



ارائه ی مدل تحلیلی برای طراحی سیستم جاسازی قطعات با هندسه شکل آزاد

هادی پروز^۱، محمدجواد ناطق^{۲*}

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

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

* nategh@modares.ac.ir، ۱۴۱۱۵-۱۱۱، صندوق پستی

چکیده

در این مقاله، مدلی تحلیلی برای طراحی سیستم جاسازی قطعات با هندسه ی نامنظم (غیر چندوجهی) ارائه شده است. تحلیل ارائه شده بر مبنای قانون محدود کردن درجات آزادی قطعه کار با بیشترین شدت ممکن بنا نهاده شده است. قانون مزبور در سه بخش اصلی توازی بین جاسازها، بیشترین فاصله بین آن ها و بیشترین حالت دوسوئی (در تئوری پیچ واره) بین جاسازهای پایه، کنار و توقف مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل پیشنهادی، رعایت همزمان این اصل ها برای نیل به سیستم جاسازی مطمئن جزو شرایط الزامی طرح عنوان شده است. مدل سازی ریاضی هریک از اصول فوق بر مبنای تعاریفی همچون ماتریس های جاسازی پایه، کنار و سوم انجام شده و روش امتیازدهی به سطوح کاندید برای تعیین سطوح جاسازی دوم و سوم و موقعیت جاسازها بر روی آن ها استفاده شده است. برای ارزیابی توانایی تئوری پیشنهادی در ارائه ی سیستم جاسازی مناسب، مطالعه موردی شامل مدلی از یک پره توربین حاوی سطوح آزاد استفاده شده و نتایج بدست آمده از تحلیل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

کلید واژگان: جاسازی اجسام نامنظم، درجه آزادی قطعه کار، طراحی سیستم جاسازی، طراحی قید و بندها، قوانین جاسازی

Analytical model of locating system design for parts with free form surfaces

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

ABSTRACT

In this study, an analytical model for designing the locating system for non-polyhedral parts is presented. The model is based on constraining maximum (possible) workpiece DOFs using accurately posed locators. The model consists of three main rules: parallelism between locators, maximum (available) distance between locators and maximum reciprocity (in screw theory) between base, side and stop locators. The model states that the simultaneous consideration of the mentioned three rules is necessary for obtaining a robust locating system. The modeling of the rules is implemented using the innovative base, side and stop locating matrices. The scoring method is employed for selecting the base, side and stop surfaces between locating candidates. A turbine blade model is incorporated to evaluate the suggested model's capabilities in presenting robust and stable locating system.

Keywords: Degree of freedom, Fixture design, Free-form surfaces, Locating rules, Locating system.

قید و بندها می باشد. استاول بال [۲]، این تئوری را برای مدل سازی سیستم های سینماتیکی- دینامیکی ارائه و ضمن معرفی مختصات پلورک توانست این تئوری را بر مبنای استفاده از پارامتری بنام پیچ واره بنا بگذارد. استفاده از این تئوری در طراحی قید و بندها توسط راث و اوریل [۳] منجر به تعریف پارامترهای تشکیل دهنده ی پیچ واره، قیود تقابل و دفع در طراحی سیستم جاسازی قید و بندها و استفاده از آن ها برای تعریف کار مجازی شد. با تعریف کار مجازی جهت استفاده در طراحی قید و بندها، پژوهشگران مختلفی سعی بر مدل سازی رفتار قطعه کار و قید و بند در تماس با هم شدند. آسادا و بای [۴]، مدلی سینماتیک بر مبنای استفاده از تئوری پیچ واره با استفاده از بررسی تماس قطعه کار و جاسازها ارائه کرد. پس از تشکیل ماتریس ژاکوبین، نتیجه شد که چنانچه مرتبه ی این ماتریس برابر شش باشد، سیستم جاسازی طراحی شده منحصر به فرد است. چو، چاندر و باراش [۵]، مدلی را بر پایه تئوری پیچ واره برای طراحی سیستم جاسازی و بست برای قطعات با هندسه-

۱- مقدمه

طراحی سیستم فیکسچرینگ اصلی ترین مرحله از مجموعه فعالیت های طراحی قید و بند بشمار می رود. این مرحله از طراحی قید و بند دارای سه زیر شاخه کلی طراحی سیستم جاسازی، سیستم بست و سیستم تکیه گاهی (در صورت نیاز) می باشد [۱]. مرحله طراحی سیستم جاسازی وظیفه ی طراحی قید قطعه کار (با استفاده از اصول ریاضی) به گونه ای دارد که بیشترین درجات آزادی از قطعه کار سلب شود. هندسه ی قطعه کار یکی از شرایط تعیین کننده در طراحی سیستم جاسازی می باشد. طراحی یک سیستم جاسازی مطمئن برای قطعات با هندسه ی آزاد به دلیل وجود سطوح نامنظم در قطعه کار نیازمند پردازش بیشتری بوده و مدل های ریاضیاتی پیچیده تری نیاز دارد. ارائه ی مدلی تحلیلی که توانایی طراحی این سیستم را برای قطعات با سطوح آزاد داشته باشد، شاکله ی اصلی این مقاله را تشکیل می دهد. تئوری پیچ واره یکی از ابزارهای مورد استفاده در این بخش از طراحی

Please cite this article using:

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/Farsi)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

به مانند آرایه‌های پینی، نیاز به دانستن سطوح جاسازی دوم و سوم و غیره را ندارد. پیروی این سیستم از اصول مدل‌سازی ریاضی، قابلیت پیاده‌سازی نرم-افزاری آن را در سیستم‌های یکپارچه طراحی قید و بندها تامین می‌کند.

۲- مدل‌سازی ریاضی

مدل ارائه شده در این مقاله بر مبنای محدود کردن بیشترین درجات آزادی از قطعه‌کار استوار است، که دارای سه زیرشاخه اصلی توازی جاسازها، بیشترین فاصله جاسازها نسبت به هم و بیشترین حالت دوسوئی^۲ جاسازهای پایه، کنار و توقف نسبت به هم است.

۲-۱- سطح جاسازی پایه

با فرض معلوم بودن سطح جاسازی پایه از مجموعه فعالیت‌های طرح‌ریزی فرآیند، سه جاساز بر روی آن می‌بایست به‌صورتی قرار گیرند که توازی دلخواه طراح را همراه با بیشترین فاصله از هم فراهم کنند. برای این منظور، تمام سطوح موجود در قطعه‌کار مش‌بندی (براساس انحنا) شده و مدل‌سازی بر مبنای آن آغاز می‌شود. با فرض عمود بودن جاساز بر سطح در هر نقطه، ماتریس $BLRM$ بصورت رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود:

$$BLRM = \{BLRM(n \times n) | BLRM(i, j) = IP(i, j)\} \quad (1)$$

در این معادله، n تعداد گره‌های مش‌بندی انجام‌شده، (i, j) شماره‌ی دو جاساز، $IP(i, j)$ مقدار حاصل‌ضرب داخلی بین بردار نرمال دو نقطه (i, j) است. تحلیل به دو قسمت توازی و فاصله‌ی بین جاسازها تقسیم می‌شود.

۲-۱-۲- تحلیل توازی

برای ارائه‌ی این تحلیل و تسهیل در درک آن، نمونه‌ای از یک ماتریس $BLRM$ در شکل ۱ ارائه شده است. پارامتر M_1 با عنوان پارامتر تنظیم توازی جاسازهای پایه تعریف می‌شود که نشان‌دهنده‌ی میزان توازی قابل قبول برای جاسازهای پایه توسط طراح است. با فرض $M_1 = 0.9$ (معادل $25/8$ درجه اختلاف زاویه بین دو جاساز)، مشاهده می‌شود که جاساز شماره یک با جاسازهای $\{6, 7, 8\}$ توازی قابل قبول را دارد. با مراجعه به سطر ششم از ماتریس $BLRM$ ، می‌توان دریافت که جاساز شماره شش نیز با جاسازهای $\{1, 7\}$ توازی قابل قبول را دارد. لذا، مجموعه $\{1, 6, 7\}$ به عنوان مجموعه‌ای که شرط توازی را ارضا می‌کند، قابل انتخاب است. با اجرای این روش برای تمام نقاط مش‌بندی، سه جاسازها را می‌توان از این ماتریس استخراج کرد.

۲-۲- تحلیل فاصله بین جاسازها

ورودی‌های این گام از تحلیل، سه جاسازهای خروجی از گام تحلیل توازی هستند. مساحت مثلث متشکل از هریک از سه جاسازها از رابطه (۲) که معروف به معادله شولیس^۳ است، محاسبه می‌شود.

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۱		۰.۷۰	۰.۶۲	۰.۸۵	۰.۸۷	۰.۹۲	۰.۹۵	۰.۹۸
۲								
۳								
۴								
۵								
۶	۰.۹۲	۰.۳۸	۰.۳۰	۰.۳۵	۰.۴۸		۰.۹۲	۰.۶۴
۷	۰.۹۵	۰.۱۵	۰.۲۰	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۹۲		۰.۷۲
۸	۰.۹۸	۰.۸۵	۰.۸۲	۰.۷۸	۰.۵۲	۰.۶۴	۰.۷۲	

شکل ۱ نمونه‌ای از یک ماتریس $BLRM$ فرضی

ی چندوجهی ارائه کرد. وی با استفاده از نیرو ممان‌های جاسازی، ماتریس جاسازی را تعریف و شرط مرتبه‌ی کامل برای این ماتریس را برای نیل به طرح جاسازی منحصر بفرد ضروری عنوان نمود.

مارین و فریرا [۶]، با فرض این‌که قطعه‌کار تحت اثر نیروممان‌های خارجی مشخصی قرار دارد، از تئوری پیچ‌واره برای طراحی سیستم جاسازی قطعات با هندسه‌ی چندوجهی استفاده کرد. تقسیم صفحات کاندید به دو ناحیه‌ی تقابل و دفع و قرار دادن جاساز در نقطه‌ای که بیشترین حالت تقابل را با نیروممان‌های خارجی داشته باشد، مبنای اصلی این پژوهش را تشکیل می‌داد. از این روش برای ارزیابی بستر طراحی‌شده از لحاظ توانایی پیاده‌سازی مدل‌های ریاضی قید و بندها در [۷] استفاده گردید. پاور و گنگورد [۸]، به پیاده‌سازی نرم‌افزاری این روش و ارزیابی توانایی آن با استفاده از مدل سه-بعدی پرداختند. برای مطالعه‌ی بیشتر در این زمینه می‌توان به پژوهش‌های [۹] مراجعه نمود.

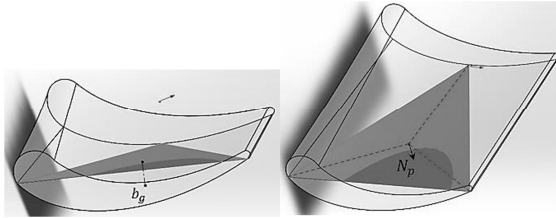
طراحی قید و بندها برای قطعات با هندسه‌ی آزاد نیاز به مدل‌سازی پیچیده‌تری نسبت به مطالعات مربوط به قطعات چندوجهی دارد. ناطق [۱۰]، گزارشی از مجموعه سیستم‌های قید و بندی که برای قطعات با هندسه‌ی آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد، ارائه نمود. نمونه‌هایی از این سیستم‌ها شامل استفاده از پین‌ها بصورت آرایه‌ای، آلیاژهای زودگذر، گیره‌ها با فک‌های لغزان^۱، مکانیزم اهرم و رشته سیم بصورت متحرک برای گرفتن قطعه‌کار می-باشند. عدم پیروی از اصول مدل‌سازی ریاضی صحیح و استفاده از روش هماهنگ‌سازی اجزای قید و بند با کانتور سطح قطعه‌کار، منجر به جاسازی اضافی در این روش‌ها می‌شود. هرچند که نمونه‌هایی از اختراعاتی (همچون نلسن و چولشتاین [۱۱] و داندل جونز [۱۲]) برای موقعیت‌دهی قطعات با هندسه‌ی نامنظم به همراه قابلیت کنترل رایانه‌ای ارائه شده است، ولی محدودیت‌هایی همچون سفتی پایین، عدم ارائه‌ی سیستم جاسازی کامل و هماهنگ‌سازی آرایه‌ای با کانتور سطح قطعه‌کار استفاده از آن‌ها را در قید و بندهای ماشین‌ابزار با محدودیت مواجه کرده است.

از بین تمام روش‌های جاسازی قطعات شکل آزاد، استفاده از آرایه‌های پینی برای موقعیت‌دهی قطعه‌کار برای ماشین‌کاری بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به هورتادو و ملکوتی [۱۳] با هدف بهینه‌سازی تعداد و موقعیت پین‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک، افزری و همکاران [۱۴] با هدف بهینه‌سازی موقعیت پین‌ها با استفاده از الگوریتم دسته‌ی زنبورها و یونگ و همکاران [۱۵] با هدف بهینه‌سازی با تابع هدف پایدارترین شکل‌بندی قطعه‌کار اشاره نمود. پیش‌فرض دانستن سطوح جاسازی و نیل به نتایجی که چندان صحیح به نظر نمی‌رسد، از جمله محدودیت‌های این پژوهش‌ها می‌باشد.

بنابر آن‌چه اشاره گردید، مدلی که بر پایه‌ی اصول طراحی سیستم جاسازی برای قطعات با هندسه‌ی شکل-آزاد پایه‌ریزی شده باشد، گزارش نشده است. در این مقاله، آنالیزی سیستماتیک برای طراحی سیستم جاسازی برای این نوع قطعات براساس اصل جاسازی ۱-۲-۳ ارائه می‌گردد. مبنای اصلی این مدل، قانون محدود کردن درجات آزادی قطعه‌کار با بیشترین شدت ممکن است. روش ارائه شده با استفاده از قوانین جاسازی همراه با تئوری پیچ‌واره، سطوح جاسازی مناسب را بر مبنای امتیازدهی تعیین کرده و موقعیت مناسب جاسازها را بر روی سطوح نیز محاسبه می‌کند. این روش محدودیت-های روش‌های قبلی اعم از محدودیت به هندسه چندوجهی، جاسازی اضافی

2. Reciprocity
3. Shoelace formula

1. Swivel jaws



شکل ۲ صفحه‌ی معادل جاسازهای پایه

با تصویر کردن این نقطه روی سطح جاسازی پایه، نقطه b_g حاصل می‌شود. حال، با استفاده از دو پارامتر N_p و b_g ، نیروممان معادل سطح جاسازی پایه از رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌شود:

$$W_b = [-N_p, b_g \times (-N_p)] \quad (5)$$

پیچ‌ی معادل هریک از جفت جاسازهای کاندید نیز بصورت رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$T_s = [0, 0, 0, -1/2 (N_1 + N_2)] \quad (6)$$

که در آن، N_1 و N_2 بردار نرمال جفت جاساز کاندید است. برای تحلیل دوسویی بین جاسازهای کنار و پایه، از تعریف کار مجازی در تئوری پیچ‌واره استفاده می‌شود. هرچقدر مقدار این ضریب نزدیک به صفر باشد، تداخل وظایف جاسازهای کنار با جاسازهای پایه کمتر است. برای محاسبه‌ی ضریب کار مجازی بین نیروممان W_b و پیچ‌ی T_m از رابطه‌ی (۷) استفاده می‌شود:

$$DofC = \sigma(W_b, T_s) = W_{b1}T_{s4} + W_{b2}T_{s5} + W_{b3}T_{s6} + W_{b4}T_{s1} + W_{b5}T_{s2} + W_{b6}T_{s3} \quad (7)$$

مقدار پارامتر $DofC$ به هریک از درایه‌های مربوطه در ماتریس $SLRM$ اضافه می‌شود (رابطه ۸).

$$SLRM(i, j) = \begin{cases} IP(i, j), D(i, j), DofC & SLRM(i, j) \neq 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

در این مرحله، امتیاز هریک از این جفت جاسازها می‌بایست از رابطه‌ی (۹) محاسبه شود.

$$S(i, j) = \frac{DofC_w - DofC(i, j)}{DofC_w - 0} \quad (9)$$

در این رابطه، $DofC_w$ بیشترین (بزرگترین) مقدار ضریب کار مجازی در بین تمام سطوح کاندید جاسازی و $DofC(i, j)$ ضریب کار مجازی محاسبه شده برای جفت جاساز i, j از رابطه‌ی (۷) است. این رابطه یک معادله‌ی خطی را برای تعیین امتیاز هریک از جفت جاسازها (در بازه $[0, 1]$) ارائه می‌کند. پس از محاسبه‌ی امتیازها، بیشترین امتیاز کسب‌شده توسط جفت جاسازهای هرکدام از سطوح کاندید جاسازی تعیین می‌شود. این جفت جاسازها برای هریک از سطوح کاندید بهترین نقاط جاسازی بوده و امتیاز کسب‌شده توسط آن‌ها به‌عنوان امتیاز سطح کاندید مربوطه درج می‌شود. در این مرحله، سطحی که بیشترین امتیاز را کسب کرده است، به عنوان سطح جاسازی دوم معرفی می‌شود.

۲-۳- سطح جاسازی سوم

آنالیز اخذ درجات آزادی قطعه‌کار با بیشترین شدت ممکن برای سطح جاسازی سوم صرفاً شامل تحلیل حالت دوسویی با جاسازهای پایه و کنار می‌باشد. در این مرحله، سطوح جاسازی پایه و کنار مشخص شده و موقعیت جاسازها بر روی آن‌ها نیز محاسبه شده است. سطوح کاندید جاسازی برای این مرحله، شامل تمام سطوح موجود در قطعه‌کار به استثناء سطوح جاسازی پایه، کنار و سطح ماشین‌کاری است. از آنجائی که شدت حالت دوسویی بین جاساز توقف با جاسازهای کنار

$$S = \frac{1}{2} \sqrt{\left| \det \begin{pmatrix} x_A & x_B & x_C \\ y_A & y_B & y_C \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \right| + \left| \det \begin{pmatrix} y_A & y_B & y_C \\ z_A & z_B & z_C \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \right| + \left| \det \begin{pmatrix} z_A & z_B & z_C \\ x_A & x_B & x_C \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \right|} \quad (2)$$

در این معادله، (x_A, y_A, z_A) مختصات نقطه‌ی اول، (x_B, y_B, z_B) مختصات نقطه‌ی دوم و (x_C, y_C, z_C) مختصات نقطه‌ی سوم مثلث است. بر این اساس کفایت مساحت مثلث تشکیل‌شده از کاندیدهای پایه جاسازی محاسبه شده و بیشترین مقدار آن تعیین گردد. در این قسمت از تحلیل نیازی به امتیازدهی به سه جاسازها نیست و سه نقطه‌ی جاسازی با بیشترین مساحت، بهترین نقاط جاسازی پایه هستند.

۲-۲- سطح جاسازی کنار

قانون سلب درجات آزادی قطعه‌کار با بیشترین شدت ممکن برای سطح جاسازی کنار دارای سه زیرشاخه‌ی توازی، بیشترین فاصله بین جاسازها و بیشترین حالت دوسویی با جاسازهای پایه است. سطوح کاندید جاسازی می‌بایست قبل از ارائه‌ی تحلیل مشخص شوند. در این پژوهش، فرض بر این است که تمام سطوح موجود در قطعه‌کار بجز سطوح جاسازی پایه و ماشین‌کاری می‌توانند به‌عنوان سطح کاندید جاسازی کنار استفاده شوند.

۲-۲-۱- تحلیل توازی و فاصله بین جاسازها

برای ارائه‌ی تحلیل، ماتریس $SLRM$ در فاز اول بصورت رابطه‌ی (۳) تعریف می‌شود.

$$SLRM = \{SLRM(n \times n) | SLRM(i, j) = [IP(i, j), D(i, j)]\} \quad (3)$$

که در آن؛ $D(i, j)$ فاصله بین آن دو نقطه‌ی جاسازی است. مقدار توازی دو جاساز فرضی در هر نقطه از مش‌بندی همراه با فاصله‌ی بین آن دو جاساز در هر درایه از ماتریس $SLRM$ ذخیره می‌شود که بمعنای رعایت همزمان اصل توازی و اصل فاصله‌ی بین جاسازها است. در مرحله بعد، پردازش این ماتریس با فیلتر کردن جفت جاسازها آغاز می‌شود. از بین تمام کاندیدهای موجود در این ماتریس، آن جفت جاسازهایی که نتوانند مقدار توازی بیشتر از M_2 و فاصله‌ی بیشتر از $M_3 \times MEL$ را فراهم کنند، حذف می‌شوند (رابطه ۴).

$$SLRM(i, j) = \begin{cases} 0 & IP(i, j) < M_2 \text{ or } D(i, j) < M_3 \times MEL \\ IP(i, j), D(i, j) & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

پارامتر M_2 با عنوان پارامتر تنظیم توازی و M_3 با عنوان پارامتر تنظیم فاصله بین جاسازهای کنار تعریف می‌شود. پارامتر MEL نیز بزرگترین طول لبه‌ی موجود در بین تمام سطوح کاندید می‌باشد. رابطه‌ی (۴) بیان می‌دارد که جفت جاسازها باید مقدار توازی و فاصله مناسب با همدیگر داشته باشند تا به‌عنوان کاندیدهای جاسازی کنار انتخاب شوند.

۲-۲-۲- تحلیل تداخل با جاسازهای پایه

جفت جاسازهای مرحله‌ی قبل می‌بایست حالت دوسویی را با شدتی که قابل قبول توسط طراح باشد، نسبت به جاسازهای پایه تأمین کنند. امکان نیل به جواب ایده‌آل که در آن هر دو جاساز کنار با تمام جاسازهای پایه دوسو باشند، برای قطعات با هندسه‌ی شکل آزاد وجود ندارد. در این مقاله، ایده‌ای با عنوان صفحه‌ی معادل سطح جاسازی پایه که از سه نقطه‌ی جاسازی عبور می‌کند، مطرح می‌شود. مطابق شکل ۲، بردار نرمال صفحه معادل (N_p) محاسبه شده و نقطه‌ی میانی صفحه‌ی مثلثی تعیین می‌شود.

سپس با استفاده از تحلیل بخش ۲، سطوح جاسازی دوم و سوم همراه با موقعیت جاسازها محاسبه می‌گردد. برای این کار، مش‌بندی سطوح با استفاده از امکانات مش‌بندی بستر (محیط پیش و پس‌پردازش سالومه) براساس انحنا سطح انجام گردید. بردار نرمال در هریک از نقاط مش‌بندی توسط مجموعه ابزارهای موجود در پایتون اوسی.سی محاسبه گردید. شکل ۳ تا د نشان‌دهنده‌ی نتایج به‌دست آمده برای محاسبه‌ی موقعیت جاسازها روی سطح پایه براساس مقادیر پارامتر تنظیم M_1 است.

همان‌گونه که برمی‌آید، با کاهش مقدار این پارامتر (عقب‌نشینی از مواضع توازی بین جاسازهای پایه) فاصله بین جاسازها افزایش می‌یابد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که طراح می‌بایست از مواضع خود در قبال توازی جاسازها در قطعات با هندسه شکل-آزاد تا حد قابل توجهی عقب‌نشینی نماید تا با افزایش فاصله بین جاسازها، دقت قابل قبول بدست آورد. موقعیت نقاط جاسازی بر روی سطح پایه با فرض $M_1 = 0.1$ در جدول ۱ ارائه شده است.

پس از محاسبه‌ی موقعیت جاسازهای پایه، سطوح جاسازی دوم و سوم می‌بایست تعیین گردد. مجموعه کاندیدهای سطح جاسازی دوم شامل سطوح $\{2.3, 5.6\}$ است. جدول ۲ نشان‌دهنده بیشترین طول لبه‌ی موجود در هر یک از این سطوح کاندید است.

بیشترین طول لبه موجود در قطعه‌کار بین تمام سطوح کاندید جاسازی $MEL = 180.62\text{mm}$ برای سطح شماره سه می‌باشد. با انتخاب $M_2 = M_3 = 0.9$ ، سطوح کاندید پنج و شش از مجموعه کاندیدهای جاسازی حذف می‌شوند. لذا، انتخاب بین سطوح کاندید جاسازی دو و سه می‌بایست با محاسبه‌ی امتیاز هریک از این سطوح از رابطه‌ی (۹) بدست آید. پس از اجرای آنالیز ارائه شده در بخش ۲-۲ توسط نرم‌افزار، مقدار امتیاز کسب شده توسط هریک از کاندیدهای جاسازی در جدول ۳ ارائه شده است.

امتیاز بالاتر سطح کاندید سه نسبت به سطح کاندید دو نشانگر انتخاب این سطح به عنوان سطح جاسازی دوم است. موقعیت نقاط جاسازی چهارم و پنجم بر روی این سطح در شکل ۴ نشان داده شده است. موقعیت دو نقطه‌ی جاسازی نیز به‌صورت $[0.44; 53; -22.48]$ و $[177.52; 46.63; -7.75]$ می‌باشد. پس از انتخاب سطح شماره سه به‌عنوان سطح جاسازی دوم، تحلیل ارائه شده در بخش ۲-۳ برای محاسبه‌ی سطح جاسازی سوم همراه با موقعیت جاساز توقف بر روی آن پیاده‌سازی نرم‌افزاری گردید. سطوح کاندید برای این مرحله از تحلیل شامل مجموعه $\{2.5, 6\}$ هستند که پس از اجرای محاسبات، مقدار امتیاز هریک از این سطوح مطابق جدول ۴ بدست می‌آید. نتایج جدول ۳ نشان‌گر این است که دو سطح پنج و شش امتیاز تقریباً یکسانی را از این قانون بدست می‌آورند.

جدول ۱ موقعیت جاسازهای محاسبه شده روی سطح پایه (با فرض $M_1 = 0.1$)		
موقعیت جاساز اول	موقعیت جاساز دوم	موقعیت جاساز سوم
$[1.16/-16 \text{ و } 0.54/-12]$	$[8.85/-8 \text{ و } 44.77/4]$	$[17.71/17 \text{ و } 52.32/51]$

جدول ۲ بیشترین طول لبه (فاصله قابل اعمال بین جاسازها) برای سطوح کاندید				
شماره سطح	۲	۳	۵	۶
طول بیشترین لبه	۱۸۰/۲۲	۱۸۰/۶۲	۱۰۷/۹۸	۹۳/۶۸

جدول ۳ مقادیر امتیاز محاسبه شده برای سطوح کاندید جاسازی دوم		
شماره سطح	۲	۳
امتیاز کسب شده	۰/۹۲	۰/۹۵

به همان اندازه‌ی حالت دوسویی این جاساز با جاسازهای پایه برای طراح حائز اهمیت است، لذا دقت کافی برای ارضای این مهم مد نظر قرار می‌گیرد. برای این تحلیل، نقاط مش‌بندی بر روی هریک از سطوح کاندید جاسازی سوم تبدیل به پیچ‌های متناسب با آن می‌شود. سپس مقدار حالت دوسویی هریک از این پیچ‌ها نسبت به جاسازهای پایه و کنار از رابطه‌ی (۱۰) بدست می‌آید.

$$DofC_{3i} = 1/2 \sigma(W_b, T_i) + 1/2 \sigma(W_s, T_i) \quad (10)$$

برای محاسبه‌ی این نیروممان از میانگین‌گیری (اختصاص ضریب ۰/۵) ضریب کار مجازی هریک از پیچ‌های سطح کاندید جاسازی سوم با نیروممان معادل پایه و نیروممان معادل جاسازی کنار استفاده می‌شود. در این معادله، T_i پیچ‌های هریک از نقاط جاسازی و W_s نیروممان متوسط جاسازی کنار است که از رابطه‌ی (۱۱) حاصل می‌شود.

$$W_s = [-N_s, S_g \times (-N_s)] \quad (11)$$

حال امتیاز هریک از جاسازها از رابطه‌ی (۱۲) محاسبه می‌شود:

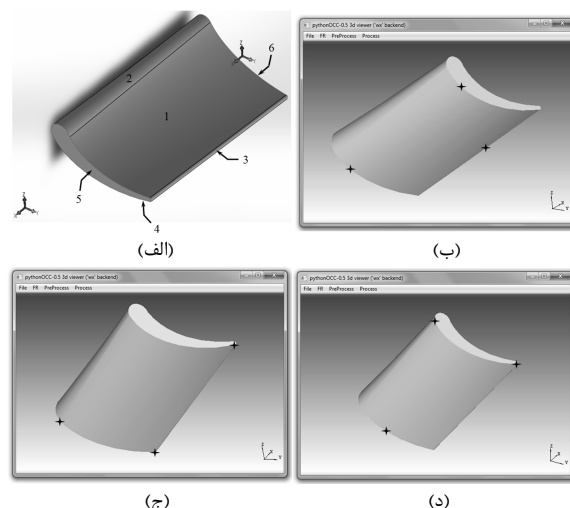
$$S(i) = \frac{DofC_{3w} - DofC_3(i)}{DofC_{3w} - 0} \quad (12)$$

در این معادله، $DofC_{3w}$ بیشترین مقدار $DofC_{3i}$ بین تمام سطوح کاندید جاسازی است. بیشترین امتیاز در بین جفت جاسازهای هر سطح به-عنوان امتیاز آن سطح مطرح می‌شود. لذا، سطحی که بیشترین امتیاز را بین تمام سطوح کسب کند، به‌عنوان سطح جاسازی سوم انتخاب می‌شود. با انتخاب سطح جاسازی، موقعیت جاساز نیز روی آن سطح از مرحله‌ی تحلیل مشخص شده است. اگر تمام جاسازهای موجود بر روی سطح امتیاز یکسانی را کسب کرده باشند، جاساز سوم در مرکز آن سطح اعمال می‌شود.

۳- مطالعه‌ی موردی

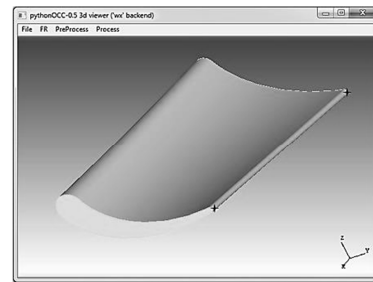
مدل نشان داده شده در شکل ۳ الف به‌عنوان نمونه‌ای از یک مدل با هندسه-ی شکل‌آزاد برای ارزیابی تحلیل استفاده می‌شود. فرض بر این است که سطح یک به‌عنوان سطح ماشین‌کاری و سطح چهار از مجموعه فعالیت‌های قید و بند به‌عنوان سطح جاسازی پایه انتخاب شده است.

تحلیل ارائه شده، در بستر یکپارچه طراحی و ساخت به‌کمک رایانه [۷] با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی نرم‌افزاری شد. براساس آنالیز ارائه شده در بخش ۲-۱، ابتدا موقعیت نقاط جاسازی پایه محاسبه می‌شود.



شکل ۳ الف) مطالعه‌ی موردی مدل پره توربین؛ موقعیت جاسازهای پایه با فرض (ب)

$M_1 = 0.7$ (ج) $M_1 = 0.4$ (د) $M_1 = 0.1$



شکل ۴ نقاط جاسازی کنار بر روی سطح جاسازی دوم

جدول ۴ مقادیر امتیاز محاسبه شده برای سطوح کاندید جاسازی دوم

شماره سطح	۶	۵	۲
امتیاز کسب شده	۰/۹۳۱	۰/۹۲۹	۰/۳۸۹

این موضوع بیانگر این است که انتخاب بین این دو سطح صرفاً با احتساب قانون محدود کردن درجات آزادی قطعه‌کار با بیشترین شدت ممکن امکان‌پذیر نیست. علت این موضوع نیز صفحه‌ای بودن این دو سطح می‌باشد. لذا، برای تعیین سطح مناسب جاسازی سوم می‌بایست قوانین دیگری از جمله قانون تحمل نیرو و گشتاور ماشین‌کاری با احتساب جهت نیروها و گشتاورها مورد استفاده قرار گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی تحلیلی برای طراحی سیستم جاسازی قطعات با سطوح شکل‌آزاد بر مبنای محدود کردن درجات آزادی قطعه‌کار ارائه گردید. سطوح جاسازی دوم و سوم با استفاده از روش جاسازی ۱-۲-۳ تعیین و موقعیت جاسازها بر روی آن‌ها محاسبه گردید. این قانون برای سطح پایهی جاسازی به دو بخش توازی جاسازها و بیشترین فاصله بین آن‌ها تقسیم‌بندی گردید و با تعریف ماتریس $BLRM$ مورد آنالیز قرار گرفت. برای سطح جاسازی دوم، این قانون به سه قسمت توازی، فاصله بین جاسازها و بیشترین حالت دوسویی جاسازهای کنار با جاسازهای پایه تقسیم شد و با ذخیره داده‌های آن‌ها در ماتریس $SLRM$ ، تحلیلی کامل برای مدل‌سازی آن ارائه شد. سطح جاسازی سوم همراه با موقعیت جاساز توقف نیز به روشی مشابه مورد تحلیل قرار گرفت. بر خلاف پژوهش‌های پیشین که اغلب از آرایه‌های پینی برای جاسازی مدل‌های نامنظم استفاده می‌کردند، مدل ارائه شده توانایی تعیین سطوح جاسازی و موقعیت جاسازها را بر روی آن‌ها دارد. نمونه‌ای از مدل پره توربین دارای سطوح آزاد به عنوان مطالعه‌ی موردی جهت ارزیابی توانایی تحلیل ارائه شده مورد استفاده قرار گرفت. با محاسبه‌ی موقعیت جاسازها بر روی سطح پایه، نتیجه گرفته شد که طراح می‌بایست از مواضع خود در قبال توازی جاسازهای پایه عقب‌نشینی نماید تا بتواند فاصله‌ی مناسب بین جاسازها را کسب کند. برای مدل ارائه‌شده، سطح شماره سه با کسب امتیاز ۰/۹۵ بعنوان سطح جاسازی دوم انتخاب گردید. برای سطح جاسازی سوم نیز دو سطح پنج و شش امتیاز یکسانی را کسب کردند. لذا، طراحی قانونی که مقدار تحمل سطح در برابر نیرو و گشتاور ماشین‌کاری را مدل‌سازی نماید، به عنوان مطالعات بعدی پیشنهاد می‌گردد.

۵- فهرست علائم

$BLRM$	ماتریس جاسازی پایه
b_g	تصویر مرکز ثقل صفحه‌ی معادل پایه روی سطح پایه

$D(i, j)$	فاصله‌ی بین جاسازهای کنار
$DofC$	مقدار حالت دوسویی جاسازهای کنار با پایه
$IP(i, j)$	پارامتر توازی جاسازها
M_1	پارامتر تنظیم توازی جاسازهای پایه
M_2	پارامتر تنظیم توازی جاسازهای کنار
M_3	پارامتر تنظیم فاصله جاسازهای کنار
MEL	بیشترین طول لبه بین سطوح کاندید جاسازی دوم
n	تعداد نقاط مش‌بندی
N	بردار نرمال
S	مساحت سطح مثلث متشکل از جاسازهای پایه
$SLRM$	ماتریس جاسازی کنار
$S(i)$	مقدار امتیاز کسب شده توسط جاساز توقف i ام
$S(i, j)$	مقدار امتیاز کسب شده توسط جفت جاساز کناری i, j ام
S_g	نقطه مرکز ثقل لبه‌ی معادل جاسازی کنار
$TLRM$	ماتریس جاسازی توقف
T	پیچ‌هی جاسازی
W	نیروممان جاسازی
اندیس‌ها	
b	سطح جاسازی پایه
i	شماره هر جاساز (یا هر نقطه روی سطح)
p	صفحه معادل سطح جاسازی پایه
s	سطح جاسازی کنار
w	بیشترین (بدترین) مقدار پارامتر

۶- مراجع

- [1] Y. Rong, S. Huang, and Z. Hou, *Advanced computer-aided fixture design*, pp. 20-27, USA: Elsevier Academic Press, 2005.
- [2] R. StawellBall, *A treatise on the theory of screws*, London: Cambridge university press, 1900.
- [3] M. S. Ohwovoriole, B. Roth, An extension of screw theory, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 103, pp. 725-735, 1981.
- [4] H. Asada, A. B. By, Kinematic Analysis of Workpart Fixturing for Flexible Assembly with Automatically Reconfigurable Fixtures, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 1, No. 2, pp. 86-94, 1985.
- [5] Y.C. Chou, V. Chandru, M. M. Barash, A mathematical approach to automatic configuration of machining fixtures: analysis and synthesis, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 299-306, 1989.
- [6] R. A. Marin, P. M. Ferreira, Optimal Placement of Fixture Clamps, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, pp. 676-694, 2002.
- [7] 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.
- [8] P. J. Pawar, S. R. Gangurde, Development of a software for automated design of machining fixtures using kinematic analysis and synthesis, in *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering*, Dhaka, Bangladesh, 2003.
- [9] E. C. DeMeter, Restraint Analysis of Fixtures Which Rely on Surface Contact, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 116, pp. 207-215, 1994.
- [10] M. J. Nategh, The design of machine tools jigs and fixtures, pp. 70-80, Tehran, Iran: Tarbiat Modares University pub, 2007. (in persian)
- [11] S. D. Jones, *Computer controlled reconfigurable part fixture mechanism*, US Patent No. US5732194 A, 2013.
- [12] P. E. Nelson, H. R. Schlosstein, *Reconfigurable holding fixture*, US Patent No. US5249785 A, 1992.
- [13] 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 & Manufacture*, Vol. 42, pp. 837-849, 2002.
- [14] N. I. Afzeri, Hybrid Optimization of Pin type fixture Configuration for Free Form Workpiece, *International Journal of Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 32-42, 2008.
- [15] K. Y. Yeung, X. Chen, 3D freeform component fixture design optimisation using a genetic algorithm, in *Proceedings of The Computing and Engineering Annual Researchers' Conference*, Huddersfield: University of Huddersfield, pp. 1-6, 2007.