ISSN: 2538-2594; Naqshejahan - Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning. 2021;11(4):96-116

Enhancing Structural Capabilities of Rotationally Symmetrical Synclastic Shells in Architecture Inspired by Geometric Features of Bird Eggshells

ARTICLE INFO

Article Type
Analytic Study

Authors

Ehsan Gholamzadeh
MohammadReza Matini *
Seyed Yahya Islami
GholamReza Talischi

How to cite this article

Gholamzadeh E, Matini M, Islami Y, Talischi G. Enhancing Structural Capabilities of Rotationally Symmetrical Synclastic Shells in Architecture Inspired by Geometric Features of Bird Eggshells. *Naqshejahan*. 2022 Jan 10; 11(4)96-116.

https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1400.11.4.6.5

1. PhD Candidate of Architecture, Department of Architecture, Borujerd Branch, Islamic Azad University, Borujerd, Iran.
2. Assistant Professor of Faculty of Architecture and Urban Planning, University of Art, Tehran, Iran.
3. Assistant Professor of School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran.
4. Assistant Professor of Faculty of Art and Architecture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

**Correspondence*

Address: Assistant Professor of Faculty of Architecture and Urban Planning, University of Art, Tehran, Iran.

Email: m.matini@art.ac.ir
Phone: +98 919 471 1138

Article History
Received: 10 Nov 2021
Accepted: 21 Dec 2021
ePublished: 10 Jan 2022

ABSTRACT

Aims: The study of natural shells has long been considered by architects. This research focuses on investigation and recognition of "Rotationally Symmetrical Synclastic" shells (RSS shells). It aims to promote and introduce the structural capabilities of RSS shells in architecture in order to promote the use of the bird eggshell pattern in nature.

Materials & Methods: The research method is mixture of the descriptive-analytical and the comparative methodology; with the use of the primary sources, MATLAB analytical software, and parametric analysis of the optimality of bird eggshell surfaces as examples of natural RSS shells. The research method is set to introduce how to use the optimal and functional capabilities of these surfaces in architecture.

Findings: First, an introduction of RSS shells and their morphology is presented with an emphasis on bird eggshells. Next, the issue of bird eggshell optimality and the usability of optimal forms and structures of these shells in architecture is discussed. Finally, after interpreting and analyzing the data, a parametric analysis of the optimality of eggshell surfaces was carried out, which informed the use of similar RSS shells in architecture.

Conclusion: By using digital analysis tools in parametric modeling of bird eggshells, more optimal RSS shells can be achieved in contemporary architecture. Shells with minimal materials and the ability to run faster and easier than other shells, which can be suitable coverings for large spans.

Keywords: Optimality, Rotationally Synclastic Shells, Eggshells, Nature, Architecture

CITATIONLINKS

[1] Falahat, M., Shahidi, S. Nature and Its Role in Architectural Design. *Honar-Ha-Ye-Ziba: Memary Va Shahrsazi*, 2010 Jul 14; 2(42): 37-46. [2] Feizabadi, M. Bemanian, M. Golabchi, M. Mirhosseini, S. M. Methods of Utilizing Natural Organisms in Technological Architecture. Middle-East Journal of Scientific Research, 2013 Mar; 13 (3): 379-389. [3] Medi, H. Imani, M. Biomimic Technology and Nature Inspiration. *Naqshejahan- Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 2018 Jul 16;8(1):47-55. [4] Matini, M. Kakoei, E. Compliant Mechanisms; an Approach Leading to Reduce Functional Deficiencies of Kinetic Skins. Honar-Ha-Ye-Ziba: Memary-Va-Shahrsazi, 2019 Jun 22; 24 (2): 39-48. [5] Ghiabaklou, Z. Biomimetic Auditorium Design Inspired by Seashells. *Honar-Ha-Ye-Ziba: Memary Va Shahrsazi*, 2013 Mar 3; 18(3): 17-24. [6] Moore, F. Understanding Structures. United States: McGraw-Hill Education - Europe.1998; 6-198. [7] Golabchi, Mahmoud and Amiri, Mojtaba, Structural Elements for Architects, Tehran: University of Tehran Press. 2016; 423-544. [8] Melaragno, M. An Introduction to Shell Structures: The Art and Science of Vaulting. New York, Van Nostrand Reinhold. 1991 Nov 30; 120-121. [9] Adaptive Wooden Architecture. Designing a Wood Composite with Shape-Memory Behavior. [10] Design and Analisis of Shell Structures (Solid Mechanics and Its Applications(16) [11] The Mathematics of Egg Shape. [12] Oregon: The Museum of Natural and Cultural History. [13] Building with Earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture. [14] The History and Evolution of the Dome in Persia. [15] Iran's Gifts to the World of Dome Architecture. [16] The Study of Theoretical Geometry of Domes and Arches in Iranian Architecture, First Conference on Technology and Traditional Structures Based on Domes, Tehran. [17] Persian Art: Parthian and Sassanian Dynasties. [18] Space Grid Structures. [19] Space Frame Structures, Structural Engineering Handbook, Ed. Chen Wai-Fah, CRC Press LLC. [20] Esthétique des proportions dans la nature et dans les arts. [21] Mathematical interpretation of artificial ovoids and avian egg shapes (part I). [22] mvz.berkeley.edu [Internet]. Berkeley: Museum of Vertebrate Zoology; 2020 [Cited 2021 May 3]. [23] Avian egg shape: Form, function and evolution. Science. [24] vis.sciencemag.org [Internet]. Washington DC.: Sciencemag. 2017 [Cited 2021 May 25]. [25] Ecological drivers of global gradients in avian dispersal inferred from wing morphology. [26] Fu, F. Advanced modelling techniques in structural design: John Wiley & Sons. 2015; 11-153. [27] Hass, J.R. & Heil, C.D. & Weir,M.D. Thomas' Calculus.14th Edition, Pearson. 2017; 737. [28] nationalgeographic.com [Internet]. Washington DC.: National Geographic. 2017 [Cited 2021 July 27].[29] archisearch.gr [Internet]. Berlin: archisearch. 2021 [Cited 2021 Aug 26]. [30] galinsky.com [Internet]. Florida: galinsky. 2003 [Cited 2021 Aug 26]. [31] atlasofplaces.com [Internet]. Geneva: Atlas of Places. 2018 [Cited 2021 Aug 29].

Copyright© 2021, TMU Press. This open-access article 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 Attribution-NonCommercial terms.

ارتقاء قابلیت ساختاری پوسته های سین کلاستیک متقارن دورانی در معماری با الهام از ویژگی های *هندسی* پوسته تخم پرنده

احسان غلامزاده[1*]، محمد رضا متینی[2]، سید یحیی اسلامی[3]، غلامرضا طلیسچی[4]**

۱- دانشجوی دکتری معماری، گروه معماری، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران.

۲- استادیارگروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، تهران، ایران. (نویسنده مسئول)

۳- استادیار دانشکده معماری، پردیس هنر های زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۴- استادیارگروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

چکیده

اهداف: مطالعه بر روی پوسته های طبیعی، از دیرباز مورد توجه معماران قرار گرفته است. پژوهش حاضر بر روی پوسته های «سین کلاستیک متقارن دورانی»، با نام پوسته های آر.اس.اس متمرکز شده که به اختصار پوسته های «سین کلاستیک دورانی» نامیده شده است. این پژوهش به ارتقاء قابلیت های ساختاری این پوسته ها در معماری با استفاده از الگوی پوسته تخم پرنده در طبیعت پرداخته است.

ابزار و روش ها: روش تحقیق این پژوهش توصیفی-تحلیلی و تطبیقی است و از منابع اولیه این حوزه و نرم افزار تحلیلی متلب استفاده نموده تا از طریق تحلیل سطوح تخم پرنده به عنوان یک پوسته سین کلاستیک دورانی طبیعی، به چگونگی افزایش ظرفیت های ساختاری این سطوح در معماری بپردازد.

یافته ها: ابتدا معرفی پوسته های سین کلاستیک دورانی و گونه شناسی فرمی آن ها با تمرکز بر پوسته تخم پرندگان صورت گرفته است. در ادامه به مساله بهینگی پوسته تخم پرندگان و الگو پذیری بهینه فرمی و ساختاری این پوسته ها در معماری پرداخته شده است. در نهایت با تفسیر و تحلیل داده ها، به تحلیل پارامترهای بهینگی سطوح پوسته های تخم مرغی پرداخته و از نتایج آن در سطوح سین کلاستیک دورانی معماری بهره گیری شده است.

نتیجه‌گیری: با بهره گیری از ابزارهای تحلیل دیجیتال در مدل سازی پارامتریک پوسته تخم پرندگان، می توان به پوسته های بهینه تر سین کلاستیک دورانی در معماری معاصر دست یافت. پوسته هایی با حداقل مصالح و قابلیت اجرای سریعتر و آسانتر نسبت به پوسته های دیگر برای پوشش فضایی مناسب دهانه های بزرگ.

کلمات کلیدی: بهینگی، پوسته های سین کلاستیک دورانی، پوسته تخم پرندگان، طبیعت، معماری

مقدمه

شاید بتوان طبیعت را بهترین الگوی انسان در تمام تاریخ معماری دانست. در عین اینکه بشر هرگز نتوانسته است گوشه ای از طبیعت را همان طور که هست به تصویر بکشد، الگوهایی از آن برگرفته که هیچ تخیل نیرومند بشری قادر به خلق چنین الگوهایی نبوده است. ارتباط بین معماری و طبیعت، سؤالات، امکانات و راه حل های زیادی را پیش روی انسان قرار داده است. در معماری معاصر معمارانی چون: «آنتونی گائودی»، «لوئیس سالیوان»، «فرانک لوید رایت»، «آلوار آلتو»، «یورن اُتزن»، «تادو آندو»، «فرای اُتو»، «سانتیاگو کالاتراوا» همواره از طبیعت الهام گرفته اند. این پژوهش در امتداد کار معمارانی است که به مساله الگوبرداری از پوسته ها در طبیعت پرداخته اند. در پیشینه این پژوهش، می توان به جنبه های الهام از طبیعت در معماری و نیز اهمیت پوسته ها در طبیعت و معماری اشاره نمود. فلاحت و شهیدی به تحولات مفهوم طبیعت و نقش آن در شکل گیری فضای معماری اشاره دارند.[1] فیض آبادی، بمانیان، گلابچی و میرحسینی به روش های بهره گیری از ساختار های موجودات طبیعی در معماری تکنولوژیکی پرداخته اند و الهام از ساختارهای طبیعی پوسته ای در آثار معماری مورد بررسی و نقد قرارگرفته است.[2] مدی و ایمانی به فناوری بایومیمتیک و الهام از طبیعت پرداخته اند؛ عملکرد گرایی از مشخصات بارز بایومیمتیک در این پژوهش معرفی شده است و الهام فرمی و عملکردی از پوسته های طبیعی در آثار کالاتراوا مورد بررسی قرار گرفته است.[3] تقی زاده، متینی و کاکوئی نیز در پژوهش خود، به ساختار پوسته های ساختمانی در مواجهه با مکانیزم حرکتی اشاره داشته اند.[4] قیابکلو ارائه مدلی کاربردی از بیونیک در معماری را نشان داده و به طراحی پارامتریک بر اساس پوسته صدف ها پرداخته است.[5] بنابراین همان طور که اشاره گردید، مطالعه بر روی پوسته های طبیعی، جزو یکی از حوزه های مختلفی است که از دیرباز مورد توجه معماران قرار گفته است. امروزه به منظور رسیدن به بهینگی حداکثری فرمی و ساختاری پوسته ها در معماری، ضرورت انجام چنین پژوهش هایی بسیار حائز اهمیت است. پوسته، سازه ای نازک

با سطوحی اغلب منحنی می باشد که بارها را فقط بوسیله کشش، فشار و برش به تکیه گاه ها منتقل می نمایند. پوسته ها درسازه ها و پوشش های بیرونی ساختمان ها، در جایی که بار وارده گسترده یکنواخت است، بسیار کارآمد هستند. از طرفی به علت اینکه پوسته ها اغلب بسیار نازک می باشند، مقاومت خمشی ناچیزی دارند و برای تحمل بارهای متمرکز مناسب نمی باشند. [6] مقاومت پوسته‌ها نیز ناشی از فرم آن‌هاست و نه جرمشان. پوسته‌ها در بکارگیری مصالح بسیار بهینه هستند، زیرا آن‌ها در برابر بارها بیشتر از این‌که با رفتار خمشی مقاومت کنند، به وسیله شکلشان مقاومت می‌کنند.[7] پوسته ها در طبیعت بسیار فراوانند و به فرم های مختلف دیده می شوند. در این پژوهش از میان تمامی فرم های مختلف پوسته، بر روی پوسته های «سین کلاستیک متقارن دورانی» تمرکز شده و به اختصار پوسته های «سین کلاستیک دورانی» نامیده شده است؛ پوسته تخم پرندگان به دلیل تنوع و فراوانی آن در طبیعت، به عنوان نمونه موردی در نظر گرفته شده است. اولین ضرورت انجام این پژوهش مساله الگوبرداری از پوسته های سین کلاستیک دورانی در طبیعت می باشد، زیرا طبیعت در طی سالیان سال به الگوهایی بسیار متنوع رسیده است و خداوند قادر و متعال الگوهایی را تولید کرده است که خیلی پیشرفته تر ومتنوع تر از آن چیزی است که انسان دارد. دومین ضرورت، مساله ضرورت بهره گیری از فناوری های نوین در جهت بهینه سازی سطوح پوسته های سین کلاستیک دورانی در معماری می باشد؛ از آنجا که طبیعت همه چیز را بهینه می کند، در دنیای امروز در معماری زیست الگو این ضرورت کاملاً احساس می شود، از اینرو نقش فناوری در ایجاد فرم ها و سطوح بهینه در راستای دستیابی به مدولاسیون در طراحی و افزایش کیفیت و سرعت اجرای بالا، دغدغه دیگر این پژوهش می باشد. از طرفی با توجه به پیشینه معماری ایران در زمینه سازه های طاقی و گنبدی، ضرورت توسعه پوسته های سین کلاستیک دورانی با بهره گیری از تحلیل بهینگی سطوح و فناوری های نوین در معماری بیش از پیش احساس می شود.

اهداف این پژوهش، شامل موارد زیر می باشد:

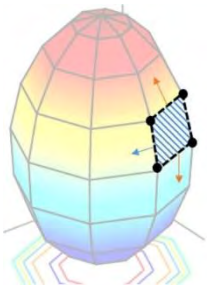
- ارتباط بیشتر با طبیعت از طریق مطالعه پوسته های سین کلاستیک دورانی طبیعی نظیر پوسته تخم پرندگان در جهت دستیابی به بهینگی بیشتر سطوح پوسته های سین کلاستیک دورانی در معماری.
- شناخت دقیق بهینگی پوسته تخم پرندگان و الگوهای قابل استفاده در معماری.
- الگوبرداری صحیح از تحلیل پارامتری بهینگی سطح پوسته تخم مرغ و ساخت پوسته های سین کلاستیک دورانی بهینه تر در معماری.

در این راستا، ابتدا به معرفی چهار چوب نظری پژوهش پرداخته شده است که شامل: معرفی پوسته های سین کلاستیک دورانی در طبیعت و معماری، گونه شناسی فرمی پوسته های سین کلاستیک دورانی و پوسته تخم پرندگان با معرفی نمونه هایی از این پوسته ها در طبیعت و معماری، مساله بهینگی پوسته تخم پرندگان و الگو پذیری پوسته های سین کلاستیک دورانی در معماری می باشند. در نهایت به تفسیر و تحلیل داده ها پرداخته می شود که شامل تحلیل پارامتریک میزان بهینگی سطح پوسته تخم مرغی و در نهایت به ارائه راهکار های مناسب جهت دستیابی به پوسته های سین کلاستیک دورانی بهینه از طریق معرفی نمونه ها در معماری منجر خواهد شد.

مواد و روش‌ها

روش تحقیق این پژوهش توصیفی-تحلیلی و تطبیقی است و از منابع اولیه این حوزه و نرم افزار تحلیلی متلب استفاده نموده تا از طریق تحلیل پارامتری بهینگی سطوح تخم پرنده به عنوان یک پوسته سین کلاستیک دورانی در طبیعت، به چگونگی استفاده از ظرفیت های کاربردی بهینه این سطوح در معماری بپردازد. در این راستا ابتدا به مدل سازی پارامتری پوسته تخم مرغ پرداخته شده است، سپس جهت دستیابی به بهینگی سطوح، تحلیل میزان بهینگی سطح و حجم پوسته تخم مرغ در ۴ نمونه هم رده صورت گرفته است. در ادامه با استفاده از

تغییر پارامتری مولد های ساختاری محیطی پوسته تخم مرغی شکل، جهت محاسبه میزان سطح بهینه استفاده شده است. در اینجا با تغییر مولد های محیطی پوسته تخم مرغی شکل می توان به ساختارهای مختلف پوسته های سین کلاستیک دورانی هم تراز دست یافت. لازم به ذکر است جهت محاسبه سطح بهینه و همچنین حجم اشغال‌شده سطح تخم مرغی شکل، بایستی از انتگرال‌گیری دو و سه‌گانه جهت محاسبه سطح بهینه و حجم اشغال شده استفاده نمود. بدین منظور المان سطح به صورت شکل ۱ تعریف می‌شود. در این المان یک چهارضلعی مشاهده می‌شود که می‌توان آن را به صورت یک ذوزنقه در نظر گرفت. با داشتن مختصات نقاط این ذوزنقه می‌توان در ابتدا مقادیر اضلاع آن و سپس ارتفاع آن را محاسبه نمود که در نهایت منجر به محاسبه المان سطح بهینه می‌شود. مجموع المان‌های سطح در هر قاچ می‌تواند یک المان محیطی را به دست آورد و سپس با ضرب تعداد المان‌های محیطی در تعداد آن می‌توان سطح بهینه را به دست آورد. بدین منظور باید هم‌زمان از انتگرال دوگانه به صورت عددی یک‌بار در جهت تتا و بار دیگر در جهت فی استفاده نمود. فلش‌های نشان داده شده در شکل ۱ جهات اسکن سطح بهینه جهت محاسبه انتگرال را نشان می‌دهد. به منظور محاسبه حجم اشغال شده توسط سطح طراحی شده باید هر المان سطحی در ارتفاع آن ضرب شده و سپس با استفاده از رابطه محاسبه حجم یک هرم، مقدار حجم المان حساب شود. سپس این المان حجم باید در دو راستای تتا و فی که به صورت زوایای عمودی و افقی هستند اسکن شود. مجموع تمامی المان‌های حجم در نهایت حجم اشغال شده را حاصل می‌کند.



شکل ۱ : المان سطح جهت محاسبه سطح بهینه

معرفی پوسته های سین کلاستیک دورانی در طبیعت و معماری

پوسته ها در طبیعت از متنوع ترین فرم هایی هستند که در دنیای فیزیکی اطراف ما یافت می شوند؛ نظیر تخم پرندگان، صدف های دریایی، پوسته نرم‌تنان، لاک پشت ها، جمجمه انسان، دانه گیاهان و لانه هایی که پرندگان خاص به طور کاملاً غریزی می سازند. [8]پوسته ها را می توان بر مبنای هندسه و شکل شان تقسیم بندی کرد. پوسته ها در حالت کلی به دو نوع دارای انحناء و دارای تا شدگی تقسیم می شوند. در بررسی گونه شناسی پوسته ها بر اساس انحناء در جهات مختلف با توجه به مقادیر تعیین شده حالات متفاوتی متصور می گردد و شامل: الف- پوسته‌های قابل توسعه، ب- پوسته‌های سین کلاسیک، ج- پوسته‌های آنتی کلاسیک، د- پوسته‌های فرم آزاد.[9] پوسته‌های سین کلاسیک و یا به عبارتی پوسته های همگون انحنایی در طبقه بندی انواع پوسته ها جزو زیر مجموعه سطوح منحنی منظم غیر قابل توسعه قرار دارند، به طوریکه دارای دو انحناء می باشند و جهت‌های انحنایی آنها یکسان است. [10] (پوسته های سین کلاستیک خود دارای تنوع بی شماری هستند، با در نظرگرفتن حالت خاصی از آنها که به صورت متقارن دورانی می باشند، پوسته های سین کلاستیک دورانی پدید می آیند که از دیرباز تا کنون مورد توجه ویژه معماران بوده است.

برای شناخت بهتر اصول فرمی پوسته های سین کلاستیک دورانی در طبیعت و معماری، ابتدا به بررسی اصول فرمی پوسته های سین کلاستیک می پردازیم. در بررسی رویکرد ساخته شدن فرم های سین کلاستیک در طبیعت، با سه رویکرد الف-اتفاقی، ب-مبتنی بر هندسه نااقلیدسی و ج-تلفیقی مواجه می شویم. در صورتی که رویکرد ساخته شدن اتفاقی باشد به طبع آن ساختار شکلی نامشخص و ناپایدار خواهد بود. رویکرد مبتنی بر هندسه نااقلیدسی خود به دو دسته پوسته های سین کلاستیک دارای هندسه بیضوی/ کروی الف- متقارن و منظم و ب- نامتقارن تقسیم می شوند. ساختار شکلی پوسته های دسته اول که متقارن و نظم می باشند شامل پوسته

های سین کلاستیک: ۱- متقارن دورانی ۲- متقارن انتقالی ۳- متقارن انعکاسی ۴- متقارن دورانی- انعکاسی ۵- متقارن مقیاسی و فرکتال می باشد و ساختار شکلی دسته دوم که پوسته های سین کلاستیک نامتقارن می باشد به گونه ایست که فقط دارای تناسب و قواعد هندسی است. رویکرد سوم ساخته شدن فرم های سین کلاستیک به صورت تلفیقی می باشد و وحدت در ساختار و کلیت، ساختار شکلی آن را پدید می آورد. در این پژوهش از میان تمام حالات مختلفی که برای پوسته های سین کلاستیک ذکر شد، تمرکز بر روی پوسته های سین کلاستیک دورانی در طبیعت و معماری صورت گرفته است؛ در جدول ۱ به معرفی نمونه هایی از ساختار های هندسی این پوسته ها در طبیعت و معماری پرداخته شده است که شامل: ۱-ساختار هندسی کروی ۲- ساختار هندسی بیضوی دورانی (شبه کروی) ۳- ساختار هندسی سهموی دورانی می باشند.

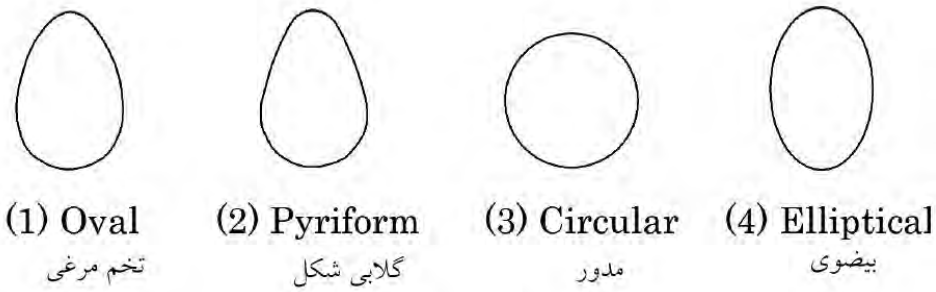
پوسته های سین کلاستیک دورانی در طبیعت و معماری

ساختار هندسی	طبیعت		معماری	توضیحات
کروی Spherical				ساختمان کلوبن - ۱۹۸۹ م. استکهلم- سوئد نمونه طبیعت: مروارید
بیضوی دورانی (شبه کره) Ellipsoid of Revolution(Spheroid)				مرکز ملی هنرهای نمایشی - ۲۰۰۷ م. پکن- چین نمونه طبیعت: تخم پرنده
سهموی دورانی Paraboloids of Revolution				مسجد بی بی خانم . قرن ۸ ه.ق سمرقند- ازبکستان نمونه طبیعت: بلوط

جدول ۱ : نمونه هایی از پوسته های سین کلاستیک دورانی در طبیعت و معماری

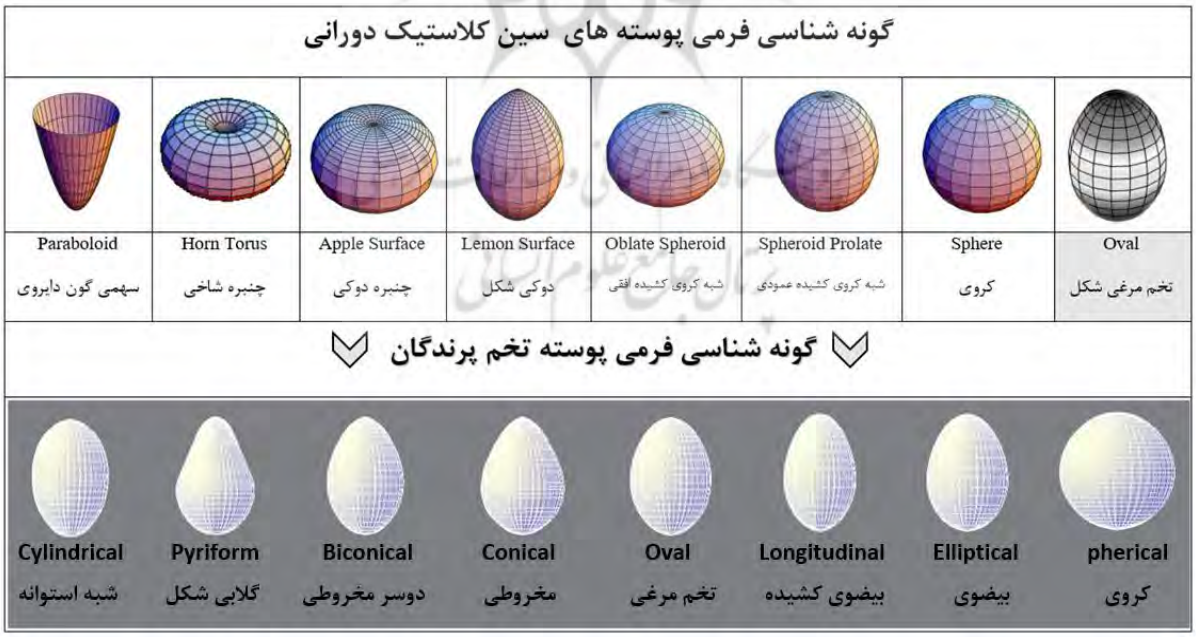
گونه شناسی فرمی پوسته های سین کلاستیک دورانی و پوسته تخم پرندگان

همانطور که پوسته ها در طبیعت از متنوع ترین فرم هایی هستند که در دنیای فیزیکی اطراف ما یافت می شوند، پوسته های سین کلاستیک دورانی نیز دارای تنوع بسیار بالایی می باشند به طوری که به طور فراوان در طبیعت دیده می شوند، نظیر: تخم پرندگان، دانه گیاهان و نیز بسیاری از میوه ها و ساختار های طبیعی که فرم کلی پوسته آنها به صورت سین کلاستیک دورانی می باشند. اگر فرم کلی پوسته تخم پرندگان، به عنوان جزئی از یک مجموعه پوسته های سین کلاستیک دورانی در طبیعت در نظر گرفته شود، می توان آنها را در مقایسه با یکدیگر ارزیابی کرد. به منظور توصیف تخم در گونه های مختلف پرندگان و طبقه بندی آنها در طول تاریخ، دسته بندی های مختلفی توسط محققین صورت گرفته است. با توجه به شکل پایه تخم پرندگان، در دسته بندی نیشیاما، آنها را می توان در ۴ گروه طبقه بندی کرد: ۱-دایره ای، ۲-بیضوی، ۳-تخم مرغی شکل و ۴-گلابی شکل.[11] (شکل۲) در هر دسته از اشکال مذکور، تعداد بسیاری از گونه های مختلف تخم پرندگان را در اندازه های مختلف می توان قرار داد.



شکل ۲ : انواع اشکال مختلف پوسته تخم پرندگان [11]

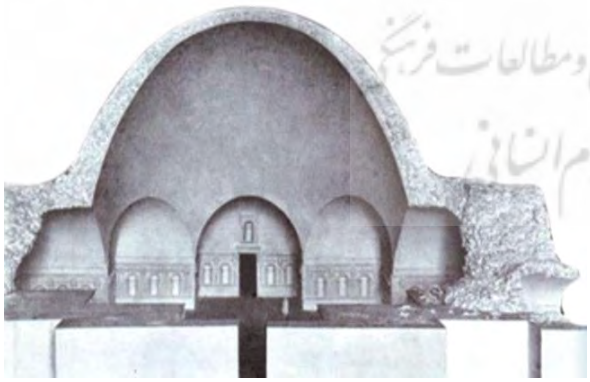
خوشبختانه بسیاری از مجموعه های تخم پرندگان در موزه های تاریخ طبیعی در سراسر جهان نگهداری می شوند. یکی از این مجموعه ها، هسته مجموعه های پرنده شناسی «موزه تاریخ طبیعی و فرهنگی» با تلاش های دکتر آلبرت جی پریل ایجاد شد. پریل تخم پرندگان را از سراسر جهان جمع آوری کرد و نمونه ها از طریق مبادله با جمع آوری کنندگان دیگر و با تلاش جامعه محلی اضافه شدند. پریل بخش عمده ای از مجموعه خود را در سال ۱۹۴۵ به موزه تاریخ طبیعی و فرهنگی دانشگاه اورگن در آمریکا واگذار کرد که همه آنها به طور دقیق مستندسازی شده و برای مطالعه و لذت بردن نسل های آینده نگهداری می شوند.[12] نتایج بررسی ها حاکی از تنوع فرمی در تخم پرندگان است، این فرم ها همگی زیر مجموعه فرم های کروی، شبه کروی کشیده عمودی و تخم مرغی شکل از مجموعه فرم های پوسته های سین کلاستیک دورانی هستند و شامل فرم های: کروی، بیضوی، بیضوی کشیده، تخم مرغی، مخروطی، دوسر مخروطی، گلابی شکل و شبه استوانه ای می باشند؛ در جدول ۲ گونه شناسی فرمی پوسته های سین کلاستیک دورانی و همچنین گونه شناسی فرمی پوسته تخم پرندگان نمایش داده شده است.



جدول ۲ : گونه شناسی فرمی پوسته های سین کلاستیک دورانی و پوسته تخم پرندگان

نمونه های پوسته سین کلاستیک دورانی در معماری و پوسته تخم پرندگان در طبیعت

مطالعه ادوار مختلف تاریخی نشان می دهد، معماران همواره با بکارگیری فناوری های نو در حل مسائل پوسته های سین کلاستیک که بیشتر در قالب پوشش های منحنی فضایی خودنمایی می کنند، کوشیده اند. معماران و مهندسان همواره در پی یافتن راه حل های جدید برای حل مساله ایستایی و استحکام فضاهای محصور در کنار توجه به مسائل زیبا شناختی آن بوده اند. توجه به فناوری و بکار گیری آن امری اجتناب ناپذیر در حل مسائل بوده است. نوع مصالح مصرفی، اندازه دهانه، خیز پوشش، هندسه و روش اجرا در شکل گیری فرم نهایی پوشش های منحنی در معماری تاثیر گذار می باشند. پوشش های منحنی که شامل تاق و گنبد می باشند، یکی از مهمترین تکنیک های مورد استفاده در جهان است. استفاده از سیستم تاق و گنبد به طور گسترده در مناطقی از آسیای مرکزی و آسیای غربی، جنوب اروپا و آفریقا به اتکای ساختمایه های بومی هر منطقه مشاهده می شود، به ویژه در اقلیم های گرم و خشک که طی روز گرمایی با درجه حرارت بالا وجود دارد. سیستم های پوشش منحنی شکل به راحتی گرمای محیط را جذب کرده و هوای فضای داخلی را بهتر از فضای مکعبی شکل کنترل می کنند که یکی از دلایل این امر وجود سطوح کمتری از سطح جاذب گرما نسبت به پوشش های مسطح است. در اقلیم های سرد نیز به دلیل کاهش سطح در برخی از حجم های ساختمانی، اتلاف گرمایی کمتری مشاهده می شود.[13] گنبد سابقه طولانی در معماری جهان دارد اما تمام گنبد های پیشین بر پایه مدور قرار می گرفتند و این معماران ساسانی بودند که نخستین بار مساله گنبد بر سطوح چهار گوش را حل کردند. از این رو می توان گفت ایران سرزمین گنبد های واقعی است.[14] بنا به گفته *محمد کریم پیرنیا*، «گنبد ارمغان معماری ایران به جهان معماری» می باشد، ایرانی ها در دوران قبل از اسلام توانستند که تاق و گنبد را که پدیده ای طبیعی و خاص معماری ایران است را جایگزین بام تخت و خرپشته چوبین کنند.[15] تاق ها نیز یک نوع از پوشش منحنی می باشند. انواع مختلف تاق ها از حرکت یا دوران قوس ها در فضا ایجاد می شوند و از ترکیب تاق های ساده انواع پیچیده تر تاق بوجود می آیند. [16] حال سؤالی که مطرح می شود این است که کدامیک از پوشش های فضایی تاقی و گنبدی در معماری در حوزه پوسته های سین کلاستیک دورانی قرار خواهند گرفت؟ از میان تمامی تاق های سین کلاستیک بررسی شده، بیشتر نمونه های«تاق کلنبو»، «تاق چشمه»، «تاق چهاربخش» و «تاق کاربندی» از نمونه های پوسته های سین کلاستیک دورانی هستند که به عنوان پوشش فضایی در معماری سرزمین های اسلامی به ویژه ایران بسیار دیده شده اند. از طرفی پژوهش جاری نشان می دهد که از میان تمامی فرم های مختلف گنبد، تنها گنبد سین کلاستیک، همان «گنبد ناری» می باشد و با توجه به ویژگی شبه کروی بودن، در دسته پوسته های سین کلاستیک دورانی در معماری قرار گرفته است. از اولین نمونه های جسورانه و با شکوه آن می توان به کاخ بزرگ شاهپور و تالار تشریفات آن با گنبدی شلجمی یاد کرد. (شکل ۳)



شکل ۳ : بیشاپور، طرح بازسازی کاخ شاهپور[17]

در دوران معاصر نیز، همزمان با توسعه راه آهن و صنعتی شدن تولیدات، یک دوره جدید در توسعه فرمها با سازه های نو آغاز شد. در اولین مرحله مجموعه ای از خرپاهای متنوع شکل گرفت و در مراحل بعد سازه های مشبک فضایی سه بعدی به وجود آمدند. [18] در نیمه دوم قرن بیستم، جهان معماری شاهد پیشرفتهای چشمگیری در زمینه سیستم های نوین سازه ای همچون سازه های غشایی، خریایی، کششی، کش بستی، هوای فشرده، باز و بسته شونده، سازه های فضاکار و ... بوده است. [6] از اهداف مورد نظر در خلق و ابداع این سازه ها می توان به کاهش میزان مصرف مصالح، شفافیت بیشتر، گستردگی بصری و انعطاف پذیری بیشتر اشاره کرد. در این راستا، سازه های سه بعدی نظیر گنبد به سمت صنعتی شدن گام نهادند و فرم های جدید و متنوع سین کلاستیک در قالب سازه های فشاری و یا کششی شکل گرفتند. در یک دسته بندی از فناوری های نوین بکار رفته در پوسته های سین کلاستیک دورانی که به صورت فرم های گنبدی می باشند، می توان آنها را از لحاظ منطق سازه ای به دو دسته سازه های فشاری و کششی تقسیم بندی کرد. گنبدهای مشبک مهاربندی شده، در دسته سازه های فشاری قرار می گیرند و دارای حالات مختلف می باشند، نظیر: ۱) گنبد دندانه دار ۳) گنبد دیامتیک ۴) گنبد لاملا ۵) گنبد ژئودزیک. [19] پوسته های گنبدی غشایی یا کابلی نیز به لحاظ منطق سازه ای در دسته سازه های کششی قرار می گیرند و شامل گنبد با سازه هوا فشرده و گنبد با سازه کش بستی می باشند. [1] در جدول ۳ نمونه هایی از پوسته های سین کلاستیک دورانی در معماری معاصر دیده شده است.

نمونه هایی از پوسته های سین کلاستیک دورانی در معماری معاصر

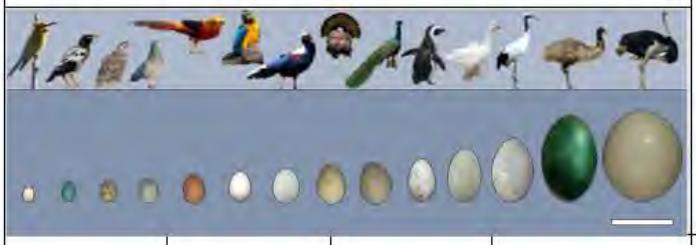
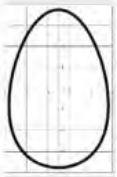
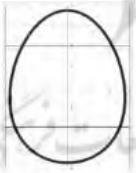
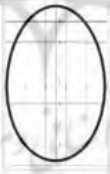
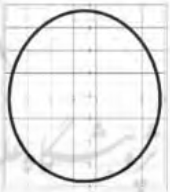
گنبد ورزشی رایس اند آرینگتون (RICE & ARLINGTON SPORTS DOME) ایالات متحده آمریکا- اوهایو ۱۹۹۹ م.	گنبد رایشتاگ (Reichstag) آلمان- برلین ۱۹۹۹ م.
سیویک آرنا (Civic Arena) ایالات متحده آمریکا- پنسیلوانیا- پتسبورگ ۱۹۶۱ م.	گنبدهای سدونا- زاندو (Sedona Domes-Xanadu) ایالات متحده آمریکا- آریزونا- سدونا ۱۹۹۴ م.

جدول ۳ : نمونه هایی از پوسته های سین کلاستیک دورانی در معماری معاصر

بعد از بررسی پوسته های سین کلاستیک دورانی در معماری، به بررسی این پوسته ها در طبیعت پرداخته شده است. پوسته ها در طبیعت از متنوع ترین فرم هایی هستند که در دنیای فیزیکی اطراف ما یافت می شوند؛ پوسته تخم پرندگان یک نمونه بسیار عالی از پوسته های سین کلاستیک دورانی در طبیعت می باشد. تخم پرنده، یک پدیده طبیعی منحصر به فرد است که با جنبه های مختلف زندگی انسان ارتباط تنگاتنگی دارد. این یک محصول غذایی، موضوع تحقیق در پرنده شناسی

و پرورش طیور است. منحنی های تخم مرغی شکل در ریاضیات، هنر، معماری، فلسفه و دین توجه خاصی را به خود جلب می کنند. از نظر تاریخی، طرح های مختلف تخم مرغی شکل از زمان ایران باستان، بیزانس و روس شناخته شده اند.[20] از این طرح ها برای ساخت گنبد معابد استفاده شد.

بعدها، طرح های تخم مرغی شکل به شدت در معماری، ساخت، نقاشی و هنرهای کاربردی مورد استفاده قرار گرفت.[21] در جدول ۴ نمونه هایی از تصاویر پوسته تخم پرندگان بر پایه اشکال هندسی نشان داده شده است.

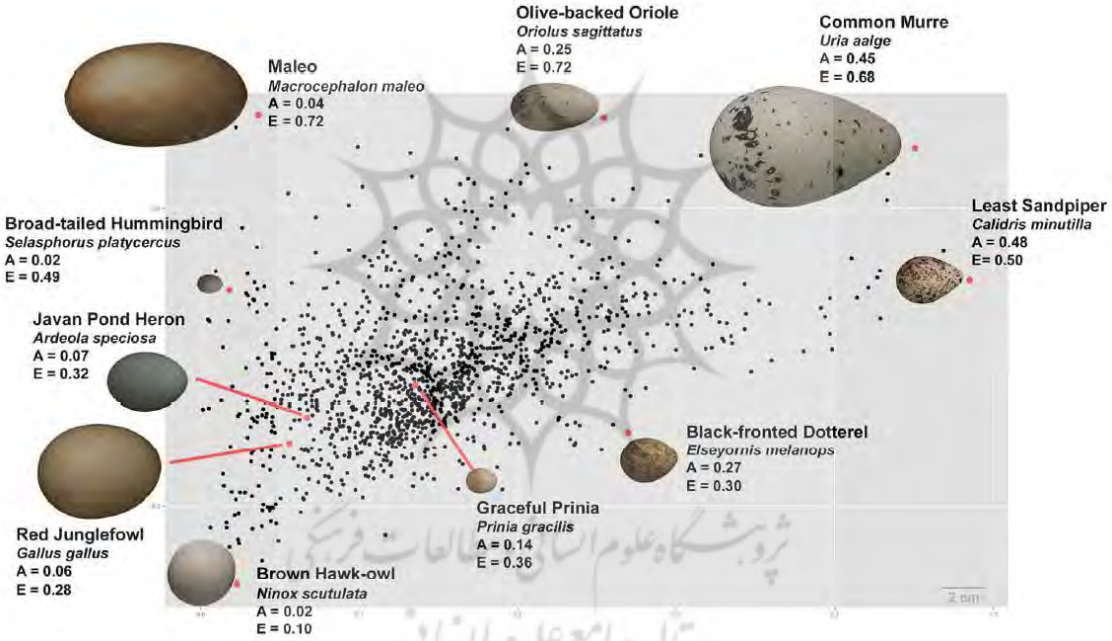
نمونه هایی از پوسته های سین کلاستیک دورانی در طبیعت				
تخم پرندگان Avian Egg				
تصاویر نمونه Sample Images				
	گیلموت Guillemot	مرغ Hen	مرغ چکشی Maleo	شترمرغ Ostrich
اشکال پایه هندسی Basic Geometric Shapes				
	گلابی شکل Pyriform	تخم مرغی Oval	بیضوی Elliptical	دایره ای Circular

جدول ۴ : پوسته تخم پرندگان، نمونه ای از پوسته های سین کلاستیک دورانی درطبیعت

بهینگی فرم و ساختار پوسته تخم پرندگان در طبیعت و الگو پذیری در معماری

برای قرن ها، دانشمندان تعجب می کردند که چرا شکل تخم از پرنده ای به پرنده دیگر بسیار متفاوت است. برای شروع، ما باید بدانیم چه اشکالی از تخم پرنده امکان پذیر است. خوشبختانه علاقه مندان و موزه های تاریخ طبیعی صدها سال است که تخم های پرندگان را جمع آوری و فهرست بندی می کنند. سپس، باید بدانیم چه نوع پرندگانی با اشکال مختلف تخم مرتبط هستند؟ و سرانجام، چگونه ممکن است ویژگی های خاص آنها – از عادات لانه سازی تا اندازه بدن – شکل تخم های آنها را در طول زمان تکامل تغییر دهد؟ دانشمندان جستجوی خود را با مشاهده عکسهای ۴۹۱۷۵ تخم پرنده که

توسط موزه جانورشناسی مهره داران در برکلی ارائه شده است، آغاز کردند. تخم ها از آشیانه ها، لانه های زیرزمینی و کلونی ها در سراسر جهان برای بیش از ۱۰۰ سال جمع آوری شده بودند.[22] آزمایشگاه استادرد در دانشگاه پرینستون، با استفاده از یک برنامه رایانه ای ویژه برای اسکن هر تصویر، اندازه گیری تخم پرنده و سپس تعیین طیف کامل شکل آنها، تصاویر ۳۷ دسته پرنده، که همه آنها از دسته های مهم پرندگان هستند را مورد بررسی قرار داد؛ یعنی ۱۴۰۰ گونه که تنها ۱۴ درصد از کل ۱۰۰۰۰ گونه پرنده است. در مرحله بعد، محققان دو ویژگی را بررسی کردند: مخروطی بودن یا میزان تندی تخمها و بیضوی بودن یا اینکه چقدر تخمها از یک کره کامل منحرف می شوند. تقریباً تخم پرندگان در همه جا یافت می شود. برخی بیضوی هستند، برخی مخروطی هستند، برخی از آنها ترکیبی از هر دو هستند و برخی همانند جغد شاهینی (hawk-owl)کره کامل هستند؛ تخم جغد شاهینی بیشترین حد کروی بودن را دارد، اما پرندگان دیگر به گونه دیگری هستند. پرندگان ساحلی مانند سینه سفید نوک قلمی(murre) و آبچلیک(sandpiper) تخم های فوق کشیده دارند. مرغ چکشی(maleo) نیز بیضوی ترین تخم را دارد. متداول ترین نوع تخم پرنده شبیه تخم سسکک رعنا (Prinia gracilis) است، البته کاملا شبیه تخم مرغی که ما به ذهن می آوریم نیست. [23] (شکل ۴)



شکل ۴ : نمایش شکل فضایی تخم پرندگان؛ تنوع در کشیدگی مخروطی A (محور افقی) و بیضوی E (محور عمودی)
میانگین شکل تخم مرغ برای هر یک از ۱۴۰۰ گونه (نقاط سیاه) و تصاویر تخم های نماینده (نقاط قرمز)، به همراه پارامترهای عددی. [23]

در ادامه، اگر مجدد به سؤالی که در ابتدا مطرح شد، برگردیم که چرا شکل تخم از پرنده ای به پرنده دیگر بسیار متفاوت است، قطعاً بایستی به پارامترهای مؤثر بسیاری در شکل گیری بهینگی تخم پرنده توجه شود. در این بخش از پژوهش به معرفی تعدادی از آنها پرداخته شده است. (جدول ۵) البته بایستی خاطر نشان کرد موارد استثناء هم دیده می شود.

محققان با بررسی تاریخچه زندگی و روابط تکاملی پرندگان در مطالعه جدیدی که در نشریه Science منتشر شده است، به نتایج قابل تأملی رسیده اند که به برخی از آنها اشاره می کنیم: [23,24]

۱- اندازه «دسته تخم در لانه» (Clutch): نشان می دهد تعداد تخمها در یک لانه می تواند بر ظاهر تخم پرنده

۲- تأثیر بگذارد، یعنی با برخی اشکالی از تخم ها که برای تقسیم گرما بهینه شده اند.

۳- فاکتور چرخش تخم پرنده : تخم های کروی به راحتی می توانند از روی صخره بچرخند. با این حال، تخم های مخروطی شکل در یک دایره تنگ می چرخند و آنها را برای پرندگان لانه صخره ای مناسب می کند.

٤- شاخص بال(Hand Wing Index): محققان مجموعه زیادی از متغیرها را بررسی کردند، از جمله: توده بدن پرنده بالغ. رژیم غذایی؛ تعداد تخم مرغ در لانه؛ نوع لانه؛ محل لانه؛ محیط؛ و چیزی به نام شاخص بال (HWI)، نماینده ای برای قابلیت پرواز. HWI بالاتر نشان داد که با عملکرد بهتر پرواز ارتباط دارد. پس از جمع آوری اعداد، دانشمندان پیوندهایی را که بدنبال آن بودند پیدا کردند: طول یک تخم پرنده با اندازه بدن آن ارتباط دارد. شکل یک تخم پرنده – چقدر مخروطی یا بیضوی است – به عادات پرواز مربوط می شود. و هرچه پرواز پرنده قوی تر باشد، تخم های آن مخروطی یا بیضوی تر خواهد بود.

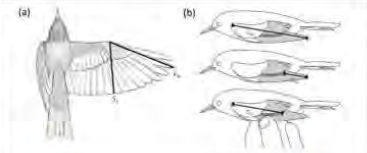
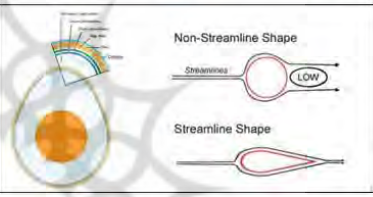
٥- درجه کشیدگی مخروطی یا بیضوی تخم: هنگامی که به پرندگان با نظم یکسان نگاه می کنید، آنهایی که پرواز قوی تری دارند، دارای تخم هایی هستند که کشیدگی مخروطی یا بیضوی بیشتری دارند.

٦- اندازه مجرای تخم پرنده مادر: شکل تخم پرنده تعادل بین دو فشار است؛ یکی محتویات داخل تخم و دیگری مجرای عبور تخم در خارج، که با ضخامت غشای تخم درست زیر پوسته تعدیل می شود و نه خود پوسته به تنهایی. واقعیت جالب اینجاست که اگر پوسته از غشاء جدا شود، تخم همچنان شکل خود را حفظ می کند.

۷- ساختار تخم پرنده: در اینجا بایستی به ارتباط بین پرواز و شکل تخم پرنده اشاره کرد. پرندگان دارای اندامی هستند با شکلی که مقاومت هوا را در برابر آن کم می کند – به ویژه در پروازهای قوی تر – اندام های آنها فشرده شده و به حداقل می رسد. از طرفی برای اینکه بیشترین استفاده از تخم ها باشد، آنها را با اشکال مخروطی یا بیضوی که حجم آنها نسبت به قطر تخم آنها بیشتر از تخم های کروی است، ساخته می شود. در عین حال بایستی به ساختار سبک، متخلخل و در عین حال مستحکم تخم پرندگان اشاره کرد.

در رابطه بین توانایی پرواز و شکل تخم مرغ استثنائاتی نیز وجود دارد. به عنوان مثال، در حالی که تخم های شترمرغ کروی هستند، تخم های پرنده کیوی (kiwi) بیضوی هستند، حتی اگر هر دو گونه پرواز نکنند. همچنین پنگوئن ها که پرندگان بدون پروازی هستند، تخم های مخروطی می گذارند، محققان طراحی شکل تخم آنها را برای شنا قوی زیر آب با شکل بدنشان که مقاومت فشار آب را در برابر آن کم می کند، مرتبط می دانند.

در بررسی های صورت گرفته از انواع مختلف تخم های پرندگان به عنوان نمونه ای از پوسته های سین کلاستیک دورانی در طبیعت، مشخص گردید که چرا شکل فرمی و ساختاری تخم پرندگان مختلف با هم متفاوت هستند و در نهایت، پارامتر های مختلف شکل گیری فرمی و ساختاری بهینه تخم پرنده، از شکل لانه و فیزیک مرغ مادر گرفته تا توانایی پرواز پرنده مورد شناسایی قرارگرفت. همین مساله به نحوی در نمونه های پوسته های سین کلاستیک دورانی در معماری از گذشته تا کنون بسیار مورد توجه معماران بوده و هست به نحوی که این توجهات در خصوص رسیدن به بهینگی فرمی و ساختاری با پیشرفت های تکنولوژیکی، بسیار بیشتر از گذشته اهمیت یافته است.

بهینگی فرم و ساختار پوسته های سین کلاستیک دورانی در طبیعت		
بررسی موردی: پوسته تخم پرندگان در طبیعت		
پارامتر های بهینگی فرمی و ساختاری		توضیحات
اندازه «دسته تخم» Clutch Size		نشان می دهد تعداد تخمها در یک لانه می تواند بر ظاهر تخم پرنده تأثیر بگذارد، یعنی با برخی اشکالی از تخم ها که برای تقسیم گرما بهینه شده اند.
پارامتر چرخش تخم: The roll factor		تخم مرغ های کروی به راحتی می توانند از روی صخره بچرخند. با این حال، تخم مرغ های مخروطی شکل در یک دایره تنگ می چرخند و آنها را برای پرندگان لانه صخره ای مناسب می کند.
پارامتر شاخص بال: (HWI) Hand Wing Index		HWI بالاتر نشان داد که با عملکرد بهتر پرواز ارتباط دارد. نتایج نشان می دهد: **طول** یک تخم مرغ با اندازه بدن پرنده ارتباط دارد. **شکل** یک تخم مرغ - چقدر مخروطی یا بیضوی است - به عادات پرواز مربوط می شود. و هرچه پرواز پرنده قوی تر باشد، تخم مرغ های آن مخروطی یا بیضوی تر خواهد بود.
پارامتر درجه کشیدگی مخروطی یا بیضوی تخم: Degree of E. & A.		هنگامی که به پرندگان با نظم یکسان نگاه می کنید، آنهایی که پرواز قوی تری دارند، دارای تخم هایی هستند که کشیدگی مخروطی یا بیضوی بیشتری دارند.
پارامتر ساختاری تخم پرنده: Structure of Egg		پرندگان دارای اندامی هستند با شکلی که مقاومت هوا را در برابر آن کم می کند- به ویژه در پروازهای قوی تر - اندام های آنها فشرده شده و به حداقل می رسد. از طرفی برای اینکه بیشترین استفاده از تخم ها باشد، آنها را با اشکال مخروطی یا بیضوی که حجم آنها نسبت به قطر تخم آنها بیشتر از تخم های کروی است، ساخته می شود. در عین حال بایستی به ساختار سبک، متخلخل و در عین حال مستحکم تخم پرندگان اشاره کرد.

جدول ۵ : بهینگی فرم و ساختار پوسته تخم پرندگان [23,24,25]

جدول ۶ ، پوسته طبیعی تخم پرنده به عنوان یک پوسته سین کلاستیک دورانی طبیعی و الگو پذیری از این پوسته ها را در معماری نشان می دهد. تصاویر تخم پرندگان، از طبقه بندی تخم پرندگان از مجموعه های تاریخ طبیعی موزه تولوز گرفته شده است و ابعاد آنها به دلیل تغییر مقیاس با اندازه واقعی مطابقت ندارد. معماران نیز با توجه به بهینگی فرم و ساختار تخم پرندگان از این پوسته های طبیعی الگوبرداری کرده اند، در نمونه های معماری به تعدادی از ساختمان های اداری معاصر که برگرفته از نمونه های پوسته های سین کلاستیک دورانی طبیعی است، اشاره شده است؛ نظیر: ساختمان کتابخانه دانشکده فلسفه دانشگاه آزاد در برلین، ساختمان دفتر مرکزی سوئیس ری در لندن، مرکز ملی هنرهای نمایشی در پکن و ساختمان دفتر مرکزی شهرداری لندن(سیتی هال) در لندن. مرکز سوئیس ری لندن در سال ۱۹۹۷ به بهره برداری رسید. شبیه سازی پارامتری رایانه ای صورت گرفته در طراحی این بنا حاکی از بهینگی مطلوب فرمی و کاهش مقاومت هوا در برابر پوسته طراحی شده می باشد؛ نورمن فاستر، معمار این پروژه، با در نظر گرفتن نیروهای جانبی باد و طراحی سازه مورب بیرونی، توانسته در کنار بهینگی فرمی به بهینگی سازه ای نیز دست یابد.[26] کتابخانه دانشکده فلسفه دانشگاه آزاد برلین در سال ۲۰۰۵ افتتاح گردید و به «مغز برلین» شهرت یافت. طراحی پوسته بیرونی کتابخانه با شکلی تخم مرغی به صورت شفاف و نقره ای صورت گرفت. غشای داخلی از الیاف شیشه ای شفاف نور خورشید را فیلتر و فضای تمرکز را ایجاد می کند، در حالی که دهانه های پراکنده پنجره ها، الگوهای متغیری از نور و سایه را ایجاد می کند. مرکز ملی هنرهای نمایشی در پکن که در سال ۲۰۰۷ به بهره برداری رسید، اکنون به «تخم مرغ غول پیکر» شهرت یافته است و آن به دلیل داشتن شکل گنبد نیم بیضوی آن می باشد. نمای

خارجی به صورت یک پوسته سازه ای فولادی از جنس ورق تیتانیوم است. طول محور طولانی در جهت شرق به غرب ۲۱۲.۲۰ متر ، طول محور کوتاه در جهت شمال–جنوب ۱۴۳.۶۴ متر و ارتفاع ساختمان ۴۶.۲۸۵ متر است. در این بنا می توان به سازه بسیار سبک، و در برخی قسمت ها شفاف و در عین حال مستحکم فرم تخم مرغی آن اشاره داشت. سالن پارک جدید علم و فناوری هنگ کنگ، معروف به ساختمان «تخم مرغ طلایی»، در سال ۲۰۰۹ افتتاح گردید، حجم این سالن از فرم تخم مرغ الهام گرفته است و نماد بکارگیری تکنولوژی و فناوری در پارک علم و فناوری شده است.

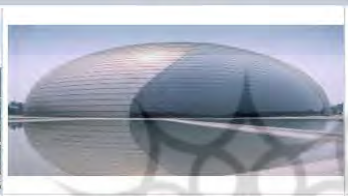
الگو پذیری از پوسته تخم پرندگان در معماری

تخم مرغ طلایی - سالن پارک جدید علم و فناوری هنگ کنگ

Golden Egg

هنگ کنگ- چین

۲۰۰۹



مرکز ملی هنرهای نمایشی

National Center for the Performing Arts (NCPA)

پکن- چین

۲۰۰۷

ساختمان سوئیس ری

Swiss Re

انگلستان- لندن

۱۹۹۷

کتابخانه دانشکده فلسفه دانشگاه آزاد برلین

Philogical Library of FU

آلمان- برلین

۲۰۰۵

جدول ۶ : الگو پذیری از پوسته تخم پرندگان در معماری

یافته ها

بخش اول یافته های حاصل از بررسی هندسی پارامتری رویه پوسته تخم مرغ مورد بحث قرار می گیرد. یک «رویه» یا «سطح» مجموعه نقاطی از فضاست که در معادله $F(x,y,z)=0$ صدق می کنند، نظیر: کره، استوانه، مخروط و ... . حال در هندسه تحلیلی، «رویه های درجه دوم» در فضای سه بعدی دسته ای از رویه ها هستند که به این صورت تعریف می شوند: مکان هندسی همه نقاطی مانند $P=(x,y,z)$ که در معادله $F(x,y,z)=0$صدق کنند به گونه ای که F یک تابع درجه دو است.[27] به عنوان مثال کره، سهمی گون، بیضی گون و ... در این دسته قرار دارند. از این رو می توان پوسته های سین کلاستیک دورانی را که شامل «کره»، «کره گون» و «سهمی گون دایروی» می باشند را در یک دسته خاص یعنی «رویه های درجه دوم متقارن دورانی» قرار داد. پوسته تخم پرندگان با اشکالی نظیر «کره گون»، «بیضی گون» و «سهمی گون دایروی» در دسته «رویه های درجه دوم متقارن دورانی» قرار دارند.(شکل ۵)

شکل ۵ : پوسته تخم پرندگان با اشکال مختلف[28]

جهت بررسی هندسی پارامتری رویه پوسته تخم پرندگان، از میان تمامی اشکال مختلف؛ فرم «تخم مرغی شکل» در نظر گرفته شده است. معادله سطوح مورد بررسی به صورت تابع درجه دوم در مختصات کروی می باشند که عبارت است از :

$$x = (1 + c\varphi)\sin(\varphi)\cos\theta$$
$$y = (1 + c\varphi)\sin(\varphi)\sin\theta$$
$$z = b\cos(\varphi)$$

که در آن

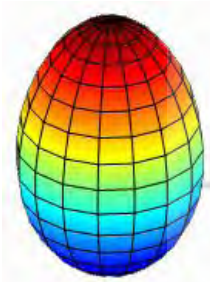
$$c = \frac{2}{\pi}\left(\frac{w}{2} - 1\right) = \frac{w}{\pi} - \frac{2}{\pi}$$

$$b = \frac{h}{2};$$

و همچنین

$$\theta = [0, 2\pi]$$
$$\varphi = [0, \pi]$$

حال با در نظر گرفتن پارامترهای مولد محیطی Nphi و Ntheta در راستای عمودی و افقی، همچنین پارامتر بیشینه عرضی w و پارامتر بیشینه ارتفاع h و نیز با استفاده از کد های اعتبار سنجی لازم در نرم افزار متلب، مدل پارامتری یک نمونه تخم مرغ بدست آمد.(شکل ۶)



شکل ۶: مدل پارامتری تخم مرغ با استفاده از متغیر های h ، w ، Nphi و Ntheta

تحلیل میزان بهینگی سطوح پوسته های تخم مرغی و پوسته های سین کلاستیک دورانی در معماری

در بررسی های صورت گرفته از انواع مختلف تخم های پرندگان به عنوان نمونه ای از پوسته های سین کلاستیک دورانی در طبیعت، مشخص گردید که چرا شکل فرمی و ساختاری تخم پرندگان مختلف با هم متفاوت هستند و در نهایت، پارامتر های مختلف شکل گیری فرمی و ساختاری بهینه تخم پرنده، از شکل لانه و فیزیک مرغ مادر گرفته تا توانایی پرواز پرنده مورد شناسایی قرارگرفت. حال مساله بررسی میزان بهینگی سطوح پوسته ها در بین یک گونه مطرح می شود و اینکه چگونه می توان به کمک فناوری به بهینه

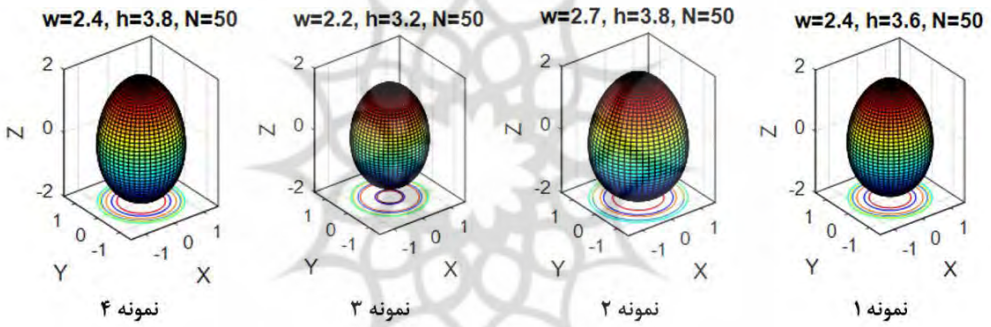
ترین حالت سطح بهینه به میزان حجم اشغال شده در یک پوسته تخم مرغی دست یافت؟ به همین منظور به صورت کاملاً اتفاقی از یک شانه تخم مرغ، ۴ مورد انتخاب گردید و بیشینه عرض و بیشینه ارتفاع آنها اندازه گیری شد. (جدول ۷)

	h	*w*
نمونه ۱	3.6	2.4
نمونه ۲	3.8	2.7
نمونه ۳	3.2	2.2
نمونه ۴	3.8	2.4

جدول ۷: مقادیر h و w نمونه های انتخابی پوسته تخم مرغ

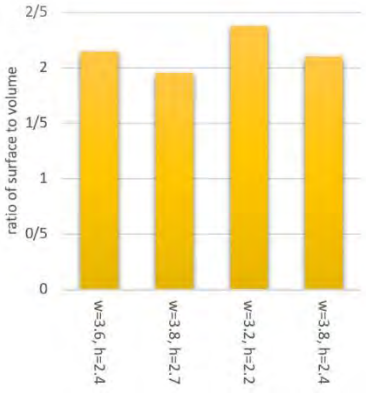
با در نظر گرفتن پارامترهای مولد محیطی Nphi و Ntheta به میزان ۵۰ در راستای عمودی و افقی می توان به مدل نمونه های واقعی رسید. در ادامه، سطوح بهینه مورد نظر و حجم اشغال شده و قیاس نمونه ها به منظور رسیدن به بهینه ترین حالت سطح بهینه به میزان حجم اشغال در بین نمونه های انتخابی با استفاده از کد نویسی صورت گرفته در نرم افزار متلب محاسبه شد. (جدول ۸)

شماره نمونه	h	w	حجم اشغال شده	سطح بهینه	نسبت سطح به حجم
1	3.6	2.4	11.1080	23.8604	2.1480
2	3.8	2.7	14.7298	28.8085	1.9558
3	3.2	2.2	8.2240	19.5428	2.3763
4	3.8	2.4	11.8714	24.9154	2.0988

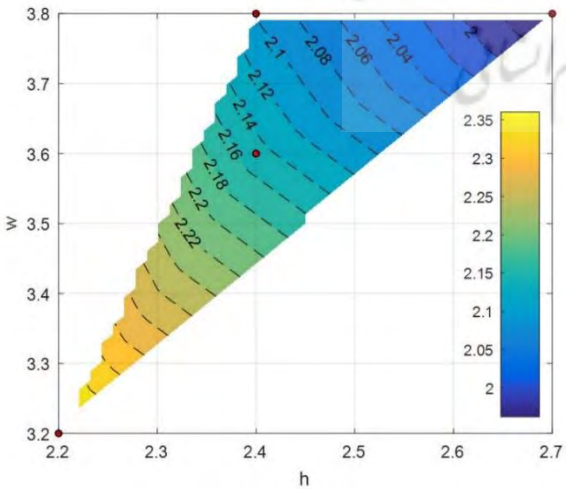


جدول ۸: مقادیر حجم اشغال شده، سطح بهینه و نسبت آن برای نمونه های مختلف

نمودار های ۱ و ۲ مقایسه مقادیر نسبت سطح به حجم در نمونه ها را نشان می دهد.



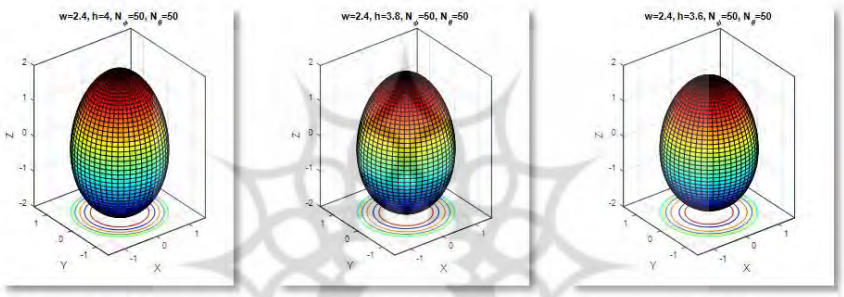
نمودار ۱: مقایسه مقادیر نسبت سطح بهینه به حجم اشغال شده برای نمونه های مختلف



نمودار ۲: مقایسه مقادیر نسبت سطح بهینه به حجم اشغال شده برای نمونه های مختلف

نتایج نشان می دهد میزان بهینگی سطح به حجم اشغال شده در نمونه ۲ به بالاترین سطح خود رسیده است. بنابراین می توان در یک گونه مشخص از تخم پرندگان، میزان بهینگی حداکثری سطح به حجم را اندازه گیری کرد. امروزه با پیشرفت هایی که در بکارگیری ابزار های فناورانه در طراحی و ساخت معماری حاصل گردیده است، نظیر: دقت در محاسبات، تحلیل و پردازش اطلاعات، می توان به کیفیت بهتر در بررسی ابعاد مختلف موضوع بهینگی سطوح سین کلاستیک دورانی پرداخت. در ادامه با ثابت در نظر گرفتن همه پارامترهای یک پوسته تخم مرغی کامل و تنها افزایش پارامتر ارتفاعی، میزان بهینگی سطح در سه حالت در جدول ۹ قابل بررسی می باشد.

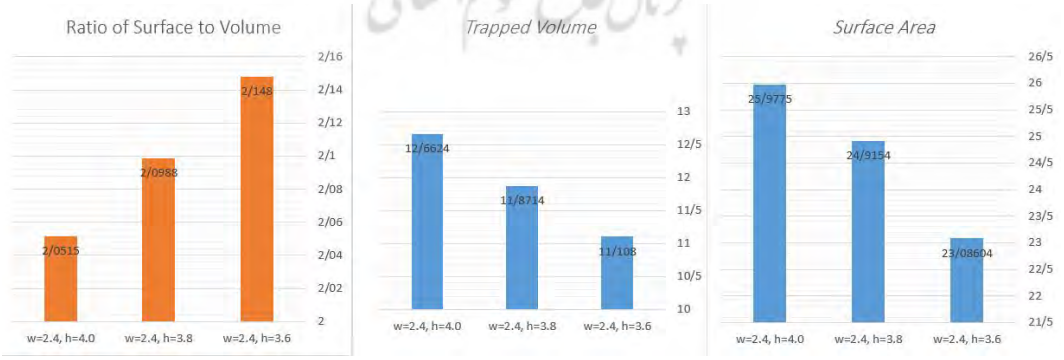
	h	w	N_{phi}	N_{theta}	سطح بهینه	حجم اشغال شده	نسبت سطح بهینه به حجم اشغال شده
حالت ۱	3.6	2.4	50	50	23.8604	11.1080	2.1480
حالت ۲	3.8	2.4	50	50	24.9154	11.8714	2.0988
حالت ۳	4.0	2.4	50	50	25.9775	12.6624	2.0515



حالت ۳ حالت ۲ حالت ۱

جدول ۹: مقادیر سطح بهینه، حجم اشغال شده و نسبت آن در حالت های مختلف برای متغیر ارتفاعی h

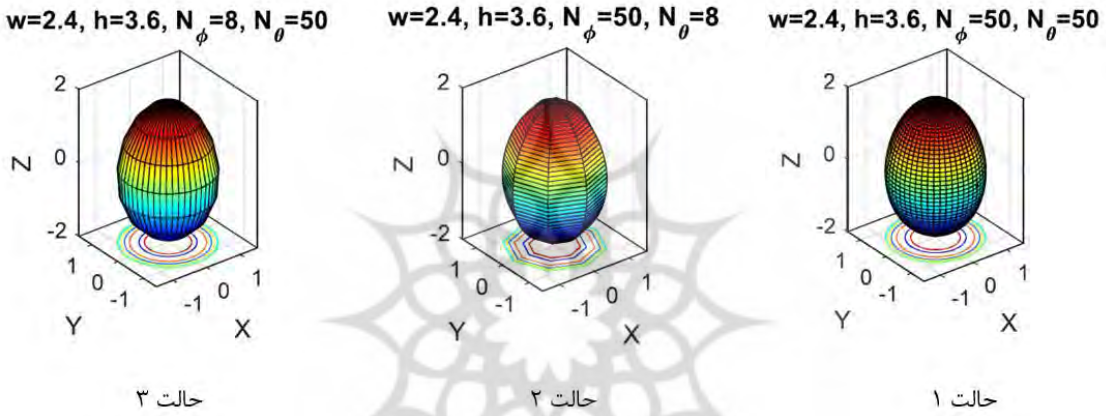
نتایج مدل سازی پارامتری مطابق نمودارهای ۳، ۴ و ۵، حاکی از آن است که در مقایسه حالت های ۱ و ۲ و ۳، با افزایش ارتفاع پوسته، مساحت پوسته و حجم اشغال شده بیشتر می شود اما نسبت سطح پوسته به حجم اشغال شده کمتر می شود و این نتیجه افزایش بهینگی سطح پوسته نسبت به حجم اشغال شده را در بر خواهد داشت.



نمودار های ۳ ، ۴ و ۵ : به ترتیب از سمت راست؛ میزان سطح بهینه، حجم اشغال شده و نسبت سطح به حجم اشغال شده

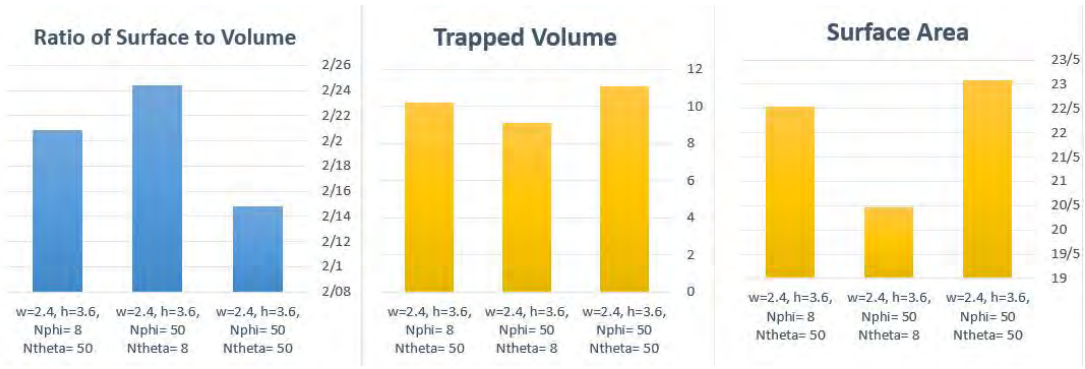
در اینجا سؤالی که مطرح می شود این است؛ تغییرات پارامتریک چگونه می تواند به بهینگی حداکثری در پوسته های تخم مرغی و نیز پوسته های سین کلاستیک دورانی هم تراز آن در معماری منجر شود؟ به همین منظور مطابق اطلاعات جدول ۱۰، ۳ حالت در نظر گرفته شد. حالت ۱، یک پوسته تخم مرغی کامل را نشان می دهد و حالت های ۲ و ۳ مربوط به تغییرات مولدهای محیطی عمودی و افقی همان پوسته تخم مرغی می باشد.

	h	w	N_{phi}	N_{theta}	سطح بهینه	حجم اشغال شده	نسبت سطح بهینه به حجم اشغال شده
حالت ۱	3.6	2.4	50	50	23.8604	11.1080	2.1480
حالت ۲	3.6	2.4	50	8	20.4611	9.1170	2.2443
حالت ۳	3.6	2.4	8	50	22.5479	10.2088	2.2087



جدول ۱۰: مقادیر سطح بهینه، حجم اشغال شده و نسبت آن در حالت های مختلف برای متغیر مولد محیطی N

نمودار ۶ مقایسه سطح بهینه را نشان می دهد. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که با تغییر مولدهای محیطی عمودی و افقی پوسته تخم مرغی، با در نظر گرفتن ارتفاع ثابت و عرض ثابت در هر سه حالت، تنها در حالت ۲ که مولد های عمودی به تعداد ۸ عدد تقلیل یافته، سطح پوسته به کمترین میزان خود رسیده است؛ از طرفی بهینه ترین حالت نسبت سطح به حجم مربوط به حالت ۱ می باشد، زیرا فرم تخم مرغی به طور کامل حفظ شده است.



نمودار های ۶ ، ۷ و ۸ : به ترتیب از سمت راست؛ میزان سطح بهینه، حجم اشغال شده و نسبت سطح به حجم اشغال شده

از مقایسه خروجی های نرم افزار، می توان اظهار داشت که سطح پوسته های تخم مرغی شکل، با در نظر گرفتن عرض و ارتفاع ثابت، اگر به صورت ترکین در نظر گرفته شود، مساحت پوسته کاهش می یابد و میزان مصالح مصرفی به حداقل میزان خود خواهد رسید، بنابراین نتیجه می گیریم در اجرای پوسته تخم مرغی به صورت ترکین که جزو پوسته های سین کلاستیک دورانی هم تراز آن می باشد، اجرای پوسته به صورت کاملاً مدولار در تقسیم به قطعات کوچکتر امکان پذیر است، بالا رفتن سرعت اجرا و افزایش کیفیت اجرا نیز از نتایج دیگر آن خواهد بود؛ از طرفی نمایان شدن سازه در ساختار عمودی نما و همچنین توزیع بارهای مناسب توسط آن، از محاسن دیگر به شمار می آید.

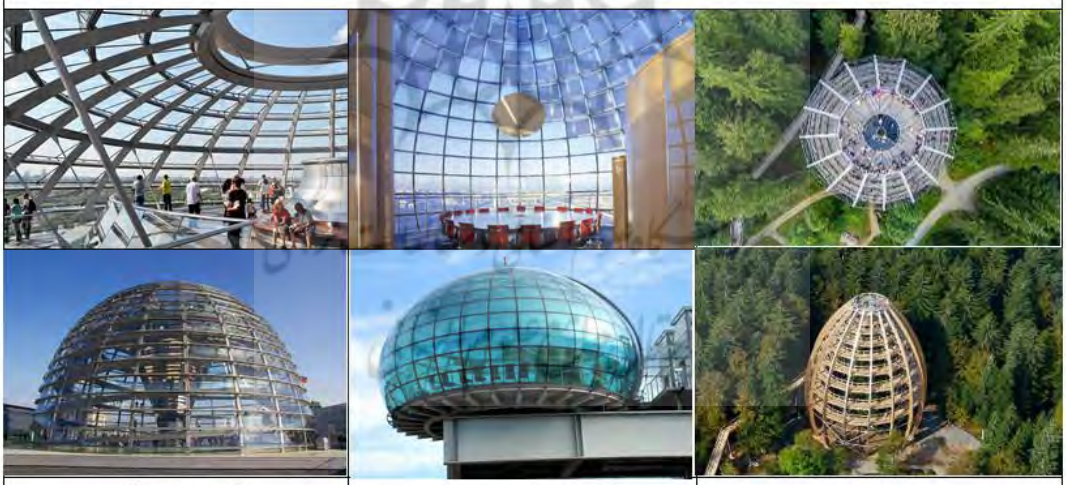
در جدول ۱۱ به نمونه هایی از پوسته های تخم مرغی در معماری معاصر که به صورت ترکین طراحی و اجرا شده اند، اشاره شده است:

۱- گنبد ساختمان پارلمان آلمان در برلین که به گنبد رایشتاگ شهرت دارد، به عنوان یکی از نمونه ها، مورد بررسی فرمی و ساختاری قرار گرفت. در گنبد رایشتاگ، فرم تخم مرغی گنبد توانسته است علاوه بر پوشش دهانه ۴۲ متری، با اجرایی به صورت ترکین، به بهینگی سطح نیز دست یابد.

۲- گنبد «حباب» شیشه ای، در طرح بازسازی و احیاء کارخانه فیات در تورین ایتالیا در سال ۲۰۰۲ توسط دفتر رنتزو پیانو و همکارانش طراحی و ساخته شد. این گنبد حبابی، یکی دیگر از نمونه های گنبد های ترکین می باشد که به صورت ترکیبی از شیشه و فلز ساخته شده است.

۳- برج درختی تخم مرغی شکل، در پارک ملی جنگلی باواریا که در سال ۲۰۰۹ در آلمان ساخته شد. ارتفاع این برج تخم مرغی شکل ۴۴ متر می باشد. ساختار اصلی برج عمدتاً از چوب ساخته شده است و از ۱۶ تیر منحنی متقارن دورانی به صورت ترکین استفاده شده است. [29,30,31]

نمونه هایی از اجرای پوسته تخم مرغی به صورت ترکین



برج درختی	گنبد حباب شیشه ای	گنبد رایشتاگ
(Tree Tower)	(Globe Bubble)	(Reichstag)
آلمان- پارک ملی جنگلی باواریا	ایتالیا- تورین	آلمان- برلین
۲۰۰۹ م.	۲۰۰۲ م.	۱۹۹۹ م.

جدول ۱۱: نمونه هایی از اجرای پوسته های تخم مرغی ترکین در معماری معاصر [29,30,31]

با توجه به مباحث گفته شده مشخص گردید که از طریق بررسی پارامتریک می توان به میزان سطح بهینه، حجم اشغال شده و نیز رابطه سطح به حجم پوسته های تخم مرغی که نمونه ای از پوسته های سین کلاستیک دورانی در طبیعت می باشند، دست یافت. بنابراین به کمک فناوری و ابزارهای محاسباتی مناسب، می توان میزان بهینگی سطوح را معین نمود؛ به عنوان نمونه، افزایش پارامتر ارتفاعی در یک پوسته تخم مرغی، منجر به افزایش بهینگی سطح نسبت به حجم اشغال شده می شود، همچنین با در نظر گرفتن ارتفاع و عرض ثابت، از طریق کاهش مولد های عمودی محیطی، می توان به سطوح پوششی کمتری رسید، در این حالت ممکن است پوسته تخم مرغی در عبور از فرآیند محاسباتی پارامتریک، به پوسته سین کلاستیک دورانی همتراز تبدیل گردد، پوسته های ترکین تخم مرغی یک نمونه از این پوسته ها می باشند. در این پوسته ها مصرف مصالح کاهش یافته و اجرای آنها به نسبت راحت تر و با سرعت بیشتری انجام خواهد شد.

بحث و نتیجه گیری

با توجه به مباحث مطرح شده و اهمیت الگوبرداری از فرم ها و ساختارهای طبیعی، طبیعت به عنوان یک الگوی بسیار غنی، همواره از ابتدای خلقت بشر مورد توجه قرار گرفته است. آنچه که در پوسته های سین کلاستیک دورانی ساخته دست بشر بسیار حائز اهمیت می باشد، ارتباط با طبیعت و بهره مندی از مفاهیم و ایده های نوین فناوری ساخت پوسته های سین کلاستیک دورانی طبیعی است، شناخت هر چه بیشتر فرم و ساختار پوسته های طبیعی می تواند افقی نو در این حوزه محسوب شود. در حال حاضر نمونه های بسیار زیادی از پوسته های سین کلاستیک دورانی در طبیعت وجود دارند که با مطالعه دقیق و کشف ویژگی های خلقت آنها، می توان به بهینگی فرمی و ساختاری آنها پی برد. مطالعه پوسته تخم پرندگان در این پژوهش نشان داد که با وجود تفاوت در شکل تخم پرندگان، فرم و ساختار همه آنها بهینه می باشند. پارامترهایی نظیر اندازه دسته تخم پرنده، نحوه چرخش تخم پرنده، تعیین شاخص بال (HWI) و رابطه آن با تخم پرنده، رابطه پرواز و درجه کشیدگی مخروطی و بیضوی تخم پرنده، و همچنین پارامتر ساختاری تخم پرنده و رابطه تعادل فشار بین محتویات تخم و مجرای عبور تخم پرنده مادر، از عوامل موثر در شکل گیری بهینه تخم پرندگان با اشکال گوناگون می باشند. از طرفی بررسی های پارامتریک از طریق مدل سازی ۴ نمونه تخم مرغ در یک گونه معین با بهره گیری از نرم افزار محاسباتی متلب، نشان داد که می توان میزان بهینگی سطوح نسبت به حجم اشغالی را در یک گونه اندازه گرفت و به بهینه ترین حالت در یک گونه نزدیک تر شد، بنابراین به کمک فناوری و ابزارهای تحلیلی دیجیتال مناسب، می توان میزان بهینگی سطوح را معین نمود؛ نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با افزایش پارامتر ارتفاعی در یک پوسته تخم مرغی، می توان به افزایش بهینگی سطح نسبت به حجم اشغال شده دست یافت، همچنین با در نظر گرفتن ارتفاع و عرض ثابت، از طریق کاهش مولد های عمودی محیطی، می توان به سطح پوششی کمتری رسید. در این حالت، پوسته تخم مرغی در عبور از فرآیند محاسباتی پارامتریک، به پوسته سین کلاستیک دورانی همتراز تبدیل می گردد، پوسته های ترکین تخم مرغی یک نمونه از این پوسته ها می باشند. بنابراین با استفاده از تحلیل بهینگی سطوح پوسته های سین کلاستیک دورانی در طبیعت و نیز تغییر مولد های محیطی در مدل سازی، می توان به پوسته های بهینه تر سین کلاستیک دورانی در معماری رسید و قابلیت های ساختاری این پوسته ها را ارتقاء بخشید. آنچه که در تحلیل میزان بهینگی پوسته های تخم مرغی به عنوان نمونه ای از پوسته های سین کلاستیک دورانی طبیعی شکل گرفت حاکی از آن است که با بکارگیری پوسته های تخم مرغی به صورت ترکین در مقایسه با حالت ساده آن، مصرف مصالح در این پوسته ها کاهش یافته و فرآیند اجرا از طریق مدولاسیون به نسبت راحت تر و با سرعت بیشتری امکان پذیر خواهد بود.

تشکر و قدردانی: این مقاله برگرفته از رساله دکتری نگارنده اول با عنوان « نقش فناوری در بهینه سازی فرم و سازه در معماری زیست الگو، بررسی پوسته های سین کلاستیک» به راهنمایی دکتر محمدرضا متینی و دکتر سید یحیی اسلامی و مشاوره دکتر غلامرضا طلیسچی در دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بروجرد در حال انجام می باشد.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی حاصل پژوهش نویسندگان مقاله و صحت نتایج بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافعی با اشخاص و سازمان ها وجود نداشته است.

سهم نویسندگان: احسان غلامزاده (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۲۵٪)؛ محمد رضا متینی(نویسنده دوم)، پژوهشگر فرعی(استاد راهنما) (۲۵٪)؛ سید یحیی اسلامی(نویسنده سوم)، پژوهشگر فرعی(استاد راهنما) (۲۵٪)؛ غلامرضا طلیسچی(نویسنده چهارم)، پژوهشگر فرعی(استاد مشاور) (۲۵٪).

منابع مالی: از هزینه های شخصی تأمین شده است.

منابع

1- Falahat, M., Shahidi, S. Nature and Its Role in Architectural Design. *Honar-Ha-Ye-Ziba: Memary Va Shahrsazi*, 2010 Jul 14; 2(42): 37-46. https://dorl.net/dor/20.1001.1.22286020.1389.2.42.4.3

2- Feizabadi, M. Bemanian, M. Golabchi, M. Mirhosseini, S. M. Methods of Utilizing Natural Organisms in Technological Architecture. Middle-East Journal of Scientific Research, 2013 Mar; 13 (3): 379-389, https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54829521

3- Medi, H. Imani, M. Biomimic Technology and Nature Inspiration. *Naqshejahan- Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 2018 Jul 16;8(1):47-55 http://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1397.8.1.7.9

4- Matini, M. Kakoei, E. Compliant Mechanisms; an Approach Leading to Reduce Functional Deficiencies of Kinetic Skins. Honar-Ha-Ye-Ziba: Memary-Va-Shahrsazi, 2019 Jun 22; 24 (2): 39-48. https://dx.doi.org/10.22059/jfaup.2019.258891.672029

5- Ghiabaklou, Z. Biomimetic Auditorium Design Inspired by Seashells. *Honar-Ha-Ye-Ziba: Memary Va Shahrsazi*, 2013 Mar 3; 18(3): 17-24. https://dx.doi.org/10.22059/jfaup.2013.51314

6- Moore, F. Understanding Structures. United States: McGraw-Hill Education - Europe.1998; 6-198.

7- Golabchi, Mahmoud and Amiri, Mojtaba, Structural Elements for Architects, Tehran: University of Tehran Press. 2016; 423-544. [Persian]

8- Melaragno, M. An Introduction to Shell Structures: The Art and Science of Vaulting. New York, Van Nostrand Reinhold. 1991 Nov 30; 120-121. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0223-1

9- Mansoori M., Kalantar N., Creasy T., Rybkowski Z. Adaptive Wooden Architecture. Designing a Wood Composite with Shape-Memory Behavior. In: Bianconi F., Filippucci M. (eds) Digital Wood Design. Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, Cham. 2019 Mar; [24] :703-717. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03676-8

10- Farshad, M. Design and Analisis of Shell Structures (Solid Mechanics and Its Applications(16)), Springer Netherlands.1992; [16]: 2-28. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1227-9

11- Nishiyama,Y. The Mathematics of Egg Shape. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2012 May;78(5):679-89. Available from https://ijpam.eu/contents/2012-78-5/8/8.pdf

12- mnch.uoregon.edu [Internet]. Oregon: The Museum of Natural and Cultural History; 2010 [Cited 2021 April 25]. Available from https://mnch.uoregon.edu/collections-galleries/birds-eggs

13- Minke, G. Building with Earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture. Birkhäuser- Publisher for Architecture. Germany. 2006; 11-198.

14- Creswell, K.A.C. The History and Evolution of the Dome in Persia. Journal of the Royal Asiatic society of the Great Britain and Ireland. 1914; 681- 701.

15- Pirnia, M. Iran's Gifts to the World of Dome Architecture. Hanar Va Mardom.1973; [136-137]: 2-7. [Persian]

16- Parsa, S. and Fakhartehrani, F. The Study of Theoretical Geometry of Domes and Arches in Iranian Architecture, First Conference on Technology and Traditional Structures Based on Domes, Tehran. 2013;1:1-11 [Persian] Available from https://civilica.com/doc/205014/

17- Grishman, R. Persian Art: Parthian and Sassanian Dynasties. Translated by B. Farahvashi. Elmi Va Farhangi Publication. Tehran. 1991;137 [Persian]

18- Chilton, J. Space Grid Structures. Routledge. New York. 1999; 1.

19- Lan, Tien. T. Space Frame Structures, Structural Engineering Handbook, Ed. Chen Wai-Fah, CRC Press LLC. Boca Raton. Florida. 2005 Sep; 956-1013.

20- Ghyka, M. C. Esthétique des proportions dans la nature et dans les arts. Editorial Poseidon. 1979; 6-320.

21- Mytiai IS, Matsyura AV. Mathematical interpretation of artificial ovoids and avian egg shapes (part I). *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2019 Feb; 10(1):92-102. https://doi.org/10.15421/021915

22- mvz.berkeley.edu [Internet]. Berkeley: Museum of Vertebrate Zoology; 2020 [Cited 2021 May 3]. Available from https://mvz.berkeley.edu/mvzegg/

23- Stoddard, M. C., E. H. Yong, D. Akkaynak, C. Sheard, J. Tobias and L. Mahadevan. 2017. Avian egg shape: Form, function and evolution. Science. Washington DC. 2017 Jun 23; [356] 1249-1254. http://dx.doi.org/10.1126/science.aaj1945

24- vis.sciencemag.org [Internet]. Washington DC.: Sciencemag. 2017 [Cited 2021 May 25]. Available from https://vis.sciencemag.org/eggs.

25- Sheard, C., Neate-Clegg, M.H.C., Alioravainen, N. et al. Ecological drivers of global gradients in avian dispersal inferred from wing morphology. Nature Communications. 2020 May 18;11,2463. https://doi.org/10.1038/s41467-020-16313-6

26- Fu, F. Advanced modelling techniques in structural design: John Wiley & Sons. 2015; 11-153

27- Hass, J.R. & Heil, C.D. & Weir,M.D. Thomas' Calculus.14th Edition, Pearson. 2017; 737

28- nationalgeographic.com [Internet]. Washington DC.: National Geographic. 2017 [Cited 2021 July 27]. Available from https://www.nationalgeographic.com/animals/article/bird-eggs-shapes-flight-evolution

29- archisearch.gr [Internet]. Berlin: archisearch. 2021 [Cited 2021 Aug 26]. Available from https://www.archisearch.gr/architecture/egg-shaped-architecture

30- galinsky.com [Internet]. Florida: galinsky. 2003 [Cited 2021 Aug 26]. Available from http://www.galinsky.com/buildings/reichstag/index.htm

31- atlasofplaces.com [Internet]. Geneva: Atlas of Places. 2018 [Cited 2021 Aug 29]. Available from https://www.atlasofplaces.com/architecture/lingotto-factory/