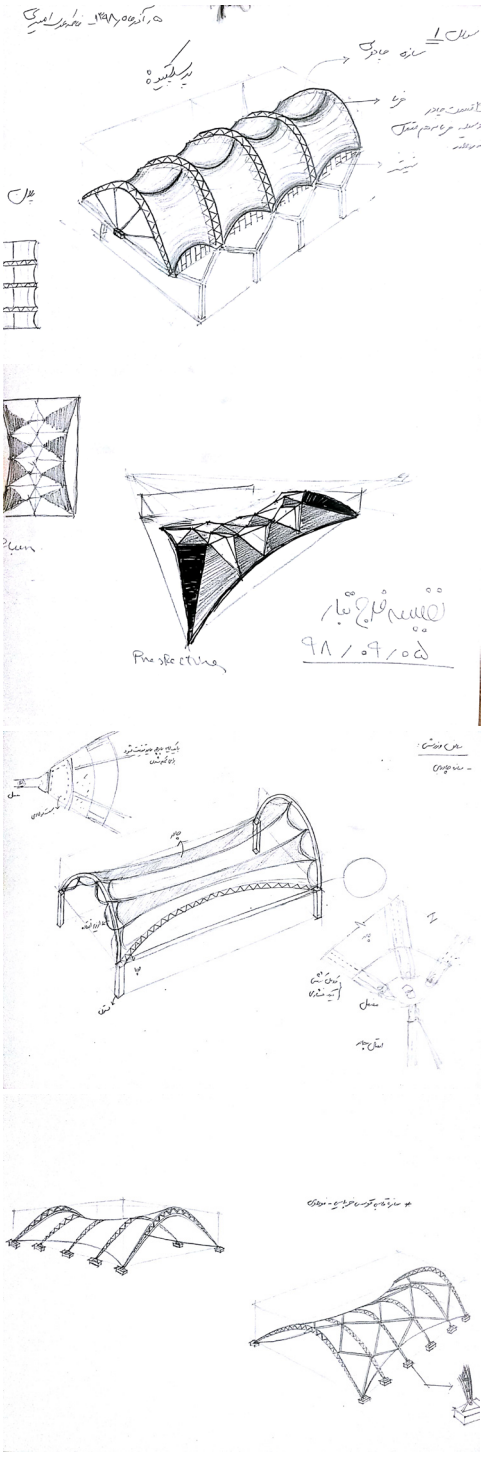
یافته ۱۲. قابلیت تولید فرم‌های گوناگون سازه‌ای: مسئله‌ای که برخی از مشارکت‌کنندگان در طراحی سازه با آن مواجه هستند، تنوع اندک در فرم طراحی برای برخی سازه‌ها، برای مثال سازه‌های چادری است. اگرچه سازه‌های چادری به‌خاطر الزام هندسه مضاعف دوطرفه محدود به فرم‌های یکنواختی مانند مخروطی یا زین‌اسبی به‌نظر می‌رسند، اما آشنایی با هندسه سازنده و تعامل آن با هندسه توصیفی و ایستا به مشارکت‌کنندگان امکان داد تا با ترکیب خطوط انحنای متفاوت و پیکربندی‌های گوناگون، فرم‌های چادری متنوع و نوآورانه‌ای خلق کنند، در حالی که ساختار دوطرفه اصلی حفظ شده است.

۶. ۲. استخراج اطلاعات سازه‌ای مبتنی بر شناخت هندسی

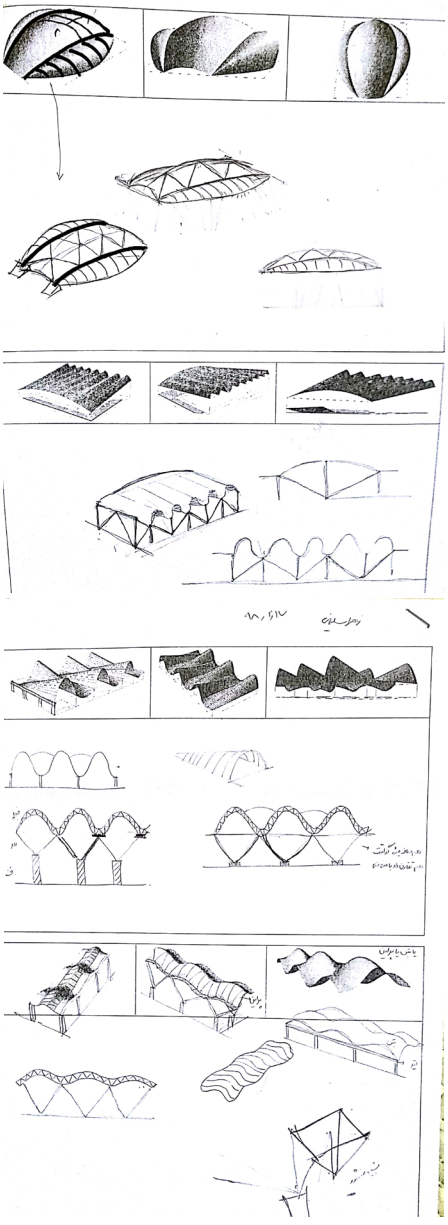
در این بخش، تعامل سه رکن شناخت هندسی-توصیفی، سازنده

DOI: 10.22034/rau.2025.2058972.1191

و ایستا-در استخراج اطلاعات سازه‌ای بررسی می‌شود. یافته‌ها حاکی است که ادغام این مؤلفه‌ها، فرصت‌های چندبعدی مبتنی بر اصول هندسی را در سه بُعد فضایی، علمی و فناورانه پدید می‌آورد. سازمان‌دهی این تحلیل بر اساس همین سه وجه صورت گرفته و داده‌ها از طریق تمرین‌های طراحی مفهومی و



تصویر ۲. برخی از نمونه‌های طراحی و ترسیم سازه‌های گوناگون بر روی یک فرم معیّن توسط مشارکت‌کنندگان.

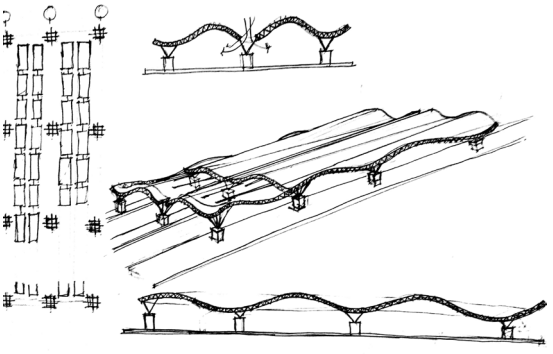


تصویر ۳. برخی از نمونه‌های طراحی پیکربندی سازه بر روی فرم سازه توسط مشارکت‌کنندگان.

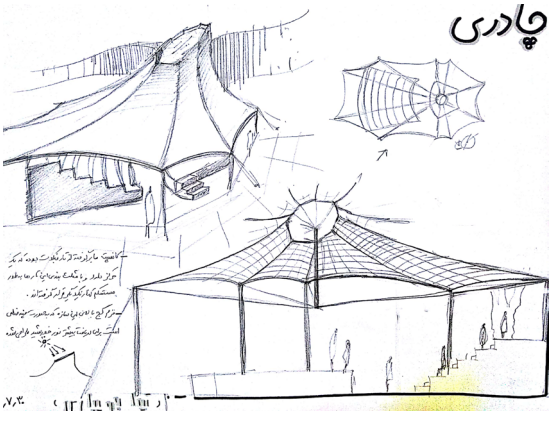
آزمون‌های اسکیس گردآوری، با منابع تخصصی هم‌سنجی و به‌تفصیل ارائه شده‌اند (جدول ۴).

اطلاعات وجه فضایی: نتایج تحقیق حاکی است که نسبت میان هندسهٔ سازه و فرم معماری در بُعد فضایی حول دو محور اصلی تعریف می‌شود: «سطح نمایش بصری» که نمایانگر چگونگی بروز اجزای باربر در نما و فضای داخلی است، و «درجه یکپارچگی هندسی» که میزان همبستگی فرم معماری با سیستم سازه‌ای را نشان می‌دهد.

یک معیار محوری در تعریف نسبت هندسه سازه و فرم معماری، میزان نمایان‌سازی سازه است؛ در چنین حالتی، اجزای باربر نه‌تنها برای ارتقای عملکرد طراحی می‌شوند، بلکه خود به عنوان عناصر بصری قابل مشاهده در نما و فضای داخلی عمل می‌کنند. این رویکرد به‌ویژه در پروژه‌های نمادگرا برجسته است، جایی که هندسه موضعی- از طریق مقاطع طولی غیرمنشوری یا بالدار و شبکه‌های مشبک- با دقت بهینه می‌گردد تا جلوه سازه تقویت شود. افزون بر این، نمایش سیستم باربری (مثلاً ستون‌های درختی یا تلفیق اعضای فشاری ضخیم و کششی نازک) می‌تواند مسیر نیروها را در فرم معماری آشکار سازد و هم‌زمان میزان یکپارچگی و همبستگی میان هندسه سازه و فضای معماری را تبیین نماید.



تصویر ۴. تعامل هندسه ایستا با هندسه‌های توصیفی و سازنده: مشارکت‌کننده از هندسه نمودار خمشی یک تیر چند دهانه در طراحی فرم سقف خرپای سه‌بعدی یک ایستگاه راه‌آهن استفاده کرده است.



تصویر۵. استفاده از مفهوم تغییر مسیر هندسهٔ نیرو در تبدیل دکل سرتاسری به دکل معلّق از کابل‌ها کششی توسط مشارکت‌کننده.

موسری (۲۰۰۴) می‌گوید در پروژه‌های بزرگ و ویژه، به دلیل الزام‌های منطقی، مصالحی و کارکردی، هماهنگی هندسی سازه با فرم معماری به بیشینه خود نزدیک می‌شود، در حالی که در طرح‌های معمولی، میزان این یکپارچگی تابع رویکرد و اولویت‌های طراح است (Mosseri, 2004: 594). با وجود میل قوی به خلق سازه‌های کارا و منسجم، داده‌های این تحقیق نشان می‌دهد که سطح همبستگی فرم و سازه در طرح‌های مشارکت‌کنندگان متغیر است؛ گاهی استراتژی سازه‌ای فضا را شکل می‌دهد و گاهی هندسه سازه ناگزیر با فرم و عملکرد فضایی سازه به توافق می‌رسد.

با توجه به تنوع تعامل میان فرم معماری و هندسه سازه می‌توان سه الگوی اصلی را شناسایی کرد: در الگوی تلفیق، سازه و فرم معماری چنان در هم تنیده می‌شوند که جداسازی هندسی میان آنها ناممکن است؛ سازه‌های پوسته‌ای یا غشایی با تکیه‌گاه‌های قوسی از این دسته‌اند که هم‌زمان حجم معماری و عملکرد باربری را تعریف می‌کنند. الگوی هم‌سازی، فرمی نسبتاً مستقل اما هماهنگ از سازه را نشان می‌دهد؛ مانند سازه‌های قابی که بدون تحمیل بر فرم ساختمان، آن را به‌طور مساوی پشتیبانی می‌کنند. در مقابل، الگوی تضاد، کنش هندسی دوگانه‌ای را به تصویر می‌کشد که در آن غشاهای منحنی و کابل‌ها یا تکیه‌گاه‌های خطی هر یک زبان بصری و ساختاری خود را حفظ می‌کنند؛ نمونه‌ای روشن از این ناهمگونی هندسی سازه‌های چادری است. این سه الگو چارچوبی چندوجهی برای بررسی سطوح گوناگون همبستگی یا برخورد میان فرم معماری و هندسه سازه فراهم می‌آورند و بسته به اهداف و اولویت‌های طراحی، کاربردهای متفاوتی می‌یابند.

اطلاعات وجه علمی: از دیدگاه علمی، هر سازه برای تاب‌آوری در برابر بارهای عمودی و افقی موظف به برقراری چهار ویژگی

DOI: 10.22034/rau.2025.2058972.1191

بنیادین- تعادل، پایداری، مقاومت و سختی- است (Macdonald, 2019). شناخت هندسی این امکان را میسر می‌سازد که با تحلیل دقیق پیکربندی اعضا و نسبت دهانه به عمق، برآوردی سریع از ممان اینرسی و محل تمرکز تنش‌ها صورت گیرد و نقاط ضعف تعادل یا ناپایداری پیش از ساخت شناسایی شود. افزون بر این، تغییر هوشمند مقطع از حالت تخت به فرم‌های موج‌دار یا تاشده می‌تواند مقاومت خمشی و سختی را تا چند برابر افزایش دهد؛ ضمن اینکه طراحی مقاطع خرپایی و کابل‌ها با تبدیل بارهای خمشی به محوری، استحکام کلی سازه را تقویت می‌کند. در نتیجه، زبان هندسی ابزاری قدرتمند برای تفسیر و بهینه‌سازی این شرایط مهندسی در مرحله مفهومی طراحی به شمار می‌آید.

بارگذاری سازه منجر به شکل‌گیری نیروهای داخلی و واکنش‌های تکیه‌گاهی می‌شود که اعضا موظفند زیر بار نهایی بدون گسیختگی یا تغییرشکل بیش از حد عمل کنند. افزون بر این، سختی کافی برای محدودکردن تغییرشکل‌های مجاز ضروری است؛ سختی نشان‌دهنده نیروی مورد نیاز برای ایجاد واحد جابه‌جایی و مقاومت بیان‌گر ظرفیت باربری نهایی عضو است. این ویژگی‌ها به چیدمان هندسی اعضا، مشخصات مقاطع و نوع مصالح وابسته‌اند، به‌طوری که افزایش ابعاد یا تغییر هندسه مقطع حتی با مصالح ضعیف، عناصر قوی تولید کند.، هر دو مقاومت و سختی را تقویت می‌کنند. تغییر هندسه مقطع به فرم‌های موج‌دار یا تاشده نیز به افزایش ممان اینرسی و مقاومت خمشی می‌انجامد. همچنین، بهره‌گیری از مقاطع خرپایی و تیرکابل با تبدیل بارهای خمشی به نیروهای محوری، صلبیت خمشی سازه را به شکل مؤثری ارتقا می‌دهد.

اطلاعات وجه فناوری: به دلیل تسلط ناکافی بخشی از معماران بر اصول هندسی سازه، اغلب به فرم‌های ساده‌تر روی می‌آورند تا هزینه‌های ساخت و آزمون‌های تجربی را به حداقل برسانند، هرچند فناوری‌های نوین در دسترس است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که درک عمیق هندسی توانمندی طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های با هندسه آزاد را برای معماران فراهم می‌کند. در این فرایند، ترکیب هوشمند مصالح و چیدمان اعضا به عنوان ابزار شکل‌دهی هندسی عمل کرده و اجرای سازه با کمترین مداخله در هندسه اولیه ممکن می‌شود. پاتمن (۲۰۱۳) نیز تأکید می‌کند که برای انطباق با الزامات تولید و نصب، معمولاً پس از تعیین هندسه اصلی نیاز به بازنگری و اصلاحات جزئی وجود دارد (Pottmann, 2013: 198).

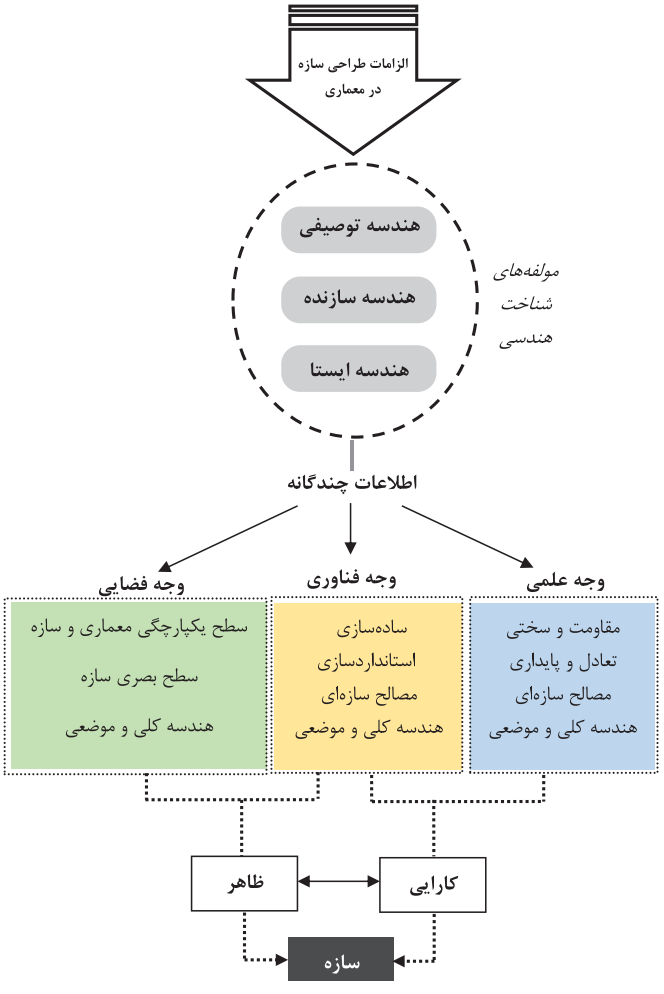
هماهنگی ابعادی که امکان تولید قطعات استاندارد در کارخانه و نصب سریع در سایت را فراهم می‌کند، متکی به دقت طراح و قابلیت نظم‌پذیری هندسه سازه است (امیت، ۹۶: ۱۳۸۶). در این پژوهش، استانداردسازی به عنوان راهبرد اصلی مطرح می‌شود که با اصلاح هندسی فرم، تعداد مدول‌های یکتا را کاهش و تکرارپذیری -به‌ویژه در سامانه‌های خرپای فضاکار و تاشده- را بهبود می‌بخشد. بااین‌حال، تمرکز بیش از حد بر استانداردسازی می‌تواند توانایی خلق فرم‌های آزاد و پیچیده را محدود کند، زیرا این پروژه‌ها به مدول‌های متنوع‌تری نیاز دارند. هرچند ساده‌سازی هندسی اجرا و مونتاژ را تسهیل می‌کند، اما نباید کیفیت ذاتی برخی سامانه‌های استانداردشده -که خود ماهیتی پیچیده و فنی دارند- را تحت‌الشعاع قرار دهد. توجه هم‌زمان به هندسه کلی و موضعی سازه در تدوین راهبردهای ساده‌سازی و استانداردسازی، کلید طراحی سازه‌هایی کارا و قابل اجرا است.

سطح هندسی سازه: تحلیل هم‌نشینی معماری و سازه مستلزم بررسی هندسه در سطوح متنوع -از هندسه فضایی کلی تا هندسه موضعی جزئیات- است. در سطح کلان، هندسه سیستم سازه‌ای که فرم و رفتار باربری را ترسیم می‌کند (مانند سازه‌های قوسی، گنبدی یا قابی)، ابتدا باید مشخص شود و بر اساس نحوه پیکربندی بارها و شرایط تکیه‌گاهی به سه گروه فعال، نیمه‌فعال و غیرفعال تقسیم گردد. در سطح خرد، مقاطع متنوع (خرپایی، مستطیلی یا H شکل) با تناسبات هندسی ویژه بررسی می‌شوند تا پاسخ موضعی اجزا به تنش‌ها آشکار شود. ادغام این دو سطح -کلان و موضعی- چارچوبی جامع برای توضیح فرم و عملکرد سازه ارائه می‌دهد (Macdonald, 2019).

تطبیق هندسه کلی و موضعی سازه نشان می‌دهد که، اولاً، دو سازه با هندسه کلی یکسان اما مصالح متفاوت می‌توانند به‌واسطه فرایندهای تولید متفاوت، هندسه موضعی ناهمسان ارائه کنند. ثانیاً تنوع هندسه موضعی بازتاب‌گر نقشه باربری فرم است؛ به‌طوری که مقاطع خرپایی مثلثی یا مقاطع بهینه‌شده بر مبنای الگوی تنش، کارایی موضعی بالاتری دارند. رابطهٔ میان مقیاس هندسی و ماهیت مصالح نیز کلیدی است: مصالح یک‌کاره (تنها کشش یا تنها فشار) عمدتاً هندسه فعال کلی را شکل می‌دهند، در حالی که مصالح دوکاره (تحمل هم‌زمان

کشش و فشار) بیشتر در جزئیات و سطوح موضعی اثرگذارند. این الگو در هندسه‌های فعال، نیمه‌فعال و غیرفعال تکرار می‌شود و ویژگی‌های مصالح در اتصالات، تناسبات مقطع و فناوری ساخت خود را نشان می‌دهد. از این رو، در سازه‌های نمایان، دقت در انتخاب مصالح و طراحی جزئیات اتصال به عنوان عامل کلیدی در کیفیت ساخت و نمای بصری مطرح است (Sandaker, 2008).

جمع‌بندی نشان می‌دهد که ادغام سه رکن شناخت هندسی –توصیفی، سازنده و ایستا– دو دسته اطلاعات کلیدی را در طراحی سازه آشکار می‌سازد: نخست داده‌هایی که ظاهر نهایی سازه را توجیه کرده و چرایی فرم‌بخشی بصری را بیان می‌کنند، و سپس اطلاعاتی که کارایی سازه در برابر الزامات فیزیکی را تحلیل می‌نماید. برخی از این داده‌ها صرفاً بر یکی از این دو بُعد اثر می‌گذارند و گروهی دیگر هر دو جنبه را با هم تقویت می‌کنند. به‌طور معمول، اطلاعات علمی عمدتاً کارایی و داده‌های فضایی عمدتاً ظاهر را پوشش می‌دهند، در حالی که اطلاعات فناورانه به‌طور هم‌زمان به بهبود هردو مؤلفه می‌پردازد (تصویر ۶). بهره‌گیری از این بینش به مشارکت‌کنندگان امکان داده فرم‌هایی را بیافرینند که هم از دید عملکردی کارآمد و هم از منظر بصری قابل قبول‌اند.



تصویر ۶. بررسی تعامل میان مؤلفه‌های شناخت هندسی سازه، اطلاعات چندگانه‌ای را برای مشارکت سازه در فرایند طراحی معماری پیشنهاد می‌دهد.

DOI: 10.22034/rau.2025.2058972.1191

جدول ۴. تحلیل داده‌های حاصل از روش‌های مختلف گردآوری داده‌ها، از طریق کدگذاری انتخابی، با عنوان «اطلاعات سازه‌ای مبتنی بر شناخت هندسی».

نکات پرتکرار دریافتی و برخی مثال‌های مهم از نتایج تمرین‌های طراحی		شمارهٔ یافته‌های مرتبط	مقوله‌های فرعی و اصلی (کدگذاری انتخابی)	
داده‌های گردآوری شده از طریق آزمون‌های عملی، مشاهده، مصاحبه و منابع تخصصی	سازماندهی مصالح سازه‌ای در ترکیبات سه‌بعدی و مقطع اعضاء با استفاده از فناوری‌های در دسترس	۵	برخی اطلاعات وجه فناوری شامل: ساده‌سازی، استانداردسازی، مصالح سازه، هندسه کلی و موضعی	۱. اطلاعات مرتبط با ظاهر سازه ۲. اطلاعات مرتبط با کارایی سازه
	سازماندهی تیرهای خمیده در امتداد سازه‌های با فرم آزاد یا سازه‌های گسسته	۱، ۳، ۵		
	رابطه هندسی لایه‌های فوقانی و تحتانی در سازه‌های چندلایه	۲، ۵		
	ویژگی‌های انحنای گاوسی (یا انحناهای اصلی) در ساخت و اجرای سازه	۱، ۵، ۱۰		
	تعیین موقعیت خطوط یا چین و شکن‌ها در سازه‌های منحنی یا تاشده	۲، ۵، ۱۰		
	کاربرد عناصر اولیه هندسی (نقطه، خط و سطح) در تولید سطوح سازه	۱، ۲، ۳، ۵، ۱۰		
	استفاده از سطوح گسترش‌پذیر در تولید سازه‌های با فرم آزاد	۱، ۲، ۵		
	تقسیم‌بندی هندسی سازه‌های گسترش‌ناپذیر و پیچیده به قطاع‌های کوچک‌تر با ویژگی نزدیک به سطوح گسترش‌پذیر یا پانل‌های ساده‌تر	۱، ۲، ۵، ۱۰		
	استفاده از سطوح خطدار برای طراحی و تولید سازه‌های گسترش‌پذیر و گسترش‌ناپذیر	۱، ۲، ۵		
	سازماندهی عناصر مختلف سازه بر روی فرم معماری	۲، ۳، ۴، ۹، ۱۲	برخی اطلاعات وجه فضایی شامل: سطح یکپارچگی معماری و سازه، سطح بصری سازه، هندسه کلی و موضعی	
	نسبت هندسه سازه و فرم معماری	۲، ۳، ۴، ۷، ۹، ۱۲		
	نسبت هندسه سازه و نمای بیرونی	۳، ۴، ۷، ۹، ۱۲		
	نسبت هندسه سازه و عملکرد ساختمان	۳، ۴، ۷، ۹		
	تاثیر هندسه سازه بر کیفیات معماری و ویژگی‌های فضای داخلی (برای مثال نورگیری توسط سازه مشبک)	۳، ۴، ۷، ۹		
	نسبت نیرو و جهت‌های انحنای گاوسی (انحناهای اصلی) سطوح	۶، ۸، ۹	برخی اطلاعات وجه علمی شامل: مقاومت و سختی، تعادل و پایداری، مصالح سازه، هندسه کلی و موضعی	
	رفتار سازه‌ای سطوح گسترش‌پذیر و گسترش‌ناپذیر با توجه به ویژگی‌های هندسی آنها (تعداد و جهات انحناهای اصلی)	۶، ۸، ۹		
	نوع مصالح سازه‌ای با توجه به ویژگی‌های هندسی سازه	۲، ۳، ۸، ۹		
	نسبت دهانه و ویژگی‌های هندسی سازه (هندسه گاوسی سازه، خواص هندسی سطوح مانند عمق سازه‌ای و ممان اینرسی)	۶، ۷، ۸، ۹		
	نسبت دهانه و سطوح فرم‌های فعال، نیمه‌فعال و غیرفعال	۴، ۶، ۷، ۸، ۹		
	کاربرد مثلث‌بندی در ساخت سازه‌های مشبک و گسسته (با توجه به ویژگی هندسی مثلث)	۳، ۸، ۹		
	نسبت نیرو و پیکربندی عناصر باربر در سیستم‌های سازه‌ای	۲، ۳، ۹، ۱۱، ۱۲		

۷. نتیجه‌گیری

روش‌شناسی این پژوهش بر پایه یک رویکرد کیفی و با روش اقدام‌پژوهی طراحی شده تا نقش مؤلفه‌های شناخت هندسی در فرایند طراحی سازه‌های معماری را واکاوی کند. داده‌ها از طریق کارگاه‌های آموزشی و تمرین‌های عملی گردآوری شد که شرکت‌کنندگان را مستقیماً با مفاهیم هندسی مواجه

ساخت. تعامل مستمر با دانشجویان و فارغ‌التحصیلان معماری ضمن غنا بخشیدن به داده‌ها، فهم عمیق‌تری از چالش‌ها و فرصت‌های طراحی فراهم آورد. این ساختار پژوهشی، علاوه‌بر تأمین مشاهدات کیفی واقعی، زمینه‌ای برای تحلیل چگونگی تأثیر شناخت هندسی بر طراحی سازه مهیا کرد. در مرحله نهایی، بررسی گفت‌وگوها و بازخوردها امکان شناسایی الگوهای کلیدی در فرایند طراحی را فراهم ساخت.

نتایج کدگذاری داده‌ها در سطوح باز، محوری و انتخابی نشان داد شرکت‌کنندگان از سه رکن شناخت هندسی -توصیفی، سازنده و ایستا- در یک مدل مفهومی ادغام‌شده بهره گرفتند تا اطلاعات فضایی، علمی و فناورانه را به‌طور هم‌زمان و یکپارچه استخراج کنند. این پژوهش برای اولین‌بار نشان می‌دهد که اجتماع این مؤلفه‌ها در مرحله طراحی مفهومی، امکان استخراج موازی الگوهای باربری (وجه علمی)، راهکارهای ساده‌سازی و استانداردسازی (وجه فناورانه) و کیفیت بصری و یکپارچگی فرم و سازه (وجه فضایی) را فراهم می‌آورد. در حالی که مطالعات پیشین هر یک از این ابعاد را جداگانه واکاوی کرده بودند، سازوکار عملی استخراج هم‌زمان این سه گروه داده در ادبیات معماری و سازه تاکنون ارائه نشده بود.

شناخت این پیوند و تعاملات، یک چارچوب سه‌سطحی برای استخراج اطلاعات سازه‌ای ارائه می‌دهد که حاوی مجموعه‌ای از خصوصیات ظاهری و کارایی است. این چارچوب بصورت هم‌زمان قادر است:

ـ در بُعد فضایی، نسبت میان نمایش بصری سازه و یکپارچگی هندسی معماری و سازه را معین کند و سطوح مختلف پیوند میان فرم معماری و فرم سازه را از منظر تلفیق، همسازی و تضاد تبیین نماید؛

ـ در بُعد علمی، الزامات تعادل، پایداری، مقاومت و سختی را از طریق تحلیل هندسی فرم‌های کلی و موضعی بررسی کند و نشان دهد چگونه تغییرات هندسی می‌تواند قابلیت باربری و استحکام را بررسی کند؛

ـ در بُعد فناورانه، امکان استانداردسازی و ساده‌سازی تولید اجزا را فراهم آورد و راهکارهایی برای تطبیق هندسه با مقررات تولید صنعتی و محدودیت‌های اجرایی ارائه دهد.

یکپارچه‌سازی این سه دسته اطلاعات در مرحله طراحی مفهومی، امکان تصمیم‌گیری آگاهانه نسبت به معماری و سازه را، پیش از ورود به محاسبات دقیق مهندسی، برای معماران و دانشجویان فراهم می‌آورد. بدین ترتیب، مطالعه حاضر نه‌تنها پیوند نظری میان شناخت هندسی و تحلیل سازه‌ای را مستحکم می‌کند، بلکه ابزاری کاربردی برای پیش‌برد طراحی خلاقانه و کارآمد در معماری معاصر ارائه می‌دهد.

در مسیر پژوهش‌های آتی، موضوعات زیر پیشنهاد می‌شود:

ـ گسترش چارچوب به سیستم‌های سازه‌ای خاص مانند سازه‌های غشایی، کابلی یا پوسته‌ای پیچیده.

ـ توسعه و به‌کارگیری الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای خودکارسازی استخراج اطلاعات هندسی-سازه‌ای در نرم‌افزارهای طراحی معماری و مدل‌سازی پارامتریک.

ـ مطالعه تأثیر کارگاه‌های آموزشی واقعیت مجازی و افزوده بر فهم مفاهیم هندسه و سازه در یادگیری طراحی معماری، با تمرکز بر تجربه عملی.

ـ طراحی آزمون‌های کمی برای سنجش تأثیر تلفیق هندسه و سازه بر خلاقیت، کارایی و کیفیت پروژه‌های آموزشی و حرفه‌ای طراحی معماری.

فهرست منابع

احمدنژاد کریمی، مجید؛ محمودی کامل‌آباد، مهدی؛ عظیمی، مریم (۱۳۹۷)، وجوه و حدود دانش سازه در فرایند طراحی معماری، صفه، ۲۸ (۲)، ۱۹-۳۲.

احمدنژاد کریمی، مجید؛ محمودی کامل‌آباد، مهدی؛ عظیمی، مریم (۱۴۰۲)، ارزیابی تأثیر به‌کارگیری شناخت هندسی سازه در طراحی معماری: نمونهٔ موردی: دانشجویان رشتهٔ معماری، *صفه*، ۳۳ (۲)، ۴۹-۶۶.

امیت، استیون (۱۳۸۶)، *تکنولوژی معماری*، ترجمهٔ افشین درکی، تهران: نشر پلک.

محمودی کامل‌آباد، مهدی (۱۳۹۱)، دانش ضمنی سازه در فرایند طراحی، *رسالهٔ دکتری تخصصی معماری*، دانشگاه شهید بهشتی تهران.

Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D., & Williams, C. (2014). *Shell structures for architecture: Form finding and optimization*. New York: Routledge.

Akbari, M., Mirabolghasemi, A., Akbarzadeh, H., & Akbarzadeh, M. (2020). Geometry-based structural form-finding to design architected cellular solids. In *SCF '20, November 5–6, 2020, Virtual Event, USA*.

Alberti, L. B. (1988). *On the art of building in ten books* (J. Rykwert, N. Leach, & R. Tavernor, Trans.). MIT Press. (Original work

DOI: 10.22034/rau.2025.2058972.1191

published ca. 1452)

Beghini, A., Galassi, V., Mingardo, P., & Zanini, M. A. (2014). High-rise architecture: structural and aesthetic integration. *Journal of Architectural Engineering*, 20 (4), 719–727.

Ceccato, C., Hesselgren, L., Pauly, M., Pottmann, H., & Wallner, J. (Eds.). (2010). *Advances in architectural geometry*. Springer.

Chandrasekaran, S., Kumar, S., & Madhuri, S. (2021). *Recent Advances in Structural Engineering*. Springer.

Collins, K. M. T., Onwuegbuzie, A. J., & Jiao, Q. G. (2007). A mixed methods investigation of mixed methods sampling designs in social and health science research. *Journal of Mixed Methods Research, 1* (3), 267-294.

Denzin, N., & Lincoln, Y. S. (2003). Introduction: The discipline and practice of qualitative research. In N. K. Denzin & Y. S. Lincoln (Eds.), *Strategies of qualitative inquiry* (pp. 1–45). Thousand Oaks, CA: SAGE.

Dörfler, K., Knippers, J., Menges, A., Parascho, S., Pottmann, H., & Wortmann, T. (2023). *Advances in Architectural Geometry 2023*. Berlin, Boston: De Gruyter. https://doi.org/10.1515/9783111162683

Gharib, F., & Bonet, J. (2020). Advanced strategies in structural optimization: Seismic design, materials, and innovations. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 135, 253–270.

Hadian, A. S. (2020). Structural Thinking in Architecture: Technical Stimulation for Architects. *The International Journal of Architectonic, Spatial, and Environmental Design*, 14 (4), 31–41.

Jiang, C., Mundilova, K., Rist, F., Wallner, J., & Pottmann, H. (2019). Curve-pleated structures. *ACM Transactions on Graphics, 38*, 13 pages.

Katona, V. (2020). Geometry and architecture: Parametricism, morphology, design methodology. *Symmetry: Culture and Science*, 31 (3), 229–246.

Konstantatou, M., Mcrobie, F. A., & D'Acunto, P. (2020). Unified geometrical framework for the plastic design of reinforced concrete structures. *Structural Concrete Journal*.

Leach, N. (2009). Digital morphogenesis. *Architectural Design*, 79 (5), 14–21. https://doi.org/10.1002/ad.1040

Macdonald, A. J. (2019). *Structure and architecture* (3rd ed.). New York: Routledge Press.

Mainstone, J. R. (2001). *Form structural in developments*. Oxford: Architectural Press.

Marschner, Z., Sellán, S., Liu, H.-T. D., & Jacobson, A. (2023). Constructive Solid Geometry on Neural Signed Distance Fields. *Proceedings of SIGGRAPH Asia 2023*.

Migliari, R. (2012). Descriptive geometry: From its past to its future. *Nexus Network Journal, 14* (3).

Millais, M. (2005). *Building structures: From concepts to design*. Taylor & Francis Press.

Mosseri, A. (2004). Structural design in nature and in architecture. In M. W. Collins & C. A. Brebbia (Eds.), *Design and nature: Comparing design in nature with science and engineering* (pp. 589-599). WIT Press.

Motro, R. (Ed.). (1992). *First International Conference on Structural Morphology: Abstracts*. Montpellier, France.

Moruzzi, C. (2020). Measuring creativity: An account of natural and artificial creativity. *European Journal for Philosophy of Science*, 11 (1). https://doi.org/10.1007/s13194-020-00313-w

Pellis, D., Kilian, M., Dellinger, F., Wallner, J., & Pottmann, H. (2019). Visual smoothness of polyhedral surfaces. *ACM Transactions on Graphics, 38* (4), Article 11 pages.

Pellis, D., Kilian, M., Wang, H., Jiang, C., Müller, C., & Pottmann, H. (2021). Advances in Architectural Geometry. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 135.

Pottmann, H., Kilian, A., & Hofer, M. (Eds.). (2008). *Advances in architectural geometry: Proceedings of the conference, Vienna, 13-16 September 2008*. Vienna University of Technology.

Pottmann, H. (2013). Architectural geometry and fabrication-aware design. *Nexus Network Journal, 15* (2), 195–208.

Pratt, M. J. (2003). Procedural modelling, generative geometry, and the international standard ISO 10303 (STEP). In *Mathematics of surfaces: 10th IMA international conference, Leeds, UK, September 15-17, 2003, proceedings* (pp. 320-337). Berlin Heidelberg: Springer.

Sandaker, B. N. (2008). *On span and space: Exploring structures in architecture*. Routledge.

Shea, K., Aish, R., & Gourtovaia, M. (2005). Towards integrated performance-driven generative design tools. *Automation in Construction*, 14 (2), 253–264. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.09.005

Shelden, D. R. (2002). Digital surface representation and the constructibility of Gehry's architecture (PhD thesis). Massachusetts Institute of Technology.

Stringer, E. E. T. (2007). *Action research* (3rd ed.). Thousand Oaks, CA: SAGE.

Torbert, W. R. (1991). *The power of balance: Transforming self, society, and scientific inquiry*. Sage, Newbury Park, CA.

Tovar, E., & Flager, F. (2021). *Visual programming workflows for early-stage structural design exploration*. Automation in Construction, 125, 103594. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103594