



Numerical and Experimental Analysis of Locating Error of a Polyhedral Workpiece in the Fixture

Iman Rashidi, Hadi Parvaz * , Mehdi Bahrami, Sattar Hazrati

Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

ABSTRACT: Any change in position of the fixture components can lead to deviations in the workpiece's position and orientation, resulting in a defective product. This study suggests a numerical and experimental approach to calculate the positioning error of the workpiece in the fixture. Initially, the linear and angular components of the workpiece deviation due to disturbances in the locators were calculated using numerical modeling in Abaqus software. An experimental setup was fabricated to validate the numerical results. The experimental tests were conducted to measure the linear and angular components of workpiece deviations. The experiments were performed in two conditions: with and without clamping force, with each experiment repeated three times. Also, the effects of applying clamping force and disturbances to the workpiece and locators were studied on the results. In the first series of tests, the workpiece was positioned in a fully horizontal position and clamping forces of 100, 150, 200, 250, 350, and 500 N were applied. In the second, disturbances were also applied to the locators along with the clamping force. In both procedures, the displacement of a reference point, resulting from deformation and deviation of the workpiece, was measured and compared with the numerical predictions. The analysis of all results revealed that the maximum errors between the numerical and experimental results for the disturbed and non-disturbed conditions were equal to 9.1% and 14.9%, respectively.

Review History:

Received: Oct. 28, 2024

Revised: Jan. 17, 2025

Accepted: Feb. 28, 2025

Available Online: Mar. 12, 2025

Keywords:

Experimental Test

Locating Error

Fixture Error

Wear in Locator

Fixture Design

1- Introduction

Fixtures are essential components in precision machining, ensuring the correct positioning and stability of workpieces during manufacturing processes. Among various sources of fixture errors, the displacement or misalignment of locators plays a crucial role in introducing positioning inaccuracies. The fixture design for machining process is implemented in four stages: setup planning, fixture planning, unit design, and verification [1]. One of the tests conducted during the verification stage is the analysis of workpiece locating errors in the fixture [2]. There are various types of locating errors in the fixture, including changes in locator height, shifts in locator position, deformation of the locator, or even localized wear locator's cross-section. Such wear causes the workpiece to be positioned at a point different from the intended design location, leading to errors in the workpiece's position and orientation [3]. Therefore, it is essential to analyze and quantify these errors to enhance the reliability and efficiency of fixture systems. This study aims to investigate the impact of locator disturbances on workpiece positioning through a combined numerical and experimental approach. First, a finite element model is developed in Abaqus software to simulate the effects

of locator wear and displacement on the linear and angular deviations of the workpiece. To validate the numerical results, an experimental setup is designed and fabricated, allowing the measurement of workpiece displacement under different conditions. Unlike previous studies that primarily focused on linear deviations, this research considers both linear and angular deviations, providing a more comprehensive analysis of fixture-induced errors. The novelty of this research lies in its simultaneous evaluation of clamping force effects and locator disturbances on workpiece stability, which has been rarely explored in previous studies. Furthermore, this study employs a combination of multiple measurement techniques, including dial indicators, a visual measurement machine (VMM), and image processing, to enhance the accuracy of deviation measurements.

2- Methodology

Abaqus software was used to predict the workpiece deviation caused by disturbances in the locators. The simulations were conducted under two conditions: (1) applying only the clamping force without any disturbance to the locator, and (2) first introducing a disturbance to the

*Corresponding author's email: h.parvaz@shahroodut.ac.ir



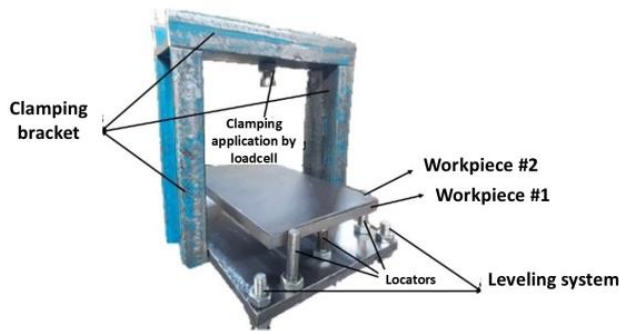


Fig. 1. The fabricated setup for experimental testing

locator, causing the workpiece to deviate, and then applying the clamping force. Two types of workpieces were used in this study for measuring deviations: a rigid workpiece with a thickness of 10 mm and a flexible sheet metal workpiece with a thickness of 2 mm. Since the clamping force was only applied to the flexible sheet metal workpiece, the simulation was conducted for this workpiece.

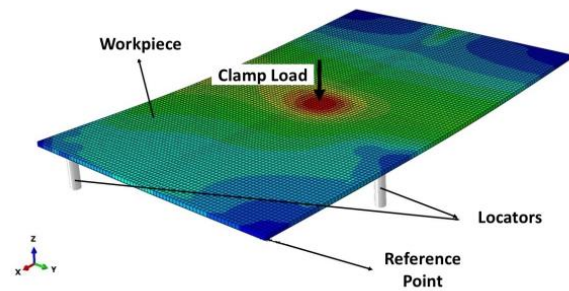
An experimental setup, including a workpiece and a 3-2-1 fixture system, was designed to measure linear and angular displacements in experimental tests. In this study, two types of experimental tests were conducted: one without clamping force and the other with clamping force, to measure the linear and angular deviations of the workpiece. A workpiece with a thickness of 10 mm was used in the first type of experiment. In all experiments conducted in this study, disturbances were applied to the base locator (L_1) as the reference locator in the form of a reduction in height. The linear and angular displacements were then measured using three methods: image processing, data acquisition with dial indicators, and a VMM device. To ensure the accuracy of the experiments performed with the camera and dial indicator methods, each test was repeated three times.

The second type of experiment was conducted by applying a clamping force to a workpiece with a thickness of 2 mm under two conditions: without and with disturbances applied to the locator (L_1). In the undisturbed condition, only the clamping force was applied in multiple stages with values of 100, 150, 200, 250, 350, and 500 N at the center of the workpiece.

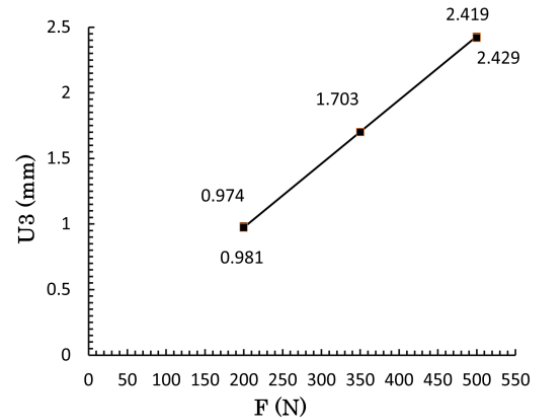
3- Results and Discussion

Figure 2(a) illustrates the deformed shape of the workpiece obtained from the numerical analysis. The reference point of the workpiece experiences deformation in the +Z direction. The displacement of the reference point was calculated using numerical analysis, as shown in the graphs in Figure 2.

A key observation from the data presented in Figure 2(b) is the relatively linear relationship between the applied force and the displacement of the reference point. It results from the fact that the workpiece material remains in elastic region.



(a)



(b)

Fig. 2. (a) The deformed shape of the sheet metal workpiece, and (b) displacement of the reference point under clamping force in the disturbed condition

The linearity of this relationship greatly aids fixture designers in estimating the workpiece deviation caused by locator disturbances, even in the presence of clamping force. A similar linear relationship exists for workpiece deviation due to locator disturbances in the absence of a clamping force [4]. In essence, a fixture designer can perform a simple simulation to determine the deformation for a given disturbance and predict the combined effects of disturbances and clamping forces at different force levels.

To validate the numerical results, the linear deviation of the workpiece was experimentally measured, considering the clamping force under both conditions: without and with disturbances applied to the reference locator. Figure 3 represents a typical result. The maximum error in the displacement of the reference point was found to be 14.9% in the undisturbed condition and 9.1% in the disturbed condition. A crucial takeaway from this comparison is the reliability of simulations in achieving verifiable and experimentally consistent results. This finding is particularly important as it enables fixture designers to obtain these values through simulations in the design phase without need to perform

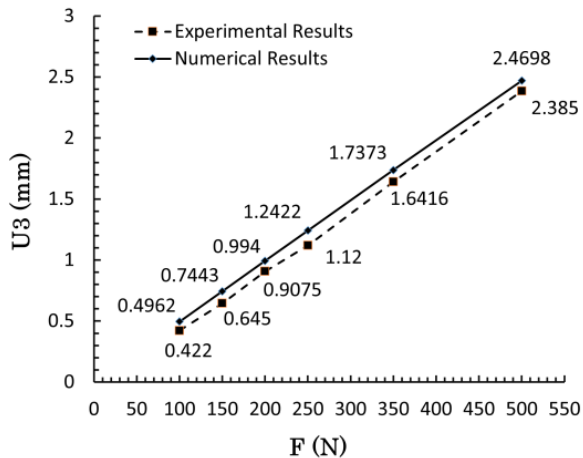


Fig. 3. Comparison between the numerical and experimental results for the displacement of the reference point

experimental tests.

The angular deviation of the workpiece was measured using three methods: imaging with a camera, dial indicators, and a VMM device. The consistency between the data obtained from these methods was examined to ensure the accuracy of the experimental procedures. The average measurement error for angular deviation using dial indicators was 4% for the alpha angle and 7% for the beta angle. Similarly, the error for the camera method was 4% and 3%, respectively.

4- Conclusions

In this study, numerical and experimental analyses were conducted to calculate the linear and angular deviations of a workpiece in a fixture system under clamping force, both with and without disturbances. Comparing the numerical and experimental data, the maximum error in the undisturbed and disturbed conditions was obtained as 14.9% and 9.1%, respectively. One of the key findings of this research was the linear relationship between the disturbance magnitude in the locators and the deviation of the workpiece from its ideal position, regardless of the presence or absence of a clamping force. This relationship provides significant assistance to fixture designers in estimating the effects of potential locator wear on workpiece deviation. Assuming the accuracy of the experimental data obtained from the VMM method, the average error in measurement of the angular deviation using dial indicators and camera-based methods were 7% and 4%, respectively.

References

- [1] I. Boyle, Y. Rong, D.C. Brown., A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(1) (2011) 1-12.
- [2] Y.K. Rong, S. Huang., *Advanced computer-aided fixture design*, Elsevier, 2005.
- [3] H. Wang, Y.K. Rong, H. Li, P. Shaun, *Computer aided fixture design: Recent research and trends*, *Computer-Aided Design*, 42(12) (2010) 1085-1094.
- [4] H. Parvaz, M. Bodaghy Aleny, *Analysis of workpiece locating error using geometric fixture model: A theoretical and experimental study*, *AUT Journal of Mechanical Engineering*, 4(2) (2020) 229-240.



مطالعه عددی و تجربی خطای جاسازی قطعه کار با هندسه چندوجهی در قید و بند

ایمان رشیدی، هادی پرواز*^{id}، مهدی بهرامی و ستار حضرتی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۷
بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲

کلمات کلیدی:

آزمایش تجربی
خطای جاسازی
خطای قید و بند
سایش جاساز
طراحی قید و بند

خلاصه: هرگونه تغییر موقعیت و ارتفاع در جاسازهای قید و بند منجر به انحراف قطعه کار از موقعیت و جهت ایده‌آل می‌شود. در این پژوهش، یک رویکرد عددی و تجربی برای محاسبه خطای جاسازی قطعه کار در قید و بند استفاده شده است. برای اجرای پژوهش، ابتدا مقادیر انحراف خطی و زاویه‌ای قطعه کار با اعمال اغتشاش در جاسازها با استفاده از مدل سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس محاسبه شد. برای صحت‌سنجی نتایج، یک مجموعه آزمایشگاهی شامل یک قید و بند به همراه قطعه کار ساخته شد و آزمایش‌های تجربی برای اندازه‌گیری مقادیر جابجایی‌های خطی و زاویه‌ای قطعه کار اجرا شد. آزمایش‌های تجربی در دو حالت بدون بست و همراه با نیروی بست انجام شد و هر آزمایش سه بار تکرار شد. در رویه اول آزمایش‌های تجربی، قطعه کار در حالت کاملاً افقی قرار داشته و فقط نیروی بست با مقادیر ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۵۰ و ۵۰۰ نیوتن به آن اعمال شد. در رویه دوم، اغتشاش همراه با نیروی بست به قطعه کار اعمال شد. با اعمال اغتشاش در جاسازها در هر دو حالت، مقدار جابجایی نقطه مرجع، که ناشی از تغییر شکل و تغییر موقعیت است، اندازه‌گیری شد و با مقادیر متناظر آن از شبیه‌سازی مقایسه شد. با بررسی تمام نتایج، بیشترین مقدار خطای بین نتایج عددی و تجربی برای حالت‌های با و بدون اغتشاش برابر با $9/1\%$ و $14/9\%$ میلی‌متر به‌دست آمد.

۱- مقدمه

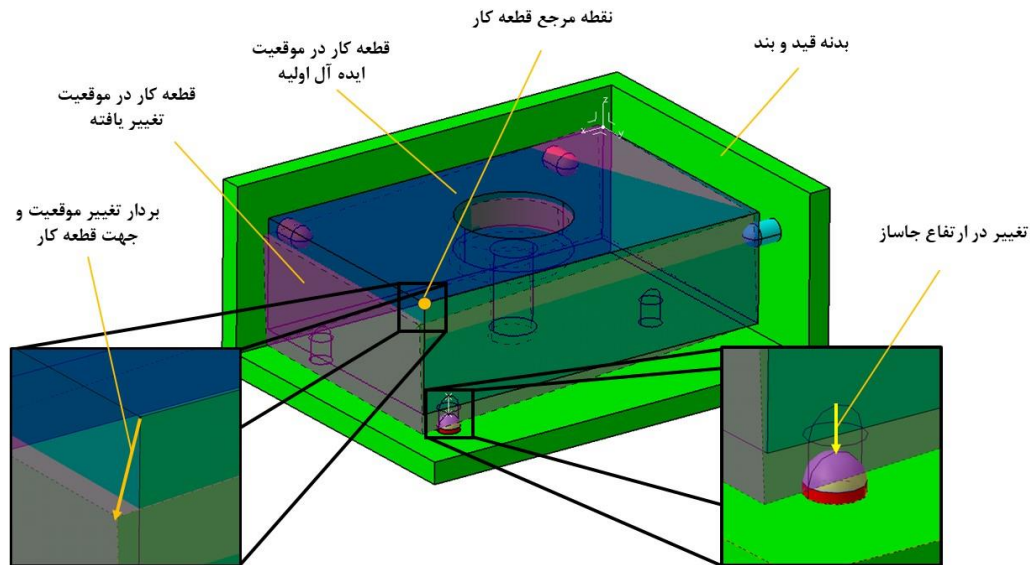
قیدوندها یکی از تجهیزات صنعتی هستند که برای موقعیت‌دهی قطعه کار و حفظ آن در حین ماشین‌کاری استفاده می‌شود. قیدوندها یکی از دقیق‌ترین و پرهزینه‌ترین اجزای یک سیستم ساخت را تشکیل می‌دهند و جزو المان‌های اساسی با نقشی تعیین‌کننده، در کیفیت قطعه نهایی هستند. اجزای تشکیل دهنده قید و بندها شامل صفحه‌ها، جاسازها، تکیه‌گاه‌ها، بست‌ها، بوش‌ها و سایر اجزای مورد نیاز بر حسب عملکرد هستند. وجود خطا در هریک از این قطعات و یا خطا در مونتاژ آن‌ها می‌تواند منجر به قرارگیری قطعه کار در موقعیت و جهت نادرست شده و باعث ایجاد قطعه معیوب می‌شود. طراحی قید و بند برای قطعه کار ماشین‌کاری در چهار مرحله طرح‌ریزی ستاپ، طرح‌ریزی قیدوندها، طراحی واحدها و صحت‌سنجی اجرا می‌شود [۱]. یکی از خروجی‌های اصلی مرحله طرح‌ریزی قید و بندها، چیدمان جاسازی است که برای قطعات چندوجهی از اصل ۱-۲-۳ پیروی می‌کند. این چیدمان جاسازی معمولاً در مرحله صحت‌سنجی تحت آزمایش‌های مختلف قرار

می‌گیرد تا از درستی و کارایی آن اطمینان به عمل آید.

یکی از آزمایش‌هایی که در مرحله صحت‌سنجی بر روی چیدمان جاسازی انجام می‌شود، آنالیز خطای جاسازی قطعه کار در قید و بند است [۲]. منظور از خطای جاسازی، تغییر در موقعیت و جهت قطعه کار در قید و بند نسبت به موقعیت و جهت ایده‌آل است. این تغییر در موقعیت و جهت به عوامل مختلفی بستگی دارد که یکی از اصلی‌ترین آن‌ها، تغییر در موقعیت یا ارتفاع جاسازها است. معمولاً، یکی از اصلی‌ترین مشکلاتی که در صنایع می‌تواند برای قید و بندها اتفاق بیفتد، سایش جاسازها و در نتیجه کاهش ارتفاع آن‌ها است. خطای جاسازی صرفاً در قالب تغییر ارتفاع جاساز نبوده و می‌تواند به‌صورت تغییر در موقعیت جاساز، تغییر شکل جاساز و یا حتی خوردگی موضعی در بخش‌هایی از سطح مقطع جاساز نمایان شود. این سایش منجر به جاسازی قطعه کار در نقطه‌ای غیر از نقطه مدنظر طراح قید و بند شده و باعث ایجاد خطا در موقعیت و جهت قطعه کار می‌شود [۳]. برای بررسی این خطا، معمولاً اغتشاش‌هایی را در قالب جابجایی موقعیت، ارتفاع و یا جهت در یک یا چند جاساز اعمال کرده و تغییر موقعیت و جهت قطعه کار را در یک

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: h.parvaz@shahroodut.ac.ir





شکل ۱. نمایی شماتیک از خطای جاسازی و تغییر موقعیت و جهت قطعه کار

Fig. 1. hematic representation of locating error and deviation of workpiece position and orientation in the fixture

شتابسنج مرسوم در دنیای اندازه‌گیری ماکرو وجود ندارد. اندازه‌گیری مقادیر این مولفه‌ها با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری غیرمستقیم زاویه‌ای یکی از چالش‌های اصلی در پژوهش حاضر به‌شمار می‌رود. برای اندازه‌گیری مقادیر این زوایا در پژوهش حاضر، از سه روش استفاده از دوربین‌های تصویربرداری در سه راستای عمود بر هم، استفاده از ساعت‌های اندازه‌گیری بر روی صفحات قطعه‌کار و استفاده از دستگاه اندازه‌گیری بصری^۱ بهره گرفته شده است. در واقع، در دو روش اخیر، اندازه‌برداری از نقاط مختلف بر روی سه سطح عمود بر هم قطعه‌کار به‌گونه‌ای انجام می‌گیرد که بتوان با داده‌های بدست آمده، سطوح را در نرم‌افزارهای مرسوم طراحی به‌کمک رایانه رسم کرده و زوایا را اندازه‌گیری کرد.

برای محاسبه تحلیلی مقادیر تغییر موقعیت و جهت قطعه‌کار ناشی از اعمال اغتشاش در جاسازها، معمولاً از مدل هندسی قید و بند استفاده می‌شود [۴]. چند فرضیه برای استخراج این مدل استفاده می‌شود. در فرض اول، قطعه‌کار صلب در نظر گرفته می‌شود که معنی آن این‌گونه است که وجود یا عدم وجود بست تأثیری بر روی اندازه بردار تغییر موقعیت و جهت قطعه‌کار ندارد [۵، ۶]. مقادیر تغییر شکل‌ها کم و در محدوده الاستیک بوده و عناصر و سطوح جاسازها صلب فرض می‌شود. شش تماس بین قطعه‌کار و جاسازها بر

یا چند نقطه کلیدی محاسبه می‌کنند. این نقاط کلیدی می‌تواند نقاط موجود بر روی مسیر ماشین‌کاری، نقاط بر روی سطوح دارای تolerانس ابعادی و یا هندسی و یا هر نقطه دیگری بر روی قطعه‌کار باشد. شکل ۱ نمایی شماتیک از این تغییر در موقعیت و جهت قطعه‌کار ناشی از کاهش ارتفاع در یکی از جاسازها را نشان می‌دهد. در این شکل، یک قطعه با هندسه چندوجهی بر روی شش جاساز قرار گرفته است و با اعمال اغتشاش در یکی از جاسازها، دچار تغییر موقعیت و جهت می‌شود. بردارهای اغتشاش در جاسازها و بردار تغییر موقعیت و جهت قطعه‌کار در این شکل قابل مشاهده است.

برای محاسبه مقادیر تغییرات موقعیت و جهت، که مجموعاً مشتمل بر شش مؤلفه است، می‌توان از روش‌های تحلیلی، شبیه‌سازی و آزمایش تجربی استفاده کرد. محاسبه سه مؤلفه جابجایی خطی قطعه‌کار ناشی از اعمال اغتشاش در جاسازها معمولاً آسان بوده و با استفاده از ساعت‌های اندیکاتور قابل انجام است. برای این منظور، کفیسست سه ساعت اندازه‌گیری در راستای عمود بر هم در نقطه مرجع روی قطعه‌کار (شکل ۱) قرار گرفته و مقادیر مولفه‌های خطی بردار در راستاهای X ، Y و Z اندازه‌گیری شود. مقادیر مولفه‌های زاویه‌ای بردار تغییر موقعیت و جهت قطعه‌کار نیز در سه راستای مزبور تعریف می‌شود. اندازه بسیار کم این مولفه‌ها، اندازه‌گیری آن‌ها را دشوار می‌کند؛ به‌گونه‌ای که امکان اندازه‌گیری آن‌ها با استفاده از سنسورهای

1 Visual Measurement Machine (VMM)

اساس اصل جاسازی ۱-۲-۳ تعریف شده و تماس بین قطعه کار و هر جاساز در یک نقطه برقرار می‌شود. باید توجه نمود که برخی از این فرضیات در حوزه عملکرد قید و بندها منطقی به نظر نمی‌رسد. در دنیای واقعی، قطعه کار غیرصلب در قید و بند توسط جاسازها موقعیت‌دهی شده و موقعیت آن توسط بست‌ها حفظ می‌شود. نیروی بست باعث ایجاد تغییر شکل در قطعات (به خصوص قطعات انعطاف‌پذیر ورقی) می‌شود. تاثیر همزمان این تغییر شکل همراه با وجود اغتشاش در یک یا چند جاساز می‌تواند منجر به عدم رعایت الزام‌های تolerانسی قطعه کار در حین ماشین‌کاری شود. از این رو، در پژوهش حاضر، یک سری از آزمایش‌های تجربی باید با حضور نیروی بست همراه با اعمال اغتشاش در جاسازها اجرا شود. برای این منظور، باید از قطعه‌کاری با ضخامت کم استفاده شود تا مقادیر تغییر شکل به اندازه‌ای بزرگ شوند که قابل اندازه‌گیری با تجهیزات مزبور باشند.

پژوهش‌های زیادی در زمینه تعیین موقعیت بهینه جاسازها [۷]، مطالعه پایداری قطعه کار در قیدوبند و استفاده از مکانیزم‌های ابتکاری برای موقعیت‌دهی و بست این نوع قطعات [۸] منتشر شده است. در مطالعه پیشینه پژوهش‌ها در زمینه خطای جاسازی قطعه کار، ویشنوپریان و همکاران [۹]، یک روش بهینه‌سازی با در نظر گرفتن خطای هندسی جاسازها برای به حداقل رساندن خطای ماشین‌کاری در سیستم جاسازی ۱-۲-۳ ارائه کردند. برای راستی‌آزمایی مقادیر تحلیلی استخراج شده از مدل تحلیلی ارائه‌شده در رابطه (۱)، باید آزمایش‌های تجربی اجرا شود. در طراحی قید و بند برای قطعات انعطاف‌پذیر (همچون قطعات ورقی)، طراح از تعداد جاساز بیشتری برای کاهش تغییر شکل قطعه کار بهره می‌گیرد. بهینه‌سازی موقعیت اعمال این جاسازها با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مورد توجه پژوهشگران در این زمینه بوده است [۱۰، ۱۱]. وانگ [۱۲]، مدل هندسی قید و بند را برای بررسی اثرات خطاها در موقعیت جاساز، تolerانس هندسی سطوح مبدا و تolerانس هندسی جاساز، بر روی دو پارامتر خطای موجود در نقطه خاصی از قطعه کار و تolerانس هندسی در جهت خاص ماشین‌کاری توسعه داد. در مرجع [۱۳]، یک مدل خطی بین خطاها در نقاط جاسازی و حالت قطعه کار ایجاد شد. در محاسبه خطاها در نقاط جاسازی، دو فرمول برای بیان این خطاها در تماس سطح به سطح و پیکربندی تماس پین-حفره ایجاد شد. پیش‌بینی‌های نظری با نتایج شبیه‌سازی از طریق دو مطالعه موردی مقایسه شد. خدایگان [۱۴]، یک مدل بهینه‌سازی برای کاهش خطای جاسازی قطعه کار با تنظیم جاسازها در نقاط تماس پیشنهاد کرد. نسبت قابلیت هندسی^۱ برای تعیین

کمی توانایی فرآیند تولید در تولید مشخصات مهم قطعه کار در چهارچوب الزامات طراحی معرفی شد. تحلیل عدم قطعیت نیز بر اساس سه رویکرد مستقیم، بدترین حالت و روش‌های آماری انجام شد. از آنجا که موقعیت جاسازها تاثیر زیادی بر روی مقدار انحراف موقعیت و جهت قطعه کار در قید و بند دارد، پژوهش‌هایی در زمینه بهینه‌سازی موقعیت جاسازها با هدف کمینه‌سازی تأثیر وجود خطا در جاسازها بر روی اندازه بردار تغییر موقعیت و جهت قطعه کار انجام شده است. بات و همکاران [۱۵] مدلی بر پایه الگوریتم ژنتیک برای محاسبه خطای جاسازی قطعه کار با در نظر گرفتن نیروها و گشتاور ماشین‌کاری پیشنهاد دادند. موقعیت جاسازها به گونه‌ای بهینه شد که خطای ناشی از انحراف موقعیت و جهت قطعه کار با وجود تغییر در نقطه اعمال نیرو و گشتاور ماشین‌کاری کمینه شود. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی مؤید پیش‌بینی روش بهینه‌سازی بود. پنگ و همکاران [۱۶] روشی برای پیش‌بینی تحلیلی مقدار تغییر موقعیت و جهت یک قطعه کار انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن توپوگرافی سطح تماس بین جاساز و قطعه کار و خطای پروفیل سطح ناشی از آن ارائه کردند. آن‌ها رابطه‌ای تحلیلی برای محاسبه توپوگرافی سطح تماس و سفتی تماس توسعه دادند تا با استفاده از آن بتوانند مقدار انحراف قطعه کار از حالت ایده‌آل را تعیین کنند. اخیراً، هونگ و همکاران [۱۷] روشی را بر مبنای بهینه‌سازی برای کمینه‌کردن لقی در مونتاژ قطعات انعطاف‌پذیر با اندازه بزرگ در صنعت کشتی‌سازی ارائه کردند. آن‌ها از روش بهینه‌سازی غیرخطی چندهدفه همراه با الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی موقعیت جاسازها به گونه‌ای استفاده کردند که منجر به کمینه‌کردن لقی در فرآیند مونتاژ شود. نمونه‌ای از یک مطالعه موردی، که شامل مونتاژ قطعات انعطاف‌پذیر ورقی بود، برای اثبات قابلیت‌های مدل تحلیلی ارائه‌شده استفاده شد. نمونه‌هایی دیگر از پژوهش‌های اجرا شده با هدف مطالعه تاثیر موقعیت جاسازها بر روی انحراف موقعیت و جهت قطعه کار و بهینه‌سازی چیدمان جاسازها با هدف کمینه‌سازی اندازه این بردار در مرجع [۱۸] ارائه شده است. با توجه به پیشینه پژوهش‌های بررسی شده، اکثر پژوهش‌هایی که در زمینه مطالعه خطای جاسازی قطعه کار انجام شده است، دارای رویکرد تحلیلی بوده است. در پیشینه پژوهش‌های بررسی شده، پروز و بوداکی [۱۹]، مولفه‌های خطی مقدار انحراف قطعه کار محاسبه کردند. آن‌ها از مدل هندسی قیدوبند برای بررسی تاثیر طرح جاسازی قطعه کار بر روی مولفه‌های خطی خطای موقعیت‌دهی قطعات صلب با هندسه چندوجهی و شکل-آزاد استفاده کردند و همچنین آزمایش‌های تجربی برای صحت‌سنجی نتایج تحلیلی انجام دادند. باید در نظر داشت که بردار انحراف قطعه کار دارای

1 Geometrical Capability Ratio (GCR)

است. دلیل استفاده از این دو قطعه کار در این پژوهش، بررسی تاثیر نیروی بست بر تغییر شکل قطعه کار است. قطعه کار در قید و بند نیاز به استفاده از بست دارد تا در موقعیت مشخص شده توسط جاسازها به صورت پایدار قرار گیرد. بروز خطا در جاسازها نیز در اثر استفاده مداوم پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر است. ترکیب ضرورت وجود بست برای قطعه کار در قید و بند و وجود خطا در جاسازها منجر به وقوع همزمان تغییر شکل (ناشی از اعمال نیروی بست به قطعه کار) و جابجایی (ناشی از خطا در جاسازها) می‌شود. برای مطالعه اثر این ترکیب در پژوهش حاضر از قطعه دوم (قطعه ورقی انعطاف‌پذیر) استفاده شده است. به عبارت دیگر، در قطعه کار دوم، ضخامت قطعه کار اول به اندازه‌ای کاهش پیدا کرده است که بتوان تغییر شکل آن را در نقطه مرجع با اعمال یک نیروی بست معقول با استفاده از ساعت‌های اندازه‌گیری بدست آورد. از آنجا که نیروی بست صرفاً بر روی قطعه کار ورقی اعمال شده است، شبیه‌سازی بر روی این قطعه کار انجام شده است. شکل ۲ نشان‌دهنده مدل استفاده شده برای اجرای آنالیز المان محدود در فرایند مذکور است. این مدل از یک قطعه کار چندوجهی و شش جاساز L_1 تا L_6 تشکیل شده است.

برای اجرای آنالیز عددی، قطعه کار بصورت تغییرشکل‌پذیر با ابعاد $220 \times 220 \times 140$ میلی‌متر طراحی شد. سطوح $P1$ ، $P2$ و $P3$ به عنوان سطوح جاسازی پایه، کناری و توقف در نظر گرفته شد. نقطه مرجع در گوشه قطعه کار انتخاب شد و دستگاه مختصات جهانی در نقطه مرجع قرار گرفت. جاسازهای سر تخت با قطر و طول (به ترتیب) ۵ میلی‌متر و ۲۰ میلی‌متر تعریف و به عنوان جسم صلب در نرم‌افزار ایجاد شدند.

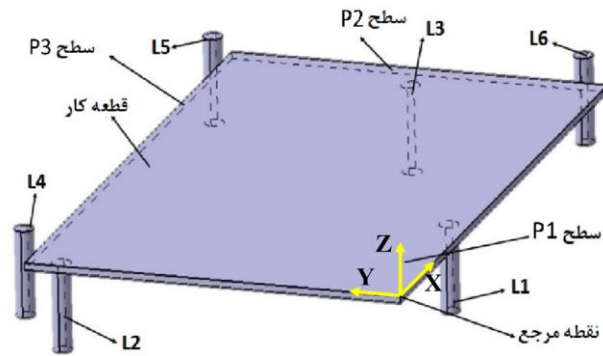
کلیه قطعات در نرم‌افزار بصورت قطعات سه‌بعدی از جنس فولاد کم‌کربن در نظر گرفته شدند. خواص الاستیک قطعه کار با تعریف مدول یانگ برابر با 210×10^3 مگاپاسکال و ضریب پواسون برابر با 0.3 انجام شد. برای جنس یک مقطع تعریف شد و خواص مذکور به صورت مجزا توسط این مقطع به اجزای شبیه‌سازی اختصاص داده شد. جاسازهای L_1 ، L_2 و L_3 با استفاده از اصل ۱-۳-۲ به ترتیب در موقعیت‌های $(0, 0, 10)$ ، $(0, 10, 0)$ و $(0, 0, 210)$ مونتاز شدند و قطعه کار بر روی جاسازها مونتاز شد. برای شبیه‌سازی فرایند مذکور حلگر استاندارد آباکوس مورد استفاده قرار گرفت. از جاسازهای L_4 تا L_6 در این شبیه‌سازی به دلیل عدم تاثیر آن‌ها در روند حل صرف نظر شد. تماس سطح به سطح اصطکاکی بین سطوح قطعه کار و جاساز تعریف شد و همچنین برای اطمینان از این که قطعه کار و جاساز در حین آنالیز داخل یکدیگر نفوذ نداشته باشند، شرط تماس این دو سطح از

شش مولفه است که قبل از این پژوهش تنها سه مؤلفه اول اندازه‌گیری شده است. یکی از جنبه‌های نوآوری این پژوهش محاسبه و اندازه‌گیری تجربی مؤلفه‌های زاویه‌ای انحراف قطعه کار با استفاده از چند روش است. همچنین، برای نگه‌داشتن قطعه کار در داخل قید و بند در حین عملیات ماشین‌کاری در صنعت از نیروی بست استفاده می‌شود. این نیرو می‌تواند باعث ایجاد تغییر شکل بصورت همزمان با تغییر موقعیت قطعه کار در قیدوبند ناشی از تغییر موقعیت و جهت جاسازها شود. در این پژوهش، آزمایش‌هایی همراه با اعمال نیروی بست به قطعه کار انجام شده است که جابجایی نقطه مرجع بر اثر اغتشاش و نیروی بست در آن اندازه‌گیری شده است. برای این منظور یک مدل عددی و یک مجموعه آزمایشگاهی با دو قطعه کار ساخته می‌شود و بر اساس چند روش اندازه‌گیری تجربی، انحراف موقعیت قطعه کار محاسبه می‌شود. این آزمایش‌ها به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند که عبارتند از آزمایش‌های تجربی بدون اعمال نیروی بست و آزمایش‌های تجربی همراه با نیروی بست. همچنین شبیه‌سازی و آزمایش تجربی در هر دو حالت بدون اغتشاش در جاساز و همراه با اغتشاش در جاساز انجام می‌شود.

بر این اساس در ادامه مقاله در بخش ۲، به مدل‌سازی آنالیز عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود پرداخته می‌شود. در بخش ۳، به نحوه ساخت مجموعه آزمایشگاهی و اجرای آزمایش‌های مربوطه پرداخته خواهد شد. مقایسه نتایج آنالیز عددی و نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی شالوده بخش ۴ خواهد بود. نهایتاً، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای شاکله اصلی بخش ۵ را تشکیل خواهد داد.

۲- آنالیز عددی

در پژوهش حاضر از نرم‌افزار آباکوس برای پیش‌بینی مقدار انحراف قطعه کار ناشی از اعمال اغتشاش در جاسازها، استفاده شده است. هدف محاسبه جابجایی نقطه مرجع می‌باشد. استفاده از شبیه‌سازی برای محاسبه تاثیر همزمان تغییر شکل و تغییر موقعیت قطعه کار ناشی از اعمال همزمان اغتشاش در جاسازها و نیروی بست به قطعه کار است. شبیه‌سازی با اعمال نیروهای مختلف در دو حالت بدون اعمال اغتشاش به جاساز و همراه با اعمال اغتشاش به جاساز انجام شد. در حالت اول فقط نیروی بست به آن اعمال می‌شود و در نوع دوم ابتدا اغتشاش در جاساز ایجاد شده و قطعه کار دچار انحراف شده و سپس نیروی بست به آن اعمال می‌شود. لازم بذکر است که در این پژوهش از دو قطعه کار صلب (با ضخامت ۱۰ میلی‌متر) و ورقی (با ضخامت ۲ میلی‌متر) برای اندازه‌گیری مقدار انحراف قطعه کار استفاده شده



شکل ۲. نمایی از مدل قطعه کار و سیستم جاسازی طراحی شده در نرم افزار

Fig. 2. Model of the workpiece and fixture in the simulation software

جدول ۱. سطوح نیروی بست اعمالی به قطعه کار بر اساس نوع شبیه سازی

Table 1. The clamping force levels in the numerical analysis

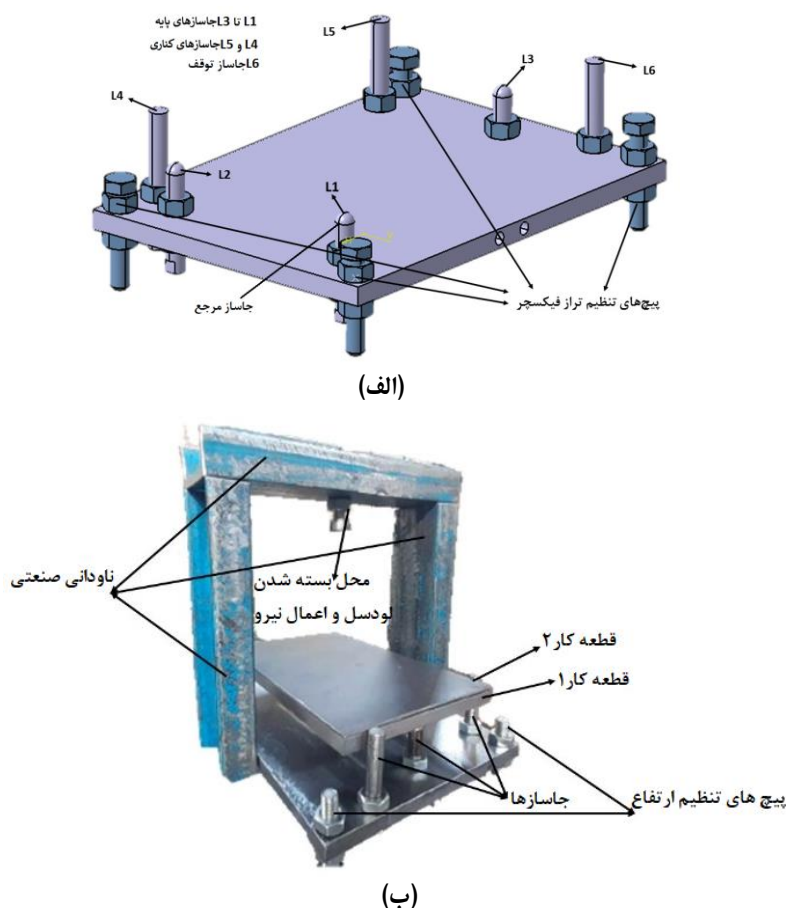
با اعمال اغتشاش در جاساز		بدون اعمال اغتشاش در جاساز	
نیرو (نیوتن)	اغتشاش (میلی متر)	نیرو (نیوتن)	شماره آزمایش
۲۰۰	۰/۲۴	۱۰۰	۱
۲۰۰	۰/۳۸۵	۱۵۰	۲
۳۵۰	۰/۶	۲۰۰	۳
۵۰۰	۰/۸	۲۵۰	۴
۵۰۰	۱	۳۵۰	۵
-	-	۵۰۰	۶

شبیه سازی قطعه کار ثابت بوده و فقط نیروی بست به قطعه کار وارد می شود که این نیروها از ۱۰۰ نیوتن شروع شده و تا ۵۰۰ نیوتن ادامه دارد. در حالت با اغتشاش، ابتدا جابجایی بر روی جاساز مطابق مقادیر ارائه شده در جدول ۱ اعمال شده و سپس نیروی بست متناظر با مقدار اغتشاش به قطعه کار وارد می شود. نویسندگان مقاله واقف به این موضوع هستند که مقادیر این اغتشاش ها در برخی از قید و بند کمتر از مقادیر استفاده شده در این پژوهش است. در واقعیت برای کاهش تاثیر سایش جاساز بر موقعیت دهی قطعه کار و تولید انبوه قطعات با کیفیت یکسان و تolerانس های مشابه و کاهش هزینه تولید، از فولادهای ابزار سخت کاری شده، که با کیفیت و دقت بالا ساخته شده اند و سایش بسیار اندکی دارند، برای ساخت جاسازها استفاده می شود.

نوع تماس سخت^۱ انتخاب شد. ضریب اصطکاک بین سطوح تماس جاساز و قطعه کار برابر با ۰/۲ انتخاب شد. شرایط مرزی نیز به صورت گرفتن تمام درجات آزادی از جاسازها تعریف شد. نهایتاً، نیروهای وارد به مرکز قطعه کار در ۵ سطح از ۱۰۰ تا ۵۰۰ نیوتن بسته به نوع شبیه سازی مطابق جدول ۱ تعریف شد.

ابتدا برای اطمینان از صحت نتایج شبیه سازی، هیچ گونه اغتشاشی در قطعه کار اعمال نمی شود. در این حالت، قطعه کار بر روی جاسازها در حالت افقی قرار داشته و صرفاً نیروی بست با سطوح نشان داده شده در ستون دوم جدول ۱ به آن اعمال می شود. به عبارت دیگر در این مرحله، در زمان اجرای

1 Hard Contact



شکل ۳. (الف) نمایی از مدل قید و بند طراحی شده در نرم‌افزار و (ب) قید و بند ساخته شده برای اجرای آزمایش‌ها

Fig. 3. (a) Fixture model in the simulation software, and (b) fabricated fixture for the experiments

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی مقایسه می‌شود که در بخش ۴ به آن پرداخته خواهد شد.

۳- آزمایش تجربی

یک مجموعه آزمایشگاهی که شامل قطعه کار و سیستم جاسازی ۱-۲-۳ بود، برای اندازه‌گیری جابجایی خطی و زاویه‌ای در آزمایش‌های تجربی طراحی شد (شکل ۳). این مجموعه قابلیت جاسازی هر دو قطعه کار صلب و ورقی را دارا بود. این مجموعه شامل قطعه کار، صفحه بدنه قید و بند، پیچ‌های تنظیم ارتفاع و جاسازهای L_1 تا L_3 به عنوان جاسازهای پایه، L_4 و L_5 به عنوان جاسازهای کناری و L_6 به عنوان جاساز توقف می‌باشد. برای ساخت مجموعه آزمایشگاهی، پس از طراحی مدل سه بعدی، نقشه‌های اجرایی از هر یک از قطعات آماده گردید و فرآیند ساخت شروع شد. برای صرفه‌جویی در زمان و هزینه، تنها از یک صفحه برای نصب تمام جاسازهای

مقادیر قید شده با هدف بررسی تاثیر سایش جاساز بر موقعیت دهی قطعه کار با در نظر گرفتن امکانات موجود اندازه‌گیری در نظر گرفته شده است. مقادیر اغتشاش در جاسازها به حدی اعمال شده است که بتوان مقادیر تغییر شکل و تغییر موقعیت و جهت قطعه کار ناشی از آن با تجهیزات موجود و در دسترس قابل اندازه‌گیری باشد. البته، قابل ذکر است که با توجه به ماهیت هندسی، مقیاس پذیر و خطی بودن مساله، می‌توان نتایج ارائه شده در پژوهش حاضر را با در نظر گرفتن ضریب مقیاس در مقادیر کمتر اغتشاش نیز استفاده نمود. خطی بودن مساله نیز در بخش نتایج اثبات شده است. بر اثر اعمال این نیروها به قطعه کار، نقطه مرجع قطعه کار شروع به حرکت یا جابجایی می‌کند که مقادیر آن از شبیه‌سازی به دست می‌آید. این سطوح نیرویی برای امکان مقایسه بهتر بین آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. مش بندی مدل از نوع S4R است که یک المان استاندارد چهار گره از نوع صفحه‌ای است. قطعه کار با اندازه مش ۲ میلی‌متر مش بندی شد.

پایه، کناری و توقف استفاده شد. برای تراز کردن بدنه قید و بند از چهار پیچ دو مهره‌ای، در چهارگوش صفحه پایه استفاده شد. همچنین، در سطح استوانه‌ای جاسازها رزوه ایجاد شد که به وسیله آن‌ها بتوان، قطعه کار را بر روی مجموعه آزمایشگاهی در حالت افقی تراز کرد.

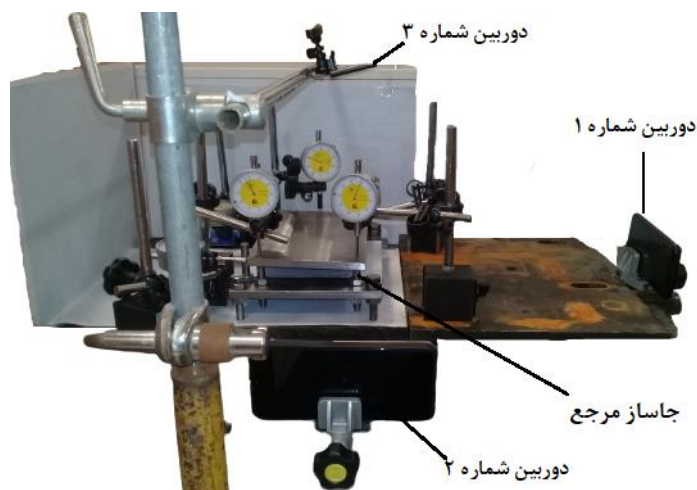
صفحه قید و بند از ورق خام با ابعاد بزرگ‌تر بریده شد و سپس توسط دستگاه فرز به ابعاد نهایی $180 \times 250 \times 10$ میلی‌متر رسانده شد. سوراخ‌هایی با دقت بالا با قطر و موقعیت مناسب برای مونتاژ پیچ‌های تنظیم ارتفاع و جاسازها بر روی سطح آن ایجاد شد. جاسازهای پایه توسط عملیات تراشکاری و فرزکاری با قطر 10 میلی‌متر و طول 55 میلی‌متر به صورت سرگرد و جاسازهای کناری و توقف با قطر 10 میلی‌متر و طول 70 میلی‌متر به صورت سرتخت ماشین‌کاری شدند. بر روی سطح کلیه جاسازها به منظور تراز کردن قطعه کار به اندازه نصف طول آن قطعه کارها، رزوه $10M$ ایجاد شد. برای آزمایش اول، در حالت بدون اعمال نیروی بست، یک قطعه کار با ابعاد نهایی $10 \times 220 \times 140$ میلی قطعه کار متر توسط عملیات فرزکاری ماشین قطعه کار کاری شد و برای آزمایش دوم در حالت اعمال نیروی بست، یک قطعه انعطاف قطعه کار پذیر با ابعاد 140×220 میلی قطعه کار متر و ضخامت 2 میلی‌متر ماشین‌کاری شد. برای اعمال نیروی بست، از ناودانی صنعتی با سایز 50 میلی‌متر با طول‌های 203 میلی‌متر به تعداد دو عدد و 228 میلی‌متر به تعداد یک عدد بریده شد. یک سازه با عملیات جوش کاری برای اعمال نیرو ساخته شد و با عملیات فرزکاری سطوح مورد نیاز، ماشین‌کاری و سوراخ‌های مناسب برای مونتاژ لودسل بر روی سازه ایجاد شد. شکل ۳ نشان‌دهنده مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده است.

در این پژوهش از دو نوع آزمایش تجربی، بدون اعمال نیروی بست و با اعمال نیروی بست برای اندازه‌گیری انحراف خطی و زاویه‌ای قطعه کار استفاده شد. در آزمایش تجربی نوع اول (بدون اعمال نیروی بست)، از قطعه کار با ضخامت 10 میلی‌متر استفاده شد. در تمام آزمایش‌هایی که در پژوهش حاضر انجام شد، اغتشاش به جاساز پایه (L_1) به عنوان جاساز مرجع و در قالب کاهش ارتفاع به قطعه کار اعمال شد. این جاساز در سری اول آزمایش‌ها در موقعیت (۰ و 10 و 10) قرار داشت. برای آزمایش‌های سری دوم که بر روی قطعه کار ورقی انجام گرفت، با توجه به تعدد ساعت‌های اندازه‌گیری نصب‌شده در اطراف نقطه مرجع، امکان دسترسی به جاساز L_1 در مختصات عنوان‌شده وجود نداشت. لذا، این جاساز به نقطه (۰ و 10 و 80) منتقل شد تا امکان اغتشاش‌ها به سهولت برای آزمایشگر فراهم شود. مبدا مختصات در شکل ۲ قابل مشاهده است. سپس، مقدار جابجایی

خطی و زاویه‌ای با استفاده از سه روش پردازش تصویر، داده‌برداری با ساعت اندازه‌گیری و دستگاه VMM^1 اندازه‌گیری شد. اغتشاش در جاساز مرجع (L_1) در 11 سطح ($0/2$ ، $0/4$ ، $0/6$ ، $0/8$ ، 1 ، $1/5$ ، 2 ، $2/5$ ، 3 ، 4 و 5 میلی‌متر) به قطعه کار اعمال شد و مقادیر شش مولفه انحراف قطعه کار (سه مولفه خطی و سه مولفه زاویه‌ای) در هر حالت اندازه‌گیری شد. برای اطمینان از صحت آزمایش‌های انجام شده با روش دوربین و روش ساعت اندازه‌گیری، آزمایش‌ها در هر اغتشاش، به تعداد سه مرتبه تکرار شدند. مجموع تعداد آزمایش‌ها در حالت بدون اعمال نیروی بست برابر با 77 آزمایش بود. در روش اول اندازه‌گیری انحراف زاویه‌ای قطعه کار، از تصویربرداری با سه دوربین در راستای طول، عرض و ارتفاع قطعه کار استفاده شد. بدین صورت که ابتدا اغتشاش $0/2$ میلی‌متر به جاساز مرجع وارد شد و سپس تصاویری توسط سه دوربین گرفته شد. برای آزمایش‌های بعدی، قطعه کار و جاساز دوباره به حالت تراز برگردانده شد و اجرای آزمایش‌ها مشابه با همین رویکرد تا رسیدن به اغتشاش برابر با 5 میلی‌متر پی گرفته شد. با اعمال هر اغتشاش به جاساز، تصاویر با استفاده از دوربین‌ها برداشت شده و به کمک نرم‌افزار Image J، زوایای ایجاد شده بر اثر اغتشاش‌های وارد به قطعه کار اندازه‌گیری شد. استفاده از دوربین و پردازش تصویر در ابتدای آزمایش‌های تجربی انجام شد و نتایج آن نشان داد که قطعه کار در راستای Z دچار انحراف زاویه‌ای نمی‌شود. مقایسه نتایج بدست‌آمده از این روش با سایر روش‌های اندازه‌گیری زاویه نشان داد که این روش نیز می‌تواند دقت مناسبی را در اندازه‌گیری زاویه در مقادیر کم ارائه کند. برای اعمال دقیق مقدار اغتشاش در جاساز L_1 از ساعت اندازه‌گیری استفاده شد (شکل ۴).

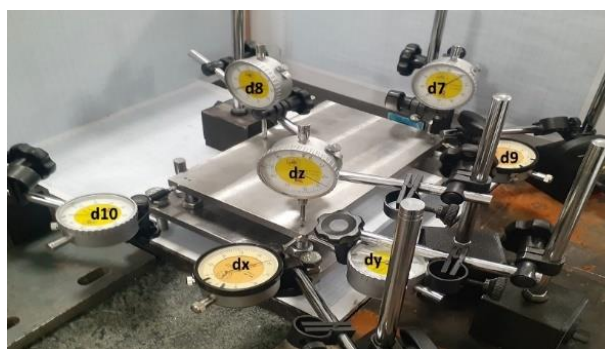
در روش دوم، انحراف خطی و زاویه‌ای با قراردادن هفت ساعت اندازه‌گیری بر روی سطوح اندازه‌گیری شد. روش انجام آزمایش‌ها همانند روش دوربین بود. برای اندازه‌گیری زوایا، سه ساعت اندازه‌گیری بر روی سطح فوقانی قطعه کار، دو ساعت بر روی سطح کناری و دو ساعت بر روی سطح کناری دوم قرار داده شد (شکل ۵). با مقادیر اندازه‌گیری‌شده توسط ساعت‌های فوقانی، سطح مربوط به آن در نرم‌افزار طراحی مدل‌سازی شد. همچنین، با داده‌های اندازه‌گیری‌شده توسط چهار ساعت دیگر، دو خط مربوط به صفحات کناری اول و دوم در نرم‌افزار طراحی شد. با داشتن این سطوح، زوایای انحراف قطعه کار در نرم‌افزار اندازه‌گیری شد. با اعمال اغتشاش در جاساز مرجع، مقادیر جابجایی روی ساعت‌ها ثبت شد. هر یک از این آزمایش‌ها، سه مرتبه تکرار شد. پس از اتمام آزمایش‌ها، مقدار میانگین

1 Visual Measurement Machine



شکل ۴. ساعت‌های اندازه‌گیری مقدار اغتشاش در جاسازها

Fig. 4. Measurement of disturbance at locators using dial indicators



شکل ۵. نحوه اندازه‌گیری انحراف خطی و زاویه‌ای قطعه‌کار با روش ساعت‌های اندازه‌گیری

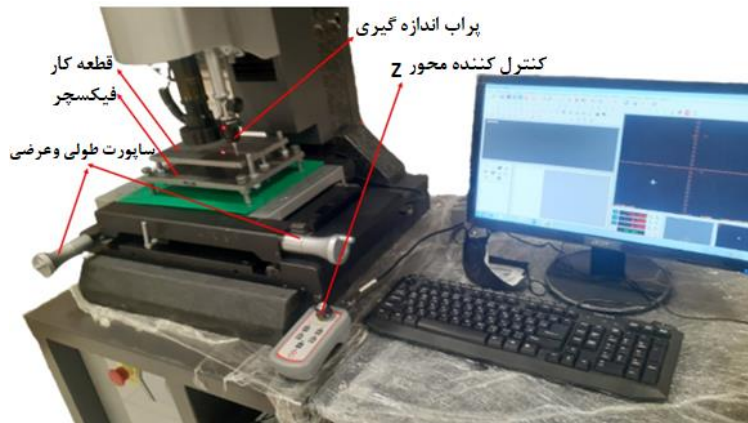
Fig. 5. Measurement of the linear and angular deviations of the workpiece using dial indicators

از سه صفحه‌ای که روی آن جاسازی نصب نشده بود، انجام شد. سه نقطه از هر یک از این سه صفحه توسط پراب دستگاه VMM اندازه‌گیری و ثبت شد. برای هر آزمایش تجربی، جمعاً از نه نقطه داده‌برداری انجام شد. نقاط به‌دست‌آمده، به کمک نرم‌افزار سالی‌دورکس تبدیل به صفحات شده و انحراف زاویه‌ای قطعه‌کار با استفاده از آن‌ها اندازه‌گیری شد.

آزمایش نوع دوم، با اعمال نیروی بست به قطعه‌کاری با ضخامت ۲ میلی‌متر در دو حالت بدون اعمال اغتشاش و با اعمال اغتشاش به جاساز (L_1) انجام شد. همانگونه که اشاره شد، این جاساز برای دسترسی بهتر به موقعیت جدیدی که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، جابجا شد. برای اندازه‌گیری مقدار نیروی وارد شده به قطعه‌کار، از لودسل زمیک و برای نمایش مقدار

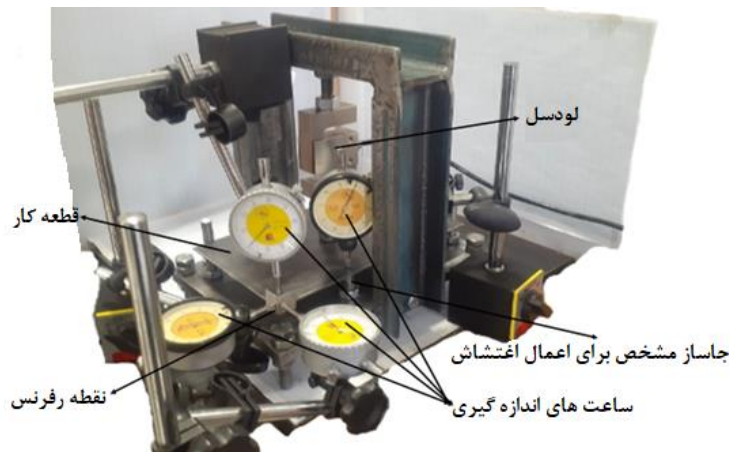
برای هر آزمایش تجربی محاسبه شد و به کمک نرم‌افزار طراحی، با تبدیل این مقادیر به صفحات، زاویه‌های ایجاد شده بر اثر اغتشاش وارد شده به قطعه‌کار اندازه‌گیری شد.

در روش سوم، صفحه قید و بند و قطعه‌کار مطابق شکل ۶ بر روی میز دستگاه VMM در حالت تراز قرار داده شد. انحراف خطی و زاویه‌ای قطعه‌کار با اعمال اغتشاش در ۱۱ پله مذکور (از ۰/۲ تا ۵ میلی‌متر) در جاساز مرجع (L_1) اندازه‌گیری شد. قطعه‌کار پس از اعمال هر اغتشاش در حالت تراز قرار داده شد. برای تعیین دقیق مقدار اغتشاش اعمال شده به جاساز، یک ساعت اندازه‌گیری بر روی جاساز مرجع نصب شد. با توجه به شکل قطعه‌کار و داده‌های مورد نیاز برای ساخت صفحه در نرم‌افزار سالی‌دورکس، داده‌برداری



شکل ۶. اندازه‌گیری انحراف قطعه‌کار با دستگاه VMM

Fig. 6. Measurement of the workpiece deviations using a Visual Measurement Machine (VMM)



شکل ۷. نحوه اندازه‌گیری انحراف قطعه‌کار با اعمال نیرو (بدون اعمال اغتشاش)

Fig. 7. Measurement of the workpiece deviation under clamping force (without disturbance)

نشان‌دهنده شکل‌بندی اجرای این آزمایش است. در حالت اعمال اغتشاش به جاساز مرجع (L_1)، جابجایی اعمال شده از $0/24$ میلی‌متر شروع و در پنج پله، تا ۱ میلی‌متر ادامه پیدا کرد. برای اغتشاش‌های مذکور، نیروهای اعمالی به قطعه‌کار مطابق مقادیر قید شده در جدول ۲ در نظر گرفته شد. با افزایش مقدار اغتشاش، مقدار نیرو نیز افزایش یافت. برای انجام آزمایش‌های تجربی در حالت اعمال اغتشاش، ابتدا ساعت‌های اندازه‌گیری در نقطه صفر تنظیم شد. در ادامه با اعمال هر اغتشاش نیروی متناظر با آن به قطعه‌کار اعمال و مقادیر جابجایی‌های ساعت‌های اندازه‌گیری ثبت شد. شکل ۸ نشان‌دهنده شکل‌بندی اجرای این آزمایش است.

نیرو از صفحه نمایش خوانش‌گر لودسل استفاده شد. برای اعمال نیرو به قطعه‌کار از سه ناودانی استفاده شد. لودسل توسط دو مهره در بالا مهار شد و برای اعمال نیرو از مهره بالایی استفاده شد. سه ساعت اندازه‌گیری بر روی نقطه مرجع، به صورت دو به دو عمود بر هم در گوشه قطعه‌کار قرار داده شد. برای اندازه‌گیری دقیق اغتشاش اعمال شده به جاساز مرجع از یک ساعت اندازه‌گیری مجزا استفاده شد. در حالت بدون اغتشاش، فقط نیروی بست در چندین مرحله با مقادیر ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۵۰ و ۵۰۰ نیوتن به مرکز قطعه‌کار وارد شد. آزمایش‌ها با اعمال هر نیروی جدید، سه بار تکرار شد و انحرافات خطی توسط ساعت‌های اندازه‌گیری ثبت شد. انحراف خطی قطعه‌کار با میانگین‌گیری از مقادیر بدست آمده محاسبه شد. شکل ۷

جدول ۲. مقدار اغتشاش و نیروی بست در آزمایش‌های تجربی همراه با نیروی بست

Table 2. The disturbance and clamping force levels used in experimental tests

اغتشاش (میلی‌متر)	نیرو (نیوتن)
۰/۲۴	۲۰۰
۰/۳۸۵	۲۰۰
۰/۶	۳۵۰
۰/۸	۵۰۰
۱	۵۰۰



شکل ۸. نحوه اندازه‌گیری انحراف قطعه کار (با اعمال نیروی بست و اغتشاش)

Fig. 8. Measurement of the workpiece deviation under clamping force and locator disturbance

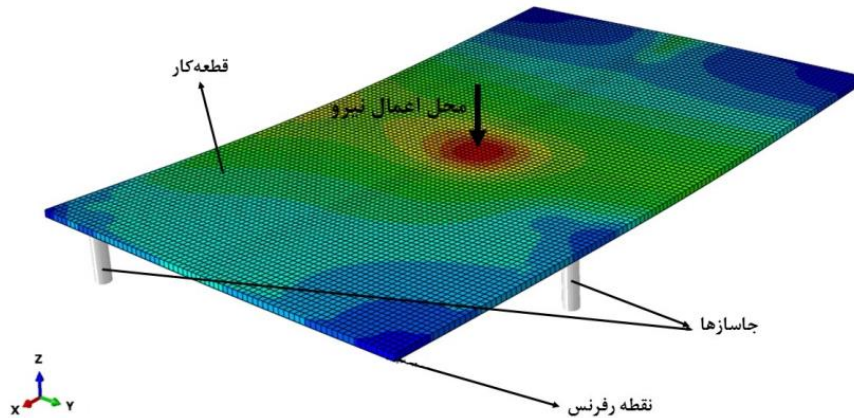
۴- نتایج و بحث

و مقادیر ذکر شده در بخش ۲، میزان جابجایی قطعه کار در هر دو حالت محاسبه شد. شکل ۹ شکل اعوجاج یافته قطعه کار پس از اعمال نیرو را نشان می‌دهد. آنچه که از شکل اعوجاج یافته مشخص است، با توجه به اینکه سه جاساز با بیشینه فاصله از هم قرار دارند، مقدار جابجایی در نقطه محل اعمال نیرو بیشینه بوده و در جهت Z^- است. ولیکن، نقطه مرجع قطعه کار دچار تغییر شکل در راستای Z^+ شده است. مقدار جابجایی نقطه مرجع از آنالیز عددی مطابق نمودار شکل‌های ۱۰ و ۱۱ محاسبه شد. جابجایی در دو جهت X و Y بسیار کوچک و در حد صفر است. در نتیجه، جابجایی نقطه مرجع فقط در راستای Z محاسبه شد.

مطابق نمودار شکل ۱۰ با افزایش نیرو، نقطه مرجع به بالا حرکت کرده و جابجایی نقطه مرجع افزایش می‌یابد. نکته مهم در داده‌های این نمودار،

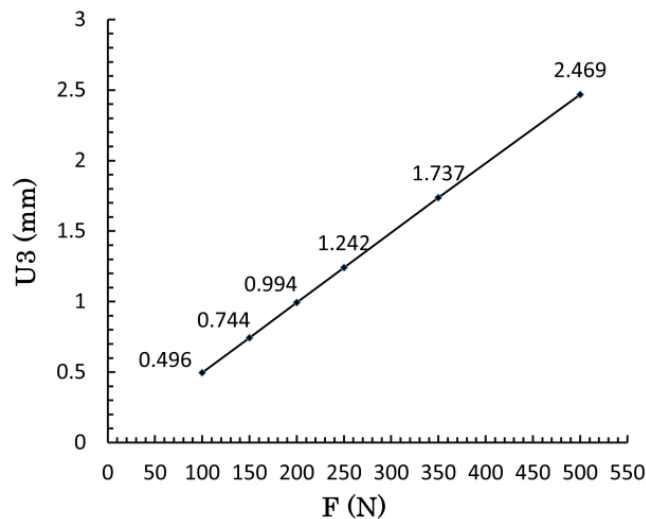
در این بخش به نتایج بدست‌آمده از تحلیل عددی و آزمایش‌های تجربی پرداخته شده است. در بخش نتایج عددی، میزان انحراف خطی قطعه کار در یک سیستم جاسازی ۱-۲-۳ با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس پیش‌بینی شد. شبیه‌سازی عددی برای حالتی که نیروی بست به قطعه کار اعمال می‌شود با دو روش انجام شد. در روش اول، اغتشاش به جاساز وارد نشده و فقط نیروی بست به قطعه کار اعمال شد. در روش دوم، اغتشاش نیز به جاساز مرجع همراه با نیروی بست اعمال شد.

با تعریف خواص و ویژگی‌های اجزا، تعیین نوع حلگر، در نظر گرفتن ضریب اصطکاک سطح قطعه کار با سطوح جاسازها، تعریف مقدار نیروی وارده به قطعه کار و اعمال شرایط مرزی و بارگذاری، مطابق مشخصات



شکل ۹. نمونه‌ای از قطعه کار اعوجاج یافته بعد از اعمال نیرو

Fig. 9. Deformed shape of the workpiece with application of the clamping force

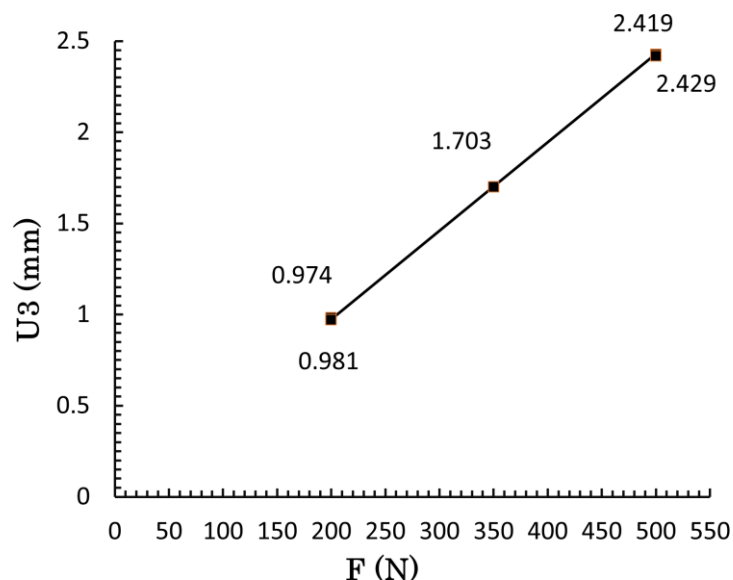


شکل ۱۰. تغییر شکل نقطه مرجع بر اثر نیروهای وارد به قطعه کار (در حالت بدون اغتشاش)

Fig. 10. Displacement of the reference point under clamping force in the undisturbed condition

[۱۹]. در واقع، طراح قید و بند می‌تواند با اجرای یک شبیه‌سازی ساده، مقدار تغییر شکل را در یک اغتشاش مشخص بدست آورده و اثرات اغتشاش توام با نیروی بست را در هر شدت نیروی دیگری محاسبه کند. دو اغتشاش به اندازه ۰/۲۴ و ۰/۳۸۵ میلی‌متر، همراه با اعمال نیروی ۲۰۰ نیوتنی، اغتشاش ۰/۶ میلی‌متر با نیروی ۳۵۰ نیوتنی و اغتشاش‌های ۰/۸ و ۱ میلی‌متر با نیروی ۵۰۰ نیوتنی در جاساز مرجع اعمال شدند. شکل

رابطه نسبتاً خطی بین نیروی وارده بر قطعه کار و مقدار تغییر شکل در نقطه مرجع است که علت آن، قرارگیری تغییر شکل در محدوده الاستیک جنس قطعه کار است. خطی بودن این رابطه کمک شایانی به طراح قید و بند در محاسبه مقدار انحراف قطعه کار در اثر اغتشاش در جاسازها با وجود نیروی بست می‌کند. چراکه، رابطه خطی مشابهی بین مقدار انحراف قطعه کار ناشی از اغتشاش در جاسازها در حالت بدون اعمال نیروی بست نیز وجود دارد



شکل ۱۱. جابجایی نقطه مرجع بر اثر نیروی بست (در حالت با اغتشاش)

Fig. 11. Displacement of the reference point under clamping force in the disturbed condition

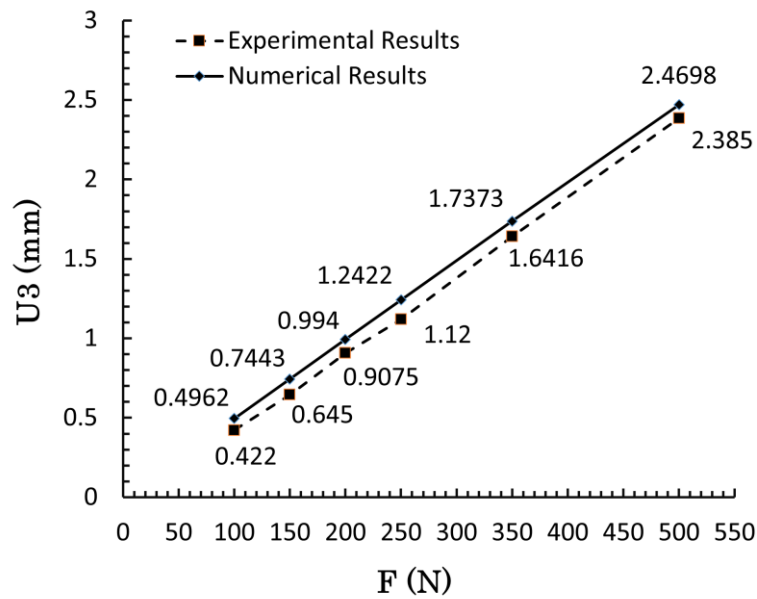
مقدار خطا در اندازه‌گیری جابجایی نقطه مرجع در دو حالت بدون اغتشاش و با اغتشاش به ترتیب برابر با ۱۴/۹ و ۹/۱ درصد بدست آمد. نتیجه مهمی که از این مقایسه برمی‌آید، قابلیت شبیه‌سازی در نیل به نتایج قابل استناد و منطبق بر داده تجربی است. این نتیجه از آن سو حائز اهمیت است که طراح قید و بند می‌تواند در مرحله طراحی و بدون نیاز به ساخت، مقادیر این داده‌ها را با اجرای شبیه‌سازی بدست آورد. بیشینه مقدار خطا در مقادیر کم نیروی بست مشاهده می‌شود که علت آن نیز خطاهای اندازه‌گیری است. از آنجاکه مقادیر کم در بازه حداقل دامنه قابل اندازه‌گیری توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری قرار می‌گیرد، کوچک‌ترین خطا در خوانش اعداد منجر به افزایش خطا می‌شود. همچنین، خطاهایی همچون تکرارپذیری در نقطه خوانش، تنظیم درست پراب برای خوانش در نقطه قبلی، خطای اپراتور در خوانش و غیره را می‌توان جزو عوامل تاثیرگذار بر این موضوع دانست.

انحراف زاویه‌ای قطعه‌کار با استفاده از سه روش دوربین تصویری، ساعت اندازه‌گیری و دستگاه VMM مطابق روشی که در بخش ۳ به آن پرداخته شد، اندازه‌گیری شد. انطباق بین داده‌های بدست‌آمده از این سه روش باید بررسی می‌شد تا از صحت روش اجرای آزمایش‌ها اطمینان به عمل آید. جدول ۴ نشان‌دهنده داده‌های بدست‌آمده از این سه روش اندازه‌گیری در مقادیر مختلف اغتشاش در جاساز مرجع است. لازم به ذکر است که جابجایی

۱۱ نشان‌دهنده جابجایی نقطه مرجع بر اثر اعمال نیروها همراه با اغتشاش در جاساز مرجع است.

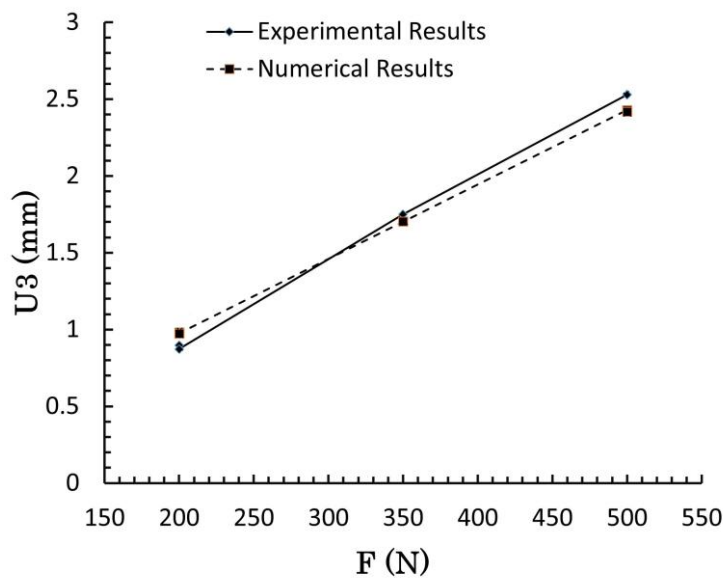
مطابق نمودار شکل ۱۱ با افزایش نیرو، جابجایی نقطه مرجع افزایش می‌یابد؛ ولی در یک نیروی ثابت، با افزایش اغتشاش، جابجایی نقطه مرجع نیز افزایش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که علاوه بر اینکه شدت نیروی بست در قطعات ورقی پارامتر مهمی است، باید تمهیدات لازم برای جلوگیری از سایش سر جاسازها اندیشیده شود. لذا، طراح قید و بند باید ضمن محاسبه تغییر شکل این نوع قطعات، پارامترهای سایش در جاسازها را نیز مدنظر قرار دهد. برای صحت‌سنجی نتایج آنالیز عددی، میزان انحراف خطی قطعه‌کار با آزمایش‌های تجربی با در نظر گرفتن نیروی بست، در هر دو روش بدون اعمال اغتشاش و با اعمال اغتشاش به جاساز مرجع مطابق روشی که در بخش ۳ به آن پرداخته شد، اندازه‌گیری شد. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان‌دهنده مقایسه بین نتایج تحلیل عددی و تجربی هستند. از انحرافات خطی در صفحه بدلیل ناچیز بودن صرف‌نظر شد و فقط انحرافات در راستای ارتفاع اندازه‌گیری شد.

آنچه که از مقایسه نتایج عددی و تجربی در این نمودارها مشاهده می‌شود، تطابق داده‌ها است. با افزایش مقدار نیروی بست، مقدار جابجایی نقطه مرجع افزایش یافته است که منطبق بر فیزیک مساله است. بیشینه



شکل ۱۲. مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی جابجایی نقطه مرجع، در حالت بدون اغتشاش در جاساز

Fig. 12. Comparison of numerical and experimental results for reference point displacement without locator disturbance



شکل ۱۳. مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی جابجایی نقطه مرجع، در حالت اعمال اغتشاش در جاساز

Fig. 13. Comparison of numerical and experimental results for reference point displacement with locator disturbance

جدول ۳. نتایج تجربی همراه با محاسبه انحراف استاندارد و خطا برای جابجایی نقطه مرجع در حالت‌های همراه و بدون اعمال اغتشاش در جاساز

Table 3. Experimental results, standard deviation, and error analysis for reference point displacement in undisturbed and disturbed conditions

آزمایش	نیرو (نیوتن)	اغتشاش (میلی‌متر)	جابجایی نقطه مرجع (میلی‌متر)				انحراف استاندارد (میلی‌متر)	حد پایین خطا (%)	حد بالای خطا (%)
			تکرار ۱	تکرار ۲	تکرار ۳	میانگین			
بدون اغتشاش	۱۰۰	--	۰/۴۲۵	۰/۴۲۰	۰/۴۲۰	۰/۴۲۲	۰/۰۰۲	۰/۰۱	
	۱۵۰	--	۰/۶۳۵	۰/۶۵۵	۰/۶۵۵	۰/۶۴۸	۰/۰۰۹	۰/۰۱	
	۲۰۰	--	۰/۹۱۰	۰/۹۰۵	۰/۹۰۵	۰/۹۰۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰	
	۲۵۰	--	۱/۱۱۵	۱/۱۲۵	۱/۱۲۵	۱/۱۲۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰	
	۳۵۰	--	۱/۶۵۰	۱/۶۱۰	۱/۶۶۵	۱/۶۴۲	۰/۰۲۳	۰/۰۱	
	۵۰۰	--	۲/۴۱۰	۲/۳۷۵	۲/۳۷۰	۲/۳۸۵	۰/۰۱۸	۰/۰۱	
با اغتشاش	۲۰۰	۰/۲۴	۰/۸۹۵	۰/۹۰۵	۰/۹۰۰	۰/۹۰۰	۰/۰۰۴	۰/۰۱	
	۲۰۰	۰/۳۸۵	۰/۹۰۵	۰/۸۴۰	۰/۸۸۵	۰/۸۷۷	۰/۰۲۷	۰/۰۳	
	۳۵۰	۰/۶	۱/۷۵۰	۱/۷۵۰	۱/۷۵۵	۱/۷۵۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰	
	۵۰۰	۰/۸	۲/۵۵۰	۲/۵۱۰	۲/۵۲۰	۲/۵۲۷	۰/۰۱۷	۰/۰۱	
	۵۰۰	۱	۲/۵۷۵	۲/۵۷۰	۲/۵۹۰	۲/۵۸۵	۰/۰۱۸	۰/۰۱	

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تحلیل عددی و تجربی برای محاسبه میزان انحراف خطی قطعه‌کار در یک سیستم جاسازی ۱-۲-۳ با اعمال نیروی بست در دو حالت اعمال اغتشاش و بدون اعمال اغتشاش اجرا شد. همچنین، مقدار انحراف زاویه‌ای قطعه‌کار با استفاده از سه روش پردازش تصویر، داده‌برداری با ساعت اندازه‌گیری و دستگاه VMM محاسبه شد. پیش‌بینی تجربی میزان انحراف خطی قطعه‌کار از آنالیز عددی با اجرای آزمایش‌های تجربی صحت‌سنجی شد. برای این منظور، مجموعه آزمایشگاهی ساخته شد و نتایج آنالیز عددی با نتایج تجربی مقایسه گردید. با مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی در حالت بدون اغتشاش در جاساز و اعمال بست با شدت ۵۰۰ نیوتن، میزان تغییر شکل قطعه‌کار با ۳/۵ درصد خطا محاسبه شد که بیانگر دقت آنالیز عددی بود. سپس، با اعمال بست با شدت ۳۵۰ نیوتن و اغتشاش ۰/۶ میلی‌متری در جاساز، میزان انحراف قطعه‌کار با خطای ۲/۶ درصد محاسبه شد. با مقایسه همه داده‌های عددی و تجربی، بیشینه مقدار خطا در دو حالت بدون اغتشاش و با اغتشاش به ترتیب برابر با ۱۴/۹ و ۹/۱٪ بدست آمد.

زاویه‌ای که با استفاده از دوربین سوم اندازه‌گیری شده است (γ)، ناچیز و در حد صفر می‌باشد. از این رو مطابق جدول ۴ مولفه‌های جابجایی زاویه‌ای دوربین اول (α) و دوم (β) اندازه‌گیری شد. انطباق داده‌های بدست‌آمده از سه روش اندازه‌گیری بیانگر صحت اجرای آزمایش‌ها است.

متوسط مقدار خطا در اندازه‌گیری انحراف زاویه‌ای قطعه‌کار با روش ساعت‌های اندازه‌گیری برای زاویه انحراف آلفا و بتا به ترتیب برابر با ۰/۴ و ۰/۷٪ است. همین مقادیر خطا برای روش استفاده از دوربین به ترتیب برابر با ۳ و ۴ درصد بدست آمد. البته مقادیر بیشینه خطا در روش ساعت‌های اندازه‌گیری و دوربین برابر با ۱۵٪ حاصل شد. مرجع در محاسبه مقادیر این خطاها، داده‌های بدست‌آمده از روش VMM بوده است. مقادیر کم این خطاها بیانگر صحت اعداد بدست آمده برای انحراف زاویه‌ای قطعه‌کار است. منابع خطا در اجرای آزمایش‌های تجربی شامل خطای داده‌برداری، خطای اپراتور، خطای موقعیت‌دهی جاسازها، خطا در موقعیت ساعت‌ها، خطا در موقعیت‌دهی پراب VMM و خطا در تراز بودن قطعه‌کار است. البته، شدت برخی از این خطاها با تکرار آزمایش تا حد قابل قبولی کاهش داده شد.

جدول ۴. نتایج بدست‌آمده برای انحراف زاویه‌ای از روش ساعت‌های اندازه‌گیری، دستگاه VMM و دوربین

Table 4. Comparison between the results of the angular deviation measured by VMM, dial indicators, and camera-based methods

زاویه انحراف آلفا (درجه)	زاویه انحراف بتا (درجه)					
	VMM	دوربین	ساعت‌ها	VMM	دوربین	ساعت‌ها
۰/۲	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۱۰	۰/۱۱	۰/۱۰
۰/۴	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۲۱
۰/۶	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۲۹	۰/۳۲	۰/۳۲
۰/۸	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۳۸	۰/۴۰	۰/۴۲
۱	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۴۸	۰/۵۱	۰/۵۱
۱/۵	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۱	۰/۷۲	۰/۷۳	۰/۷۶
۲	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۹۵	۰/۹۸	۱/۰۲
۲/۵	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۳۷	۱/۲۰	۱/۲۰	۱/۲۰
۳	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۴۲	۱/۴۳	۱/۴۵	۱/۵۱
۴	۰/۵۸	۰/۵۶	۰/۵۶	۱/۸۹	۱/۹۲	۲/۰۱
۵	۰/۷۲	۰/۷۰	۰/۶۹	۲/۳۷	۲/۳۷	۲/۴۸

قطعه کار را با دقت قابل قبولی در مراحل اولیه طراحی قید و بند محاسبه کند. استفاده از عملگر نیوماتیکی و الکترومکانیکی برای اعمال دقیق اغتشاش به عنوان جایگزین جاساز پیچی، استفاده از سنسورهای گپ‌سنج برای محاسبه دقیق مقدار اغتشاش در هر یک از جاسازها و مطالعه اثر موقعیت و نوع چیدمان جاسازها در مقادیر انحراف خطی و زاویه‌ای را می‌توان به عنوان پیشنهادهایی برای اجرای پژوهش‌های آتی در این زمینه معرفی کرد.

منابع

- [1] I. Boyle, Y. Rong, D.C. Brown., A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(1) (2011) 1-12.
- [2] Y.K. Rong, S. Huang., *Advanced computer-aided fixture design*, Elsevier, 2005.

نتیجه دیگری که از اجرای پژوهش حاصل شد، رابطه نسبتاً خطی بین مقدار اغتشاش در جاسازها و اندازه انحراف قطعه کار از موقعیت ایده‌آل (صرف‌نظر از وجود یا عدم وجود نیروی بست) بود. این رابطه کمک قابل توجهی به طراح قید و بند در تخمین اثرات سایش‌های احتمالی در جاسازها بر روی انحراف قطعه کار می‌کند.

یکی از نوآوری‌های اصلی این پژوهش اندازه‌گیری مقدار انحراف زاویه‌ای قطعه کار بود. این پارامتر با استفاده از سه روش اندازه‌گیری شد. با فرض صحت داده‌های تجربی بدست آمده از روش VMM، متوسط مقدار خطا در اندازه‌گیری انحراف زاویه‌ای با ساعت اندازه‌گیری در دو جهت آلفا و بتا به ترتیب برابر با ۰/۴٪ و ۰/۷٪ بدست آمد. این مقدار خطا برای روش دوربین به ترتیب برابر با ۰/۴٪ و ۰/۳٪ حاصل شد. مقادیر خطای بدست آمده برای انحراف خطی و زاویه‌ای در این پژوهش به خوبی بیانگر این است که روش‌های استفاده شده دارای صحت بوده است. همچنین، طراح قید و بند می‌تواند با استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی، مقدار انحراف خطی و زاویه‌ای

- [12] M. Yu Wang, Tolerance analysis for fixture layout design, *Assembly Automation*, 22(2) (2002) 153-162.
- [13] W. Tang, Y. Li, J. Yu, J. Zhang, L. Yu, Locating error analysis for workpieces with general fixture layouts and parameterized tolerances, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(3) (2016) 416-427.
- [14] S. Khodaygan, A method for optimal reduction of locating error with the minimum adjustments of locators based on the geometric capability ratio of process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94 (2018) 3963-3978.
- [15] S.U. Butt, M. Arshad, A.A. Baqai, H.A. Saeed, N.A. Din, R.A. Khan, Locator placement optimization for minimum part positioning error during machining operation using genetic algorithm, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 22 (2021) 813-829.
- [16] D. Peng, L. Wang, C.K. Mechefske, Y. Shao, Position prediction and error compensation for a large thin-walled box-shaped workpiece in a fixture, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116 (2021) 2633-2649.
- [17] G. Hong, S. Gao, T. Xia, J. Du, X. Jin, E. Pan, L. Xi, Fixture layout optimization of large compliant ship part assembly for reducing and straightening butt clearance, *Engineering Optimization*, 56(9) (2024) 1473-1492.
- [18] C. Liu, J. Wang, B. Zhou, J. Yu, Y. Zheng, J. Liu, Development of fixture layout optimization for thin-walled parts: A review, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 37(1) (2024) 17.
- [19] H. Parvaz, M. Bodaghy Aleny, Analysis of workpiece locating error using geometric fixture model: A theoretical and experimental study, *AUT Journal of Mechanical Engineering*, 4(2) (2020) 229-240.
- [3] H. Wang, Y.K. Rong, H. Li, P. Shaun, Computer aided fixture design: Recent research and trends, *Computer-Aided Design*, 42(12) (2010) 1085-1094.
- [4] Y. Kang, Y. Rong, J. Yang, Computer-aided fixture design verification. Part 3. Stability analysis, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21 (2003) 842-849.
- [5] G. Qin, W. Zhang, M. Wan, G. Qin, A mathematical approach to analysis and optimal design of a fixture locating scheme, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29 (2006) 349-359.
- [6] Y. Kang, Y. Rong, J. Yang, Computer-aided fixture design verification. Part 1. The framework and modelling, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21 (2003) 827-835.
- [7] J.M. Crichigno Filho, R. de Medeiros, R. Pereira Cardoso, A contribution for increasing workpiece location accuracy in a 3-2-1 fixture system, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(4) (2019) 1332-1335.
- [8] Z. Jiang, X. Tang, Optimization of fixture flexibility for irregular geometries of workpiece based on metamorphic mechanisms, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103 (2019) 325-342.
- [9] S. Vishnupriyan, M. Majumder, K. Ramachandran, Optimization of machining fixture layout for tolerance requirements under the influence of locating errors, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(1) (2010) 152-161.
- [10] M. Calabrese, T. Primo, A. Del Prete, Optimization of machining fixture for aeronautical thin-walled components, *Procedia CIRP*, 60 (2017) 32-37.
- [11] Y. Xing, Fixture layout design of sheet metal parts based on global optimization algorithms, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(10) (2017) 101004.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

I. Rashidi, H. Parvaz, M. Bahrami, S. Hazrati, Numerical and Experimental Analysis of Locating Error of a Polyhedral Workpiece in the Fixture, Amirkabir J. Mech Eng., 56(11) (2025) 1555-1574.

DOI: [10.22060/mej.2025.23625.7792](https://doi.org/10.22060/mej.2025.23625.7792)

