



## تحلیل پایداری قطعات با هندسه شکل - آزاد در قید و بندها

هادی پروز<sup>1</sup>، محمدجواد ناطق<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* صندوق پستی 111-14115، nategh@modares.ac.ir، تهران

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 01 دی 1394

پذیرش: 01 بهمن 1394

ارائه در سایت: 25 بهمن 1394

کلید واژگان:

اصل کمترین اندازه نیروها

تحلیل پایداری

تماس اجسام صلب

طراحی قید و بندها

هندسه شکل - آزاد

## چکیده

آزمایش پایداری قطعه کار یکی از مراحل اصلی در صحت‌سنجی سیستم جاسازی و بست در مراحل اولیه طراحی قید و بند است. پایداری قطعات شکل - آزاد در قید و بند متأثر از نیرو - ممان‌های وارده از وزن قطعه کار، جاسازها، بست‌ها و ماشین کاری است. در این مقاله، مدلی تحلیلی برای آنالیز پایداری این قطعات در قید و بندها بر مبنای اصل کمترین اندازه نیروها ارائه می‌شود. اصل کمترین اندازه نیروها برای قطعات با هندسه شکل - آزاد در قالب یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی درمی‌آید که حل آن، پایداری قطعه کار را تعیین می‌کند. بررسی پایداری قطعه کار در هنگام بارگذاری در سیستم جاسازی، محاسبه محدوده پایداری و تحلیل تأثیر فاصله جاسازهای پایه از هم بر پایداری قطعه کار با هندسه شکل - آزاد شاکله این پژوهش را تشکیل می‌دهد. نمونه‌ای از مدل پره توربین به عنوان مطالعه موردی برای آنالیز عملکرد مدل ارائه شده استفاده شد. بارگذاری این قطعه کار در سیستم جاسازی در قالب مراحل مشخصی طراحی و پایداری قطعه کار تحت اثر نیرو - ممان‌های وزن و جاسازی در هریک از مراحل بررسی شد. نتایج به دست آمده شامل تعیین محدوده پایداری مدل در محدوده زاویه‌ای 22-38 درجه بر جاسازهای پایه، افزایش پایداری قطعه کار با افزایش فاصله جاسازهای پایه از هم و تأیید طرح جاسازی اصلی با تأیید پایداری قطعه کار در مراحل بارگذاری بود. نتایج، بیانگر توانایی بالای اصل کمترین اندازه نیروها برای آنالیز پایداری قطعات شکل - آزاد در مازول صحت‌سنجی مجموعه فعالیت‌های طراحی قید و بند به کمک رایانه است.

## Stability analysis of free-form workpieces in fixtures

Hadi Parvaz, Mohammad Javad Nategh\*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

\*P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, nategh@modares.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 22 December 2015  
Accepted 21 January 2016  
Available Online 14 February 2016

## Keywords:

Fixture Design  
Free-form Geometry  
Minimum Norm Principle  
Rigid Body Dynamics  
Stability Analysis

## ABSTRACT

The stability analysis of workpiece in fixtures is considered as one of the stages of the fixture verification system. The stability of free-form workpieces in fixtures is affected by different agents including weight, locators, and clamps and machining wrenches. In this study, a mathematical model has been presented for part stability analysis based on the minimum norm principle that led to a non-linear quadratic optimization problem. The solution to this problem is the reaction forces at the contact points between workpiece and locators. The study includes the workpiece stability analysis at the loading stages, determination of stability span for workpiece and investigating the effect of the base locator's distances on the workpiece stability through examples. A turbine blade model was incorporated as the case study to evaluate the suggested model capabilities in stability analysis. The loading procedure of this part into the fixture was categorized into sequential stages and its stability was investigated in contact with the locators. The results included the stability span of  $[22^\circ-38^\circ]$  for the workpiece on base locators, increased stability by the distanced base locators and the confirmation of the main locating plan through the stability verification at the loading stages. The results showed the model efficiency and accuracy in analyzing the free-form part stability in contact with the fixture elements. The proposed dexterous model can be integrated into the CAFD platform to be used at the early stages of locating and clamping system design applications.

## 1- مقدمه

تماس با جاسازها و بست‌ها باید در هر شرایطی پایداری خود را حفظ کند. این پایداری را می‌توان به صورت حفظ تعادل استاتیکی بین نیرو - ممان‌های<sup>2</sup> داخلی در نقاط تماس قطعه کار با جاسازها و بست‌ها و نیرو - ممان‌های خارجی هم‌چون وزن، جاسازی و بست تعریف کرد [3]. قطعه کار در هنگام بارگذاری در داخل قید و بند، تحت نیرو - ممان‌های ناشی از وزن و جاسازها

سیستم‌های صحت‌سنجی قید و بند با هدف نیل به طرح جاسازی و بست مطمئن که نیازهای طراحی را پوشش دهد، ایجاد شده‌اند [1]. این نیازها برای طرح قید و بند شامل آنالیز عملکرد سیستم جاسازی، ترازها، پایداری قطعه کار و فیکسچر و قابلیت دسترسی<sup>1</sup> است [2]. قطعه کار در قید و بند در

2- Wrench

1- Accessibility

منظور، بیشترین جابه‌جایی ناشی از نیروهای ماشین‌کاری در نقاط تماس قطعه‌کار و قید و بند محاسبه شد. مقادیر بردار ویژه ماتریس سفتی قید و بند که منجر به کمترین جابه‌جایی در نقاط تماس قطعه‌کار و قید و بند می‌شد، به‌دست آمد. آن طرح قید و بندی که کمترین مقدار برای پارامتر بیشترین جابه‌جایی ناشی از نیروهای ماشین‌کاری و کمترین مقدار ویژه ماتریس سفتی قید و بند را داشت، به‌عنوان طرح جاسازی قطعه‌کار انتخاب می‌شد.

گرفتن پایدار قطعات در ربایتیک از جهاتی مشابه با طراحی قید و بند است چراکه درجات آزادی قطعه‌کار توسط انگشتان ربات بایستی به‌گونه‌ای گرفته شود که پایداری تماس‌های ایجادشده حفظ شود. گرفتن قطعات در ربایتیک به دو دسته قطعه‌کار با هندسه مشخص و نامشخص تقسیم می‌شود. در دسته اول از روش‌هایی که بر مبنای تعیین موقعیت و شناسایی فیچرهای قطعه‌کار است، استفاده می‌شود. در حالی‌که روش کاربردی برای دسته دوم (که تشابه بیشتری با طراحی قید و بندها دارد)، استفاده از تئوری‌های یادگیری و تشابه با سیستم‌های طراحی‌شده پیشین برای قطعات مشخص موجود در پایگاه داده است [13]. طرح اولیه برای استفاده از روش احتمالاتی بر مبنای مدل تصمیم‌گیری مارکوف با بازنگری جزئی<sup>1</sup> برای گرفتن قطعات در [14] ارائه گردید. روشی بر مبنای استفاده از اطلاعات سنسور نصب‌شده در انگشت ربات برای تعیین بهترین طرح گرفتن پایدار قطعه‌کار در [15] ارائه شد. در این روش، پایگاه داده‌ای برای قطعات مشخص همراه با نقاط محاسبه‌شده برای گرفتن پایدار آن‌ها طراحی شد و با استفاده از روش یادگیری، موقعیت نقاط مناسب برای گرفتن قطعه‌کار جدید تعیین گردید. بکیروغلو و همکاران [16] پایداری گرفتن قطعه را با استفاده از روشی بر مبنای احتمالات، اطلاعات سنسوری و یادگیری ماشینی برای رفع مشکل نامعینی هندسی قطعه جدید مورد بررسی قرار دادند. دنگ و ال [17] در پژوهشی مشابه، روشی بر مبنای استفاده از داده‌های لمسی برای گرفتن پایدار قطعات با هندسه نامشخص پیشنهاد کرد. به تازگی نیکاندروا، لکسون و کیرکی [18] مدل‌سازی احتمالاتی برای تعیین پایداری قطعه با استفاده از اطلاعات سنسوری انجام دادند. نتیجه این پژوهش به این صورت مطرح گردید که برای قطعات با نامعینی هندسی بالا، بهینه‌سازی طرح گرفتن قطعه برای بیشترین پایداری و کمترین آنتروپی احتمال نیل به طرح مناسب را بیشتر می‌کند.

پژوهش حاضر در ادامه فعالیتی است که در [19] برای طراحی سیستم جاسازی قطعات با هندسه شکل - آزاد اجرا شده است. در [19]، از قانون محدود کردن درجات آزادی قطعه‌کار با بیشترین شدت ممکن به‌عنوان قانون اصلی برای طراحی لی-اوت جاسازی قطعات شکل - آزاد مثل پره توربین استفاده گردید. این قانون به سه اصل توازی، بیشترین فاصله و کمترین تداخل بین جاسازها تقسیم و سیستم جاسازی با روش 1-3-2 طراحی شد. ولیکن، قطعه‌کار باید بر سیستم جاسازی و در تماس با هریک از جاسازهای پایه، کناری و توقف دارای پایداری بوده و از لغزش و جدایش قطعه‌کار از جاسازها اجتناب شود. لذا، در این پژوهش، روشی برای تحلیل پایداری قطعه‌کار با هندسه شکل - آزاد در سیستم جاسازی ارائه می‌شود. بررسی پایداری قطعه‌کار در قید و بند یک حالت نامعین استاتیکی است. با توجه به آنچه در بالا اشاره گردید، پژوهش‌های اجراشده در زمینه بررسی پایداری قطعه‌کار در قید و بند برای رفع این نامعینی در مطالعه نیرویی، از فرض حالت دوبعدی قطعه‌کار، اعمال فرضیات ابتکاری همچون نرخ افزایش ضریب

قرار می‌گیرد. پس از بارگذاری، اعمال بست (ها) نیز منجر به افزون‌شدن نیرو - ممان‌هایی به قطعه‌کار می‌شود. نحوه، جهت و شدت اعمال این نیرو - ممان‌ها در مرحله اولیه طراحی سیستم جاسازی و بست آنالیز شده و به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که قطعه‌کار همواره در تمام این مراحل پایداری خود را در تماس با این اجزا حفظ نماید. پس از بارگذاری قطعه‌کار و اعمال بست، نیرو - ممان ناشی از ماشین‌کاری به قطعه‌کار اعمال می‌شود که می‌تواند پایداری قطعه‌کار را برهم بزند. برای این منظور، تمهیداتی هم‌چون تحمل نیرو - ممان ماشین‌کاری توسط جاسازها (به جای بست‌ها)، طراحی موقعیت و جهت جاسازها برای بیشترین تحمل نیرو - ممان ماشین‌کاری و غیره در مرحله طراحی سیستم جاسازی و بست در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین آنالیز پایداری باید به‌عنوان یکی از ابزارهای صحت‌سنجی با سامانه طراحی سیستم جاسازی و بست یک‌پارچه‌سازی شود تا پایداری قطعه‌کار در طرح ارائه‌شده تضمین شود.

عوامل مؤثر در پایداری قطعه‌کار در قید و بند شامل طرح جاسازی، تغییر شکل قید و بند، نیرو و توالی بست است. چو، چاندرا و باراش [4] با استفاده از تئوری پیچ‌واره و تعاریف ارائه‌شده در [5]، سیستم جاسازی و بست را برای قطعات منشوری طراحی کردند. آنالیز پایداری بست طراحی‌شده نیز به‌صورت لزوم جواب مثبت برای نیروهای عکس‌العمل در جاسازها اجرا گردید. لی و کاتکوسکی [6] با تکیه بر مدل‌سازی اصطکاک در بست‌ها، به محاسبه نیروی لازم برای بست جهت حفظ پایداری قطعه‌کار در تماس با آن پرداختند. وی با تعریف سطوح محدودکننده در فضای نیرو - ممان و فرض الاستیک بودن نقاط تماس، پایداری قطعه‌کار را به‌صورت لزوم قرارگیری نیرو/ممان‌های وارده بر آن روی سطح محدودکننده تعریف کرد. بررسی تأثیر توالی مناسب اعمال بست‌ها برای حفظ پایداری قطعات منشوری در قید و بند در [7] مورد توجه قرار گرفت. ساده‌سازی‌های فراوان اعم از فرض عمود بودن سطوح قطعه‌کار و سطوح قید و بند به همدیگر از جمله محدودیت‌های این پژوهش بود. در [8]، مدلی برای تعیین سطوح و موقعیت اعمال جاسازها و بست‌ها برای قید و بندهای مدولار پیشنهاد شد. سپس، طرح جاسازی و بست از دیدگاه دقت جاسازی، قابلیت دسترسی قطعه‌کار به قید و بند و پایداری بست مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. برای آنالیز پایداری بست، با فرض نرخ افزایش برابر برای تمام نیروهای اصطکاک در تمام سطوح تماس، صرفاً به حل حالت دوبعدی با استفاده از معادلات تعادل استاتیکی (جهت تسهیل در محاسبه نیروها) اکتفا شد. روی و لیائو [9] به مطالعه کمی پایداری قطعه‌کار در قید و بند که مناسب برای محیط‌های طراحی خودکار فیکسچر بود، پرداختند. در این روش، مقدار مقاومت قطعه‌کار (با هندسه منشوری) در برابر اعمال اغتشاش مجازی به‌عنوان معیاری برای پایداری آن مطرح گردید. کانگ، رونغ و یانگ [10] روشی با فرض قابلیت جابه‌جایی نقاط تماس و محاسبه ماتریس سفتی، برای صحت‌سنجی طرح قید و بند از دیدگاه پایداری قطعه‌کار با استفاده از محاسبه نیروهای عکس‌العمل در نقاط تماس استفاده کردند. ایشان معیاری کمی به نام CSI را که براساس زاویه نیروی عکس‌العمل در نقطه تماس نسبت به زاویه مخروط اصطکاکی بود، تعریف کرد، برای سنجش پایداری قطعه‌کار ارائه کرد. در [11]، تأثیر توالی اعمال بست‌ها بر پایداری قطعه‌کار منشوری با استفاده از محاسبه نیروهای عکس‌العمل در نقاط تماس قطعه‌کار با جاسازها تعیین شد. در پژوهشی مشابه، به تازگی نیز آسانته [12]، تأثیر نیروهای ماشین‌کاری را همراه با نرمی قطعه‌کار و قید و بند بر پایداری قطعه‌کار مورد مطالعه قرار داد. برای این

1- Partially Observed Markov Decision Processes (POMDP)

- مقدار ضریب اصطکاک در تمام نقاط تماس مشخص و برابر است (در آنالیز ارائه شده می‌توان مقدار ضریب اصطکاک را در هر نقطه تماس متفاوت اعمال کرد)
- هندسه قطعه‌کار از نوع شکل - آزاد بوده و مقادیر بردارهای نرمال و مماسی آن در هر نقطه تماس مشخص است.
- جاساز، عمود بر پروفیل سطح است.
- موقعیت اعمال جاسازها مشخص است.

شکل 1 نشان‌دهنده یک قطعه با هندسه شکل - آزاد همراه با سیستم جاسازی طراحی شده با شش جاساز است. مجموعه دارای یک دستگاه مختصات جهانی XYZ و شش دستگاه مختصات محلی  $nt_1t_2$  بر هریک از جاسازها است. قطعه تحت اثر یک نیرو - ممان برآیند خارجی  $W_e$  قرار گرفته است.

استفاده از اصل کمترین اندازه نیروها برای رفع نامعینی استاتیکی، در قالب مسأله بهینه‌سازی غیرخطی به صورت معادله (1) قابل ارائه است.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } |\varphi| \text{ with constraints:} & \quad (a) \\ T\varphi + W_e = 0 & \quad (b) \\ (f_n)_i \geq 0 & \quad (c) \\ (f_{t_1}^2 + f_{t_2}^2)_i \leq (\mu f_n)_i^2 & \quad (1) \end{aligned}$$

که در آن،  $|\varphi|$  اندازه نیروهای عکس‌العمل در نقاط تماس،  $f_i$  بردار نیرو در نقطه تماس  $i$ ام به صورت  $(f_n, f_{t_1}, f_{t_2})$ ،  $f_n$  مؤلفه عمودی بردار نیرو،  $f_{t_1}$  مؤلفه مماسی اول بردار نیرو،  $f_{t_2}$  مؤلفه مماسی دوم بردار نیرو،  $T$  ماتریس تبدیل از دستگاه مختصات محلی به دستگاه مختصات جهانی و  $W_e$  نیرو ممان برآیند خارجی است.

## 2-1- تابع هدف

تابع هدف در مسأله بهینه‌سازی ارائه شده در رابطه (1) به صورت اندازه (نرم) بردار حاوی نیروهای عکس‌العمل در نقاط شش‌گانه جاسازی است. تابع هدف که به صورت  $\varphi$  در رابطه (1) یاد شده است را می‌توان به صورت رابطه (2) عنوان کرد.

$$\varphi = (F_1, F_2, \dots, F_6), \quad F_i = (f_n, f_{t_1}, f_{t_2})_i \quad (2)$$

تابع هدف  $\varphi$  دارای شش نیروی عکس‌العمل در شش جاساز است که هریک از این بردارها، دارای سه مؤلفه عمودی، مماسی نخست و دوم (براساس با شکل 1) هستند. اندازه بردار هدف  $(|\varphi|)$  از رابطه (3) محاسبه و در بهینه‌سازی استفاده شده است.

$$|\varphi| = F_1^2 + F_2^2 + F_3^2 + F_4^2 + F_5^2 + F_6^2 \quad (3)$$

مطابق با قید شماره 2 در رابطه (1)، مقدار پارامتر  $f_n$  باید مثبت باشد تا تماس قطعه‌کار و جاسازها همواره حفظ شود. علامت دو پارامتر  $f_{t_1}$  و  $f_{t_2}$  می‌تواند مثبت یا منفی باشد. علامت مثبت نشانگر هم‌جهت بودن این پارامترها با جهت  $t_1$  و  $t_2$ ، و منفی بیانگر این است که نیروهای مماسی محاسبه شده، معکوس این جهات است.

## 2-2- قیود بهینه سازی

برای محاسبه نیروهای عکس‌العمل در جاسازها، تعادل استاتیکی بین نیروها باید رعایت شود که قید نخست در معادله (1) برای این منظور ارائه شده است. ماتریس  $T$  برای تبدیل مقادیر نیروها در راستای نرمال، مماسی نخست و دوم به دستگاه مختصات جهانی استفاده می‌شود. قید دوم برای حفظ تماس بین قطعه‌کار و جاسازها و لزوم مثبت بودن نیروهای عکس‌العمل محاسبه شده است. قید سوم نیز شرایط اصطکاک کولمب در نقاط تماس بوده که

اصطکاک برابر در تمام نقاط تماس و یا فرض الاستیک بودن نقاط تماس و بررسی تغییر شکل‌ها و جابه‌جایی‌ها در آن نقاط استفاده کرده‌اند. همچنین، مطالعه تأثیر توالی اعمال بست‌ها بر پایداری قطعه‌کار توسط پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. خلاء مشخصی که در بیشتر پژوهش‌های ارائه شده وجود دارد، اعمال فرضیات ساده‌سازی نه چندان نزدیک به حالت واقعی و مناسب و استفاده از قطعات با هندسه ساده منشوری است. برای قطعات با هندسه شکل - آزاد، نیازهای مهم‌تری در طراحی سیستم جاسازی و آنالیز پایداری مطرح می‌شود. یکی از این نیازها، لزوم بررسی پایداری قطعه‌کار جهت اجتناب از لغزش آن در سیستم جاسازی (صرفاً با احتساب نیرو - ممان وزن و بدون در نظر گرفتن نیرو - ممان‌های خارجی بست و ماشین‌کاری) است. این عامل به عنوان یکی از آزمایش‌های صحت‌سنجی برای انتخاب بهترین طرح جاسازی از بین تمام کاندیدهای جاسازی در مرحله اولیه طراحی قید و بند است. در این مقاله، روشی بر مبنای استفاده از اصل کمترین اندازه نیروها برای آنالیز پایداری قطعه‌کار بدون در نظر گرفتن فرضیات ساده‌سازی مزبور ارائه می‌شود. استفاده از این اصل برای قطعات سه‌بعدی منجر به مسأله بهینه‌سازی غیرخطی مرتبه چهارم می‌شود که با حل آن، پایداری قطعه‌کار سنجیده می‌شود. تعیین محدوده پایداری قطعه‌کار در سیستم جاسازی، تأثیر فاصله جاسازهای پایه از هم بر پایداری قطعه‌کار و آنالیز پایداری برای هریک از مراحل بارگذاری قطعه‌کار در سیستم جاسازی در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمونه‌ای از مدل پره توربین (به عنوان مدلی با هندسه تماماً شکل - آزاد) به عنوان مطالعه موردی جهت سنجش توانایی مدل پیشنهادی در آنالیز پایداری استفاده می‌شود. چابک و سریع بودن مدل ارائه شده و عدم استفاده از فرضیات ساده‌سازی، قابلیت استفاده از این روش را در صحت‌سنجی طرح سیستم جاسازی (جاسازهای پایه، کناری و توقف) جهت نیل به پایداری کامل قطعه‌کار در طرح نهایی قید و بند نمایان می‌سازد.

## 2- مدل سازی

برای یک قطعه در فضای سه بعدی، شش درجه آزادی وجود دارد که باید توسط سیستم جاسازی گرفته شود. محدود کردن این درجات آزادی براساس سیستم 1-2-3 و با استفاده از شش جاساز انجام می‌شود؛ بنابراین تعداد مجهولات برای محاسبه نیروها در نقاط تماس قطعه و جاسازها برابر هجده بوده و تعداد معادلات تعادل شش است. برای رفع نامعینی معمولاً از فرض الاستیک بودن نقاط جاسازی و محاسبه تغییر شکل‌ها استفاده می‌شود. حال آن‌که تعیین پایداری قطعه‌کار تحت نیرو - ممان‌های وزن و جاسازی در مراحل اولیه طراحی قید و بند اجرا می‌شود که اطلاعات زیادی از نحوه تماس‌ها و شرایط مرزی مسأله وجود ندارد. برای رفع نامعینی استاتیکی در این پژوهش، اصل کمینه اندازه نیروها استفاده می‌شود. این اصل بیان می‌دارد که از بین تمام نیروهایی که می‌توانند معادلات تعادل را ارضا کنند، آن مجموعه‌ای جواب مسأله است که کمترین اندازه را داشته باشد. محاسبه نیروهای عکس‌العمل در جاسازهای قید و بند یک مسأله نامعین استاتیکی است. مجموعه فرضیات برای اعمال این اصل جهت تعیین پایداری قطعه‌کار به صورت زیر است:

- قطعه‌کار و سیستم جاسازی صلب است.
- اصطکاک در نقاط تماس از نوع کولمبی است.

مطرح کرد: جدایش در نقاط تماس قطعه کار و قید و بند (عدم ارضا قید دوم) و یا لغزش قطعه کار در نقاط تماس (عدم ارضا قید سوم). در آنالیز پایداری قطعات با هندسه شکل - آزاد در قید و بند، قطعه کار باید با قرارگیری بر جاسازهای پایه دارای پایداری مناسب بوده و دچار لغزش نشود. محدوده پایداری مناسب برای قرارگیری پایدار قطعه کار روی جاسازهای پایه باید محاسبه شود. سپس قطعه کار در هر مرحله از جاسازی و در تماس با جاسازها باید پایدار بوده و دچار لغزش یا جدایش از جاسازها نشود. این اصل به عنوان یکی از قیود صحت سنجی سیستم جاسازی طراحی شده در هر مرحله از بارگذاری قطعه کار در قید و بند استفاده شده و منجر به طرح نهایی پایدار برای قید قطعه کار می شود. در زیر به بررسی توانایی های مدل با استفاده از مطالعه موردی با هندسه شکل - آزاد پرداخته می شود.

### 3- مطالعه موردی

مسئله بهینه سازی ارائه شده در معادله (1) در نرم افزار متلب پیاده سازی و با استفاده از جعبه ابزار بهینه سازی آن حل شد. حل گر بهینه ساز مقید<sup>1</sup> همراه با الگوریتم مجموعه فعال<sup>2</sup> و تعداد تکرار استاندارد 400 بار برای حل استفاده شد. برای سنجش توانایی مدل ارائه شده در آنالیز پایداری، مطالعه موردی بارگذاری قطعه کار پره توربین در سیستم جاسازی 1-2-3 مورد بررسی قرار گرفت (شکل 2). دلیل انتخاب این قطعه کار، بررسی پیچیده ترین حالت ممکن که تمام سطوح قطعه کار دارای هندسه شکل - آزاد باشند، است. در این مدل، سطح جاسازی پایه و دوم دارای هندسه شکل - آزاد با انحنای بالا هستند که فرآیند بارگذاری آن در سیستم جاسازی را با مشکلاتی هم چون لغزش بر جاسازهای پایه و عدم پایداری در تماس با جاسازهای کناری و توقف مواجه می سازد.

همچنین تمام پره توربین ها دارای ریشه هستند که از آن برای قرارگیری بر روتور استفاده می شود. طراحی سیستم جاسازی و بست مطمئن برای ماشین کاری ریشه ضروری بوده و فیکسچر بندی مناسب باید از سطح پره انجام شود.

مراحل بارگذاری این قطعه کار در سیستم جاسازی در سه مرحله قابل بیان است.

- تماس قطعه کار با جاسازهای پایه (شکل 3-a)؛ تحت اثر نیرو - ممان وزن، معمولاً برای قراردادی قطعه کار روی جاسازهای پایه، نیروی اضافی علاوه بر وزن به قطعه کار وارد نمی شود.
- قرارگیری قطعه کار در فاصله بسیار اندک نسبت به جاسازهای کناری (شکل 3-b)؛ این مرحله، تصویری لحظه ای از فرآیند بارگذاری بوده و پایداری قطعه کار در آن باید قوی باشد. در این لحظه از بارگذاری، تأثیر فاصله جاسازهای پایه بر پایداری مطالعه می شود.
- لغزش بر جاسازهای پایه و تماس با جاسازهای کناری (شکل 3-c)؛ در این مرحله قطعه کار تحت نیرو - ممان وزن و بارگذاری  $W_L$  قرار می گیرد.
- تماس با جاساز توقف همراه حفظ تماس با جاسازهای پایه و کناری (شکل 3-d)؛ در این گام نیز قطعه کار تحت نیرو - ممان های وزن و جاسازی  $W_{L1}$  و  $W_{L2}$  قرار می گیرد.

فرض بر این است که قطعه کار دارای جرم 0.6 کیلوگرم بوده و ضریب اصطکاک در تمام نقاط تماس 0.3 است، همچنین سیستم جاسازی

تعیین کننده خطی یا غیرخطی بودن بهینه سازی است. این قید برای قطعه کار با حالت دوبعدی به صورت خطی و برای حالت قطعه کار سه بعدی دارای حالت غیرخطی خواهد بود.

از آنجایی که در حالت دوبعدی، یکی از مؤلفه های مماسی از بردار نیروی عکس العمل در هر جاساز کم می شود، نیروی عکس العمل ایجاد شده دارای 2 مؤلفه عمودی و مماسی است. در این حالت، قید سوم (اصطکاک کولمب) به صورت رابطه (4) می شود.

$$|f_t| \leq \mu |f_n| \quad (4)$$

از آنجا که جهت هریک از مؤلفه های  $f_t$  و  $f_n$  مشخص است، هریک از این پارامترها یک عدد هستند و لذا، رابطه (4) به صورت خطی است.

در حالت سه بعدی، مؤلفه مماسی دوم در راستای  $t_2$  به مؤلفه های عمودی ( $n$ ) و مماسی اول ( $t_1$ ) به هریک از نیروهای عکس العمل در جاسازها افزوده می شود. قید اصطکاک کولمب، به گونه ای باید تعریف شود که اندازه برآیند مؤلفه های مماسی اول و دوم از مقدار بیشینه آن (یعنی  $\mu |f_n|$ ) کمتر باشد. این قید را می توان به صورت رابطه (5) نوشت.

$$(f_{t_1}^2 + f_{t_2}^2)_i \leq (\mu f_n)_i^2 \quad (5)$$

این معادله، یک رابطه غیرخطی بین  $f_{t_1}$ ،  $f_{t_2}$  و  $f_n$  است که مسئله بهینه سازی رابطه (1) را به حالت غیرخطی تبدیل می کند.

ماتریس تبدیل  $T$  از رابطه (6) به دست می آید.

$$\begin{aligned} T &= (T_1, T_2, \dots, T_6) \\ T_i &= (T_n, T_{t_1}, T_{t_2}) \\ (T_n)_i &= (n_i, r_i \times n_i), (T_{t_1})_i = (t_{1i}, r_i \times t_{1i}), (T_{t_2})_i \\ &= (t_{2i}, r_i \times t_{2i}) \end{aligned} \quad (6)$$

در این معادلات،  $T_i$  ماتریس تبدیل مختصات محلی به جهانی برای نقطه تماس  $i$ ام و  $n$ ،  $t_1$ ،  $t_2$  جهات عمودی، مماسی اول و دوم در نقطه تماس  $i$ ام است. به عبارت دیگر، برای محاسبه ماتریس تبدیل از دستگاه مختصات محلی به جهانی، تمام اطلاعات موقعیت و جهت نقطه جاسازی باید مشخص باشد. مقدار نیرو - ممان برآیند خارجی از  $W_e = W_g + W_L$  به دست می آید که در آن،  $W_g$  نیرو - ممان وزن و  $W_L$  نیرو - ممان بارگذاری است.

چنانچه مسئله بهینه سازی منجر به جواب شود، نشان دهنده رعایت شدن تمام قیود یاد شده بوده و قطعه کار بر سیستم جاسازی پایدار است، ولی اگر پاسخی برای این مسئله به دست نیاید، نشان دهنده عدم ارضا یکی از قیود سه گانه است. عدم پایداری قطعه کار در قید و بند را می توان به دو صورت

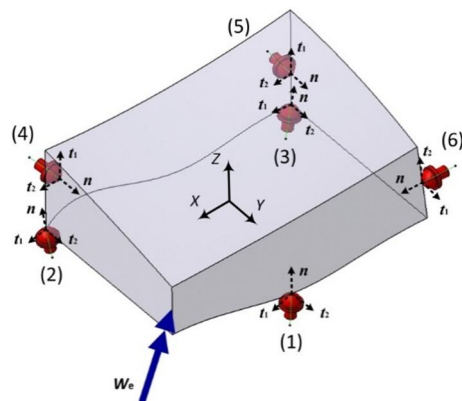


Fig. 1 The model with freeform geometry with the designed locating system adapted for mathematical modeling of stability analysis with minimum norm principle

شکل 1 مدل شکل - آزاد همراه با طرح جاسازی برای مدل سازی آنالیز پایداری با استفاده از اصل کمترین اندازه نیروها

1- Fmincon  
2- Active-set

پیشنهادی (بدون آنالیز پایداری) برای قطعه کار محاسبه و تعیین شده است. موقعیت نقاط جاسازی محاسبه شده در جدول 1 ارائه شده و نقطه مرکز ثقل قطعه کار (88.95, -14.73, 0.56) است.

### 3-1- قطعه کار در تماس با جاسازهای پایه

پس از محاسبه بردارهای نرمال و مماسی نخست و دوم با استفاده از نرم افزار [20]، با تغییر بردار گرانش در محدوده مشخصی مطابق با شکل 4، مقادیر نیروها در هر مرحله از بارگذاری با حل مسئله بهینه سازی به دست آمده و پایداری قطعه کار بررسی می شود. دستگاه مختصات جهانی روی قطعه کار نصب شده و همراه با تغییر موقعیت و جهت قطعه کار، تغییر می کند. به عبارت دیگر، مقادیر موقعیت نقاط جاسازی، بردارهای نرمال و مماسی نخست و دوم که در جدول 1 ارائه شده اند، همواره ثابت هستند. برای محاسبه محدوده پایداری قطعه کار روی جاسازهای پایه کافی است جهت بردار گرانش تغییر کرده و مسئله برای هر شکل بندی حل شود. برای این منظور مدل قطعه کار در نرم افزار مدل سازی رسم و سیستم جاسازی آن مشخص شد. فرض بر این شد که ارتفاع جاسازها به گونه ای تنظیم شود که قطعه کار در راستای  $X$  تراز باشد. در این صورت بردار گرانش به صورت  $[0, -\sin\theta, -\cos\theta]$  که  $\theta$  زاویه بر صفحه  $YZ$  است، تعریف می شود. با تغییر مقدار  $\theta$ ، بازه ای که قطعه کار دارای پایداری (بدون لغزش یا جدایش در نقاط تماس) روی سطح جاسازی پایه است، محاسبه می شود.

بردار گرانش در شکل 4 همواره به سمت عمود بر زمین عمل می کند. حال آن که دستگاه مختصات جهانی نصب شده بر قطعه کار در حال جابه جایی و چرخش همراه با قطعه کار است. با حل مسئله بهینه سازی اشاره شده در رابطه (1) و استفاده از فرضیات انجام شده، پارامترهای جدول 1 و بازه تغییر  $[0^\circ - 90^\circ]$  درجه برای  $\theta$ ، محدوده جاسازی پایدار قطعه کار بر جاسازهای پایه به صورت  $22^\circ < \theta_s < 38^\circ$  به دست می آید که در شکل 5 نشان داده شده است.

محدوده هاشور خورده بین  $L_1$  و  $L_2$  نشان دهنده محدوده ای است که اگر بردار وزن در آن قرار گیرد، قطعه کار بر سه جاساز پایه پایدار خواهد بود. احتمال لغزش قطعه کار در خارج از این محدوده محتمل ترین دلیل ناپایداری است.

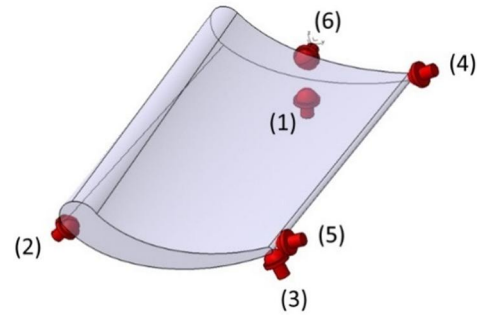
### 3-2- قطعه کار در موقعیت نزدیک به تماس با جاسازهای کناری

قطعه کار در موقعیت نشان داده شده در شکل 3-b در نزدیکی تماس با جاسازهای کناری قرار دارد. این موقعیت برای این منظور انتخاب شده است

جدول 1 موقعیت نقاط جاسازی قطعه کار شکل 2 همراه با بردارهای نرمال، مماسی نخست و دوم (طرح جاسازی اصلی)

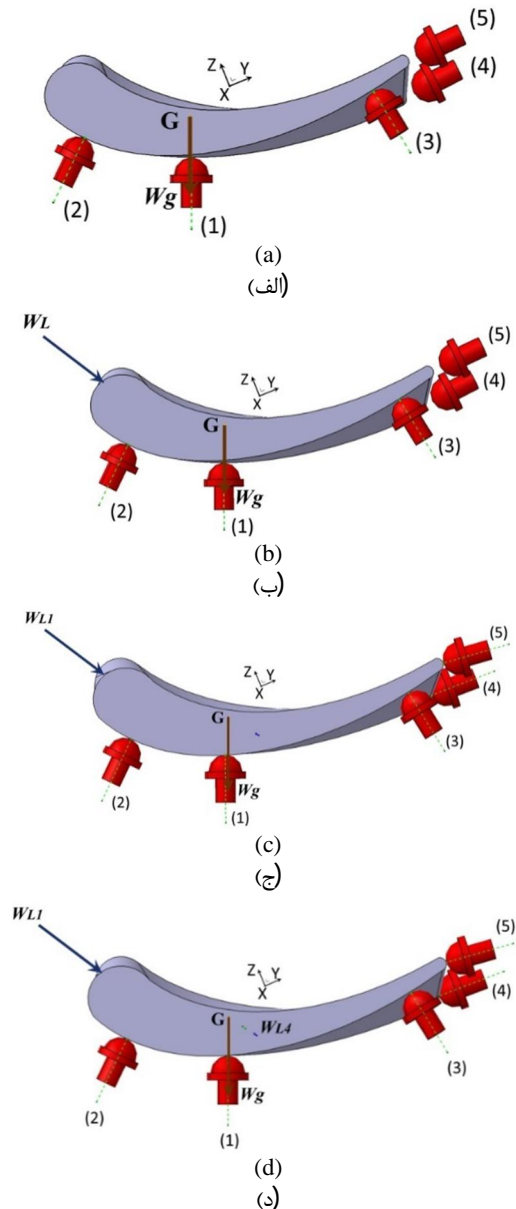
**Table 1** The position of the locating points for model of Fig. 2 beside the normal, the first tangential and second tangential vectors

شماره	1	2	3	4	5	6
مختصات (mm)	0.00	180.00	180.00	2.46	171.03	0
بردار نرمال (n)	-12.53	-52.32	44.77	44.39	46.32	-10
بردار مماسی اول ( $t_1$ )	-16.16	17.71	-8.85	-22.63	-8.75	-9
بردار مماسی دوم ( $t_2$ )	0.03	-0.91	0.23	0.86	0.82	0.00
	-0.94	-0.41	-0.97	-0.49	-0.57	0.00
	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.00
	-0.04	-0.05	0.01	0.01	0.01	-1.00
	0.05	0.07	0.08	0.08	0.08	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.94	0.41	0.97	0.49	0.57	0.00
	-0.33	-0.91	0.23	0.87	0.82	-1.00



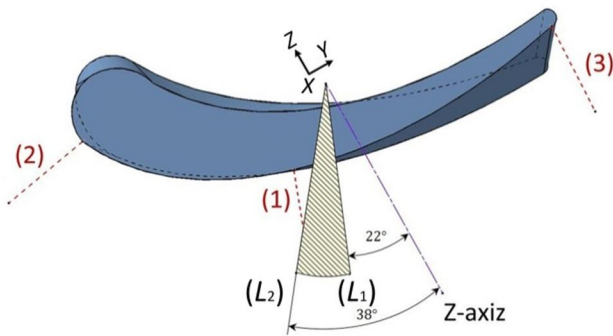
**Fig. 2** Case study: loading of turbine blade model into the fixture

شکل 2 مطالعه موردی بارگذاری پره توربین در سیستم جاسازی



**Fig. 3** The procedure of workpiece loading into the fixture a) resting on the base locators b) the position of nearly contact the side locators c) making contact with the side locators while keeping contact with the base locators d) making contact with the stop locators while keeping contact with the base and side locators

شکل 3 مراحل بارگذاری قطعه کار در قید (الف) تماس با جاسازهای پایه (ب) موقعیت نزدیک به تماس با جاسازهای کناری (ج) تماس با جاسازهای کناری (د) تماس با جاساز توقف



**Fig. 5** The calculated stability area for work piece on the base locators (the hatched area between  $L_1$  &  $L_2$ )

شکل 5 محدوده جاسازی پایدار قطعه کار بر جاسازهای پایه

تأثیر آن بر پایداری قطعه در موقعیت مزبور بررسی می‌شود.

با حل مسأله بهینه‌سازی برای این شکل‌بندی و با اعمال صرفاً نیرو-ممان وزن، جوابی برای مقادیر نیروهای عکس‌العمل به‌دست می‌آید که نشان‌دهنده پایداری قطعه کار بر جاسازهای پایه است. مقادیر این نیروها در جدول 2 نشان داده شده است. برای این محاسبه، مقدار بردار گرانش به صورت  $[0, -\sin 23^\circ, -\cos 23^\circ]$  استفاده می‌شود که از مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار مدل‌سازی به‌دست آمده است.

مطابق با شکل 3-b، نیرو-ممان بارگذاری به‌صورت  $W_L = |W_L| \times (0, \cos(60^\circ), -\sin(60^\circ))N$  در نقطه  $(90, -43.57, 25.16)$  به قطعه کار اعمال می‌شود. با فرض  $0N < |W_L| < 5N$ ، مسأله بهینه‌سازی برای مقادیر مختلف  $|W_L|$  حل شده و مقدار کمترین شدت  $|W_L|$  که قطعه با اعمال آن پایداری خود را از دست می‌دهد، محاسبه می‌شود. با اجرای فرآیند بالا، کمترین مقدار اندازه نیرو برای آغاز حرکت قطعه کار (آغاز لغزش قطعه کار بر جاسازهای پایه) برابر با 1.54 نیوتن به‌دست می‌آید. لازم بذکر است که نقاط پایه جاسازی در این طرح در بیشترین فاصله نسبت به هم قرار گرفته‌اند. برای اجرای مقایسه، طرح جاسازی دوم با نزدیک کردن نقاط جاسازی پایه به یکدیگر مطابق شکل 6 پیشنهاد می‌شود. این طرح جاسازی برای مطالعه تأثیر فاصله جاسازها از هم، بر کمترین مقدار نیروی لازم برای شروع لغزش روی جاسازهای پایه ارائه می‌شود.

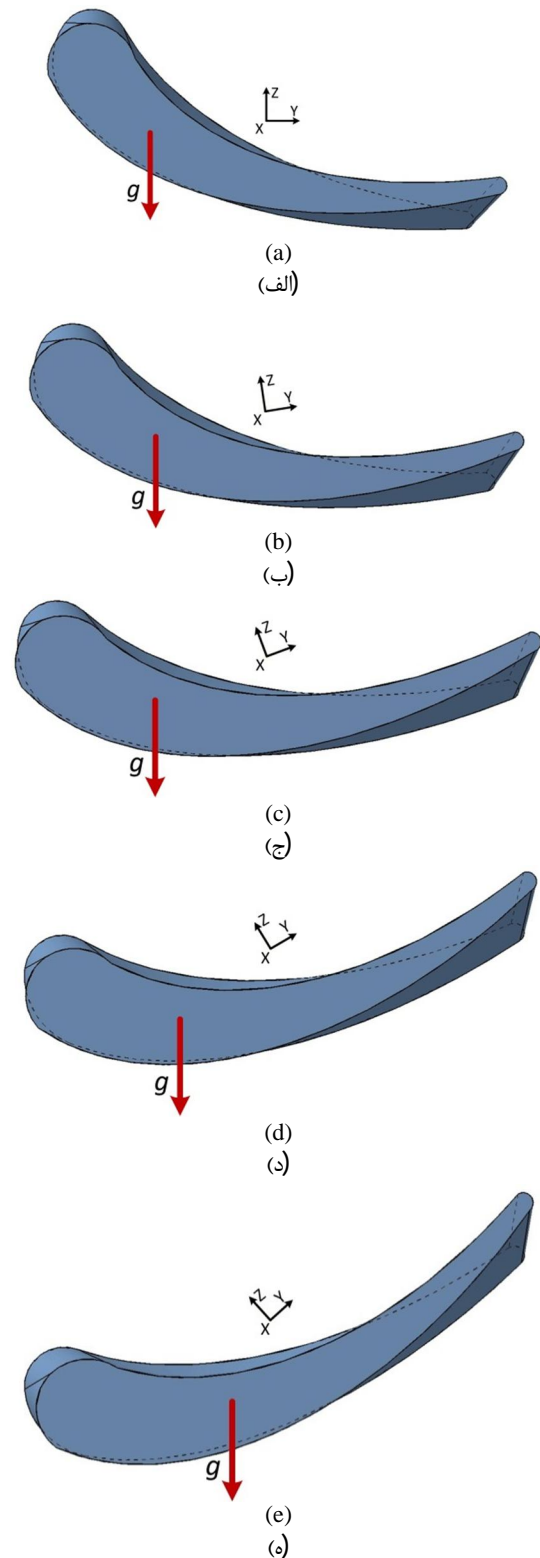
موقعیت نقاط جاسازی همراه با بردارهای نرمال و مماسی نخست و دوم در هر یک از آن‌ها در جدول 3 ارائه شده است.

با اعمال نیرو-ممان مشابه با طرح جاسازی پیشین بر قطعه کار در طرح جاسازی دوم به‌صورت  $W_L = |W_L| \times (0, \cos(60^\circ), -\sin(60^\circ))N$  در نقطه  $(90, -43.57, 25.16)$  و با فرض  $0N < |W_L| < 5N$ ، کمترین مقدار نیروی لازم برای شروع لغزش قطعه کار روی جاسازهای پایه برابر با 0.1 نیوتن به‌دست می‌آید. مقدار بسیار کم به‌دست آمده برای این پارامتر نشان‌دهنده پایداری ضعیف قطعه کار در نقطه نزدیک به تماس با جاسازهای کناری است. دلیل این پدیده، نزدیک بودن بیش از حد جاسازهای پایه به

جدول 2 مقادیر نیروهای عکس‌العمل در موقعیت نزدیک به تماس با جاسازهای کناری (شکل 3-b) با احتساب صرفاً نیرو-ممان وزن

**Table 2** The reaction forces at the base locators in position near to making contact with the side locators

شماره جاساز	1	2	3
نیروها (N)	2.20	1.25	2.95
	-0.60	0.25	-0.04
	-0.66	-0.27	0.12



**Fig. 4** The different potential resting condition of workpiece on the base locators (by changing the  $g$  vector at the global XYZ coordinate system)

شکل 4 نحوه قرارگیری قطعه کار بر جاسازهای پایه تحت زوایای مختلف (با تغییر بردار گرانش در دستگاه مختصات جهانی)

که قطعه کار در آن باید پایداری بالایی داشته باشد. برای تعیین پایداری و مطالعه تأثیر فاصله جاسازهای پایه از هم بر آن، طرح جاسازی دوم (شکل 6) پیشنهاد می‌شود. در این طرح، جاسازهای پایه به یکدیگر نزدیک‌تر شده و



جدول 4 مقادیر نیروهای عکس‌العمل در مرحله دوم بارگذاری (شکل c-3)

**Table 4** The reaction forces at the five locators for the second stage of loading (Fig. 3c)

شماره	1	2	3	4	5
نیروها	4.21	1.06	4.55	3.00	0.36
(N)	-0.11	0.08	-0.12	0.32	0.09
	-1.26	-0.30	-1.31	-0.84	-0.06

#### 3-4- قطعه‌کار در تماس با جاسازهای پایه، کناری و توقف

در مرحله آخر از جاسازی، قطعه‌کار باید با لغزش بر جاسازهای پایه و کناری، با جاساز توقف تماس پیدا کند. برای این منظور، با اعمال دو نیرو- ممان به صورت  $W_{L1} = 5 \times (0, \cos(60^\circ), -\sin(60^\circ))N$  در نقطه  $(90, -43.57, 25.16)$  و  $W_{L2} = 10 \times (-1, 0, 0)N$  در نقطه  $(180, -11.8, -4.65)$ ، قطعه‌کار در تماس با تمام شش جاساز در شکل d-3 قرار می‌گیرد. اگر مسأله بهینه‌سازی برای این شکل‌بندی نیز حل شود، جوابی معین برای مقادیر نیروهای عکس‌العمل به‌دست می‌آید که در جدول 5 نشان داده شده است.

با توجه به این‌که قطعه‌کار در تمام مراحل بارگذاری در حالت پایدار در قید قرار می‌گیرد، بنابراین سیستم جاسازی اصلی طراحی‌شده برای این قطعه‌کار صحیح است. چنان‌چه در هریک از مراحل بارگذاری، مسأله بهینه‌سازی منتج به جواب برای نیروهای عکس‌العمل نشود، نشان‌دهنده وجود لغزش یا جدایش قطعه‌کار از کمپنه یکی از جاسازهاست.

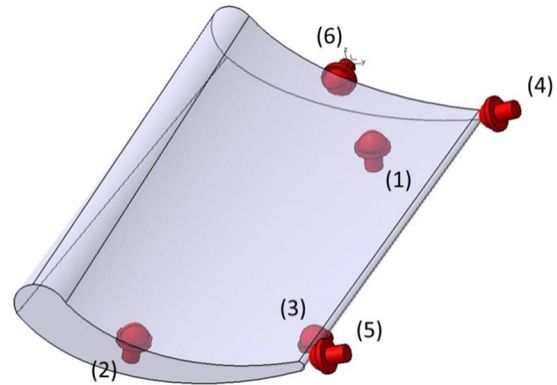
#### 4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدلی تحلیلی برای تعیین پایداری قطعه‌کار با هندسه شکل - آزاد در قید و بند ارائه شد. اصل کمترین اندازه نیروها به‌صورت یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی جهت محاسبه نیروهای عکس‌العمل در نقاط تماس قطعه‌کار و سیستم جاسازی پیشنهاد شد که با حل آن توسط نرم‌افزار متلب، پایداری قطعه‌کار در مراحل مختلف بارگذاری قطعه‌کار مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ای از یک مطالعه موردی به‌صورت بارگذاری مدلی از یک پره توربین در سیستم جاسازی، برای بررسی توانایی مدل در آنالیز پایداری استفاده شد. با اعمال مدل ارائه‌شده به هریک از مراحل بارگذاری، نتیجه گرفته شد که اگر مسأله بهینه‌سازی منجر به ارائه پاسخ گردد، قطعه‌کار بر سیستم جاسازی و نقاط تماس آن پایدار است. برای مدل یادشده با فرض ضریب اصطکاک 0.3، نتیجه حاصل شد که محدوده زاویه‌ای که قطعه‌کار می‌تواند بر جاسازهای پایه به‌صورت پایدار قرار گیرد، بازه  $22^\circ < \theta_s < 38^\circ$  است. تأثیر نزدیک بودن جاسازهای پایه به یکدیگر بر پایداری با محاسبه مقدار کمترین اندازه نیرو برای لغزش قطعه‌کار بر جاسازهای پایه در موقعیتی نزدیک به تماس با جاسازهای کناری بررسی شد. مقدار این نیرو برای طرح جاسازی اصلی 1.54 نیوتن و برای طرح جاسازی دوم 0.1 نیوتن به‌دست آمد که نشان‌گر پایداری ضعیف قطعه‌کار با نزدیک کردن جاسازهای پایه به هم بود. با بررسی پایداری قطعه‌کار در تمام مراحل جاسازی، نتیجه حاصل شد که سیستم جاسازی اصلی صحیح بوده و پایداری کامل قطعه‌کار را فراهم

جدول 5 مقادیر نیروهای عکس‌العمل در مرحله سوم بارگذاری (شکل d-3)

**Table 5** The reaction forces at the six locators for the third stage of loading (Fig. 3d)

شماره	1	2	3	4	5	6
نیروها	3.35	4.00	1.48	1.96	2.16	6.38
(N)	-0.10	-0.40	-0.03	-0.04	-0.04	-0.38
	1.00	1.13	0.44	0.58	0.64	-1.72



**Fig. 6** The second locating plan with base locators near together for studying the effect of base locator distances on the workpiece stability  
شکل 6 طرح جاسازی دوم (با جاسازهای پایه نزدیک به هم) برای مطالعه تأثیر فاصله جاسازهای پایه از هم روی پایداری قطعه‌کار

جدول 3 موقعیت نقاط جاسازی پایه قطعه‌کار در طرح جاسازی دوم (جاسازهای پایه نزدیک به هم) همراه با بردارهای نرمال و مماسی نخست و دوم

**Table 3** The pose of the locators in the second locating plan besides the normal and the first and second tangential vectors

شماره	1	2	3	4	5	6
مختصات	10.39	150.89	144.25	2.46	171.03	0
(mm)	-20.82	-25.30	-13.49	-22.63	-8.75	-10
بردار نرمال	0.02	-0.04	-0.07	0.03	0.04	-1.00
(n)	0.40	0.17	-0.13	0.86	0.82	0.00
	0.91	0.98	0.99	-0.49	-0.57	0.00
بردار مماسی	0.00	0.00	0.00	0.99	0.99	0.00
اول ( $t_1$ )	0.91	0.98	0.99	0.01	0.01	-1.00
	-0.40	-0.17	0.13	0.08	0.08	0.00
بردار مماسی	0.99	0.99	0.99	0.00	0.00	0.00
دوم ( $t_2$ )	-0.05	-0.02	0.00	0.49	0.57	0.00
	0.05	0.05	0.07	0.87	0.82	-1.00

یکدیگر و عدم رعایت کمترین فاصله بین نقطه مرکز ثقل قطعه‌کار و نقطه میانی مثلث متشکل از جاسازهای پایه است.

طرح جاسازی دوم صرفاً برای مطالعه تأثیر فاصله جاسازهای پایه بر پایداری قطعه‌کار ارائه شد و فقط در همین مرحله از بارگذاری استفاده می‌شود. برای ادامه بارگذاری، از طرح جاسازی اصلی (شکل 2 و جدول 1) استفاده می‌شود.

#### 3-3- قطعه‌کار در تماس با جاسازهای پایه و کناری

در این مرحله از بارگذاری، قطعه‌کار بر جاسازهای پایه لغزیده و با جاسازهای کناری تماس پیدا می‌کند. با اعمال نیرو- ممان  $W_L = 5 \times (0, \cos(60^\circ), -\sin(60^\circ))N$  در نقطه  $(90, -43.57, 25.16)$  از شکل c-3، قطعه‌کار در تماس با جاسازهای کناری قرار می‌گیرد. فرض بر این است که بردار گرانش به‌صورت  $[0, -\sin 23^\circ, -\cos 23^\circ]$  است تا پایداری قطعه‌کار بر جاسازهای پایه حفظ شود. برای مطالعه پایداری، مسأله بهینه‌سازی اشاره‌شده در معادله (1) با نیرو- ممان‌های وزن و جاسازی و با استفاده از اطلاعات بالا حل گشت. با توجه به این‌که جواب مشخصی مطابق با جدول 4 برای نیروهای عکس‌العمل در جاسازها به‌دست می‌آید، قطعه‌کار در پایداری کامل در تماس با جاسازهاست.

به عبارت دیگر، قطعه‌کار در موقعیت و جهت مناسب بر جاسازهای پایه و کناری قرار گرفته است.

می‌کند.

استفاده از اصل کمینه اندازه نیروها برای تعیین پایداری قطعه‌کار تحت نیروهای ناشی از اعمال بست و ماشین‌کاری به‌عنوان پیشنهادی برای ادامه پژوهش در این زمینه مطرح می‌شود.

## 5- فهرست علائم

$f$	مؤلفه‌های بردار نیروی عکس‌العمل
$F$	بردار نیروی عکس‌العمل در هریک از جاسازها
$g$	بردار گرانش
$L_1$	کران پایین محدوده پایداری
$L_2$	کران بالای محدوده پایداری
$n_i$	بردار نرمال برای نقطه تماس $i$ ام
$r$	بردار موقعیت
$T$	ماتریس تبدیل
$t_{1i}$	بردار مماسی نخست برای نقطه تماس $i$ ام
$t_{2i}$	بردار مماسی دوم برای نقطه تماس $i$ ام
$W$	نیروممان اعمالی

## علائم یونانی

$\theta$	زاویه بردار گرانش در صفحه YZ مدل پره توربین
$\theta_s$	زاویه پایداری قطعه‌کار بر جاسازهای پایه
$\varphi$	بردار نیروهای عکس‌العمل در تمام جاسازها

## زیرنویس‌ها

$e$	پارامتر اعمالی خارجی بر قطعه‌کار
$g$	اندیس گرانش
$i$	شماره جاساز
$L$	اندیس پارامتر بارگذاری
$L_1$	اندیس پارامتر بارگذاری نخست
$L_2$	اندیس پارامتر بارگذاری دوم
$n$	اندیس جهت نرمال (عمود)
$t_1$	اندیس جهت مماسی نخست
$t_2$	اندیس جهت مماسی دوم

## 6- مراجع

- [1] H. Wang, Y. Rong, H. Li, P. Shaun, Computer aided fixture design: recent research and trends, *Computer Aided Design*, Vol. 42, No. 12, pp. 1085-1094, 2010.
- [2] Y. Kang, Y. Rong, J. C. Yang, Computer-aided fixture design verification. Part 1. The framework and modelling, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, No. 10, pp. 827-835, 2003.
- [3] I. Boyle, Y. Rong, D. C. Brown, A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 27, No. 1, pp. 1-12, 2011.
- [4] Y. C. Chou, V. Chandru, M. M. Barash, A mathematical approach to automatic configuration of machining fixtures: analysis and synthesis, *Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 111, No. 4, pp. 299-306, 1989.
- [5] M. S. Ohwovoriele, B. Roth, An extension of screw theory, *mechanical design*, Vol. 103, No. 4, pp. 725-735, 1981.
- [6] S. H. Lee, M. R. Cutkosky, Fixture planning with friction, *Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 113, No. 3, pp. 320-327, 1991.
- [7] C. Cogun, The importance of the application sequence of clamping forces on workpiece accuracy, *Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 114, No. 4, pp. 539-543, 1992.
- [8] Y. Wu, Y. Rong, W. Ma, S. R. LeClair, Automated modular fixture planning: Accuracy, clamping, and accessibility analyses, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 14, No. 1, pp. 17-26, 1998.
- [9] U. Roy, J. Liao, Fixturing analysis for stability consideration in an automated fixture design system, *manufacturing science and engineering*, Vol. 124, No. 1, pp. 98-104, 2002.
- [10] Y. Kang, Y. Rong, J. C. Yang, Computer-aided fixture design verification. Part 3. Stability analysis, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, No. 10-11, pp. 842-849, 2003.
- [11] M. Y. Wang, D. M. Pelinescu, Contact force prediction and force closure analysis of a fixtured rigid workpiece with friction, *manufacturing science and engineering*, Vol. 125, No. 2, pp. 325-332, 2003.
- [12] J. N. Asante, Effect of fixture compliance and cutting conditions on workpiece stability, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 48, No. 1-4, pp. 33-43, 2010.
- [13] J. Bohg, A. Morales, T. Asfour, D. Kragic, Data-driven grasp synthesis-a survey, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 30, No. 2, pp. 289-309, 2014.
- [14] Y. Bekiroglu, J. Laaksonen, J. A. Jorgensen, V. Kyrki, D. Kragic, Assessing grasp stability based on learning and haptic data, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 27, No. 3, pp. 616-629, 2011.
- [15] M. Madry, L. Bo, D. Kragic, D. Fox, ST-HMP: Unsupervised spatio-temporal feature learning for tactile data, in *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong: IEEE, pp. 2262-2269, 2014.
- [16] Y. Bekiroglu, D. Song, L. Wang, D. Kragic, A probabilistic framework for task-oriented grasp stability assessment, in *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe: IEEE, pp. 3040-3047, 2013.
- [17] H. Dang, P. K. Allen, Stable grasping under pose uncertainty using tactile feedback, *Autonomous Robots*, Vol. 36, No. 4, pp. 309-330, 2014.
- [18] E. Nikandrova, J. Laaksonen, V. Kyrki, Towards informative sensor-based grasp planning, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 62, No. 3, pp. 340-354, 2014.
- [19] H. Parvaz, M. J. Nategh, Analytical model of locating system design for parts with free-form surfaces, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 129-133, 2015. (in Persian)
- [20] H. Parvaz, M. J. Nategh, A pilot framework developed as a common platform integrating diverse elements of computer aided fixture design, *Production Research*, Vol. 51, No. 22, pp. 6720-6732, 2013.