



بهینه‌سازی توپولوژیک سازه همراه با بارگذاری حرارتی و مکانیکی

سروش مجیری¹، علیرضا شفیعی^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

* کد پستی 89195741، arshafiei@yazd.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 خرداد 1399

داوری اولیه: 2 شهریور 1399

پذیرش: 14 آبان 1399

کلیدواژگان:

بهینه‌سازی

بهینه‌سازی توپولوژیک

انسیس

تنش حرارتی

ساخت افزایشی

در دنیای جدید با توجه به هزینه‌های ناشی از تولید و رویکرد جامعه‌ی صنعتی در سبک و کوچک‌تر ساختن سازه‌ها و قطعات مکانیکی، احساس نیاز به تحولی عظیم در تغییر رویکرد طراحان به مقوله طراحی شدت یافته است. در این پژوهش به بررسی قابلیت‌ها، میزان کارایی و محدودیت‌های شاخه‌ای جدید از علم طراحی به نام بهینه‌سازی توپولوژیک پرداخته شد. معیار انتخاب مسائل، تلاش در جهت هرچه بهتر نشان دادن قابلیت‌های بهینه‌سازی توپولوژیک بوده است. به‌منظور ارزیابی مسائل پیچیده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در محدوده نرم‌افزار انسیس بهره گرفته شد که از جمله این مسائل می‌توان به تیر یکسر گیردار تحت بارگذاری استاتیکی، تیر دوسرگیردار تحت بارگذاری استاتیکی و حرارتی، هندسه گنبدی شکل تحت بارگذاری استاتیکی و حرارتی اشاره کرد. نتایج نشان داد حجم کاسته شده در مدل‌های نهایی به ترتیب برابر 66/29%، 52/88% و 50/054% است که این امر طبیعتاً مقداری افزایش در تنش و جابجایی مدل نهایی داشته است که طراح با توجه به محدودیت‌های حاکم بر مسئله حقیقی می‌تواند آن‌ها را تنظیم کند. نتایج نشان داد که مقدار میانگین تنش در نمونه‌های تیر یکسر گیردار، تیر دوسرگیردار و هندسه گنبدی شکل به ترتیب 88، 800 و 6 مگاپاسکال افزایش یافته است. همچنین میانگین میزان جابجایی در این نمونه‌ها به ترتیب 0/0001، 0/006 و 0/002 میلی‌متر افزایش یافت. به‌منظور ارزیابی چالش‌های پیش‌بینی نشده و بررسی تولیدپذیری نمونه‌های بهینه‌شده، نمونه گنبدی شکل با توجه به وجود حفره‌های سه‌بعدی در بدنه، انتخاب و با استفاده از فرایند ساخت افزایشی تولید شد. نتایج نشان داد که محصول خروجی از دقت مناسبی برخوردار است.

Topology optimization of structures with thermal and mechanical loading

Soroush Mojiri, Alireza Shafiei*

Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

* P.O.B. 89195741 Yazd, Iran, arshafiei@yazd.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 7 June 2020

First Decision: 23 August 2020

Accepted: 4 November 2020

Keywords:

Thermal stress

Topology optimization

ANSYS

Additive manufacturing

Abstract

In this study, capabilities, performance, and limits of a new design field named topology optimization were investigated. Case studies under different loads and boundary conditions were evaluated. The case studies were selected by the purpose of illustration of the capabilities of topology optimization. In order to analyze the case studies with more complexity such as cantilever beam, both end fixed beam, dome shape under static and thermal loading, Optimization algorithms were used in the ANSYS software. Results showed reduced volume in final models are 66.29%, 52.88%, 50.054%, respectively. The mean value of stress in the Cantilever beam, both end beam and dome shape was increased 88, 800 and 6 Mpa, respectively. Also, the displacement level was increased 0.0001, 0.006 and 0.002 mm, respectively. In order to reveal the unexpected challenges and evaluation of optimized models, due to the presence of cavities in the body, Dome Shape model was selected and produced by additive manufacturing (FDM method). Results indicated that the output product has good dimensional accuracy and surface smoothness. By creating support structures that manually selected numbers and locations, 3D cavities were formed with good accuracy, indicate that there is a high potential for manufacturability of complex design parts without classical methods.

1- مقدمه

تولید ساخت افزایشی¹ و زیرمجموعه‌های آن رخ داده است، توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند. نرم‌افزار انسیس² که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و قوی‌ترین نرم‌افزارهای تجاری تحلیل المان محدود در عرصه مهندسی شناخته می‌شود قابلیت بهینه‌سازی

امروزه به دلیل هزینه‌های بالا در تولید و گران بودن مواد خام مصرفی، طراحان در رابطه با طراحی سازه‌ها و قطعات مکانیکی تمایل به کوچک و سبک‌تر ساختن مدل‌های طراحی دارند. بر این مبنا، فرایندها و نرم‌افزارهای جدیدی ارائه شده‌اند که به‌خصوص با تحول عظیمی که در دهه‌ی اخیر در روش‌های

¹ Additive Manufacturing

² Ansys

Please cite this article using:

S. Mojiri, A. Shafiei, Topology optimization of structures with thermal and mechanical loading, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 12, pp. 54- 63, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

قابل بهینه‌سازی باشد [5]

می‌توان بهینه‌سازی در شکل را روشی دانست که در آن تغییرات ماهیتی نیست و تنها حدود قرارگیری مرزها تغییر می‌کند. به‌عنوان مثال اگر 6 سوراخ در هندسه است این تعداد افزایش یا کاهش نمی‌یابد. این در حالی است که در روش بهینه‌سازی توپولوژیک تغییرات ماهیتی‌تر است و ممکن است منجر به کم یا زیاد شدن یک المان گردد. این روش که ابداع‌کننده‌ی آن بندسوئی⁵ و کیکوچی⁶ هستند از ابتدای دهه‌ی 1960 شروع به فراگیر شدن کرده است [5, 7].

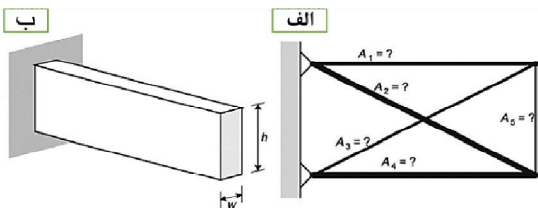


Fig. 1 Two samples of structures which size optimization could be able to applied.

شکل 1 دو نمونه از سازه‌هایی که بهینه‌سازی در سایز می‌تواند در آن‌ها صورت گیرد. الف) خرپا با ضخامت میله نامشخص ب) تیر یکسر گیردار با ابعاد سطح مقطع نامشخص [6].

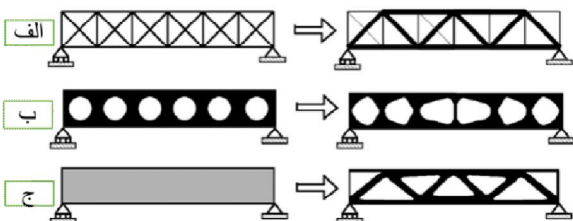


Fig. 2 Three types of structural optimization a) size optimization b) optimization in shape c) topology optimization

شکل 2 سه نوع مختلف بهینه‌سازی ساختاری. الف) بهینه‌سازی سایز ب) بهینه‌سازی در شکل ج) بهینه‌سازی توپولوژیک [2].

2- بهینه‌سازی ساختاری تحت تابع هدف نرمی حداقلی⁷

یکی از متداول‌ترین توابع هدف در مسائل بهینه‌سازی ساختاری، تابع هدف نرمی حداقلی است. در این روش به دنبال ماتریس سختی عام حداکثری که در حقیقت همان نرمی حداقلی است می‌گردیم. المانی به حدود ω^{mat} را در نظر بگیرید که بخشی از یک حجم مرجع به حدود ω می‌باشد. هدف آن است که نرمی به حداقل برسد (سختی به حداکثر برسد) لذا باید به دنبال تانسور سختی $(E_{ijkl}(x))$ بهینه‌ای بود که می‌تواند در تمام طول دامنه مقادیر مختلفی را اخذ کند. رابطه (2) بیانگر کار

توپولوژیک¹ را به خود افزوده است [1]. یکی از مهم‌ترین کاستی‌ها و مشکلاتی که تمام نرم‌افزارهای بهینه‌سازی توپولوژیک از جمله آباکوس با خود به همراه دارند آن است که تنها در محدوده بارگذاری استاتیکی توانایی بهینه‌سازی دارند اما در نرم‌افزار انسیس این کاستی برطرف شده و قابلیت بهینه‌سازی تحت بارگذاری استاتیکی و حرارتی توأمان را دارد [2]. در این پژوهش سعی شده است ارزیابی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی توپولوژیک و کاربردهای آن صورت گیرد.

بهینه‌سازی در مهندسی به معنای پیدا کردن بهترین جواب برای مسئله طراحی است، به‌طوری‌که تابع ارزیابی را بهبود ببخشد. تابع ارزیابی در مسئله بهینه‌سازی تابع هدف² نامیده می‌شود که با استفاده از قیدهایی که در طرح مسئله بهینه‌سازی لحاظ می‌شوند، بهبود داده می‌شود. در بهینه‌سازی، مسئله به‌صورت رابطه (1) دسته‌بندی می‌شود:

Problem p)

Find $x = \{x_1, x_2, \dots\}$

To minimize $f(x)$

s. t. $g_j(x) < 0$

$h_k(x) = 0$

(1)

مجموعه x شامل متغیرهای طراحی، f تابع هدف، g و h

قیود نابرابری و برابری حاکم بر مسئله هستند [3].

بهینه‌سازی ساختاری شامل پروسه‌هایی است که بهترین توزیع جرم در محدوده‌ی حجم اولیه جسم را تعیین می‌کند به‌طوری‌که جسم تحت شرایط مرزی اعمال‌شده دچار فروپاشی و یا حتی ورود به ناحیه‌ی پلاستیک نشود، لذا قیودی را در نظر می‌گیریم که می‌تواند از جنس تنش، جابجایی و ... باشد.

در طراحی سه نوع مختلف از بهینه‌سازی وجود دارد که همگی زیرمجموعه بهینه‌سازی ساختاری قرار می‌گیرند [4]:

- بهینه‌سازی در اندازه (بهینه‌سازی اندازه‌ای)³

- بهینه‌سازی در شکل⁴

- بهینه‌سازی توپولوژیک

در روش بهینه‌سازی اندازه‌ای طراح از قبل می‌داند که سازه به چه شکل خواهد بود اما سایز مؤلفه‌هایی که سازه را تشکیل می‌دهند را نمی‌داند. به‌عنوان مثال اگر هدف، طراحی تیر یکسر گیردار باشد، طول و موقعیت قرارگیری تیر معمولاً از قبل مشخص است اما ضخامت سطح مقطع آن باید طراحی شود که این امر قابل بهینه‌سازی است. مثالی دیگر را می‌توان سازه خرپا در نظر گرفت به‌طوری‌که ضخامت میله‌های تشکیل‌دهنده خرپا

¹ Topology Optimization

² Objective Function

³ Size Optimization

⁴ Shape Optimization

⁵ Bendsoe

⁶ Kikuchi

⁷ Minimum Compliance

که در آن E_{ijkl}^0 سختی پایه می‌باشد که در ابتدا در همه المان‌ها یکسان است. برای هدایت مسئله به یک مسئله طراحی 0 و 1 (توزیع یا حذف جرم) از فاکتوری به نام پنالتی استفاده می‌شود تا به وسیله آن بتوان مقادیر میانه چگالی مصنوعی را به مقادیر غیر دلخواه (صفر) تبدیل کرد. متداول‌ترین متد بهینه‌سازی که در آن از روش پنالتی استفاده می‌شود متد SIMP¹ است که در زیر به شرح آن پرداخته خواهد شد [4].

1-2- متد بهینه‌سازی توپولوژیک SIMP

در این روش با دادن چگالی مصنوعی ρ_e ($0 \leq \rho_e \leq 1$) به هر المان خواص سختی آن المان را تغییر می‌دهد. چگالی مصنوعی را می‌توان به صورت کسری از چگالی‌های حقیقی تعریف کرد به طوری که:

$$\rho(x_j) = \frac{\rho_j}{\rho_0} \quad (12)$$

که در آن چگالی المان ρ_0 ، چگالی مواد پایه و $\rho(x_j)$ بیانگر چگالی مصنوعی المان ρ می‌باشد. سختی هر المان از ضرب چگالی مصنوعی آن المان در سختی پایه (سختی اولیه یکسان در همه المان‌ها) به دست می‌آید به طوری که:

$$E_{ijkl} = \rho(x)^p E_{ijkl}^0, \quad p > 1 \quad (13)$$

$$\int_{\omega} \rho(x) d\omega \ll V, \quad 0 \ll \rho(x) \leq 1 \quad (14)$$

که در آن $p \geq 1$ توان پنالتی است که به طور معمول $p \geq 3$. زمانی که $E_{ijkl} = 0$ باشد بدان معناست که ماده‌ای در آن نقطه وجود ندارد و آنگاه که $E_{ijkl} > 0$ باشد بدان معناست که ماده در آن نقطه وجود دارد.

$$\begin{aligned} E_{ijkl}(\rho_e = 0) &= 0, \\ E_{ijkl}(\rho_e = 1) &= E_{ijkl}^0 \end{aligned} \quad (15)$$

توزیع و گسترش مواد در حجم مسئله به وسیله چگالی مصنوعی کنترل می‌شود و چگالی مصنوعی خود نیز با انتخاب $p > 1$ به سمت 0 و 1 هدایت می‌شود. با انتخاب $p > 1$ مواد با مقادیر میانه به مواد غیر دلخواه (صفر) تبدیل می‌شود [4].

3- الگوریتم‌ها و تنظیمات بهینه‌سازی در انسیس

انسیس از دو الگوریتم برای بهینه‌سازی توپولوژیک استفاده می‌کند که هر دو بر پایه روش SIMP استوار هستند:
- الگوریتم برنامه نویسی ترتیبی محذب²: از این الگوریتم در بهینه‌سازی‌های پیچیده استفاده می‌شود و می‌توان قیودی فراتر از وزن و حجم مانند تنش و جابجایی بر آن نگاشت.

مجازی داخلی یک جسم الاستیک می‌باشد که دارای بار تعادلی u و جابجایی مجازی v می‌باشد.

$$a(x, y) = \int E_{ijkl}(x) \varepsilon_{ij}(v) \varepsilon_{kl}(u) d\omega \quad (2)$$

که کرنش خطی شده بوده و از رابطه (3) حساب می‌شود:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

همچنین نیروها به صورت رابطه (4) قابل بیان هستند:

$$l(u) = \int f u d\omega + \int t u ds \quad (4)$$

که در آن t تنش و f نیروی حجمی (body force) است. در ادامه نرمی حداقلی به صورت رابطه (5) بیان می‌شود:

$$\min l(u) \quad (5)$$

که در آن U میدان جابجایی مجاز می‌باشد. در معادله (5)، E_{ad} بیانگر تانسورهای سختی تعریف شده مجاز برای مسئله طراحی می‌باشد. برای مسئله بهینه‌سازی توپولوژیک شامل همه‌ی تانسورهای سختی است که اگر در محدوده‌ی ω^{mat} باشد شامل خواص ماده ایزوتروپیک است و اگر در این محدوده نباشد، صفر است.

به منظور دستیابی به میدان جابجایی u و سختی E ، شیوه بیان شده در بالا، به فرم رابطه (6) در قالب المان محدود ارائه می‌گردد:

$$\min f^T u \quad s.t. \quad k(E)u = f; E_e \in E_{ad} \quad (6)$$

E_e سختی متعلق به المان e است و K می‌تواند به فرم رابطه (7) بیان شود:

$$K = \sum_{e=1}^N K_e(E_e) \quad (7)$$

که در آن K_e ماتریس سختی المان e است. در بهینه‌سازی توپولوژیک هدف توزیع جرم و یا حذف جرم در نقاط مختلف است لذا مسئله طراحی به عنوان یک مسئله 0 و 1 به صورت معادله (8) و (9) قابل بیان است:

$$E_{ijkl} = 1_{\omega^{mat}} E_{ijkl}^0, \quad 1_{\omega^{mat}} = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in \omega^{mat} \\ 0 & \text{if } x \in \frac{\omega}{\omega^{mat}} \end{cases} \quad (8)$$

$$\int_{\omega} 1_{mat} d\omega = vol(\omega^{mat}) \leq V \quad (9)$$

برای ایجاد تغییر در سختی هر المان پارامتری به نام چگالی مصنوعی (ρ_e) تعریف می‌شود به طوری که:

$$\begin{aligned} E_{ijkl}(\rho_e = 0) &= 0, \\ E_{ijkl}(\rho_e = 1) &= 1 \end{aligned} \quad (10)$$

¹ Solid Isotropic Material with Penalization

² Sequential Convex Programming

بارگذاری استاتیکی، تیر دوسرگیردار با بارگذاری استاتیکی و حرارتی، هندسه گنبدی شکل با بارگذاری‌های استاتیکی و حرارتی بررسی می‌گردد. جنس مواد به کاررفته در تمام مسائل، فولاد با خواصی مطابق جدول 1 است.

جدول 1: خواص فولاد [9].

Table 1 Steel propertise [9]

واحد	مقدار	خواص
Kg/m ³	7850	چگالی
1/°C	1/2×10 ⁻⁵	ضریب انبساط حرارتی
Pa	2×10 ¹¹	مدول یانگ
	0/3	نسبت پواسون
Pa	7/69×10 ¹⁰	مدول برشی
W/m. °C	60/5	ضریب رسانایی هدایتی (k)

4-1- تیر یکسر گیردار

مطابق شکل 4 تیر یکسر گیردار به ضخامت 1 میلی‌متر تحت بارگذاری نقطه‌ای 1000 نیوتنی می‌باشد. محدوده اولیه تیر با استفاده از المان‌های مربعی به تعداد 8400 المان مش‌بندی شده است. شکل 5 خروجی‌های اولیه المان محدود را نشان می‌دهد.

فرایند بهینه‌سازی با تابع هدف نرمی حداقلی و قید پاسخ حجمی 65% شروع به تکرار می‌کند و پس از 38 تکرار همگرا شده است. شکل (6- الف) بیانگر چگالی مصنوعی هر المان می‌باشد به طوری که المان‌های قرمز داری چگالی مصنوعی به ارزش 1 و المان‌های آبی به ارزش 0/001 می‌باشند. در شکل (6- ب) المان‌هایی که دارای چگالی مصنوعی کمتر از 0/5 می‌باشند حذف شده‌اند و طبق این معیار، مدل بهینه‌سازی شده ارائه گردیده است.

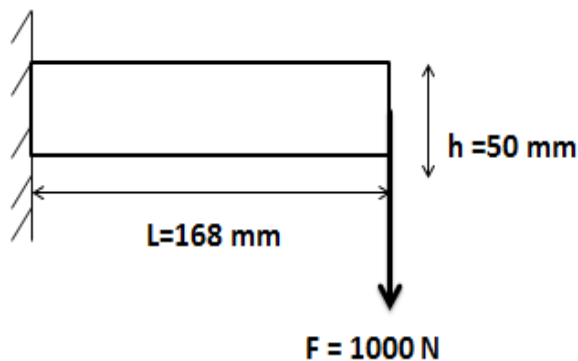


Fig. 3 Five connection in ANSYS

شکل 3 اتصال پنج‌گانه در محیط انسیس

- الگوریتم معیار بهینگی¹: از این الگوریتم در بهینه‌سازی‌هایی استفاده می‌شود که تنها تحت قیود جرم و حجم هستند [2].

می‌توان برخی از ورودی‌هایی که حل‌کننده پیش از شروع فرآیند به آن‌ها نیاز دارد را تعریف کرد. حداکثر تعداد تکرار پروسه یک گزینه قابل انتخاب می‌باشد که به صورت پیش‌فرض بر روی 500 تکرار تنظیم شده است. به دلیل مشکلات عددی، حداقل چگالی مصنوعی یک المان نمی‌تواند دقیقاً صفر باشد و باید مقداری بین 0 و 1 داشته باشد. این عدد به صورت پیش‌فرض به روی 0.001 تنظیم شده است. دقت همگرایی معمولاً باید 2% یا کمتر باشد. اگر هدف به حداقل رساندن جرم و حجم باشد، توصیه شده که بر روی 0.1% تنظیم شده باشد. یکی دیگر از ورودی‌هایی که در این بخش قابل تنظیم است فاکتور پنالتی است انسیس توصیه می‌کند که این مقدار بر روی 3 تنظیم شود [8]. تابع هدف انتخاب‌شده در طول تمام مسائل ارائه شده در این مقاله نرمی حداقلی است (سختی حداکثری).

در پروسه بهینه‌سازی قدم اول، طراحی مدل موردنظر است. برای این امر انسیس دو نرم‌افزار به نام‌های دیزاین مودلر² و اسپیس کلیم³ در نظر گرفته است. البته می‌توان مدل اولیه را در نرم‌افزارهای دیگری (مانند سالیدورکز⁴) طراحی کرده و سپس وارد انسیس کرد. مدل‌های استفاده‌شده در این تحقیق همگی در نرم‌افزار سالیدورکز طراحی گردیده‌اند.

قدم بعدی در این فرایند مش بندی و تحلیل المان محدود با توجه به شرایط اولیه و مرزی حاکم بر مسئله می‌باشد، برای این امر انسیس نرم‌افزاری به نام مکانیکال⁵ را در نظر گرفته است. پس از آنکه نخستین خروجی‌های تحلیل المان محدود به دست آمد الگوریتم‌های بهینه‌سازی توپولوژیک اعمال شده که با استفاده از خروجی‌های تحلیل اولیه و قیود حاکم بر مسئله، مدل بهینه‌سازی شده را ارائه می‌دهد. در این مقاله به منظور دستیابی به پروسه بهینه‌سازی ذکر شده در بالا، برای حالتی که مسئله تحت تنش‌های مکانیکی و حرارتی باشد اتصالی پنج‌گانه مابین نرم‌افزارهای موجود در زیرمجموعه انسیس برقرار شده است که این امر از توانایی‌ها و جذابیت‌های این نرم‌افزار می‌باشد (شکل 3).

4- مثال‌های عددی و نتایج

در این بخش سه مثال عددی شامل تیر یکسر گیردار با

¹ Optimality Criteria

² Design Modeler

³ Spaceclaim

⁴ Solidworks

⁵ Mechanical

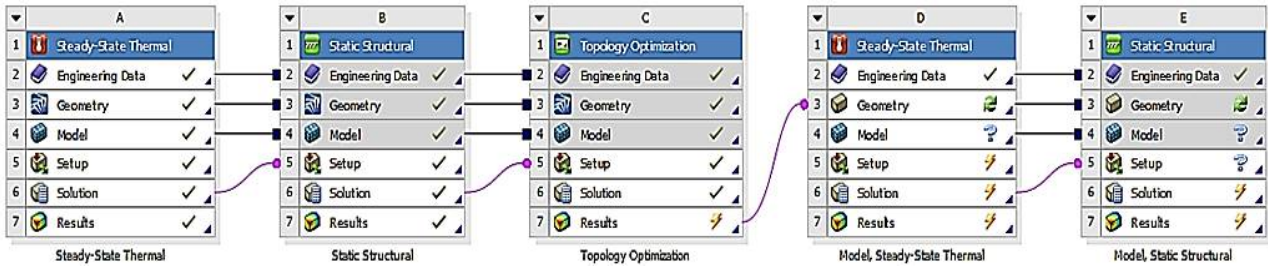


Fig.4 Cantilever beam under loading 1000 N

شکل 4: تیر یکسر گیردار تحت بارگذاری 1000 نیوتنی

پس از این مرحله مدل بهینه‌شده به نرم‌افزار اسپیس کلیم انتقال داده می‌شود و در آنجا با استفاده از ابزارهای تعبیه‌شده در نرم‌افزار، هندسه مسئله ویرایش شده و امکان مش‌بندی مجدد آن برای تحلیل المان محدود ثانویه فراهم می‌گردد. شکل 7 خروجی های ثانویه المان محدود را نشان می‌دهد.

جدول 2 میزان تغییرات جرم و حجم مدل نهایی را نشان می‌دهد. این در حالی است که میانگین میزان جابجایی و تنش در تیر به ترتیب به‌اندازه 0/0001 میلی‌متر و 88 مگاپاسکال افزایش یافته است.

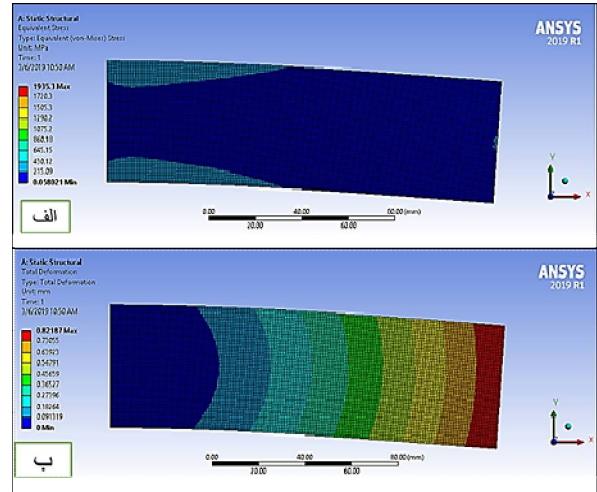


Fig 5 Finite element analyze of initial model a) VonMises stress in initial model b) Displacement value in initial model

شکل 5 تحلیل المان محدود مدل اولیه. الف) میزان تنش وون مایزر در مدل اولیه، ب) میزان جابجایی در مدل اولیه

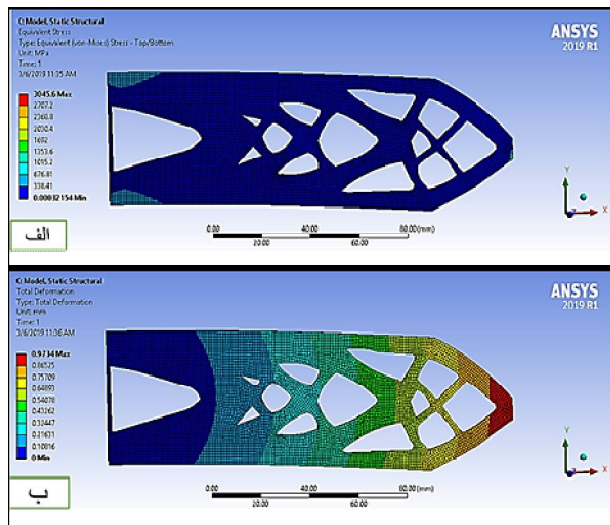


Fig.7 Finite element analyze in optimized model a) Von Mises stress in optimized model b) The value of displacement in optimized model

شکل 7 تحلیل المان محدود در مدل بهینه‌شده. الف) تنش وون مایزر در مدل بهینه ب) میزان جابجایی در مدل بهینه

جدول 2 میزان تغییرات جرم و حجم نهایی در تیر یکسرگیردار

Table 2 The value of variation of final model in cantilever beam

حجم اولیه	8400	mm ³
حجم نهایی	5568	mm ³
نسبت حجم نهایی به حجم اولیه	66/29%	
جرم اولیه	0/0659	kg
جرم نهایی	0/04371	kg

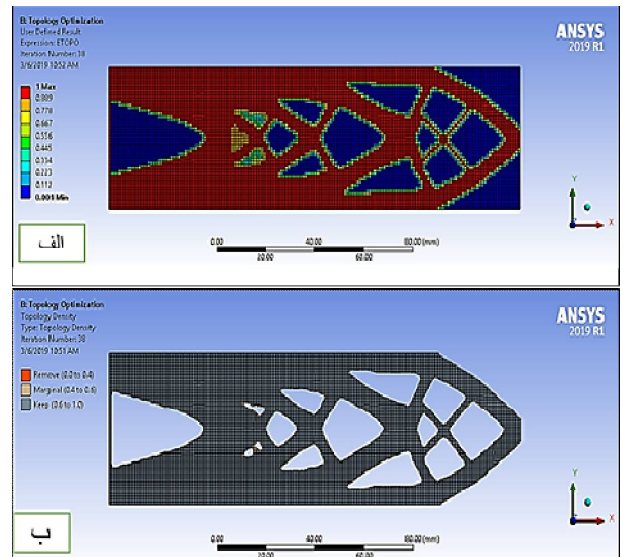


Fig.6 a) Distribution of artificial density of every elements b) Final optimized model

شکل 6 الف) توزیع چگالی مصنوعی هر المان، ب) مدل نهایی بهینه‌شده (توزیع المان‌ها با چگالی بالاتر از 0/5)

حجمی 50% شروع به تکرار می‌کند می‌کند و پس از 48 تکرار همگرا شده است که خروجی‌های آن در شکل‌های (10- الف) و (10- ب) آورده شده است. شکل 11 خروجی‌های ثانویه المان محدود را نشان می‌دهد. جدول 3 میزان تغییرات جرم و حجم مدل نهایی را نشان می‌دهد. این در حالی است که میانگین میزان جابجایی و تنش در تیر به ترتیب به اندازه 0/006 میلی‌متر و 800 مگاپاسکال افزایش یافته است.

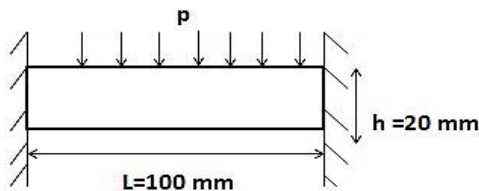


Fig. 8 Both end beam

شکل 8 تیر دوسرگیردار

2-4- تیر دوسرگیردار تحت بارگذاری حرارتی و استاتیکی مطابق شکل 8 تیر دوسرگیردار به ضخامت 5 میلی‌متر تحت بارگذاری گسترده 100 مگاپاسکالی است به گونه‌ای که لبه بالایی تیر در دمای 10 درجه سانتی‌گراد و لبه پایینی در دمای 100 درجه سانتی‌گراد قرار دارد، این گرادیان دما باعث به وجود آمدن انتقال گرمای هدایتی در تیر شده که این امر انبساط تیر را به دنبال دارد. دو لبه تیر تحت قیود ثابت قرار دارند و از هرگونه جابجایی منع شده‌اند لذا جلوی انبساط تیر گرفته می‌شود که این امر منجر به ایجاد تنش حرارتی در طول تیر می‌شود. محدوده تیر با استفاده از المان‌های مربعی به تعداد 8000 مش بندی شده است. شکل 9 خروجی‌های اولیه المان محدود را نشان می‌دهد.

فرایند بهینه‌سازی با تابع هدف نرمی حداقلی و قید پاسخ

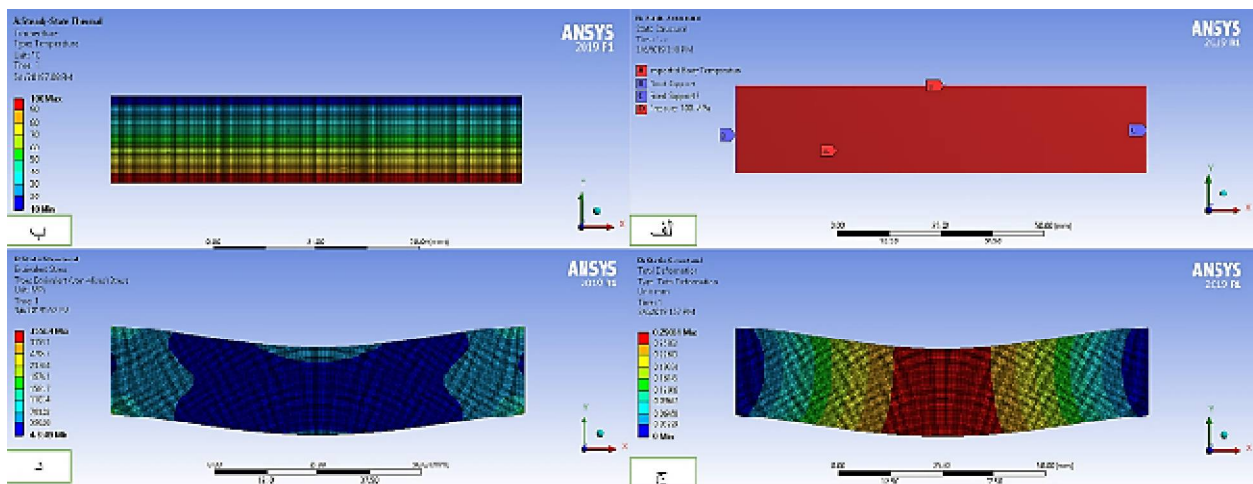


Fig. 9 a) Applied of boundary condition on the beam, b) Distribution of temperature in initial model, c) The value of displacement in initial model, d) Von Mises stress in initial model

شکل 9 الف) اعمال شرایط مرزی بر روی تیر، ب) توزیع دما در مدل اولیه، ج) میزان جابجایی در مدل اولیه، د) میزان تنش وون مایزر در مدل اولیه

Table 3 The value of variation of final model in both end beam

جدول 3 میزان تغییرات جرم و حجم مدل نهایی		
حجم اولیه	1000	mm ³
حجم نهایی	5288/7	mm ³
نسبت حجم نهایی به حجم اولیه	%52/88	
جرم اولیه	0/0785	kg
جرم نهایی	0.01517	kg

3-4- هندسه گنبدی شکل تحت بارگذاری حرارتی و استاتیکی

هندسه گنبدی شکل از دونیم کره به شعاع‌های 53 و 55 میلی‌متر تشکیل شده است. رأس گنبد از استوانه‌ای به شعاع داخلی 5 میلی‌متر و شعاع خارجی 8 میلی‌متر تشکیل شده است. مطابق شکل 12 داخل گنبد تحت شار حرارتی $\frac{w}{mm^2}$ می‌باشد و قید دمای 22 درجه بر روی سطح خارجی آن قرار گرفته است و رأس

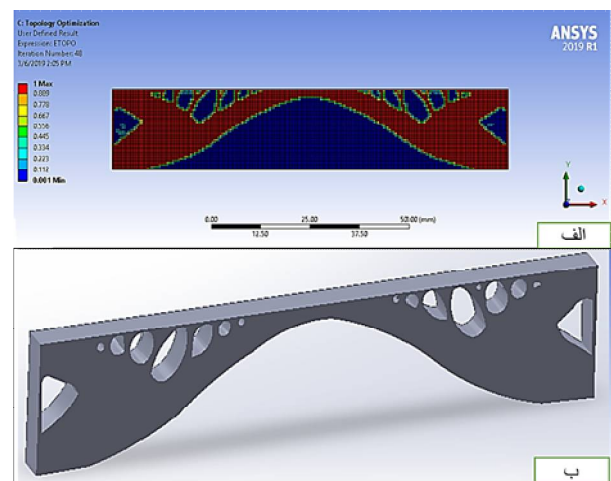


Fig. 10 a) Distribution of artificial density in elements, b) Final model

شکل 10 الف) توزیع چگالی مصنوعی هر المان، ب) مدل نهایی

محدوده هندسه مش‌بندی شده که خروجی‌های اولیه همان محدود در شکل 13 ارائه شده است. فرایند بهینه‌سازی با تابع هدف نرمی حداقلی و قید پاسخ حجمی 50% شروع به تکرار می‌کند و پس از 41 تکرار همگرا شده که خروجی‌های آن در شکل 14 آورده شده است. جدول 4 میزان تغییرات جرم و حجم مدل نهایی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که میانگین میزان جابجایی و تنش در هندسه بهینه شده به ترتیب به‌اندازه 0/002 میلی‌متر و 6 مگاپاسکال افزایش یافته است.

گنبد تحت بار استاتیکی 5000 نیوتنی می‌باشد. لبه پایینی هندسه ثابت در نظر گرفته شده است.

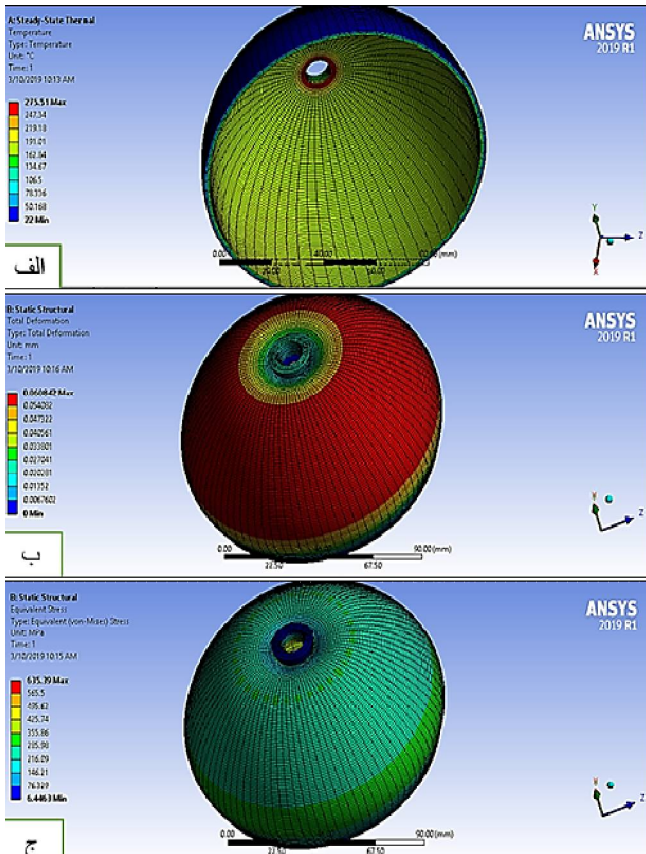


Fig. 13 a) Distribution of temperature in initial model, b) The value of displacement in initial model, c) Von Mises stress in initial model
 شکل 13 الف) توزیع دما در مدل اولیه، ب) میزان جابجایی در مدل اولیه، ج) میزان تنش وون مایزر در مدل اولیه

Table 4 The value of variation of final model in dome shape example

جدول 4 میزان تغییرات جرم و حجم مدل نهایی

پارامتر	مقدار	واحد
حجم اولیه	36760	mm ³
حجم نهایی	18400	mm ³
نسبت حجم نهایی به اولیه	50/054	%
جرم اولیه	0/288	kg
جرم نهایی	0/1444	kg

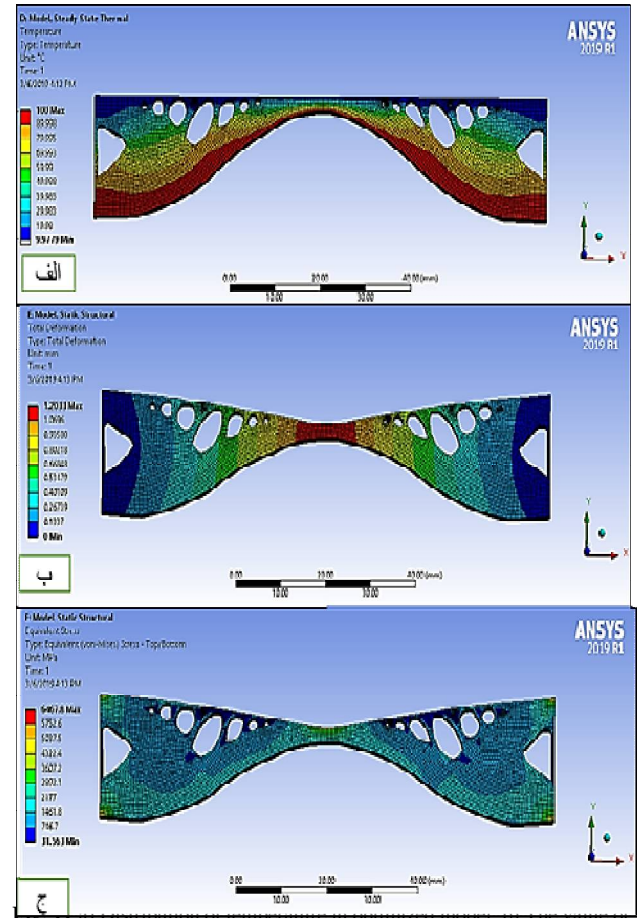


Fig. 11 a) Distribution of temperature in optimized model, b) The value of displacement in optimized model, c) Von Mises stress in optimized model
 شکل 11 الف) توزیع دما در مدل بهینه شده، ب) میزان جابجایی در مدل بهینه شده ج) تنش وون مایزر در مدل بهینه شده

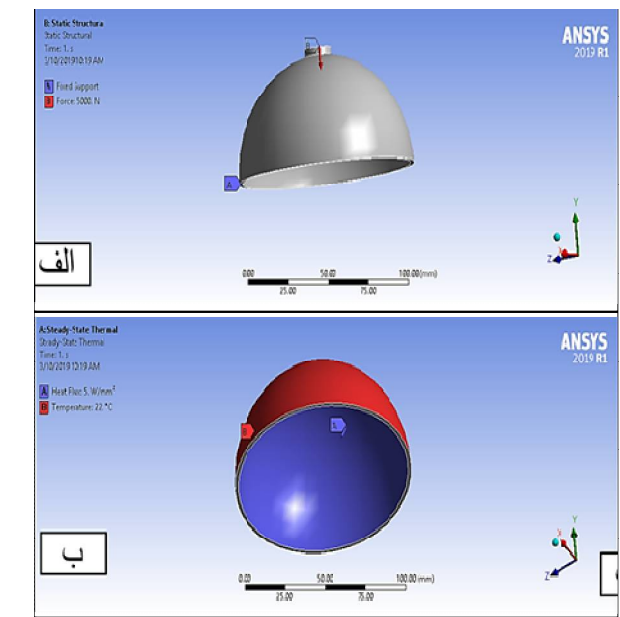


Fig. 12 a) Applied of static boundary condition, b) Applied of thermal boundary condition

شکل 12 الف) اعمال شرایط مرزی استاتیکی، ب) اعمال شرایط مرزی حرارتی

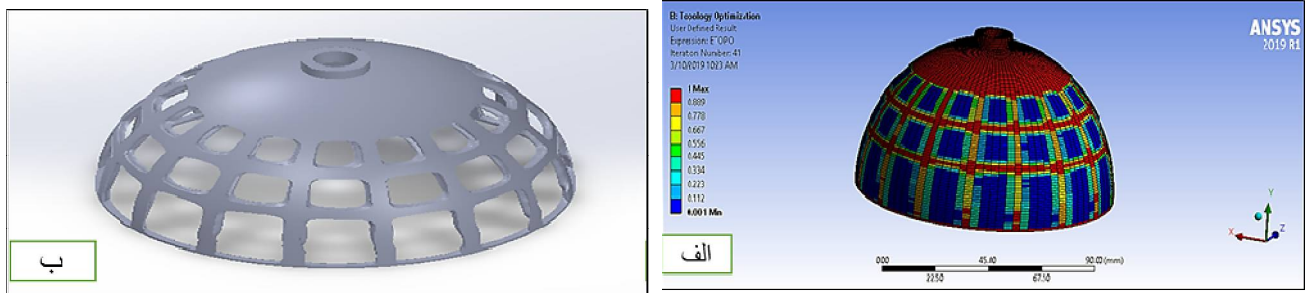


Fig. 14 a) Distribution of artificial density in elements, b) Final model

شکل 14: الف) توزیع چگالی مصنوعی هر المان، ب) مدل نهایی

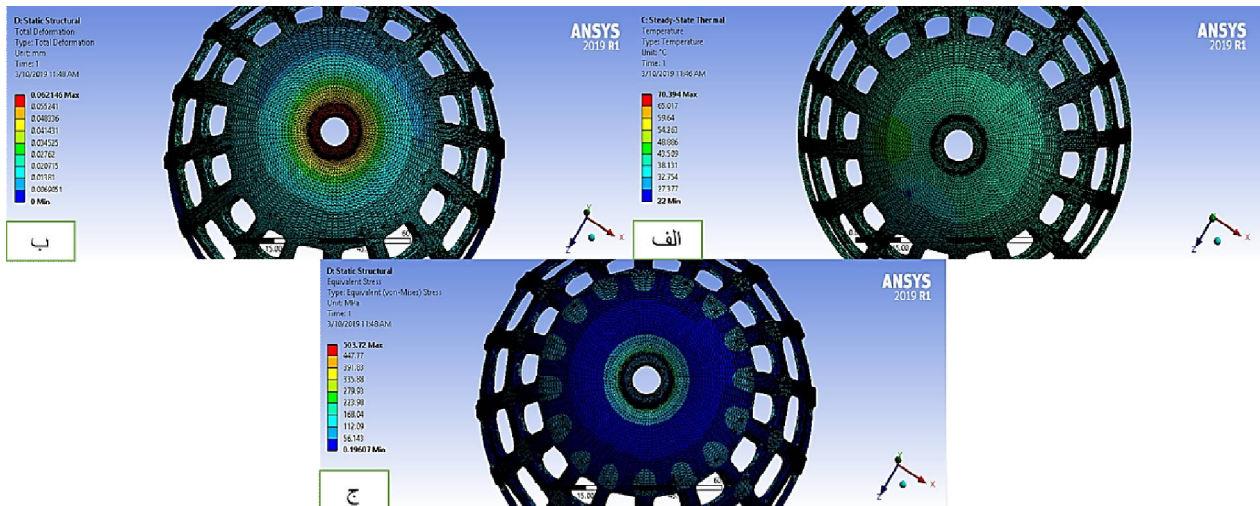


Fig. 15 a) Distribution of temperature in optimized model, b) The value of displacement in optimized model, c) Von Mises stress in optimized model

شکل 15 الف) توزیع دما در مدل بهینه شده، ب) میزان جابجایی در مدل بهینه شده، ج) توزیع تنش وون مایز در مدل بهینه شده

4-4- تهیه نمونه سه بعدی

به منظور بررسی قابلیت تولید و چالش‌های پیش‌بینی نشده در نمونه بهینه‌سازی شده نهایی، چاپ سه‌بعدی مورد استفاده قرار گرفت. ساخت نمونه با استفاده از این فرایند به صورت گسترده به منظور بررسی مدل‌های مفهومی، تست نمونه و برقراری ارتباط بین طراحی و نمونه نهایی انجام می‌گیرد. نمونه‌هایی که با استفاده از این روش تولید می‌شوند، می‌توانند نمونه‌های اولیه کاربردی باشد که در سنجش عملکرد نمونه نهایی به کار می‌رود. این فرایند با استفاده از یک دستگاه FDM انجام گرفت. در ابتدا خروجی نهایی نمونه با فرمت STL و ابعاد مناسب به نرم‌افزار لایه‌سازی با نام simplify3D معرفی شد. پس از انتخاب $40^{\circ}77^{\circ}77$ میلی‌متر با رعایت مقیاس¹، با توجه به وجود حفره‌های ایجاد شده ناشی از بهینه‌سازی و کم بودن ضخامت دیواره حفره‌ها، مناسب‌ترین وجه قطعه به عنوان بستر انتخاب گردید.

در مرحله بعد، تنظیمات مرتبط با جنس قطعه، نازل چاپگر، تعداد لایه‌های جامد پایینی و بالایی، درصد تراکم داخلی¹ و درصد تراکم سازه‌های پشتیبان انجام گرفت. به منظور چاپ

با کیفیت بالاتر، قطر نازل برابر $0/45$ میلی‌متر انتخاب شد. همچنین جهت افزایش استحکام نمونه، درصد تراکم داخلی برابر 70% و تعداد لایه‌های جامد پایینی و بالایی به ترتیب 7 و 4 لایه انتخاب شد.

درصد تراکم سازه‌های پشتیبان برابر 35% انتخاب شد. با توجه به نقش اولین لایه در چسبیدن مناسب و عدم سقوط سازه‌های پشتیبان و نمونه، ارتفاع لایه اول برابر $0/2$ میلی‌متر تنظیم شد. نهایتاً جنس نمونه از نوع PLA که یکی از انواع پلاستیک است انتخاب شد.

پس از اتمام فرایند، مطابق شکل 17 نمونه به همراه سازه‌های پشتیبان با نهایت دقت از بستر چاپگر جداسازی شد. موفقیت‌آمیز بودن نتایج چاپ سه‌بعدی نشان داد که نمونه بهینه‌سازی شده دارای قابلیت ساخت است و می‌توان از الگوی بهینه‌سازی شده به منظور ساخت افزایشی با استفاده از لیزر بهره برد و زمینه‌های صنعتی شدن قطعه مورد نظر را ایجاد کرد. همچنین امکان بارگذاری‌های مختلف و ارزیابی خواص مکانیکی نمونه فلزی ساخته شده با استفاده از فرایند ساخت افزایشی وجود دارد.

¹ Infill percentage

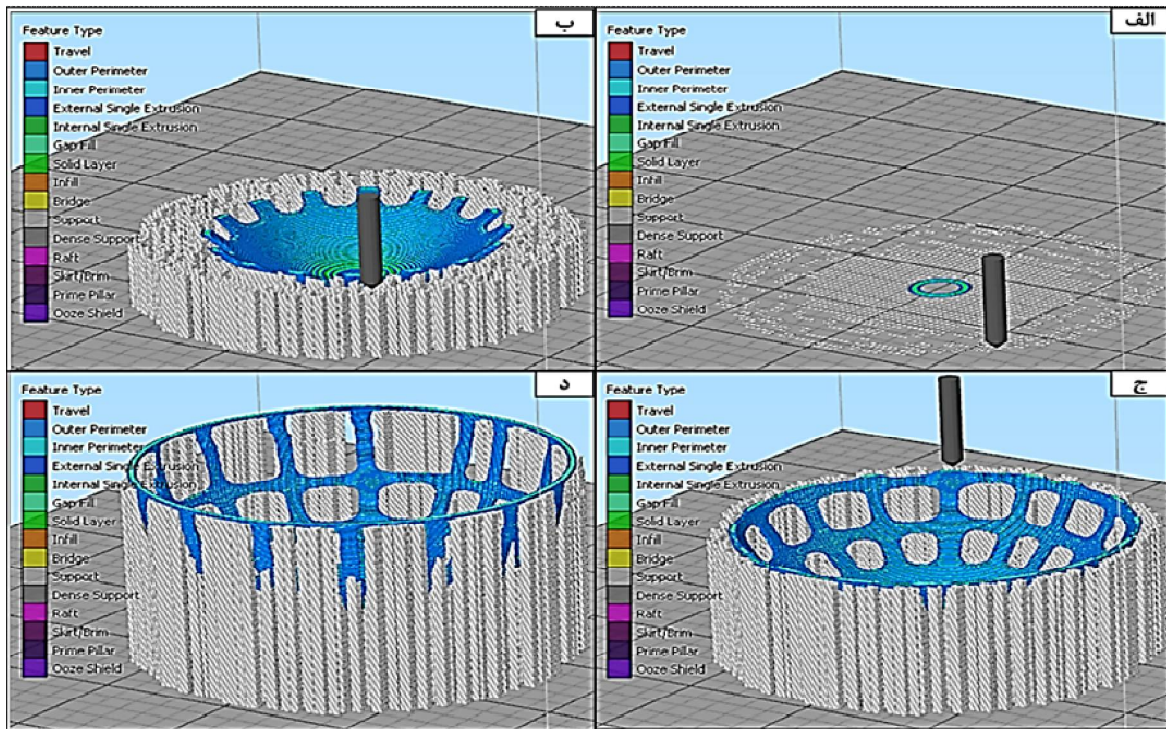


Fig. 16 Output pictures of Simplify 3D in isometric view in layers of a) 1, b) 68, c) 137, d) 205

شکل 16 تصاویر خروجی از نرم‌افزار لایه‌سازی از نمای ایزومتریک در لایه‌های الف) 1، ب) 68، ج) 137 و د) 205

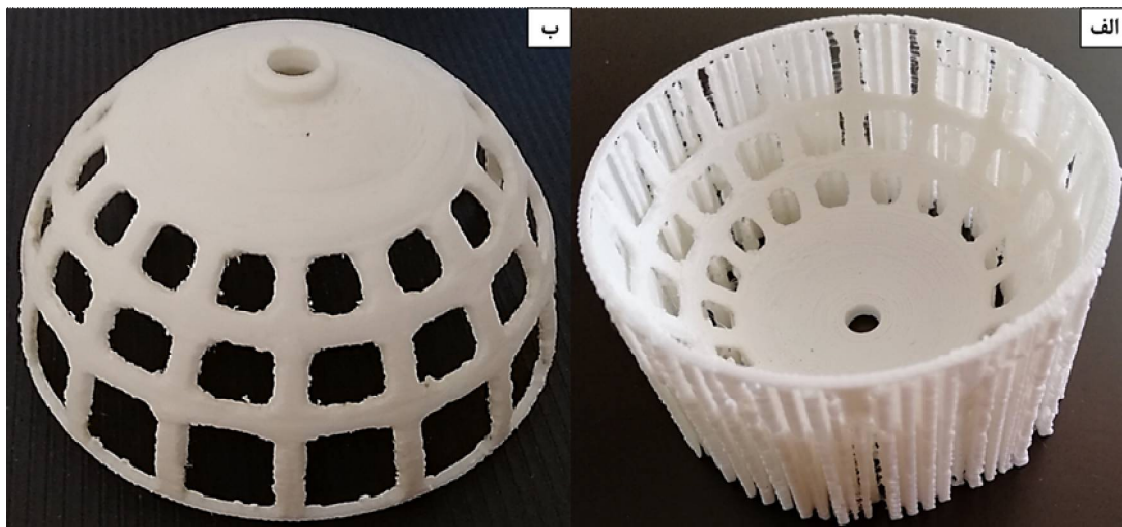


Fig. 17 3D printed model of final model in optimized form a) with support structures, b) After deleting support structures

شکل 17 نمونه سه‌بعدی پرینت شده از قطعه نهایی بهینه‌سازی شده الف) همراه با سازه‌های پشتیبان، ب) پس از حذف سازه‌های پشتیبان و قطعه نهایی

5- جمع‌بندی

انسیس بهره گرفته شد که از جمله این مسائل می‌توان به تیر یکسرگیردار تحت بارگذاری استاتیکی، تیر دوسرگیردار تحت بارگذاری استاتیکی و حرارتی، هندسه گنبدی شکل تحت بارگذاری استاتیکی و حرارتی اشاره کرد. نتایج نشان داد حجم کاسته شده در مدل‌های نهایی به ترتیب برابر $66/29\%$ ، $52/88\%$ و $50/054\%$ است که این امر طبیعتاً مقداری افزایش در تنش و جابجایی مدل نهایی داشته است که طراح با توجه به محدودیت‌های حاکم بر مسئله حقیقی می‌تواند آن‌ها را تنظیم

در این پژوهش به بررسی قابلیت‌ها، میزان کارایی و محدودیت‌های شاخه‌ای جدید از علم طراحی به نام بهینه‌سازی توپولوژیک پرداخته شد. در این راستا، مسائل تحت بارگذاری‌ها و شرایط مرزی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. معیار انتخاب مسائل، تلاش در جهت هرچه بهتر و بیشتر نشان دادن قابلیت‌های بهینه‌سازی توپولوژیک بوده است. به‌منظور ارزیابی مسائل پیچیده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در محدوده نرم‌افزار

- Prometheus. 2018.
- [3] Hassani. B and Hinton. E, Homogenization and structural topology optimization: theory, practice and software. *Springer Science & Business Media*, 2012.
- [4] Bendsoe. M.P and Sigmund. O, Topology Optimization, 2nd ed. . denmark: *Methods and Applications*.
- [5] Bendsoe. M.P and Sigmund. O, Topology optimization: Theory, methods and applications. 2003. *Springer*, 2013.
- [6] Querin. O.M, Victoria. M, and Alonso. C, Topology Design Methods for Structural Optimization. .
- [7] Bendsoe. M.P and Kikuchi. N, Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method Computer methods in applied mechanics and engineering 71-2 (1988) 197–224.
- [8] ANSYS Mechanical User's Guide. [Online]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/%0Asecured?returnurl=/Views/Secured/corp/v190/wb_sim/ds_Home.html.
- [9] Ansys workbench material library. Ansys, 2019.
- [10] Center of professional development, learning and research. [Online]. Available: www.cpdlr.com.
- [11] [Online]. Available: www.mullenixracingengines.com/shop/exhaust/manifold.
- کند. نتایج نشان داد که مقدار میانگین تنش در نمونه‌های تیر یکسر گیردار، تیر دوسرگیردار و هندسه گنبدی شکل به ترتیب 88، 800 و 6 مگاپاسکال افزایش یافته است. همچنین میانگین میزان جابجایی در این نمونه‌ها به ترتیب 0/0001، 0/006 و 0/002 میلی‌متر افزایش یافت.
- به‌منظور ارزیابی چالش‌های پیش‌بینی‌نشده و بررسی تولید پذیری نمونه‌های بهینه‌شده، نمونه گنبدی شکل با توجه به وجود حفره‌های سه‌بعدی در بدنه، انتخاب و با استفاده از فرایند ساخت افزایشی تولید شد. نتایج نشان داد که محصول خروجی از دقت مناسبی برخوردار است. با ایجاد سازه‌های پشتیبان که تعداد و جایگاه آن‌ها توسط طراح تعیین می‌شود، سوراخ‌های سه‌بعدی با دقت مناسبی ایجاد شد که این امر بیانگر تولید پذیری مدل‌های نسبتاً پیچیده بدون استفاده از روش‌های تولید سنتی است.

6- مراجع

- [1] ANSYS Topology Optimization Limitations, ANSYS HELP Guide, 2018.
- [2] Jensen. F, Topology Optimization of Turbine Manifold in the Rocket Engine Demonstrator