



طراحی سیستم بست برای قطعات با هندسه شکل - آزاد

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 14115-111، nategh@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 خرداد 1395

پذیرش: 18 تیر 1395

ارائه در سایت: 24 شهریور 1395

کلید واژگان:

پره توربین

تحلیل پایداری

طراحی سیستم بست

طراحی قید و بند

هندسه شکل - آزاد

چکیده

طراحی قید و بند برای قطعات با هندسه شکل - آزاد نیاز به پردازش، محاسبات و هزینه بالاتری نسبت به قطعات چندوجهی دارد. نظر به این که طراحی سیستم جاسازی و بست هسته اصلی سامانه طراحی قید و بند را تشکیل می‌دهد، در این مقاله روشی تحلیلی برای طراحی سیستم بست به صورت خودکار برای این نوع از قطعات ارائه می‌شود. طراحی سیستم بست بر مبنای سه اصل اجرا می‌شود که نقاط اعمال بست از دو اصل اول تعیین شده و توسط اصل سوم، راستی آزمایی می‌گردد. اصول مذکور شامل کمترین تعداد بست، بیشترین مولفه نیروی بست در راستای اعمال جاسازها و حفظ پایداری استاتیکی قطعه کار در سیستم قید و بند است. پس از ارائه روش مدل‌سازی ریاضیاتی هر یک از این اصول، پیاده‌سازی نرم‌افزاری آن‌ها در محیط یکپارچه طراحی قید و بند به کمک رایانه (توسعه داده شده توسط نویسندگان مقاله) اجرا گردید. سه نمونه مطالعه موردی شامل مدل‌هایی از قطعات شکل - آزاد حاوی سطوح نریز برای سنجش عملکرد تحلیل پیاده‌سازی شده استفاده شد. کمترین تعداد بست محاسبه شده برای این مطالعات موردی همراه با پایداری قطعه کار در تماس با جاسازهای شش‌گانه و بست‌ها، نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالای روش ارائه شده در طراحی سیستم بست برای قطعات شکل - آزاد بود. قابلیت‌های طراحی خودکار سیستم بست برای قطعات (فارغ از نوع هندسه آن) و یکپارچه شدن با سایر ماژول‌های طراحی قید و بند (هم‌چون طراحی سیستم جاسازی) امکان استفاده صنعتی از این سیستم را فراهم می‌کند.

Design of clamping system for workpiece with freeform geometry

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 11 June 2016
 Accepted 08 July 2016
 Available Online 14 September 2016

Keywords:

Clamping System Design
 Fixture Design
 Free-form Geometry
 Stability Analysis
 Turbine Blade

ABSTRACT

Jig and fixture design for workpieces with freeform geometry has more complexity in comparison with the polyhedral parts. The locating and clamping system design construct the basis of the jig and fixture design activities. In this study, a theoretical analysis is suggested for automatic design of clamping points for freeform workpieces. The clamping design is performed in three main stages, in which the clamping application points are determined through the first two principles and are verified through the last stage. The mentioned principles consist of: (1) the minimum quantity of clamps, (2) the maximum clamping force components on the locating directions and (3) the workpiece static stability under the external wrenches. After mathematical modeling, the suggested analysis was implemented into the already designed CAFD framework by the authors. Three machining models were chosen as case studies to evaluate the capabilities of the implemented system in robust design of clamping layout. The minimum quantity of clamps (single clamp for two case studies and double clamp for the third one) was designed by the developed method that verified the robustness and reliability of the suggested and implemented clamping system design model. The automatic design of clamping scheme for workpieces (regardless of the geometry) besides its capability in integration with the other modules of fixture design activities provides the opportunity for the system to be used in industrial applications.

1- مقدمه

نیازهای اساسی قید و بند شامل اطلاعاتی همچون کارکرد قید و بند، نوع جاسازها و بست‌های مورد استفاده، شکل‌بندی کلی قید و بند و غیره همراه با طراحی لی‌اوت جاسازی و موقعیت و جهت اعمال بست‌ها اجرا می‌شود [2]. تعداد و جهت اعمال جاسازها و بست‌ها باید به گونه‌ای باشد که سیستم جاسازی کامل همراه با بست‌های قابل اطمینان برای قطعه کار فراهم آید [3]. نظر به اهمیت سیستم جاسازی و بست قطعه کار و ماهیت نظریه سیستم

طراحی قید و بند برای قطعه کار ماشین‌کاری در چهار مرحله طرح‌ریزی ستاپ‌ها، طرح‌ریزی قید و بند، طراحی واحدها و صحت‌سنجی اجرا می‌شود [1]. ماژول طرح‌ریزی قید و بند اصلی‌ترین مرحله طراحی است که خروجی آن، تعیین‌کننده سایر مراحل طراحی شامل انتخاب المان‌های مناسب، تعیین سازه قید و بند، نحوه مونتاژ المان‌ها و ... می‌باشد. در مرحله طرح‌ریزی،

طرح‌ریزی قید و بند، این ماژول مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. وظیفه سیستم جاسازی تعیین دقیق موقعیت و جهت اعمال جاسازها بر روی قطعه کار جهت نیل به سیستم جاسازی کامل است. سیستم بست نیز وظیفه حفظ پایداری قطعه کار بر روی سیستم جاسازی را با جلوگیری از جدایش قطعه کار از جاسازها دارد. آنالیزهای نظریه انجام شده در زمینه طراحی سیستم جاسازی و بست از مدل‌های مختلفی هم‌چون نظریه پیچ، مدل هندسی قید و بند، آنالیز نیرویی به کمک معادلات تعادل و ... همراه با ساده‌سازی‌هایی (برای حل آن‌ها) بهره می‌گیرند. علی‌رغم پژوهش‌های گسترده‌ای که در این بخش بر روی قطعات با هندسه چندوجهی اجرا شده است، طرح‌ریزی قید و بند برای قطعات با هندسه شکل-آزاد با استفاده از اصول صحیح طراحی (به دلیل پیچیدگی‌های آنالیز و مدل‌سازی این نوع قطعات) چندان مورد توجه قرار نگرفته است. این در حالیست که این نوع قطعات استفاده به مراتب گسترده‌تری در صنایع مختلف (مخصوصاً صنایع پیشرفته نیروگاهی، نظامی و...) دارند.

لذا، طراحی خودکار سیستم جاسازی و بست برای قطعات با هندسه شکل-آزاد می‌تواند فعالیت‌های طراحی قید و بند برای این قطعات را تا حد قابل توجهی سریع‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر نماید. در این بین، طراحی سیستم بست با استفاده از اصول ریاضیاتی قید و بند برای قطعات با هندسه شکل-آزاد از نوع نرَبز مورد توجه این پژوهش قرار گرفته است. طراحی چنین سیستمی برای این نوع از قطعات می‌بایست نیازهای مختلفی را هم‌چون اقتصادی بودن طرح، قابلیت اطمینان بالا و حتی‌الامکان ساده بودن طرح پاسخگو باشد.

2- پیشینه پژوهش

پیشینه پژوهش‌ها در زمینه طرح‌ریزی قید و بند را می‌توان به دو دسته کلی روش‌های طرح‌ریزی مستقیم و براساس بهینه‌سازی تقسیم‌بندی کرد. روش اول از اصول طراحی سیستم جاسازی و بست بر مبنای تکنولوژی گروهی، استدلال نمونه مبنای¹ و... استفاده کرده و با ایجاد پایگاهی از اطلاعات مربوط به قید و بندهای طراحی شده قبلی، به بازیابی اطلاعات براساس قطعه کار ورودی جدید می‌پردازد. با ایجاد تغییرات در اطلاعات بازیابی شده، قید و بند برای قطعه کار جدید طراحی می‌شود. روش‌های بر پایه بهینه‌سازی، با در نظر گرفتن پارامترهای اساسی (هم‌چون کمترین تغییر شکل الاستیک قطعه کار، بیشترین دقت جاسازی و...) به‌عنوان تابع هدف و اعمال قیود مشخص به طراحی سیستم جاسازی و بست می‌پردازند. نظریه پیچ‌واره یکی از ابزارهای مناسب برای طراحی سیستم جاسازی و بست است که توسط بال [4] شکل‌بندی و توسعه داده شد. این نظریه توسط اهووریل [5] و با تعریف سیستم‌های پیچ‌واره همراه با تعاریف دوسویی²، تقابل³ و دفع⁴ که براساس علامت ضریب کار مجازی محاسبه می‌شد، وارد عرصه طراحی قید و بندها شد. نظریه پیچ‌واره با توجه به قابلیت‌های بالای آن در ارتباط آنالیز سینماتیک و دینامیک مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. قابلیت بررسی شرط کامل بودن سیستم جاسازی نمونه‌ای از کارکردهای این نظریه در طراحی قید و بندها بود. آسادا و بای [6] مدل سینماتیک قید و بند را بر مبنای ماتریس ژاکوبی توسعه دادند. این ماتریس که براساس معادله سطح قطعه کار و با استفاده از نیرو-ممان‌های جاسازی تعریف شد، ارتباط بین

خطای موقعیت‌دهی قطعه کار با خطای ایجاد شده در جاسازها را مدل‌سازی می‌کرد. شرط کامل بودن سیستم جاسازی به صورت مرتبه کامل برای این ماتریس تعریف شد. چو، چاندرو و باراش [7] لی-اوت سیستم جاسازی را همراه با موقعیت اعمال بست‌ها برای قطعات با هندسه چندوجهی طراحی کرد. وی ماتریس جاسازی را با استفاده از نیروممان‌های جاسازی تعریف کرده و مرتبه کامل آن را به‌عنوان شرط اصلی برای کامل بودن طرح جاسازی مطرح کرد. در [8]، روشی نمونه مبنای برای طراحی سیستم جاسازی و بست برای قطعات با هندسه چندوجهی با استفاده از قید و بند با اجزای ماژولار ارائه شد. مدلی برای تعیین موقعیت اولیه نقاط جاسازی و بست برای قطعات چندوجهی با استفاده از قوانین تجربی در [9] ارائه شد. مبنای اصلاح موقعیت‌های اولیه، کمترین اندازه تغییر شکل قطعه کار در اثر نیروهای اعمالی از طرف بست‌ها و ماشین‌کاری بود. در پژوهشی مشابه، دو پایگاه داده شامل المان‌های قابل تغییر شکل‌بندی و پایگاه روابط مونتاژی در [10] برای طرح‌ریزی قید و بند برای قطعه کار جدید ورودی ارائه شد. روش ارائه شده در سه مرحله آنالیز تشابه، تعیین مغایرت‌ها و اعمال اصلاحات لازم به طرح بازیابی شده فعالیت می‌کرد. مارین و فریرا [11]، از نظریه پیچ‌واره برای طراحی سیستم جاسازی و بست برای قطعات با هندسه چندوجهی استفاده کرد. در این روش، اغتشاش‌های وارده بر قطعه کار بصورت پیچ⁵ مدل‌سازی شدند. نواحی دوسو، تقابل و دفع براساس تصویر کردن این پیچ‌ها روی سطوح جاسازی (با فرض مشخص بودن سه سطح جاسازی) تعیین و موقعیت بهترین جاسازها بر روی آن‌ها تعیین شد. پاور و گنگورد [12]، پیاده‌سازی نرم‌افزاری روش ارائه شده در [11] را اجرا و با استفاده از مطالعات موردی قطعات چندوجهی، عملکرد آن را ارزیابی کرد. همچنین، از روش ارائه شده در [11] برای سنجش عملکرد بستر یکپارچه طراحی قید و بندها به کمک رایانه در [13] نیز استفاده شد.

روش‌های بهینه‌سازی با توابع هدف مشخص برای تعیین لی-اوت جاسازی و بست مناسب توسط پژوهشگران مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. کریشناکومار و ملکوتی [14]، روشی بر پایه بهینه‌سازی موقعیت جاسازها با تابع هدف کمینه تغییر شکل الاستیک قطعه کار تحت نیروهای ماشین‌کاری و بست ارائه کرد. پلینسکو و وانگ [15] تابع هدف را در پژوهشی مشابه به دقت جاسازی، جاسازی کامل و کمترین نیروهای عکس‌العمل در جاسازها تغییر و براساس آن، به طراحی لی-اوت جاسازی پرداختند. در [16]، روشی بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی هم‌زمان کمینه اندازه تغییر شکل الاستیک قطعه کار و موقعیت جاسازها بر روی سطوح قطعه کار ارائه شد. پس از حل، نتیجه بر آن شد که جواب به‌دست آمده از بهینه‌سازی ترکیبی دارای جواب بهتری نسبت به بهینه‌سازی جداگانه هریک از عوامل تغییر شکل الاستیک و موقعیت جاسازها بر روی سطوح جاسازی است.

با تغییر هندسه قطعه کار از حالت چندوجهی به حالت شکل-آزاد، حجم فعالیت‌های لازم برای طراحی مدل و قید و بند به مراتب افزون‌تر می‌شود. ناطق [17] گزارشی از انواع روش‌های تجربی و خلاقانه برای طراحی قید و بند برای این نوع از قطعات را ارائه نمود که شامل شکل‌بندی بین‌های آرایه‌ای، مواد با قابلیت تغییر فاز، گیره‌های لغزان و... بود. با توجه به یکپارچگی و قابلیت تحلیل روش بین‌های آرایه‌ای و هم‌زمان با افزایش قابلیت‌های روش‌های بهینه‌سازی چند متغیره، روش بهینه‌سازی موقعیت

¹ Case based reasoning

² Reciprocity

³ Contrary

⁴ Repelling

⁵ Twist

عملکرد سیستم استفاده گردید. کمینه تعداد بست‌ها، موقعیت مناسب محاسبه شده همراه با تایید پایداری قطعه کار نشان‌دهنده قابلیت اطمینان روش ارائه شده برای طراحی سیستم بست قطعات شکل-آزاد بود.

3- مدل سازی

پژوهش حاضر در ادامه مجموعه مقالاتی است که در [23] برای طراحی سیستم جاسازی برای قطعات با هندسه شکل-آزاد با استفاده از اصل محدود کردن درجات آزادی قطعه با بیشترین شدت ممکن، در [24] برای آنالیز پایداری استاتیک این نوع از قطعات و در [25] برای آنالیز گیر این نوع قطعات در سیستم جاسازی ارائه گردید. همان گونه که عنوان گردید، سیستم از سه اصل عمده کمترین تعداد بست، بیشترین مولفه نیروی بست روی جهات جاسازی و حفظ پایداری قطعه کار تحت اثر نیروهای بست و وزن برای طراحی سیستم بست قطعات استفاده می‌کند. مدل سازی ریاضی هر یک از اصول سه گانه مذکور با استفاده از نظریه پیچ‌واره و اصل کمینه اندازه نیروها اجرا می‌شود. برای اجرای مدل سازی، فرض‌های زیر در نظر گرفته شده است:

- لی-اوت جاسازی طراحی شده و موقعیت و جهت اعمال جاسازها تعیین شده است.
- بست‌ها در هر نقطه عمود بر پروفیل سطح عمل می‌کنند.
- سطوح جاسازی و سطوح ماشین کاری مشخص شده‌اند. بقیه سطوح موجود در قطعه کار می‌توانند به‌عنوان کاندید بست مطرح شوند.
- ضریب اصطکاک مشخص و در تمام تماس‌های بین المان‌های قید و بند و قطعه کار برابر است.

الگوریتم فلوجارت مورد استفاده برای طراحی سیستم بست با استفاده از اصول سه‌گانه اشاره شده، در "شکل 1" ارائه شده است. سیستم طراحی بست پیشنهادی برای نیل به کمترین تعداد بست، ابتدا شکل‌بندی تک‌بستی را انتخاب کرده و با استفاده از اصل بیشترین مولفه نیروی بست در جهات اعمال جاسازها، سعی بر محاسبه بهترین نقطه اعمال بست بر روی بهترین کاندید می‌کند. اگر نقطه محاسبه شده به‌گونه‌ای باشد که قطعه کار بتواند تست پایداری را بگذراند، سیستم تک‌بستی انتخاب می‌شود.

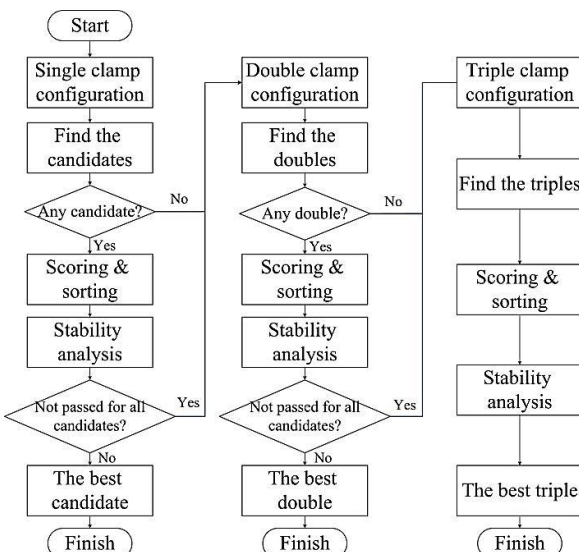


Fig. 1 Flowchart of the suggested model for clamping system design of workpieces with freeform geometry

شکل 1 الگوریتم فلوجارت سیستم پیشنهادی برای طراحی سیستم بست قطعات با هندسه شکل-آزاد

بین‌های آرایه‌ای بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. هورتادو و ملوکوتو [18] در گزارشی مفصل، به بهینه‌سازی تعداد، ابعاد و موقعیت اعمال بین‌های آرایه‌ای بر روی سطح قطعه کار با هدف نیل به بیشترین هماهنگی بین بین‌ها و پروفیل سطح قطعه کار، حفظ پایداری قطعه کار حین ماشین کاری و محدود کردن تغییر شکل قطعه کار در حد مشخص (که توسط کاربر تعریف می‌شد) پرداخت. در پژوهشی مشابه، افزری [19] به بهینه‌سازی موقعیت اعمال جاسازها در پیرامون قطعه کار با هدف کمترین تغییر شکل الاستیک قطعه کار همراه با کمینه لغزش بین قطعه کار و بین‌ها پرداخت. بین‌ها در دو ردیف مقابل هم قرار می‌گرفتند که یکی ردیف به‌عنوان جاسازها و دیگری به مثابه بست عمل می‌کرد. با حل مساله بهینه‌سازی با الگوریتم ترکیبی ژنتیک و مورچگان، موقعیت بهینه بین‌ها محاسبه می‌شد. در [20]، موقعیت اعمال بهترین جاسازها بر روی قطعه کار با استفاده از الگوریتم ژنتیک محاسبه شد. با مش بندی سطوح قطعه کار در نرم‌افزار آباکوس و استفاده از ماتریس جاسازی به عنوان تابع برازش، موقعیت و جهت اعمال جاسازها بر روی نمونه‌هایی از مطالعات موردی حاوی سطوح شکل-آزاد محاسبه گردید. جیانگ و همکاران [21] روشی بر مبنای بهینه‌سازی چند متغیره برای تعیین لی-اوت جاسازی برای قید و بندهای تایید و رد قطعه کار با توابع هدف ترکیبی دقت جاسازی، پایداری قطعه کار و سهولت باربرداری قطعه کار در قید و بند ارائه نمود. ایده اصلی در روش ارائه شده استفاده از توابع پارامتریک برای سطوح قطعه کار بود که منجر به جستجوی پیوسته بر روی سطح برای نیل به بهترین نقاط جاسازی می‌شد. ژیونگ، مولفینو و زاپی [22] سیستم جاسازی جدید 1-2-1-N را برای قطعات انعطاف‌پذیر در صنایع هوا و فضا با N جاساز پایه هوشمند و قابل کنترل، دو جاساز ساده کناری، یک جاساز ساده توقف همراه با یک جاساز هوشمند که همراه با ابزار حرکت کرده و مانع از تغییر شکل موضعی در نواحی فعال ماشین کاری می‌شد، ارائه نمود. تابع هدف بهینه‌سازی، کمینه تغییر شکل الاستیک قطعه کار همراه با کمینه‌سازی تغییر شکل در نواحی فعال ماشین کاری بود.

در پیشینه پژوهش، روش‌های طرح‌ریزی قید و بند به دو دسته روش‌های بر پایه بهینه‌سازی و روش‌های رو به جلو تقسیم شد. روش‌های بر پایه بهینه‌سازی دارای محدودیت‌هایی هم‌چون حجم محاسبات بالا و محدودیت در انتخاب تابع هدف است. روش‌های غیر بهینه‌سازی براساس استدلال نمونه مینا نیز نیاز به پایگاه داده با اطلاعات قید و بندهای پیشین دارند که اکثراً برای قطعات با هندسه چندوجهی قابل استفاده است. پیشینه پژوهش وسیعی در رابطه با طراحی سیستم جاسازی برای قطعات با هندسه چندوجهی وجود دارد. ولیکن، طراحی سیستم بست برای قطعات با هندسه شکل-آزاد چندان مورد توجه قرار نگرفته است. این در حالیست که سیستم بست یکی از پارامترهای تاثیرگذار در اقتصاد طراحی قید و بند به‌شمار می‌رود و نیاز به آنالیز و تحلیل تئوری دارد. در این مقاله، روشی بر مبنای تحلیل ترکیبی نظریه پیچ‌واره و اصل کمینه اندازه نیروها برای نیل به کمترین تعداد بست برای قطعات با هندسه شکل-آزاد ارائه می‌شود. این سیستم از سه اصل برای طراحی لی-اوت بست استفاده می‌کند: (1) کمترین تعداد بست‌ها (2) بیشترین مولفه نیروهای بست روی جهات جاسازی و (3) پایداری قطعه کار تحت اثر نیروهای بست و وزن. برای تحلیل تئوری هر یک از اصول مذکور، از نظریه پیچ‌واره همراه با اصل کمینه اندازه نیروها استفاده گردید. آنالیز ارائه شده در محیط بستر یکپارچه طراحی قید و بند به‌کمک رایانه که توسط نویسندگان مقاله در [13] ارائه شده است، پیاده‌سازی نرم‌افزاری شد. سه نمونه مطالعه موردی حاوی سطوح شکل-آزاد از نوع نریز برای سنجش

گنجانده شده است. سیستم طراحی بست ابتدا از شکل‌بندی تک‌بستی شروع کرده و شرایط لازم برای انتخاب این شکل‌بندی برای قطعه‌کار را می‌سنجد. در صورت عدم ارضا شرایط لازم، سیستم به سمت شکل‌بندی‌های دو و سه بستی پیش می‌رود. با انتخاب چنین مکانیزمی، همواره کمترین تعداد بست برای قطعه‌کار انتخاب می‌شود.

3-2- بیشترین مولفه نیروی بست در راستای اعمال جاسازها

برای پیاده‌سازی این اصل از نظریه پیچ‌واره استفاده می‌شود. وظیفه سیستم جاسازی، مقید کردن حرکت قطعه‌کار در فضای سه‌بعدی است. این محدود کردن در جهت قرارگیری جاسازها بر روی سطوح قطعه‌کار انجام می‌شود. مطابق با فرضیات ارائه شده در بخش 3، جاساز عمود بر پروفیل سطح عمل کرده و درجه آزادی قطعه‌کار را در جهت نرمال سطح² در نقطه جاسازی محدود می‌کند. ولیکن، قطعه‌کار هم‌چنان می‌تواند در راستای خلاف جهت بردار نرمال در نقاط جاسازی حرکت داشته باشد. این حرکت قطعه‌کار با نام درجه آزادی محدود نشده نام‌گذاری شده (شکل 2) و با یک پیچ به صورت رابطه (1) مدل‌سازی می‌شود:

$$\vec{T}_i = [\vec{\omega}_i, \vec{r}_i \times \vec{\omega}_i + \vec{V}_i]; \quad i = 1 - 6 \quad (1)$$

در این رابطه، $\vec{\omega}_i$ و \vec{V}_i سرعت دورانی و خطی قطعه‌کار در نقطه جاسازی نام (که بیانگر درجات آزادی قطعه‌کار هستند) بوده و \vec{r}_i موقعیت اعمال جاساز نام روی قطعه‌کار است. با توجه به این‌که جاسازها صرفاً برای محدود کردن درجات آزادی خطی قطعه‌کار طراحی می‌شوند، مقدار $\vec{\omega}_i = 0$ است. لذا، رابطه (1) به صورت رابطه (2) ساده‌سازی می‌شود:

$$\vec{T}_i = [\vec{0}, -\vec{n}_i]; \quad i = 1 - 6 \quad (2)$$

در رابطه (2)، \vec{n}_i بردار نرمال پروفیل سطح قطعه‌کار در نقطه جاسازی نام است. برای طراحی سیستم بست، تمام سطوح موجود در قطعه‌کار می‌بایست مش‌بندی شده و نقاط روی آن همراه با بردارهای نرمال سطوح در آن نقاط محاسبه می‌شوند.

برای مدل‌سازی بست، از فضای نیرویی نظریه پیچ‌واره استفاده می‌شود. نظر به این‌که وظیفه سیستم بست حفظ تماس قطعه‌کار با جاسازها است، لذا نیرویی در راستای بست به قطعه‌کار وارد می‌شود که نشان‌دهنده ماهیت

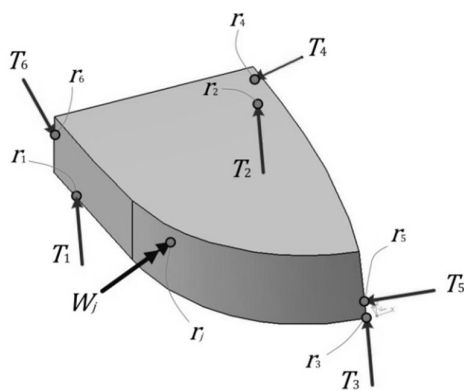


Fig. 2 Modelling of locating and clamping systems as twists for the unconstrained DOF and wrenches (respectively)

شکل 2 مدل‌سازی سیستم جاسازی در قالب پیچ به برای درجات آزادی محدود نشده و سیستم بست به صورت نیروممان

چنانچه یکی از شرایط زیر اتفاق بیفتد، سیستم به صورت خودکار وارد حالت دوبرستی می‌شود.

- هیچ نقطه اعمال بست روی هیچ کاندیدی موجود نباشد که نسبت به تمام جاسازهای قطعه‌کار حالت تقابل داشته باشد.
- با وجود نقطه یا نقاطی که شرط فوق را ارضا می‌کنند، قطعه‌کار نتواند تست پایداری را با اعمال بست در آن نقاط بگذراند.

با ورود سیستم به شکل‌بندی دو بستی، مدل‌سازی اصل بیشترین مولفه نیروهای بست روی جهات اعمال جاسازها اجرا می‌شود. طبق این آنالیز، هر بستی (روی یکی از کاندیدها) که بتواند همراه با بست دیگر (روی همان کاندید یا سایر کاندیدها) بیشترین مولفه را روی جهات جاسازی اعمال کند، با آن نقطه جفت شده و به‌عنوان یکی از نامزدهای شکل‌بندی دو بستی انتخاب می‌شود. طبیعی است که هر بستی می‌تواند روی یک تعداد از جاسازها مولفه مناسب را ایجاد کرده و روی تعداد دیگری مولفه مناسب نداشته باشد. لذا، بست دوم می‌بایست بر روی جاسازهایی که مولفه لازم را از بست اول کسب نکرده‌اند، مولفه لازم را اعمال کند. با پیدا کردن تمام این جفت‌ها روی تمام سطوح کاندید، امتیازدهی به آن‌ها انجام شده و تمام آن‌ها براساس امتیاز کسب شده مرتب‌سازی می‌شوند. اولین جفتی که قطعه‌کار بتواند با اعمال بست در آن نقاط، تست پایداری را بگذراند، به‌عنوان جفت مناسب در شکل‌بندی دو بستی انتخاب می‌شود.

اگر یکی از شرایط زیر ارضا شود، سیستم به صورت خودکار وارد حالت بررسی شکل‌بندی سه‌بستی می‌شود:

- هیچ جفت مناسبی که بتواند با هم روی تمام جاسازها مولفه لازم را اعمال کنند، پیدا نشود.
- با وجود جفت مناسب، قطعه‌کار نتواند تست پایداری را با اعمال بست در آن نقاط بگذراند.

با وقوع هر یک از شرایط فوق، شکل‌بندی سه‌بستی با روشی مشابه با شکل‌بندی دوبرستی شروع به فعالیت می‌کند. در این شکل‌بندی، اولین نقطه نامزد اعمال بست انتخاب شده و شماره جاسازهایی که این بست مولفه لازم را روی آن‌ها دارد، شناسایی می‌شود. سپس، جستجو برای یافتن نامزد بست دوم روی همان کاندید یا سایر کاندیدها شروع می‌شود. مشخصاً، بست دوم نمی‌تواند بر روی تمام جاسازهایی که مولفه لازم از بست اول را کسب نکرده‌اند، مولفه مناسب اعمال کند. لذا، تنها تعدادی از این جاسازها، مولفه لازم از بست دوم را دریافت می‌کند. در این مرحله، هنوز جاسازهایی باقی مانده‌اند که مولفه‌ای از دو بست پیدا شده دریافت نکرده‌اند. جستجو برای یافتن بست سوم که بتواند مولفه مناسب را روی این جاسازها اعمال کند، آغاز می‌شود. اگر نقطه‌ای پیدا شد، آن نقطه به جمع نقاط اول و دوم اضافه شده و یک مجموعه سه‌تایی¹ را تشکیل می‌دهد. با محاسبه این مجموعه‌های سه‌تایی روی تمام کاندیدها، روشی برای امتیازدهی آن‌ها ارائه شده و مرتب‌سازی انجام می‌شود. اولین سه‌تایی که قطعه‌کار بتواند با اعمال بست روی آن نقاط، تست پایداری را بگذراند، به‌عنوان سه‌تایی بست برای قطعه‌کار انتخاب می‌شود.

ذیلاً به بررسی تک به تک هر یک از اصول همراه با نحوه مدل‌سازی ریاضی آن پرداخته می‌شود.

3-1- اصل کمترین تعداد بست

این اصل به صورت ذاتی در الگوریتم فلوچارت ارائه شده در "شکل 1"

² Surface normal

¹ Triple

نیروی بست است. بست را می‌توان در نظریه پیچ‌واره به صورت یک نیرو-ممان¹ مدل کرد (شکل 2):

این که ممکن است چندین نقطه نامزد چنین شرطی را ارضا کنند، ابتدا تمام آن‌ها در مجموعه \vec{SC}_{cand} ³ ذخیره می‌شوند. مجموعه نامزدهای تک بست روی تمام سطوح کاندید است. سپس، روشی برای امتیازدهی به آن‌ها به صورت رابطه (7) ارائه می‌شود.

$$SC_p = \sum_{i=1}^6 |\vec{VC}_{L_i, C_j}| \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

با عنوان امتیاز هر یک از نامزدهای تک بست تعریف می‌شود. آن تک‌بستی که دارای امتیاز (SC_p) بیشتر باشد، به عنوان بهترین تک‌بست انتخاب می‌شود. لذا، نامزدهای تک‌بست مجموعه \vec{SC}_{cand} براساس امتیاز SC_p مرتب‌سازی می‌شوند. اولین تک‌بستی که قطعه‌کار بتواند با اعمال بست در آن نقطه (با شدت مناسب) پایداری خود را حفظ کند، به عنوان تک‌بست برای قطعه‌کار انتخاب می‌شود.

2-2-3- شکل‌بندی دوبستی

چنانچه هیچ نقطه نامزدی نباشد که شرط $\max(NO_{neg.Vc}) = 6$ را بگذرانند یا هیچ‌یک از نامزدها پایداری قطعه‌کار را تامین نکنند، سیستم وارد شکل‌بندی دو بست می‌شود. برای هر نقطه نامزد موجود روی هر یک از سطوح کاندیدها روش زیر می‌بایست اجرا شود.

- 1- اولین سطح کاندید انتخاب شده و نقطه نامزد اول از این کاندید مشخص می‌شود. سپس، آنالیز برای پیدا کردن جفت مناسب آن شروع می‌شود.
- 2- نقطه اول، مولفه لازم را بر روی برخی از جاسازها را داشته و روی برخی دیگر ندارد. برای تعیین شماره این جاسازها، \vec{VC}_{L_i, C_j} مربوط به این نقطه فراخوانی شده و مقادیر منفی و مقادیر مثبت آن تعیین می‌شود. مقادیر منفی آن جاسازهایی را نشان می‌دهد که بست روی آن‌ها مولفه مناسب را دارد. مقادیر مثبت نیز آن جاسازهایی را نشان می‌دهد که مولفه مناسب را از بست دریافت نکرده‌اند. چهار بردار برای نقطه نامزد اول به صورت رابطه (8) تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} \vec{r}\vec{q}_1 &= \{ \vec{VC}_{L_i, C_j} | \vec{VC}_{L_i, C_j} > 0 \} \\ \vec{r}\vec{s}_1 &= \{ \vec{VC}_{L_i, C_j} | \vec{VC}_{L_i, C_j} < 0 \} \\ \vec{r}\vec{q}_{1ind} &= \{ i | \vec{VC}_{L_i, C_j} > 0 \} \\ \vec{r}\vec{s}_{1ind} &= \{ i | \vec{VC}_{L_i, C_j} < 0 \} \end{aligned} \quad (8)$$

در این رابطه، $\vec{r}\vec{q}_1$ و $\vec{r}\vec{s}_1$ به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر منفی و مثبت برای \vec{VC}_{L_i, C_j} است. بردارهای $\vec{r}\vec{q}_{1ind}$ و $\vec{r}\vec{s}_{1ind}$ نیز شماره جاسازهای گروه اول (که مولفه لازم را از بست اول را کسب کرده‌اند) و گروه دوم (که مولفه لازم را از بست اول را کسب نکرده‌اند) است.

با استفاده از این بردارها، می‌توان بست دوم را به گونه‌ای انتخاب کرد که دارای مولفه لازم روی جاسازهایی باشد که نتوانسته‌اند مولفه مناسب از بست اول کسب کنند.

3- جستجو برای یافتن چنین جفتی آغاز می‌شود. شرط اصلی برای یک نقطه نامزد که بتواند به عنوان جفت مناسب برای نقطه اول مطرح شود، بصورت رابطه (9) ارائه می‌شود:

$$\vec{r}\vec{q}_{1ind} \subseteq \vec{r}\vec{s}_{2ind} \quad (9)$$

در این رابطه، $\vec{r}\vec{s}_{2ind}$ لیست شماره جاسازهایی است که نامزد بست

$$\vec{W}_j = [\vec{F}_j, (\vec{r}_j \times \vec{F}_j) + \vec{M}_j]; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

در این رابطه، \vec{F}_j و \vec{M}_j نیرو و گشتاور بست اعمالی زام، \vec{r}_j موقعیت اعمال بست زام و m تعداد بست‌ها است. برای محاسبه این نیروممان، موقعیت هر یک از نامزدهای بست روی هر سطح کاندید (\vec{r}_j) مشخص می‌شود. با فرض جهت اعمال بست به صورت عمود بر پروفیل سطح در خلاف جهت بردار نرمال آن، نیروممان W_j را می‌توان از رابطه (4) محاسبه نمود:

$$\vec{W}_j = [-\vec{n}_j, \vec{r}_j \times -\vec{n}_j]; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

برای مدل‌سازی اصل بیشترین مولفه نیروی بست در راستای اعمال جاسازها، ضریب کار مجازی بین هر یک از نیروممان‌های بست (\vec{W}_j) و پیچ‌های درجات آزادی محدود نشده (\vec{T}_i) می‌بایست محاسبه شود. رابطه (5) برای محاسبه این پارامتر استفاده می‌شود:

$$\vec{VC}_{L_i, C_j} = \sigma(\vec{W}_j, \vec{T}_i) = (\vec{0} \cdot (\vec{r}_j \times -\vec{n}_j) + \vec{n}_i \cdot \vec{n}_j) = \vec{n}_i \cdot \vec{n}_j \quad (5)$$

در رابطه (5)، زیرنویس L_i بیانگر جاساز i ام و C_j نشان‌دهنده بست زام است. همچنین، \vec{VC}_{L_i, C_j} ² بیانگر ضریب کار مجازی بین پیچ جاسازی i ام و نیروممان بست زام است. بردار \vec{VC}_{L_i, C_j} برای هر نقطه بست دارای شش مولفه مثبت یا منفی است. مقادیر منفی نشان‌دهنده مولفه مناسب بست روی جاساز و مقدار مثبت بیانگر عدم ایجاد مولفه لازم توسط بست روی جاساز است. از بین این شش مولفه، صرفاً مقادیر منفی ($\vec{VC}_{L_i, C_j} < 0$) برای طراحی بست استفاده می‌شود. با محاسبه مقدار این پارامتر برای هر یک از سطوح کاندید بست، می‌توان نوشت:

$$\vec{VC}_{cand} = \{ \vec{VC}_{L_i, C_1}, \vec{VC}_{L_i, C_2}, \dots, \vec{VC}_{L_i, C_m} \} \quad (6)$$

در این رابطه، \vec{VC}_{cand} نشان‌دهنده ضریب کار مجازی بین هر یک از نامزدهای بست و جاسازهای شش‌گانه برای تمام سطوح کاندید موجود در مدل است. مقدار مثبت برای هر یک از مولفه‌های شش‌گانه موجود در هر یک از \vec{VC}_{L_i, C_j} برای طراحی بست قابل استفاده نبوده و صرفاً مقادیر منفی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای کسب مولفه مناسب بست روی جاسازها، پارامتری به نام شدت تقابل (C_p) تعریف می‌شود. بازه پیشنهادی برای این پارامتر به صورت $[0.1, 0.3]$ است. با استفاده از این پارامتر، تنها بست‌هایی انتخاب می‌شوند که بتوانند شرط ($|\vec{VC}_{L_i, C_j}| > C_p$) را در مواجهه با جاسازها ارضا کنند. از شش مقدار موجود در \vec{VC}_{L_i, C_j} برای هر نامزد بست، تعداد مقادیر منفی در $NO_{neg.Vc}$ ذخیره می‌شود. بیشترین مقدار این پارامتر در هر سطح کاندید بست مشخص شده و در $\max(NO_{neg.Vc})$ ذخیره می‌شود. با استفاده از این پارامتر، که مقدار آن در بازه $0 \leq \max(NO_{neg.Vc}) \leq 6$ است، می‌توان قابلیت استفاده از سیستم تک‌بستی، دو بست و سه بست را تعیین نمود.

2-2-3- شکل‌بندی تک‌بستی

اگر کاندیدی وجود داشته باشد که شرط $\max(NO_{neg.Vc}) = 6$ را ارضا کند، یک یا چند نامزد احتمالی بست بر روی آن وجود دارند که شرط

¹ Wrench

² Virtual coefficient between L_i and C_j

³ Single clamp candidates

3- در این مرحله، هنوز تعدادی از جاسازها مولفه مناسب بست را از بست اول و دوم دریافت نکرده‌اند. لیست این جاسازها به صورت رابطه (12) تعیین می‌شود:

$$(\vec{r}q_{1\text{ind}})_U = \vec{r}q_{1\text{ind}} - \vec{r}S_{2\text{ind}} \quad (12)$$

4- جستجو در همین کاندید و سایر کاندیدها برای پیدا کردن نقطه مناسب بست سوم شروع می‌شود. چنانچه شرط ارائه شده در رابطه (13) برای نقطه نامزدی ارضا شود، آن نقطه به نقاط بست اول و دوم افزوده می‌شود.

$$(\vec{r}q_{1\text{ind}})_U \subseteq \vec{r}S_{3\text{ind}} \quad (13)$$

که در آن، $\vec{r}S_{3\text{ind}}$ لیست جاسازهایی است که مولفه مناسب را از نقطه سوم بست دریافت می‌کنند. به عبارت دیگر، چنانچه جاسازهای $(\vec{r}q_{1\text{ind}})_U$ زیر مجموعه جاسازهایی باشد که مولفه مناسب را از بست سوم دریافت کرده‌اند، آن نقطه به جفت اول و دوم اضافه شده و تشکیل یک سه‌تایی را می‌دهد.

5- تمام سه‌تایی‌های موجود بر روی تمام کاندیدها شناسایی و در بردار TC_{cand} ذخیره می‌شوند. با توجه به این‌که معمولاً تعداد این سه‌تایی‌ها زیاد است، روشی برای امتیازدهی آن‌ها به صورت رابطه (14) ارائه می‌شود:

$$TC_p = \left(\sum_{i=1}^{l_{rs1}} |\vec{V}_{C_{L_i,C_j}}| \right)_{cl_1} + \left(\sum_{i=1}^{l_{rs2}} |\vec{V}_{C_{L_i,C_j}}| \right)_{cl_2} + \left(\sum_{i=1}^{l_{rs3}} |\vec{V}_{C_{L_i,C_j}}| \right)_{cl_3} \quad \left| \vec{V}_{C_{L_i,C_j}} < 0 \right. \quad (14)$$

که در آن، l_{rs3} نشان‌دهنده تعداد المان‌های موجود در لیست $(\vec{r}S_3)$ و cl_3 نشانگر بست سوم است. TC_p نشان‌دهنده امتیاز کسب شده توسط هر یک از سه‌تایی‌های نامزد است. هر سه‌تایی که بیشترین امتیاز را کسب کرده باشد، به عنوان بهترین نامزد به آزمایش پایداری قطعه کار معرفی می‌شود. نظر به این‌که تمام سه‌تایی‌های بست که به این مرحله رسیده‌اند، شرط بیشینه مولفه نیروی بست بر روی بیشترین تعداد جاسازها را تامین کرده‌اند، امتیازدهی آن‌ها بر مبنای مقدار مولفه $(|\vec{V}_{C_{L_i,C_j}}|)$ بیشتر صورت می‌پذیرد. به عبارت دیگر آن سه‌تایی که دارای شدت مولفه تصویر شده بیشتر روی جهات جاسازی نسبت به بقیه باشد، امتیاز بیشتری را کسب می‌کند.

6- با مرتب‌سازی المان‌های موجود در TC_{cand} بر اساس امتیاز کسب شده از رابطه (14)، آن سه‌تایی که قطعه کار بتواند پایداری خود را با اعمال بست در آن‌ها حفظ کند، به عنوان بهترین سه‌تایی برای قطعه کار انتخاب می‌شود.

با اجرای تحلیل ارائه شده برای اصل بیشترین مولفه نیروی بست روی بیشترین تعداد جاسازها، مجموعه‌ای از بهترین بست‌ها برای هر قطعه کار انتخاب می‌شود. این لیست مرتب‌سازی شده می‌بایست از آزمایش پایداری قطعه کار بگذرد تا انتخاب بست مناسب نهایی شود.

3-3- اصل پایداری قطعه کار

برای آنالیز این اصل از روشی که در [26] ارائه گردید، با اجرای تنظیماتی

دوم می‌تواند مولفه لازم را روی آن‌ها اعمال کند. این رابطه بیان می‌دارد که اگر جاسازهای که مولفه مناسب را از بست اول دریافت نکرده‌اند، زیر مجموعه‌ای از $\vec{r}S_{2\text{ind}}$ باشند، دو نامزد با هم جفت شده و به لیست DC_{cand} افزوده می‌شوند.

4- با توجه به این‌که تعداد زیادی از این جفت‌ها در قطعه کار پیدا می‌شوند، روشی برای امتیازدهی به آن‌ها ارائه می‌شود. امتیاز هر یک از این جفت‌ها را می‌توان از رابطه (10) محاسبه نمود. در این رابطه، l_{rs1} و l_{rs2} تعداد المان‌های موجود در $\vec{r}S_{1\text{ind}}$ و $\vec{r}S_{2\text{ind}}$ است. $\vec{r}S_{1\text{ind}}$ و $\vec{r}S_{2\text{ind}}$ نیز نشان‌دهنده شماره جاسازهایی هستند که مولفه مناسب را از بست اول و دوم کسب کرده‌اند. مبنای امتیازدهی به جفت جاسازها بر اساس شدت مولفه آن‌ها روی همین جاسازها است. هر چند که تمام جفت جاسازهای ورودی به این مرحله، شرط لزوم پوشش‌دهی همه جاسازها را گذرانده‌اند و لیکن، آن بست‌هایی که بتواند شدت مولفه $(|\vec{V}_{C_{L_i,C_j}}|)$ بیشتری را به مولفه‌های بست اول اضافه کند، امتیاز بیشتری را کسب می‌کند.

$$DC_p = \left(\sum_{i=1}^{l_{rs1}} |\vec{V}_{C_{L_i,C_j}}| \right)_{cl_1} \left| \vec{V}_{C_{L_i,C_j}} < 0 \right. + \left(\sum_{i=1}^{l_{rs2}} |\vec{V}_{C_{L_i,C_j}}| \right)_{cl_2} \quad (10)$$

5- اولین جفت در DC_{cand} که قطعه کار بتواند با اعمال بست در آن نقاط پایداری خود را حفظ کند، به عنوان جفت مناسب در سیستم دو بست‌ی انتخاب می‌شود.

3-2-3- شکل‌بندی سه‌بستی

چنانچه هیچ جفت مناسبی در شکل‌بندی دو بست‌ی پیدا نشد یا علی‌رغم وجود جفت مناسب، قطعه کار پایداری خود را نتوانست با اعمال بست در آن نقاط حفظ کند، سیستم وارد شکل‌بندی سه‌بستی خواهد شد. در این شکل-بندی نیز آنالیز مولفه بست روی جاسازها به صورت مشابه با بخش 3-2-2 مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش زیر برای مدل‌سازی این شکل‌بندی ارائه می‌شود.

1- اولین سطح کاندید انتخاب شده و نقطه نامزد بست اول بر روی آن تعیین می‌شود. بردارهای $\vec{r}q_1$ ، $\vec{r}S_1$ ، $\vec{r}q_{1\text{ind}}$ و $\vec{r}S_{1\text{ind}}$ برای این نقطه از رابطه (8) محاسبه می‌شوند.

2- جستجو برای یافتن دومین نامزد مناسب برای نقطه اول در همان کاندید و بقیه کاندیدها آغاز می‌شود. نقطه‌ای باید پیدا شود که بتواند روی تمام جاسازهایی که مولفه مناسب را از بست اول دریافت نکرده‌اند، مولفه مناسب اعمال کند. مشخصاً، چنین نقطه‌ای پیدا نمی‌شود. لذا، اگر نامزد دوم نتوانست روی تعدادی از جاسازهای موجود در بردار $(\vec{r}q_{1\text{ind}})$ مولفه مناسب اعمال کند، به نقطه اول افزوده می‌شود. این شرط را به صورت ریاضی می‌توان در رابطه (11) مشاهده نمود.

$$\vec{r}S_{2\text{ind}} \subseteq \vec{r}q_{1\text{ind}} \quad (11)$$

در رابطه (11)، $\vec{r}S_{2\text{ind}}$ شماره جاسازهایی است که نقطه دوم بست می‌تواند مولفه لازم را روی آن‌ها اعمال کند.

² Triple clamp candidates

¹ Double clamp candidates

در این رابطه، \vec{W}_c نیروممان برآیند بست ناشی از \vec{W}_j ($j = 1, 2, \dots, m$) و \vec{W}_g نیروممان ناشی از وزن قطعه کار است.

قید (b) شرط حفظ تماس قطعه کار با جاسازها شش گانه را تبیین می کند. بدین صورت که اگر مقدار مولفه نیروی عکس العمل \vec{F}_i در راستای عمودی $(f_n)_i$ مثبت باشد، نشان دهنده حفظ تماس قطعه کار با جاسازها است. قید (c) نیز بیانگر شرط اصطکاک کولمب در نقاط تماس بین قطعه کار و جاسازها است. با توجه به این که مدل مورد استفاده به صورت سه بعدی است، این قید حالت غیرخطی را به بهینه سازی اعمال می کند.

مساله بهینه سازی اشاره شده در رابطه (15) می بایست با استفاده از تکنیک های بهینه سازی حل شود. وجود یا عدم وجود جواب برای این مساله به عنوان معیاری برای سنجش پایداری قطعه کار استفاده می شود. اگر مساله مورد نظر دارای جواب باشد، نشانگر ارضا شدن تمام قیود مساله (بالاخص قیود (b) و (c)) بوده و قطعه کار تحت اثر نیروممان های مزبور در حالت پایدار قرار دارد. چنانچه جوابی برای مساله بهینه سازی صادر نشود، حداقل یکی از قیود سه گانه رعایت نشده است. به عبارت دیگر، قطعه کار تحت اثر نیروممان های بست و وزن در حالت جدایش از جاسازها قرار گرفته و یا نیروهای مماسی به مرز خود رسیده اند که نشانگر حالت لغزش است.

4-3- سیستم بست و نیروهای ماشین کاری

اصلی ترین انتظاری که از نیروی بست می رود، این است که با توجه به هندسه قطعه کار در موقعیت و جهتی اعمال شود که بیشترین مولفه را روی تک تک جاسازها داشته باشد. برای پیدا کردن چنین بست (یا بست هایی)، کافیت نیروی بست را با اندازه واحد در نظر گرفته و مقدار مولفه های آن را روی شش جاساز محاسبه نمود. چنانچه این مولفه ها دارای اندازه کافی باشند، می توان اندازه بردار نیروی بست را در یک عدد مشخصی ضرب کرده و با حل معادلات تعادل، مقدار کمینه نیروی بست را جهت حفظ پایداری قطعه کار محاسبه نمود.

در این مقاله نیز، نیروهای ماشین کاری به عنوان یک پارامتر مستقل برای تعیین موقعیت اعمال بست ها استفاده نگردید. چراکه، اندازه نیروهای ماشین کاری به صورت مشخص تاثیری بر روی موقعیت اعمال بست ها بر روی قطعه کار ندارد. اندازه نیروی ماشین کاری صرفاً تعیین کننده کمترین اندازه نیروی بست لازم برای حفظ پایداری قطعه کار است. برای محاسبه کمترین اندازه نیروی بست نیز می توان براحتی معادله تعادل را حل کرده و اندازه این نیروها را تعیین نمود. پس به صورت خلاصه می توان بیان کرد که هیچ رابطه مستقیمی بین نیروهای ماشین کاری و موقعیت اعمال بست ها وجود ندارد.

4- مطالعات موردی

مدل سازی ارائه شده در بخش 3 برای طراحی سیستم بست قطعات شکل-آزاد در بستر یکپارچه طراحی قید و بند به کمک رایانه که توسط نویسندگان مقاله توسعه داده شده است [21] پیاده سازی نرم افزاری گردید. توابع واسط برنامه نویسی پایتون اوسی.سی¹ همراه با ماژول نصبی آپت-آپت² برای حل مساله بهینه سازی غیرخطی آنالیز پایداری استفاده شد. سه نمونه مطالعه موردی شامل مدل هایی از قطعات با هندسه شکل-آزاد برای سنجش عملکرد سیستم در طراحی سیستم بست مناسب با رعایت اصول سه گانه مزبور استفاده شد.

برای اعمال به شکل بندی جاسازی و بست استفاده می شود. قطعه کار می بایست با قرارگیری در سیستم قید و بست دارای پایداری استاتیکی باشد تا بتوان ماشین کاری را روی آن انجام داد. نظر به نامعین بودن سیستم قید و بند در حالت سه بعدی، از اصل کمینه اندازه نیروها (که معادل اصل کمینه انرژی الاستیک برای اجسام صلب است) برای مدل سازی ریاضی استفاده می شود. این اصل بیان می دارد که از بین تمام نیروهای عکس العمل که می توانند معادلات تعادل را در حالت نامعینی استاتیکی ارضا کنند، آن جوابی انتخاب می شود که کمینه اندازه را داشته باشد. "شکل 3" نمونه ای از یک قطعه کار دارای یک سیستم مختصات جهانی را همراه با شش دستگاه مختصات محلی روی هر جاساز نشان می دهد.

مطابق با "شکل 3"، اصل کمینه اندازه نیروها را می توان در قالب یک مساله بهینه سازی غیرخطی به صورت رابطه (15) مطرح کرد:

تابع هدف:

$$O.F. = \min|\vec{\varphi}|, \quad \vec{\varphi} = (\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_6), \quad \vec{F}_i = (f_{n_i}, f_{t_1_i}, f_{t_2_i})_i$$

قیود:

$$\begin{aligned} \vec{G}\vec{\varphi} + \vec{W}_e &= 0 & (a) \\ (f_n)_i &\geq 0 & (b) \\ (f_{t_1_i}^2 + f_{t_2_i}^2)_i &\leq (\mu f_n)_i^2 & (c) \end{aligned} \quad (15)$$

تابع هدف مساله بهینه سازی، اندازه نیروهای عکس العمل در نقاط جاسازی شش گانه است. برای این منظور، برداری به نام $\vec{\varphi}$ در نظر گرفته شده است که حاوی شش نیروی عکس العمل \vec{F}_1 تا \vec{F}_6 است. نظر به سه بعدی بودن مدل، هریک از نیروهای عکس العمل در جاسازها دارای سه مولفه عمودی، مماسی اول و مماسی دوم هستند. لذا کافیت تابع هدف به صورت $|\vec{\varphi}|$ تعریف شده و کمینه سازی آن با تکنیک های بهینه سازی اجرا شود.

قید (a) همان تعادل استاتیکی بین نیروممان های خارجی و داخلی قطعه کار را در دستگاه مختصات جهانی قطعه کار تبیین می کند. در این قید، ماتریس تبدیل \vec{G} از [25] به صورت رابطه (16) قابل محاسبه است [27]:

$$\begin{aligned} \vec{G} &= (\vec{G}_1, \vec{G}_2, \dots, \vec{G}_6) \\ \vec{G}_i &= (\vec{G}_n, \vec{G}_{t_1}, \vec{G}_{t_2}) \\ (\vec{G}_n)_i &= (\vec{n}_i, \vec{r}_i \times \vec{n}_i), \quad (\vec{G}_{t_1})_i = (\vec{t}_{1_i}, \vec{r}_i \times \vec{t}_{1_i}), \\ (\vec{G}_{t_2})_i &= (\vec{t}_{2_i}, \vec{r}_i \times \vec{t}_{2_i}) \end{aligned} \quad (16)$$

نیروممان برآیند خارجی قطعه کار به صورت رابطه (17) قابل بیان است.

$$\vec{W}_e = \vec{W}_c + \vec{W}_g \quad (17)$$

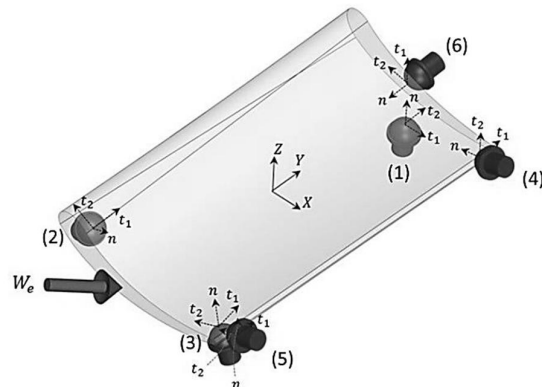


Fig. 3 The freeform model incorporated for stability analysis

شکل 3 مدل با هندسه شکل-آزاد مورد استفاده در آنالیز اصلی پایداری قطعه کار

¹ PythonOCC
² OpenOpt

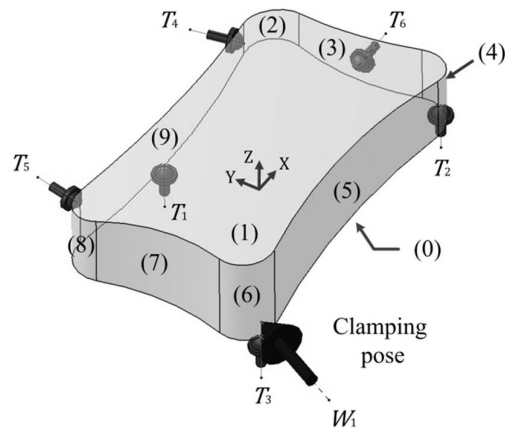


Fig. 5 The model of the second case study

شکل 5 مدل مورد استفاده برای مطالعه موردی دوم

جدول 2 سیستم جاسازی طراحی شده برای مطالعه موردی دوم

Table 2 The designed locating system data for the second case study

شماره جاساز	موقعیت (\vec{r}_i)	جهت (\vec{n}_i)
1	[-6.33, 30.23, 0.00]	[0.00, 0.00, -1.00]
2	[59.25, -28.79, 0.00]	[0.00, 0.00, -1.00]
3	[-54.74, -33.8, 0.00]	[0.00, 0.00, -1.00]
4	[48.08, 34.81, 4.36]	[-0.19, 0.98, 0.00]
5	[-48.08, 34.81, 16.76]	[0.19, 0.98, 0.00]
6	[56.24, -0.45, 4.69]	[1, 0.00, 0.00]

هیچ یک از سطوح کاندید به صورتی که مولفه مناسب را روی تمام جاسازها ایجاد کند، وجود ندارد. نظر به این که سطوح کاندید بست تماماً بر سطح جاسازی پایه عمود هستند، با اعمال بست (با شکل بندی های مختلف تک بست، دو بست و سه بست) بر روی این سطوح، مولفه مناسبی بر روی جاسازهای پایه بوجود نمی آید. برای حل این موضوع، سیستم طراحی بست آن جاسازهایی را که کمترین مولفه بست را دریافت می کنند، به عنوان استثنا از ارضای شرط $|\vec{V}_{C_{Li}C_j}| > C_F$ معاف کرده و مجدداً شروع به پردازش می کند. جواب ارائه شده با رعایت این معافیت، یک جواب پیشنهادی برای بست است که طراح قید و بند می تواند آن را استفاده یا رد کند. جاسازهای پایه در این مطالعه موردی چنین خصوصیتی را دارند و برای همین، از ارضای شرط مزبور معاف می شوند. با این فرض، اگر بست (یا چندین بست) وجود داشته باشد که بتواند شرط $|\vec{V}_{C_{Li}C_j}| > C_F$ را در قبال جاسازهای کناری و توقف ارضا کند، به عنوان بست برای قطعه کار انتخاب می شود. با اجرای مجدد سیستم با این شرط، نقطه [54.62, -33.87, 6.56] برای این مدل در شکل بندی تک بست محاسبه می شود که جهت و موقعیت اعمال آن روی مدل به صورت گرافیکی در "شکل 5" نشان داده شده است.

نظر به محدودیت های هندسی مدل قطعه کار ارائه شده در "شکل 5"، امکان طراحی بست به صورتی که مولفه مناسب بر روی تمام جاسازها داشته باشد، برای آن وجود ندارد. در این حالت، با معاف کردن برخی از جاسازها از ارضای شرط $|\vec{V}_{C_{Li}C_j}| > C_F$ ، محاسبه انجام می شود. ولیکن، برای اعمال بست پایدار و مناسب به قطعه کار، دو راه حل می توان پیشنهاد نمود. اول اینکه استراتژی ماشین کاری بایستی به گونه ای انتخاب شود که قطعه کار بر روی جاسازهای پایه فشرده شده و با این روش، از جدایش قطعه کار از این

مطالعه موردی اول به صورت مدل یک موشواره در "شکل 4" نشان داده شده است. هدف ماشین کاری سطح شماره صفر است. فرض بر این است که سطوح شماره 11، 3 و 5 به ترتیب سطوح جاسازی پایه، دوم و سوم هستند. فرض بر این است که سیستم جاسازی این مدل از قبل طراحی شده و به صورت "شکل 4" به دست آمده است. اطلاعات سیستم جاسازی این مدل در جدول 1 ارائه شده است.

با فرض $C_F = 0.2$ ، سیستم پیشنهادی طراحی بست بر روی این مدل اجرا و شکل بندی تک بست برای مدل انتخاب شد. موقعیت اعمال بست در مدل به صورت [34.65, -17.1, 15.26] به دست آمد که به صورت گرافیکی در "شکل 4" نشان داده شده است. موقعیت محاسبه شده برای اعمال بست هیچ تداخلی با سطح ماشین کاری نداشته و نرم افزار، تک بست را به گونه ای محاسبه کرده است که حالت تقابل با تمام جاسازها داشته و به وضوح پایداری قطعه کار را حفظ می نماید.

مطالعه موردی دوم در "شکل 5" نشان داده شده است. فرض بر این است که سیستم جاسازی قطعه کار طراحی شده و سطوح شماره صفر، نه و سه به ترتیب به عنوان سطوح جاسازی پایه، دوم و سوم انتخاب شده اند. سیستم جاسازی طراحی شده برای این مدل نیز در "شکل 5" نشان داده شده است. اطلاعات مربوط به سیستم جاسازی این مدل نیز در جدول 2 ارائه شده است.

با اجرای سیستم بست روی مدل مطالعه موردی دوم با فرض $C_F = 0.2$ ، ابتدا سیستم هیچ گونه جوابی را برای موقعیت و جهت بست ارائه نمی کند. چراکه، با توجه به هندسه قطعه کار امکان اعمال بست بر روی

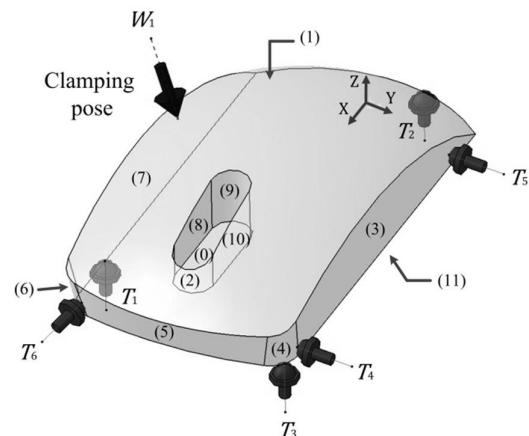


Fig. 4 The first case study: mouse model with objective of machining the surface No. 0 (the underneath surface of scroll button)

شکل 4 مطالعه موردی اول: مدل موشواره با هدف ماشین کاری سطح شماره صفر

جدول 1 سیستم جاسازی طراحی شده برای مطالعه موردی اول

Table 1 The designed locating system data for the first case study

شماره جاساز	موقعیت (\vec{r}_i)	جهت (\vec{n}_i)
1	[56.54, -20, 0]	[0.00, 0.00, -1.00]
2	[-6.76, 7.23, 0]	[0.00, 0.00, -1.00]
3	[69.41, 18.95, 0]	[0.00, 0.00, -1.00]
4	[67.68, 20.50, 5.76]	[0.00, 0.99, -0.08]
5	[10.36, 20.26, 2.98]	[0.00, 0.99, -0.08]
6	[71.84, -16.74, 2.94]	[0.93, -0.28, -0.25]

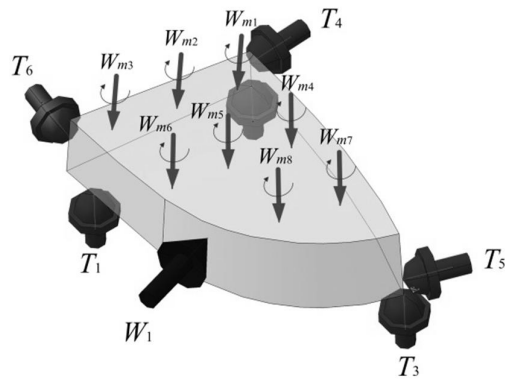


Fig. 7 Case study for investigating the effects of machining forces and torques on the minimum clamping force

شکل 7 مطالعه موردی برای بررسی تاثیر نیروها و گشتاورهای ماشین کاری روی کمینه اندازه نیروی بست

فوقانی قطعه کار است.

فرض بر این است که نیروها و گشتاورها براساس پارامترهای ماشین کاری محاسبه شده و بصورت نشان داده شده در "شکل 7" بر قطعه کار عمل می کنند. از بین تمام نقاط سطح، هشت نقطه انتخاب شده و با اعمال نیرو و گشتاور ماشین کاری در آن نقاط، آنالیز اجرا می شود. معمولاً پارامترهای ماشین کاری همراه با تعداد پاس ها به گونه ای انتخاب می شود که اندازه نیروها از محدوده 500-600 نیوتن بیشتر نشوند. موقعیت اعمال نیروها همراه با شدت نیرو و گشتاور ماشین کاری در جدول 3 ارائه شده است. برای محاسبه کمترین مقدار نیروی بست لازم برای حفظ پایداری قطعه کار، از روش بهینه سازی اشاره شده در رابطه (15) استفاده می شود. با توجه به مشخص بودن سیستم جاسازی، نیرو-ممان های جاسازی محاسبه شده و در رابطه جاگذاری می شوند. همچنین، نیرو-ممان های بست نیز در هر مرحله با استفاده از داده های جدول 3 قابل محاسبه هستند. با حل مساله بهینه سازی، کمترین نیروی لازم برای بست در هر مرحله تعیین می شود. مقادیر این نیروها در ستون آخر جدول 3 ارائه شده است.

همان گونه که مشخص است، تعیین کمترین نیروی بست با توجه به نیروهای ماشین کاری به مراتب آسانتر از تعیین دقیق موقعیت اعمال بست ها است. لذا، پردازش بالایی برای تعیین موقعیت بست می بایست انجام گردد تا موقعیت های مناسبی برای اعمال آن ها تعیین شود. محاسبه این موقعیت ها، مغز طراحی سیستم بست است و نیروهای ماشین کاری بعنوان پارامتر موثر نباید در آن مطرح گردد. این موضوع با استفاده از مثالی که در این بخش ارائه شد، اثبات می شود.

5- نتایج و بحث

در این بخش، به بررسی صحت نتایج به دست آمده برای طراحی سیستم بست روی مطالعات موردی و بحث بر روی نتایج به دست آمده پرداخته می شود. شکل بندی تکبستی برای مطالعه موردی اول و دوم توسط سیستم پیشنهاد گردید. برای بررسی رعایت اصول سه گانه طراحی سیستم بست (که در بخش 3 اشاره گردید) در هر یک از این دو مطالعه موردی، نیروممان ناشی از بست همراه با پیچ های ناشی از درجات آزادی مقید نشده در هر یک از نقاط جاسازی در جدول 4 ارائه شده و ضریب کار مجازی بین آن ها از رابطه (5) محاسبه می شود.

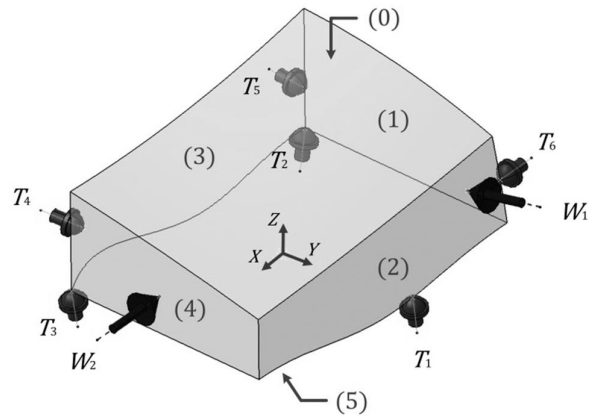


Fig. 6 The model of the third case study

شکل 6 مدل مورد استفاده در مطالعه موردی سوم

جاسازها جلوگیری شود. راه حل دوم استفاده از بست هایی با قابلیت اعمال نیروی دو جهته در نقطه محاسبه شده است. این بست ها می توانند علاوه بر اعمال نیروی عمودی در نقطه محاسبه شده، نیروی مماسی رو به جاسازهای پایه نیز اعمال کرده و مولفه مناسب روی آن ها تولید کنند.

مطالعه موردی سوم، مدلی از یک قطعه کار با سطوح تماماً شکل-آزاد است که در "شکل 6" نشان داده شده است. هدف، ماشین کاری سطح بالایی قطعه کار (سطح شماره صفر) است. فرض بر این است که سیستم جاسازی قطعه کار طراحی شده و به عنوان ورودی به سیستم طراحی بست اعمال می شود. سطوح شماره 3، 5 و 1 به ترتیب به عنوان سطوح جاسازی پایه، دوم و سوم انتخاب شده اند.

با فرض $C_F = 0.2$ ، سیستم بست پیشنهادی روی این مدل نیز اجرا می شود. امکان استفاده از تکبست براساس هندسه قطعه کار وجود نداشته و سیستم، شکل بندی دو بستی را پیشنهاد می کند. موقعیت بست اول به صورت $[-54.88, 53.51, 25.35]$ و بست دوم به صورت $[75, -2.8, 18.33]$ محاسبه می شود. لازم به ذکر است که چون سطح شماره چهار، یک سطح صفحه ای است، سیستم طراحی بست موقعیت مرکز سطح را به عنوان نقطه مناسب اعمال بست دوم معرفی می کند. چرا که، اعمال بست در هر نقطه روی این سطح تفاوتی با سایر نقاط ندارد. موقعیت و جهت این دو بست در "شکل 6" به صورت گرافیکی نشان داده شده است.

سطوح کاندید بست برای مدل مطالعه موردی سوم شامل سطوح شماره دو و چهار است. نظر به این که سطح شماره دو دارای انحنا است، می توان با اعمال بست روی نقطه محاسبه شده، مولفه مناسبی روی جاسازهای پایه به دست آورد. ولیکن، این بست مولفه مناسبی روی جاساز شماره شش ندارد. لذا، بست دوم روی سطح شماره چهار توسط سیستم پیشنهاد می شود که مولفه مناسب را روی جاساز شماره شش اعمال می کند. لازم به ذکر است که در شکل بندی های دو و سه بستی، چنانچه یک بست مولفه لازم را بر روی جاسازهای مشخصی اعمال کرد، الزامی وجود ندارد که بست دوم (یا سوم) نیز مولفه مناسبی روی آن جاسازها داشته باشند و عدم وجود دفع بین این بست ها و جاسازها کافی است.

برای بررسی تاثیر اندازه نیروهای ماشین کاری بر روی کمینه نیروی بست، مطالعه موردی در "شکل 7" ارائه می شود. فرض بر این است که سیستم جاسازی قطعه کار مشخص بوده و سیستم تکبستی با موقعیت نشان داده شده توسط سیستم برای آن طراحی شده است. هدف ماشین کاری سطح

جدول 3 موقعیت اعمال نیرو - ممان‌های ماشین‌کاری همراه با شدت آن‌ها و کمینه نیروی بست

Table 3 The position and orientation of the machining wrenches, their intensities and the minimum clamping force

شماره نیرو- ممان	موقعیت	جهت	نیروی ماشین‌کاری (N)		گشتاور ماشین‌کاری (N.m)	کمینه نیروی بست (N) $\ W_1\ _{\min}$
			$\ \vec{F}_t\ $	$\ \vec{F}_a\ $		
1	-3.57	-0.0995	200	1000	20	2040
	26.22	-0.0043				
	5.27	-0.9950				
2	-9.76	-0.0995	180	900	18	1810
	26.76	-0.0036				
	5.89	-0.9950				
3	-16.54	-0.0995	160	800	16	1680
	27.13	-0.0089				
	6.57	-0.9950				
4	-3.09	-0.0988	180	900	18	1715
	16.94	-0.1180				
	5.84	-0.9881				
5	-9.68	-0.0988	160	800	16	1490
	17.36	-0.1145				
	6.45	-0.9885				
6	-15.63	-0.0988	140	700	14	1280
	17.52	-0.1131				
	7.03	-0.9886				
7	-3.43	-0.0984	160	800	16	1470
	7.30	-0.1497				
	7.25	-0.9838				
8	-9.53	-0.0984	140	700	14	1255
	8.11	-0.1498				
	7.74	-0.9838				

بست اول دریافت کرده‌اند و عدم وجود حالت دفع بین این بست‌ها و جاسازها کافیهست. این موضوع درباره جاسازهای پایه در این مطالعه موردی مشهود است. جاسازهای پایه و کناری، مولفه مناسب را از بست اول کسب کرده‌اند ولیکن، جاساز شماره دو دارای حالت دفع با بست شماره دو است. با توجه به جهت اعمال جاسازهای دو و سه همراه با جهت اعمال بست دوم، هیچ موقعیت بهتری برای اعمال بست دوم وجود ندارد که حالت دفع مزبور را از بین ببرد. لذا، هندسه قطعه‌کار باید در ناحیه اعمال جاساز دوم از دیدگاه طراحی بست مقداری تغییر یابد تا امکان طراحی مناسب سیستم بست فراهم شود.

برای اطمینان از رعایت اصل سوم از طراحی بست (اصل پایداری استاتیکی قطعه‌کار تحت اثر بست و وزن)، مساله بهینه‌سازی رابطه (15) برای مطالعات موردی اول و دوم حل می‌شود. فرضیات برای حل مساله برای هر دو مطالعه موردی اول و دوم به صورت جرم قطعه‌کار برابر با 2Kg، ضریب اصطکاک در نقاط تماس 0.3 و نیروی بست برابر با 300N است. جدول 5 نشان‌دهنده مقادیر نیروهای عکس‌العمل در شش جاساز برای مطالعات موردی اول و دوم است.

وجود جواب برای مساله بهینه‌سازی نشانگر رعایت تمام قیود مساله بوده و نشان‌دهنده حفظ پایداری قطعه‌کار در اثر وزن و بست‌های اعمالی در نقاط محاسبه شده است.

6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدلی برای طراحی سیستم بست برای قطعات با هندسه شکل-آزاد ارائه گردید. مدل ارائه شده بر مبنای سه اصل کمترین تعداد بست، بیشترین مولفه نیروی بست بر روی جهات جاسازی و پایداری قطعه‌کار تحت وزن و نیروهای بست بنیان نهاده شد. مدل‌سازی ریاضیاتی هر یک از این اصول با روش ترکیبی نظریه پیچ‌واره و اصل کمینه اندازه نیروها تحت یک الگوریتم مشخص اجرا گردید. پیاده‌سازی نرم‌افزاری تحلیل‌های اجرا شده در

جدول 4 مقادیر ضریب کار مجازی بین هر یک از نیروممان‌های بست و پیچ‌های درجات آزادی مقید نشده جاسازی همراه با امتیاز کسب شده تک بست‌ها برای مطالعه موردی اول، دوم و دو بست برای مطالعه موردی سوم

Table 4 The values of virtual work coefficients between the clamping wrenches and the twists of locating unconstrained DOF(s) with the calculated scores for the single and double clamp configurations of the first, second and third case studies

شماره جاساز	مطالعه موردی اول		مطالعه موردی دوم	
	\overline{VC}_{L_i, C_1}	\overline{VC}_{L_i, C_2}	\overline{VC}_{L_i, C_1}	\overline{VC}_{L_i, C_2}
1	-0.93	-0.05	-0.26	-0.15
2	-0.93	-0.05	-0.23	0.18
3	-0.93	-0.05	-0.22	-0.18
4	-0.43	-0.78	-0.93	-0.15
5	-0.43	-0.96	-0.96	-0.06
6	-0.21	-0.47	-0.01	-1.00

شکل‌بندی تک‌بست طراحی‌شده برای مدل مطالعه موردی اول، شرط $|\overline{VC}_{L_i, C_j}| > 0.2$ را کاملاً رعایت کرده است. این موضوع بیانگر رعایت شدن اصل بیشینه مولفه نیروی بست روی جهات جاسازی است. مقدار امتیاز SC_{pp} برای تک‌بست طراحی‌شده از رابطه (7) برابر با 3.86 به دست آمده است. در مطالعه موردی دوم نیز تمام قوانین مرتبط با اصل بیشینه مولفه نیروی بست بر روی جهات جاسازی رعایت شده است.

در صحت‌سنجی نتایج مطالعه موردی سوم مشخص می‌شود که بست اول مولفه مناسبی بر روی جاساز شماره شش ندارد. لذا، شکل‌بندی تک‌بستی برای این مدل امکان‌پذیر نیست. با افزودن بست دوم، مقدار مولفه مناسب بر روی این جاساز تامین شده است. با توجه به آنچه در بخش 4 برای مطالعه موردی سوم ارائه شد، نیازی وجود ندارد که بست‌های دوم یا سوم مولفه مناسبی را روی جاسازهایی اعمال کنند که آن جاسازها مولفه مناسبی از

شکل‌بندی سببستی	\vec{TC}
پیچچه مربوط به درجه آزادی مقید نشده جاسازی	\vec{T}
ضریب کار مجازی	VC
بردار درجه آزادی خطی در جاساز	\vec{V}
نیروممان در نظریه پیچ‌واره	\vec{W}
علائم یونانی	
ضریب کار مجازی در نظریه پیچ‌واره	σ
بردار نیروهای عکس‌العمل در تمام جاسازها	$\vec{\phi}$
بردار درجه آزادی دورانی در جاساز	$\vec{\omega}$
زیرنویس‌ها	
مولفه محوری نیروی ماشین‌کاری	a
نامزدهای بست	can
بست نام	C_j
پارامتر اعمالی خارجی بر قطعه کار	e
اندیس گرانش	g
شماره جاساز	i
اندیس	Ind
شماره بست	j
جاساز نام	L_i
بیشینه	Max
جهت نرمال (عمود)	n
کار مجازی منفی (حالت تقابل)	neg_Vc
امتیاز نامزد بست	p
جاسازهایی که مولفه لازم را از بست کسب نکرده‌اند.	rq
جاسازهایی که مولفه لازم را از بست کسب کرده‌اند.	rs
مولفه مماسی نیروی ماشین‌کاری	t
جهت مماسی اول	t_1
جهت مماسی دوم	t_2
بروزرسانی‌شده	U
شماره بست	1,2,3

8- مراجع

- [1] 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.
- [2] Y. Rong, S. Huang, Z. Hou, *Advanced computer aided fixture design*, pp. 11-14, Burlington, USA: Elsevier Academic Press, 2005.
- [3] 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.
- [4] R. S. Ball, *A treatise on the theory of screws*, United Kingdom: Cambridge university press, 1900.
- [5] M. S. Ohwovoriole, B. Roth, An extension of screw theory, *Journal of mechanical design*, Vol. 103, No. 4, pp. 725-735, 1981.
- [6] H. Asada, A. B. By, Kinematic analysis of workpart fixturing for flexible assembly with automatically reconfigurable fixtures, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 1, No. 2, pp. 86-94, 1985.
- [7] Y. C. Chou, V. Chandru, M. M. Barash, A mathematical approach to automatic configuration of machining fixtures: analysis and synthesis, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 111, No. 4, pp. 299-306, 1989.
- [8] A. S. Kumar, A. Y. C. Nee, Framework for a variant fixture design system using case-based reasoning technique. *Proceedings of The ASME-Manufacturing Engineering Devison (MED)*, 1995.
- [9] U. Roy, J. Liao, Fixturing analysis for stability consideration in an automated fixture design system, *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol. 124, No. 1, pp. 98-104, 2002.
- [10] W. Li, P. Li, Y. Rong, Case-based agile fixture design, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 128, No. 1, pp. 7-18, 2002.

جدول 5 مقادیر نیروهای عکس‌العمل $\left\{ \begin{matrix} f_n \\ f_{t_1} \\ f_{t_2} \end{matrix} \right\}$ (N) در جاسازها برای مطالعات موردی اول و دوم (جرم قطعه کار: 2Kg، ضریب اصطکاک: 0.3، نیروی بست: 300N) و مطالعه موردی سوم (نیروی بست اول: 300N و نیروی بست دوم: 150N)

Table 5 The reaction forces of the locators $\left\{ \begin{matrix} f_n \\ f_{t_1} \\ f_{t_2} \end{matrix} \right\}$ (N) for the first and

second case studies (workpiece mass: 2Kg, Coefficient of friction: 0.3 and clamping force intensity: 300N) and the third case study (The first and second clamping force intensities: 300N and 150N, respectively)

شماره جاساز	6	5	4	3	2	1	
مطالعه موردی اول	48.52	17.56	26.30	0.00	105.50	176.09	مطالعه موردی اول
مطالعه موردی دوم	-1.98	-4.18	-7.79	0.00	7.65	4.68	مطالعه موردی دوم
مطالعه موردی سوم	14.42	3.20	1.24	0.00	30.71	39.85	مطالعه موردی سوم
	42.46	204.92	49.86	33.41	3.15	0.00	
	12.70	-53.15	-14.96	0.73	0.24	0.00	
	-1.02	-15.86	-0.07	-10.00	-0.91	0.00	
	123.97	164.32	57.68	8.19	39.55	59.43	
	6.62	-6.09	5.64	1.26	1.49	9.14	
	-36.60	-2.07	15.25	2.11	11.77	15.31	

بستر یکپارچه طراحی قید و بند به کمک رایانه که توسط نویسندگان مقاله توسعه داده شده بود، انجام شد. سه نمونه مطالعه موردی شامل قطعاتی با هندسه شکل-آزاد برای سنجش توانایی‌های سیستم ارائه شده استفاده گردید. در مدل اول و دوم، سیستم تک‌بستی با امتیاز SC_p (به ترتیب) برابر با 3.86 و 2.36 بدست آمد. اجرای آنالیز پایداری قطعه کار نیز منجر به جواب برای مساله بهینه‌سازی شد که بیانگر پایداری قطعه کار در هر دو مدل بود. سیستم دو بست برای مدل مطالعه موردی سوم با امتیاز DC_p برابر با 4.16 پیشنهاد شد. برای شکل‌بندی‌های دو و سه بست، نتیجه بر آن شد که نیازی به اعمال مولفه لازم توسط بست دوم و سوم بر روی جاسازهایی که مولفه مناسبی از بست اول کسب کرده‌اند، وجود ندارد. ولیکن، حالت دفع نباید بین این بست‌ها و جاسازها باشد. مطالعه تاثیر نیروهای ماشین‌کاری بر روی سیستم بست نشان داد که اندازه این نیروها و گشتاورها هیچ تاثیری بر روی موقعیت اعمال بست‌ها نداشته و صرفاً اندازه کمینه نیروی بست را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

7- فهرست علائم

C	پارامتر تقابل نیروممان بست و پیچچه درجه آزادی مقید نشده جاسازی
cl	بست
\vec{DC}	شکل‌بندی دو بست
\vec{F}	بردار نیرو در جاساز یا بست
f	مولفه نیروی F در راستای محورهای مختصات محلی
l	تعداد المان در لیست نامزدها
\vec{M}	بردار گشتاور در بست
m	تعداد بست‌ها
NO	تعداد پارامتر
\vec{n}	بردار نرمال سطح
\vec{r}	بردار موقعیت
rq	لیست جاسازهایی که مولفه لازم را از بست کسب نکرده‌اند.
rs	لیست جاسازهایی که مولفه لازم را از بست کسب کرده‌اند.
\vec{SC}	شکل‌بندی تک‌بستی
\vec{G}	ماتریس تبدیل از دستگاه مختصات محلی به جهانی

- [20] K. Y. Yueng, X. Chen, 3-D fixture layout design system based on genetic algorithm, *Proceedings of The 16th International Conference on Automation and Computing*, United Kingdom, September 11, 2010.
- [21] K. Jiang, X. Zhou, M. Li, X. Kong, A multi-objective optimization and decision algorithm for locator layout continuous searching in checking fixture design, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67, No. 1, pp. 357-366, 2013.
- [22] L. Xiong, R. Molfino, M. Zoppi. Fixture layout optimization for flexible aerospace parts based on self-reconfigurable swarm intelligent fixture system, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 9, pp. 1305-1313, 2013.
- [23] 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 فارسی)
- [24] H. Parvaz, M. J. Nategh, Stability analysis of free-form workpieces in fixtures, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 245-252, 2016. (in Persian فارسی)
- [25] H. Parvaz, M. J. Nategh, Analysis of jamming in locating systems of fixtures using minimum norm principle, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 124-128, 2015. (in Persian فارسی)
- [26] H. Parvaz, M. J. Nategh, Development of an efficient method of jamming prediction for designing locating systems in computer-aided fixture design, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Published Online: 27 Jan 2016.
- [27] P. Dupont, Existence and uniqueness of rigid body dynamics with coulomb friction, *Transactions-Canadian Society of Mechanical Engineering*, Vol. 17, pp. 513-525, 1993.
- [11] R. A. Marin, P. M. Ferreira, Optimal Placement of Fixture Clamps: maintaining form closure and independent regions of form closure, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, No. 3, pp. 676-85, 2002.
- [12] P. J. Pawar, S. R. Gangurde, Development of a software for automated design of machining fixtures using kinematic analysis and synthesis, *Proceedings of The International Conference on Mechanical Engineering (ICME)*, Dhaka, Bangladesh, December 26-28, 2003.
- [13] H. Parvaz, M. J. Nategh, A pilot framework developed as a common platform integrating diverse elements of computer aided fixture design, *International Journal of Production Research*, Vol. 51, No. 22, pp. 6720-6732, 2013.
- [14] K. Krishnakumar, S. N. Melkote, Machining fixture layout optimization using the genetic algorithm, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, No. 4, pp. 579-598, 2000.
- [15] D. M. Pelinescu, M. Y. Wang, Multi-objective optimal fixture layout design, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 18, pp. 365-372, 2002.
- [16] K. Kulankara, S. Satyanarayana, S. N. Melkote, Iterative fixture layout and clamping force optimization using the genetic algorithm, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, No. 1, pp. 119-125, 2002.
- [17] M. J. Nategh, *Design of machine tools jigs and fixtures*, Second edition, pp. 393-418, Tehran: Tarbiat Modares University press, 2016. (in Persian فارسی)
- [18] J. F. Hurtado, S. N. Melkote, A model for synthesis of the fixturing configuration in pin-array type flexible machining fixtures, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 7, pp. 837-849, 2002.
- [19] N. I. Afzeri, Hybrid Optimization of pin type fixture configuration for free form workpiece, *Niruth prombutr, International Journal of Engineering (IJE)*, Vol. 2, No. 3, pp. 32-42, 2008.