



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 Khorasgani 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://doi.net/dor/20.1001.1.23224.991.1400.11.4.1.0>

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.

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

CITATION LINKS

- [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).

بهره گیری از بهینه سازی توپولوژی جهت

دستیابی به فرم در طراحی معماری

نمونه موردی: پل پیاده پردیسان

حمیده سروش^۱، رهام افغانی خراسگانی^{۲*}، محمدرضا حافظی^۳، حمید علی اکبرلو^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 راه حل هایی که در دهه اخیر جهت برقراری ارتباطی مؤثر میان معماری و مهندسی سازه پیشنهاد شده است، طراحی هم زمان سازه و معماری بوسیله بهینه سازی توپولوژی است. بهینه سازی توپولوژی یکی از انواع بهینه سازی سازه ای 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 بهره گیری از قابلیت های آن در فرآیند طراحی معماری است.

ابزار و روش ها: ابتدا به تشریح مفاهیم نظری بهینه سازی توپولوژی و مدل سازی عددی اجزای محدود پرداخته، سپس کاربردهای استفاده از بهینه سازی توپولوژی در معماری بررسی شده است و فرآیند به کارگیری این روش در طراحی معماری با استفاده از الگوریتم های معرفی شده و نرم افزارهای موجود بیان شده است.

یافته ها: در طراحی با استفاده از بهینه سازی توپولوژی عموماً تأثیر تصمیمات آغازین بر فرم های حاصله از ابتدا مشخص نیست، به همین جهت تهیه دیاگرام های فرم شناسی باعث می شود که طراح بتواند از تسلط بیشتری بر فرم های حاصل از این روش برخوردار باشد. تهیه و استفاده از جداول فرم شناسی، که نشان دهنده تأثیر نوع و محل شرایط تکیه گاهی و بارگذاری بر طراحی پل های با شرایط مشابه هستند، راه حلی جهت شفاف تر نمودن فرآیند طراحی معماری با استفاده از بهینه سازی توپولوژی فراهم خواهد آورد.

نتیجه گیری: در این تحقیق اطلاعات مورد نیاز جهت بهره گیری از بهینه سازی توپولوژی در طراحی و چگونگی طراحی یک پل عابر پیاده با استفاده از این روش توضیح داده شده است و چهارچوبی مشخص از روند فرم یابی و استفاده از روش بهینه سازی توپولوژی در دل فرآیند طراحی معماری ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: بهینه سازی توپولوژی، فرم یابی، طراحی معماری، سازه.

مقدمه

برقراری ارتباط میان عملکرد سازه ای و طرح معماری یکی از مسائل مورد توجه در صنعت ساختمان است. در یک پروژه به طور معمول مسائل زیبایی شناسی و فرم داری اهمیت بنیادین برای معمار است، در حالی که تلاش مهندسين سازه معطوف به کارآمدی و پایداری سازه است. با استفاده از بهینه سازی توپولوژی در فرم یابی می توان با طراحی هم زمان سازه و فرم معماری، پاسخ مناسبی برای هر دو رویکرد مهندسی و زیبایی شناسانه ارائه نمود. بهینه سازی توپولوژی موسوم به TO (Topology Optimization) از انواع بهینه سازی سازه ای است که با توجه به قابلیت های 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 پتانسیل های این روش، و چگونگی تأثیرگذاری طراح در فرم های حاصل از این روش آشنا شوند. در نهایت، بستر سازی مناسبی برای استفاده از این روش و روش های مشابه فرم یابی در میان معماران صورت خواهد گرفت.

بدین منظور در ابتدا به تشریح مفاهیم سازه ای بهینه سازی توپولوژی پرداخته، سپس انواع کاربردهای این روش در طراحی عناصر ساختمانی به منظور آشنایی کامل با قابلیت های آن در معماری بیان شده است و در آخر فرایند به کارگیری این روش در طراحی معماری با استفاده از الگوریتم های معرفی شده و نرم افزارهای موجود توضیح داده شده است.

از بررسی پیشینه بهینه سازی توپولوژی مشخص می شود که پایه های آن در سال ۱۹۰۴ با مطالعاتی بر روی بهینه سازی خرپاها بنا نهاده شد، اما این ایده تا اواخر قرن بیستم به نتیجه قابل استفاده ای تبدیل نشد.^[۳-۵] مطالعات انجام شده بر روی

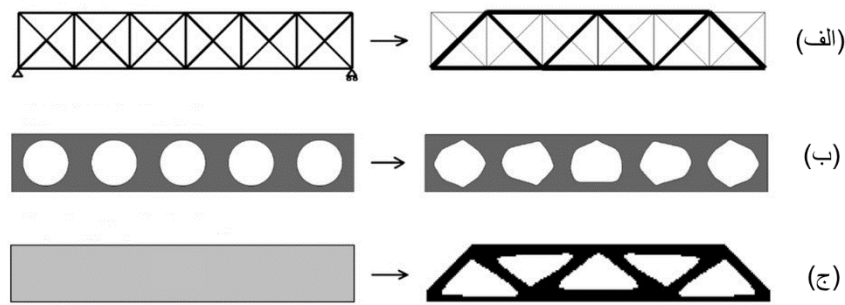
اشاره نمود؛ در این مقاله با استفاده از نمونه‌های مطالعاتی، کاربرد بهینه‌سازی توپولوژی به صورت دو بعدی و سه بعدی در صنعت ساختمان بیان شده است.^[۱۸]

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 تکنیک‌های ساخت فرم‌های حاصل از بهینه‌سازی توپولوژی را با استفاده از پرینت سه بعدی در مقاله خود بررسی کرده است.^[۲۰] در مقاله‌ای دیگر با استفاده از نمونه‌هایی موردی به مقایسه نرم افزارها و ابزارهای ساخت موجود در صنعت جهت به کارگیری این روش پرداخته شده است.^[۲۱] نمونه‌های موفق استفاده از پرینت سه بعدی در ساخت فرم‌های توپولوژیک نیز توسط لیو و همکاران معرفی شده است.^[۲۲] در مقاله‌ای دیگر نقش استفاده از روش‌های AM را در ساخت المان‌های ساختمانی طراحی شده بر پایه بهینه‌سازی توپولوژی بررسی شده است.^[۲۳] منگ و همکاران نیز چالش‌های ساخت فرم‌های توپولوژیک را بیان کرده‌اند.^[۲۴] ژیان و همکاران به راهکارهای کاهش هزینه ساخت و متریال فرم‌های بهینه‌سازی شده در طی استفاده از روش‌های AM پرداخته‌اند.^[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.

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 فرم‌یابی مقطعاتی 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 بابدند ساختمان‌های بلندمرتبه با رویکرد مذکور است.^[۹، ۱۰] در مقاله‌ای 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 بهینه‌سازی توپولوژی از منظر تئوری، به جنبه‌های 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 سال‌ها بعد بررسی این ارتباط دستمایه تحقیقاتی توسط معماران می‌شود. ایچ و همکاران ارتباط میان معماری و بهینه‌سازی 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 می‌توان به مقاله زیگارد و همکاران



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

مواد و روش ها

یکی از مهم ترین اهداف مهندسی سازه، بهینه سازی سازه ها از جنبه های مختلف سازه ای 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 بهینه سازی اندازه، بهینه سازی شکل و بهینه سازی توپولوژی می شود. (شکل ۱)

در بهینه سازی اندازه که از ابتدایی ترین روش های بهینه سازی سازه ای است، ابعاد المان های سازه ای اعم از سطح مقطع اعضا و ضخامت صفحات و سایر عناصر سازه دستخوش تغییر قرار می گیرند. در حالی که در بهینه سازی شکل، بدون تغییر اساسی در توپولوژی سازه، جایگاه هندسی نقاط اتصال و گره های سازه ای به منظور کنترل مسیر انتقال نیرو و کاهش تنش های متمرکز مورد جابجایی قرار می گیرد. بهینه سازی توپولوژی با یک مدل اولیه آغاز می شود و در طی فرایند بهینه سازی، بر اساس نحوه پخش نیرو در سازه، تغییراتی در آن ایجاد می نماید و تا حذف دسته ای از المان ها پیش می رود در واقع فرایندی برای تعیین بهترین آرایش از مقدار داده شده از مصالح در دامنه طراحی تا رسیدن به حداکثر بازدهی در سازه مورد نظر است. به عبارتی دیگر بهینه سازی یک سازه در فرم، حجم و چگونگی اتصال اعضا به یکدیگر بهینه سازی توپولوژی نامیده می شود. [۲۶]

از پارامترهای مهم در بهینه سازی تعیین دو معیار به عنوان تابع هدف و تابع قید است. تابع هدف معیاری را که طرح نسبت به آن بهینه می شود به صورت تابعی از متغیرهای طراحی بیان می کند. همچنین می توان مقادیر ویژه ای را طی بهینه سازی

اعمال نمود، این مقادیر مشخص را که از سوی طراح اعمال می شود، قید می نامند. عموماً 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 می شود. برای حل مسائل بهینه سازی توپولوژی روش های مختلفی تاکنون معرفی شده است، اما یکی از روش هایی که غالباً توسط معماران و مهندسان سازه به کار گرفته می شود روش های بهینه سازی تکاملی سازه ای موسوم به ESO (Evolutionary Structural Optimization) است [۷]، مبنای حل الگوریتم های بهینه سازی تکاملی همچون بسیاری از مسائل مهندسی بر پایه دانش اجزای محدود استوار است و تمامی نرم افزارهای موجود در این زمینه نیز بر این دو مبحث پایه ریزی شده اند. در نتیجه درک این دو مفهوم جهت آشنایی با مبانی نظری بهینه سازی 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 می شود. قاعده کلی در فرایند اجزای محدود به دست آوردن یک سری معادلات جبری برای حل کمیت های گره ای مجهول (تغییر مکان) است و کمیت های ثانویه از قبیل تنش و کرنش بر حسب کمیت های اصلی بیان می شوند. اولین قدم در حل یک مسئله به شیوه اجزای محدود تقسیم بندی مدل به تعداد مشخصی المان است که در فرایند حل مسئله و با برهم نهی روابط سازه ای هر کدام از المان ها منجر به حصول ماتریس سختی کلی سیستم می شود. این ماتریس شامل تمام اطلاعات در

directional Evolutionary) (Optimization نام دارد، که در این روش مواد ناکارآمد از سازه حذف می شوند و همزمان مواد به مناطق حساس اضافه می شود. به طور مثال اگر تنش حداکثر به عنوان هدف و معیار بهینگی در نظر گرفته شود، المان های با پایین ترین تنش حذف و به اطراف المان های با بالاترین مقادیر تنش افزوده می شود. در ادامه به معرفی الگوریتم های ESO پرداخته شده است.

جهت اعمال روش بهینه سازی تکاملی ابتدا فضای طراحی را به تعداد معینی از المان ها تقسیم کرده و پس از تعیین شرایط مرزی و بارگذاری، مسئله به صورت المان محدود تحلیل می گردد. سپس مقدار معیار موردنظر، که با توجه به نوع مسئله توسط طراح تعیین می گردد، برای هر یک از المان ها محاسبه می شود. همچنین از آن جا که مدل به اجزای محدود تقسیم شده است حذف المان به سادگی صورت می گیرد. رایج ترین معیارهای حذف المان بر اساس دو حالت سطح تنش و یا انرژی کرنشی است که در این میان ساده ترین روش معیار حذف المان بر اساس سطح تنش است، به این صورت که با حذف تدریجی المان ها با سطح تنش کمتر، سطح تنش در سازه جدید یکنواخت و یکنواخت تر می شود. در حذف مواد بر اساس تنش اغلب از تنش فون میسز (Von Mises stress) که ترکیبی از تنش های محوری و برشی می باشد به عنوان معیار استفاده می شود: [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 المان هایی که در آنها نسبت میزان متغیر معیار به نسبت حداکثر آن معیار پایین تر از حد معین RR_i باشند به عنوان مواد زائد شناخته شده و حذف می شوند. که این حذف از طریق از بین بردن تأثیر المان ها صورت می پذیرد. بدیهی است که مسئله بهینه سازی در یک مرحله قابل دستیابی نیست. یک روش تکاملی باید به روز شود به این معنی که تنها تعداد کمی از المان ها در هر مرحله باید از سازه

خصوص هندسه سازه، رفتار مصالح و تقسیم بندی المان ها بوده و نحوه پاسخ سیستم سازه ای در برابر بارهای وارده بوده و با حل معادلات ماتریسی آن تحت حالات مختلف بارگذاری نیروهای مجهول به دست خواهد آمد. در بهینه سازی تکاملی، با بررسی تأثیر نیروهای خارجی بر تک المان های سازه، در خصوص حذف و یا ماندگاری هر یک از المان های ایجاد شده در مدل بر اساس الگوریتم های بهینه سازی تکاملی و جواب های حاصل از تحلیل اجزای محدود تصمیم گیری می شود و این روند تا زمانی ادامه پیدا می کند که یکی از قیدهای تعیین شده محقق گردد. روند تحلیل اجزای محدود بدین صورت است: [۲۷]

۱. انتخاب المان و تقسیم بندی
۲. انتخاب تابع تغییر مکان
۳. به دست آوردن ماتریس سختی المان
۴. سرهم بندی معادلات و اعمال شرایط مرزی
۵. حل معادلات برای به دست آوردن تغییر مکان های مجهول
۶. به دست آوردن نیروهای عکس العمل
۷. به دست آوردن تنش ها و کرنش ها در المان

روش های بهینه سازی توپولوژی را می توان به دو گروه عمده: ۱-روش های بر پایه ریاضیات و ۲-روش های تکاملی تقسیم نمود، در واقع پیچیدگی روابط ریاضی علت اصلی ارائه روش های تکاملی بوده است. روش های تکاملی با تغییر هندسه و آرایش در فضای طراحی به هدف موردنظر دست می یابند. این روش، فرایندی تکرارشونده و تکاملی است که به منظور استفاده بهینه از مصالح، مصالح سازه را باز توزیع می کند. این باز توزیع به نحوی انجام می گیرد که مصالح از نقاط قوی تر با کارایی کمتر به نقاط ضعیف تر 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 برنامه های بر پایه اجزای محدود قابل اجرا است. نسخه پیشرفته تر روش تکاملی سازه ای، روش تکاملی سازه ای دوطرفه موسوم به Bi-BESO

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. به صورت خلاصه مراحل روش تکاملی برای یک بهینه‌سازی سختی را می‌توان به این گونه 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.

حذف شوند. در واقع مقدار RR_i 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 ER به 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،



شکل ۲) توزیع مصالح در چرخه های بهینه سازی توپولوژی در یک پل

مرکز انجمن بین المللی قطر در سال ۲۰۱۱ توسط معمار مشهور ژاپنی آراتا ایسوزاکی در دوحه قطر طراحی و اجرا شده است. سایه بان عظیمی به عرض ۳۶ متر و طول ۲۵۰ متر و وجه ورودی بنا وجود دارد که پایه آن به صورت ارگانیک و درختی و از طریق فرایند بهینه سازی توپولوژی طراحی شده است. به طور عمده می توان فرم های حاصل از بهینه سازی توپولوژی را زیرمجموعه ستون های شبه درختی تلقی نمود. برای ساخت ستون های درختی این پروژه از دو فونداسیون بتنی و ستون های فولادی با پوشش ورق های 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]

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 می کند تا سپس و بر اساس آن به توسعه طرح پرداخته شود؛ در حالت دوم از فرم بهینه سازی شده به صورت مستقیم به عنوان ورودی در فرایند ساخت استفاده می گردد. موارد استفاده از روش های دستیابی به فرم بر پایه بهینه سازی توپولوژی در معماری را می توان شامل طراحی ستون و پایه، نما و بدنه، سقف، اجزای سازه ای (خرپا، تیر، اسلب سقف و...) و طراحی مبلمان دانست. در سال های اخیر نمونه هایی در هر یک از موارد ذکر شده طراحی و ساخته شده است که در ادامه مواردی جهت آشنایی بیشتر با موضوع بررسی شده است.



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

برج ها را در برگرفته است طراح قصد داشته تا با ایجاد فرمی شبیه تار عنکبوت این حس را القا نماید که استفاده از روش بهینه سازی توپولوژی علاوه بر پاسخگویی به خواسته طراح دارای بازدهی سازه ای نیز است. [۱۵]

بدنه پل اتصال دهنده برج هایی در چین یکی دیگر از نمونه های طراحی نما با این رویکرد است. هدف از طراحی نمای این پل، بهره گیری از طراحی خلاقانه و منحصر به فرد برای اتصال میان برج ها است. از آنجایی که این پل گویی

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

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 سازه ای 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 بهینه سازی توپولوژی در طراحی سقف های پیش ساخته است.^[۸]



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

از آنجا که بهینه سازی توپولوژی روشی برای برقراری ارتباط میان سازه و معماری است قابلیت های 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

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

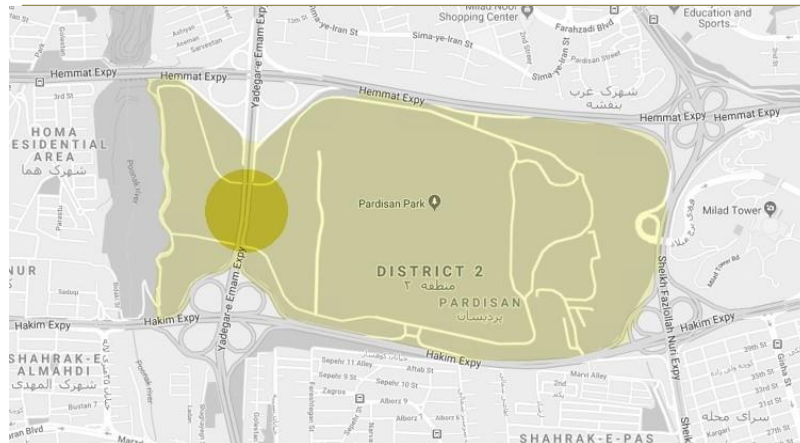
نمونه مورد مطالعه (پروژه مورد بررسی)، طراحی یک پل پیاده شهری است که دارای فرم سازه ای توجیه پذیری بوده و شاخص اصلی آن بهینه بودن از منظر سختی و وزن است؛ بدین منظور، بهینه سازی توپولوژی به عنوان روش طراحی در استحصال فرم مورد استفاده قرار گرفته است تا در عین رسیدن به فرمی منحصر به فرد از منظر طراحی، همزمان

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 دست یابی به فرم ستون های یک پل عابر پیاده شهری بر پایه بهینه سازی توپولوژی پرداخته شده است.

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.

دغدغه های 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 می نماید. در گذشته دو پل بتنی در این محدوده



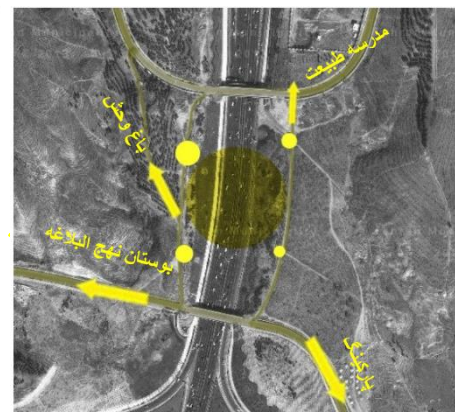
شکل ۷) جانمایی سایت پروژه در پارک پردیسان

پارکینگ جنوبی پردیسان و پارک نهج البلاغه 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)

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،



شکل ۸) کاربری های اطراف پل و شریان های اصلی

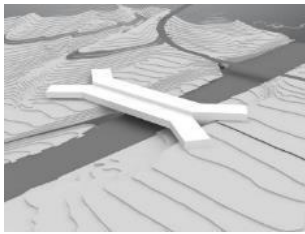
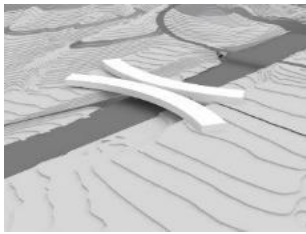
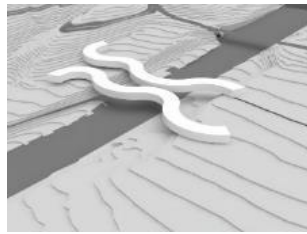
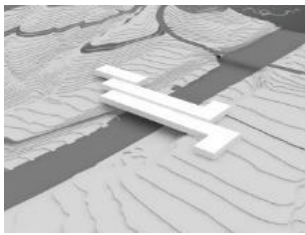
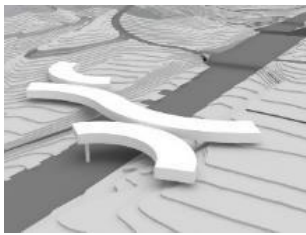
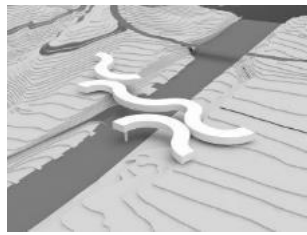
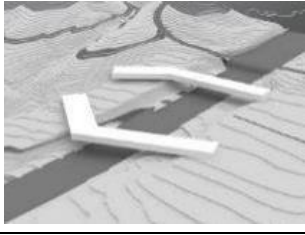
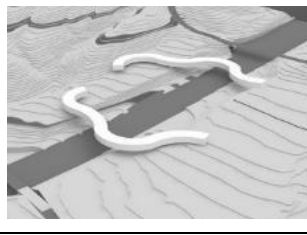


شکل ۹) نقاط تعیین شده جهت ورودی های

پل های میدانی به دلیل قابلیت بیشتر در ایجاد فضای شهری به سبب فرم میدان گاهی خود، برقراری ارتباط بیشتر با طبیعت اطراف به سبب وجود فضای سبز در میان دو پل، و دسترسی نزدیک تر ورودی های پل به جریان 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 موج دار مناسب تر دیده شدند.

پس از تعیین تعداد و محل ورودی و خروجی های پل، گزینه هایی 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

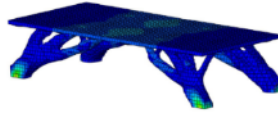
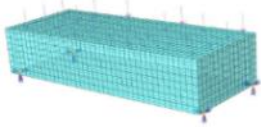
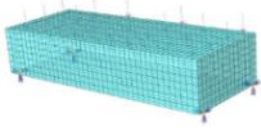
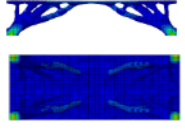
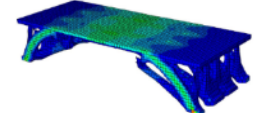
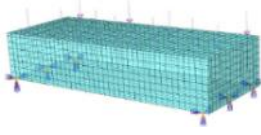
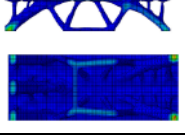
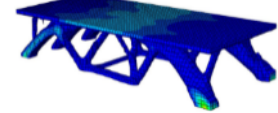
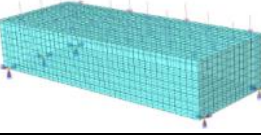
جدول ۱) گزینه های پیشنهادی فرم کلی پل

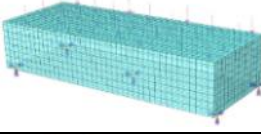
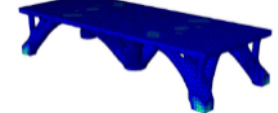
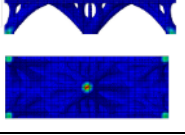
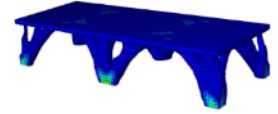
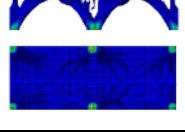
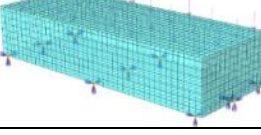
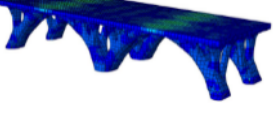
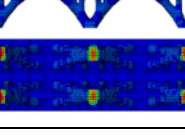
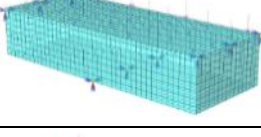
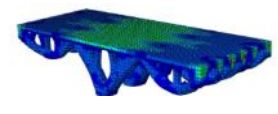
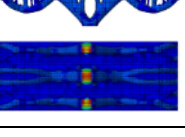
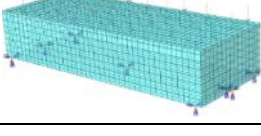
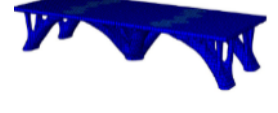
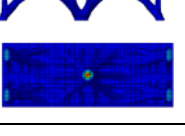
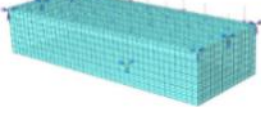
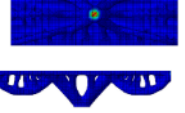
آلترناتیوها		نوع خطوط		
		۱. شکسته	۲. منحنی	۳. موجدار
نوع فرم	۱. خطی			
	۲. طبقه ای			
	۳. مرکبی			

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.

مرحله بعدی در فرایند فرم یابی تعیین نقاط تکیه گاهی است. در بهینه سازی توپولوژی، فرم بهینه یابی 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

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

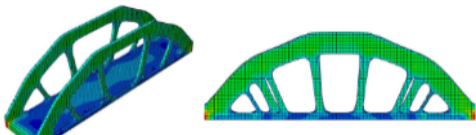
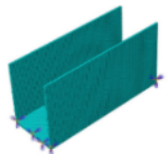
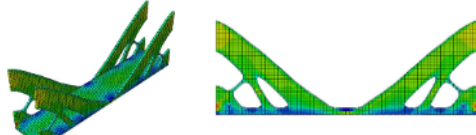
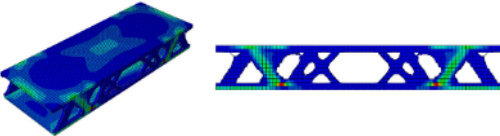
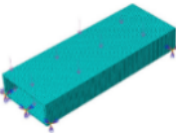
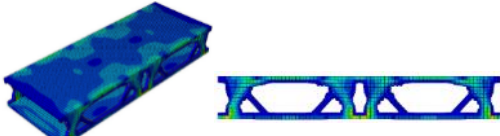
فرم نهایی		اعمال شرایط مرزی	محل اعمال ناحیه تکیه گاه	هندسه ناحیه تکیه گاه
۲ ناحیه			تقطعه ای	
			خطی	
			ترکیبی	

۳ ناحیه	تقطعه 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			

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.

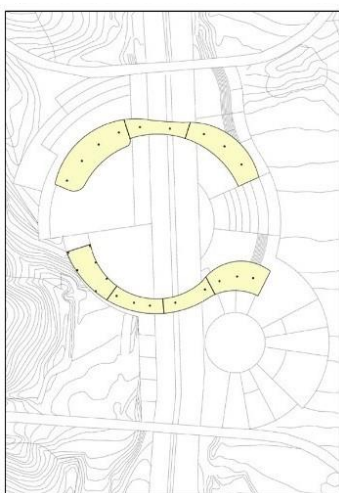
پس از مشاهده فرم های استخراج شده از جداول فرم در حالت عدم نقش سازه ای بدنه، تکیه گاه های نقطه ای به دلیل مداخله کمتر در سایت و قابلیت بیشتر توسعه فرم بر مبنای فرم بهینه شده، انتخاب گردیدند. لازم به ذکر است در حالت وجود نقش سازه ای برای بدنه پل، فرم های به دست

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

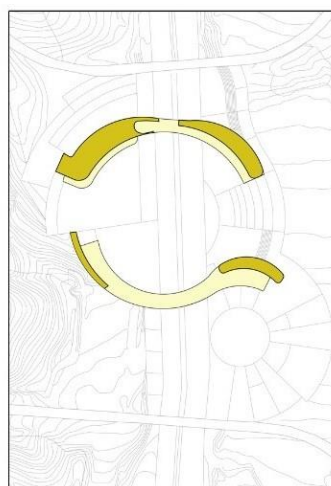
فرم نهایی	اعمال شرایط مرزی	نحوه اعمال تکیه گاهی	تعداد ناحیه بارگذاری
		تکیه گاه در عرشه	یک طبقه بارگذاری
		تکیه گاه در بدنه	یک طبقه بارگذاری
		۲ ناحیه تکیه گاهی	دو طبقه بارگذاری
		۳ ناحیه تکیه گاهی	دو طبقه بارگذاری

رایانه های شخصی انجام شده است. عرض دهانه پل نیز مابین ۱۰ تا ۱۵ متر متغیر است. (شکل ۱۱)

پس از انتخاب هندسه و نوع اعمال تکیه گاه، در گام بعدی با توجه به پلان پل به تعیین نقاط تکیه گاهی و مشخص نمودن فضاهای دو طبقه در پلان پرداخته می شود. (شکل ۱۰) از آنجا که یکی از اهداف پروژه پیش رو 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



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



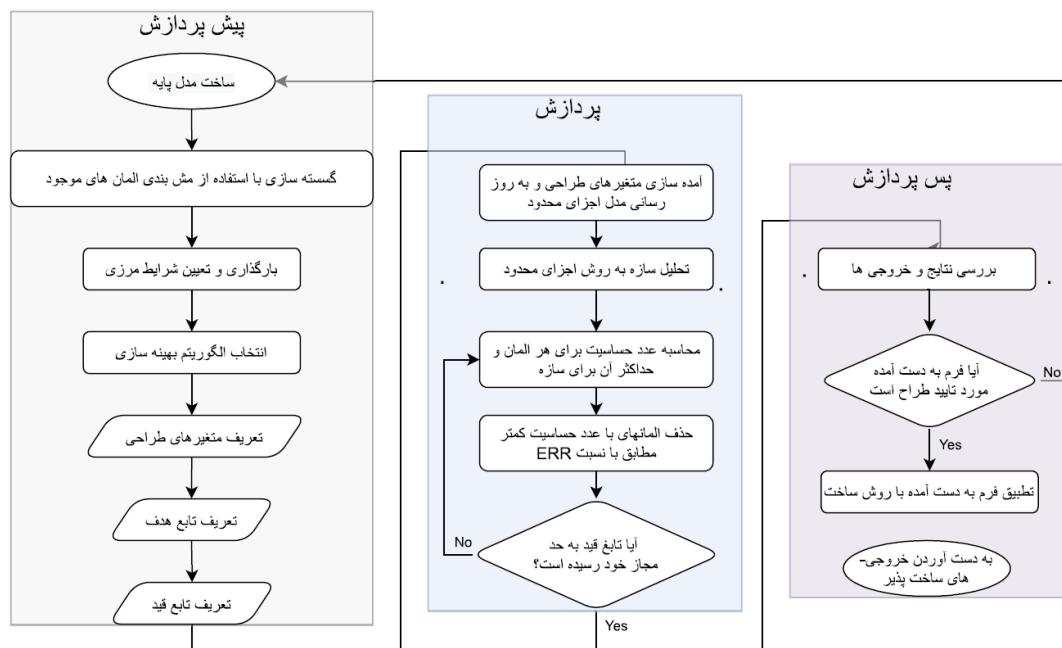
شکل ۱۰) پایه های پل و قسمت های دو طبقه

ساخت مدل، تعیین مولفه های کاربردی، تعیین شرایط مرزی و تمامی اطلاعات لازم برای آغاز فرایند بهینه سازی است. در مرحله پردازش فرایند بهینه سازی و فرم یابی صورت می گیرد و در مرحله پس پردازش به تحلیل و بررسی فرم نهایی و خروجی ها پرداخته می شود. (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، آباکوس قابلیت انتقال هندسه های حاصل از بهینه سازی با این نرم افزار را نیز دارا می باشد. در ادامه به منظور آشنایی با روند بهینه سازی، یک دهانه از پل انتخاب شده و فرایند فرم یابی در پایه و بدنه آن بیان شده است.

مراحل بهینه سازی توپولوژی در نرم افزار انجام شده است. از میان نرم افزارهایی که قابلیت انجام بهینه سازی توپولوژی را دارا می باشند و استفاده از آن ها توسط معماران مرسوم تر است، می توان به نرم افزارهای آلتیر، میلیپد، آمبا، توپواستراکت و آباکوس اشاره نمود، در این میان میلیپد و آمبا از افزونه های گرس هاپر می باشند.

نرم افزارهای آمبا و توپواستراکت به خوبی با فرم های معماری و الگوریتم های بهینه سازی تکاملی سازگار می باشند، اما به دلیل تقریبی و غیر دقیق بودن فرم های نهایی، جهت مراحل اولیه کار و فرم یابی کلی توصیه می شوند. نرم افزار آباکوس دارای ساختار پیچیده تری نسبت به سایر نرم افزارهای نامبرده است ولی خروجی های دقیق تر و کارآمدتری دارد و برای مدل سازی های نهایی پیشنهاد می گردد.

شیوه کار در این نرم افزارها بر اساس الگوریتم های SIMP است. در الگوریتم های SIMP مبنای فرم یابی 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 فرم یابی شامل سه مرحله پیش پردازش، پردازش و پس پردازش است که اقدامات انجام شده در هر مرحله بسته به نوع نرم افزار و مسئله طراحی می تواند متفاوت از یکدیگر باشد. مرحله پیش پردازش شامل

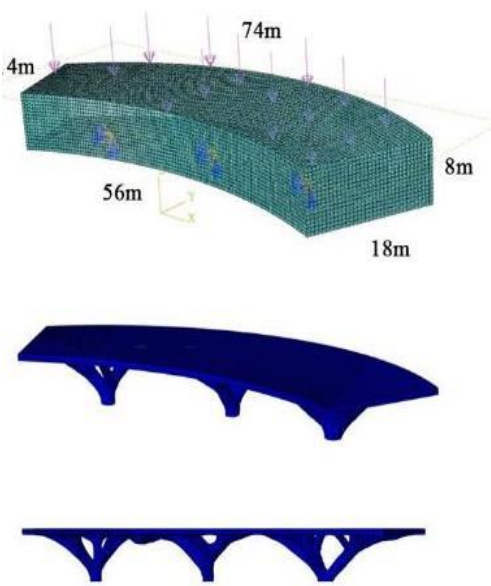


نمودار ۱) فرایند فرمیابی و بهینه سازی توپولوژی در نرم افزارهای بر پایه بهینه سازی تکاملی

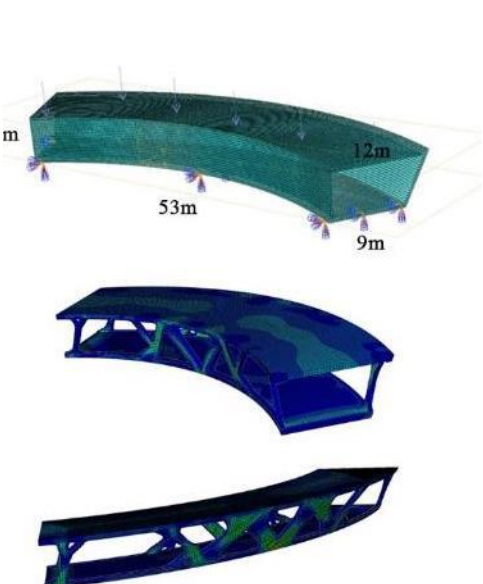
معادل های انگلیسی آن در نرم افزار و فرم نهایی پایه و بدنه قسمتی از پل به تصویر کشیده شده است.

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 همان گونه 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 چرخه های پس از مرحله ۵۰ بوده است. در جدول ۴ و ۵ اطلاعات ورودی همراه با

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

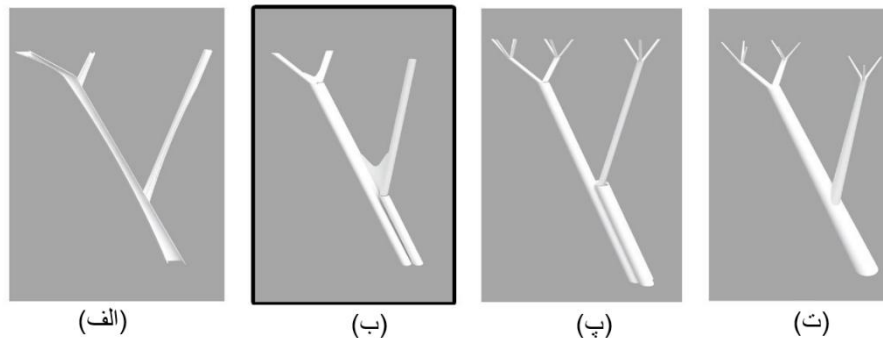
	Material -steel - mass density: 7850 kg/m³ - Young's modulus: 2e11 Pa - Poisson's ratio: 0.3 - section: solid, homogeneous Boundary condition -live load: 5 KN/m² - support: rigid Mesh element shape: hexahedral size: 0.5*0.5*0.5 m Optimization - objective function: strain energy - target: minimize - constraint: volume - maximum cycles: 80 - volume fraction: 0.1	مصالح - فولاد - 7850 kg/m³ وزن مخصوص: - 2e11 Pa مدول یانگ: ضریب پواسون: ۰.۳ مقطع: توپو، همگن شرایط مرزی 5 KN/m² - بار زنده: نوع تکیه گاه: گیردار مش بندی - نوع المان: شش وجهی - ابعاد: 0.5*0.5*0.5 m 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 - ابعاد: 0.3*0.3*0.3 m بهینه سازی - تابع هدف: انرژی کرنشی - هدف: مینیموم سازی - قید: حجم - کسر حجم: ۰.۲ حجم اولیه باقی بماند - حداکثر چرخه مجاز: ۶۰
---	---	---

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.

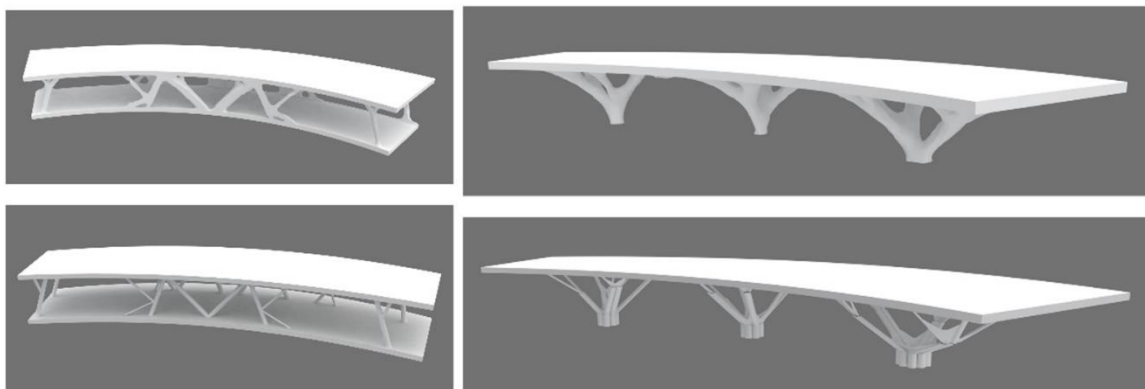
پس از پایان فرایند بهینه سازی در نرم افزار آباکوس، فرم نهایی جهت توسعه بر مبنای فرم بهینه یابی شده به نرم افزار راینو منتقل می شود. از آنجایی که پل مورد نظر در این پروژه فولادی می باشد، مقاطع مختلف فولادی که قابلیت تطبیق با فرم درختی حاصل از فرایند بهینه یابی را دارا می باشند



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

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.

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 کماتش موضعی و سهولت



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

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.

نتیجه گیری

فرایند فرم یابی و بهینه سازی 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

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 بهینه سازی توپولوژی عموماً تاثیر تصمیمات آغازین در فرآیند طراحی مانند محل قرارگیری دسترسی های عمودی، نوع تکیه گاه ها و محل قرارگیری آنها و غیره بر فرم های حاصله از ابتدا مشخص نمی باشند، به همین جهت تهیه دیاگرام های فرم شناسی برای حالات مختلف طراحی باعث می شود که طراح بتواند همزمان با حفظ شروط بهینه سازی سازه ای از تسلط بیشتری در رابطه با فرم های حاصل از روش بهینه سازی توپولوژی برخوردار باشد.

در نهایت در رابطه با نرم افزارهای مورد استفاده در بهینه سازی 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 بهینه سازی توپولوژی، به عنوان یکی از الگوریتم های بهینه سازی توپولوژی و فرایند به کارگیری از این روش در فرم یابی توسط معماران پرداخته است تا زمینه علمی و کاربردی به منظور استفاده معماران و طراحان را فراهم آورد. قابل ذکر است با فراگیری مفاهیم مطرح شده در پژوهش پیش رو و استفاده از نرم افزارهای

در این تحقیق سعی شده است با تهیه و استفاده از جداول فرم یابی، 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 بهینه سازی توپولوژی فراهم آورد.

در نهایت در رابطه با نرم افزارهای مورد استفاده در بهینه سازی 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 روش های بهینه سازی تکاملی سازه ای در طراحی معماری سازه ها مورد بررسی قرار گرفت است. در این راستا نمونه موردی طراحی پل شهری پیاده، به عنوان نمونه ای که عناصر سازه ای نقش قابل توجهی در طرح معماری نهایی بازی می کنند، انتخاب شده است. سپس مبانی نظری روش بهینه سازی تکاملی SIMP که متکی بر تحلیل اجزای محدود با المان های حجمی است تشریح گردیده و نمونه های پیشین استفاده از بهینه سازی توپولوژی در معماری و صنعت ساختمان مورد معرفی و بررسی اجمالی قرار گرفت. در ادامه جداول ریخت شناسی فرم حاصل از بهینه سازی توپولوژی در دو حالت: ۱- بهینه سازی سازه ای در حجم زیر پل ۲- بهینه سازی سازه ای در دیواره های کناری، بر اساس آرایش تکیه گاهی تهیه گردید که در ادامه از آنها در طراحی معماری مورد استفاده قرار گرفت. جهت تهیه دیاگرام های ریخت شناسی از الگوریتم بهینه سازی SIMP به صورت یکطرفه (صرفاً با کاهش المان)، با تابع هدف مینیمم سازی انرژی کرنشی و با قید کسر حجم به میزان حداکثر ۹۰٪ حجم اولیه در نرم افزار تحلیل اجزای محدود آباکوس استفاده گردید. در ادامه نحوه بکارگیری این روش در مراحل مختلف

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](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](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>

معرفی شده، به کارگیری 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.

تأییدیه 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.

- 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, Breitzkopf 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. In *An 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.
- 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. In *Advances 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>