ISSN: 2538-2594; Naqshejahan - Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning. 2021;11(4):25-43

Utilizing of Structural Topology Optimization Method to Achieve Form in Architectural Design; Case Study: Pardisan Urban Footbridge

ARTICLE INFO

Article Type
Analytic Study

Authors

Hamide Soroush
Roham Afghani khorasgani*
Mohammadreza Hafezi
Hamid Aliakbarlou

How to cite this article

Soroush H, Afghani Khoraskani R, Hafezi M, Aliakbarlou H. Utilizing of Structural Topology Optimization Method to Achieve Form in Architectural Design. Naqshejahan-Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning. 2022 Jan 10;11(4):25-43.

https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1400.11.4.1.0

1. Master of Architectural Technology, Department of Construction, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Department of Construction, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
3. Associate Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Department of Construction, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
4. Master of Structural Engineering, Department of Structure, Faculty of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

**Correspondence*

Address: Department of Construction, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Email: r_afghani@sbu.ac.ir

Phone: +98 913 129 4996

Article History
Received: 30 May 2021
Accepted: 17 Nov 2021
ePublished: 10 Jan 2022

ABSTRACT

Aims: Topology optimization is among contemporary approaches introduced to connect Architecture and Structural Engineering through simultaneous form-finding of the Architecture and Structural design. It is among various optimizations methods in structural engineering, which has been recently adopted in the architectural design process due to its direct effect on the overall form of the structure. This research aims to outline the potentials of this method within the realm of the design process as a framework.

Materials & Methods: Given that this research is performed using Finite Element modelling, at first, the theoretical framework of TO within FE software is described briefly and practically. Further on, different examples of the application of this method for architectural design is introduced, and the procedure of utilizing the method within architectural design process by use of related software and algorithms is described.

Findings: Throughout the Architectural design with TO, the effect of the initial design decisions on the resulting forms becomes somewhat unclear; for this purpose, morphology diagrams have been provided for cases similar to the design problem to facilitate the initial decision making of the designer at the initial stages of the design. Morphology diagrams, describing the effect of parameters related to boundary conditions for similar cases, make the design process transparent.

Conclusion: in this paper, a well-defined framework of the TO process and the required information to apply this method in the architectural design process are presented, and its application in the case study of an urban pedestrian bridge is described.

Keywords: Topology optimization, Form-finding, Architectural design, Structure.

CITATIONLINKS

[1] Reliability-based topology optimization of bridge structures using first and second order reliability methods. [2] Investigating the efficiency of evolutionary optimization methods in achieving architectural and construction objectives. [3] A simple evolutionary procedure for structural optimization. [4] Optimal design of multiple load case structures using an evolutionary procedure. [5] A simple approach to structural frequency optimization. [6] Evolutionary structural optimization for problems with stiffness constraints. [7] The evolutionary structural optimization method: theoretical aspects. [8] Tree-inspired dendriforms and fractal-like branching structures in architecture: A brief historical overview. [9] Application of layout and topology optimization using pattern gradation for the conceptual design of buildings. [10] Topology optimization for braced frames: Combining continuum and beam/column elements. [11] Topology optimization of bridges supported by a concrete shell. [12] Structural Emergence: Architectural and Structural Design Collaboration at SOM. [13] Topology optimization approaches. [14] A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. Struct Multidisc Optim. [15] Connecting architecture and engineering through structural topology optimization. [16] Advanced topology optimization methods for conceptual architectural design. [17] Geometric Constraints for Shape and Topology Optimization in Architectural Design. [18] Advancing building engineering through structural and topology optimization. [19] Topology optimization aided structural design: Interpretation, computational aspects and 3D printing. [20] Topology Optimization and Advanced Manufacturing as a Means for the Design of Sustainable Building Components. [21] Topology Optimization and Additive Manufacturing: Comparison of Conception Methods Using Industrial Codes. [22] Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. Structural and Multidisciplinary Optimization. [23] Robotic Additive Manufacturing (RAM) with Clay Using Topology Optimization Principles for Toolpath Planning: The Example of a Building Element. [24] From topology optimization design to additive manufacturing: Today's success and tomorrow's roadmap. [25] Morphable components topology optimization for additive manufacturing. [26] Two-Dimensional Shape Optimization. [27] A first course in the finite element method (4th ed).

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.

بهره گیری از بهینه‌سازی توپولوژی جهت دستیابی به فرم در طراحی معماری

نمونه موردی: پل پیاده پردیسان

حمیده سروش[۱]، رهام افغانی خراسگانی *[۲]، محمدرضا حافظی[۳]، حمید علی‌اکبرلو[۴]

۱- کارشناسی ارشد فناوری معماری، گروه ساختمان، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۲- استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، گروه ساختمان، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول)
۳- دانشیار دانشکده معماری و شهرسازی، گروه ساختمان، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۴- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

چکیده

اهداف: یکی از راه‌حل‌هایی که در دهه اخیر جهت برقراری ارتباطی مؤثر میان معماری و مهندسی سازه پیشنهاد شده است، طراحی هم‌زمان سازه و معماری بوسیله بهینه‌سازی توپولوژی است. بهینه‌سازی توپولوژی یکی از انواع بهینه‌سازی سازه‌ای است که به دلیل تأثیر مستقیم بر فرم در حوزه معماری ظهور نموده است. هدف از این پژوهش تدوین چهارچوبی جهت به کارگیری این روش بهینه سازی و بهره‌گیری از قابلیت‌های آن در فرآیند طراحی معماری است.

ابزار و روش ها: ابتدا به تشریح مفاهیم نظری بهینه‌سازی توپولوژی و مدلسازی عددی اجزای محدود پرداخته، سپس کاربردهای استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی در معماری بررسی شده است و فرایند بکارگیری این روش در طراحی معماری با استفاده از الگوریتم‌های معرفی شده و نرم‌افزارهای موجود بیان شده است.

یافته ها: در طراحی با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی عموما تاثیر تصمیمات آغازین بر فرم‌های حاصله از ابتدا مشخص نیست، به همین جهت تهیه دیاگرام-های فرم‌شناسی باعث می‌شود که طراح بتواند از تسلط بیشتری بر فرم‌های حاصل از این روش برخوردار باشد. تهیه و استفاده از جداول فرم‌شناسی، که نشان دهنده تاثیر نوع و محل شرایط تکیه گاهی و بارگذاری بر طراحی پل های با شرایط مشابه هستند، راه‌حلی جهت شفاف‌تر نمودن فرآیند طراحی معماری با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی فراهم خواهد آورد.

نتیجه گیری: در این تحقیق اطلاعات موردنیاز جهت بهره‌گیری از بهینه‌سازی توپولوژی در طراحی و چگونگی طراحی یک پل عابر پیاده با استفاده از این روش توضیح داده شده است و چهارچوبی مشخص از روند فرم‌یابی و استفاده از روش بهینه سازی توپولوژی در دل فرآیند طراحی معماری ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی توپولوژی، فرم یابی، طراحی معماری، سازه.

مقدمه

برقراری ارتباط میان عملکرد سازه‌ای و طرح معماری یکی از مسائل مورد توجه در صنعت ساختمان است. در یک پروژه به طور معمول مسائل زیبایی‌شناسی و فرم داری اهمیت بنیادین برای معمار است، در حالی که تلاش مهندسین سازه معطوف به کارآمدی و پایداری سازه است. با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی در فرم‌یابی می‌توان با طراحی هم‌زمان سازه و فرم معماری، پاسخ مناسبی برای هر دو رویکرد مهندسی و زیبایی‌شناسانه ارائه نمود. بهینه سازی توپولوژی موسوم به TO (Topology Optimization) از انواع بهینه‌سازی سازه‌ای است که با توجه به قابلیت‌های فراهم شده اخیر در فرآیندهای طراحی و ساخت دیجیتال، در سال های اخیر وارد حوزه معماری گردیده است.

هدف از نگارش این مقاله تدوین یک فرایند طراحی جهت به کارگیری بهینه سازی توپولوژی در طراحی معماری است تا با کمک آن طراحان با پتانسیل‌های این روش ، و چگونگی تاثیرگذاری طراح در فرم‌های حاصل از این روش آشنا شوند. در نهایت، بستر سازی مناسبی برای استفاده از این روش و روش‌های مشابه فرم‌یابی در میان معماران صورت خواهد گرفت.

بدین منظور در ابتدا به تشریح مفاهیم سازه‌ای بهینه‌سازی توپولوژی پرداخته، سپس انواع کاربردهای این روش در طراحی عناصر ساختمانی به منظور آشنایی کامل با قابلیت‌های آن در معماری بیان شده است و در آخر فرایند به‌کارگیری این روش در طراحی معماری با استفاده از الگوریتم‌های معرفی شده و نرم‌افزارهای موجود توضیح داده شده است.

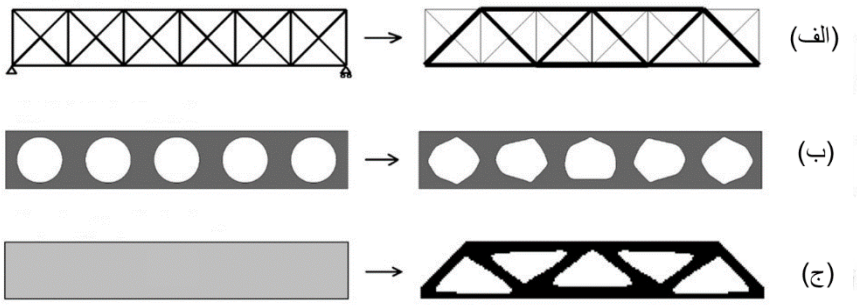
از بررسی پیشینه بهینه‌سازی توپولوژی مشخص می‌شود که پایه‌های آن در سال ۱۹۰۴ با مطالعاتی بر روی بهینه‌سازی خرپاها بنا نهاده شد، اما این ایده تا اواخر قرن بیستم به نتیجه قابل استفاده‌ای تبدیل نشد.[۳-۵] مطالعات انجام شده بر روی

بهینه‌سازی توپولوژی در این سال‌ها در رشته‌هایی غیر از معماری و سازه، همچون مکانیک انجام گرفته است و تنها در دو دهه اخیر جای خود را میان مهندسان سازه و معماران علاقه‌مند به این زمینه باز نموده است. مقالات منتشر شده توسط معماران و مهندسان سازه در این زمینه از سال ۱۹۹۶ آغاز شده است. در این مقالات الگوریتم‌های بهینه‌سازی توپولوژی با مثال‌هایی ساده در نرم‌افزارهای مکانیکی توضیح داده شده است. [۶] پس از آن روش‌های بهینه‌سازی تکاملی به عنوان مهم‌ترین و رایج‌ترین الگوریتم مورد استفاده معماران و مهندسان سازه معرفی شده است. [۷] شناخت روش‌های بهینه‌سازی تکاملی همچنان ادامه داشت تا سرانجام معماران در پژوهش‌های خود به بررسی روند طراحی و ساخت و فرم یابی قطعاتی در مقیاس کوچک توسط این روش، روی آوردند. [۸] و این روند در طراحی اجزای مختلف ساختمان از جنبه‌های سازه‌ای، طراحی و ساخت در مقیاس‌های کوچک مورد سنجش قرار گرفته است نمونه‌ای از این تحقیقات طراحی بادبند ساختمان های بلندمرتبه با رویکرد مذکور است. [۹، ۱۰] در مقاله ای دیگر نیز طراحی ستون بتنی برای یک پل عابر پیاده با استفاده از این روش تشریح شده است. [۱۱]

از سال ۲۰۱۳ کاربردی‌ترین مقالات جهت استفاده معماران در این زمینه انتشار یافت[۱۲] . در این مقالات علاوه بر معرفی کامل بهینه سازی توپولوژی از منظر تئوری، به جنبه های عملکردی این رویکرد نیز پرداخته شده است . [۱۳- ۱۴] بگینی و همکاران در مقاله‌ای تحت عنوان برقراری ارتباط میان معماری و مهندسی سازه بوسیله بهینه‌سازی توپولوژی در سال ۲۰۱۴، بصورت مستقیم با بررسی نمونه‌های موردی ساخته و یا طراحی شده، ارتباط بهینه‌سازی توپولوژی با معماری را مورد بررسی قرار دادند[۱۵] و تا سال ها بعد بررسی این ارتباط دستمایه تحقیقاتی توسط معماران می شود. ایج و همکاران ارتباط میان معماری و بهینه سازی توپولوژی را در مرحله طراحی کانسپت تشریح نمودند؛[۱۶] در ادامه داپگنی و همکاران چگونگی تاثیرگذاری کاربران را در این روند بررسی کرده‌اند. [۱۷] علاوه بر این می توان به مقاله زیگارد و همکاران اشاره نمود؛ در این مقاله با استفاده از نمونه های مطالعاتی، کاربرد بهینه سازی توپولوژی به صورت دو بعدی و سه بعدی در صنعت ساختمان بیان شده است.[۱۸]

از سویی دیگر مطالعاتی نیز پیرامون شیوه‌های ساخت فرم‌های بهینه‌سازی شده توپولوژی با استفاده از تکنولوژی‌های روز همچون پرینت سه بعدی، ساخت افزودنی موسوم به AM (Additive Manufacturing) و نرم‌افزارهای مورد استفاده و مفید در این زمینه انجام شده است. [۱۹] دنفوریو انواع تکنیک های ساخت فرم های حاصل از بهینه سازی توپولوژی را با استفاده از پرینت سه بعدی در مقاله خود بررسی کرده است. [۲۰] در مقاله ای دیگر با استفاده از نمونه هایی موردی به مقایسه نرم افزارها و ابزارهای ساخت موجود در صنعت جهت به کارگیری این روش پرداخته شده است. [۲۱] نمونه های موفق استفاده از پرینت سه بعدی در ساخت فرم های توپولوژیک نیز توسط لیو و همکاران معرفی شده است. [۲۲] در مقاله ای دیگر نقش استفاده از روش های AM را در ساخت المان های ساختمانی طراحی شده بر پایه بهینه سازی توپولوژی بررسی شده است. [۲۳] منگ و همکاران نیز چالش های ساخت فرم های توپولوژیک را بیان کرده اند. [۲۴] ژیان و همکاران به راهکارهای کاهش هزینه ساخت و متریال فرم های بهینه سازی شده در طی استفاده از روش های AM پرداخته اند. [۲۵]

در انتها با توجه به این موضوع که در میان تحقیقات و مقالات منتشر شده توسط معماران، نمونه‌ای داخلی در این زمینه یافت نشده است می‌توان به لزوم شناخت مبانی نظری این رویکرد، کاربردها و روش استفاده از آن در طراحی معماری پی برد.



شکل ۱) انواع بهینه سازی الف) بهینه‌سازی اندازه، ب) بهینه‌سازی شکل، ج) بهینه‌سازی توپولوژی

مواد و روش ها

یکی از مهم‌ترین اهداف مهندسی سازه، بهینه‌سازی سازه‌ها از جنبه‌های مختلف سازه‌ای است، بدین معنا که با صرف انرژی، مصالح، زمان و در مجموع هزینه کمتر به طراحی هدفمندتری حاصل گردد. این فرایند مرحله ای که به اصلاح و بهبود طرح ها کمک می نماید، شامل بهینه‌سازی اندازه، بهینه‌سازی شکل و بهینه‌سازی توپولوژی می‌شود. (شکل ۱)

در بهینه‌سازی اندازه که از ابتدایی‌ترین روش‌های بهینه‌سازی سازه‌ای است، ابعاد المان‌های سازه‌ای اعم از سطح مقطع اعضا و ضخامت صفحات و سایر عناصر سازه دستخوش تغییر قرار می‌گیرند. در حالی که در بهینه‌سازی شکل، بدون تغییر اساسی در توپولوژی سازه، جایگاه هندسی نقاط اتصال و گره‌های سازه‌ای به منظور کنترل مسیر انتقال نیرو و کاهش تنش‌های متمرکز مورد جابجایی قرار می‌گیرد. بهینه‌سازی توپولوژی با یک مدل اولیه آغاز می‌شود و در طی فرایند بهینه‌سازی، بر اساس نحوه پخش نیرو در سازه، تغییراتی در آن ایجاد می نماید و تا حذف دسته‌ای از المان‌ها پیش می‌رود در واقع فرایندی برای تعیین بهترین آرایش از مقدار داده شده از مصالح در دامنه طراحی تا رسیدن به حداکثر بازدهی در سازه موردنظر است. به عبارتی دیگر بهینه‌سازی یک سازه در فرم، حجم و چگونگی اتصال اعضا به یکدیگر بهینه‌سازی توپولوژی نامیده می‌شود. [۲۶]

از پارامترهای مهم در بهینه‌سازی تعیین دو معیار به عنوان تابع هدف و تابع قید است. تابع هدف معیاری را که طرح نسبت به آن بهینه می‌شود به صورت تابعی از متغیرهای طراحی بیان می‌کند. همچنین می‌توان مقادیر ویژه‌ای را طی بهینه‌سازی اعمال نمود، این مقادیر مشخص را که از سوی طراح اعمال می‌شود، قید می‌نامند. عموما مواردی مانند تنش، سختی، انرژی کرنشی و... به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده و میزان کاهش در حجم و یا وزن به عنوان قید مسئله تعریف می‌شود. برای حل مسائل بهینه‌سازی توپولوژی روش‌های مختلفی تاکنون معرفی شده است، اما یکی از روش‌هایی که غالباً توسط معماران و مهندسان سازه به کار گرفته می‌شود روش‌های بهینه‌سازی تکاملی سازه ای موسوم **به** ESO (Evolutionary Structural Optimization) است [۷] ، مبنای حل الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی همچون بسیاری از مسائل مهندسی بر پایه دانش اجزای محدود استوار است و تمامی نرم‌افزارهای موجود در این زمینه نیز بر این دو مبحث پایه‌ریزی شده‌اند. در نتیجه درک این دو مفهوم جهت آشنایی با مبانی نظری بهینه‌سازی توپولوژی و به کارگیری آن لازم خواهد بود.

روش اجزای محدود یک روش عددی برای حل مسائل مهندسی و ریاضی است و به طور معمول از آن در مسائل دارای هندسه و بارگذاری پیچیده استفاده می‌شود. قاعده کلی در فرایند اجزای محدود به دست آوردن یک سری معادلات جبری برای حل کمیت‌های گره‌ای مجهول (تغییر مکان) است و کمیت‌های ثانویه از قبیل تنش و کرنش بر حسب کمیت‌های اصلی بیان می‌شوند. اولین قدم در حل یک مسئله به شیوه اجزای محدود تقسیم‌بندی مدل به تعداد مشخصی المان است که در فرآیند حل مسئله و با برهم نهی روابط سازه‌ای هر کدام از المان‌ها منجر به حصول ماتریس سختی کلی سیستم می‌شود. این ماتریس شامل تمام اطلاعات در

خصوص هندسه سازه، رفتار مصالح و تقسیم‌بندی المان‌ها بوده و نحوه پاسخ سیستم سازه‌ای در برابر بارهای وارده بوده و با حل معادلات ماتریسی آن تحت حالات مختلف بارگذاری نیروهای مجهول به دست خواهد آمد. در بهینه‌سازی تکاملی، با بررسی تاثیر نیروهای خارجی بر تک-تک المان‌های سازه، در خصوص حذف و یا ماندگاری هر یک از المان‌های ایجاد شده در مدل بر اساس الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی و جواب‌های حاصل از تحلیل اجزای محدود تصمیم‌گیری می‌شود و این روند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که یکی از قیدهای تعیین شده محقق گردد . روند تحلیل اجزای محدود بدین صورت است: [۲۷]

۱. انتخاب المان و تقسیم‌بندی
۲. انتخاب تابع تغییر مکان
۳. به دست آوردن ماتریس سختی المان
۴. سرهم‌بندی معادلات و اعمال شرایط مرزی
۵. حل معادلات برای به دست آوردن تغییر مکان‌های مجهول
۶. به دست آوردن نیروهای عکس‌العمل
۷. به دست آوردن تنش‌ها و کرنش‌ها در المان

روش‌های بهینه‌سازی توپولوژی را می‌توان به دو گروه عمده: ۱-روش‌های بر پایه ریاضیات و ۲-روش‌های تکاملی تقسیم نمود، در واقع پیچیدگی روابط ریاضی علت اصلی ارائه روش‌های تکاملی بوده است. روش‌های تکاملی با تغییر هندسه و آرایش در فضای طراحی به هدف موردنظر دست می‌یابند. این روش، فرایندی تکرارشونده و تکاملی است که به منظور استفاده بهینه از مصالح، مصالح سازه را باز توزیع می‌کند. این باز توزیع به نحوی انجام می‌گیرد که مصالح از نقاط قوی‌تر با کارایی کمتر به نقاط ضعیف‌تر با کارایی بیشتر انتقال یافته و سازه با توجه به عملکرد موردنظر قابلیت بیشتری از خود نشان دهد. ویژگی مهم این روش ارائه نتایج قابل اعتماد همراه با سهولت در درک و یادگیری است و این روش به سادگی در برنامه‌های بر پایه اجزای محدود قابل اجرا است. نسخه پیشرفته‌تر روش تکاملی سازه‌ای، روش تکاملی سازه ای دوطرفه موسوم به Bi- BESO (bi-directional Evolutionary) (Optimization نام دارد، که در این روش مواد ناکارآمد از سازه حذف می‌شوند و هم‌زمان مواد به مناطق حساس اضافه می‌شود. به طور مثال اگر تنش حداکثر به عنوان هدف و معیار بهینگی در نظر گرفته شود، المان‌های با پایین‌ترین تنش حذف و به اطراف المان‌های با بالاترین مقادیر تنش افزوده می‌شود. در ادامه به معرفی الگوریتم‌های ESO پرداخته شده است.

جهت اعمال روش بهینه‌سازی تکاملی ابتدا فضای طراحی را به تعداد معینی از المان‌ها تقسیم کرده و پس از تعیین شرایط مرزی و بارگذاری، مسئله به‌صورت المان محدود تحلیل می‌گردد. سپس مقدار معیار موردنظر، که با توجه به نوع مسئله توسط طراح تعیین می‌گردد، برای هر یک از المان‌ها محاسبه می‌شود. همچنین از آن جا که مدل به اجزای محدود تقسیم شده است حذف المان به‌سادگی صورت می‌گیرد. رایج‌ترین معیارهای حذف المان بر اساس دو حالت سطح تنش و یا انرژی کرنشی است که در این میان ساده‌ترین روش معیار حذف المان بر اساس سطح تنش است، به این صورت که با حذف تدریجی المان‌ها با سطح تنش کمتر، سطح تنش در سازه جدید یکنواخت و یکنواخت‌تر می‌شود. در حذف مواد بر اساس تنش اغلب از تنش فون میسز (Von Mises stress) که ترکیبی از تنش های محوری و برشی می باشد به‌عنوان معیار استفاده می‌شود: [۸]

$$\sigma^{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

رابطه ۱

جهت حذف المان ها از معیار دیگری نیز به نام RR_i استفاده می شود. RR_i نرخ حذف مواد در مرحله i ام است، یعنی در هر مرحله المان‌هایی که در آنها نسبت میزان متغیر معیار به نسبت حداکثر آن معیار پایین‌تر از حد معین RR_i باشند به عنوان مواد زائد شناخته شده و حذف می‌شوند. که این حذف از طریق از بین بردن تأثیر المان‌ها صورت می-پذیرد. بدیهی است که مسئله بهینه‌سازی در یک مرحله قابل‌دستیابی نیست. یک روش تکاملی باید به‌روز شود به این معنی که تنها تعداد کمی از المان‌ها در هر مرحله باید از سازه

حذف شوند. در واقع مقدار RRi یا نرخ حذف باید به گونه‌ای باشد که در یک مرحله المان‌های زیادی از جسم حذف نگردد و حذف مواد به صورت تدریجی صورت گیرد. چرخه حذف مواد تا زمانی که هیچ المانی وجود نداشته باشد که در شرط مسئله صدق کند ادامه می‌یابد. در صورتی که هیچ المانی حذف نگردد، حالتی موسوم به حالت پایدار به وجود می‌آید که در این زمان پارامتری به نام نرخ تکاملی ERبه نرخ حذف مواد اضافه می‌گردد. بعد از این افزایش، چرخه المان محدود و حذف مواد تا زمان رسیدن به حال پایدار جدید ادامه می‌یابد و این فرآیند تا زمان دست‌یابی به حالت بهینه تکرار می‌گردد:

$$\sigma_{el} < RR_i \sigma_{max}$$

رابطه ۲

$$RR_{i+1} = RR_i + ER$$

رابطه ۳

روش تکاملی دیگر، به حداقل رساندن وزن سازه با معیار به حداکثر رساندن سختی است. از انرژی کرنشی (strain energy) معمولاً به صورت معکوس مقدار سختی کلی سازه یاد می‌شود؛ بنابراین بیشترین سختی کلی زمانی به دست می‌آید که انرژی کرنشی حداقل گردد. زمانی که یک جسم در حالت الاستیک دچار تغییر شکل می‌شود، بر روی آن کار انجام شده است، این انرژی ذخیره شده در جسم را انرژی کرنشی گویند؛ که به صورت زیر تعریف می‌شود:[۴]

$$C = (1/2)\{P\}^T\{u\}$$

رابطه ۴

در ادامه پارامتری به عنوان عدد حساسیت تعریف می‌شود، فرمول زیر تغییر انرژی کرنشی سازه به علت حذف المان i ام را نشان می‌دهد و از آن به عنوان عدد حساسیت المان یاد می‌شود که به عنوان معیاری برای کارایی المان استفاده می‌شود. در حالت کلی، هنگامی که یک المان حذف می‌شود، سختی سازه کاهش می‌یابد و متقابلاً انرژی کرنشی آن افزایش می‌یابد. برای دستیابی به این هدف که کمترین افزایش انرژی کرنشی رخ دهد، باید المان‌هایی که عدد حساسیت کمتری دارند حذف شوند.

$$\alpha_i = (1/2)\{u^i\}^T[K^i]\{u^i\}$$

رابطه ۵

در این حالت تعداد المان‌هایی که باید حذف شوند با نسبت ERR، مشخص می‌شوند که نسبت تعداد المان‌های حذف‌شده در هر تکرار به تعداد کل المان‌ها در مدل المان محدود است. طرح بهینه‌ی سازه‌ای با محاسبه‌ی عدد حساسیت و حذف المان‌ها تا زمانی که تابع هدف به مقدار مجاز برسد، به دست می‌آید. به‌صورت خلاصه مراحل روش تکاملی برای یک بهینه‌سازی سختی را می‌توان به این‌گونه بیان کرد:

۱. گسسته سازی سازه با استفاده از مش بندی المان‌های محدود
۲. تحلیل سازه پس بارگذاری و تعیین شرایط مرزی
۳. محاسبه شماره حساسیت برای هر المان
۴. حذف المان‌های با عدد حساسیت کمتر و مطابق با نسبت ERR
۵. تکرار مراحل ۳ و ۴ تا زمانی که یکی از قیود به مقدار حد مجازش برسد.

در شکل ۲ می‌توان تغییرات در فرم سازه و روند حذف المان‌های در مراحل مختلف بهینه‌سازی توپولوژی را در یک پل مشاهده نمود. این بهینه‌سازی طی ۳۳ مرحله صورت گرفته است و تابع هدف در آن به حداقل رساندن انرژی کرنشی در همه المان‌ها و یا به حداکثر رساندن سختی پل بوده است، همچنین در تابع قید طراحی مشخص شده است که در بهینه‌سازی انجام یافته، کاهش ۵۰ درصدی از حجم سازه اولیه مد نظر قرار گرفته است.

شکل ۲) توزیع مصالح در چرخه‌های بهینه‌سازی توپولوژی در یک پل

کاربرد بهینه سازی توپولوژی در معماری به صورت عمده در دو حالت بررسی می گردد؛ در حالت اول بهینه سازی توپولوژی فرم اولیه طراحی(طراحی مفهومی) را مشخص می‌کند تا سپس و بر اساس آن به توسعه طرح پرداخته شود؛ در حالت دوم از فرم بهینه‌سازی شده به‌صورت مستقیم به عنوان ورودی در فرآیند ساخت استفاده می‌گردد. موارد استفاده از روش‌های دستیابی به فرم بر پایه بهینه‌سازی توپولوژی در معماری را می‌توان شامل طراحی ستون و پایه، نما و بدنه، سقف، اجزای سازه‌ای (خرپا، تیر، اسلب سقف و...) و طراحی مبلمان دانست. در سال‌های اخیر نمونه‌هایی در هر یک از موارد ذکر شده طراحی و ساخته شده است که در ادامه مواردی جهت آشنایی بیشتر با موضوع بررسی شده است.

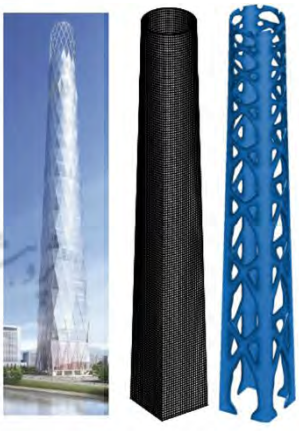
مرکز انجمن بین‌المللی قطر در سال ۲۰۱۱ توسط معمار مشهور ژاپنی آراتا ایسوزاکی در دوحه قطر طراحی و اجرا شده است. سایه‌بان عظیمی به عرض ۳۶ متر و طول ۲۵۰ در وجه ورودی بنا وجود دارد که پایه آن به صورت ارگانیک و درختی و از طریق فرایند بهینه‌سازی توپولوژی طراحی شده است. به‌طور عمده می‌توان فرم‌های حاصل از بهینه‌سازی توپولوژی را زیرمجموعه ستون‌های شبه درختی تلقی نمود. برای ساخت ستون‌های درختی این پروژه از دو فونداسیون بتنی و ستون‌های فولادی با پوشش ورق‌های منحنی استفاده شده است. برای تحلیل اجزای محدود این طرح، مدل اولیه به حدود ۳ میلیون المان تقسیم شده است و چرخه آنالیز تا رسیدن به همگرایی، به میزان ۱۰۰۰ مرتبه تکرار شده است و حجم نهایی ۱۲ درصد از حجم اولیه است.[۱۶]

شکل ۳) طراحی پایه های سایه بان مرکز انجمن های بین المللی قطر با استفاده از بهینه سازی توپولوژی [۱۸]

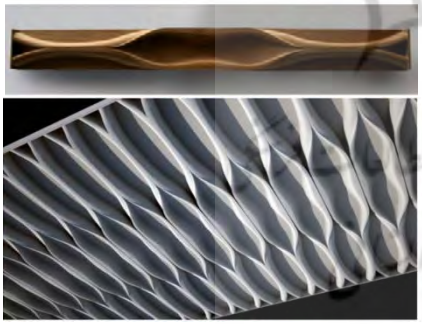
بدنه پل اتصال‌دهنده برج‌هایی در چین یکی دیگر از نمونه‌های طراحی نما با این رویکرد است. هدف از طراحی نمای این پل، بهره‌گیری از طراحی خلاقانه و منحصر به فرد برای اتصال میان برج‌ها است. از آنجایی که این پل گویی برج‌ها را در برگرفته است طراح قصد داشته تا با ایجاد فرمی شبیه تار عنکبوت این حس را القا نماید که استفاده از روش بهینه‌سازی توپولوژی علاوه بر پاسخگویی به خواسته طراح دارای بازدهی سازه‌ای نیز است.[۱۵]

شکل ۴) طراحی نمای به روش بهینه سازی توپولوژی [۱۰]

از آنجا که بهینه سازی توپولوژی روشی برای برقراری ارتباط میان سازه و معماری است قابلیت‌های فراوان جهت بکارگیری در ساختمان های بلند مرتبه با سازه دیاگرید را دارا است که در آن فرم نما هم از نظر زیبایی و هم سازه ای مورد اهمیت فراوان است. در این صورت سازه دیاگرید تحت بارهای جانبی تحلیل و فرم یابی شده که نمونه هایی از این دست در ساختمان های بلندمرتبه توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است. [۱۵] مصداق دیگر استفاده از این رویکرد در صنعت ساختمان، طراحی اجزای سازه ای همچون تیر، خرپا، دال های سقف و ... است. با توجه به تکرار فراوان اجزاء سازه‌ای در کل ساختمان، بهینه سازی و کاهش مصالح در هر جز می تواند در کاهش هزینه های کل تاثیر به سزایی داشته باشد تصویر (۶) از مصادیق استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی در طراحی سقف‌های پیش ساخته است. [۸]



شکل ۵) نمای دایاگرید فرم یابی شده به وسیله بهینه سازی توپولوژی[۱۳]



شکل ۶) اسلب سقف فرم یابی شده به وسیله بهینه سازی

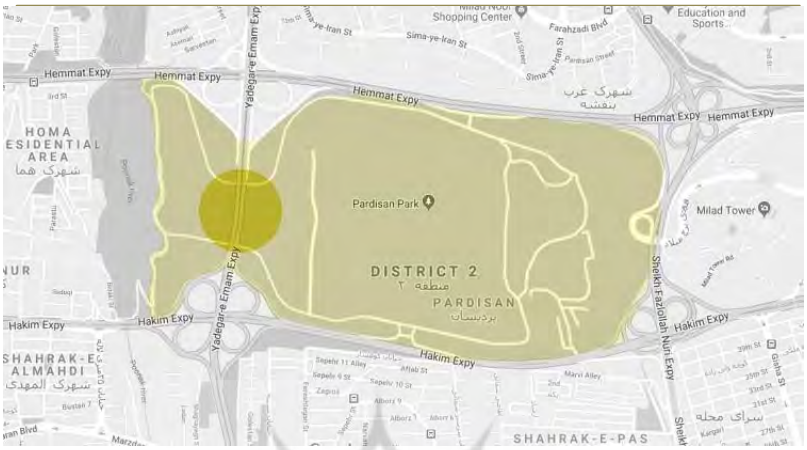
یافته ها

در ادامه معرفی مفاهیم بهینه سازی توپولوژی و آشنایی با مصادیق آن در طراحی معماری، در این بخش به معرفی پروژه مورد بررسی در این مقاله و مراحل انجام فرایند دست‌یابی به فرم ستون های یک پل عابر پیاده شهری بر پایه بهینه سازی توپولوژی پرداخته شده است.

نمونه مورد مطالعه (پروژه مورد بررسی)، طراحی یک پل پیاده شهری است که دارای فرم سازه ای توجیه پذیری بوده و شاخص اصلی آن بهینه بودن از منظر سختی و وزن است؛ بدین منظور، بهینه سازی توپولوژی به عنوان روش طراحی در استحصال فرم مورد استفاده قرار گرفته است تا در عین رسیدن به فرمی منحصر به فرد از منظر طراحی، همزمان

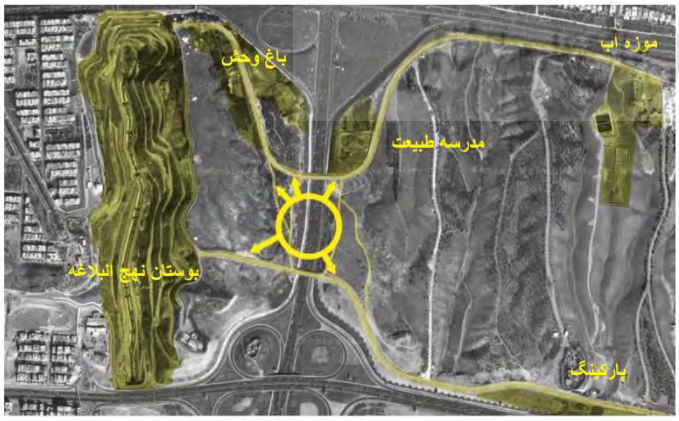
دغدغه‌های مهندسی اعم از کاهش حداکثری مصالح مصرفی هم مورد توجه ویژه قرار گیرد.

پل شهری مذکور در بخش مرکزی پارک جنگلی پردیسان در تهران واقع گردیده است و بخش شرقی و غربی پارک را به هم متصل می‌نماید. در گذشته دو پل بتنی در این محدوده ساخته شده است که علاوه بر عابر پیاده محل تردد وسایل نقلیه نیز است. با طراحی پل پیاده در این محدوده، علاوه بر تفکیک کاربری سواره و پیاده، فضای شهری و اجتماعی ای به منظور تشویق شهروندان برای حضور بیشتر در طبیعت ایجاد خواهد گردید.

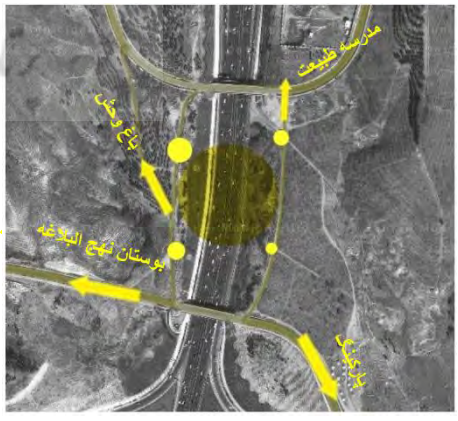


شکل ۷) جانمایی سایت پروژه در پارک پردیسان

اولین قدم در طراحی پروژه مشخص نمودن شریان های اصلی و دسترسی های پل به محیط های اطراف است، تا بدین وسیله پیرامون ظرفیت پل و محل قرار گیری آن تصمیم گیری شود. نزدیک ترین کاربری ها به سایت پروژه باغ وحش پردیسان در بخش شمال غربی و مدرسه طبیعت در شمال شرقی است. دیگر مسیرهای دسترسی به موزه آب، پارکینگ جنوبی پردیسان و پارک نهج‌البلاغه ختم خواهند شد.(شکل ۸) به منظور طراحی مجموعه ای که امکان دسترسی به کاربری های اطراف را از طریق شریان های موجود داشته باشد، چهار نقطه اصلی به عنوان ورودی های پل در نظر گرفته شد.(شکل ۹)



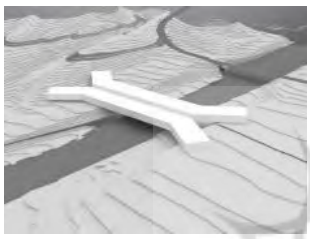
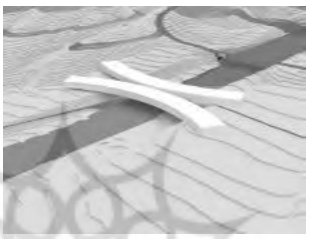
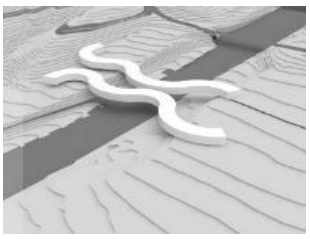
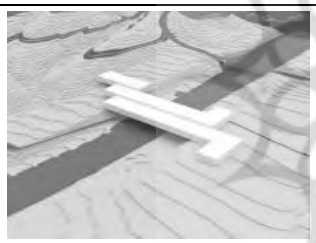
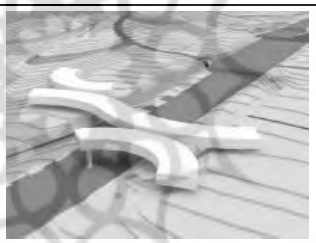
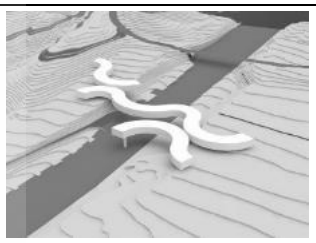
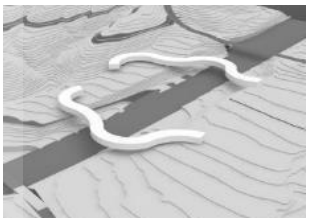
شکل۸) کاربری های اطراف پل و شریان های اصلی



شکل ۹) نقاط تعیین شده جهت ورودی های

پس از تعیین تعداد و محل ورودی و خروجی‌های پل، گزینه‌هایی که امکان تامین دسترسی پل به این نقاط را فراهم می نمایند به عنوان فرم های پیشنهادی بررسی می گردد، این گزینه ها شامل قرار گیری پل ها به صورت خطی، طبقه ای و یا میدانی می باشند. که هر یک از این گزینه ها می تواند هندسه خطوط متفاوتی همچون خطوط شکسته، منحنی و موجدار را دارا باشند. (جدول ۱) از میان گزینه های ذکر شده پل های میدانی به دلیل قابلیت بیشتر در ایجاد فضای شهری به سبب فرم میدان‌گاهی خود، برقراری ارتباط بیشتر با طبیعت اطراف به سبب وجود فضای سبز در میان دو پل، و دسترسی نزدیک تر ورودی های پل به شریان های اصلی اطراف، انتخاب گردید. همچنین خطوط منحنی به دلیل ایجاد حس حرکت بیشتر نسبت به خطوط شکسته و تناسب بهتر با طول پل نسبت به خطوط موج‌دار مناسب تر دیده شدند.

جدول ۱) گزینه های پیشنهادی فرم کلی پل

آلترناتیوها		نوع خطوط		
		۱. شکسته	۲.منحنی	۳.موجدار
نوع فرم	۱.خطی			
	۲.طبقه ای			
	۳. مرکزی			

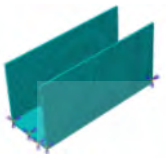
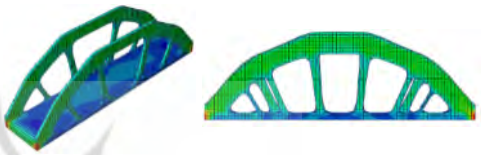
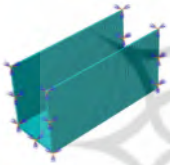
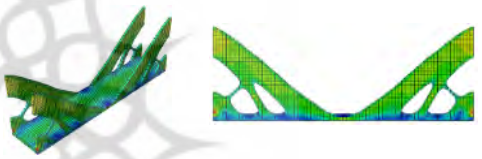
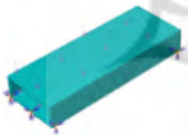
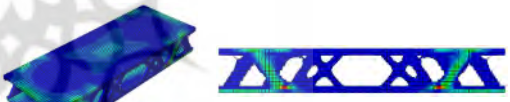
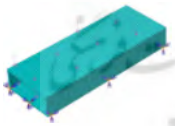
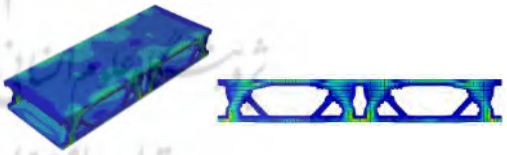
مرحله بعدی در فرایند فرم یابی تعیین نقاط تکیه گاهی است. در بهینه‌سازی توپولوژی، فرم بهینه‌یابی شده به هندسه تکیه گاه – شامل نقطه ای، خطی و یا ترکیبی از هر دو – و محل اعمال تکیه گاه وابسته قابل توجهی دارد. به همین جهت در یک دهانه متوسط به طول ۵۰ متر و یک دهانه بلند به طول ۹۰ متر شرایط مختلف تکیه گاهی سازماندهی و سنجیده شد. این بررسی در دو حالت عدم نقش سازه ای بدنه و وجود نقش سازه ای برای بدنه در باربری پل انجام شده است.

جدول ۲) فرم های بهینه شده در حالت عدم وجود نفش سازه ای در بدنه پل و شرایط مرزی متفاوت

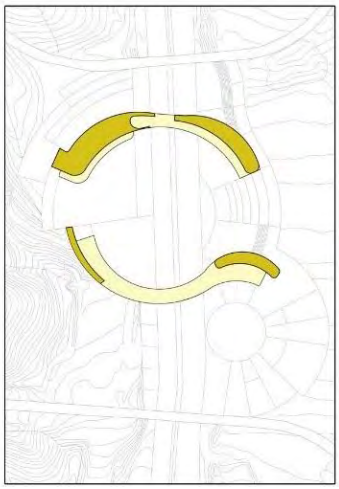
	هندسه ناحیه تکیه گاه	محل اعمال ناحیه تکیه گاه	اعمال شرایط مرزی	فرم نهایی
۲ ناحیه	نقطه ای			
	خطی			
	ترکیبی			
۳ ناحیه	نقطه ای	یک نقطه میانی		
		دو نقطه در ناحیه میانی		
	خطی	تکیه گاه کناری در پایه		
		تکیه گاه کناری در		
	ترکیبی	تکیه گاه کناری در پایه		
		تکیه گاه کناری در		

پس از مشاهده فرم های استخراج شده از جداول فرم در حالت عدم نقش سازه ای بدنه، تکیه گاه های نقطه ای به دلیل مداخله کمتر در سایت و قابلیت بیشتر توسعه فرم بر مبنای فرم بهینه شده، انتخاب گردیدند. لازم به ذکر است در حالت وجود نقش سازه ای برای بدنه پل، فرم های به دست آمده یادآور پل های با کابل کشیده، پل های کابلی معلق و پل های خرپایی است، در نتیجه می توان پل های کابلی و خرپایی را با استفاده از روش های بهینه سازی توپولوژی از منظر حجم و وزن بهینه سازی نمود.

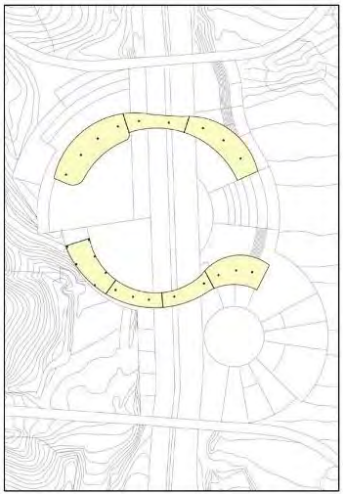
جدول ۳) فرم های بهینه شده در حالت وجود نقش سازه ای در بدنه پل و شرایط مرزی متفاوت

تعداد ناحیه بارگذاری	نحوه اعمال ناحیه تکیه گاهی	اعمال شرایط مرزی	فرم نهایی
یک طبقه بارگذاری	تکیه گاه در عرشه		
	تکیه گاه در بدنه		
دو طبقه بارگذاری	۲ ناحیه تکیه گاهی		
	۳ ناحیه تکیه گاهی		

پس از انتخاب هندسه و نوع اعمال تکیه‌گاه، در گام بعدی با توجه به پلان پل به تعیین نقاط تکیه گاهی و مشخص نمودن فضاهای دو طبقه در پلان پرداخته می‌شود.(شکل ۱۰) از آنجا که یکی از اهداف پروژه پیش رو ا فراهم آوردن چارچوبی مشخص و قابل دسترس برای علاقه مندان در این زمینه است، با تقسیم دهانه پل به دهانه های ۷۰ تا ۹۰ متری فرایند تحلیل در هر دهانه به صورت مجزا و با استفاده از رایانه های شخصی انجام شده است. عرض دهانه پل نیز مابین ۱۰ تا ۱۵ متر متغیر است. (شکل ۱۱)



شکل ۱۰) پایه های پل و قسمت های دو طبقه

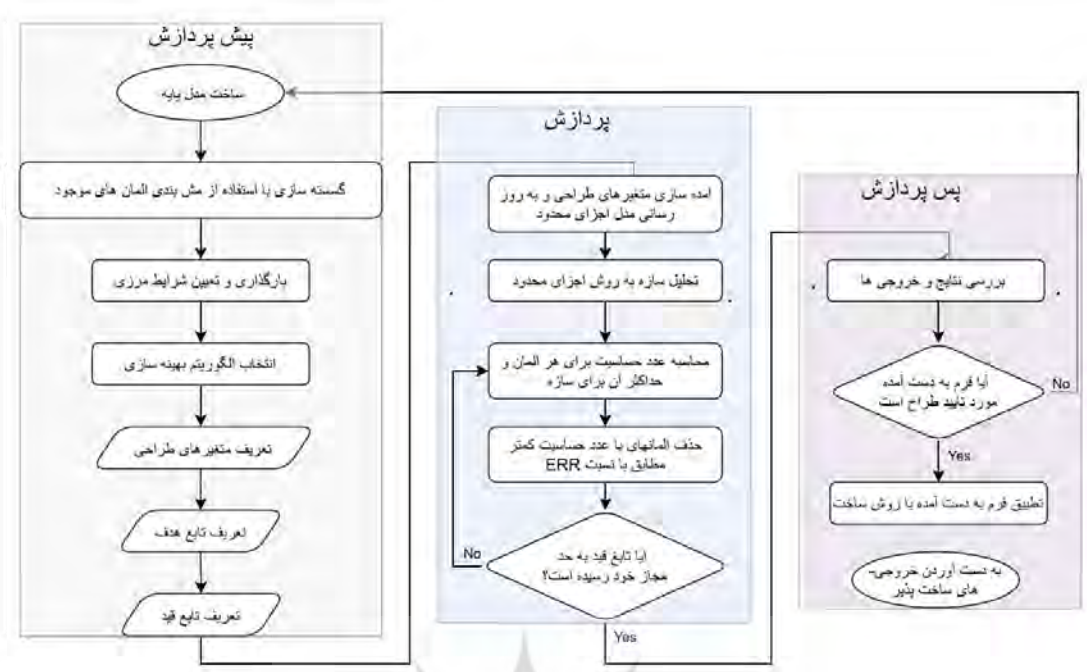


شکل ۱۱) تقسیم بندی دهانه کلی پل به قسمت های کوچکتر

مراحل بهینه سازی توپولوژی در نرم افزار انجام شده است. از میان نرم‌افزارهایی که قابلیت انجام بهینه‌سازی توپولوژی را دارا می‌باشند و استفاده از آن‌ها توسط معماران مرسوم‌تر است، می‌توان به نرم‌افزارهای آلتیر، میلیپد، آمبا، توپواستراکت و آباکوس اشاره نمود، در این میان میلیپد و آمبا از افزونه‌های گرس هاپر می‌باشند.

نرم‌افزارهای آمبا و توپواستراکت به‌خوبی با فرم‌های معماری و الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی سازگار می‌باشند، اما به دلیل تقریبی و غیر دقیق بودن فرم‌های نهایی، جهت مراحل اولیه کار و فرم یابی های کلی توصیه می‌شوند. نرم‌افزار آباکوس دارای ساختار پیچیده‌تری نسبت به سایر نرم‌افزارهای نامبرده است ولی خروجی‌های دقیق‌تر و کارآمدتری دارد و برای مدل‌سازی‌های نهایی پیشنهاد می‌گردد.

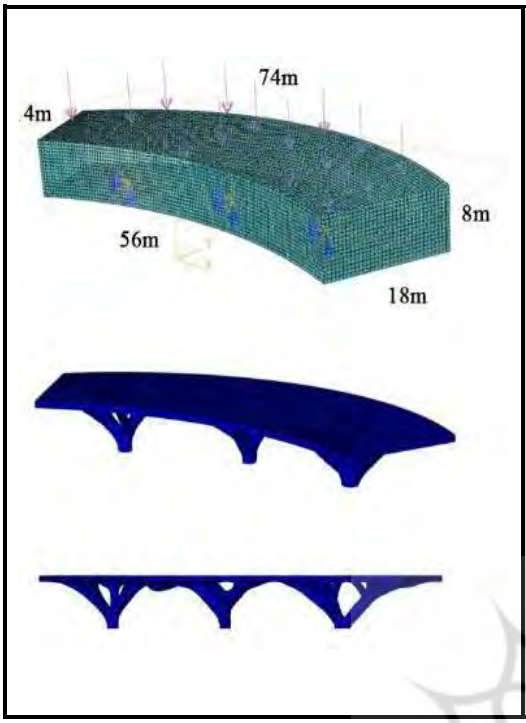
شیوه کار در این نرم افزارها بر اساس الگوریتم های SIMP است. در الگوریتم های SIMP مبنای فرم‌یابی بر پایه حذف مواد استوار است که روش های بهینه سازی ESO و BESO نیز جز این دسته از الگوریتم ها می باشند. روند کار در نرم افزارهای بهینه سازی و فرم‌یابی شامل سه مرحله پیش‌پردازش، پردازش و پس پردازش است که اقدامات انجام شده در هر مرحله بسته به نوع نرم‌افزار و مسئله طراحی می‌تواند متفاوت از یکدیگر باشد. مرحله پیش پرداش شامل ساخت مدل، تعیین مولفه های کاربردی، تعیین شرایط مرزی و تمامی اطلاعات لازم برای آغاز فرایند بهینه‌سازی است. در مرحله پردازش فرایند بهینه‌سازی و فرم‌یابی صورت می‌گیرد و در مرحله پس پردازش به تحلیل و بررسی فرم نهایی و خروجی‌ها پرداخته می‌شود. (نمودار ۱) در این تحقیق نرم افزار آباکوس به دلیل وجود دقت و کارایی بیشتر در فرم نهایی به کار گرفته شده است و از آنجایی که برای مدل سازی پل از نرم افزار راینو استفاده شده است، اباکوس قابلیت انتقال هندسه‌های حاصل از بهینه‌سازی با این نرم افزار را نیز دارا می باشد. در ادامه به منظور اشنایی با روند بهینه سازی، یک دهانه از پل انتخاب شده و فرایند فرم یابی در پایه و بدنه آن بیان شده است.



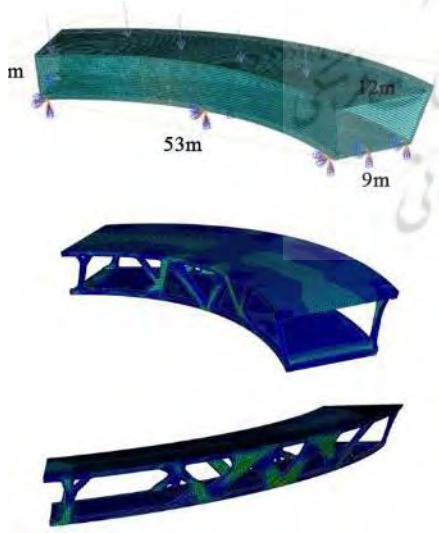
نمودار ۱) فرایند فرم‌یابی و بهینه‌سازی توپولوژی در نرم‌افزارهای بر پایه بهینه سازی تکاملی

در فرمیابی پایه، مکعب مستطیلی به شکل توپر مطابق با عرض و دهانه پل مدل سازی شده است. اطلاعات ورودی لازم جهت انجام بهینه سازی در نرم افزار اباکوس، شامل مشخصات مصالح مصرفی، شرایط مرزی اعم از نوع و میزان بار و محل تکیه گاه ها و نوع مش بندی است. اطلاعات وارده در الگوریتم بهینه سازی تکاملی همان‌گونه که پیشتر بیان شد شامل مشخص نمودن تابع هدف و تابع قید می باشد، در این تحقیق به حداقل رساندن انرژی کرنشی، به منظور به حداکثر رساندن سختی سازه به عنوان تابع هدف و حجم سازه به عنوان تابع قید در نظر گرفته شده است. پس از ورود اطلاعات لازم، نرم افزار فرایند بهینه سازی را با حداکثر تعداد چرخه تعیین شده انجام خواهد داد، در این پروژه حداکثر تعداد چرخه ۸۰ در نظر گرفته شده است و دلیل استفاده از این عدد، عدم تغییر قابل ملاحظه در چرخه‌های پس از مرحله ۵۰ بوده است. در جدول ۴ و ۵ اطلاعات ورودی همراه با معادل های انگلیسی آن در نرم افزار و فرم نهایی پایه و بدنه قسمتی از پل به تصویر کشیده شده است.

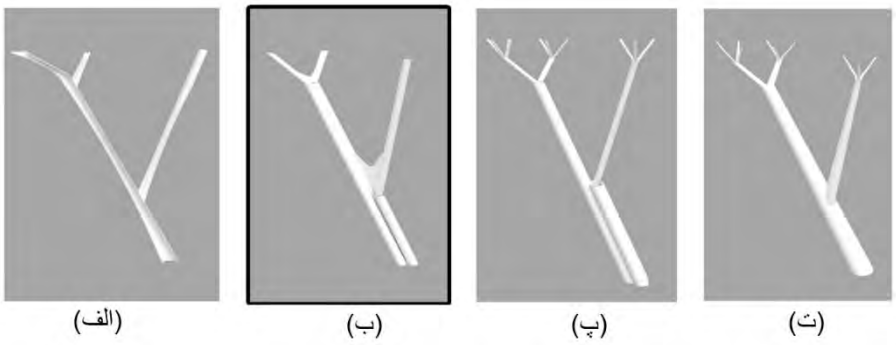
جدول ۴) اطلاعات ورودی در فرایند بهینه سازی و فرم نهایی

	Material -steel - mass density: 7850 kg/m^3 - Young's modulus: 2e11 Pa - Poisson's ratio: 0.3 - section: solid, homogeneous Boundary condition -live load: 5 KN/m^2 - support: rigid Mesh element shape: hexahedral size: 0.5*0.5*0.5 m Optimization - objective function: strain energy - target: minimize - constraint: volume - maximum cycles: 80 - volume fraction: 0.1	**مصالح** –فولاد –7850 kg/m^3 وزن مخصوص: –2e11 Pa مدول یانگ: ضریب پواسون: ۰.۳ مقطع: توپو، همگن **شرایط مرزی** –5 KN/ m^2 بار زنده: نوع تکیه گاه: گیردار **مش بندی** –نوع المان: شش وجهی –0.5*0.5*0.5 m ابعاد: **بهینه سازی** –تابع هدف: انرژی کرنشی – هدف: مینیموم سازی – قید: حجم – حداکثر چرخه مجاز: ۸۰ – کسر حجم: ۰.۱ حجم اولیه باقی بماند

جدول ۵) اطلاعات ورودی در فرایند بهینه سازی بدنه پل و فرم نهایی

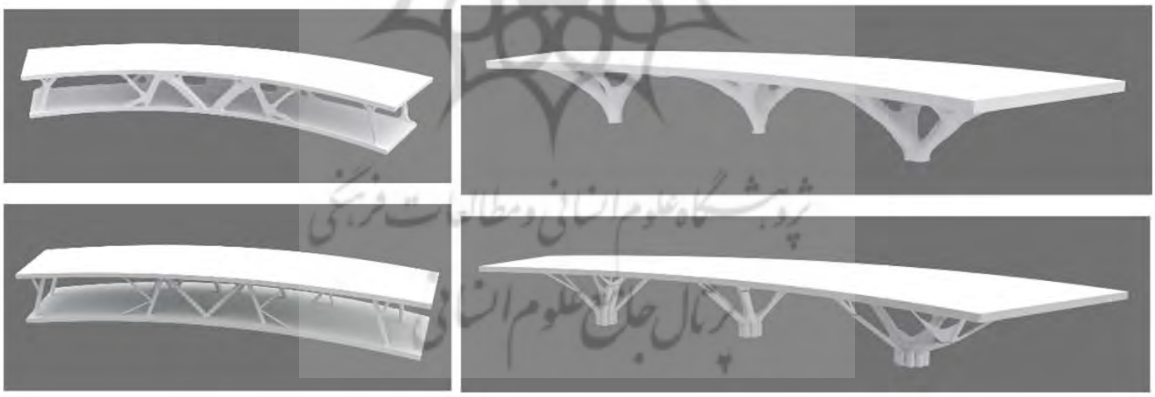
	Material -steel - mass density: 7850 kg/m3 - Young's modulus: 2e11 Pa - Poisson's ratio: 0.3 - section: solid, homogeneous Loads -live load: 5 KN/m2 - snow load: 1.08 KN/m2 - support: rigid Mesh element shape: hexahedral size: 0.3*0.3*0.3 m Optimization - objective function: strain energy - target: minimize - constraint: volume - volume fraction: 0.2 - maximum cycles: 60	مصالح –فولاد –7850 kg/m3 وزن مخصوص: –2e11 Pa مدول یانگ: ضریب پواسون: ۰.۳ مقطع: توپو، همگن شرایط مرزی –5 KN/ m2 بار زنده: –1.05 KN/m2 بار برف: نوع تکیه گاه: گیردار مش بندی –نوع المان: شش وجهی –0.3*0.3*0.3 m ابعاد: بهینه سازی –تابع هدف: انرژی کرنشی – هدف: مینیموم سازی – قید: حجم – کسر حجم: ۰.۲ حجم اولیه باقی بماند – حداکثر چرخه مجاز: ۶۰

پس از پایان فرایند بهینه سازی در نرم افزار آباکوس، فرم نهایی جهت توسعه بر مبنای فرم بهینه یابی شده به نرم افزار راینو منتقل می شود. از آنجایی که پل مورد نظر در این پروژه فولادی می باشد، مقاطع مختلف فولادی که قابلیت تطبیق با فرم درختی حاصل از فرایند بهینه یابی را دارا می باشند پیشنهاد گردید. این مقاطع شامل مقاطع سپری، مقاطع لوله ای به همراه ورق هایی با برش های منحنی به منظور تقویت مقاطع و نزدیکی بیشتر با فرم بهینه یابی شده، مقاطع لوله ای و مخروطی می باشد.



شکل ۱۲) الف) مقطع سپری ب) مقطع دسته لوله ای با ورق های تقویتی به صورت منحنی برش خورده پ) مقطع دسته لوله ای ت) مقطع مخروطی

از این میان مقاطع لوله ای همراه با ورق های تقویتی میانی به دلیل سهولت در ساخت، تطبیق بیشتر با فرم نهایی در نرم افزار آباکوس، مقاومت در برابر کمانش موضعی و سهولت های اجرا انتخاب گردید. سپس ستون های نهایی در پایه و بدنه پل با در نظر گرفتن این نوع مقطع و بر مبنای فرم حاصل از بهینه سازی توپولوژی مدل سازی گردیدند.



شکل ۱۳) ستون های مدل سازی شده بر مبنای فرم های به دست آمده از بهینه سازی توپولوژی در پایه و بدنه پل

نتیجه گیری

فرایند فرم‌یابی و بهینه‌سازی توپولوژی بر پایه بهینه سازی تکاملی شامل سه مرحله عمده پیش پردازش، پردازش و پس پردازش است. در مرحله پیش پردازش معمار با بررسی دیاگرام های دسترسی و شرایط تکیه گاهی در سایت در رابطه با محل و نوع تکیه گاه ها و پلان پل تصمیم گیری می نماید و پس از تعریف متغیرهای طراحی و توابع هدف و قید، مرحله پردازش توسط نرم افزار آغاز می گردد. با پایان مرحله پردازش و دستیابی به فرم بر اساس بهینه سازی توپولوژی، معمار می تواند با طراحی مقاطعی که از نظر فرمی به فرم بهینه یابی شده نزدیک و از نظر سازه ای کارا می باشند به ساخت پذیری فرم نهایی کمک نماید.

در این تحقیق سعی شده است با تهیه و استفاده از جداول فرم‌یابی، که نشان دهنده تاثیر نوع و محل شرایط تکیه گاهی و دیگر عوامل موثر بر طراحی پل های با دهانه های متوسط و بلند با شرایط مشابه هستند، راه حلی جهت شفافتر نمودن فرآیند طراحی معماری با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی فراهم آورد.

در نهایت در رابطه با نرم‌افزارهای مورد استفاده در بهینه‌سازی توپولوژی در طراحی معماری، مشخص گردید که نرم افزار آمبا جهت مراحل پیش پردازش و دست یابی به فرم های اولیه، نرم افزار آباکوس جهت فرم یابی های دقیق و نرم افزار راینو جهت توسعه فرم نهایی بر پایه بهینه سازی توپولوژی مناسب است. در نتیجه، با استفاده از این سه نرم افزار و یا نرم افزارهای مشابه می توان به فرم بهینه یابی شده مطلوب در طرح های معماری دست یافت.

در این پژوهش، استفاده از روش‌های بهینه سازی تکاملی سازه‌ای در طراحی معماری سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفت است. در این راستا نمونه موردی طراحی پل شهری پیاده، به عنوان نمونه‌ای که عناصر سازه‌ای نقش قابل توجهی در طرح معماری نهایی بازی می‌کنند، انتخاب شده است. سپس مبانی نظری روش بهینه سازی تکاملی SIMP که متکی بر تحلیل اجزای محدود با المان‌های حجمی است تشریح گردیده و نمونه های پیشین استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی در معماری و صنعت ساختمان مورد معرفی و بررسی اجمالی قرار گرفت. در ادامه جداول ریخت‌شناسی فرم حاصل از بهینه‌سازی توپولوژی در دو حالت: ۱- بهینه‌سازی سازه‌ای در حجم زیر پل ۲- بهینه‌سازی سازه‌ای در دیواره‌های کناری، بر اساس آرایش تکیه‌گاهی تهیه گردید که در ادامه از آنها در طراحی معماری مورد استفاده قرار گرفت. جهت تهیه دیاگرام‌های ریخت‌شناسی از الگوریتم بهینه‌سازی SIMP به صورت یکطرفه (صرفا با کاهش المان)، با تابع هدف مینیمم سازی انرژی کرنشی و با قید کسر حجم به میزان حداکثر ۹۰٪ حجم اولیه در نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود آباکوس استفاده گردید. در ادامه نحوه بکارگیری این روش در مراحل مختلف طراحی معماری در سه سطح *پیش پردازش*، *پردازش* و *پس- پردازش* مورد تشریح قرار گرفت.

در مرحله پیش پردازش معمار با بررسی دیاگرام های دسترسی و شرایط تکیه گاهی در سایت در رابطه با محل و نوع تکیه گاه ها و پلان پل تصمیم گیری می نماید و پس از تعریف متغیرهای طراحی و توابع هدف و قید، مرحله پردازش توسط نرم افزار آغاز می گردد. با پایان مرحله پردازش و دستیابی به فرم بر اساس بهینه سازی توپولوژی، معمار می تواند با طراحی مقاطعی که از نظر فرمی به فرم بهینه یابی شده نزدیک و از نظر سازه ای کارا می باشند به ساخت پذیری فرم نهایی کمک نماید.

در طراحی با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی عموما تاثیر تصمیمات آغازین در فرآیند طراحی مانند محل قرارگیری دسترسی‌های عمودی، نوع تکیه‌گاه‌ها و محل قرارگیری آنها و غیره بر فرم‌های حاصله از ابتدا مشخص نمی‌باشند، به همین جهت تهیه دیاگرام‌های فرم‌شناسی برای حالات مختلف طراحی باعث می‌شود که طراح بتواند همزمان با حفظ شروط بهینه‌سازی سازه‌ای از تسلط بیشتری در رابطه با فرم‌های حاصل از روش بهینه‌سازی توپولوژی برخوردار باشد.

در نهایت در رابطه با نرم‌افزارهای مورد استفاده در بهینه‌سازی توپولوژی در طراحی معماری، مشخص گردید که نرم افزار آمبا جهت مراحل پیش پردازش و دست یابی به فرم های اولیه، نرم افزار آباکوس جهت فرم یابی های دقیق و نرم افزار راینو جهت توسعه فرم نهایی بر پایه بهینه سازی توپولوژی مناسب است. در نتیجه، با استفاده از این سه نرم افزار و یا نرم افزارهای مشابه می توان به فرم بهینه یابی شده مطلوب در طرح های معماری دست یافت.

نتایج این پژوهش به تشریح مفهوم بهینه‌سازی توپولوژی، به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی توپولوژی و فرایند به‌کارگیری از این روش در فرم یابی توسط معماران پرداخته است تا زمینه علمی و کاربردی به منظور استفاده معماران و طراحان را فراهم آورد. قابل‌ذکر است با فراگیری مفاهیم مطرح شده در پژوهش پیش رو و استفاده از نرم‌افزارهای

معرفی شده، به‌کارگیری این رویکرد در فرم‌یابی هر جزئی از ساختمان که از اهداف طراحی آن بهینه‌سازی وزن، کارایی سازه‌ای و دستیابی به فرمی ارگانیک است، امکان‌پذیر است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تاییدیه های اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان در مقاله: نویسنده اول: پژوهشگر اصلی/ نگارنده مقاله (۴۰٪)؛ نویسنده دوم: پژوهشگر فرعی (استاد راهنمای پژوهش) (۳۰٪)؛ نویسنده سوم: پژوهشگر فرعی (استاد راهنمای پژوهش) (۲۰٪)؛ نویسنده چهارم: پژوهشگر فرعی (همکاری در مدلسازی اجزای محدود) (۱۰٪).

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

1 -Johari M, Ahmadi Nadushan B. Reliability-based topology optimization of bridge structures using first and second order reliability methods. Journal of Structural Engineering and Construction. 2017 May 22; 4(1): 18-5. [Persian] https://www.jsce.ir/article_40432.html?lang=en

2 -Sadeghian M, Hosseini A. Investigating the efficiency of evolutionary optimization methods in achieving architectural and construction objectives. 2020 Apr 14; 45: 17-34. [Persian] https://hoviatshahr.srbiau.ac.ir/article_15714.html?lang=en

3 -Xie YM, Steven GP. A simple evolutionary procedure for structural optimization. Comput. Struct. 1993 Dec 3; 49: 885-896. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/004579499390035C

4 -Xie YM, Steven GP. Optimal design of multiple load case structures using an evolutionary procedure. Computations. 1994 April 1; 11: 295-302. https://doi.org/10.1108/02644409410799290

5 -Xie YM, Steven GP. A simple approach to structural frequency optimization. Comput. Struct. 1994 Dec 17; 53: 1487-1491. https://doi.org/10.1016/0045-7949(94)90414-6

6- Chu DN, Xie YM, Hira A, Steven GP. Evolutionary structural optimization for problems with stiffness constraints. Finite Elements in Analysis and Design. 1996 April 1; 21(4): 239–251. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0168874X9500043S

7 -Tanskanen P. The evolutionary structural optimization method: theoretical aspects. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2002 Nov 22; 191(47–48): 5485–5498. https://doi.org/10.1016/S0045-7825(02)00464-4

8 -Rian IM, Sassone M. Tree-inspired dendriforms and fractal-like branching structures in architecture: A brief historical overview. Frontiers of Architectural Research. 2014 Sep 1; 3(3):298-323. https://doi.org/10.1016/j.foar.2014.03.006

9 -Stromberg LL, Beghini A, Baker WF, Paulino GH. Application of layout and topology optimization using pattern gradation for the conceptual design of buildings. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2011 Feb 1; 43(2): 165–180. https://doi.org/10.1007/s00158-010-0563-1

10 -Stromberg LL, Beghini A, Baker WF, Paulino GH. Topology optimization for braced frames: Combining continuum and beam/column elements. Engineering Structures. 2012 April 1; 37: 106–124. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.12.034

11 -Briseghella B, Fenu L, Feng Y, Mazzarolo E, Zordan T. Topology optimization of bridges supported by a concrete shell. Structural Engineering International. 2013 Feb 9; 23(3):285-94. https://doi.org/10.2749/101686613X13363929988214

12 -Besserud K, Neil K, Alessandro B. Structural Emergence: Architectural and Structural Design Collaboration at SOM. Architectural Design. 2013; 83 (2): 48–55. https://doi.org/10.1002/ad.1553

13 -Sigmund, O., Maute, K. Topology optimization approaches. Struct Multidisc Optim. 2013 Aug 21; 48: 1031–1055. https://doi.org/10.1007/s00158-013-0978-6

14 -Deaton, J.D., Grandhi, R.V. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. Struct Multidisc Optim. 2014 July 4; 49: 1–38. https://doi.org/10.1007/s00158-013-0956-z

15 -Beghini LL, Beghini A, Katz N, Baker WF, Paulino GH. Connecting architecture and engineering through structural topology optimization. Engineering Structures. 2014 Feb 1; 59: 716–726. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.10.032

16 -Aage N, Amir O, Clausen A, Hadar L, Maier D, Søndergaard A. Advanced topology optimization methods for conceptual architectural design. InAdvances in Architectural Geometry 2015 Jan 1: 159-179. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11418-7_11

17 -Dapogny C, Alexis F, Georgios M, Grégoire A, Agnes C, Rafael E. Geometric Constraints for Shape and Topology Optimization in Architectural Design. Computational Mechanics. 2017 Feb 13; 59 (6): 933–65. https://doi.org/10.1007/s00466-017-1383-6

18 -Zegard, T., Hartz, C., Mazurek, A. et al. Advancing building engineering through structural and topology optimization. Struct Multidisc Optim. 2020 Jan 10; 62: 915–935. https://doi.org/10.1007/s00158-020-02506-6

19 -Kazakis G, Kanellopoulos I, Sotiropoulos S, Lagaros ND. Topology optimization aided structural design: Interpretation, computational aspects and 3D printing. Heliyon. 2017 Oct 1; 3(10): e00431. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00431

20 -Donofrio, M. Topology Optimization and Advanced Manufacturing as a Means for the Design of Sustainable Building Components. Procedia Engineering. 2016; 145: 638–645. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.054

21 -Saadlaoui Y, Jean-Louis M, Jean-Marie R, Patrick C. Topology Optimization and Additive Manufacturing: Comparison of Conception Methods Using Industrial Codes. Journal of Manufacturing Systems. 2017 April 1; 43 (April): 178–86. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.03.006

22 -Liu J, Gaynor AT, Chen S, Kang Z, Suresh K, Takezawa A, et al. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2018 May 3; 57(6):2457–83. https://doi.org/10.1007/s00158-018-1994-3

23 -Kontovourkis O, George T, Christos G. Robotic Additive Manufacturing (RAM) with Clay Using Topology Optimization Principles for Toolpath Planning: The Example of a Building Element. Architectural Science Review. 2019 Jun 2; 63: 105-118. https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1620170

24 -Meng L, Zhang W, Quan D, Shi G, Tang L, Hou Y, Breitkopf P, Zhu J, Gao T. From topology optimization design to additive manufacturing: Today's success and tomorrow's roadmap. Archives of Computational Methods in Engineering. 2019 Mar 1:1-26. https://doi.org/10.1007/s11831-019-09331-1

25 -Xian, Y., Rosen, D.W. Morphable components topology optimization for additive manufacturing. Struct Multidisc Optim. 2020 Jul 1; 62: 19–39. https://doi.org/10.1007/s00158-019-02466-6

26 -Christensen PW, Klarbring A. Two-Dimensional Shape Optimization. InAn Introduction to Structural Optimization 2009: 117-146. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8666-3_7

27 -Logan DL. A first course in the finite element method (4th ed). United States: Thomson. 2007.