



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

هادی پروز¹، محمدجواد ناطق^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی 111-14115، nategh@modares.ac.ir

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 به‌عنوان 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 به‌دست 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°-38°] 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

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، تیرانس‌ها، پایداری قطعه کار و فیکسچر و قابلیت دسترسی¹ است [2]. قطعه کار در قید و بند در

تماس با جاسازها و بست‌ها باید در هر شرایطی پایداری خود را حفظ کند. این پایداری را می‌توان به‌صورت حفظ تعادل استاتیکی بین نیرو - ممان‌های² 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

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 رباتیک از چهراتی 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 رباتیک 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 حالی که 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 جزئی¹ 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 1-2-3 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 بندها 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، رونگ 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 اصطکاک 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 می توان مقدار ضریب اصطکاک را در هر نقطه تماس متفاوت اعمال کرد)
- هندسه قطعه کار 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 نشان دهنده 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 بهینه سازی غیرخطی به صورت معادله (1) قابل ارائه است.
- Minimize $|\varphi|$ with constraints: (a)
- $T\varphi + W_e = 0$ (b)
- $(f_n)_i \geq 0$ (c)
- $(f_{t_1}^2 + f_{t_2}^2)_i \leq (\mu f_n)_i^2$ (1)

که در آن، $|\varphi|$ اندازه نیروهای عکس العمل در نقاط تماس، f_i بردار نیرو در نقطه تماس نام به صورت (f_n, f_{t_1}, f_{t_2}) ، 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 بهینه سازی ارائه شده در رابطه (1) به صورت اندازه (نرم) بردار حاوی نیروهای عکس العمل در نقاط شش گانه جاسازی است. تابع هدف که به صورت φ در رابطه (1) یاد شده است را می توان به صورت رابطه (2) عنوان کرد.

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

تابع هدف φ دارای شش نیروی عکس العمل 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 بهینه سازی 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 قطعه کار و جاسازها همواره حفظ شود. علامت دو پارامتر f_{t_1} و f_{t_2} می تواند مثبت یا منفی باشد. علامت مثبت نشانگر هم جهت 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 عکس العمل 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 می شود. قید دوم برای حفظ تماس بین قطعه کار و جاسازها و لزوم مثبت بودن نیروهای عکس العمل 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 شکل ها و جابه جایی ها در آن نقاط استفاده کرده اند. همچنین، مطالعه تأثیر توالی اعمال بست ها بر پایداری قطعه کار توسط پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. خلاء مشخصی که در بیشتر پژوهش های ارائه شده وجود دارد، اعمال فرضیات ساده سازی نه چندان نزدیک به حالت واقعی و مناسب و استفاده از قطعات با هندسه ساده منشوری است. برای قطعات با هندسه شکل - آزاد، نیازهای مهم تری در طراحی سیستم جاسازی و آنالیز پایداری مطرح می شود. یکی از این نیازها، لزوم بررسی پایداری قطعه کار جهت اجتناب از لغزش آن در سیستم جاسازی (صرفاً با احتساب نیرو - ممان وزن و بدون در نظر گرفتن نیرو - ممان های خارجی بست و ماشین کاری) است. این عامل به عنوان یکی از آزمایش های صحت سنجی 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 قطعه کار بدون در نظر گرفتن فرضیات ساده سازی مزبور ارائه می شود. استفاده از این اصل برای قطعات سه بعدی منجر به مسأله بهینه سازی غیرخطی مرتبه چهارم می شود که با حل آن، پایداری قطعه کار سنجیده می شود. تعیین محدوده پایداری قطعه کار در سیستم جاسازی، تأثیر فاصله جاسازهای پایه از هم بر پایداری قطعه کار و آنالیز پایداری برای هریک از مراحل بارگذاری قطعه کار در سیستم جاسازی در این پژوهش مورد بررسی قرار می گیرد. نمونه ای 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 می شود. چابک و سریع بودن مدل ارائه شده و عدم استفاده از فرضیات ساده سازی، قابلیت استفاده از این روش را در صحت سنجی طرح سیستم جاسازی (جاسازهای پایه، کناری و توقف) جهت نیل به پایداری کامل قطعه کار در طرح نهایی قید و بند نمایان می سازد.

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 می شود؛ 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 شکل ها استفاده می شود. حال آن که تعیین پایداری قطعه کار تحت نیرو - ممان های وزن و جاسازی در مراحل اولیه طراحی قید و بند اجرا می شود که اطلاعات زیادی از نحوه تماس ها و شرایط مرزی مسأله وجود ندارد. برای رفع نامعینی استاتیکی در این پژوهش، اصل کمینه اندازه نیروها استفاده می شود. این اصل بیان می دارد که از بین تمام نیروهایی که می توانند معادلات تعادل را ارضا کنند، آن مجموعه ای جواب مسأله است که کمترین اندازه را داشته باشد. محاسبه نیروهای عکس العمل در جاسازهای قید و بند یک مسأله نامعین استاتیکی است. مجموعه فرضیات برای اعمال این اصل جهت تعیین پایداری قطعه کار به صورت زیر است:

- قطعه کار 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 صحت‌سنجی 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 می‌شود. در زیر به بررسی توانایی‌های مدل با استفاده از مطالعه موردی با هندسه شکل - آزاد پرداخته می‌شود.

3- مطالعه موردی

مسئله بهینه‌سازی ارائه شده در معادله (1) در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی و با استفاده از جعبه ابزار بهینه‌سازی آن حل شد. حل گر بهینه‌ساز مقید¹ همراه با الگوریتم مجموعه-فعال² 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 پیچیده‌ترین 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 انحنا بالا هستند که فرآیند بارگذاری آن در سیستم جاسازی را با مشکلاتی هم‌چون لغزش بر جاسازهای پایه و عدم پایداری در تماس با جاسازهای کناری و توقف مواجه می‌سازد.

همچنین تمام پره توربین‌ها دارای ریشه هستند که از آن برای قرارگیری بر روتور استفاده می‌شود. طراحی سیستم جاسازی و بست مطمئن برای ماشین‌کاری 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 نمی‌شود.
- قرارگیری قطعه کار در فاصله بسیار اندک نسبت به جاسازهای کناری (شکل 3-b)؛ این مرحله، تصویری لحظه‌ای 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 می‌شود.
- 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 می‌گیرد.
- تماس با جاساز توقف همراه حفظ تماس با جاسازهای پایه و کناری (شکل 3-d)؛ در این گام نیز قطعه کار تحت نیرو - ممان‌های وزن و جاسازی W_{L_1} و W_{L_2} قرار می‌گیرد.

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 بهینه‌سازی است. این قید برای قطعه کار با حالت دوبعدی به صورت خطی و برای حالت قطعه کار سه‌بعدی دارای حالت غیرخطی خواهد بود.

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

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

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

در حالت سه‌بعدی، مؤلفه مماسی دوم در راستای t_2 به مؤلفه‌های عمودی (n) و مماسی اول (t_1) به هریک از نیروهای عکس‌العمل در جاسازها افزوده می‌شود. قید اصطکاک کولمب، به گونه‌ای باید تعریف شود که اندازه برآیند مؤلفه‌های مماسی اول و دوم از مقدار بیشینه آن (یعنی $\mu |f_n|$) کمتر باشد. این قید را می‌توان 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 بهینه‌سازی رابطه (1) را به حالت غیرخطی تبدیل می‌کند.

ماتریس تبدیل T از رابطه (6) به دست می‌آید.

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

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 می‌آید که در آن، W_g نیرو - ممان وزن و W_L نیرو - ممان بارگذاری است.

چنانچه مسئله بهینه‌سازی منجر به جواب شود، نشان‌دهنده رعایت شدن تمام قیود یاد شده بوده و قطعه کار بر سیستم جاسازی پایدار است، ولی اگر پاسخی برای این مسئله به دست نیاید، نشان‌دهنده عدم ارضا یکی از قیود سه‌گانه است. عدم پایداری قطعه کار در قید و بند را می‌توان به دو صورت

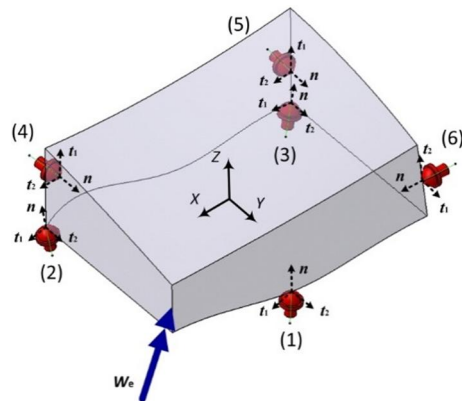


Fig. 1 The model with freeform geometry with the designed locating system adapted for mathematical modeling of stability analysis with minimum norm principle

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

1- Fmincon
2- Active-set

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

3-1- قطعه‌کار 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 مسأله بهینه‌سازی به دست آمده و پایداری قطعه‌کار بررسی می‌شود. دستگاه مختصات جهانی روی قطعه‌کار نصب شده و همراه با تغییر موقعیت و جهت قطعه‌کار، تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، مقادیر موقعیت نقاط جاسازی، بردارهای نرمال و مماسی نخست و دوم که در جدول 1 ارائه شده‌اند، همواره ثابت هستند. برای محاسبه محدوده پایداری قطعه‌کار روی جاسازهای پایه کافی است جهت بردار گرانش تغییر کرده و مسأله برای هر شکل‌بندی حل شود. برای این منظور مدل قطعه‌کار در نرم افزار مدل‌سازی رسم و سیستم جاسازی آن مشخص شد. فرض بر این شد که ارتفاع جاسازها به گونه‌ای تنظیم شود که قطعه‌کار در راستای X تراز باشد. در این صورت بردار گرانش به صورت $[0, -\sin\theta, -\cos\theta]$ که θ زاویه بر صفحه YZ است، تعریف می‌شود. با تغییر مقدار θ ، بازه‌ای که قطعه‌کار دارای پایداری (بدون لغزش یا جدایش در نقاط تماس) روی سطح جاسازی پایه است، محاسبه می‌شود.

بردار گرانش در شکل 4 همواره به سمت عمود بر زمین عمل می‌کند. حال آن که دستگاه مختصات جهانی نصب شده بر قطعه‌کار در حال جابه‌جایی و چرخش همراه با قطعه‌کار است. با حل مسأله بهینه‌سازی اشاره شده در رابطه (1) و استفاده از فرضیات انجام شده، پارامترهای جدول 1 و بازه تغییر $[0^\circ-90^\circ]$ درجه برای θ ، محدوده جاسازی پایدار قطعه‌کار بر جاسازهای پایه به صورت $22^\circ < \theta_s < 38^\circ$ به دست می‌آید که در شکل 5 نشان داده شده است.

محدوده هاشورخورده بین L_1 و L_2 نشان‌دهنده محدوده‌ای است که اگر بردار وزن در آن قرار گیرد، قطعه‌کار بر سه جاساز پایه پایدار خواهد بود. احتمال لغزش قطعه‌کار در خارج از این محدوده محتمل‌ترین دلیل ناپایداری است.

3-2- قطعه‌کار در موقعیت نزدیک به تماس با جاسازهای کناری

قطعه‌کار 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 قطعه‌کار 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	0.00	180.00	180.00	2.46	171.03	0
(mm)	-12.53	-52.32	44.77	44.39	46.32	-10
بردار نرمال	-16.16	17.71	-8.85	-22.63	-8.75	-9
(n)	-0.94	-0.41	-0.97	-0.49	-0.57	0.00
بردار مماسی اول	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.00
بردار مماسی دوم	-0.04	-0.05	0.01	0.01	0.01	-1.00
(t_1)	0.05	0.07	0.08	0.08	0.08	0.00
بردار مماسی	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(t_2)	0.94	0.41	0.97	0.49	0.57	0.00
	-0.33	-0.91	0.23	0.87	0.82	-1.00

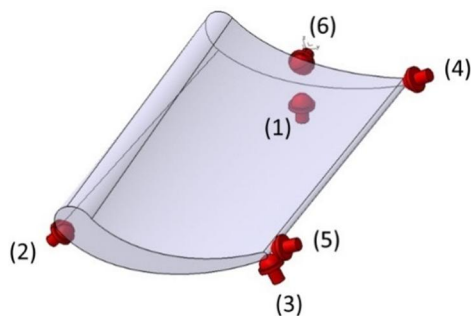


Fig. 2 Case study: loading of turbine blade model into the fixture

شکل 2 مطالعه موردی بارگذاری پره توربین در سیستم جاسازی

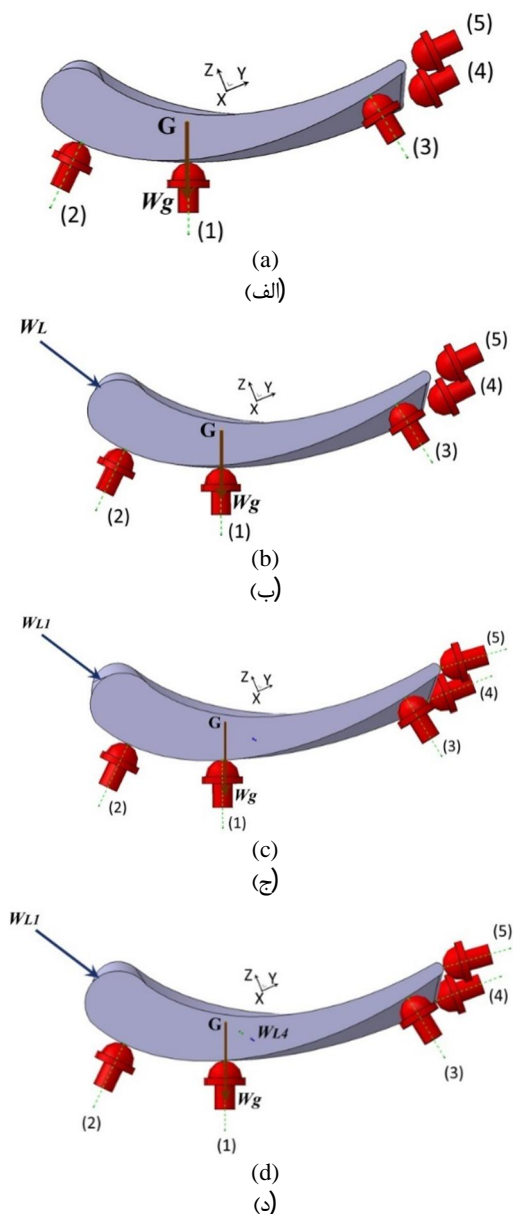


Fig. 3 The procedure of workpiece loading into the fixture a) resting on the base locators b) the position of nearly contact the side locators c) making contact with the side locators while keeping contact with the base locators d) making contact with the stop locators while keeping contact with the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

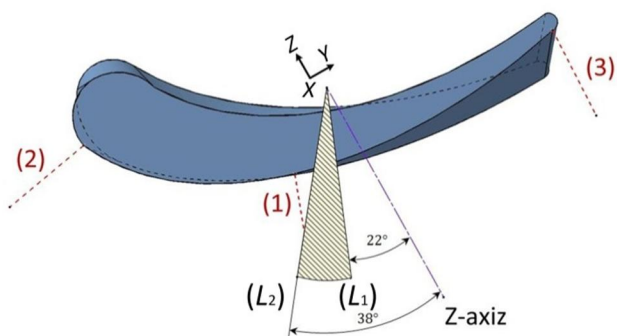


Fig. 5 The calculated stability area for work piece on the base locators (the hatched area between L_1 & L_2)

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.

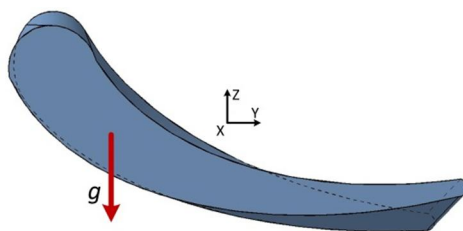
موقعیت نقاط جاسازی همراه با بردارهای نرمال و مماسی نخست و دوم در هر یک از آن‌ها در جدول 3 ارائه شده است.

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

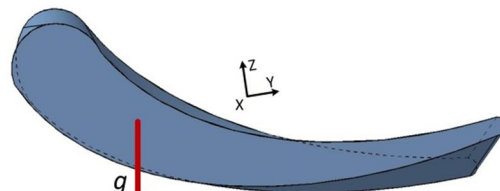
جدول 2 مقادیر نیروهای عکس‌العمل در موقعیت نزدیک به تماس با جاسازهای کناری (شکل 3-b) با احتساب صرفاً نیرو-ممان وزن

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

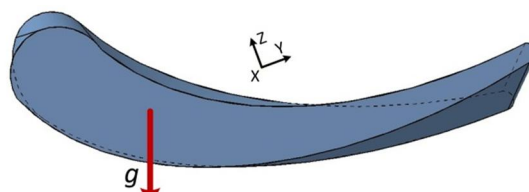
شماره جاساز	1	2	3
نیروها (N)	2.20	1.25	2.95
	-0.60	0.25	-0.04
	-0.66	-0.27	0.12



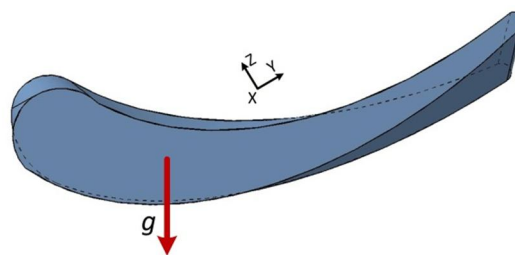
(a)
(الف)



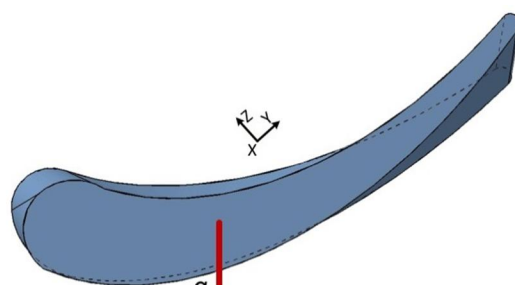
(b)
(ب)



(c)
(ج)



(d)
(د)



(e)
(ه)

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 نزدیک تر شده و

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

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

4-3- 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 3-d 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 کمینه 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 3-d)

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

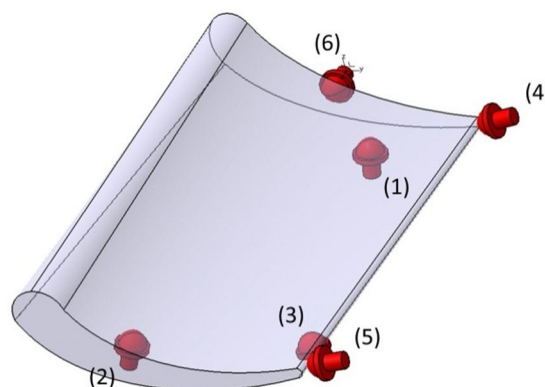


Fig. 6 The second locating plan with base locators near together for studying the effect of base locators distances on the workpiece stability
شکل 6 طرح جاسازی دوم (با جاسازهای پایه نزدیک به هم) برای مطالعه تأثیر فاصله جاسازهای پایه از هم روی پایداری قطعه‌کار

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)	6.75	-25.30	34.11	44.39	46.32	-10
	-20.82	-6.74	-13.49	-22.63	-8.75	-9
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 اول	0.00	0.00	0.00	0.99	0.99	0.00
(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 دوم	0.99	0.99	0.99	0.00	0.00	0.00
(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 3-c، 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

θ	زاویه بردار گرانش در صفحه YZ مدل پره توربین
θ_s	زاویه پایداری قطعه‌کار بر جاسازهای پایه
φ	بردار نیروهای عکس‌العمل در تمام جاسازها

زیر نویس‌ها

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. Ohwovoriole, 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.