Online ISSN: 3041-9255

**Journal of Human Ecology**

journal homepage: http://www.landscapeecologyjournals.ir/

Research Paper

# Application of the Proposed Interactive Evolutionary Algorithm in Multi-Objective Optimization of Sports Hall Roofs: Integrating Structural and Aesthetic Criteria

**Mahmoud Firouzi*[1]**

1 Faculty of Architecture and Urban Planning, Department of Architectural Technology; Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

**Keywords**

Form generation, interactive evolutionary optimization, algorithmic design, geometric

**A B S T R A C T**

This research introduces an interactive evolutionary optimization algorithm aimed at integrating aesthetic geometry with structural performance requirements in the design of long-span truss roofs. The proposed algorithm generates optimized forms by employing proportional formulas inspired by natural patterns and Islamic geometry. Within this multi-objective optimization framework, a combination of stochastic generation and human feedback is utilized to simultaneously address structural and aesthetic criteria. The algorithm was tested in the design of a basketball hall, where results indicated that higher ratios such as 2.236 yielded superior performance across multi-objective targets. However, the ratio of 0.75 was ultimately selected due to its balanced visual and structural qualities, producing the final form. Compared to the architect's initial design, this solution demonstrated substantial improvements, including up to 40% weight reduction and over 1000% enhancement in proportional consistency. Overall, the approach not only strengthened design creativity and reduced time but also established a systematic framework for advancing algorithm-driven interactive design methods in architecture.

*Corresponding Author.
Email Adresses: mam.firoozi@mail.sbu.ac.ir

Firouzi, M. (2025). Design and Optimization of a Gymnasium Roof Using an Interactive Evolutionary Algorithm: Combining Structural and Aesthetic Criteria. Human Ecology, 4(11), 1070-1088.

**Doi:** https://doi.org/10.22034/he.2025.545791.1140

سال چهارم، شماره یازدهم، تابستان ۱۴۰۴، ۱۰۷۰-۱۰۸۸.

شاپای الکترونیکی: ۹۲۵۵-۳۰۴۱

**فصلنامه اکولوژی انسانی**

http:// www.landscapeecologyjournals.ir

**مقاله پژوهشی**

# طراحی و بهینه‌سازی سقف سالن ورزشی با استفاده از الگوریتم تکاملی-تعاملی: تلفیق معیارهای سازه‌ای و زیبایی‌شناسانه

**محمود فیروزی*[۱]**

۱ دانشکده معماری و شهرسازی، دپارتمان فناوری معماری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

**چکیده**

**این پژوهش با هدف ادغام هندسه زیبایی‌شناسانه با الزامات عملکردی سازه در طراحی سقف‌های خرپایی با دهانه بلند، الگوریتمی بهینه‌سازی تعاملی-تکاملی را پیشنهاد می‌دهد. این الگوریتم با بهره‌گیری از فرمول‌های تناسباتی الهام‌گرفته از الگوهای طبیعی و اسلامی، به تولید فرم‌های بهینه می‌پردازد. در این فرایند بهینه‌سازی چندهدفه، ترکیبی از مولدهای تصادفی و بازخورد انسانی برای پاسخگویی هم‌زمان به معیارهای سازه‌ای و زیبایی‌شناسانه به کار گرفته می‌شود. الگوریتم پیشنهادی در طراحی یک سالن بسکتبال مورد آزمون قرار گرفت و نتایج نشان داد که نسبت‌های بالاتر مانند ۲.۲۳۶ بهترین عملکرد را در اهداف چندهدفه ارائه می‌دهند، اما نسبت ۰.۷۵ به دلیل تعادل بصری و عملکردی، فرم نهایی را تشکیل داده و در مقایسه با فرم اولیه معمار، بهبود چشمگیری، از جمله کاهش وزن تا ۴۰ درصد و رشد بیش از ۱۰۰۰ درصدی در تحقق تناسبات را نشان داد. این رویکرد در مجموع خلاقیت طراحی را تقویت کرده و زمان را کاهش داده و چارچوبی منظم برای توسعه‌ی روش‌های طراحی مبتنی بر الگوریتم‌های تعاملی در معماری ارائه می‌دهد.**

**واژگان کلیدی**

**تولید فرم، بهینه سازی تکاملی تعاملی، طراحی الگوریتمی، تناسبات هندسی، سقف خرپایی با دهانه بلند**

**ارجاع به این مقاله:** فیروزی، محمود . (۱۴۰۴). طراحی و بهینه‌سازی سقف سالن ورزشی با استفاده از الگوریتم تکاملی-تعاملی: تلفیق معیارهای سازه‌ای و زیبایی‌شناسانه. اکولوژی انسانی، ۴(۱۱)، ۱۰۷۰-۱۰۸۸.

## ۱. مقدمه

امروزه ادغام ملاحظات زیبایی‌شناختی در فرآیند طراحی سازه ها، به‌ویژه در قالب‌های معماری نظیر سقف‌های خرپایی با دهانه بلند، به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان عاملی کلیدی در ایجاد تعادل میان عملکرد سازه‌ای و کیفیت بصری شناخته می‌شود. با تحول رویکردهای معاصر در معماری، نیاز به در نظر گرفتن هم‌زمان عملکرد ساختاری و ارزش‌های زیبایی‌شناختی در فرآیند طراحی بیش از پیش احساس می‌گردد. به‌ویژه استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی چندهدفه که ضمن پاسخ‌گویی به قیود مهندسی متعارف، معیارهای زیبایی‌شناختی موردنیاز معماری مدرن را نیز در نظر می‌گیرد (Fonseca et al., 1995; Deb et al., 2002).

در همین راستا، در پژوهشی توسط (Bailey, Raich., 2017) شیوه‌ای نوآورانه برای استخراج و به‌کارگیری ترجیحات طراحی کاربران در بهینه‌سازی چندهدفه خرپاهای با دهانه بلند ارائه دادند. آنان با استفاده از نقشه‌های خودسازمان‌ده (Self-Organizing Maps) و شبکه‌های هیبریدی عصبی، توانستند ترجیحات کاربران را شناسایی و پیش‌بینی کرده و این اطلاعات را در کنار معیارهای کلاسیک طراحی سازه به سیستم ارزیابی توابع برازش در الگوریتم ژنتیک وارد کنند. در ادامه این رویکرد، (Byrne et al.,2017) دستورزبانی طراحی (Design Grammar) ارائه دادند که از طریق الگوریتم‌های تکاملی-تعاملی قادر به تولید طرح‌هایی با جلوه‌های زیبایی‌شناختی متنوع است. آنان با به‌کارگیری توابع برازش مبتنی بر اهداف مهندسی، امکان ارزیابی خودکار طرح‌ها و کاهش فضای جست‌وجوی در دسترس کاربر را فراهم ساختند؛ بدین ترتیب فرآیند انتخاب گزینه‌های طراحی برای معماران و مهندسان تسهیل گردید.

همچنین، (Huang et a;., 2011) نیز الگوریتم ژنتیک تعاملی (IGA) را در طراحی فرم‌های سازه‌ای معرفی کردند. در این رویکرد، تحلیل سازه‌ای به‌صورت محاسباتی توسط رایانه انجام می‌شود و هم‌زمان ارزیابی زیبایی‌شناختی از سوی معمار صورت می‌گیرد. این فرآیند دوهدفه (bi-objective) قادر است اشکالی را پدید آورد که هم از نظر سازه‌ای بهینه بوده و هم با ترجیحات زیبایی‌شناختی طراحان انطباق داشته باشند. (Yousif et al., 2011) نیز رویکردی را پیشنهاد دادند که در آن با بهره‌گیری از جمعیت‌های اولیه مبتنی بر معیارهای زیبایی‌شناختی در الگوریتم‌های تکاملی و استفاده هم‌زمان از توابع برازش مهندسی‌محور، مجموعه‌ای از طرح‌های کاندیدا تولید می‌شود که علاوه بر دارا بودن کیفیت بصری مناسب، از عملکرد فنی مطلوب نیز برخوردارند.

لذا با پیشرفت‌های اخیر در حوزه‌های محاسبات و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، امکان به‌کارگیری تکنیک‌های نوین مانند بهینه‌سازی تعاملی تکاملی در فرآیند طراحی معماری فراهم شده است. این تکنیک‌ها، با ترکیب بازخورد کاربران و قابلیت‌های الگوریتم‌های تکاملی، به طراحان اجازه می‌دهند که در فرآیند طراحی، کنترل بیشتری بر جهت و شکل‌گیری فرم‌ها داشته باشند و به کشف فرم‌های نوآورانه و کارآمد بپردازند. لذا این پژوهش نیز تلاش دارد که با تعریف جنبه های زیبایی‌شناسانه و هنری هندسه در طراحی معماری و گنجاندن آن‌ها در روند طراحی، با ترکیب قابلیت‌های محاسباتی و بازخورد انسانی، بستری مناسب برای کشف فرم‌های خلاقانه و کارآمد ارائه دهد، زیرا در حالی که هندسه یکی از عوامل کلیدی در خلق فرم‌های زیبا و جذاب در معماری است، متاسفانه در سالهای اخیر این جنبه از طراحی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هندسه، علاوه بر نقش اساسی در تعیین فرم و ساختار بنا، می‌تواند به خلق فضاهایی با ارزش‌های فرهنگی و هنری منحصر به فرد کمک کند(جهانی و همکاران، ۱۳۹۵).

لذا این پژوهش، با هدف پر کردن شکاف موجود در ادبیات تحقیق، به بررسی و پیشنهاد الگوریتمی برای ترکیب هندسه زیبایی‌شناسانه وارتقاء عملکرد سازه‌ای در طراحی سقف‌های با دهانه بلند می‌پردازد که آن بر پایه‌ی یک الگوریتم بهینه‌سازی تعاملی تکاملی برای تولید فرم‌های هندسی در سقف‌های خرپایی ارائه می شود که ترکیبی از تناسبات برگرفته از طبیعت به‌عنوان اهداف زیبایی‌شناسانه و نیازهای عملکردی سازه‌ای را در نظر می‌گیرد.

## ۲-مروری بر مفاهیم ومبانی نظری:

### ۲-۱. هندسه

هندسه شاخه ای از ریاضیات است که به خواص و روابط نقاط، خطوط، سطوح و احجام مربوط می شود(Euclid., 1956). از دیدگاه فلسفی، افلاطون با استناد به وجود عالم مُثُل و دوساحتی بودن انسان (جسم و روح) ، معتقد است که روح قبل از حلول در جسم انسان وجود داشته و در عالم مثل ساکن بوده است. ولی با ورود به جسم دچار فراموشی شده و آن مثال‌های اعلا را از یاد می برد. هنگامی که بشر صورتهای گوناگون جهان طبیعت را می بیند، خاطره ای مبهم در روحش جرقه می زند( طاهباز، ۱۳۸۳). دیدگاه افلاطون درباره جهان مُثُل و نظریه یادآوری، نشان‌دهنده این است که شناخت انسان از واقعیت فراتر از تجربه حسی سطحی است. این نظریه، علاوه بر اهمیت فلسفی، در زمینه‌های هنری و معماری نیز می‌تواند الهام‌بخش باشد؛ چرا که استفاده از تناسبات و الگوهای هندسی در طراحی، می‌تواند به نوعی پل ارتباطی بین دنیای حسّی و عالم ایده‌آل تبدیل شود. به بیان دیگر، وقتی سازه‌ای با رعایت تناسبات معین و الگوهای ریاضی طراحی می‌شود،

ممکن است ناظر نیز به‌صورت ناخودآگاه به دنیای مثالی که روح از آن یادآوری می‌کند، دعوت گردد. این امر، نه تنها به زیبایی‌شناسی اثر عمق فلسفی می‌بخشد، بلکه ارزش ادراکی آن را نیز افزایش می‌دهد.

### ۲-۲-هندسه و کاربردهای آن در معماری:

هندسه از دیرباز یکی از اساسی‌ترین علوم برای درک و طراحی فرم‌های معماری بوده است. از فیثاغورس و افلاطون تا معماران مدرن، مفهوم هندسه به عنوان یک ابزار برای بیان نظم و زیبایی در ساختارهای طبیعی و انسانی به کار رفته است. فیثاغورس بر این باور بود که جهان از نظم عددی ساخته شده و این نظم در موسیقی و معماری نیز نمایان می‌شود. افلاطون نیز هندسه را به عنوان ابزاری برای شناخت حقیقت و درک دنیای مُثُل معرفی کرد.( طاهباز، ۱۳۸۳). بررسی آثار موجود در این رابطه نشان می‌دهد که توجه به مفاهیم بنیادین ریاضی و هندسی، از گذشته‌های دور تاکنون، بخش جدایی‌ناپذیری از فرایند طراحی معماری بوده است. فیثاغورس، با تکیه بر نظم عددی، بر این باور بود که درک ساختار ریاضی جهان کلید فهم هارمونی در هنر و معماری نیز هست. از سوی دیگر، افلاطون تأکید داشت که مفاهیم هندسی تنها جنبه عملی برای ساخت بناها ندارند، بلکه می‌توانند راهی برای شناخت حقیقت و درک عمیق‌تر از ماهیت هستی باشند. از منظر امروزی، این رویکردهای فلسفی–ریاضی در مورد هندسه همچنان الهام‌بخش معماران مدرن است. فرم‌های هندسی پیچیده، ساختارهای متقارن یا الگوهای مدولار در معماری مدرن و معاصر، همگی به‌نوعی ریشه در ایده‌های فیثاغورس و افلاطون دارند که نظم درونی جهان را در قالب اعداد و اشکال می‌دیدند. نگاهی به آثار معمارانی مانند لوکوربوزیه، با خطوط ساده و تناسبات هندسی روشن، تا پروژه‌های پارامتریک امروزی، گواه آن است که مفاهیم بنیادین هندسه همچنان منبعی غنی برای نوآوری در فرم و نظم‌بخشی به فضاهای ساختمانی محسوب می‌شوند.

### ۲-۳- تناسبات و نظم‌های هندسی:

تناسبات هندسی، از اصول بنیادین در طراحی معماری بوده‌اند. ویتروویوس، معمار رومی، بر این باور بود که تناسبات در معماری باید از طبیعت و بدن انسان الهام گرفته شوند و همه اجزا باید نسبت‌های دقیق و متقارنی با کل بنا داشته باش(Smit & Coull., 1991). تناسبات هندسی و نظم ریاضی، که ویتروویوس از آن‌ها به‌عنوان پایه‌های اساسی طراحی یاد می‌کند، نه‌تنها در معماری روم باستان بلکه در سنت‌های مختلف معماری جهان، از جمله معماری ایران، حضوری پررنگ داشته‌اند. تأکید او بر الگوبرداری از طبیعت و اندام انسان نشان‌دهنده این است که ترکیب اصول زیست‌شناختی با مبانی هندسی، می‌تواند به خلق فضاهایی متناسب و زیبا منجر شود.

در معماری ایران، بهره‌گیری از «هندسه‌های مقدس» و الگوهای نمادین مانند دایره، مربع و شش‌ضلعی، از جنبه‌های شاخص در بناهای آیینی و مقدس است. این الگوهای تکرارشونده، علاوه بر القای نظم بصری، از باورهای فلسفی و عرفانی نیز نشئت می‌گیرند و به فضا بعدی معنوی می‌بخشند. وجود چنین شباهت‌هایی در سنت‌های گوناگون معماری (از روم باستان تا ایران) نشان می‌دهد که آرمان زیبایی‌شناسانه انسان در زمینه طراحی، همواره در راستای هماهنگی میان خرد (هندسه) و طبیعت (الگوهای ارگانیک) بوده است.

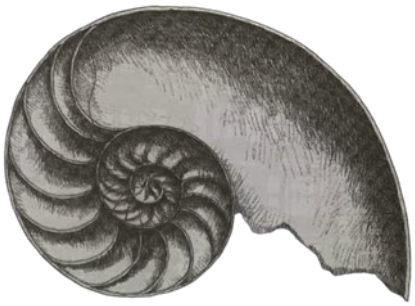
### ۲-۴-نظم هندسی زیبایی شناسی فرمی:

این نوع نظم هندسی معمولاً با واژگانی مانند تناسب، تقارن، ریتم، تضاد، سلسله مراتب، وحدت، کثرت، فضای خالی و... توصیف می‌شود. بسیاری از محققان این نظم را بررسی کرده‌اند و با نام‌های مختلفی به آن پرداخته‌اند. نکته بسیار مهم در این انتظام هندسی این است که تأثیر مراکز، سلسله مراتب، ریتم و تکرار، تقارن، تناسب و... بر زیبایی‌شناسی فرمی؛ مشابهت قوانین هندسی و ریاضی موجود در طبیعت و معماری؛ و ماهیت معنایی این قوانین همگی بر اساس یک مسئله بسیار مهم یعنی زیبایی‌شناسی فرم تنظیم و ساماندهی شده‌اند.سلسله مراتب، ریتم و تکرار، تقارن، تناسب و... همگی با هدف ایجاد زیبایی‌شناسی در مقیاس فرم و پاسخ به نیازهای معنایی در معماری تنظیم شده‌اند. به دلیل اهمیت اساسی زیبایی‌شناسی فرم در این نوع نظم هندسی، این نوع انتظام به عنوان «انتظام هندسی زیبایی‌شناسی فرمی» نامگذاری شده است. بر همین اساس، انتظام هندسی زیبایی‌شناسی فرمی را می توان به صورت :« آرایش اجزای معماری براساس اصول و قواعد هندسی (مراکز، سلسله‌مراتب، ریتم و تکرار، تقارن، تناسب و...) در راستای ایجاد زیبایی در مقیاس فرم و پاسخگویی به نیازهای معنایی درمعماری است» تعریف نمود (صاحب محمدیان و همکاران، ۱۳۸۹).

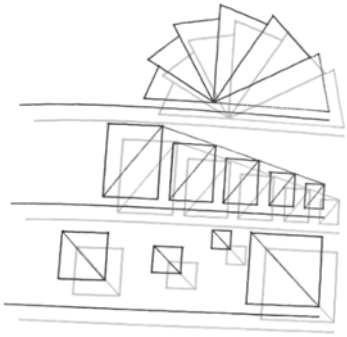
### ۲-۵-تناسب و نقش آن در معماری

تناسب در هندسه، موسیقی و هنر به‌عنوان رابطه‌ای هماهنگ میان اجزا و کل تعریف می‌شود. ویتروویوس در آثار خود بر این نکته تأکید داشت که همان‌گونه که اجزای بدن انسان متناسب با کل آن هستند، در معماری نیز اجزا باید در نسبت دقیق با کل طرح قرار گیرند تا اثری زیبا و منسجم پدید آید(Alberti., 1987). در تناسب، مفهومی بنام هارمونی در معماری مطرح است که فراتر از تعادل فیزیکی، شامل تعادل بصری نیز می‌شود. در معماری کلاسیک، تقارن و هارمونی به‌عنوان اصولی منطقی و قابل‌محاسبه در طراحی فضا به کار گرفته می‌شدند و بدن انسان ایده‌آل الگویی برای این تناسبات به شمار می‌رفت. این نگاه ریاضی‌محور به زیبایی، نشان می‌دهد که ترکیب قوانین هندسی با شهود طراح می‌تواند به خلق آثاری منجر شود که هم منطقی و هم از نظر ادراکی تحسین‌برانگیز باشند.

به‌طور کلی، نظریه‌های تناسبات بر ایجاد نظمی هماهنگ و قابل‌ادراک میان اجزای سازه و کل بنا تأکید دارند. بر اساس دیدگاه اقلیدس، نسبت زمانی معنا پیدا می‌کند که روابط کمی میان اجزا برابر باشند و همین برابری مبنای ایجاد وحدت بصری و نظم فضایی در معماری است (چینگ، ۱۴۰۰). این روابط می‌توانند از محدودیت‌های ساختاری و مصالح نیز تأثیر بگیرند، اما در نهایت چارچوبی ذهنی برای طراح ایجاد می‌کنند که در آن تناسبات انسانی، نسبت طلایی یا قواعد مدرن طراحی به‌عنوان ابزار سنجش زیبایی و کارایی به کار می‌روند( چینگ، ۱۴۰۰). نهایتاً، نظم مطلوب زمانی به دست می‌آید که وحدت و تنوع به شکلی متوازن در معماری تلفیق شوند. نمونه‌هایی همچون پوسته‌ی حلزون ناتیلوس نشان می‌دهد که طبیعت با استفاده از الگوهای تناسبی، وحدت ساختاری را در کنار زیبایی بصری ایجاد می‌کند؛ الگویی که با نسبت طلایی قابل بازتولید است و الهام‌بخش طراحی معماری در مقیاس‌های مختلف محسوب می‌شود(چینگ، ۱۴۰۰).



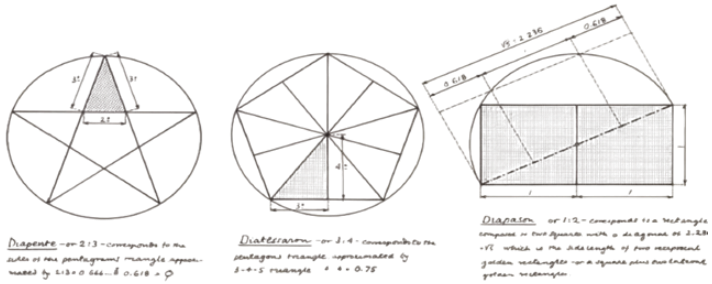
**شکل۱. پوسته حلزون ناتیلوس،**
**مأخذ:فرانسیس‌دی‌کی‌چینگ،فرم فضا و نظم**



**شکل ۲. مدل ریاضی پوسته حلزون،**
**مأخذ:فرانسیس‌دی‌کی‌چینگ،فرم فضا و نظم**

## ۶-۲-ریتم و کارکرد آن در معماری

ریتم به تکرار منظم یا نامنظم عناصر در فضا یا فرم اطلاق می‌شود و می‌تواند هم درک بصری ناظر و هم تجربه حرکتی او در توالی‌های فضایی را تحت تأثیر قرار دهد. از منظر معماری، تقریباً همه ساختمان‌ها بر پایه عناصری تکرارشونده شکل می‌گیرند؛ از ستون‌ها و تیرها گرفته تا مدول‌های فضایی و بازشوهای متعدد. این تکرارها علاوه بر پاسخ به نیازهای عملکردی، ساختاری هماهنگ و قابل‌ادراک برای مخاطب ایجاد می‌کنند (چینگ، ۱۴۰۰). چنین رویکردی یادآور این نکته است که زیبایی اغلب بر پایه نظمی درونی و تعادلی پنهان شکل می‌گیرد که گرچه همواره آشکار نیست، اما در ادراک انسانی نقشی اساسی دارد. کپلر در نظریه‌ی «هارمونی جهانی» بیان می‌کند که حرکات کیهانی نیز همانند موسیقی بر اساس نسبت‌های هماهنگ سامان یافته‌اند (Kepler., 1995). این نگاه به پیوند بنیادین میان ریاضی، موسیقی و زیبایی، در معماری نیز انعکاس یافته است؛ جایی که نظم فضایی همانند گام‌های موسیقایی به‌وسیله تناسبات هندسی تعریف می‌شود. لوکوربوزیه نیز موسیقی را تمرینی ریاضی‌گونه می‌داند که همچون معماری از تکرار، تناسب و نظم برای خلق هارمونی بهره می‌گیرد. بر این اساس، معماری را می‌توان «موسیقی منجمد» دانست که به جای صدا، با فرم، فضا و نور بیان می‌شوند. آلبرتی در دوره رنسانس، تناسبات عددی موسیقایی فیثاغورث را مبنای خلق معماری‌ای معرفی کرد که هم از نظر سازه‌ای مؤثر و هم از نظر زیبایی‌شناختی ارزشمند باشد. در این رویکرد، همان اعدادی که اصوات هماهنگ را پدید می‌آورند، در سطح بصری نیز تجربه‌ای دلپذیر ایجاد می‌کنند. نسبت‌های موسیقایی مانند اکتاو (۱:۲)، پنجم (۲:۳) و چهارم (۳:۴) نه تنها در صدا بلکه در فرم‌های هندسی و ترکیبات معماری بازتاب یافته‌اند. این نسبت‌ها، به‌ویژه در پیوند با نسبت طلایی، نشان می‌دهند که اصول هارمونی موسیقایی قابلیت تبدیل‌شدن به الگوهای هندسی و تناسبی در طراحی معماری را دارند( Doczi., 1994).

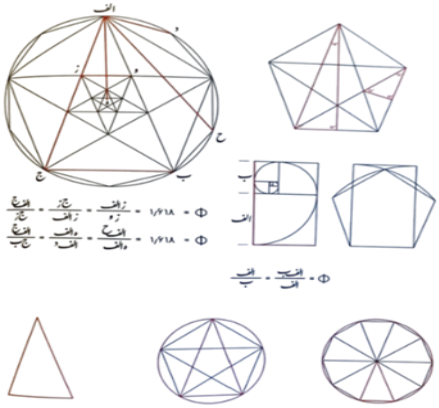


**شکل ۳. معادل‌های بصری هارمونی‌های موسیقی فیثاغورثی و ساخت نسبت طلایی**
**مأخذ:**Doczi ,1994

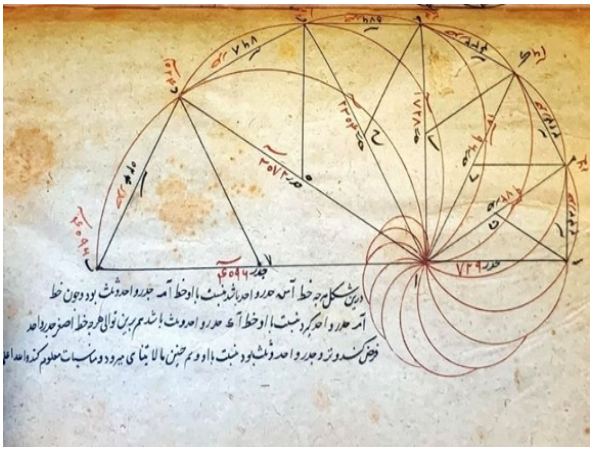
## ۲-۷-نسبت‌های طلایی در معماری ایران

شهریار حاتمی در کتاب *نهان بر عیان* درباره ابوالوفا بوزجانی، ریاضی‌دان برجسته قرن چهارم هجری، می‌نویسد که او یکی از تأثیرگذارترین چهره‌ها در تاریخ هندسه کاربردی به شمار می‌رود. اثر مهم او، *النجارة*، نمونه‌ای کم‌نظیر از پیوند مباحث نظری هندسه با نیازهای عملی صنعتگران و معماران است. بوزجانی در این کتاب با ترسیمات دقیق و تنها با استفاده از خط‌کش و یک‌بار گشودن پرگار، ساختارهایی چون چندوجهی‌های منتظم و نیمه‌منتظم را ارائه می‌کند؛ رویکردی که فراتر از سنت اقلیدسی بوده و افق‌های تازه‌ای را در هندسه کاربردی می‌گشاید(Ivins., 1964). ویژگی متمایز هندسه بوزجانی، تأکید بر زاویه و درک سه‌بعدی فضا، به‌ویژه در سطوح کروی، است.

در حوزه تناسبات، بوزجانی برای رسم پنج‌ضلعی از مثلث متساوی‌الساقین با زاویه ۳۶ درجه در رأس استفاده می‌کند؛ مثلثی که در آن نسبت «ذات وسطین و طرفین» (نسبت طلایی) برقرار است. اگر دایره محیطی این مثلث ترسیم شود، قاعده مثلث به پنج بخش مساوی تقسیم شده و پنج‌ضلعی منتظم به دست می‌آید. همچنین، با قرار دادن رأس مثلث به‌عنوان مرکز و ترسیم دایره‌ای به شعاع یکی از ساق‌ها، قاعده مثلث محیط دایره را به ده قسمت مساوی تقسیم می‌کند و از این طریق ده‌ضلعی منتظم ایجاد می‌شود. نسبت ضلع ده‌ضلعی به شعاع دایره همان نسبت طلایی است. این روش‌های هندسی نشان‌دهنده عمق درک بوزجانی از نسبت‌های عددی و کاربرد آن‌ها در خلق فرم‌های متقارن و موزون هستند(Ivins., 1964).



**شکل۴. :نسبت ذات طرفین وسطین(نسبت طلایی) در هنر ایرانی شهریار حاتمی،نهان بر عیان،۱۴۰۰**



**شکل ۵. روش ترسیم اعداد اصم به شیوه ی بوزجانی ،مآخذ:شهریار حاتمی،نهان بر عیان،۱۴۰۰**

## ۲-۸-سازه‌های فضا کار و خرچاهای دهانه بلند

سازه‌های فضاکار، به‌ویژه خرپاهای سه‌بعدی، از کارآمدترین سیستم‌های سازه‌ای برای پوشش فضاهای وسیع و بدون ستون میانی محسوب می‌شوند. این سازه‌ها با بهره‌گیری از شبکه‌های هندسی منظم ـ متشکل از مثلث‌ها، مربع‌ها یا چندضلعی‌های پایدار ـ امکان توزیع یکنواخت بار در سه بعد را فراهم می‌سازند. از نظر اجرایی نیز، سازه‌های فضاکار مزایای متعددی دارند: قطعات آن‌ها در کارخانه و تحت شرایط کنترل‌شده تولید می‌شوند که به دقت و یکنواختی بالا منجر می‌شود. وزن پایین اجزا و مدولار بودن سیستم، حمل‌ونقل آسان بدون تجهیزات سنگین و مونتاژ سریع در محل پروژه را ممکن می‌سازد. این ویژگی‌ها نه تنها زمان اجرا را کاهش می‌دهند بلکه صرفه‌جویی اقتصادی چشمگیری نیز به همراه دارند.خرپاهای دهانه‌بلند یکی از مهم‌ترین راه‌حل‌ها برای پوشش فضاهای وسیع بدون ستون میانی هستند و کاربرد گسترده‌ای در سالن‌های ورزشی، نمایشگاه‌ها، فرودگاه‌ها، پل‌ها و فضاهای صنعتی دارند. بر اساس تعاریف مهندسی، خرپاهای دهانه‌بلند به سازه‌هایی گفته می‌شود که توانایی پوشش دهانه‌هایی بیش از ۲۰ متر را دارند. عملکرد آن‌ها مبتنی بر تبدیل بارهای خمشی به نیروهای کششی و فشاری در اعضای منفرد است؛ رویکردی که با حداقل مصرف مصالح، امکان کاهش وزن مرده سازه و دستیابی به دهانه‌های بسیار بزرگ را فراهم می‌سازد( Smith, Coull, 1994). ویژگی متمایز خرپاهای دهانه‌بلند، انعطاف‌پذیری آن‌ها در پذیرش الگوهای هندسی متنوع است. فرم‌های مثلثی، مربعی، لوزی‌شکل و حتی ساختارهای پیچیده الگوریتمی می‌توانند در قالب این سیستم‌ها پیاده‌سازی شوند بدون آن‌که عملکرد مکانیکی آن‌ها مختل گردد.

شکل۶. سقف خرپایی فرودگاهTaiwan Taoyuan

## ۹-۲-بهینه‌سازی تعاملی و نقش آن در فرآیند طراحی

با پیشرفت‌های اخیر در محاسبات و یادگیری ماشین، تحلیل داده‌ها به ابزاری مؤثر برای طراحان تبدیل شده است. این ابزارها توانایی شناسایی الگوها، استخراج اطلاعات مفید و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در کاوش فضای طراحی را دارند. با این حال، در رویکردهای پارامتریک، تعریف فضای طراحی کارآمد مستلزم صرف زمان و تلاش قابل توجه است(Brown, Mueller., 2020) .

فرآیند طراحی معماری و سازه به طور معمول شامل چهار مرحله‌ی متوالی است: طراحی مفهومی، طراحی شماتیک، توسعه طراحی و اسناد ساخت. در این میان، مرحله‌ی طراحی مفهومی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا تصمیمات اساسی درباره هندسه، جرم‌گذاری و فرم کلی پروژه عمدتاً در این مرحله اتخاذ می‌شوند. این مرحله غالباً پیش از ورود جدی مهندسان سازه و توسط تیم معماری هدایت می‌گردد. اهمیت آن در این است که شکل کلی سازه، تأثیری تعیین‌کننده بر عملکرد نهایی دارد؛ حتی بیش از مصالح یا ابعاد اعضا. در این بستر، تکنیک‌هایی چون طوفان فکری به‌عنوان ابزاری برای افزایش خلاقیت و تولید ایده‌های متنوع مطرح می‌شوند. برخلاف بهینه‌سازی استاندارد که عمدتاً بر اهداف کمی استوار است، رویکردهای تعاملی تلاش می‌کنند تا اهداف کیفی طراحی را نیز با مشارکت فعال طراحان در نظر بگیرند. این الگوریتم‌ها که به‌عنوان «بهینه‌سازی تعاملی» یا «انسان–رایانه» شناخته می‌شوند، قابلیت غلبه بر محدودیت‌های روش‌های سنتی را دارند (Mueller et al., 2015; Mueller et al., 2014). در بهینه‌سازی تعاملی، ابزارهای طراحی باید توازن میان هدایت کاربر و آزادی کاوش در فضای طراحی را برقرار کنند. از آنجا که در معماری پاسخی واحد و مطلق وجود ندارد، این ابزارها باید طیف گسترده‌ای از گزینه‌ها را تولید کنند؛ مشابه یک عضو خلاق در جلسه‌ی طوفان فکری که ایده‌های نوآورانه و غیرمنتظره ارائه می‌دهد.

## ۳-روش شناسی تحقیق

این پژوهش از نوع کاربردی–توسعه‌ای است و با رویکرد محاسباتی–تعاملی به بررسی نقش بهینه‌سازی تکاملی در طراحی مفهومی سازه‌های فضاکار دهانه‌بلند می‌پردازد. مطالعه‌ی موردی تحقیق، پروژه‌ی مسقف‌سازی زمین فوتبال مدرسه‌ی نیکان و تبدیل آن به سالن بسکتبال سرپوشیده با ظرفیت تماشاگر است. در این پروژه، هدف ایجاد سقفی با دهانه ای مناسب است به‌گونه‌ای که پوشش کامل زمین و دید مناسب برای سکوی تماشاگران تضمین شود. در گام نخست، پوسته‌ای اولیه برای سقف به‌عنوان ورودی تولید و به الگوریتم معرفی گردید تا فرآیند تولید فرم‌های جایگزین و بهینه‌سازی آغاز شود. برای این منظور، از مجموعه ابزارهای طراحی پارامتریک در محیط Grasshopperو موتور بهینه‌سازی توسعه‌یافته توسط گروه سازه‌های دیجیتال MIT استفاده شد؛ ابزاری که به‌طور خاص برای پشتیبانی از طراحی مفهومی مبتنی بر عملکرد و کاوش در فضای طراحی ساخته شده است. این موتور، امکان پیاده‌سازی رویکردهای مختلف بهینه‌سازی چندهدفه شامل اولویت‌بندی اهداف عملکردی به‌صورت پیشینی، پسینی و تعاملی را فراهم می‌سازد. افزون بر قابلیت کاوش در فضای طراحی، این مجموعه ابزار دارای مؤلفه‌هایی برای مدل‌سازی جایگزین، بهینه‌سازی با محدودیت، ساده‌سازی فضای طراحی و سایر نیازهای رایج در طراحی پارامتریک مبتنی بر عملکرد است(MIT Digital Structures., 2019). در فرآیند تحقیق، مجموعه‌ای از فرم‌های اولیه سقف خرپایی تولید و با استفاده از Karamba3D تحت تحلیل سازه‌ای قرار گرفتند. سپس با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی تعاملی، فرم‌های منتخب بر اساس ترکیبی از معیارهای کمی (وزن سازه، تغییر شکل و پایداری) و کیفی (تناسبات هندسی و ارزش‌های زیبایی‌شناسانه) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نقش طراح در این میان انتخاب تعاملی فرم‌های برتر از میان جبهه پارتو بود که با تلفیق قضاوت انسانی و محاسبات الگوریتمی، فرآیند بهینه‌سازی هدایت شد.

## ۴-یافته های تحقیق:

### ۴-۱-فرمول بندی مسئله و معرفی الگوریتم پیشنهادی

مسئله اصلی در این پژوهش بر طراحی سقف‌های خرپایی دهانه‌بلند با تمرکز بر ادغام بهینه اهداف زیبایی‌شناسانه (بر پایه تناسبات بایونیک و معماری اسلامی) و عملکرد سازه‌ای (کمینه‌سازی جرم و کنترل تغییرشکل) استوار است. این مسئله به صورت یک بهینه‌سازی چندهدفه تعریف می‌شود که در آن تابع هدف زیبایی‌شناسانه، کمینه‌سازی اختلاف مطلق ($|M|$) بین نسبت ابعاد سلول‌های شبکه فضاکار ($N$) و ضرایب تناسباتی هدف از پیش‌تعریف‌شده (مانند ۰.۶۱۸ یا ۱.۶۱۸) را دنبال می‌کند، در حالی که تابع هدف سازه‌ای، کمینه‌سازی جرم و کنترل حداکثر تغییرشکل (به عنوان محدودیت فرعی، حداکثر ۵۰۰/۱ دهانه) تحت بارهای مرده با متریال Steel S335 را هدف قرار می‌دهد. الگوریتم پیشنهادی، یک چارچوب تکاملی-تعاملی در محیط Grasshopper و Karamba3D، فرآیند را به صورت سلسله‌مراتبی به شرح زیراجرا می‌کند: ابتدا، پوسته اولیه به عنوان هندسه پایه تعریف شده و پارامترهای ورودی از طریق اسلایدرهای پارامتریک تنظیم می‌گردند؛ سپس، تکیه‌گاه‌ها و ستون‌ها به صورت دستی برای تضمین پایداری سازه‌ای مشخص می‌شوند. شبکه فضاکار با تعریف نقاط در صفحه $X$-$Y$ شکل می‌گیرد، که فاصله در محور $X$ به عنوان پارامتر اصلی (ژن بهینه‌سازی) تعیین شده و فاصله در محور $Y$ با ضرب در ضرایب تناسباتی محاسبه می‌شود. نقاط به سلول‌های مستطیلی تبدیل شده و بردار نرمال در محور $Z$ با مقیاس هماهنگ ($a$ یا $a/2$) تعریف می‌گردد تا انسجام سه‌بعدی حفظ شود. تنوع هندسی از طریق اعمال ۲۰ نقطه کنترل با تلورانس ±۲ متر در محور $Z$ و ضریب مقیاس‌بندی ۱۰ درصدی ایجاد می‌شود. بهینه‌سازی زیبایی‌شناسانه با کمینه‌سازی $|M|$ و بهینه‌سازی سازه‌ای با تحلیل اجزای محدود (FEA) در Karamba3D انجام می‌گیرد. فرآیند با انتخاب تعاملی فرم‌های برتر از جبهه پارتو و تکرار آن به عنوان ژن‌های نسل بعدی تکامل می‌یابد، که این رویکرد پتانسیل تقویت خلاقیت و کارایی در طراحی‌های معماری بایونیک را با فرموله‌سازی دقیق مسئله نشان می‌دهد.

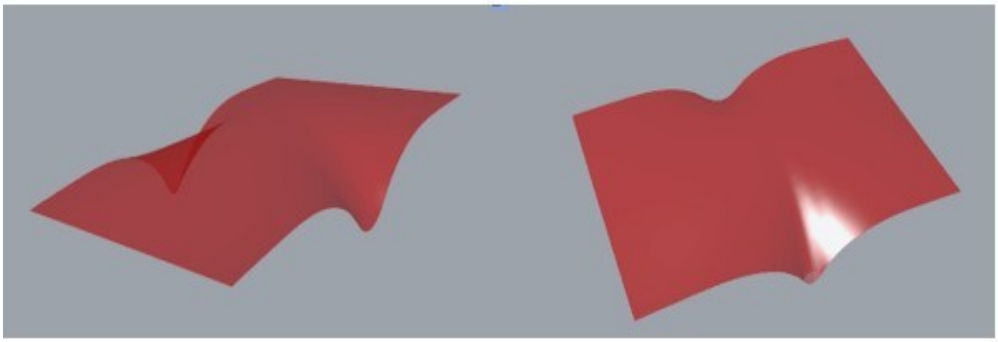
### ۴-۲- تبیین کارایی و نحوه‌ی عملکرد الگوریتم پیشنهادی

با توجه به الگوریتم در نظر گرفته شده، در ادامه چارچوبی یکپارچه برای تلفیق اهداف زیبایی‌شناسانه و عملکردی سازه‌ای در فرآیند طراحی پارامتریک ارائه می‌شود. این فرآیند، که در فاز صفر طراحی آغاز می‌شود، به چند مرحله اصلی زیر تقسیم می شود به چند مرحله اصلی شامل: تعریف نیازها و ایده‌های اولیه، تبدیل ایده اولیه به ورودی الگوریتم، تنظیم و آغاز بهینه‌سازی چندهدفه، تحلیل و ارزیابی فرم‌ها، انتخاب فرم‌های برتر و ورود به بهینه‌سازی تعاملی و نهایتا ارائه گزینه‌های نهایی تقسیم می گردد که در ادامه به ترتیب ارایه خواهد شد.

#### ۴-۲-۱-تعریف نیازها و ورودی ایده‌ی اولیه پروژه به الگوریتم:

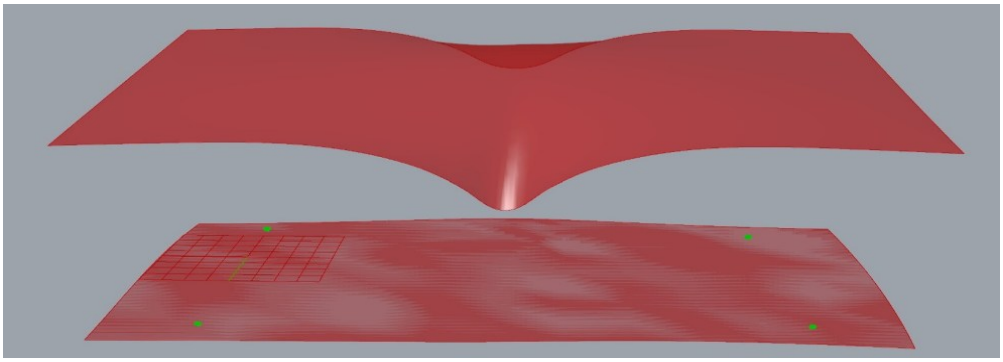
در این مرحله، نیازها و ورودی ایده‌ی اولیه برای پروژه مدرسه نیکان که قصد دارد زمین فوتبال خود در حیاط را مسقف کرده و تبدیل به زمین بسکتبال سرپوشیده کند، مشخص می گردد به طوری که سکوی تماشاچیان دید کامل به زمین داشته باشد. برای تحقق این هدف، یک سقف دهانه بلند با ابعاد ۲۳ در ۳۵ متر تعریف شد تا بر فراز زمین بسکتبال قرار گیرد. گام نخست در این فرآیند، ایجاد گزینه‌هایی برای طراحی و ترسیم پوسته‌ای اولیه به‌عنوان ورودی الگوریتم بود تا بر مبنای آن، الگوریتم بتواند فرم نهایی سازه را پیشنهاد، اصلاح و بهینه‌سازی کند.

**شکل ۷. :نقشه موقعیت پروژه**



**شکل ۸. پوسته‌ی اولیه‌ی وارد شده به فضای طراحی به عنوان ورودی توسط طراح**

پس از وارد کردن صفحه‌ی اولیه نمایی از صفحه‌ی وارد شده در زیر پوسته ایجاد می شود که طراح با توجه به شرایط پروژه مکان دقیق ستون هارا مشخص می کند.



**شکل ۹. مرحله‌ی واردکردن مکان ستون ها توسط طراح**

### ۲-۲-۴-تولید فرم‌ها

پس از تشکیل شبکه‌ی اولیه براساس الگوریتم تشریح‌شده در مطالب پیش، تنظیمات مربوط به موتور محاسباتی سازه‌ای و پارامترهای بهینه‌سازی تناسباتی–سازه‌ای اعمال شد و فرآیند بهینه‌سازی آغاز گردید. در این مرحله، برای هر یک از نسبت‌های هندسی پیشنهادی، ۱۰،۰۰۰ فرم مختلف تولید و مورد ارزیابی قرار گرفتند که در مجموع به تولید ۶۰،۰۰۰ فرم منتهی شد.

### ۳-۲-۴-تنظیمات مربوط به موتور محاسباتی سازه‌ای

در الگوریتم پیشنهادی، برای اطمینان از تحلیل دقیق و مقایسه عادلانه فرم‌های تولیدشده در طراحی سقف خرپایی دهانه‌بلند سالن ورزشی مان، با دقت در محیط Karamba3D تعریف شد. در این مرحله، بار مرده به عنوان نیروی غالب، به صورت خودکار بر اساس وزن سازه و شتاب گرانش محاسبه گردید تا شرایط واقعی بارگذاری شبیه‌سازی شود. سپس برای متریال انتخابی، فولاد Steel S335، به دلیل مقاومت و پایداری بالا برای سازه‌های دهانه‌بلند برگزیده شد، که با مشخصات مکانیکی استاندارد در موتور محاسباتی سازگار است. نهایتا برای تنظیم مقاطع سازه‌ای، به منظور رفع چالش عدم یکنواختی در مقایسه نسبت‌های تناسباتی (۰.۵ تا ۲.۲۳۶)، یک بهینه‌سازی مقدماتی صرفاً سازه‌ای انجام گرفت. در این مرحله، ۵۰۰۰ مدل برای هر نسبت تناسباتی با استفاده از مقاطع لوله‌ای متنوع آزمایش شد تا کمینه‌سازی همزمان جرم و حداکثر جابجایی (≥۵۰۰/۱ دهانه) حاصل گردد. نتایج این بهینه‌سازی، ۴ تا ۷ مقطع بهینه را برای هر نسبت تناسباتی شناسایی کرد، که به عنوان کاندیداهای گسسته در اسلایدر پارامتریک به موتور بهینه‌سازی چندهدفه متصل شدند. این رویکرد، با تضمین تناسب مقاطع با ابعاد مدول‌های متغیر هر نسبت، امکان مقایسه عادلانه و دقیق عملکرد سازه‌ای و زیبایی‌شناسانه را فراهم آورد. لیست‌های مربوط به مقاطع لوله‌ای برای هر نسبت تناسباتی به شرح زیر است:

**جدول ۱. مقاطع انتخابی برای نسبت ۰.۵**

| | قطر ضخامت بیرونی به میلیمتر | قطر گوشته‌ی داخلی به میلیمتر |
|---|---|---|
| ۱. | ۶۰.۳ | ۳.۹ |
| ۲. | ۶۰.۳ | ۵.۵ |
| ۳. | ۶۰.۳ | ۶.۴ |
| ۴. | ۶۳.۵ | ۶.۴ |
| ۵. | ۷۳ | ۴.۸ |

| | | |
|---|---|---|
| ۶. | ۷۶ | ۳.۲ |

**جدول ۲. مقاطع انتخابی برای نسبت ۰.۶۱۸**

| | قطر ضخامت بیرونی به میلیمتر | قطر گوشته‌ی داخلی به میلیمتر |
|---|---|---|
| ۱. | ۶۰.۳ | ۵.۵ |
| ۲. | ۷۳ | ۳.۲ |
| ۳. | ۷۳ | ۶.۴ |
| ۴. | ۷۶.۲ | ۳.۲ |
| ۵. | ۷۶.۲ | ۳.۹ |
| ۶. | ۷۶.۲ | ۵.۲ |
| ۷. | ۷۶.۲ | ۶.۴ |

**جدول۳. مقاطع انتخابی برای نسبت ۰.۷۵**

| | قطر ضخامت بیرونی به میلیمتر | قطر گوشته‌ی داخلی به میلیمتر |
|---|---|---|
| ۱. | ۷۳ | ۳.۲ |
| ۲. | ۷۶.۲ | ۳.۲ |
| ۳. | ۷۶.۲ | ۳.۹ |
| ۴. | ۷۶.۲ | ۶.۴ |
| ۵. | ۸۸.۹ | ۴.۸ |
| ۶. | ۸۸.۹ | ۵.۵ |
| ۷. | ۸۸.۹ | ۷.۶ |

**جدول۴. مقاطع انتخابی برای نسبت ۱.۶۱۸**

| | قطر ضخامت بیرونی به میلیمتر | قطر گوشته‌ی داخلی به میلیمتر |
|---|---|---|
| ۱. | ۱۱۴.۳ | ۸.۶ |
| ۲. | ۱۱۴.۳ | ۹.۵ |
| ۳. | ۱۲۷ | ۳.۲ |
| ۴. | ۱۲۷ | ۴.۸ |
| ۵. | ۱۳۹ | ۶.۶ |

**جدول۵. مقاطع انتخابی برای نسبت ۲.۲۳۶**

| | قطر ضخامت بیرونی به میلیمتر | قطر گوشته‌ی داخلی به میلیمتر |
|---|---|---|
| ۱. | ۱۳۹.۷ | ۶.۶ |
| ۲. | ۱۳۹.۷ | ۹.۵ |
| ۳. | ۱۴۱.۳ | ۳.۴ |
| ۴. | ۱۴۱.۳ | ۹.۵ |
| ۵. | ۱۴۱.۳ | ۱۲.۷ |

به این ترتیب، در مرحله بهینه‌سازی سازه‌ای، مقاطع سازه‌ای به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. هدف اصلی این بهینه‌سازی، کمینه کردن وزن (Mass) سازه و هدف فرعی آن، کاهش بیشترین جابه‌جایی (Maximum Displacement) بود. بدین صورت، با تمرکز بر سبکی و پایداری، انتخاب مقاطع بر اساس عملکرد سازه‌ای آن‌ها در معیارهای تعریف شده صورت گرفت.

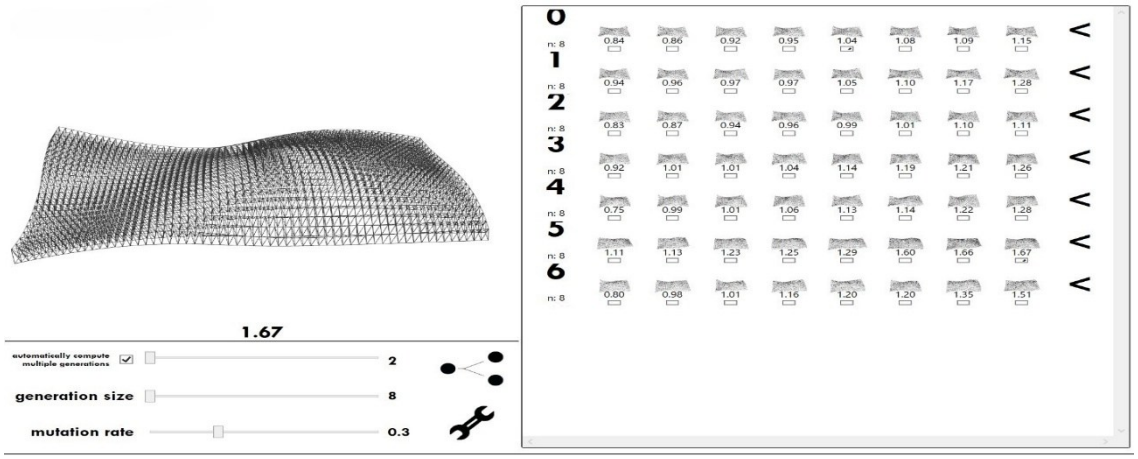
### ۴-۲-۴-بهینه‌سازی تناسباتی

در الگوریتم پیشنهادی، به منظور دستیابی به هارمونی هندسی مبتنی بر تناسبات بایونیک و معماری اسلامی، با تمرکز بر محورهای X و Y به عنوان اهداف اصلی طراحی شد. متغیرهای بهینه‌سازی به دو دسته تقسیم شدند: متغیرهای وابسته، شامل ۲۰ نقطه کنترل برای ایجاد تنوع هندسی (با تلورانس ±۲ متر در محور Z) و اندازه یال‌های خرپا در محور X (پارامتر a)، و متغیرهای گسسته، شامل دو اسلایدر برای مقیاس‌گذاری کل فرم با ضرایب ۰.۹، ۱، و ۱.۱. این تنظیمات، که در محیط Grasshopper پیاده‌سازی شدند، موتور بهینه‌سازی را برای تولید فرم‌ها فعال کردند. برای هر نسبت تناسباتی (۰.۵، ۰.۶۱۸، ۰.۷۵، ۱، ۱.۶۱۸، ۲.۲۳۶)، ۱۰,۰۰۰ فرم تولید و ارزیابی شد، که از میان آن‌ها ۱۰۰ نمونه برتر برای هر نسبت (مجموعاً ۶۰۰ نمونه) در قالب جبهه پارتو استخراج گردید. این نمونه‌ها بر اساس کمینه‌سازی انحراف از تناسبات هدف و معیارهای سازه‌ای (جرم و تغییرشکل) رتبه‌بندی شدند. سپس، برای هر نسبت، سه فرم برتر از منظر اهداف چندهدفه انتخاب

شده و پارامترهای تشکیل‌دهنده آن‌ها به عنوان ژنوم‌های اولیه برای فرآیند بهینه‌سازی تعاملی وارد چرخه بعدی شدند، که این رویکرد امکان همگرایی به سمت راه‌حل‌های بهینه‌تر را با حفظ تعادل زیبایی‌شناسانه و عملکردی تقویت نمود.

### ۴-۲-۵- بهینه‌سازی تعاملی

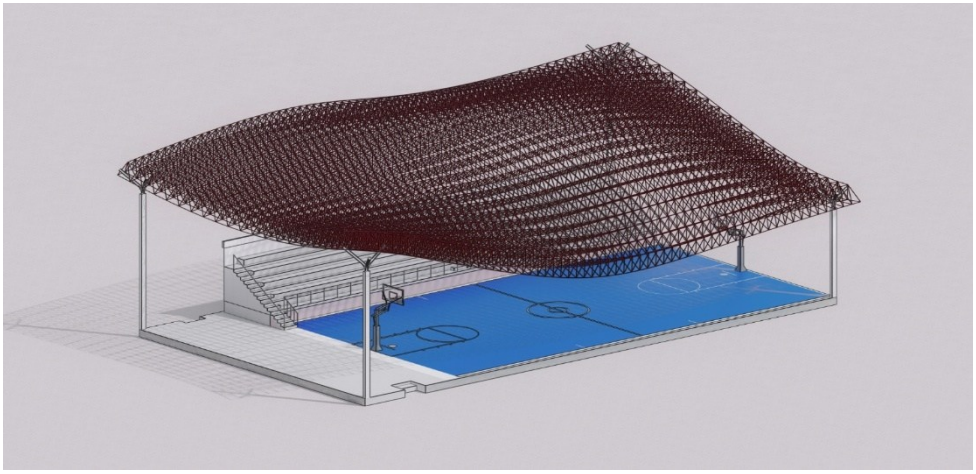
مرحله بهینه‌سازی تعاملی، هسته اصلی الگوریتم پیشنهادی را تشکیل می‌دهد، که با ادغام قضاوت انسانی و محاسبات الگوریتمی، بهینه‌سازی چندهدفه را در طراحی سقف خرپایی دهانه‌بلند سالن بسکتبال هدایت می‌کند. پس از استخراج ۶۰۰ فرم برتر (۱۰۰ فرم برای هر نسبت تناسباتی) از جبهه پارتو، ژنوم‌های مربوطه به همراه اهداف بهینه‌سازی (کمینه‌سازی جرم، کنترل تغییرشکل، و انحراف از تناسبات هدف) به موتور بهینه‌سازی تعاملی در محیط Grasshopper وارد می‌شوند. فرآیند با تولید فرم‌های اولیه از ژنوم‌های منتخب آغاز می‌شود، و برای هر فرم، امتیازی مبتنی بر نرمال‌سازی و میانگین‌گیری معیارهای کمی (عملکرد سازه‌ای و تناسبات) محاسبه و نمایش داده می‌شود. معمار، با تکیه بر این امتیازات و شهود زیبایی‌شناسانه خود، فرم‌هایی را انتخاب می‌کند که پتانسیل بهینه‌ترین تعادل بین هارمونی بصری و کارایی سازه‌ای را دارند. این فرم‌های منتخب به عنوان ژنوم‌های نسل بعدی وارد چرخه تکاملی شده و فرآیند تولید، امتیازدهی، و انتخاب تکرار می‌گردد. این چرخه تعاملی تا دستیابی به فرمی نهایی ادامه می‌یابد که ترکیب بهینه‌ای از پایداری سازه‌ای، تناسبات هندسی (ملهم از الگوهای بایونیک و اسلامی)، و جذابیت بصری را ارائه دهد. این رویکرد، با تقویت نقش طراح در هدایت فرآیند محاسباتی، امکان دستیابی به راه‌حل‌های خلاقانه و کارآمد را فراهم می‌آورد.



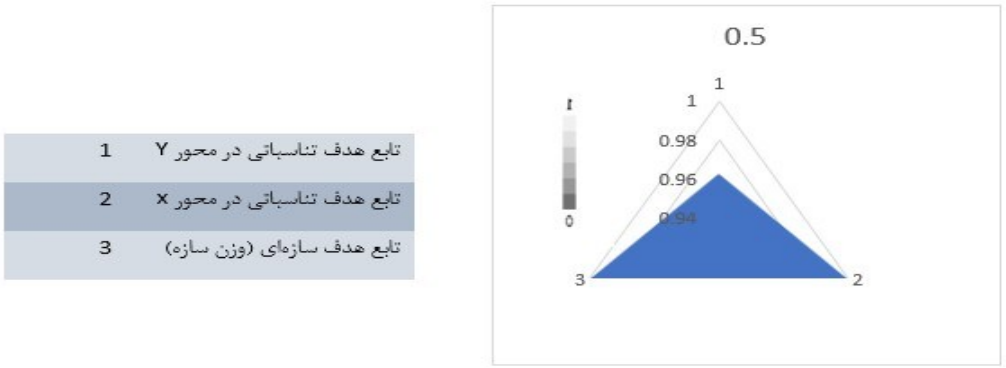

**شکل ۱۰. تصویری از انتخاب فرم های مطلوب در مرحله‌ی بهینه‌سازی تکاملی تعاملی**

### ۴-۲-۶- نتیجه نهایی بهینه‌سازی تعاملی

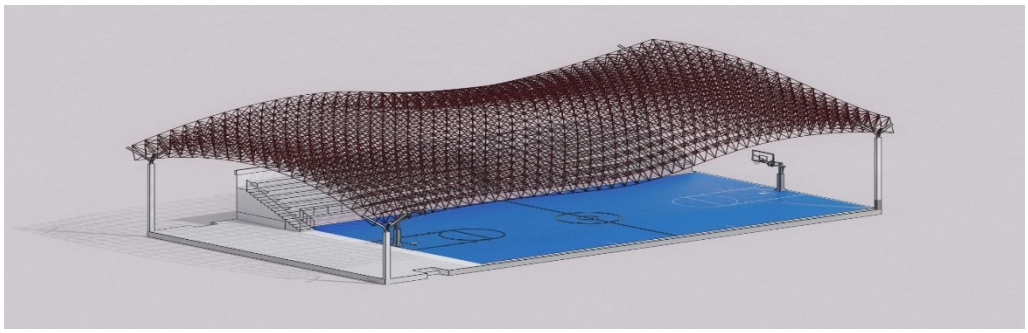
بهینه‌سازی تعاملی برای تمامی نسبت‌های پیشنهادی انجام شد. در هر نسبت، پس از چندین مرحله تکرار و انتخاب توسط معمار، یک فرم مطلوب نهایی انتخاب گردید. این فرم‌ها با توجه به اهداف بهینه‌سازی، امتیازات محاسبه‌شده، و جذابیت بصری بهینه شدند. در نهایت برای هر نسبت‌تناسباتی بهترین فرم انتخاب شدند. در ادامه فرم‌های نهایی برای تعدادی از نسبت های تناسباتی انتخاب شده ارایه شده است.



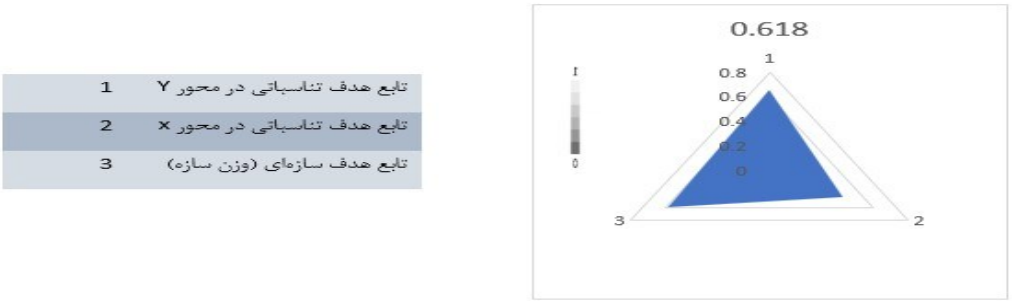
**شکل ۱۱. فرم نهایی منتخب در نسبت ۰.۵**

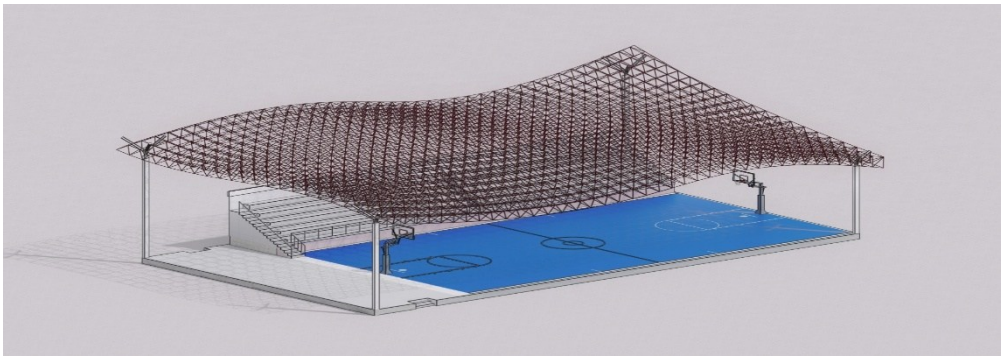



**شکل ۱۲. نرمال‌سازی شده فرم نهایی در توابع هدف**



**شکل ۱۳. فرم نهایی منتخب در نسبت ۰.۶۱۸**

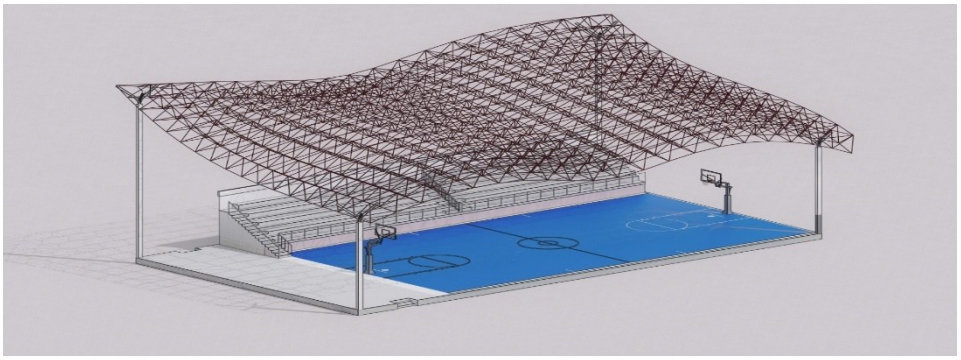


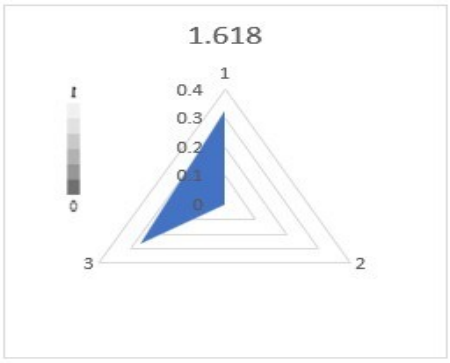
**شکل ۱۴. (نرمال‌سازی شده در توابع هدف)**

| | |
|---|---|
| 1 | تابع هدف تناسباتی در محور Y |
| 2 | تابع هدف تناسباتی در محور x |
| 3 | تابع هدف سازه‌ای (وزن سازه) |

**شکل۱۵. فرم نهایی منتخب در نسبت ۰.۶۱۸**



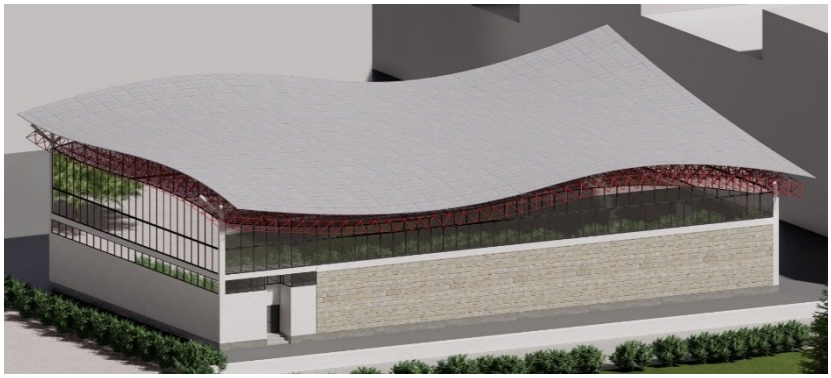
**شکل ۱۶. فرم نهایی منتخب در نسبت ۱.۶۱۸**




| | |
|---|---|
| 1 | تابع هدف تناسباتی در محور Y |
| 2 | تابع هدف تناسباتی در محور x |
| 3 | تابع هدف سازه‌ای (وزن سازه) |

**شکل ۱۷. (نرمال‌سازی شده در توابع هدف)**

در نهایت با توجه به اعداد بدست آمده برای اهداف، تصمیمات طراح و شرایط پروژه فرم سقف مربوط به نسبت ۰.۷۵ فرم نهایی برای سقف این پروژه انتخاب شد. در ادامه نماهای منتخب از این پروژه در قالب شکل های ۱۵ و ۱۶ ارایه می شوند.



**شکل ۱۸. نماهای داخلی و خارجی سالن**

**شکل ۱۹. نمای سقف نهایی از داخل**

### ۳-۴- ارزیابی نمونه‌های برتر بهینه‌سازی چندهدفه

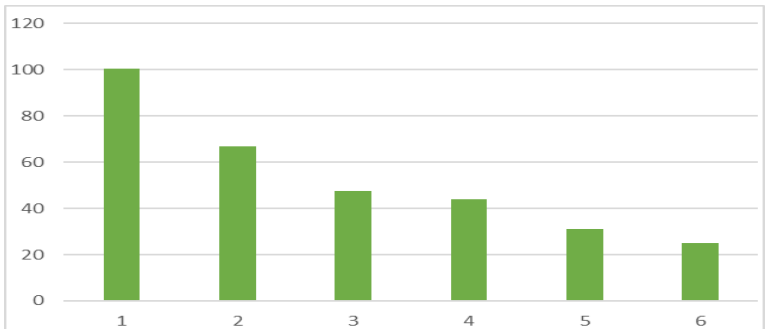
در پایان به ارزیابی نمونه‌های برتر در فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه، با استخراج فرم‌های منتخب از جبهه پارتو (Pareto Front) اقدام گردید که بر اساس سه معیار اصلی: کمینه‌سازی وزن سازه، کاهش انحراف از تناسبات هدف (ملهم از الگوهای بایونیک و اسلامی)، و برقراری تعادل بین عملکرد سازه‌ای و هارمونی زیبایی‌شناسانه دسته‌بندی شدند. فرم‌های برتر برای هر نسبت تناسباتی (۰.۵ تا ۲.۲۳۶) با تحلیل دقیق در محیط Karamba۳D شناسایی شدند،جایی که وزن سازه و حداکثر تغییرشکل (≥۵۰۰/۱ دهانه) به عنوان معیارهای سازه‌ای و انحراف از نسبت‌های تناسباتی به عنوان معیار زیبایی‌شناسانه ارزیابی شدند. این دسته‌بندی، شامل فرم‌هایی با کمترین جرم (اولویت سازه‌ای)، فرم‌هایی با نزدیک‌ترین تناسبات به اهداف زیبایی‌شناسانه، و فرم‌هایی با تعادل نرمال‌شده بین این دو هدف، امکان مقایسه جامع و انتخاب آگاهانه را برای فرآیند بهینه‌سازی تعاملی فراهم آورد.

جهت مقایسه فرم‌های تولیدشده در فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه با هدف ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی، از طریق سه روش نظام‌مند انجام شد. ابتدا، نسبت‌های تناسباتی (۰.۵، ۰.۶۱۸، ۰.۷۵، ۱، ۱.۶۱۸، ۲.۲۳۶) بر اساس میانگین عملکرد هر هدف بهینه‌سازی (کمینه‌سازی جرم، کنترل تغییرشکل، و انحراف تناسباتی) و دسته‌بندی متعادل (نرمال‌سازی ترکیبی) رتبه‌بندی شدند. سپس، فرم اولیه طراحی‌شده توسط معمار با گزینه‌های منتخب جبهه پارتو از نظر شاخص‌های عملکردی (وزن سازه، حداکثر تغییرشکل ≥۵۰۰/۱ دهانه، و انحراف از تناسبات هدف) و جذابیت بصری مقایسه شد تا میزان بهبود الگوریتم ارزیابی گردد. در نهایت، فرم‌های نهایی منتخب برای پروژه با فرم اولیه معمار سنجیده شدند، که ارتقای عملکردی (مانند کاهش وزن و بهبود تناسبات تا ۱۱۰۰ درصد) و افزایش هارمونی بصری را نشان داد، و کارایی الگوریتم در تولید راه‌حل‌های بهینه و خلاقانه را تأیید نمود.

در پایان به منظور انتخاب نهایی فرم های برتر، با استخراج ۶۰۰ فرم (۱۰۰ فرم برای هر نسبت تناسباتی: ۰.۵، ۰.۶۱۸، ۰.۷۵، ۱، ۱.۶۱۸، ۲.۲۳۶) از جبهه پارتو اقدام گردید. این فرم‌ها بر اساس سه معیار کلیدی : کمینه‌سازی وزن سازه (عملکرد سازه‌ای)، کمینه‌سازی انحراف از تناسبات هدف (زیبایی‌شناسی)، و تعادل نرمال‌شده بین این اهداف (دسته متعادل) دسته‌بندی شدند. در اولین گام، رتبه‌بندی نسبت‌ها نشان داد که نسبت ۲.۲۳۶ با میانگین انحراف ۲۵.۱۴ سانتی‌متر و وزن ۲۷,۷۳۵.۲۳ کیلوگرم بهترین عملکرد را در هر سه دسته ارائه می دهد، در حالی که نسبت ۰.۵ با انحراف ۱۰۰.۵۶ سانتی‌متر و وزن ۴۰,۲۵۴.۶۸ کیلوگرم ضعیف‌ترین می باشد.

**جدول ۶. میانگین میزان انحراف تناسباتی در نسبت های مختلف**

| رتبه | نسبت تناسباتی | میزان انحراف(سانتی‌متر) |
|---|---|---|
| **۱.** | ۲.۲۳۶ | ۲۵.۱۴ |
| **۲.** | ۱.۶۱۸ | ۳۱.۲۳ |
| **۳.** | ۱ | ۴۳.۸۹ |
| **۴.** | ۰.۷۵ | ۴۷.۶۸ |
| **۵.** | ۰.۶۱۸ | ۶۶.۸۷ |
| **۶.** | ۰.۵ | ۱۰۰.۵۶ |

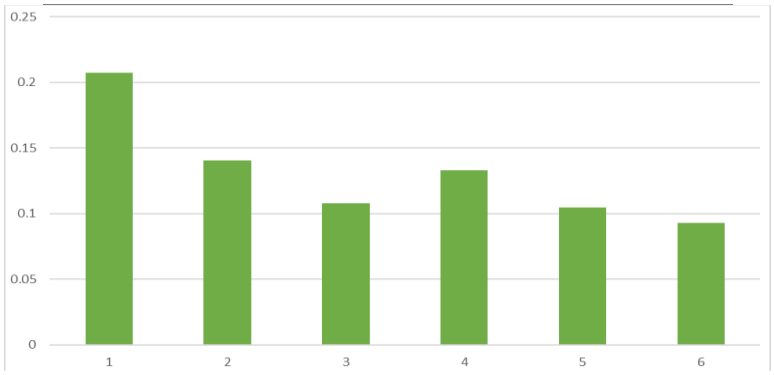



شکل ۲۰. **میانگین میزان انحراف تناسباتی در نسبت های مختلف**

پس از بررسی فرم‌های به‌دست‌آمده، به دلیل ناهم‌جنس بودن اعداد، نرمال‌سازی کمینه-بیشینه روی داده‌ها انجام شد تا امکان انجام عملیات ریاضی روی متغیرها فراهم شود. با این نرمال‌سازی برای دسته متعادل، امتیازات را یکپارچه نموده و مجددا نسبت ۲.۲۳۶ با امتیاز ۰.۰۹۲ در صدر قرار گرفت، در حالی که نسبت ۰.۷۵ با امتیاز ۰.۱۰۷ به دلیل تعادل بصری و سازه‌ای برجسته گردید.

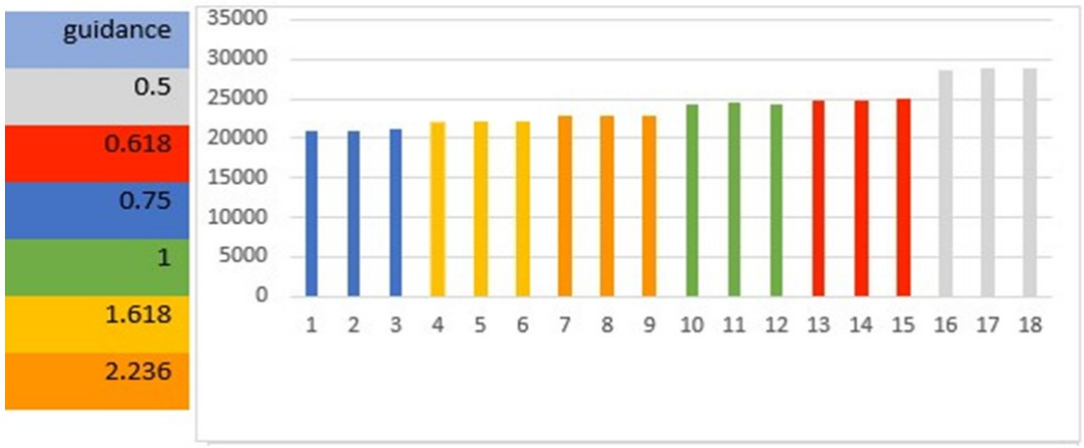
**جدول ۷. میانگین عملکرد هر نسبت تناسباتی در توابع هدف مختلف(نرمال‌سازی شده در توابع هدف)**

| | نسبت تناسباتی | امتیاز نسبت در دسته بندی متعادل |
|---|---|---|
| **۱.** | ۲.۲۳۶ | ۰.۰۹۲ |
| **۲.** | ۱.۶۱۸ | ۰.۱۰۴ |
| **۳.** | ۰.۷۵ | ۰.۱۰۷ |
| **۴.** | ۱ | ۰.۱۳۲ |
| **۵.** | ۰.۶۱۸ | ۰.۱۴۰ |
| **۶.** | ۰.۵ | ۰.۲۰۷ |

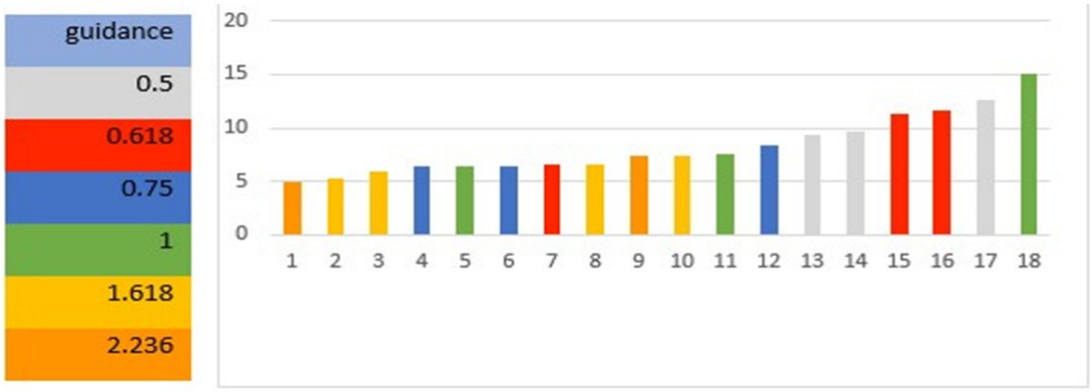



شکل ۲۱. **بهترین فرم ها در دسته بالانس**

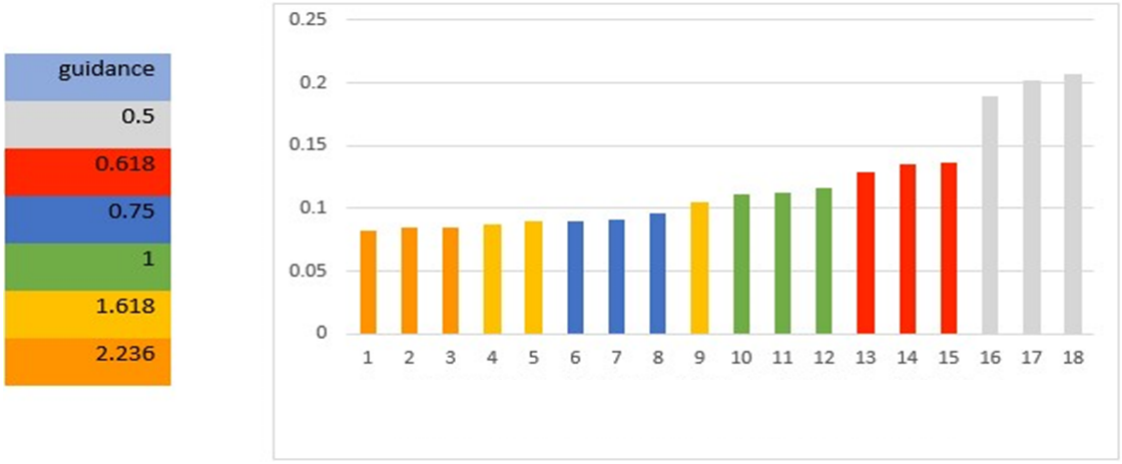
در پایان برای هر نسبت، سه فرم برتر در هر دسته (عملکرد سازه‌ای، تناسباتی، و متعادل) و سه فرم با جذابیت بصری بالا انتخاب شدند تا در بهینه‌سازی تعاملی استفاده شوند. این انتخاب به طراح اجازه می‌دهد تا در مرحله‌ی بهینه‌سازی تعاملی، فرم‌هایی را که نه تنها از نظر عملکرد سازه‌ای و تناسباتی برتر هستند، بلکه از لحاظ زیبایی بصری نیز جذابیت بیشتری دارند، مورد تحلیل و بهبود قرار دهد. این فرآیند، ترکیبی از معیارهای علمی و شهودی طراحی را برای دستیابی به فرم‌های بهینه‌تر فراهم می‌آورد. شکلهای مربوط به این انتخاب( ۲۲ الی ۲۴) در ادامه ارایه شده است.




شکل ۲۲. **مقایسه بهترین فرم های انتخاب شده از نظر عملکرد سازه ای در نسبت های مختلف**




شکل ۲۳. **مقایسه بهترین فرم های انتخاب شده از نظر عملکرد تناسباتی در نسبت های مختلف**




شکل ۲۴. **مقایسه بهترین فرم های انتخاب شده از نظر تعادل اهداف در نسبت های مختلف عملکرد قابل قبول**

در پایان با مقایسه عملکرد فرم‌های منتخب حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه با فرم اولیه معمار، بر اساس سه معیار کلیدی (وزن سازه، انحراف تناسباتی، و امتیاز متعادل نرمال‌شده) در شش نسبت تناسباتی (۰.۵، ۰.۶۱۸، ۰.۷۵، ۱، ۱.۶۱۸، ۲.۲۳۶) اقدام گردید. نتایج این مرحله نشان داد که نسبت ۰.۷۵ با رشد ۱۱۳۴٪ در تناسبات و امتیاز متعادل ۰.۴۸۳، تعادل مطلوبی بین زیبایی‌شناسی و عملکرد سازه‌ای با وزن متوسط ۶۵,۷۳۶.۱۶ کیلوگرم، برقرار نموده و نسبت ۰.۶۱۸ نیز با رشد ۹۸۵٪ در تناسبات و ۳۴۰٪ در اهداف متعادل، فرمی سبک‌تر (۵۱,۶۲۸.۶۷ کیلوگرم) ارائه داد. در مقابل، نسبت ۲.۲۳۶ با کمترین رشد تناسباتی (۴۰۰٪) و امتیاز متعادل ۰.۲۱۰، علی‌رغم وزن ۴۶,۷۵۰.۰۲ کیلوگرم، در دستیابی به اهداف زیبایی‌شناسانه ضعیف‌تر عمل کرد. این مقایسه، بهبود چشمگیر عملکرد فرم‌های بهینه‌شده در هر سه معیار را نسبت به فرم اولیه تأیید کرد که درجدول (۸) ارایه شده است.

| guidance | میزان رشد اهداف مختلف در فرم‌های انتخابی نسبت به فرم اولیه | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | وزن | درصد رشد | تناسبات | درصد رشد | فرم‌های متعادل | درصد رشد |
| 0.5 | 91926.39 | 319% | 112.665 | 1067% | 0.72871756 | 365% |
| 0.618 | 51628.67 | 208% | 97.055 | 985% | 0.45352484 | 340% |
| 0.75 | 65736.16 | 312% | 80.66 | 1134% | 0.4833509 | 524% |
| 1 | 48400.92 | 199% | 73.82 | 762% | 0.36458868 | 320% |
| 1.618 | 46082.83 | 209% | 46.355 | 781% | 0.26792156 | 284% |
| 2.236 | 46750.02 | 204% | 26.185 | 400% | 0.21031912 | 251% |

**شکل ۲۵. مقایسه فرم‌های برتر انتخاب شده با فرم اولیه**

در پایان، با مقایسه شش فرم نهایی با یکدیگر در دسته‌بندی‌ها و نسبت‌های مختلف، پس از بررسی فرم های نهایی از لحاظ بصری و امتیازات بهینه‌سازی، فرم نهایی از نسبت ۰.۷۵ انتخاب گردید.

| guidance | وزن سازه | تناسبات | فرم‌های متعادل |
|---|---|---|---|
| 0.5 | 34712.59 | 39.9 | 1 |
| 0.618 | 30614.11 | 23.92 | 0.52155013 |
| 0.75 | 24793.17 | 17.8 | 0.12402178 |
| 1 | 27261.19 | 32.195 | 0.49332144 |
| 1.618 | 27431.93 | 10.51 | 0.13300979 |
| 2.236 | 28913.82 | 11.775 | 0.22922712 |

**شکل ۲۶. نتایج فرم های نهایی در اهداف مختلف**

لذا ارزیابی نهایی کمی ۶۰۰ فرم برتر از جبهه پارتو در شش نسبت تناسباتی (۰.۵ تا ۲.۲۳۶) اگر چه حاکی از برتری نسبت ۲.۲۳۶ در هر سه دسته‌ی اهداف (تناسبات، عملکرد سازه‌ای، و فرم‌های متعادل) بوده و بهترین عملکرد را ارائه داده (داشتن کمترین وزن، کمترین انحراف از تناسبات و بیشترین رشد نسبی در اهداف کلان) و اثربخشی بالای الگوریتم در تولید فرم‌های بهینه را نشان داد، اما نسبت ۰.۷۵، با وجود قرارگیری در رتبه دوم یا سوم در هر دسته، از نظر بصری و تعادلی میان عملکرد سازه‌ای و تناسبات، فرم‌هایی متوازن و قابل قبولی ارائه کرده و به همین دلیل نیز در نهایت، فرم نهایی منتخب پروژه از میان فرم‌های این نسبت انتخاب شد. و نهایتا نسبت ۰.۵ ضعیف‌ترین عملکرد را در تمامی دسته‌بندی‌ها داشته و برخلاف تصور اولیه که انتظار می‌رفت کوچک بودن مدول‌ها منجر به تناسبات دقیق‌تری شود، در عمل این نسبت نه از نظر سازه‌ای و نه زیبایی‌شناسانه عملکرد مطلوبی نداشت. در مقایسه‌ی فرم‌های نهایی با فرم اولیه معمار، در تمامی نسبت‌ها بهبود چشمگیری مشاهده شد؛ به‌گونه‌ای که در برخی موارد مانند نسبت ۰.۷۵، رشد بیش از ۱۱۰۰ درصدی در دستیابی به اهداف تناسباتی مشاهده گردید. لذا به طور کلی این یافته‌ها، اثربخشی الگوریتم پیشنهادی در تقویت خلاقیت و کارایی طراحی‌های بایونیک را نشان داده و بر ضرورت ارزیابی‌های عملی در پروژه‌های واقعی برای تأیید پایداری و گسترش‌پذیری آن تأکید نموده و کارایی این الگوریتم در تولید فرم‌های بهینه و خلاقانه را تأیید می نماید.

## ۵-نتیجه گیری

فرآیند تحقیق حاضر با هدف توسعه و ارزیابی یک الگوریتم تکاملی—تعاملی برای طراحی سقف‌های خرپایی دهانه‌بلند، نشان داد که ادغام الزامات زیبایی‌شناسانه با معیارهای عملکردی سازه‌ای می‌تواند به خلق فرم‌هایی کارآمد و در عین حال واجد کیفیت بصری منجر شود. دستاوردهای پژوهش بیانگر آن است که استفاده از رویکرد بهینه‌سازی تعاملی نه تنها موجب ارتقای کیفیت طراحی، بلکه باعث شکل‌گیری بستری نوین برای خلاقیت و نوآوری در معماری و مهندسی سازه شده است. ارزیابی کلی الگوریتم پیشنهادی نشان داد که این روش توانسته است به اهداف اصلی تحقیق دست یابد. الگوریتم با بهره‌گیری از تناسبات هندسی الهام‌گرفته از طبیعت و معماری اسلامی، فرم‌هایی تولید

کرد که ضمن دارا بودن کیفیت بصری، از نظر سازه‌ای نیز بهینه بودند. یکی از نتایج مهم، کاهش چشمگیر وزن سازه تا حدود ۴۰ درصد نسبت به طرح‌های اولیه بود؛ دستاوردی که در کنار کارایی سازه‌ای، مزایای اقتصادی و اجرایی نیز به همراه دارد.

از منظر فرآیند طراحی، الگوریتم پیشنهادی در چند بعد اصلی نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا نمود. نخست آن‌که امکان تولید فرم‌های متنوع، زیبا و کاربردی را فراهم نمود؛ فرم‌هایی که با تلفیق اصول تناسبات هندسی و بهینه‌سازی چندهدفه، علاوه بر عملکرد سازه‌ای مطلوب، کاهش مصرف مصالح و هزینه‌ها را نیز به همراه داشتند. دوم آن‌که این روش توانست تحلیل همزمان چندین هدف طراحی — شامل تناسبات فرمی، پایداری سازه‌ای و کاهش وزن — را محقق سازد و بدین ترتیب بستری برای دستیابی به تعادل میان اهداف متعارض فراهم آورد. چنین ویژگی‌ای موجب انتخاب فرم‌هایی شد که در عین برخورداری از کارایی فنی، واجد کیفیت زیبایی‌شناسانه بالایی نیز بودند.از دیگر مزایای برجسته این رویکرد، تقویت خلاقیت و نوآوری طراحان در مراحل اولیه طراحی است، چرا که الگوریتم پیشنهادی با ارائه‌ی گزینه‌های متنوع و غیرمنتظره، فرآیند شکل‌گیری ایده‌ها را تسریع بخشیده و بستر مناسبی برای خلق مفاهیم جدید در معماری ایجاد کرد.

با وجود این دستاوردها، در پژوهش حاضر بایستی به محدودیت‌های محاسباتی نیز اشاره نمود، چرا که بهینه‌سازی تعاملی فرایندی سنگین و زمان‌بر است که می‌تواند در پروژه‌های بزرگ‌مقیاس منابع محاسباتی زیادی را مصرف نماید. هرچند این چالش با بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته‌تر محاسباتی و توان پردازشی بیشتر قابل مدیریت است، اما توجه به آن در توسعه و کاربرد عملی این رویکرد ضروری خواهد بود.

اکنون بر مبنای نتایج به‌دست‌آمده و محدودیت‌های پژوهش، پیشنهادات زیر در چهار دسته‌ی اصلی ارائه می‌شود:

-**گسترش قوانین هندسی و تناسبات** :توسعه الگوریتم هایی در چارچوب تناسبات متنوع‌تری مانند نسبت‌های طلایی، الگوریتم‌های فرکتالی یا الگوهای اسلامی برای بررسی پتانسیل آن در طراحی فرم‌های پیچیده‌تر (مانند گنبدها و طاق‌ها) -**توسعه شاخص‌های ارزیابی چندبعدی** :افزودن معیارهایی نظیر مصرف انرژی، نور طبیعی، آکوستیک، و هزینه چرخه‌ی عمر به فرآیند بهینه‌سازی، به‌منظور دستیابی به طراحی جامع‌تر-**مطالعه میان‌رشته‌ای** :پیوند الگوریتم با حوزه‌هایی چون روان‌شناسی محیطی و ادراک بصری، برای بررسی تأثیر تناسبات هندسی بر تجربه‌ی کاربر و کیفیت ادراک فضا -**ادغام با داده‌های اقلیمی** :ورود پارامترهای اقلیمی مانند باد، باران، و تابش خورشید در فرآیند بهینه‌سازی برای خلق سازه‌هایی سازگار با محیط -**کاهش زمان محاسبات** :به‌کارگیری الگوریتم‌های تکاملی سریع‌تر، محاسبات موازی یا یادگیری ماشین به‌منظور تسهیل اجرای الگوریتم در پروژه‌های بزرگ‌مقیاس -**کاربرد در پروژه‌های متنوع** :آزمودن الگوریتم در پروژه‌های متنوع، در مقیاس‌های کوچک (مانند سازه‌های سبک) تا پروژه‌های زیرساختی بزرگ، برای ارزیابی کارایی و عملی بودن آن - **ترغیب نهادهای آموزشی و پژوهشی** :توصیه به دانشگاه‌ها و مؤسسات پژوهشی برای حمایت از تحقیقات میان‌رشته‌ای در حوزه معماری پارامتریک و بهینه‌سازی تعاملی -**استانداردسازی و دستورالعمل‌ها** :پیشنهاد به نهادهای حرفه‌ای و سازمان‌های نظام مهندسی برای تدوین دستورالعمل‌های مرتبط با به‌کارگیری الگوریتم‌های هوشمند در طراحی معماری و سازه -**حمایت مالی و سرمایه‌گذاری** : ایجاد مشوق‌های مالی برای پروژه‌هایی که از طراحی پارامتریک و بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم‌های تعاملی استفاده می‌کنند، با هدف گسترش کاربرد صنعتی آن -**ادغام با واقعیت مجازی و افزوده** :(VR/AR) استفاده از محیط‌های تعاملی برای ارزیابی فرم‌های پیشنهادی به‌صورت بصری و مقیاس واقعی -**پیوند با ساخت دیجیتال و رباتیک** :بهره‌گیری از فناوری‌های ساخت افزایشی (3D Printing) و مونتاژ رباتیک برای تولید فرم‌های پیچیده و بهینه -**یکپارچه‌سازی با پلتفرم‌های** :BIM توسعه ارتباط میان الگوریتم و مدل‌های اطلاعات ساختمان (BIM) برای تسهیل انتقال داده‌ها از طراحی مفهومی به فاز اجرا.

## ۶- منابع:


۱. عالمی، بابک ، پوردیهیمی, شهرام و مشایخ فریدنی، سعید . (۱۴۰۰). سازه، فرم و معماری. مطالعات معماری ایران, ۵(۹)، ۱۲۳-۱۴۰.

۲. دی کی چینگ، فرانسیس (۱۴۰۰). معماری: فرم، فضا و نظم. ترجمه علیرضا تغابنی و قویدل، س.ویرایش سوم.

۳. محمدیان منصور، صاحب ، ندیمی, هادی و تفضلی, زهره . (۱۳۹۹). نظریه ای درباره انتظامهای هندسیِ معماری ایران. پژوهش های باستان شناسی ایران، ۱۰(۲۴)، ۲۲۷-۲۴۹.

٤. طاهباز، منصوره. (۱۳۸۳). شکل مقدس، صفه، شماره ۳۸، ۱۲۵-۹۵.

5. Alberti, B. L. (1987). The Ten Books of Architecture. Dover Publications.p108.
6. Bailey, B.W and Raich, A.M. (2007). Interactive multi-objective design of long-span trusses. In Proceedings of the 9th annual conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO '07). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 902. https://doi.org/10.1145/1276958.1277132.
7. Brown, N. C., & Mueller, C. T. (2020). Design Variable Analysis and Generation for Performance-Based Parametric Modeling in Architecture.
8. Byrne, Jonathan, Michael Fenton, Erik Hemberg, James McDermott, Michael O'Neill, Elizabeth Shotton, and Ciaran McNally. (2011). Combining Structural Analysis and Multi-Objective Criteria for Evolutionary Architectural Design. Springer, HTTPs://doi.org/10.1007/978-3-642-20520-0_21.
9. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist Mult objective genetic algorithm: nsga-ii. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2), 182-197. https://doi.org/10.1109/4235.996017.
10. Doczi, G. (1994). The Power of Limits. Shambhala Boston & London, p. 9.
11. Euclid. (1956). The Elements (Sir T. Heath, Trans.). Dover Publications.
12. Fonseca, C. M. and Fleming, P. (1995). An overview of evolutionary algorithms in Mult objective optimization. Evolutionary Computation, 3(1), 1-16. https://doi.org/10.1162/evco.1995.3.1.1.
13. Huang, W., Xu, W and Wang, T. (2011). structural form generation using interactive genetic algorithm. Proceedings of the 16th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia / The University of Newcastle, Australia 27-29 April 2011, pp. 751-760. https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2011.751.
14. Ivins, W. M. (1964). *Art and Geometry: A Study in Space Intuitions*. Dover Publications, p. 40.
15. Kepler, J. (1995). *Epitome of Copernican Astronomy and Harmonies of the World* (C. G. Wallis, Trans.). Prometheus Books.
16. MIT Digital Structures. (2019). Design Space Exploration Tools: User Manual Version 1.4. MIT. Retrieved from tools_readme_v1_4.pdf, p. 2.
17. Mueller, C. T., & Ochsendorf, J. A. (2014). Combining structural performance and designer preferences in evolutionary design space exploration.
18. Mueller, C. T., Lee, J., & Fivet, C. (2015). Modelling with Forces: Grammar-Based Graphic Statics for Diverse Architectural Structures.
19. Smith, D., & Coull, A. (1991). *Tall Building Structures: Analysis and Design*. John Wiley & Sons.
20. Yousif, S., Clayton, M & Tan, W. (2018). Towards Integrating Aesthetic Variables in Architectural Design Optimization. 106th ACSA Annual Meeting Proceedings, The Ethical Imperative. https://doi.org/10.35483/ACSA.AM.106.68.