Naqshejahan- Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning
Volume --, Issue --, --- 2021
Pages: 1-14
Type: Original Research

# Using Topology Optimization Method to Achieve Form in Architectural Design

**Soroush H.[1] *MSc*, Afghani Khoraskani R.*[1] *PhD*, Hafezi M.[1] *PhD*, Aliakbarlou H.[2] *MSc***

[1]Department of Construction, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[2]Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

**Abstract**

**Aims**: Topology optimization is one of the contemporary approaches introduced to connect Architecture and Structural Engineering through simultaneous form-finding of the Architecture and Structural design. It is one of the various optimizations methods in structural engineering, which due to its direct effect on the overall form of the structure, has been recently adopted in architectural design process. The aim of this study is to acquaint designers with the potentials of this method and its application in architectural design.

**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 application of this method for architectural design is introduced and the procedure of utilizing the method within architectural design process is described.

**Findings**: Throughout the Architectural design with TO, the effect of the initial design decisions on the resulting forms becomes somewhat vague and unclear, for this purpose morphology diagrams has been provided for cases similar to the design problem in order to facilitate the initial decision making of the designer at initial stages of the design.

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

**Keywords:** Topology Optimization, Form-Finding, Architectural Design, Structure

*Corresponding Author
Tel: +98 (21) 29902861
Fax: +98 (21) 22431637
Post Address: Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Evin, Tehran, Iran. Postal Code: 1983963113.
r_afghani@sbu.ac.ir
Received: January 22, 2020 Accepted: March 18, 2020 ePublished: October 21, 2020

# استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی برای دستیابی به فرم در طراحی معماری

**حمیده سروش MSc**
گروه ساختمان، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
**رهام افغانی‌خراسکانی* PhD**
گروه ساختمان، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
**محمدرضا حافظی PhD**
گروه ساختمان، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
**حمید علی‌اکبرلو MSc**
گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

**چکیده**
**اهداف:** یکی از راه‌حل‌هایی که در دهه اخیر به‌منظور برقراری ارتباطی موثر میان معماری و مهندسی سازه پیشنهاد شده است، طراحی همزمان سازه و معماری به‌وسیله بهینه‌سازی توپولوژی است. بهینه‌سازی توپولوژی یکی از انواع بهینه‌سازی سازه‌ای است که به‌دلیل تاثیر مستقیم بر فرم در حوزه معماری ظهور نموده است. هدف از این پژوهش آشنایی طراحان با پتانسیل‌های این روش و به‌کارگیری آن در طراحی معماری است.
**روش‌ها:** ابتدا به تشریح مفاهیم نظری بهینه‌سازی توپولوژی و مدل‌سازی عددی اجزای محدود پرداخته، سپس کاربردهای استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی در معماری با ذکر مصادیق متنوع مورد بررسی قرار گرفته و فرآیند به‌کارگیری این روش در طراحی معماری با استفاده از الگوریتم‌های معرفی‌شده و نرم‌افزارهای موجود توضیح داده شده است.
**یافته‌ها:** در طراحی با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی عموماً تاثیر تصمیمات آغازین بر فرم‌های حاصله از ابتدا مشخص نیست. به همین جهت تهیه دیاگرام‌های فرم‌شناسی برای حالات مختلف باعث می‌شود که طراح بتواند از تسلط بیشتری بر فرم‌های حاصل از روش بهینه‌سازی توپولوژی برخوردار باشد. تهیه و استفاده از جداول فرم‌شناسی، که نشان‌دهنده تاثیر نوع و محل شرایط تکیه‌گاهی و دیگر عوامل موثر بر طراحی پل‌های با دهانه‌های متوسط و بلند با شرایط مشابه هستند، راه حلی به‌منظور شفاف‌ترنمودن فرآیند طراحی معماری با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی فراهم خواهد آورد.
**نتیجه‌گیری:** در این تحقیق چهارچوبی مشخص از روند فرم‌یابی برای معماران، اطلاعات مورد نیاز برای بهره‌گیری از بهینه‌سازی توپولوژی در طراحی و چگونگی طراحی یک پل عابر پیاده شهری با استفاده از این روش توضیح داده شده است.
**کلیدواژه‌ها:** بهینه‌سازی توپولوژی، فرم‌یابی، طراحی معماری، سازه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۸
*نویسنده مسئول: r_afghani@sbu.ac.ir

## مقدمه

برقراری ارتباط میان عملکرد سازه‌ای و طرح معماری یکی از مسایل مورد توجه در صنعت ساختمان است. در یک پروژه به‌طور معمول مسایل زیبایی‌شناسی و فرم دارای اهمیت بنیادین برای معمار است، در حالی که تلاش مهندسان 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 ارایه نمود. "بهینه‌سازی توپولوژی" از انواع بهینه‌سازی سازه‌ای است که با توجه به قابلیت‌های فراهم‌شده اخیر در فرآیندهای طراحی و ساخت دیجیتال، در سال‌های اخیر وارد حوزه معماری شده است.

هدف از نگارش این مقاله نهادن گامی در راستای آشنایی طراحان با پتانسیل‌های این روش و فرآیند به‌کارگیری آن در طراحی معماری، تبیین فرآیند طراحی با استفاده از این روش و چگونگی تاثیرگذاری طراح در فرم‌های حاصل از این روش است، به‌منظور بسترسازی برای استفاده از این روش و روش‌های مشابه فرم‌یابی در میان معماران.

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

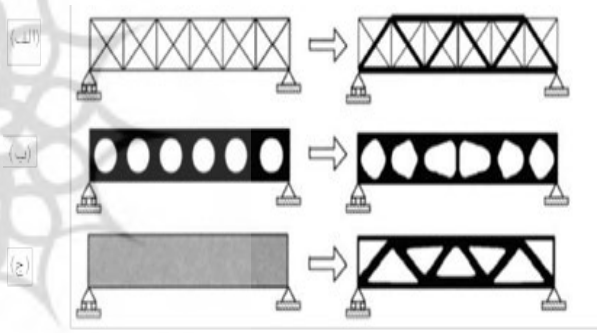
پژوهش پیش رو دارای جهت‌گیری کاربردی است و هدف از آن ارایه چهارچوبی در طراحی با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی توپولوژی است با هدف توسعه به‌کارگیری این روش در آینده در طراحی‌های معماری. در این روند از نرم‌افزارهای مدل‌سازی پارامتریک از جمله راینو (Rhino 5) و گرس‌هاپر (Grasshopper 0.9.0076) و نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود آباکوس (Abaqus 2017) استفاده شده است.

از بررسی پیشینه بهینه‌سازی توپولوژی مشخص می‌شود که پایه‌های آن در سال ۱۹۰۴ با مطالعاتی روی بهینه‌سازی خرپاها بنا نهاده شد، اما این ایده تا اواخر قرن بیستم به نتیجه قابل استفاده‌ای تبدیل نشد[1-3]. مطالعات انجام‌شده 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 منتشرشده 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[4]. پس از آن روش‌های بهینه‌سازی تکاملی به‌عنوان مهم‌ترین و رایج‌ترین الگوریتم مورد استفاده معماران و مهندسان سازه معرفی شده است[5]. شناخت روش‌های بهینه‌سازی تکاملی همچنان ادامه داشت تا سرانجام معماران در پژوهش‌های خود به بررسی روند طراحی و ساخت و فرم‌یابی قطعاتی در مقیاس کوچک توسط این روش، روی آوردند[6] 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 ساختمان‌های بلندمرتبه با رویکرد مذکور است[7, 8].

از سال ۲۰۱۳ کاربردی‌ترین مقالات برای استفاده معماران در این زمینه انتشار یافت[9]. بگینی و همکاران در مقاله‌ای تحت عنوان

برقراری ارتباط میان معماری و مهندسی سازه به‌وسیله بهینه‌سازی توپولوژی در سال ۲۰۱۴، به‌صورت مستقیم با بررسی نمونه‌های موردی ساخته یا طراحی‌شده، ارتباط بهینه‌سازی توپولوژی با معماری را مورد بررسی قرار دادند[10] و تا سال‌ها بعد بررسی این ارتباط دستمایه تحقیقاتی توسط معماران شد[11-13]. پس از آن مطالعات غالباً به سوی شیوه‌های ساخت فرم‌های بهینه‌سازی‌شده توپولوژی با استفاده از تکنولوژی‌های روز همچون پرینت سه‌بعدی و نرم‌افزارهای مورد استفاده و مفید در این زمینه سوق پیدا کرده است[14-19]. در انتها با توجه به این موضوع که در میان تحقیقات و مقالات منتشرشده 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.

یکی از مهم‌ترین اهداف مهندسی سازه، بهینه‌سازی سازه‌ها از جنبه‌های مختلف سازه‌ای است، بدین معنی که با صرف انرژی، مصالح، زمان و در مجموع هزینه کمتر، طراحی هدفمندتری حاصل شود. این فرآیند مرحله‌ای که به اصلاح و بهبود طرح‌ها کمک می‌نماید، شامل بهینه‌سازی اندازه، بهینه‌سازی شکل و بهینه‌سازی توپولوژی می‌شود (شکل ۱).



**شکل ۱)** انواع بهینه‌سازی: الف) بهینه‌سازی اندازه، ب) بهینه‌سازی شکل، ج) بهینه‌سازی توپولوژی

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 به‌منظور کنترل مسیر انتقال نیرو و کاهش تنش‌های متمرکز مورد جابه‌جایی قرار می‌گیرد. بهینه‌سازی توپولوژی با یک مدل اولیه آغاز می‌شود و طی فرآیند بهینه‌سازی، براساس نحوه پخش نیرو در سازه، تغییراتی در آن ایجاد می‌نماید و تا حذف دسته‌ای از المان‌ها پیش می‌رود در واقع فرآیندی برای تعیین بهترین آرایش از مقدار داده‌شده از مصالح در دامنه طراحی تا رسیدن به حداکثر بازدهی در سازه مورد نظر است. به عبارتی دیگر بهینه‌سازی یک سازه در فرم، حجم و چگونگی اتصال اعضا به یکدیگر بهینه‌سازی توپولوژی نامیده می‌شود[20].

از پارامترهای مهم در بهینه‌سازی، تعیین دو معیار به‌عنوان تابع هدف و تابع قید است. تابع هدف معیاری را که طرح نسبت به آن بهینه می‌شود به‌صورت 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. عموماً مواردی مانند تنش، سختی، انرژی کرنشی و غیره به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده و میزان کاهش در حجم یا وزن به‌عنوان قید مساله تعریف می‌شود. برای حل مسایل بهینه‌سازی توپولوژی تاکنون روش‌های مختلفی معرفی شده است، اما یکی از روش‌هایی که غالباً توسط معماران و مهندسان سازه به کار گرفته می‌شود روش‌های بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ای موسوم به ESO است[5]. مبنای حل الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی همچون بسیاری از مسایل 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 به‌منظور آشنایی با مبانی نظری بهینه‌سازی توپولوژی و به‌کارگیری آن لازم خواهد بود.

**روش اجزای محدود**

روش اجزای محدود یک روش عددی برای حل مسایل مهندسی و ریاضی است و به‌طور معمول از آن در مسایل دارای هندسه و بارگذاری پیچیده استفاده می‌شود. قاعده کلی در فرآیند اجزای محدود، به‌دست‌آوردن 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 مساله به شیوه اجزای محدود تقسیم‌بندی مدل به تعداد مشخصی المان است که در فرآیند حل مساله و با برهم‌نهی 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 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 تک‌تک المان‌های سازه، در خصوص حذف یا ماندگاری هر یک از المان‌های ایجادشده در مدل براساس الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی و جواب‌های حاصل از تحلیل اجزای محدود تصمیم‌گیری می‌شود و این روند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که یکی از قیدهای تعیین‌شده محقق شود. روند تحلیل اجزای محدود بدین صورت است[21]:

۱- انتخاب المان و تقسیم‌بندی
۲- انتخاب تابع تغییر مکان
۳- به‌دست‌آوردن ماتریس سختی المان
۴- سرهم‌بندی معادلات و اعمال شرایط مرزی
۵- حل معادلات برای به‌دست‌آوردن تغییر مکان‌های مجهول
۶- به‌دست‌آوردن نیروهای عکس‌العمل

۷- به‌دست‌آوردن تنش‌ها و کرنش‌ها در المان

**بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ای**

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 ارایه روش‌های تکاملی بوده است. روش‌های تکاملی با تغییر هندسه و آرایش در فضای طراحی به هدف مورد نظر دست می‌یابند. این روش، فرآیندی تکرارشونده و تکاملی است که به‌منظور استفاده بهینه از مصالح، مصالح سازه را باز توزیع می‌کند. این باز توزیع به نحوی انجام می‌گیرد که مصالح از نقاط قوی‌تر با کارآیی کمتر به نقاط ضعیف‌تر با کارآیی بیشتر انتقال یافته و سازه با توجه به عملکرد مورد نظر قابلیت بیشتری از خود نشان دهد. ویژگی مهم این روش ارایه نتایج قابل اعتماد همراه با سهولت در درک و یادگیری است و این روش به‌سادگی در برنامه‌های بر پایه اجزای محدود قابل‌اجرا است. نسخه پیشرفته‌تر روش تکاملی سازه‌ای، روش تکاملی سازه‌ای دوطرفه موسوم به BESO است که در این روش مواد ناکارآمد از سازه حذف می‌شوند و همزمان مواد به مناطق حساس اضافه می‌شود. به‌طور مثال اگر تنش حداکثر به‌عنوان هدف و معیار بهینگی در نظر گرفته شود، المان‌های با پایین‌ترین تنش حذف و به اطراف المان‌های با بالاترین مقادیر تنش افزوده می‌شوند. در ادامه به معرفی الگوریتم‌های ESO پرداخته شده است.

به‌منظور اعمال روش بهینه‌سازی تکاملی ابتدا فضای طراحی را به تعداد معینی از المان‌ها تقسیم کرده و پس از تعیین شرایط مرزی و بارگذاری، مساله به‌صورت المان محدود تحلیل می‌شود. سپس مقدار معیار مورد نظر، که با توجه به نوع مساله توسط طراح تعیین می‌شود، برای هر یک از المان‌ها محاسبه می‌شود. همچنین از آنجا که مدل به اجزای محدود تقسیم شده است حذف المان به‌سادگی صورت می‌گیرد. رایج‌ترین معیارهای حذف المان براساس دو حالت سطح تنش یا انرژی کرنشی است که در این میان ساده‌ترین روش معیار حذف المان براساس 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 براساس تنش اغلب از تنش فون‌میسز (Von Mises stress) که ترکیبی از تنش‌های محوری و برشی است به‌عنوان معیار استفاده می‌شود[5]:

$$\sigma^{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$ (رابطه ۳-۱)

برای حذف المان‌ها از معیار دیگری نیز به نام RRi استفاده می‌شود. RRi 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 RRi باشند به‌عنوان مواد زاید شناخته شده و حذف می‌شوند که این حذف از طریق ازبین‌بردن تاثیر المان‌ها صورت می‌پذیرد. بدیهی است که مساله بهینه‌سازی در یک مرحله قابل دست‌یابی 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 نشود و حذف مواد به‌صورت تدریجی صورت گیرد. چرخه حذف مواد تا زمانی که هیچ المانی وجود نداشته باشد که در شرط مساله صدق کند ادامه می‌یابد. در صورتی که هیچ المانی حذف نشود، حالتی موسوم به حالت پایدار به وجود می‌آید که در این زمان پارامتری به نام نرخ تکاملی ER به نرخ حذف مواد اضافه می‌شود. 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 می‌شود:

$$\sigma_{el} < RR_i\sigma_{max}$$ (رابطه ۳-۲)

$$RR_{i+1} = RR_i + ER$$ (رابطه ۳-۳)

روش تکاملی دیگر، به‌حداقل‌رساندن وزن سازه با معیار به‌حداکثررساندن سختی است. از انرژی کرنشی (strain energy) معمولاً به‌صورت معکوس مقدار سختی کلی سازه یاد می‌شود؛ بنابراین بیشترین سختی کلی زمانی به دست می‌آید که انرژی کرنشی حداقل شود. زمانی که یک جسم در حالت الاستیک دچار تغییر شکل می‌شود، روی آن کار انجام شده است، این انرژی ذخیره‌شده در جسم را انرژی کرنشی گویند که به‌صورت زیر تعریف می‌شود[4]:

$$C = (1/2)\{P\}^T\{u\}$$ (رابطه ۳-۴)

در ادامه پارامتری به‌عنوان عدد حساسیت تعریف می‌شود. فرمول زیر تغییر انرژی کرنشی سازه به‌علت حذف المان i ام را نشان می‌دهد و از آن به‌عنوان عدد حساسیت المان یاد می‌شود که به‌عنوان معیاری برای کارآیی المان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حالت کلی، هنگامی که یک المان حذف می‌شود، سختی سازه کاهش می‌یابد و متقابلاً انرژی کرنشی آن افزایش پیدا می‌کند. 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 ۳-۵)

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 بهینه سازه‌ای با محاسبه 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 این گونه بیان کرد:

۱- گسسته‌سازی سازه با استفاده از مش‌بندی المان‌های محدود

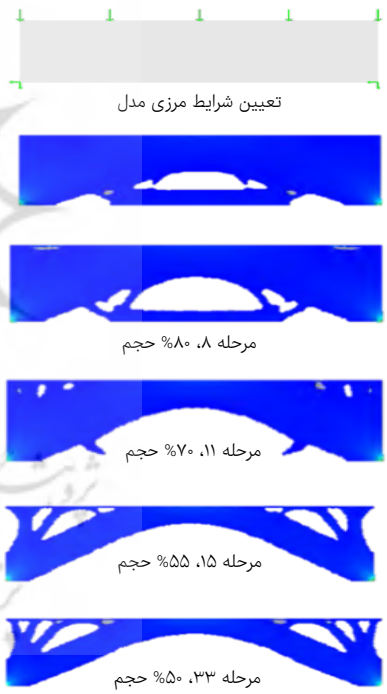
۲- تحلیل سازه پس از بارگذاری و تعیین شرایط مرزی

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 **Error! Reference source not found.** 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 به‌حداقل‌رساندن انرژی کرنشی در همه المان‌ها یا به‌حداکثررساندن سختی پل بوده است، همچنین در تابع قید طراحی مشخص شده است که در بهینه‌سازی انجام‌یافته، کاهش ۵۰درصدی از حجم سازه اولیه مد نظر قرار گرفته است (شکل ۲).




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

## کاربرد بهینه‌سازی توپولوژی در معماری

کاربرد بهینه‌سازی توپولوژی در معماری به‌صورت عمده در دو حالت بررسی می‌شود؛ در حالت اول بهینه‌سازی توپولوژی فرم اولیه طراحی (طراحی مفهومی) را مشخص می‌کند تا سپس و براساس آن به توسعه طرح پرداخته شود؛ در حالت دوم از فرم بهینه‌سازی‌شده به‌صورت مستقیم به‌عنوان ورودی در فرآیند ساخت استفاده می‌شود. 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 غیره) و طراحی مبلمان دانست. در سال‌های اخیر نمونه‌هایی در هر یک از موارد ذکرشده طراحی و ساخته شده که در ادامه مواردی به‌منظور 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 به‌صورت ارگانیک و درختی و از طریق فرآیند بهینه‌سازی توپولوژی طراحی شده است. به‌طور عمده می‌توان فرم‌های حاصل از بهینه‌سازی توپولوژی را زیرمجموعه ستون‌های شبه‌درختی 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 ۳میلیون المان تقسیم شده و چرخه آنالیز تا رسیدن به همگرایی، به میزان ۱۰۰۰ مرتبه تکرار شده و حجم نهایی ۱۲% حجم اولیه است[11] (شکل ۳).

**شکل ۳)** طراحی پایه‌های سایه‌بان مرکز انجمن‌های بین‌المللی قطر با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی[14]

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 بر گرفته 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[10] (شکل ۴).

**شکل ٤)** طراحی نمای پل به روش بهینه‌سازی توپولوژی[10]

از آنجا که بهینه‌سازی توپولوژی روشی برای برقراری ارتباط میان سازه و معماری است، قابلیت‌های فراوان برای به‌کارگیری در ساختمان‌های بلندمرتبه با سازه دیاگرید را داراست که در آن فرم نما هم از نظر زیبایی و هم سازه‌ای مورد اهمیت فراوان است. در این صورت سازه دیاگرید تحت بارهای جانبی تحلیل و فرم‌یابی شده که نمونه‌هایی از این دست در ساختمان‌های بلندمرتبه توسط *بگینی* و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است[10] (شکل ۵).

**شکل ۵)** نمای دایاگرید فرم‌یابی‌شده به‌وسیله بهینه‌سازی توپولوژی[10]

مصداق دیگر استفاده از این رویکرد در صنعت ساختمان، طراحی اجزای سازه‌ای همچون تیر، خرپا، اسلب‌های سقف و غیره است. با توجه به تکرار فراوان اجزای سازه‌ای در کل ساختمان، بهینه‌سازی و کاهش مصالح در هر جزء می‌تواند در کاهش هزینه‌های کل تاثیر بسزایی داشته باشد. شکل ۶ از مصادیق استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی در طراحی سقف‌های پیش‌ساخته است[6] (شکل ۶).

**شکل ٦)** اسلب سقف فرم‌یابی‌شده به‌وسیله بهینه‌سازی توپولوژی[6]

## فرآیند دست‌یابی به فرم به‌وسیله بهینه‌سازی توپولوژی

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

### معرفی پروژه

پروژه مورد بررسی، طراحی یک پل پیاده شهری است که دارای فرم سازه‌ای توجیه‌پذیری بوده و شاخص اصلی آن بهینه‌بودن از منظر سختی و وزن است؛ بدین منظور، بهینه‌سازی توپولوژی به‌عنوان 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 شده 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 اجتماعی‌ای به‌منظور تشویق شهروندان برای حضور بیشتر در طبیعت ایجاد خواهد شد (شکل ۷).

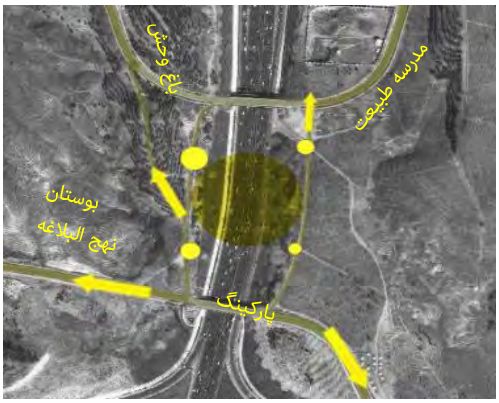
**شکل ۷)** جانمایی سایت پروژه در پارک پردیسان

### تحلیل سایت

اولین قدم در طراحی پروژه مشخص‌نمودن شریان‌های اصلی و دسترسی‌های پل به محیط‌های اطراف است، تا بدین وسیله پیرامون ظرفیت پل و محل قرارگیری آن تصمیم‌گیری شود. نزدیک‌ترین کاربری‌ها 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).

**شکل ۸)** کاربری‌های اطراف پل و شریان‌های اصلی

به‌منظور طراحی مجموعه‌ای که امکان دسترسی به کاربری‌های اطراف را از طریق شریان‌های موجود داشته باشد، چهار نقطه اصلی به‌عنوان ورودی‌های پل در نظر گرفته شد (شکل ۹).




**شکل ۹)** نقاط تعیین‌شده برای ورودی‌های پل

### دیاگرام‌های دسترسی

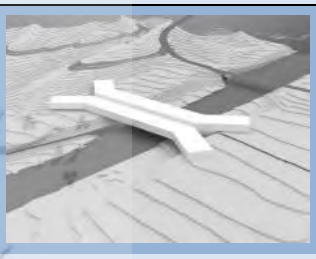
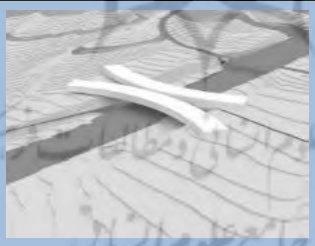
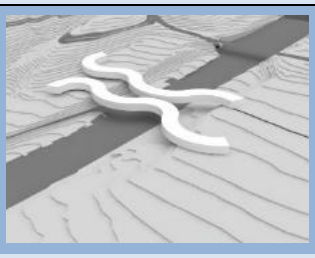
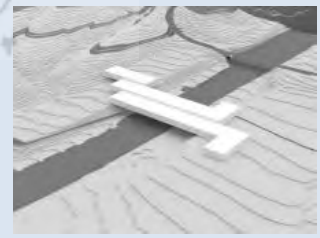
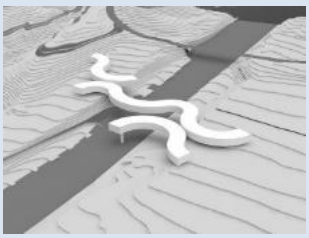
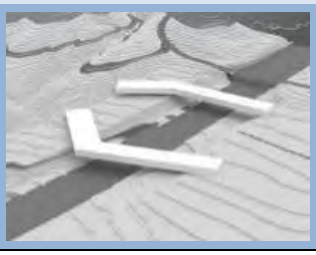
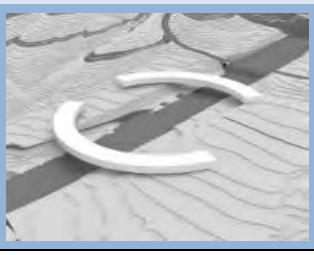
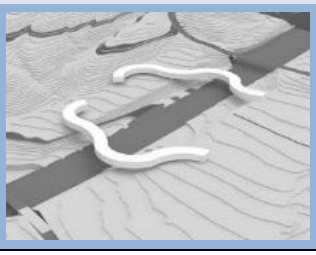
پس از تعیین تعداد و محل ورودی و خروجی‌های پل، گزینه‌هایی که امکان تامین دسترسی پل به این نقاط را فراهم می‌نمایند به‌عنوان فرم‌های پیشنهادی بررسی می‌شود. این گزینه‌ها شامل قرارگیری پل‌ها به‌صورت خطی، طبقه‌ای یا میدانی هستند که هر یک از این گزینه‌ها می‌تواند هندسه خطوط متفاوتی همچون خطوط شکسته، منحنی و موجدار را دارا باشند. از میان گزینه‌های ذکرشده پل‌های میدانی به‌دلیل 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 نزدیک‌تر ورودی‌های پل به شریان‌های اصلی اطراف، انتخاب شد. همچنین خطوط منحنی به‌دلیل ایجاد حس حرکت بیشتر نسبت به خطوط شکسته و تناسب بهتر با طول پل نسبت به خطوط موجدار مناسب‌تر دیده شدند (جدول ۱).

### تعیین نقاط تکیه‌گاهی

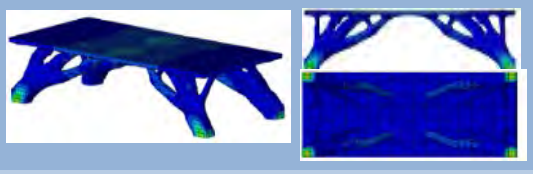
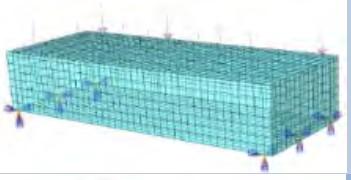
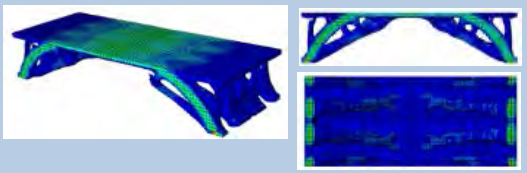
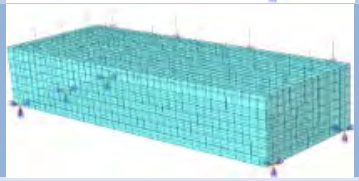
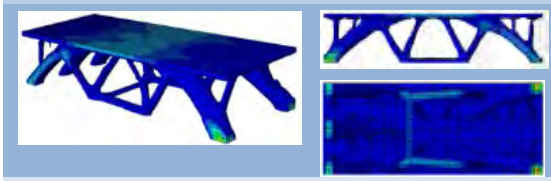
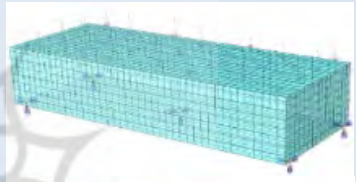
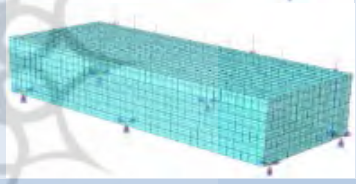
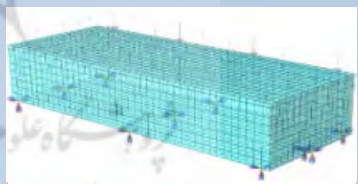
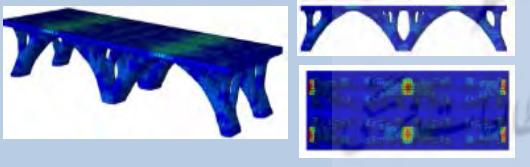
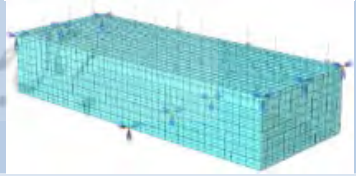
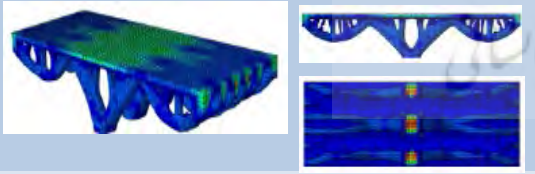
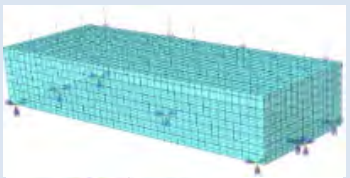
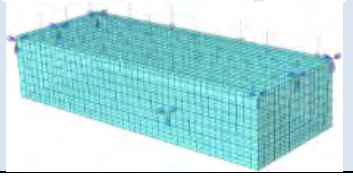
مرحله بعدی در فرآیند فرم‌یابی تعیین نقاط تکیه‌گاهی است. در بهینه‌سازی توپولوژی، فرم بهینه‌یابی‌شده به هندسه تکیه‌گاه (شامل نقطه‌ای، خطی یا ترکیبی از هر دو) و محل اعمال تکیه‌گاه وابستگی قابل توجهی دارد. به همین جهت در یک دهانه متوسط به طول ۵۰ متر و یک دهانه بلند به طول ۹۰ متر شرایط مختلف تکیه‌گاهی سازماندهی و سنجیده شد. این بررسی در دو حالت عدم وجود نقش سازه‌ای بدنه و وجود نقش سازه‌ای برای بدنه در باربری پل انجام شده است.

پس از مشاهده فرم‌های استخراج‌شده از جداول فرم در حالت عدم نقش سازه‌ای بدنه، تکیه‌گاه‌های نقطه‌ای به‌دلیل مداخله کمتر در سایت و قابلیت بیشتر توسعه فرم بر مبنای فرم بهینه‌شده، انتخاب شدند. لازم به ذکر است در حالت وجود نقش سازه‌ای برای بدنه پل، فرم‌های به‌دست‌آمده یادآور پل‌های با کابل کشیده، پل‌های کابلی معلق و پل‌های خرپایی است، در نتیجه می‌توان پل‌های کابلی و خرپایی را با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی توپولوژی از منظر حجم و وزن بهینه‌سازی نمود (جداول ۲ و ۳).

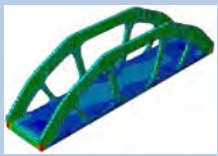
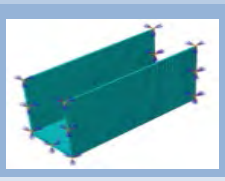
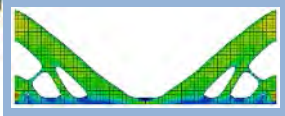
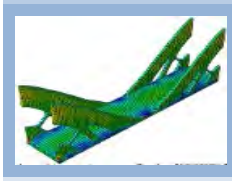
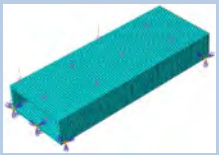
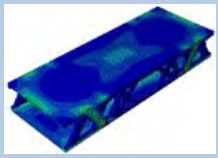
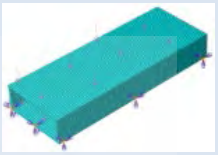
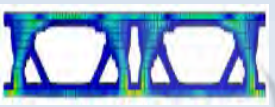
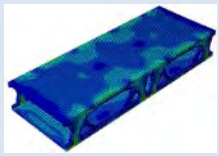
**جدول ۱)** گزینه‌های پیشنهادی فرم کلی پل براساس نوع خطوط

| نوع فرم | خطوط شکسته | خطوط منحنی | خطوط موجدار |
|---|---|---|---|
| فرم خطی |  |  |  |
| فرم طبقه‌ای |  | |  |
| فرم مرکزی |  |  |  |

**جدول ۲)** فرم‌های بهینه‌شده در حالت عدم وجود نقش سازه‌ای در بدنه پل و شرایط مرزی متفاوت براساس محل اعمال و هندسه ناحیه تکیه‌گاه

| محل اعمال تکیه‌گاه | اعمال شرایط مرزی | فرم نهایی |
|---|---|---|
| **• دو ناحیه تکیه‌گاهی** | | |
| **نقطه‌ای** | |  |
| **خطی** |  |  |
| **ترکیبی** |  |  |
| **• سه ناحیه تکیه‌گاهی** | | |
| **- نقطه‌ای** | | |
| یک نقطه میانی |  | |
| دو نقطه در ناحیه میانی |  | |
| **- خطی** | | |
| تکیه‌گاه کناری در پایه |  |  |
| تکیه‌گاه کناری در عرشه |  |  |
| **- ترکیبی** | | |
| تکیه‌گاه کناری در پایه |  | |
| تکیه‌گاه کناری در عرشه |  | |

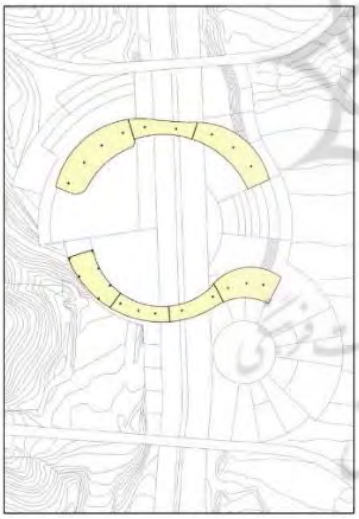
**جدول ۳)** فرم‌های بهینه‌شده در حالت وجود نقش سازه‌ای در بدنه پل و شرایط مرزی متفاوت براساس تعداد ناحیه بارگذاری و نحوه اعمال ناحیه تکیه‌گاهی

| نحوه اعمال ناحیه تکیه‌گاهی | اعمال شرایط مرزی | فرم نهایی | |
|---|---|---|---|
| **یک طبقه بارگذاری** | | | |
| تکیه‌گاه در عرشه | | |  |
| تکیه‌گاه در بدنه |  |  |  |
| **دو طبقه بارگذاری** | | | |
| دو ناحیه تکیه‌گاهی |  | |  |
| سه ناحیه تکیه‌گاهی |  |  |  |

پس از انتخاب هندسه و نوع اعمال تکیه‌گاه، در گام بعدی با توجه به پلان پل به تعیین نقاط تکیه‌گاهی و مشخص‌نمودن فضاهای دو طبقه در پلان پرداخته می‌شود (شکل ۱۰).

**شکل ۱۰)** قسمت‌های دو طبقه پل

از آنجا که یکی از اهداف پروژه پیش رو، فراهم‌آوردن چارچوبی مشخص و قابل دسترس برای علاقه‌مندان در این زمینه است، با تقسیم دهانه پل به دهانه‌های ۷۰ تا ۹۰متری فرآیند تحلیل در هر دهانه به‌صورت مجزا و با استفاده از رایانه‌های شخصی انجام شده است. عرض دهانه پل نیز مابین ۱۰ تا ۱۵ متر متغیر است (شکل ۱۱).



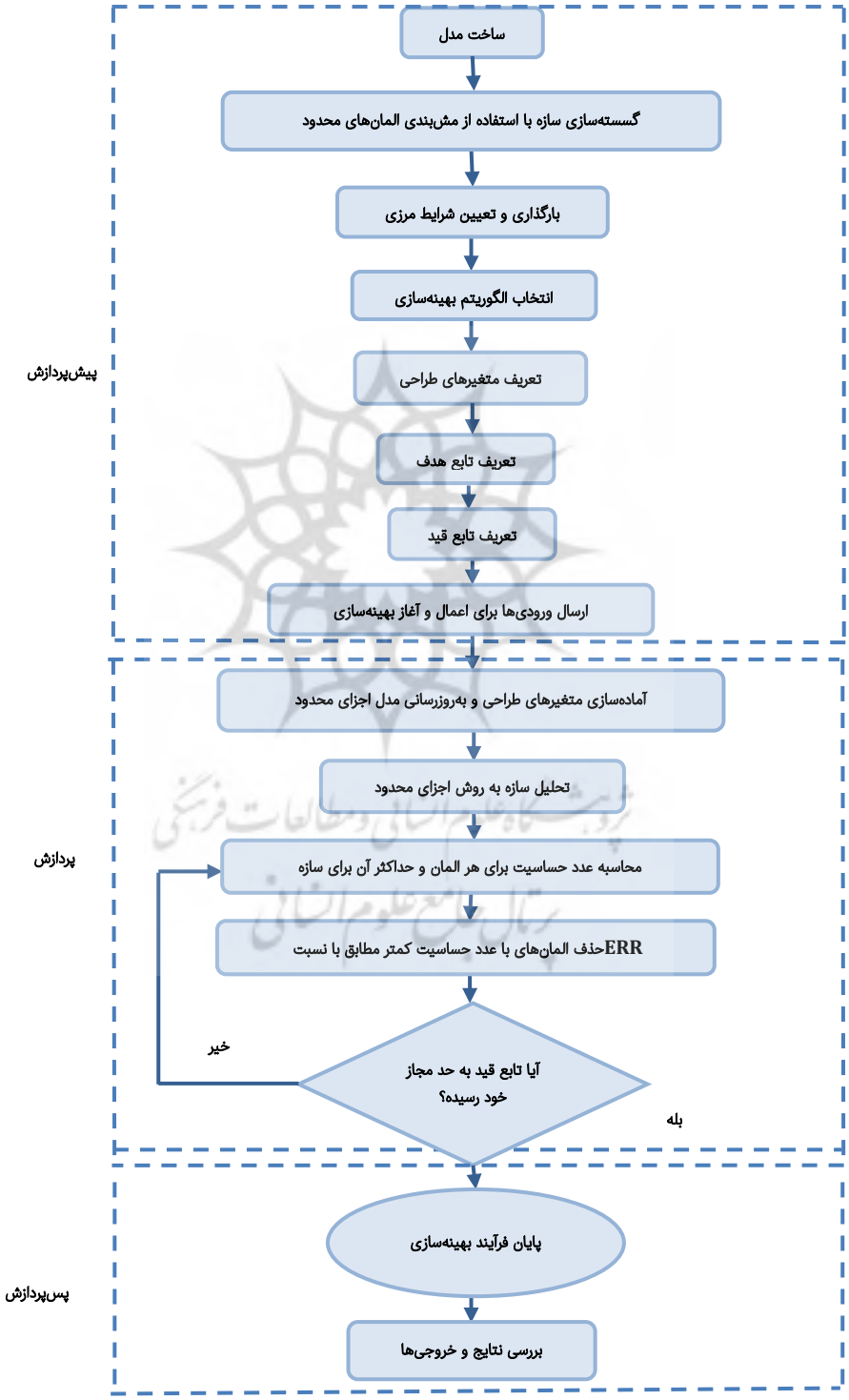
**شکل ۱۱)** تقسیم‌بندی دهانه کلی پل به قسمت‌های کوچک‌تر

## مراحل بهینه‌سازی توپولوژی در نرم‌افزار

از میان نرم‌افزارهایی که قابلیت انجام بهینه‌سازی توپولوژی را دارا هستند و استفاده از آنها توسط معماران مرسوم‌تر است، می‌توان به نرم‌افزارهای آلتیر، میلیپد (Millipede)، آمبا (Ameba)، توپواستراکت و آباکوس اشاره نمود. در این میان میلیپد و آمبا از افزونه‌های گرس‌هاپر هستند. نرم‌افزارهای آمبا و توپواستراکت به‌خوبی با فرم‌های معماری و الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی سازگار هستند، اما به‌دلیل تقریبی و غیردقیق‌بودن فرم‌های نهایی، به‌منظور مراحل اولیه کار و فرم‌یابی‌های 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 می‌شود.

شیوه کار در این نرم‌افزارها براساس الگوریتم‌های مصالح ایزوتروپیک جامد با تابع جریمه (SIMP) است. در الگوریتم‌های SIMP مبنای فرم‌یابی بر پایه حذف مواد استوار است که روش‌های بهینه‌سازی ESO و BESO نیز جزء این دسته از الگوریتم‌ها هستند. روند کار در نرم‌افزارهای بهینه‌سازی و فرم‌یابی شامل سه مرحله پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش است که اقدامات انجام‌شده در هر مرحله بسته به نوع نرم‌افزار و مساله طراحی می‌تواند متفاوت از یکدیگر باشد. مرحله پیش‌پردازش شامل ساخت مدل، تعیین مولفه‌های کاربردی، تعیین شرایط مرزی و تمامی اطلاعات لازم برای آغاز فرآیند بهینه‌سازی است. در مرحله پردازش فرآیند بهینه‌سازی و فرم‌یابی صورت می‌گیرد و در مرحله پس‌پردازش به تحلیل و بررسی فرم نهایی و خروجی‌ها پرداخته می‌شود (نمودار ۱).




**نمودار ۱)** فرآیند فرم‌یابی و بهینه‌سازی توپولوژی در نرم‌افزارهای بر پایه بهینه‌سازی تکاملی

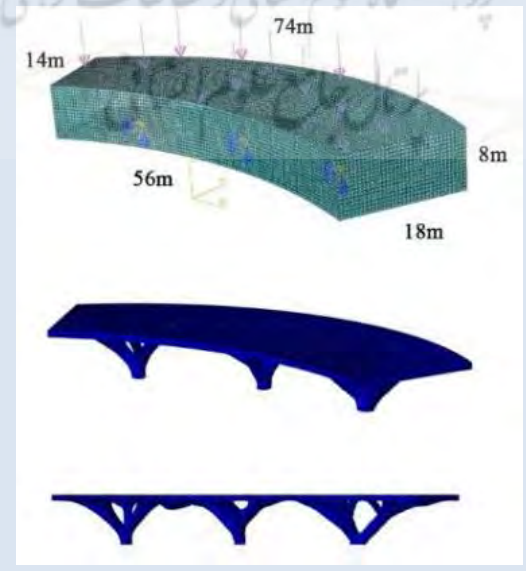
در این تحقیق نرم‌افزار آباکوس به‌دلیل وجود دقت و کارآیی بیشتر در فرم نهایی به کار گرفته شده است و از آنجایی که برای مدل‌سازی پل از نرم‌افزار راینو استفاده شده است، آباکوس قابلیت انتقال هندسه‌های حاصل از بهینه‌سازی با این نرم‌افزار را نیز دارا است. در ادامه به‌منظور اشنایی با روند بهینه‌سازی، یک دهانه از پل انتخاب شده و فرآیند فرم‌یابی در پایه و بدنه آن بیان شده است.

در فرم‌یابی پایه، مکعب‌مستطیلی به شکل توپر مطابق با عرض و دهانه پل مدل‌سازی شده است. اطلاعات ورودی لازم برای انجام بهینه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس، شامل مشخصات مصالح مصرفی، شرایط مرزی اعم از نوع و میزان بار و محل تکیه‌گاه‌ها و نوع مش‌بندی است. اطلاعات وارده در الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی همان گونه که پیش‌تر بیان شد شامل مشخص‌نمودن تابع هدف و تابع قید است.

در این تحقیق به‌حداقل‌رساندن انرژی کرنشی، به‌منظور به‌حداکثررساندن سختی سازه به‌عنوان تابع هدف و حجم سازه به‌عنوان تابع قید در نظر گرفته شده است. پس از ورود اطلاعات لازم، نرم‌افزار فرآیند بهینه‌سازی را با حداکثر تعداد چرخه تعیین‌شده 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 معادل‌های انگلیسی آن در نرم‌افزار و فرم نهایی پایه و بدنه قسمتی از پل به تصویر کشیده شده است.

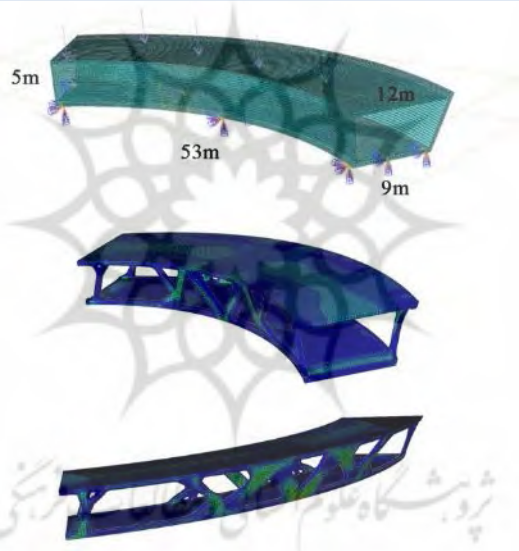
**جدول ۴)** اطلاعات ورودی در فرآیند بهینه‌سازی و فرم نهایی

| | |
|---|---|
| **مصالح**<br>- فولاد<br>- وزن مخصوص: ۷۸۵۰ kg/m³<br>- مدول یانگ: 2e11 Pa<br>- ضریب پواسون: ۰/۳<br>- مقطع: توپو، همگن | **Material**<br>- Steel<br>- Mass density: 7850 kg/m³<br>- Young's modulus: 2e11 Pa<br>- Poisson's ratio: 0.3<br>- Section: solid, homogeneous |
| **شرایط مرزی**<br>- بار زنده: ۵ KN/m²<br>- نوع تکیه‌گاه: گیردار | **Boundary condition**<br>- Live load: 5 KN/m²<br>- Support: rigid |
| **مش‌بندی**<br>- نوع المان: شش‌وجهی<br>- ابعاد: ۰/۵×۰/۵×۰/۵ m | **Mesh**<br>- Element shape: hexahedral<br>- Size: 0.5×0.5×0.5 m |
| **بهینه‌سازی**<br>- تابع هدف: انرژی کرنشی<br>- هدف: مینیمم‌سازی<br>- قید: حجم<br>- حداکثر چرخه مجاز: ۸۰<br>- کسر حجم: ۰/۱ حجم اولیه باقی بماند. | **Optimization**<br>- Objective function: strain energy<br>- Target: minimize<br>- Constraint: volume<br>- Maximum cycles: 80<br>- Volume fraction: 0.1 |



**جدول ۵)** اطلاعات ورودی در فرآیند بهینه‌سازی بدنه پل و فرم نهایی

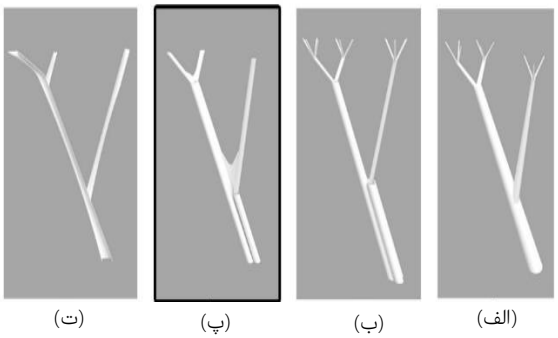
| | |
|---|---|
| **Material**<br>-Steel<br>- Mass density: 7850 kg/m³<br>- Young's modulus: 2e11 Pa<br>- Poisson's ratio: 0.3<br>- Section: solid, homogeneous | **مصالح**<br>- فولاد<br>- وزن مخصوص: ۷۸۵۰ kg/m³<br>- مدول یانگ: 2e11 Pa<br>- ضریب پواسون: ۰/۳<br>- مقطع: توپو، همگن |
| **Loads**<br>- Live load: 5 KN/m²<br>- Snow load: 1.08 KN/m²<br>- Support: rigid | **شرایط مرزی**<br>- بار زنده: ۵ KN/m²<br>- بار برف: ۱/۰۸ KN/m²<br>- نوع تکیه‌گاه: گیردار |
| **Mesh**<br>Element shape: hexahedral<br>- Size: 0.3×0.3×0.3 m | **مش‌بندی**<br>- نوع المان: شش‌وجهی<br>- ابعاد: ۰/۳×۰/۳×۰/۳ m |
| **Optimization**<br>- Objective function: strain energy<br>- Target: minimize<br>- Constraint: volume<br>- Volume fraction: 0.2<br>- Maximum cycles: 60 | **بهینه‌سازی**<br>- تابع هدف: انرژی کرنشی<br>- هدف: مینیمم‌سازی<br>- قید: حجم<br>- کسر حجم: ۰/۲ حجم اولیه باقی بماند<br>- حداکثر چرخه مجاز: ۶۰ |



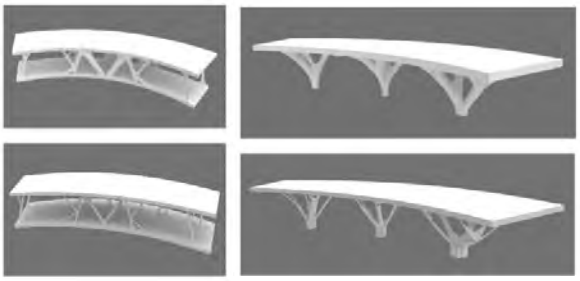

## ساخت‌پذیری

پس از پایان فرآیند بهینه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس، فرم نهایی به‌منظور توسعه بر مبنای فرم بهینه‌یابی‌شده به نرم‌افزار راینو منتقل می‌شود. از آنجایی که پل مورد نظر در این پروژه فولادی است، مقاطع مختلف فولادی که قابلیت تطبیق با فرم درختی حاصل از فرآیند بهینه‌یابی را دارا هستند پیشنهاد شد. این مقاطع شامل مقاطع سپری، مقاطع لوله‌ای به‌همراه ورق‌هایی با برش‌های منحنی به‌منظور تقویت مقاطع و نزدیکی بیشتر با فرم بهینه‌یابی‌شده، مقاطع لوله‌ای و مخروطی است (شکل ۱۲).

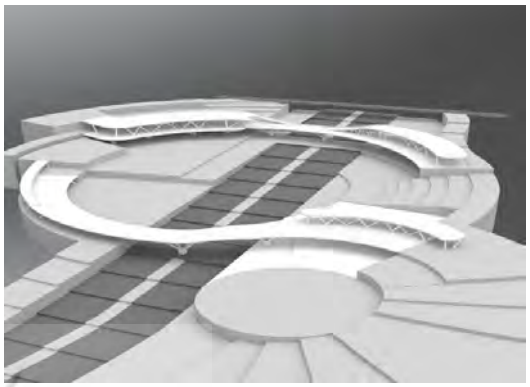
از این میان مقاطع لوله‌ای همراه با ورق‌های تقویتی میانی به‌دلیل سهولت در ساخت، تطبیق بیشتر با فرم نهایی در نرم‌افزار آباکوس، مقاومت در برابر کمانش موضعی و سهولت‌های اجرا انتخاب شد. سپس ستون‌های نهایی در پایه و بدنه پل با درنظرگرفتن این نوع مقطع و بر مبنای فرم حاصل از بهینه‌سازی توپولوژی مدل‌سازی شدند (شکل‌های ۱۳ و ۱۴).




**شکل ۱۲)** الف) مقطع مخروطی، ب) مقطع دسته لوله‌ای، پ) مقطع دسته لوله‌ای با ورق‌های تقویتی به‌صورت منحنی برش‌خورده، ت) مقطع سپری



**شکل ۱۳)** ستون‌های مدل‌سازی‌شده بر مبنای فرم‌های به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی توپولوژی در پایه و بدنه پل



**شکل ۱٤)** رندر فرم نهایی

## تحلیل نتایج

فرآیند فرم‌یابی و بهینه‌سازی توپولوژی بر پایه بهینه‌سازی تکاملی شامل سه مرحله عمده پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش است. در مرحله پیش‌پردازش معمار با بررسی دیاگرام‌های دسترسی و شرایط تکیه‌گاهی در سایت در رابطه با محل و نوع تکیه‌گاه‌ها و پلان پل تصمیم‌گیری می‌نماید و پس از تعریف متغیرهای طراحی و توابع هدف و قید، مرحله پردازش توسط نرم‌افزار آغاز می‌شود. با پایان مرحله پردازش و دست‌یابی به فرم براساس بهینه‌سازی توپولوژی، معمار می‌تواند با طراحی مقاطعی که از نظر فرمی به فرم بهینه‌یابی‌شده نزدیک و از نظر سازه‌ای کارآ هستند به ساخت‌پذیری فرم نهایی کمک نماید.

در طراحی با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی عموماً 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 نیستند. 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 این تحقیق سعی شده است با تهیه و استفاده از جداول فرم‌یابی، که نشان‌دهنده تاثیر نوع و محل شرایط تکیه‌گاهی و دیگر عوامل موثر بر طراحی پل‌های با دهانه‌های متوسط و بلند با شرایط مشابه هستند، راه حلی برای شفاف‌ترنمودن 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 شد که نرم‌افزار آمبا برای مراحل پیش‌پردازش و دست‌یابی به فرم‌های اولیه، نرم‌افزار آباکوس برای فرم‌یابی‌های دقیق و نرم‌افزار راینو به‌منظور توسعه فرم نهایی بر پایه بهینه‌سازی توپولوژی مناسب است. در نتیجه، با استفاده از این سه نرم‌افزار یا نرم‌افزارهای مشابه می‌توان به فرم بهینه‌یابی‌شده مطلوب در طرح‌های معماری دست یافت.

## نتیجه‌گیری

این پژوهش به تشریح مفهوم بهینه‌سازی توپولوژی، روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ای موسوم به ESO به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی توپولوژی و فرآیند به‌کارگیری از این روش در فرم‌یابی توسط معماران پرداخته است تا زمینه علمی و کاربردی مختصری به‌منظور استفاده معماران و طراحان علاقه‌مندی که قصد ورود به این زمینه را دارند، فراهم آورد. قابل ذکر است با فراگیری مفاهیم مطرح‌شده در پژوهش پیش رو و استفاده از نرم‌افزارهای معرفی‌شده، به‌کارگیری این رویکرد در فرم‌یابی هر جزئی از ساختمان که از اهداف طراحی آن بهینه‌سازی وزن، کارآیی سازه‌ای و دست‌یابی به فرمی ارگانیک است، امکان‌پذیر است. با توجه به نوظهوربودن این رویکرد در صنعت ساختمان امید می‌رود در آینده پتانسیل‌های ذکرشده از این روش توسعه یافته و شاهد نمونه‌های شاخص‌تر و متعددتری در این زمینه باشیم.

**تشکر و قدردانی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

**تاییدیه اخلاقی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

**تعارض منافع:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

**سهم نویسندگان:** حمیده سروش (نویسنده اول)، نگارنده مقاله/پژوهشگر اصلی (٤٠%)؛ رهام افغانی‌خراسکانی (نویسنده دوم)، نگارنده مقاله/ روش‌شناس (۳۰%)؛ محمدرضا حافظی (نویسنده سوم)، نگارنده مقاله/ روش‌شناس (۲۰%)؛ حمید علی‌اکبرلو (نویسنده چهارم)، /پژوهشگر کمکی (۱۰%)

**منابع مالی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

## منابع

1- Xie YM, Steven GP. A simple evolutionary procedure for structural optimization. Comput Struct. 1993;49(3):885-96.

2- Xie YM, Steven GP. Optimal design of multiple load case structures using an evolutionary procedure. Eng Comput. 1994;11(4):295-302.

3- Xie YM, Steven GP. A simple approach to structural frequency optimization. Comput Struct. 1994;53(6):1487-91.

4- Chu DN, Xie YM, Hira A, Steven GP. Evolutionary structural optimization for problems with stiffness constraints. Finite Elements in Analysis and Design. 1996;21(4):239-51.

5- Tanskanen P. The evolutionary structural optimization method: theoretical aspects. Comput Methods Appl Mech Eng. 2002;191(47-48):5485-98.
6- Dombernowsky P, Søndergaard A. Three-dimensional topology optimisation in architectural and structural design of concrete structures. In: Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium. Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures; 2009 Sep 28- Oct 2; Universidad Politecnica de Valencia, Spain.
7- Stromberg LL, Beghini A, Baker WF, Paulino GH. Application of layout and topology optimization using pattern gradation for the conceptual design of buildings. Struct Multidiscip Optim. 2011;43(2):165-80.
8- Stromberg LL, Beghini A, Baker WF, Paulino GH. Topology optimization for braced frames: Combining continuum and beam/column elements. Eng Struct. 2012;37:106-24.
9- Besserud K, Katz N, Beghini A. Structural emergence: architectural and structural design collaboration at SOM. Architect Design. 2013;83(2):48-55.
10- Beghini LL, Beghini A, Katz N, Baker WF, Paulino GH. Connecting architecture and engineering through structural topology optimization. Eng Struct. 2014;59:716-26.
11- Briseghella B, Fenu L, Feng Y, Mazzarolo E, Zordan T. Topology optimization of bridges supported by a concrete shell. Struct Eng Int. 2013;23(3):285-94.
12- Aage N, Amir O, Clausen A, Hadar L, Maier D, Søndergaard A. Advanced topology optimization methods for conceptual architectural design. In: Block P, Knippers J, Mitra NJ, Wang W, editors. Advances in architectural geometry 2014. Cham: Springer; 2015. p. 159-79.
13- Dapogny C, Alexis F, Georgios M, Grégoire A, Agnes C, Rafael E. Geometric constraints for shape and topology optimization in architectural design. Comput Mech. 2017;59(6):933-65.
14- Donofrio, M. Topology optimization and advanced manufacturing as a means for the design of sustainable building components. Procedia Eng. 2016;145:638-45.
15- Kazakis G, Kanellopoulos I, Sotiropoulos S, Lagaros ND. Topology optimization aided structural design: Interpretation, computational aspects and 3D printing. Heliyon. 2017;3(10):e00431.
16- Saadlaoui Y, Jean-Louis M, Jean-Marie R, Patrick C. Topology optimization and additive manufacturing: comparison of conception methods using industrial codes. J Manufact Syst. 2017;43(Part 1):178-86.
17- Liu J, Gaynor AT, Chen S, Kang Z, Suresh K, Takezawa A, et al. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. Struct Multidiscip Optim. 2018; 57(6):2457-83.
18- 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. Arch Comput Methods Eng. 2020;27:805-30.
19- Kontovourkis O, Tryfonos G, Georgiou C. Robotic additive manufacturing (RAM) with clay using topology optimization principles for toolpath planning: the example of a building element. Architect Sci Rev. 2020; 63(2):105-18.
20- Christensen PW, Klarbring A. Two-dimensional shape optimization. In: Christensen PW, Klarbring A, editors. An introduction to structural optimization. Dordrecht: Springer; 2008. p. 117-46.
21- Logan DL. A first course in the finite element method. 4th Edition. United States: Thomson; 2007.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی