



A new optimal structural boundary modification algorithm in the multi-objective topology optimization of microgripper

E. Hasanabadi, A. Ghodoosian*, A. Nikoobin

Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Iran

ABSTRACT: In industries where manufacturing and assembly operations are to be carried out with a high degree of precision on a micro scale, precise control and movement of components on a micro scale are desperately needed. Integrated microgripper mechanisms are used for this purpose. In this paper, a compliant-based microgripper is designed using multi-objective topology optimization method and the final form of the mechanism is prepared for manufacturing using a new optimal structural boundary modification algorithm. Usually, the optimization faces some problems in the designing step of the structure topology, such as node to node joining rather than the correct joining of the elements, as well as staircase boundaries due to the analysis of the problem with the finite element method. To overcome these drawbacks, in this paper, the curve fitting method is used to minimize the sum of squared errors in the boundary profile of the structure; meanwhile, the optimized objective functions of the structure are improved and better results are obtained. Finally, the performance results of the microgripper are confirmed using the comparison between numerical simulations and empirical tests.

Review History:

Received: Nov. 08, 2019
Revised: Jul. 02, 2020
Accepted: Aug. 31, 2020
Available Online: Sep. 10, 2020

Keywords:

Compliant mechanism
Microgripper
Multi-objective topology optimization
Structural boundary modification algorithm
Experimental test

1- Introduction

Microgripper is one of the tools for high-precision positioning of the micro specimens with minimal error. Various methods have been proposed by researchers for designing compliant mechanisms such as the mechanism synthesis method [1], and topology optimization [2, 3]. Among these, topology optimization provides a logical, fast, and efficient approach. For example, in references [4, 5], a topology optimization method was used for extracting the conceptual design of the compliant microgripper mechanism. The extracted conceptual design was not appropriate for manufacturing because the topology optimization methods use finite element, and so, the mentioned conceptual design should be reformed at its boundaries. In the studies in the field of preparing the microgripper mechanism for manufacturing by post-optimization techniques [6, 7], the effect of changes, which are applied to the mechanism, is ignored.

In the present paper, the existing problems in manufacturing the conceptual design are resolved through the use of a new optimal boundary modification algorithm so that the performance indicators and optimized objective functions of the structure will be improved. First, the microgripper's conceptual design is developed using the topology optimization method. Then, the new optimal boundary modification algorithm is applied to prepare the microgripper for manufacturing. After that, the microgripper

manufacturing method and testing process will be expressed and finally, the numerical and empirical results will be compared.

2- Methodology

In this paper, the conceptual design of the mechanism is obtained from multi-objective topology optimization. To this end, the design domain of the mechanism, input and output forces, and the supports are considered as depicted in Fig. 1.



Fig. 1. Initial design domain

*Corresponding author's email: aghoddosian@semnan.ac.ir



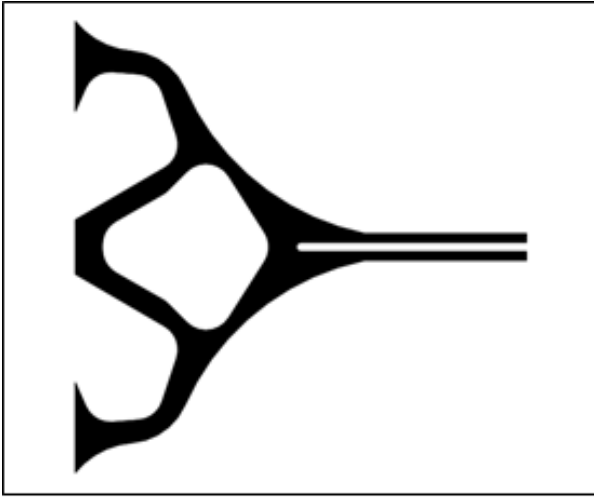


Fig. 2. The final design of the microgripper

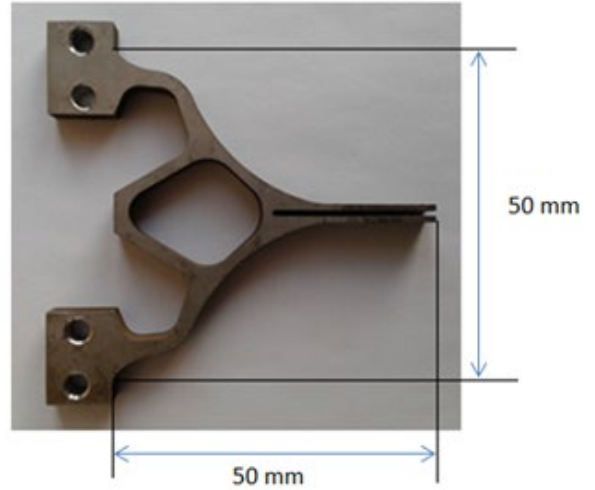


Fig. 3. The manufactured microgripper

The structure should be stiff enough to sustain external loads, so the strain energy of the structure should be reduced subsequently. Hence, the desired objective function is the minimization of the strain energy as well as minimization of the structure volume. For structural strain energy, we have [8]:

$$SE = \frac{1}{2} \{D\}^T [K] \{D\} \quad (1)$$

where, K is the general stiffness matrix and D is the node displacement vector resulted from f_{in} orce.

In this article, the new structural boundary modification algorithm is used. For this purpose, the B-spline curve, which is calculated by minimizing the sum of squared errors, is fitted to the structure boundary. The innovation proposed in this article is that during the calculation of mentioned curve, the objective functions of the optimization problem are calculated as well; i.e. the sum of squared errors is minimized besides considering the objective functions values; otherwise, the structure may deviate from the optimum state after the boundary modification.

The B-spline curve is extracted from the following equation [9]:

$$x(u) = \sum_{j=0}^n B_j N_{i,k}(u) \quad (2)$$

where B_i is the i^{th} control point $n + 1$, the number of control points, and $N_{i,k}(u)$ is the basis function of the B-spline curve, which is defined as follows:

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u - t_i)N_{i,k-1}(u)}{t_{i+k-1} - t_i} + \frac{(t_{i+k} - u)N_{i+1,k-1}(u)}{t_{i+k} - t_{i+1}} \quad (3)$$

and

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } t_i \leq u \leq t_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

The sum of squared errors is calculated as follows:

$$f = \sum_{j=0}^r \|P_j - x(u_j)\|^2 \quad (5)$$

Therefore, considering Eqs. (3) and (6) we will see:

$$f = \sum_{z=0}^r \left\| P_z - \sum_{j=0}^n B_j N_{i,k}(u_j) \right\|^2 \quad (6)$$

The optimization of f value is performed so that the values of the objective functions (strain energy and volume of the structure) are minimized in comparison to the original values. So the final form of the structure will be as shown in Fig. 2.

The microgripper is made from 316 Stainless Steel sheets (Fig. 3).

3- 3. Results and Discussion

By simulating the microgripper in the ANSYS WORKBENCH analysis software, the input and output displacements of the jaws can be obtained using finite element numerical solution and the results are plotted in Fig. 4. As can be seen in the diagram, there is a good match between the numerical and the experimental results, and the maximum error is equal to 7.76 %.

4- Conclusions

In this paper, an optimum conceptual design of the compliant mechanism of microgripper structure is obtained using a multi-objective topology optimization method. Due to the staircase boundaries, the manufacturing process of the microgripper encounters difficulty. Therefore, using a logical and systematic approach, the boundaries of the structure were corrected. To this end, the curve fitting method was used to minimize the sum of squared errors of the boundary profile and the optimized objective functions were improved. Then, the final structure obtained from optimization was constructed

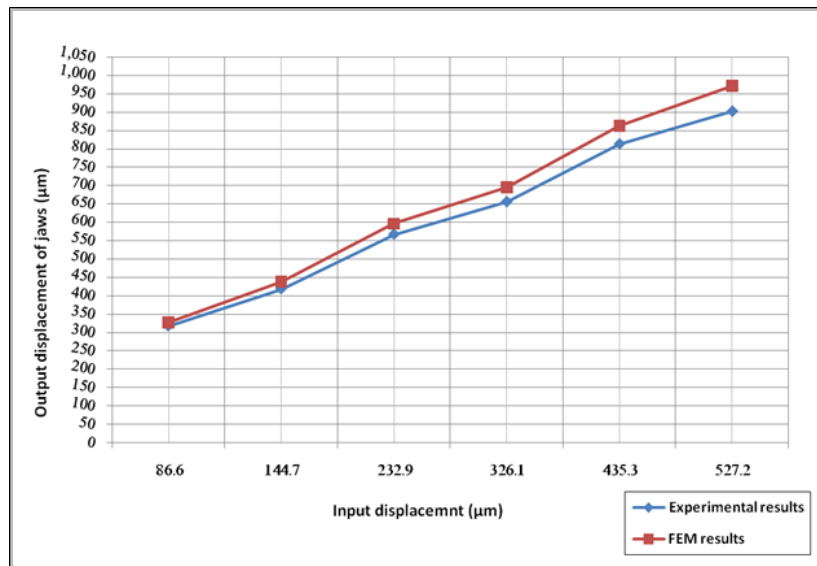


Fig. 4. Variation of the output displacement for the applied input displacement

from 316 stainless steel sheets and the EDM-Wire cut method and laboratory tests were performed on it. The results of the experiments show an appropriate consistency between the simulation results and the built structure

References

- [1] A.E. Albanesi, V.D. Fachinotti, M.A. Pucheta, A. Cardona, Synthesis of compliant mechanisms for segment-motion generation tasks, *Mecánica Computacional*, 26 (2007) 2919-1930.
- [2] V. Megaro, J. Zehnder, M. Bächer, S. Coros, M.H. Gross, B. Thomaszewski, A computational design tool for compliant mechanisms, *ACM Trans. Graph.*, 36(4) (2017) 82:81-82:12.
- [3] S. Linß, S. Henning, L. Zentner, Modeling and design of flexure hinge-based compliant mechanisms, in: *Kinematics*, IntechOpen, 2019.
- [4] J. Liang, X. Zhang, B. Zhu, Nonlinear topology optimization of parallel-grasping microgripper, *Precision Engineering*, 60 (2019) 152-159.
- [5] B. Zhu, X. Zhang, H. Zhang, J. Liang, H. Zang, H. Li, R. Wang, Design of compliant mechanisms using continuum topology optimization: A review, *Mechanism and Machine Theory*, 143 (2020) 103622.
- [6] R. Bharanidaran, T. Ramesh, Numerical simulation and experimental investigation of a topologically optimized compliant microgripper, *Sensors and Actuators A: Physical*, 205 (2014) 156-163.
- [7] R. Bharanidaran, T. Ramesh, A modified post-processing technique to design a compliant based microgripper with a plunger using topological optimization, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1-4) (2017) 103-112.
- [8] R. Ansola, E. Veguería, J. Canales, J.A. Tárrago, A simple evolutionary topology optimization procedure for compliant mechanism design, *Finite Elements in Analysis and Design*, 44(1) (2007) 53-62.
- [9] X. Qian, Topology optimization in B-spline space, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 265 (2013) 15-35.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

E. Hasanabadi, A. Ghodoosian, A.A. Nikoobin, new optimal structural boundary modification algorithm in the multi-objective topology optimization of microgripper, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(4) (2021) 535-538.

DOI: [10.22060/mej.2020.17318.6576](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17318.6576)





الگوریتم جدید اصلاح مرز سازه در طراحی بهینه چندهدفه توپولوژی یک میکروگریپر

احسان حسن‌آبادی، علی قدوسیان*، امین نیکوبین

دانشکده مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۷

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۱۲

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۲۰

کلمات کلیدی:

مکانیزم یکپارچه

میکروگریپر

بهینه‌سازی توپولوژی چندهدفه

الگوریتم اصلاح مرز

تست تجربی

خلاصه: در صنایعی که عملیات ساخت و مونتاژ باید با دقت بالا و در ابعاد میکرو صورت گیرد، انتقال و جابجایی کنترل شده و دقیق قطعات در ابعاد میکرو به شدت مورد نیاز است. برای این منظور از مکانیزم‌های یکپارچه میکروگریپر استفاده می‌گردد. در این مقاله با استفاده از روش بهینه‌سازی توپولوژی چندهدفه، میکروگریپری با مکانیزم یکپارچه طراحی گردیده است. معمولاً سازه‌های استخراج شده با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی در طراحی توپولوژی سازه‌ها، دارای اشکالاتی هستند. از جمله اتصالات گره با گره به جای اتصال صحیح المان‌ها و همچنین وجود مرزهای پلکانی به دلیل تحلیل مسئله به صورت المان محدود. از این رو در این مقاله با استفاده از یک الگوریتم جدید اصلاح مرز سازه، شکل نهایی مکانیزم به گونه‌ای استخراج می‌گردد که برای ساخت نهایی آماده گردد. برای این منظور از روش برازش منحنی استفاده شده است تا از طریق کمینه‌نمودن مجموع خطای مربعات، پروفیل مرز سازه اصلاح گردد، به گونه‌ای که سازه پس از اصلاح مرز از حالت بهینه خارج نشده و حتی توابع هدف مورد استفاده در طراحی میکروگریپر، بهبود داده شوند. در انتها با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی و تست‌های تجربی و آزمایشگاهی، عملکرد سازه میکروگریپر مورد بررسی قرار گرفته و انطباق مناسبی بین نتایج مشاهده شده است.

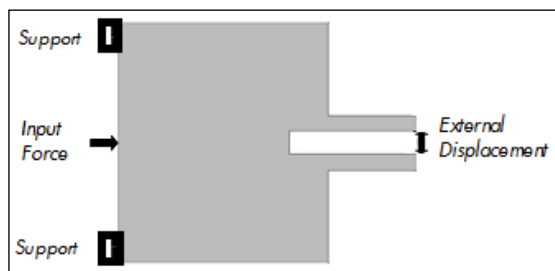
۱- مقدمه

صورت یکپارچه طراحی گردد تا از وجود مفاصل در آن اجتناب گردد. تاکنون روش‌های مختلفی از جمله روش سنتز مکانیزمی [۶، ۷]، روش مدلسازی جسم صلب مجازی [۸] و تکنیک‌های بهینه‌سازی سازه‌ای [۹-۱۱]، برای طراحی مکانیزم‌های یکپارچه ارائه شده است. از میان روش‌های ارائه شده، تکنیک بهینه‌سازی سازه‌ای (بهینه‌سازی توپولوژی)، روشی منطقی، سریع و کارآمد است. به عنوان مثال در [۱۲-۱۷] از روش بهینه‌سازی توپولوژی جهت استخراج طرح مفهومی و اولیه مکانیزم یکپارچه میکروگریپر استفاده شده است. لازم به ذکر است تمامی کارهای قبلی در طراحی میکروگریپرها به روش بهینه‌سازی توپولوژی، به صورت تک هدفه انجام گرفته است، اما در این مقاله با استفاده از روش بهینه‌سازی توپولوژی چندهدفه، طرح اولیه مکانیزم استخراج گردیده است. در حالت کلی به دلیل ماهیت

در سال‌های اخیر، جابجایی دقیق قطعات در ابعاد میکرو در بسیاری از صنایع از جمله مونتاژکاری‌های میکرو، میکرو ربات‌ها، قطعات الکترونیکی و غیره [۱-۴] به شدت رواج یافته است. یکی از وسایلی که می‌توان توسط آن قطعات میکرو را با دقت بالا و با کمترین خطا جابجا کرد، میکروگریپر است [۵]. میکروگریپر، وسیله‌ای است که به ازای جابجایی ورودی به آن، فک‌های خروجی آن باز یا بسته شده و بدین طریق اجسام میکرو را جابجا می‌نماید. به طور عمده در طراحی میکروگریپرها از مفاصل استفاده نمی‌شود، زیرا وجود مفاصل باعث ایجاد خطای ساخت، خطای مونتاژ، لقی، سایش و اصطکاک بین قطعات خواهد شد. بنابراین مکانیزم باید به

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: aghoddosian@semnan.ac.ir





شکل ۱. شماتیک کلی میکروگریپر
Fig. 1. Initial design domain

کرده و مقدار جابجایی خروجی سازه افزایش می‌یابد. اما در مقابل باید انرژی کرنشی سازه نیز کاهش یابد تا سازه میکروگریپر سفتی و استحکام خود را از دست ندهد. از این رو توابع هدف مورد نظر، کمینه‌شدن انرژی کرنشی^۱ و کمینه‌شدن حجم سازه^۲ خواهند بود. بدین ترتیب با استفاده از مرجع [۲۰] برای انرژی کرنشی سازه خواهیم داشت:

$$SE = \frac{1}{2} \{D\}^T [K] \{D\} \quad (1)$$

که K ماتریس سفتی کلی و D بردار جابجایی گره‌ای ناشی از نیروی F_{in} است. همچنین رابطه بین ماتریس سفتی و بردار جابجایی و نیروی ورودی به صورت زیر خواهد بود:

$$[K] \{D\} = F_{in} \quad (2)$$

در این مقاله، با استفاده از ترکیب روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه هیوریستیکی^۳ الگوریتم ژنتیکی مرتب‌سازی نامغلوب^۴ و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه^۵ و با انجام کدنویسی در محیط نرم‌افزار متلب^۶، به حل مسئله بهینه‌سازی توپولوژی چندهدفه پرداخته شده است. بدین صورت که با در نظر گرفتن یک جمعیت اولیه تصادفی از سازه‌های مختلف میکروگریپر و استفاده از مفاهیم رتبه‌بندی^۷ و فاصله ازدحامی^۸ مربوط به الگوریتم ژنتیکی مرتب‌سازی نامغلوب^۲، بهترین سازه میکروگریپر در هر مرحله از تحلیل شناسایی شده و تمامی سازه‌ها بر مبنای بهترین سازه بدست‌آمده در این مرحله، با استفاده از

روش‌های بهینه‌سازی توپولوژی که از المان محدود بهره می‌برند، طرح مفهومی استخراج‌شده، برای ساخت مناسب نبوده و طرح مفهومی مذکور نیاز به اصلاحاتی در مرزهای آن خواهد داشت. در مقالاتی که سعی نموده‌اند با اعمال تغییرات بعدی مکانیزم میکروگریپر را برای ساخت آماده نمایند [۱۸، ۱۹]، به تاثیراتی که تغییرات اعمال‌شده بر روی مکانیزم خواهد داشت، اشاره‌ای نشده است. در این مقالات با استفاده از روش بهینه‌سازی توپولوژی تک‌هدفه، میکروگریپری طراحی و یک طرح مفهومی برای آن استخراج گردیده است، اما بدون هیچ روش منطقی، مرزهای سازه اصلاح گردیده و در نقاط اتصال گره با گره، مفصلی با شعاع‌های مختلف در نظر گرفته شده است، بدون اینکه تاثیرات این تغییرات بر روی سازه بهینه شده مفهومی مورد بررسی قرار گیرد. بدیهی است هرگونه تغییرات بر روی سازه ممکن است مکانیزم طراحی‌شده را از حالت بهینه خارج کرده و یا شاخص‌های عملکردی بهینه‌شده آن را تغییر دهد.

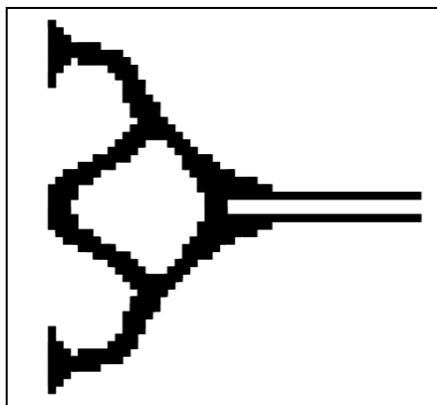
بدین ترتیب در این مقاله سعی شده است با استفاده از روش جدید اصلاح مرز، مشکلات موجود در طرح مفهومی بدست‌آمده از بهینه‌سازی توپولوژی، به نحوی مرتفع گردد که شاخص‌های عملکردی و توابع هدف بهینه‌شده سازه، نه تنها تغییر نکرده بلکه حتی در جهت مثبت بهبود داده شود. در ابتدا نحوه طراحی اولیه میکروگریپر با استفاده از روش بهینه‌سازی توپولوژی بیان می‌گردد. سپس الگوریتم جدید اصلاح مرز سازه جهت آماده‌سازی میکروگریپر برای ساخت ارائه می‌شود. در ادامه نحوه ساخت میکروگریپر و روند انجام آزمایشات بیان شده و در انتها نتایج عددی و تجربی بدست‌آمده با هم مقایسه می‌گردد.

۲- طراحی بهینه میکروگریپر با روش بهینه‌سازی توپولوژی

طراحی مکانیزم میکروگریپر، با روش بهینه‌سازی توپولوژی انجام می‌گیرد. بدین ترتیب در ابتدا باید شماتیک کلی میکروگریپر، محدوده طراحی مکانیزم، نیروی ورودی، جابجایی خروجی و تکیه‌گاه‌ها مشخص شده باشند. شکل ۱ شماتیک کلی میکروگریپر را نشان می‌دهد.

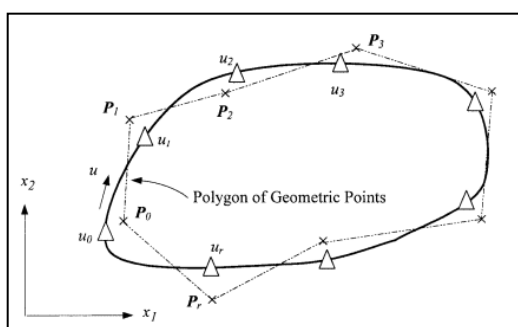
همانطور که بیان شد، در این مقاله طراحی مکانیزم میکروگریپر با روش بهینه‌سازی توپولوژی چند هدفه صورت خواهد گرفت. بدیهی است هرچه حجم سازه کاهش یابد انعطاف‌پذیری آن افزایش پیدا

1 Strain energy (SE)
2 Volume (V)
3 Heuristic
4 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA II)
5 Multiple Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)
6 MATLAB software
7 Ranking
8 Crowding distance



شکل ۲. سازه بهینه میکروگریپر پس از حل مسئله بهینه‌سازی

Fig. 2. Conceptual design of microgripper



شکل ۳. نقاط هندسی چندضلعی [۱۷]

Fig. 3. Geometric points of polygon

و

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } t_i \leq u \leq t_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

که $k-1$ به معنای درجه چندجمله‌ای توابع پایه است.

مقدار مجموع خطای مربعات بر طبق مرجع [۲۲] به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$f = \sum_{j=0}^r \|P_j - x(u_j)\|^2 \quad (6)$$

که در آن $\|\bullet\|$ به معنای نرم بردار \bullet ، $x(u)$ منحنی بی‌اسپلاین برازش شده، $x(u_j) = [x_1(u_j), x_2(u_j), x_3(u_j)]$ بردار موقعیت منحنی بی‌اسپلاین برازش شده در u_j و P_j نقاط هندسی چندضلعی شکل ۳ می‌باشند.

بنابراین با توجه به روابط (۳) و (۶) خواهیم داشت:

$$f = \sum_{z=0}^r \left\| P_z - \sum_{j=0}^n B_j N_{i,k}(u_j) \right\|^2 \quad (7)$$

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه، به‌روزرسانی می‌گردند. این روند تا استخراج بهینه‌ترین سازه ادامه خواهد داشت. مزیت این روش، افزایش سرعت و دقت در تعیین سازه بهینه نهایی می‌باشد. لذا سازه بهینه میکروگریپر به صورت شکل ۲ بدست می‌آید که باید الگوریتم اصلاح مرز بر روی آن اعمال گردد.

۳- استخراج طرح نهایی با استفاده از الگوریتم اصلاح مرز

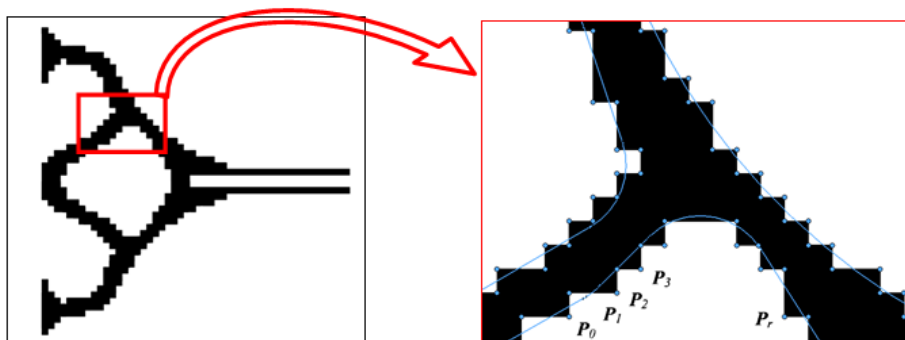
وجود مناطق پله‌ای بر روی مرز میکروگریپر در سازه بهینه بدست آمده در شکل ۲، فرآیند ساخت را تحت الشعاع قرار داده و آن را دشوار می‌نماید. این مناطق را نمی‌توان در مرحله بهینه‌سازی به کلی از بین برد اما با افزایش تعداد المان‌ها می‌توان از تاثیر آن‌ها کاست. از سوی دیگر نمی‌توان تعداد المان‌ها را نیز بسیار افزایش داد زیرا این امر باعث افزایش زمان حل مسئله و در برخی موارد موجب افزایش خطا در حل عددی مسئله المان محدود خواهد شد. بدین ترتیب در این مقاله از الگوریتم اصلاح مرز برای برطرف کردن این مشکل استفاده شده است. لذا برای اصلاح مرز سازه میکروگریپر از روش برازش منحنی بی‌اسپلاین^۱ استفاده خواهد شد. منحنی برازش شده با استفاده از کمینه‌شدن مجموع خطای مربعات بدست می‌آید، اما نوآوری مطرح شده در این مقاله بدین صورت است که در حین استخراج منحنی مرز سازه، توابع هدف مسئله بهینه‌سازی (کمینه‌شدن انرژی کرنشی و کمینه‌شدن حجم سازه) نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدان معنی که کمینه‌سازی مجموع خطای حداقل مربعات با در نظر گرفتن توابع هدف سازه صورت می‌گیرد. در غیر این صورت ممکن است سازه پس از اصلاح مرز از حالت بهینه خارج گردد. با توجه به مرجع [۲۱] منحنی بی‌اسپلاین از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$x(u) = \sum_{j=0}^n B_j N_{i,k}(u) \quad (3)$$

که B_i به معنای i امین نقطه کنترلی و $n+1$ تعداد نقاط کنترلی بوده و $N_{i,k}(u)$ تابع پایه منحنی بی‌اسپلاین است که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

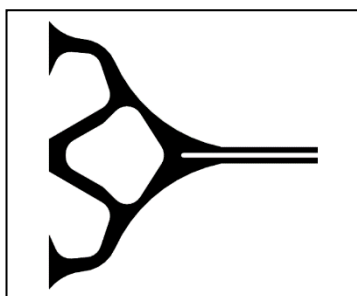
$$N_{i,k}(u) = \frac{(u-t_i)N_{i,k-1}(u)}{t_{i+k-1}-t_i} + \frac{(t_{i+k}-u)N_{i+1,k-1}(u)}{t_{i+k}-t_{i+1}} \quad (4)$$

1 B-spline



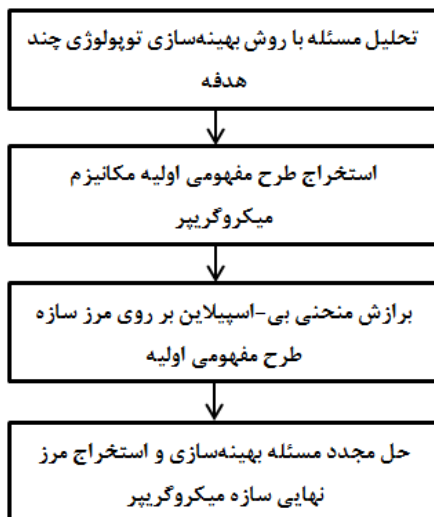
شکل ۴. نمایی از برازش منحنی در مرزهای سازه

Fig. 4. A view of the curve fitting at the boundaries of the structure



شکل ۵. طرح نهایی پس از اصلاح مرز و آماده جهت ساخت

Fig. 5. The final design of the structure after modifying the boundaries and ready for construction



شکل ۶. فلوجارت روند انجام گرفته به منظور اصلاح مرز سازه

Fig. 6. Flowchart of the process performed to modify the structural boundary

۴- ساخت میکروگریپر و انجام تست‌های تجربی

در این مرحله میکروگریپر طراحی شده به منظور انجام تست‌های تجربی و آزمایشگاهی، تحت فرآیند ساخت قرار خواهد گرفت. میکروگریپر از جنس ورق استیل ۳۱۶ [۱۸] و با استفاده از روش

حال برای کمینه‌نمودن مقدار f ، در محیط نرم‌افزار متلب، توابع هدف مسئله بهینه‌سازی (انرژی کرنشی و حجم سازه) به عنوان قیود مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و مقدار f به‌گونه‌ای کمینه می‌گردد که مقادیر انرژی کرنشی و حجم سازه نسبت به مقادیر قبلی، هیچ‌گونه افزایشی نداشته باشند تا خللی در شرایط بهینه سازه بدست‌آمده، وارد نگردد. لذا با توجه به این موارد و کمینه‌نمودن مقدار f نسبت به نقاط کنترلی، رابطه بین نقاط کنترلی و نقاط گوشه‌ای هر یک از المان‌ها در مرز سازه، مطابق با رابطه (۸) خواهد بود:

$$N^T N B = N^T P \quad (8)$$

که ماتریس N به صورت زیر می‌باشد:

$$N = \begin{bmatrix} N_{0,k}(u_0) & N_{1,k}(u_0) & \dots & N_{n,k}(u_0) \\ N_{0,k}(u_1) & N_{1,k}(u_1) & \dots & N_{n,k}(u_1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{0,k}(u_r) & N_{1,k}(u_r) & \dots & N_{n,k}(u_r) \end{bmatrix}_{(r+1) \times (n+1)} \quad (9)$$

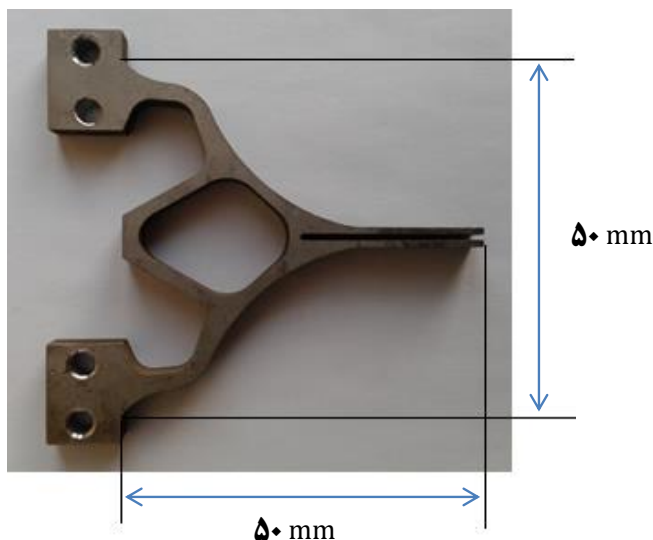
بدین ترتیب برازش منحنی با توجه به نقاط $P_z : z = 0, 1, \dots, r$ که در واقع مختصات گوشه هر یک از المان‌ها در مرز سازه می‌باشند، مرز جدید سازه همانند شکل ۴ بدست خواهد آمد. در انتها شکل نهایی سازه (شکل ۵) برای ساخت آماده گردیده است.

لذا فلوجارت روند انجام گرفته به منظور اصلاح مرز سازه به صورت شکل ۶ خواهد بود.

جدول ۱. خواص مکانیکی ورق استیل ۳۱۶ [18]

Table 1. Mechanical properties of stainless steel type 316

مقدار	خاصیت مکانیکی
8×10^{-6}	چگالی (kg/mm ³)
193×10^3	مدول الاستیسیته (MPa)
۲۹۰	تنش تسلیم (MPa)



شکل ۷. نمایی از میکروگریپر طراحی شده

Fig. 7. The manufactured microgripper

جابجایی ورودی، از پیچ A که در شکل ۹ نشان داده شده است، استفاده می‌گردد. بدین صورت که با چرخش پیچ A، جابجایی ورودی به میکروگریپر اعمال شده و مقدار جابجایی با توجه به خط نشان قرمز رنگ در شکل ۹ بدست می‌آید.

پس از اعمال جابجایی ورودی، با استفاده از دوربین دیجیتال میکروسکوپ، از فاصله هوایی بین خط نشان قرمز رنگ و نقطه اعمال جابجایی عکس‌برداری شده و با استفاده از روش پردازش تصویر، مقدار جابجایی اعمال شده محاسبه می‌گردد (شکل ۱۰). از همین روش جهت محاسبه جابجایی خروجی میکروگریپر نیز استفاده خواهد شد (شکل ۱۱).

۵- نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی

همانطور که بیان شد جهت انجام تست آزمایشگاهی سازه میکروگریپر مقدار جابجایی خروجی فک‌های میکروگریپر با اعمال

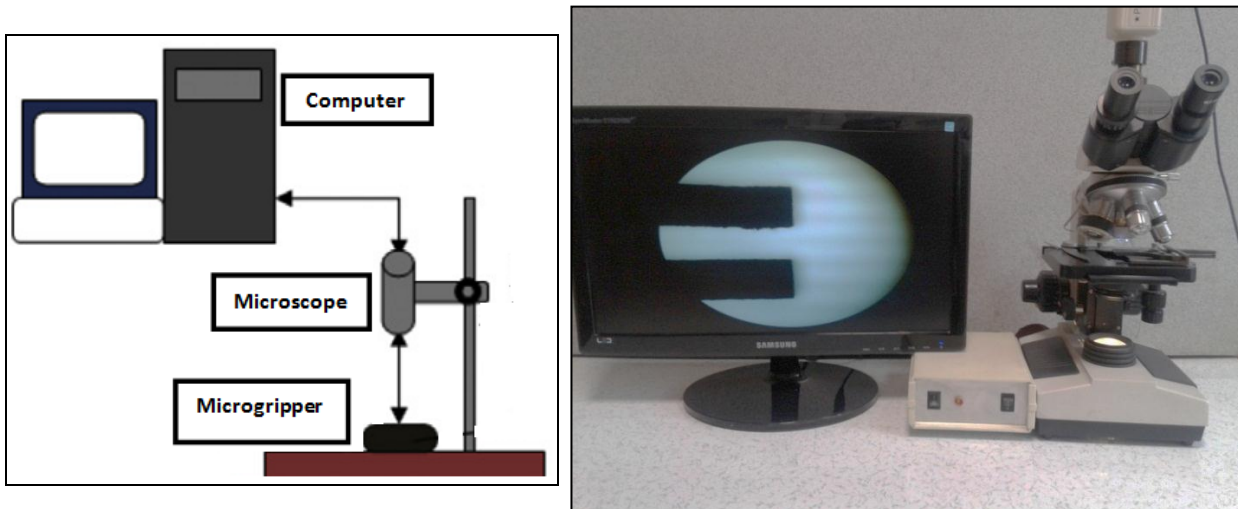
وایرکات^۱، که روشی دقیق است، ساخته خواهد شد. خواص مکانیکی این ماده در جدول ۱ آورده شده است. نمایی از میکروگریپر در شکل ۷ نشان داده شده است و ابعاد میکروگریپر ساخته شده ۵۰ در ۵۰ میلی‌متر است.

جهت انجام تست‌های تجربی، یک جابجایی ورودی به میکروگریپر اعمال شده و مقدار بازشدگی فک‌های میکروگریپر، اندازه‌گیری خواهد شد. از آنجا که مقدار جابجایی فک‌ها عددی بسیار کوچک است و اندازه‌گیری این مقدار باید با دقت بالایی صورت گیرد، بدین ترتیب از یک میکروسکوپ برای این منظور استفاده گردیده است. در شکل ۸ چگونگی قرارگیری تجهیزات آزمایشگاهی نشان داده شده است.

همانطور که بیان شد با اعمال یک جابجایی کوچک به

میکروگریپر، مقدار جابجایی خروجی آن بدست می‌آید. برای این منظور، میکروگریپر بر روی یک پایه قرار خواهد گرفت و برای اعمال

1 EDM-Wire cut



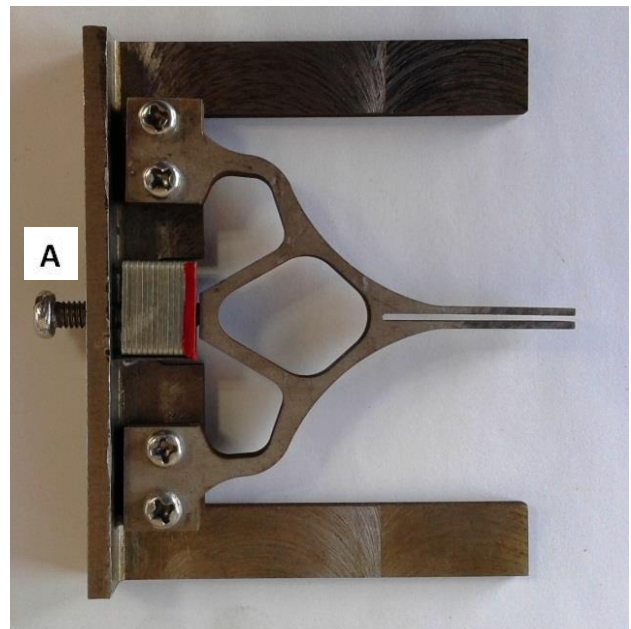
شکل ۸. چگونگی قرارگیری تجهیزات آزمایشگاهی

Fig. 8. Deformation-measuring experimental setup for the microgripper

در ادامه با شبیه‌سازی میکروگریپر شکل ۵ در نرم‌افزار تحلیل انسیس^۱، می‌توان نمودار شکل ۱۲ را برای جابجایی ورودی و جابجایی خروجی فک‌ها با استفاده از روش‌های حل عددی المان محدود، بدست آورد. همانطور که از نمودار مشخص است، انطباق خوبی بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد و مقدار خطا در بیشترین حالت خود برابر با $7/76\%$ خواهد بود.

مقدار درصد اختلاف جابجایی‌های ورودی در برابر جابجایی‌های خروجی در دو حالت تست تجربی و شبیه‌سازی عددی در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به جدول هرچه مقدار جابجایی ورودی افزایش داده شده است مقدار جابجایی خروجی در دو حالت تست تجربی و شبیه‌سازی عددی نیز بیشتر شده و مقدار درصد اختلاف جابجایی خروجی در این دو حالت نیز با افزایش جابجایی ورودی، افزایش یافته است. در مرجع [۲۳] نیز که با روشی غیر از بهینه‌سازی توپولوژی به طراحی میکروگریپر پرداخته است، همان نتیجه بدست آمده از جدول ۲ قابل مشاهده است، که با افزایش جابجایی ورودی مقدار درصد اختلاف جابجایی خروجی در دو حالت تست تجربی و شبیه‌سازی عددی افزایش یافته است.

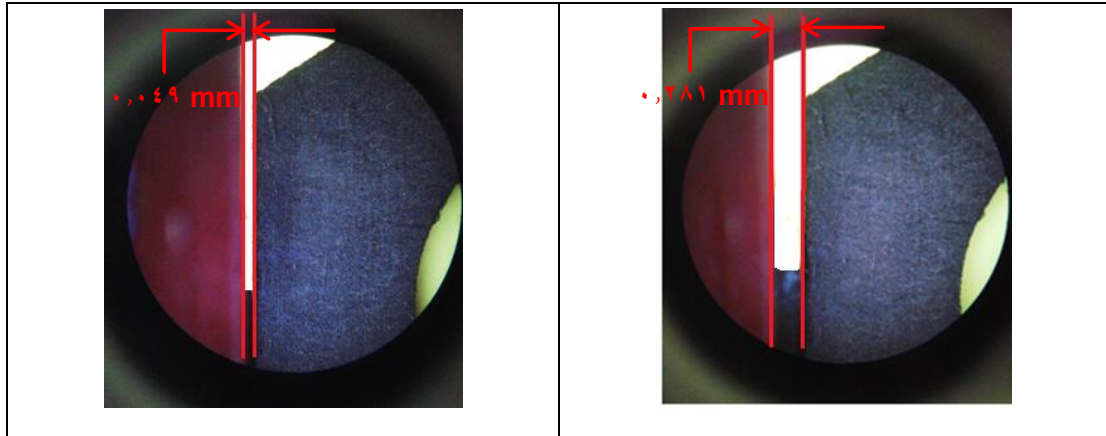
در شکل ۱۳ نمونه‌ای از تحلیل‌های انجام گرفته با نرم‌افزار انسیس برای جابجایی و تنش آورده شده است. در شکل الف-۱۳ مقدار جابجایی نقاط مختلف میکروگریپر با استفاده از طیف رنگی مشخص گردیده است. همان‌طور که در شکل مشخص است بیشترین مقدار



شکل ۹. قرارگیری میکروگریپر بر روی پایه

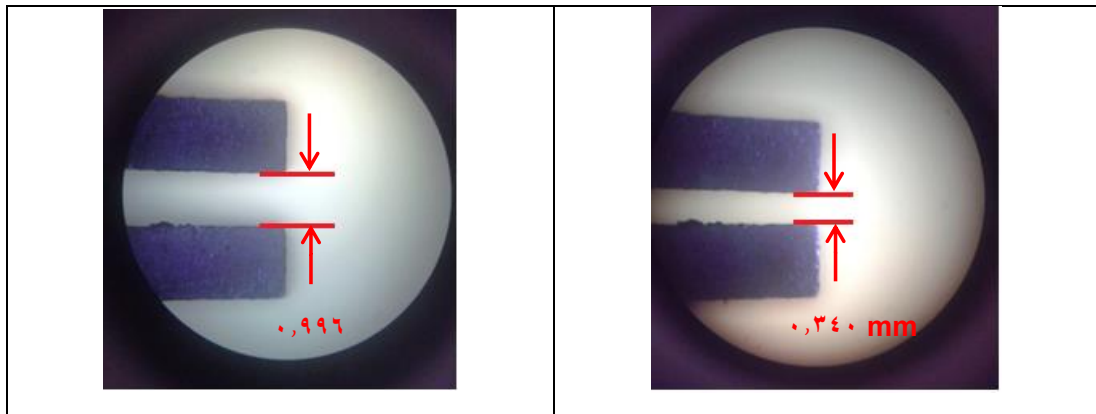
Fig. 9. A view of microgripper on the base and screw A

یک جابجایی ورودی، بدست خواهد آمد. اعمال جابجایی ورودی با استفاده از پیچ A در شکل ۹ صورت می‌گیرد، به گونه‌ای که با پیچاندن پیچ و سفت کردن آن، جابجایی ورودی به سازه میکروگریپر اعمال خواهد شد. سپس مقدار این جابجایی با استفاده از روش‌های پردازش تصویر محاسبه شده و مقدار جابجایی خروجی متناظر میکروگریپر نیز به همین روش بدست خواهد آمد. بدین ترتیب نمودار جابجایی ورودی و جابجایی خروجی به صورت شکل ۱۲ نشان داده خواهد شد.



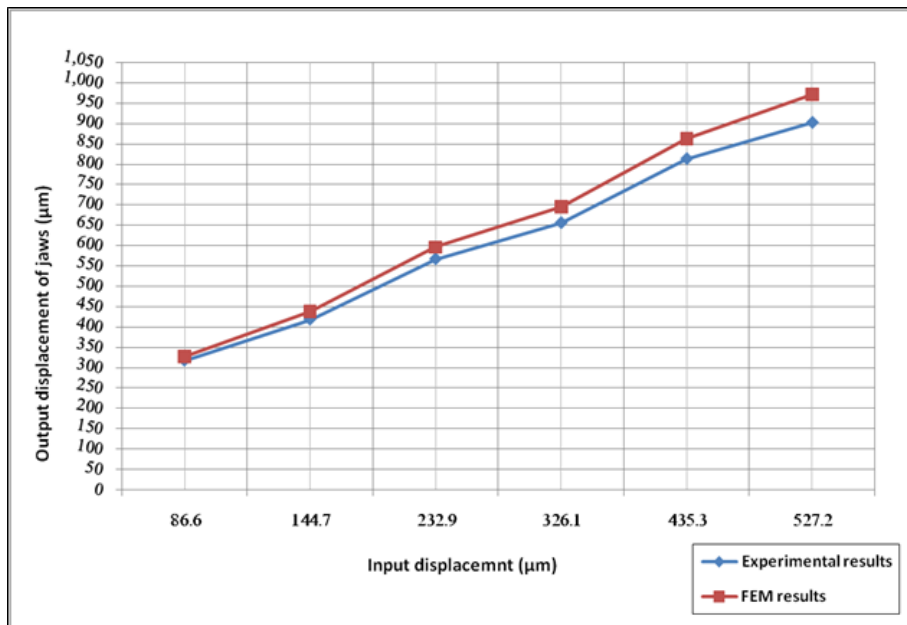
شکل ۱۰. محاسبه مقدار جابجایی اولیه با استفاده از عکس برداری دیجیتال و پردازش تصویر

Fig. 10. Calculating the input displacement value using the microscope digital camera and image processing method



شکل ۱۱. محاسبه مقدار جابجایی فک‌های خروجی با استفاده از عکس برداری دیجیتال و پردازش تصویر

Fig. 11. Calculating the output displacement of jaws using the microscope digital camera and image processing method



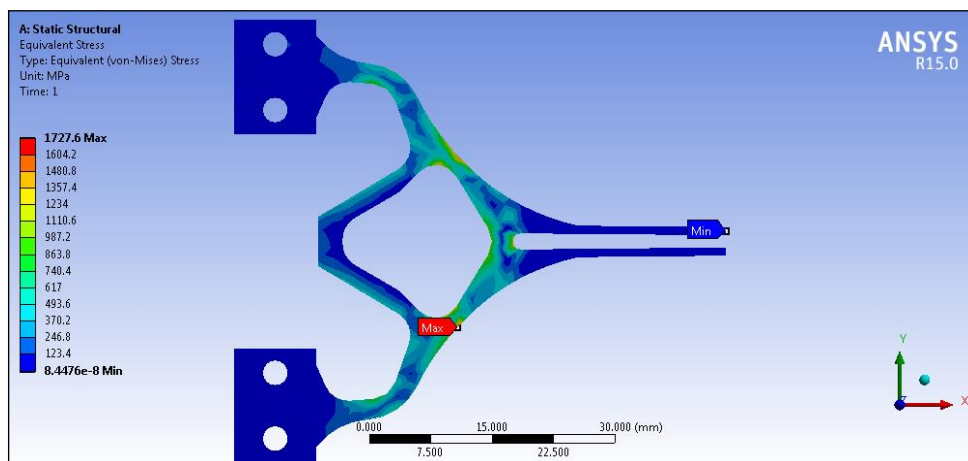
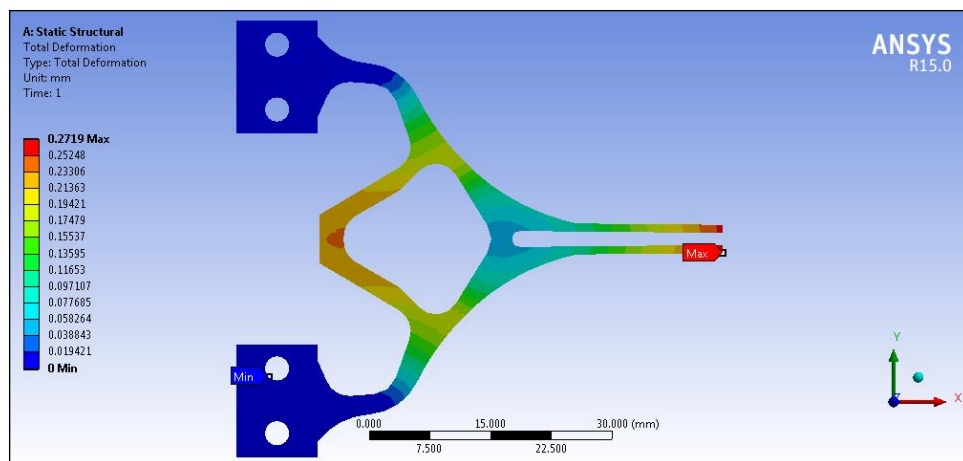
شکل ۱۲. جابجایی ورودی در برابر جابجایی خروجی فک‌های میکروگripper - تست تجربی و شبیه‌سازی عددی

Fig. 12. Variation of the output displacement for the applied input displacement

جدول ۲. درصد اختلاف جابجایی‌های ورودی در برابر جابجایی‌های خروجی - تست تجربی و شبیه‌سازی عددی

Table 2. Percentage difference between input displacement versus output displacement - Experimental testing and numerical simulation

درصد اختلاف	جابجایی خروجی شبیه‌سازی عددی (میکرومتر)	جابجایی خروجی تست تجربی (میکرومتر)	جابجایی ورودی (میکرومتر)
۳/۱۵	۳۲۷/۷۳	۳۱۷/۷۳	۸۶/۶
۴/۷۸	۴۳۸/۷۹	۴۱۸/۷۹	۱۴۴/۷
۵/۳۰	۵۹۷/۰۲	۵۶۷/۰۲	۲۳۲/۹
۶/۱۰	۶۹۵/۸۲	۶۵۵/۸۲	۳۲۶/۱
۶/۱۵	۸۶۳/۳۱	۸۱۳/۳۱	۴۵۳/۳
۷/۷۶	۹۷۲/۲۷	۹۰۲/۲۷	۵۲۷/۲



شکل ۱۳. نمونه‌ای از تحلیل‌های انجام‌گرفته با نرم‌افزار انسیس - الف. تحلیل جابجایی - ب. تحلیل تنش

Fig. 13. Contour plots of the microgripper - (a) Total deformation plot - (b) Von-Mises stress plot

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک طرح مفهومی بهینه از سازه میکروگریپر با مکانیزم یکپارچه با استفاده از روش بهینه‌سازی توپولوژی چندهدفه

جابجایی مربوط به فک‌های میکروگریپر می‌باشد.

در شکل ب- ۱۳ مقدار تنش در نقاط مختلف سازه میکروگریپر مشخص شده است.

- [2] P. Dario, M.C. Carrozza, A. Benvenuto, A. Mencias, Micro-systems in biomedical applications, Journal of Micromechanics and Microengineering, 10(2) (2000) 235.
- [3] A. Alogla, P. Scanlan, W. Shu, R. Reuben, A scalable syringe-actuated microgripper for biological manipulation, Procedia Engineering, 47 (2012) 882-885.
- [4] Y. Zhang, Y. Yu, Z. Zhang, X. Zhang, Structure and Design of Microgrippers: A Survey, in: 2017 2nd International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC), IEEE, 2017, pp. 139-143.
- [5] P. Zhang, W. GUO-ying, Y.-l. HAO, Z.-j. LI, Development of microgripper technology [J], Optics and Precision Engineering, 3 (2000) 292-296.
- [6] L. Saggere, S. Kota, Synthesis of planar, compliant four-bar mechanisms for compliant-segment motion generation, Journal of Mechanical Design, 123(4) (2001) 535-541.
- [7] A.E. Albanesi, V.D. Fachinotti, M.A. Pucheta, A. Cardona, Synthesis of compliant mechanisms for segment-motion generation tasks, Mecánica Computacional, 26 (2007) 2919-1930.
- [8] L.L. Howell, Compliant mechanisms, John Wiley & Sons, 2001.
- [9] M.P. Bendsøe, O. Sigmund, Topology optimization : theory, methods and applications, Springer, Berlin [u.a.], 2003.
- [10] V. Megaro, J. Zehnder, M. Bächer, S. Coros, M.H. Gross, B. Thomaszewski, A computational design tool for compliant mechanisms, ACM Trans. Graph., 36(4) (2017) 82:81-82:12.
- [11] S. Linß, S. Henning, L. Zentner, Modeling and design of flexure hinge-based compliant mechanisms, in: Kinematics, IntechOpen, 2019.
- [12] L. Yin, G. Ananthasuresh, A novel topology design scheme for the multi-physics problems of electro-thermally actuated compliant micromechanisms, Sensors and Actuators A: Physical, 97 (2002) 599-609.
- [13] O. Sardan, D.H. Petersen, K. Mølhave, O. Sigmund, P. Bøggild, Topology optimized electrothermal polysilicon microgrippers, Microelectronic Engineering, 85(5) (2008) 1096-1099.

طراحی گردیده است. اما به دلیل وجود مرزهای پلکانی در سازه طراحی شده، فرآیند ساخت میکروگریپر دشوار خواهد شد. لذا با استفاده از یک روش منطقی مرزهای سازه اصلاح گردید. برای این منظور، روش برازش منحنی برای کمینه نمودن حداقل خطای مربعات پروفیل مرز سازه مورد استفاده قرار گرفت به گونه‌ای که سعی گردید تا توابع هدف سازه بهینه شده میکروگریپر نیز، بهبود داده شود. در غیر این صورت ممکن است سازه بهینه شده میکروگریپر از حالت بهینه خارج گردد. در برخی از مقالات قبلی از جمله [۱۸، ۱۹]، سعی نموده‌اند با اعمال برخی تغییرات مکانیزم میکروگریپر را برای ساخت آماده نمایند اما در خصوص تاثیرات ایجاد شده توسط این تغییرات بحثی به میان نیامده است، چراکه ممکن است این تغییرات باعث دور شدن سازه میکروگریپر از حالت بهینه و یا تغییر شاخص‌های عملکردی آن شود، اما در این مقاله این تاثیرات به خوبی مورد پایش قرار گرفته است. در ادامه، سازه بهینه شده نهایی با استفاده از فولاد ضد زنگ ۳۱۶ و روش وایرکات ساخته شد و تحت آزمون‌های تجربی قرار گرفت. نتایج تجربی بدست آمده مطابقت خوبی با نتایج شبیه‌سازی عددی دارند.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

SE	انرژی کرنشی، J
V	حجم، m^3
K	ماتریس سفتی کلی، N/m
D	بردار جابجایی گره‌ای، m
F_{in}	نیروی ورودی، N
B_i	i امین نقطه کنترلی
$N_{i,k}$	تابع پایه منحنی B-spline
n	تعداد نقاط کنترلی منهای یک
$x(u)$	تابع منحنی B-spline
P_j	معرف نقاط هندسی

منابع

- [1] S. Nah, Z. Zhong, A microgripper using piezoelectric actuation for micro-object manipulation, Sensors and Actuators A: Physical, 133(1) (2007) 218-224.

- [19] R. Bharanidaran, T. Ramesh, A modified post-processing technique to design a compliant based microgripper with a plunger using topological optimization, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1-4) (2017) 103-112.
- [20] R. Ansola, E. Veguería, J. Canales, J.A. Tárrago, A simple evolutionary topology optimization procedure for compliant mechanism design, *Finite Elements in Analysis and Design*, 44(1) (2007) 53-62.
- [21] F.R. David, J.A. Adams, *Mathematical elements for computer graphics*, McGraw-Hill International, (1990).
- [22] P.-S. Tang, K.-H. Chang, Integration of topology and shape optimization for design of structural components, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 22(1) (2001) 65-82.
- [23] K. Shrivastava, S.S. Joshi, Design and development of compliant microgripper-based assembly station, in: *ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2016.
- [14] A.N.Reddy, N.Maheshwari, D.K.Sahu, G. Ananthasuresh, Miniature compliant grippers with vision-based force sensing, *Robotics, IEEE Transactions on*, 26(5) (2010) 867-877.
- [15] R. Horstmann, L.K. Ardi, G.P. Rehder, E.C. Silva, M.N.P. Carreno, Development of ETM microgrippers using Topology Optimization, in: *Microelectronics Technology and Devices (SBMicro)*, 2014 29th Symposium on, IEEE, 2014, pp. 1-5.
- [16] J. Liang, X. Zhang, B. Zhu, Nonlinear topology optimization of parallel-grasping microgripper, *Precision Engineering*, 60 (2019) 152-159.
- [17] B. Zhu, X. Zhang, H. Zhang, J. Liang, H. Zang, H. Li, R. Wang, Design of compliant mechanisms using continuum topology optimization: A review, *Mechanism and Machine Theory*, 143 (2020) 103622.
- [18] R. Bharanidaran, T. Ramesh, Numerical simulation and experimental investigation of a topologically optimized compliant microgripper, *Sensors and Actuators A: Physical*, 205 (2014) 156-163.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Hasanabadi, A. Ghodoosian, A.A. Nikoobin, new optimal structural boundary modification algorithm in the multi-objective topology optimization of microgripper, AmirKabir J. Mech Eng., 53(4) (2021) 2261-2270.

DOI: [10.22060/mej.2020.17318.6576](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17318.6576)

