



Analysis of the Effects of Machining Loads on Online Values of Reaction Forces in Fixture Locating System

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Parvaz H.^{1*},
Heidari M.¹,
Hosseini S.V.¹

How to cite this article

Parvaz H, Heidari M, Hosseini S V. Analysis of the Effects of Machining Loads on Online Values of Reaction Forces in Fixture Locating System. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(9):615-628.

¹ Assistant Professor, Department of Manufacturing, Production, and Mechatronics, Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Phone: -

P. O. Box: 36199-95161

h.parvaz@shahroodut.ac.ir

Article History

Received: April 21, 2021

Accepted: June 13, 2021

ePublished: July 28, 2021

ABSTRACT

The magnitude of reaction forces in locating points is considered as one of the basic parameters in the fixture planning and element design stages of the fixture design procedure. The magnitude of these forces depends on the intensity, position, and orientation of the transient clamping and active machining forces and torque. Analysis of the effect of machining force and torque on reaction forces is a complex process because the magnitude, position, and orientation of machining loads change at any given time. In this paper, an analytical model is presented to investigate the effect of machining loads on online values of reaction forces in the contact points between the workpiece and the fixturing elements. The magnitude and direction of machining forces and torque are calculated on the tool path and using these parameters as inputs to the analytical model, the reaction forces are calculated in each of the six locators at each moment. A finite element analysis is performed to validate the values predicted by the analytical model. For this purpose, the necessary subroutines are prepared and the values of the reaction forces obtained from the simulation are compared to their corresponding values from the analytical model. A three-dimensional workpiece with a 3-2-1 locating system was used as a case study to evaluate the performance of the proposed model. The maximum error in calculating the reaction forces was obtained as 10.85% from the proposed analytical model which indicates the accuracy of the theoretical predictions.

Keywords Force Analysis; Locating; Jig and Fixture; Reaction Force; Machining Load.

CITATION LINKS

[1] A Mathematical Approach to Automatic Configuration of Machining Fixtures: Analysis and Synthesis. [2] Fixture Planning With Friction. [3] Deformable Sheet Metal Fixturing: Principles, Algorithms, and Simulations. [4] Optimal Placement of Fixture Clamps: Minimizing the Maximum Clamping Forces. [5] A model for synthesis of the fixturing configuration in pin-array type flexible machining fixtures. [6] Computer-Aided Fixture Design Verification. [7] The Application of Chip Removal and Frictional Contact Analysis for Workpiece-Fixture Layout Verification. [8] Principles of Process Planning. [9] Machining fixture locating and clamping position optimization using genetic algorithms. [10] Finite element modeling of fixture-workpiece contacts: single contact modeling and experimental verification. [11] Optimisation of machining fixture layout under multi-constraints. [12] Deformation control through fixture layout design and clamping force optimization. [13] A pilot framework developed as a common platform integrating diverse elements of computer aided fixture design. [14] A multi-objective optimization and decision algorithm for locator layout continuous searching in checking fixture design. [15] Fixture layout optimization for flexible aerospace parts based on self-reconfigurable swarm intelligent fixture system. [16] Development of locating system design module for freeform workpieces in computer-aided fixture design platform. [17] Development of computer aided clamping system design for workpieces with freeform surfaces. [18] Analytical and Numerical Investigation of Reaction Forces in Fixturing of Rigid Workpiece with Polyhedral Geometry. [19] Manufacturing Automation. [20] Prediction of Milling Force Coefficients From Orthogonal Cutting Data [21] Materials Properties Handbook: Titanium Alloys.

آنالیز اثر نیرو و گشتاور ماشین کاری بر روی مقادیر برلحظه نیروهای عکس العمل در سیستم جاسازی قید و بندها

هادی پروز*

گروه ساخت و تولید و مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

مهدی حیدری

گروه ساخت و تولید و مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

سیدوحید حسینی

گروه ساخت و تولید و مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

چکیده

مقادیر نیروهای عکس العمل در قید و بندها جزو شاخصه‌های اساسی در مراحل طرح‌ریزی و طراحی اجزای قید و بند به شمار می‌رود. مقدار این نیروها در هریک از نقاط جاسازی ثابت نبوده و تابعی از مقدار و جهت نیروی برآیند بست (به عنوان نیروی گذرا) و نیرو و گشتاور ماشین کاری (به عنوان نیروی فعال) است. از آنجا که بزرگی، موقعیت و جهت نیرو و گشتاور ماشین کاری در هر لحظه متغیر است، مطالعه اثر آن بر روی نیروهای عکس العمل، فرآیندی پیچیده به شمار می‌رود. در این مقاله، یک مدل تحلیلی برای بررسی اثر نیروها و گشتاور ماشین کاری بر روی مقادیر برلحظه نیروهای عکس العمل در جاسازها ارائه شده است. در این مدل، ابتدا مقادیر و جهت نیروها و گشتاورهای ماشین کاری در هر لحظه بر روی مسیر حرکت ابزار محاسبه شده و سپس با استفاده از این شاخصه‌ها به عنوان ورودی مدل تحلیلی، مقادیر برلحظه نیروهای عکس العمل در هریک از جاسازهای شش‌گانه محاسبه شده است. تحلیل اجزا محدود برای صحت‌سنجی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل تحلیلی اجرا شده است. برای این منظور، کدهای لازم نوشته شده و مقادیر نیروهای عکس العمل به دست آمده از شبیه‌سازی با مقادیر متناظر آن‌ها از مدل تحلیلی مقایسه شده است. یک قطعه کار سه‌بعدی با سیستم جاسازی ۱-۲-۳ که تحت عملیات فرزکاری قرار گرفته است، به عنوان مطالعه موردی برای بررسی کارایی مدل پیشنهادی استفاده شد. بیشینه مقدار خطا در محاسبه نیروهای عکس العمل از مدل تحلیلی پیشنهادی برابر با ۱۰/۹ درصد به دست آمد که بیانگر دقت بالای نتایج تحلیلی است.

کلیدواژه‌ها: آنالیز نیرویی؛ جاسازی؛ قید و بند؛ نیروی عکس العمل؛ نیروی ماشین کاری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۳

* نویسنده مسئول: h.parvaz@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

طراحی قید و بندها معمولاً در چهار مرحله طرح‌ریزی ستاپ، طرح‌ریزی قید و بند، طراحی اجزای قید و بند و صحت‌سنجی اجرا می‌شود. اندازه نیروهای عکس العمل به عنوان یک شاخصه کلیدی در همه این مراحل استفاده می‌شود. در طرح‌ریزی قید و بندها، تصمیم‌گیری درباره کلیت طرح قید و بند بسته به هندسه قطعه کار،

درجه صلبیت آن و امکانات موجود در کارگاه انجام شده و سپس سیستم‌های جاسازی، بست و تکیه‌گاه طراحی می‌شوند. اندازه نیروهای عکس العمل نقش مهم و کلیدی در محاسبه موقعیت جاسازها، موقعیت و جهت اعمال بست‌ها و در نتیجه مقدار تغییر شکل قطعه کار ناشی از اعمال نیروهای بست و ماشین کاری دارند. به عنوان مثال، موقعیت و جهت نیروی بست باید به گونه‌ای انتخاب شود که نیروهای عکس العمل مثبت بر روی همه جاسازها ایجاد شوند. در مرحله طراحی اجزای قید و بند، اندازه نیروهای عکس العمل بر روی هریک از نقاط جاسازی، دقیقاً به عنوان ورودی مرحله طراحی عمل کرده و مقادیر اندازه‌های هندسی جاسازها همراه با جنس ماده مورد استفاده در آن‌ها، با استفاده از این داده‌ها محاسبه می‌شوند. در مرحله آخر از طراحی قید و بندها که صحت‌سنجی است، اندازه نیروهای عکس العمل نقش مهمی را در آنالیزهای پایداری، صحت سیستم جاسازی و بست، و اجتناب از وقوع گیر قطعه کار در حین جاسازی در قید و بند دارد. لذا، داده‌های مربوط به اندازه نیروهای عکس العمل در مراحل مختلف طراحی قید و بندها استفاده شده و می‌توان این داده‌ها را به عنوان یکی از اصلی‌ترین ابزارهای طراح قید و بند دانست.

محاسبه تحلیلی مقادیر این نیروها در قید و بند قطعات با هندسه چندوجهی یک فرآیند نسبتاً پیچیده به شمار می‌رود. چراکه امکان استفاده از معادلات تعادل استاتیکی با توجه به نامعین بودن استاتیکی سامانه وجود ندارد. در سامانه جاسازی یک قطعه سه‌بعدی، سه مؤلفه نیروی عکس العمل در هر نقطه تماس وجود دارد که شامل یک مؤلفه عمودی و دو مؤلفه مماسی است. لذا، مجموعاً تعداد هجده مجهول در یک سیستم جاسازی ۱-۲-۳ وجود خواهد داشت که امکان محاسبه آن‌ها با داشتن شش معادله تعادل استاتیکی وجود ندارد. برای حل این مسأله در مقاله حاضر، از اصل کمینه اندازه نیروها استفاده شده است. از سوی دیگر، نیروهای خارجی وارده بر قطعه کار در یک قید و بند ماشین کاری به دو دسته استاتیکی (شامل نیروی بست و وزن قطعه کار) و دینامیکی (ماشین کاری) تقسیم‌بندی می‌شود. محاسبه نیروهای عکس العمل با در نظر گرفتن صرفاً نیروهای استاتیکی منجر به نیل به جواب در محدوده استاتیکی خواهد شد. به عبارت دیگر، ممکن است طراحی سیستم جاسازی و بست با استفاده از این داده‌ها انجام شده و منجر به جواب حتی نادرست شود. به عنوان مثال، ممکن است سیستم بست بدون در نظر گرفتن نیروهای ماشین کاری و با اعمال نیروهای بست و وزن قطعه کار طراحی شده و به ظاهر درست، نیز باشد. ولی اعمال نیروی ماشین کاری، که اندازه و جهت آن در هر لحظه متغیر است، منجر به تغییر جهت مؤلفه عمودی نیروی عکس العمل در یکی از جاسازها شده و باعث جدایش قطعه کار از آن جاساز شود. استدلال مشابهی را نیز می‌توان در طراحی استاتیکی و دینامیکی اجزای جاسازی بدون در نظر گرفتن نیروهای ماشین کاری برای محاسبه نیروهای عکس العمل مطرح نمود. لذا، نیروی ماشین کاری باید به عنوان اصلی‌ترین نیروی خارجی اعمالی بر قطعه کار در قید و بندها در محاسبه

بود که مقدار بیشینه نیروی ماشین‌کاری از یک رابطه تحلیلی که برای فرآیند شیارتراشی ارائه شده بود^[8]، محاسبه شده و به صورت بارهای استاتیکی در مسیر ماشین‌کاری به قطعه کار اعمال شد. این موضوع امکان استفاده از داده‌های به دست آمده برای نیروهای عکس‌العمل را در طراحی دینامیکی و خستگی اجزای جاسازی و تحلیل ارتعاشی بدنه قید و بند از بین می‌برد. در پژوهشی مشابه، کایا^[9] از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی موقعیت جاسازها، بست و تکیه‌گاه با در نظر گرفتن نیروهای بست و ماشین‌کاری به عنوان نیروهای خارجی استفاده کرد. نیروهای ماشین‌کاری به صورت بیشینه نیرو از تحلیل ارائه شده در مرجع^[8] محاسبه شده، به قطعه کار اعمال گردید و از تحلیل اجزا محدود در هربار تکرار فرآیند بهینه‌سازی استفاده شد. تحلیل پایداری قطعه بر روی قید و بند نیز به عنوان یک شرط لازم در هر جواب جدید تولید شده توسط الگوریتم ژنتیک اجرا شد. تماس بین یک قطعه کار و یک جاساز را به صورت تحلیلی و شبیه‌سازی با اعمال شرایط مرزی مختلف و هندسه تماس تخت-تخت و تخت-کروی توسط ساتیانارایانا و ملکوتی^[10] مورد بررسی قرار گرفت. شاخصه‌های خروجی شامل تغییر شکل الاستیک قطعه کار و نیروهای عکس‌العمل بودند. با صرف نظر کردن از اصطکاک بین قطعه کار و جاسازها، وانگ و همکاران^[11] یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای بیشینه‌سازی دقت موقعیت‌دهی و تکرارپذیری جاسازی ارائه دادند. در هر مرحله از بهینه‌سازی، پایداری قطعه کار نیز بر روی سیستم جاسازی بررسی شد. چن و همکاران^[12] مدلی برای کمینه‌سازی اندازه نیروهای بست با در نظر گرفتن اثرات اصطکاک بین قطعه کار و سیستم جاسازی و اثرات برداشت براده ارائه کردند. از روش تحلیل اجزا محدود برای محاسبه مقادیر تغییر شکل‌ها در هربار تکرار استفاده شد. روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک برای نیل به جواب بهینه برای سیستم جاسازی استفاده گردید. در مرجع^[13]، طراحی سامانه تکیه‌گاه با اجرای تحلیل اجزا محدود بر روی یک قطعه کار با هندسه چندوجهی انجام شد. برای اجرای این تحلیل، نیروی بست و وزن قطعه کار به عنوان تنها نیروهای خارجی وارد بر قطعه در نظر گرفته شده و با صرف نظر کردن از اصطکاک بین قطعه و جاسازها، بیشینه تغییر شکل قطعه کار برای اعمال تکیه‌گاه مشخص شد. جیانگ و همکاران^[14] یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای طراحی سیستم جاسازی برای قید و بندهایی که برای بررسی کیفیت قطعه کار استفاده می‌شد، ارائه دادند. هدف بهینه‌سازی نیل همزمان به دقت جاسازی، حفظ پایداری قطعه کار در قید و بند و قابلیت باربرداری سریع و ساده قطعه کار در سیستم جاسازی بود. الگوریتم جستجو پیشنهادی به جای گسسته‌سازی سطح، از روش جستجوی پیوسته بر روی سطح قطعه کار استفاده می‌کرد تا خطای گسسته‌سازی از بین برود. شرط حفظ پایداری قطعه کار بر روی سیستم جاسازی نیز به عنوان شرط لازم در هر مرحله از تکرار فرآیند بهینه‌سازی رعایت می‌شد. ژبونگ و همکاران^[15] از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک برای محاسبه چینش بهینه جاسازی برای قطعات غیرصلب مورد استفاده در صنایع هوا و فضا استفاده کردند. مقدار تغییر شکل قطعه کار در

نیروهای عکس‌العمل در نظر گرفته شود. مقاله حاضر، به بررسی اثر نیروها و گشتاور ماشین‌کاری بر روی مقادیر نیروهای عکس‌العمل در قید و بندها با سیستم جاسازی ۱-۲-۳ می‌پردازد.

در بررسی پیشینه پژوهش، مقاله‌هایی که نیروهای عکس‌العمل در نقاط جاسازی را برای استفاده در هریک از مراحل طراحی قید و بندها محاسبه کرده‌اند، ارائه می‌شود. همچنین، پژوهش‌هایی که در آن تحلیل اجزا محدود در زمینه طراحی قید و بندها اجرا شده است، بررسی می‌شود. چو و همکاران^[1] مدلی را برای طراحی سیستم جاسازی قطعات چندوجهی با استفاده از تئوری پیچ ارائه کردند. با محاسبه نیروهای عکس‌العمل در حالت دوبعدی، حفظ تماس بین قطعه کار و جاسازها به صورت شرط مثبت بودن مؤلفه عمودی این نیروها مطرح شد. لی و کاتکوسکی^[2]، مقادیر مؤلفه مماسی نیروی عکس‌العمل در نقاط جاسازی را با استفاده از تعریفی به نام سطح حدی در حالت لغزش محاسبه کردند. برای محاسبه مقدار این نیرو، عنوان شد که رابطه مستقیمی بین سرعت لغزش قطعه کار روی جاساز و مؤلفه مماسی نیروی عکس‌العمل در آن نقطه وجود دارد. جای و همکاران^[3]، مقادیر نیروهای عکس‌العمل در نقاط جاسازی را برای آنالیز پایداری قطعه کار غیرصلب استفاده کردند. برای این نوع از قطعات، تعداد بیشتر از سه جاساز بر روی سطح پایه استفاده شد و پایداری آن با وجود تعداد مختلفی از جاسازهای پایه بررسی شد. در مرجع^[4]، تئوری پیچ برای مدل‌سازی نیروهای خارجی اعمالی به قطعه کار در قالب پیچه‌های (Twist) اغتشاشی استفاده شد و با تعیین موقعیت جاسازها به گونه‌ای که بیشترین حالت تقابل را با این پیچه‌ها داشته باشند، به طراحی سیستم جاسازی برای قطعات با هندسه چندوجهی پرداخته شد. هورتادو و ملکوتی^[5]، تحلیل پایداری یک قطعه کار با هندسه شکل-آزاد را که با استفاده از آرایه‌های پینی‌شکل موقعیت‌دهی شده بود، انجام دادند. یک بهینه‌سازی چندمنظوره برای محاسبه بهترین ترکیب پین‌ها برای رسیدن به حالت بهینه انطباق بین سطح و پین‌ها همراه با کمینه مقدار تغییر شکل قطعه کار اجرا شد. در مرجع^[6]، تحلیل پایداری قطعه کار بر روی قید و بند با محاسبه مقادیر نیروهای عکس‌العمل در جاسازها انجام شد. ماتریس سفتی مجموعه قطعه کار و قید و بند از طریق نرم‌افزار تحلیل اجزا محدود محاسبه شده و با داشتن اندازه نیروهای خارجی، مقادیر جابجایی در هریک از نقاط تماس محاسبه شد. با استفاده از مقادیر این جابجایی‌ها، اندازه نیروهای عکس‌العمل بر روی هریک از این نقاط محاسبه شده و در تحلیل پایداری استفاده شد. در پژوهشی مشابه با پژوهش حاضر، مقادیر مؤلفه عمودی نیروهای عکس‌العمل در نقاط تماس بین قطعه کار و جاسازها با اجرای تحلیل اجزا محدود و با در نظر گرفتن نیروهای ماشین‌کاری محاسبه شدند^[7]. هدف اصلی اجرای این تحلیل، بهینه‌سازی موقعیت اعمال جاسازها و بست‌ها بود. محدودیت اصلی این روش علاوه بر استفاده از تحلیل سنگین اجزا محدود در هربار از تکرار فرآیند بهینه‌سازی، عدم محاسبه مقادیر نیروها و گشتاورهای ماشین‌کاری به صورت لحظه به لحظه بود. نحوه در نظر گرفتن اثرات بار ماشین‌کاری در پژوهش مزبور به این صورت

تحلیلی، از شبیه‌سازی در نرم‌افزار اجزا محدود استفاده شده و مقادیر تحلیلی با مقادیر عددی مقایسه شده است. محاسبه سریع همه مؤلفه‌های عمودی و مماسی در نقاط جاسازی شش‌گانه، محاسبه تحلیلی مقادیر برلحظه نیروهای عکس‌العمل در نقاط جاسازی با احتساب نیروهای برلحظه ماشین‌کاری و بررسی مقایسه‌ای نتایج بر روی یک مطالعه موردی سه‌بعدی، نوآوری‌های اصلی مقاله حاضر به‌شمار می‌رود.

۲- مدل‌سازی تحلیلی

برای حل مسأله محاسبه نیروهای عکس‌العمل در جاسازهای یک قید و بند در پژوهش حاضر، از اصل کمینه اندازه نیروها استفاده می‌شود. این اصل بیان می‌دارد که از بین همه گزینه‌هایی که برای یک مسأله نامعین استاتیکی به‌عنوان پاسخ مطرح هستند، جواب قابل قبول آن جوابی است که کمترین اندازه ممکن را داشته باشد. فرض بر این است که شش دستگاه مختصات محلی $n - t_1 - t_2$ در نقاط تماس شش‌گانه بین قطعه‌کار و جاسازها تعریف شده و یک دستگاه مختصات جهانی $X - Y - Z$ برای مجموعه تعریف شده است. پیاده‌سازی ریاضیاتی این مسأله منجر به یک مسأله بهینه‌سازی می‌شود که تابع هدف آن کمینه‌سازی بزرگی بردار برآیند $\|R\| = \sum_{i=1}^6 \|R_i\|$ به‌گونه‌ای است که:

$$\|R\| = |W_e| \quad (1)$$

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, 6\} \rightarrow \begin{cases} R_{i_n} > 0 \\ \sqrt{R_{i_{t1}}^2 + R_{i_{t2}}^2} < \mu R_{i_n} \end{cases}$$

در این معادله، R بردار برآیند نیروهای عکس‌العمل است که دارای شش مؤلفه R_i می‌باشد. R_i بردار برآیند نیروی عکس‌العمل در نقطه جاسازی i ام است که دارای سه مؤلفه عمودی (R_{i_n}) ، مماسی اول $(R_{i_{t1}})$ و مماسی دوم $(R_{i_{t2}})$ می‌باشد. J ماتریس تبدیل از دستگاه مختصات محلی $n - t_1 - t_2$ به دستگاه مختصات جهانی $X - Y - Z$ بوده و W_e آچار (Wrench) برآیند نیروها و گشتاورهای خارجی وارد بر قطعه‌کار است. قید اول در رابطه (۱)، همان شرط برقراری تعادل استاتیکی بین نیروهای خارجی و داخلی در دستگاه مختصات جهانی است. قید دوم نیز دارای دو شرط است که شرط اول لزوم مثبت بودن مؤلفه عمودی نیروی عکس‌العمل در تمام جاسازها (شرط لازم برای پایداری قطعه‌کار بر روی قید و بند) و شرط دوم لزوم برقراری قانون اصطکاک کولمب در نقاط تماس بین قطعه‌کار و جاسازها است. ماتریس تبدیل J از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$J = [J_1, J_2, \dots, J_6]$$

$$J_i = [J_{i_n}, J_{i_{t1}}, J_{i_{t2}}]$$

$$J_{i_n} = \begin{bmatrix} n_i^T \\ (r_i \times n_i)^T \end{bmatrix}, J_{i_{t1}} = \begin{bmatrix} t_{1i}^T \\ (r_i \times t_{1i})^T \end{bmatrix}, J_{i_{t2}} = \begin{bmatrix} t_{2i}^T \\ (r_i \times t_{2i})^T \end{bmatrix} \quad (2)$$

در این رابطه، J_i ماتریس تبدیل از دستگاه مختصات محلی به جهانی برای نقطه جاسازی i ام است که دارای سه مؤلفه عمودی (J_{i_n}) ، مماسی اول $(J_{i_{t1}})$ و مماسی دوم $(J_{i_{t2}})$ می‌باشد. r_i

ناحیه نزدیک به منطقه فعال ماشین‌کاری با استفاده از تحلیل اجزا محدود محاسبه شده و اثرات انواع هندسه برخورد قطعه‌کار و جاساز بر روی مقادیر تغییر شکل مطالعه گردید. پروز و ناطق^[16,17] مدل‌هایی را برای طراحی سیستم جاسازی و بست برای قطعات صلب با هندسه شکل‌آزاد ارائه کردند. در طراحی سیستم جاسازی، مقادیر نیروهای عکس‌العمل برای تحلیل پایداری و اجتناب از وقوع گیر استفاده شد. همچنین، مقادیر مثبت این نیروها برای اطمینان از درستی سیستم بست طراحی شده استفاده شد. در مرجع^[18]، مقادیر نیروهای عکس‌العمل در جاسازها با در نظر گرفتن نیروهای وزن و بست به‌عنوان تنها نیروهای خارجی وارده بر قطعه‌کار با هندسه چندوجهی محاسبه شد. تماس اصطکاکی بین قطعه‌کار و جاسازها به‌صورت صفحه به صفحه مدل‌سازی شده و مقادیر نیروهای عکس‌العمل از تحلیل اجزا محدود محاسبه شده و با مقادیر تحلیلی مقایسه شدند. مقادیر نیروها و گشتاور ماشین‌کاری به‌عنوان یک بار خارجی تأثیرگذار بر روی نیروهای عکس‌العمل در نظر گرفته نشدند. با توجه به مشابهت پژوهش مزبور با پژوهش حاضر، لازم به‌ذکر است که در پژوهش مزبور، نیروی بست به‌عنوان تنها نیروی خارجی وارد بر قطعه‌کار در نظر گرفته شد و از اثرات نیروها و گشتاور ماشین‌کاری صرف‌نظر شد. این در حالی است که بار ماشین‌کاری یکی از اصلی‌ترین نیروهای خارجی وارد بر مجموعه قید و بندها به‌شمار می‌آید که باید در محاسبات مربوط به نیروهای عکس‌العمل در نظر گرفته شود.

با بررسی پژوهش‌های پیشین می‌توان مشاهده کرد که پژوهش‌هایی در زمینه محاسبه تحلیلی و عددی مقادیر نیروهای عکس‌العمل در نقاط جاسازی قید و بندها منتشر شده است. ولیکن، کمبودهایی برای هر یک از این پژوهش‌ها وجود دارد که استفاده از آن‌ها را محدود به حالت‌ها و شکل‌بندی‌های خاص می‌کند. به‌عنوان مثال، در محاسبه تحلیلی مقادیر این نیروها، به حالت دوبعدی بسنده شده و صرفاً مؤلفه عمودی نیروی عکس‌العمل در هر نقطه تماس محاسبه شده است. همچنین، در برخی تحلیل‌ها، از اثرات نیروها و گشتاورهای ماشین‌کاری کاملاً صرف‌نظر شده و یا پیاده‌سازی آن در تحلیل‌ها بصورت قرار دادن مقادیر بیشینه نیرو بر روی یک یا چند گره در مسیر ماشین‌کاری انجام شده است. نیروهای عکس‌العمل محاسبه‌شده در این روش‌ها، جامعیت نداشته و تنها مقدار نیروی عکس‌العمل در چند لحظه خاص را در اختیار طراح قرار می‌دهند. در محاسبه نیروهای عکس‌العمل از تحلیل اجزا محدود نیز کمبودهایی همچون اعمال شرایط مرزی به‌صورت مستقیم در گره‌ها و عدم استفاده از تماس اصطکاکی بین سطوح قطعه‌کار و جاسازها محسوس است. برای پوشش دادن این خلأها در مقاله حاضر نیروها و گشتاور ماشین‌کاری بصورت پیوسته و برلحظه محاسبه شده و به‌عنوان ورودی نیروی فعال همراه با نیروهای بست و وزن قطعه‌کار در تحلیل پیشنهادی در نظر گرفته شده است. مقادیر برلحظه نیروهای عکس‌العمل در نقاط جاسازی شش‌گانه برای یک قطعه‌کار با هندسه چندوجهی محاسبه شده است. برای صحت‌سنجی نتایج

بهینه‌سازی، مقادیر تحلیلی نیروهای عکس‌العمل به صورت برلحظه محاسبه می‌شود.

۳- شبیه‌سازی

تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای صحت‌سنجی نتایج تحلیلی اجرا شد. برای این منظور، کدهای لازم در زبان برنامه‌نویسی پایتون نوشته شده و با اجرای آن، مقادیر نیروهای عکس‌العمل در هریک از جاسازهای شش‌گانه نشان داده شده در شکل ۱ (L_1 تا L_6) محاسبه شدند. هندسه مدل در نرم‌افزار مدل‌سازی، آماده شده و با استفاده از فرمت خنثی استپ (STEP) در قالب یک قطعه سه‌بعدی تغییر شکل‌پذیر به نرم‌افزار تحلیل منتقل شد. جاسازها بصورت یک قطعه صلب تحلیلی با هندسه پوسته استوانه‌ای به قطر و طول (به ترتیب) ۵ و ۱۰ میلی‌متر در نرم‌افزار آباکوس تعریف شده و استفاده شدند. با توجه به اینکه جنس قطعه‌کار در مرجع [20] آلیاژ تنگستن Ti_6Al_4V است، جنس قطعه از همین آلیاژ تعریف شده و مدول یانگ و ضریب پواسون آن به ترتیب برابر با ۱۱۰ گیگاپاسکال و ۰/۳۴ درج گردید [21]. در پژوهش حاضر به تعریف خصوصیات قطعه‌کار در محدوده الاستیک بسنده شد. قطعه‌کار در قید و بند علاوه بر اینکه به هیچ وجه مجاز نیست که وارد محدوده تغییر شکل پلاستیک شود، بلکه مقدار تغییر شکل الاستیک آن نیز باید دقیقاً کنترل شود تا دقت موقعیت‌دهی قطعه‌کار حفظ شود. این موضوع با بهینه‌سازی چیدمان جاسازی و بست انجام می‌شود. یک نمونه از قطعه‌کار و شش نمونه از جاساز در مرحله مونتاژ ایجاد شده و با قیدگذاری مناسب در موقعیت مشخص شده در شکل ۱ قرار گرفتند. برای حل مسأله، یک گام حل تعریف شده و از حل‌گر استاندارد در حالت عمومی استاتیک با زمان حل ۱ ثانیه استفاده شد. همچنین، مقادیر نمو اولیه، کمترین و بیشترین اندازه نمو زمانی به ترتیب برابر با ۰/۰۰۰۰۱ و ۱ ثانیه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که در مسأله حاضر، نیروی ماشین‌کاری در هر لحظه به صورت یک نیروی مجزا با مقدار مشخص به قطعه‌کار اعمال شده و تحلیل عددی انجام می‌شود. لذا، ماهیت حل مدل استاتیک بوده و علت استفاده از حل‌گر استاندارد نیز همین است. با پیشروی ابزار، مقدار و موقعیت نیروی ماشین‌کاری نیز به‌روزرسانی شده و مجدداً حل انجام می‌شود. تماس قطعه‌کار با جاسازهای سرتخت به صورت سطح به سطح برقرار شده و ضریب اصطکاک در تمام نقاط تماس برابر با ۰/۲۵ در نظر گرفته شد. هرچند اثر تغییر ضریب اصطکاک بر روی اندازه نیروهای عکس‌العمل نیز بررسی شده و نتیجه بر آن شده است که اندازه نیروهای عکس‌العمل تقریباً مستقل از مقدار ضریب اصطکاک است [18]. پس از تعریف تماس‌ها، نیروهای خارجی بصورت نیروی بست و نیروها و گشتاور ماشین‌کاری به قطعه‌کار در موقعیت‌های نشان داده شده در شکل ۱ اعمال شدند. بست‌ها با نیرویی برابر با ۱۵۰۰ نیوتن در موقعیت‌های مشخص

در جهات مماسی، شعاعی و محوری محاسبه شود. برای این منظور، با توجه به هندسه مارپیچی لبه‌ها، یک جزء به ضخامت dz از ابزار در نظر گرفته شده و نیروهای دیفرانسیلی dF_r ، dF_t و dF_a به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} dF_{t,j}(\phi_j(z)) &= [K_{tc} h_j(\phi_j(z)) + K_{te}] dz \\ dF_{r,j}(\phi_j(z)) &= [K_{rc} h_j(\phi_j(z)) + K_{re}] dz \\ dF_{a,j}(\phi_j(z)) &= [K_{ac} h_j(\phi_j(z)) + K_{ae}] dz \end{aligned} \quad (3)$$

با تصویرکردن نیروهای دیفرانسیلی رابطه (۳) در جهات سه‌گانه استاندارد می‌توان مؤلفه‌های نیروهای دیفرانسیلی در جهات X ، Y و Z را برای لبه زام بصورت dF_x ، dF_y ، dF_z محاسبه کرد. با انتگرال‌گیری از طرفین معادله‌های حاصل شده در طول درگیری لحظه‌ای لبه زام، که به صورت $[z_{j,1} - z_{j,2}]$ است، و جاگذاری $dz = d\phi_j/k_\beta$ ، می‌توان مؤلفه‌های نیروهای ماشین‌کاری را برای لبه زام محاسبه نمود:

$$\begin{aligned} F_{x,j}(\phi_j) &= \left\{ \frac{c}{4k_\beta} [-K_{tc} \cos 2\phi_j + K_{rc} [2\phi_j - \sin 2\phi_j]] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{k_\beta} [K_{te} \sin \phi_j - K_{re} \cos \phi_j] \right\} \Big|_{\phi_j(z_{j,1})}^{\phi_j(z_{j,2})} \\ F_{y,j}(\phi_j) &= \left\{ \frac{-c}{4k_\beta} [K_{tc} (2\phi_j - \sin 2\phi_j) + K_{rc} \cos 2\phi_j] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{k_\beta} [K_{te} \cos \phi_j + K_{re} \sin \phi_j] \right\} \Big|_{\phi_j(z_{j,1})}^{\phi_j(z_{j,2})} \\ F_{z,j}(\phi_j) &= \left\{ \frac{1}{k_\beta} [K_{ac} c \cos \phi_j - K_{ae} \phi_j] \right\} \Big|_{\phi_j(z_{j,1})}^{\phi_j(z_{j,2})} \end{aligned} \quad (4)$$

با محاسبه نیروی هریک از لبه‌های ابزار و جمع آن‌ها می‌توان مقادیر برلحظه نیروهای برآیند ماشین‌کاری را در زاویه درگیری ϕ به صورت $F_x(\phi)$ ، $F_y(\phi)$ ، $F_z(\phi)$ محاسبه کرد. از آنجا که مؤلفه‌های نیروی ماشین‌کاری مزبور در لبه ابزار عمل می‌کنند، با انتقال آن‌ها به مرکز ابزار، گشتاور ماشین‌کاری نیز ایجاد خواهد شد. مقدار این گشتاور با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$T_c = \frac{D}{2} \sum_{j=1}^N F_{t,j}(\phi_j) \quad (5)$$

که در آن، مقدار $F_{t,j}$ با جاگذاری $h_j(\phi_j(z)) = c \sin \phi$ در رابطه (۳) و انتگرال‌گیری از آن در بازه $[z_{j,1} - z_{j,2}]$ در زاویه درگیری ϕ به دست می‌آید. برای تعیین لبه‌های فعال ماشین‌کاری و در نتیجه کرانه‌های انتگرال برای هر لبه، از الگوریتم ارائه شده در [19] استفاده شده است. مقادیر مؤلفه‌های نیروی ماشین‌کاری در یک دور کامل دوران ابزار ($0 < \phi < 360$) محاسبه شده و به‌عنوان بخشی از ورودی W_e همراه با نیروهای بست درج می‌شود. با حل مسأله

ماشین‌کاری در ۵۲ نقطه در مسیر پیمایش ابزار روی قطعه‌کار اعمال می‌شود.

شرایط مرزی به‌صورت محدود کردن کامل شش درجه آزادی بر روی جاسازها اعمال شد. با اجرای کد نوشته‌شده در زبان برنامه‌نویسی پایتون و اعمال نیرو و گشتاور ماشین‌کاری با اندازه و جهت مشخص در طول مسیر ماشین‌کاری، مقادیر برلحظه نیروهای عکس‌العمل بر روی هر یک از جاسازها در طول زمان ماشین‌کاری محاسبه شدند.

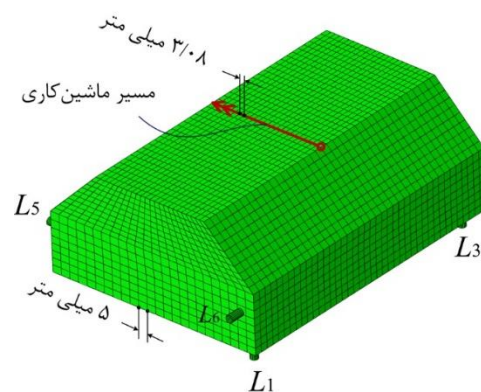
با توجه به اینکه ماشین‌کاری به‌صورت ذاتی یک عملیات دینامیکی است و در محاسبه نیروهای عکس‌العمل از حل‌گر استاتیکی (در هر لحظه از دوران ابزار) استفاده شده است، باید ارزیابی‌های مربوط به وقوع رزونانس نیز انجام شود. به عبارت دیگر بایستی فرکانس‌های طبیعی مجموعه قطعه‌کار و جاسازها در حالت واقعی و در مودهای مختلف ارتعاشی محاسبه شده و اطمینان حاصل شود که فرکانس تحریک اعمال‌شده توسط ابزار در محدوده نزدیک به فرکانس طبیعی مجموعه قطعه‌کار و جاسازها نیست. برای این کار، یک تحلیل اجزا محدود برای محاسبه فرکانس طبیعی مجموعه با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شد. شرایط اجرای این تحلیل تقریباً مشابه با شرایط ذکر شده فوق بوده و تمام تماس‌ها بین قطعه‌کار و جاسازها به‌صورت اصطکاکی با شرایط ذکر شده در نظر گرفته شدند. مقدار دانسیته قطعه‌کار برابر با $4/4$ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شد^[21]. یک گام حل از زیرمجموعه اغتشاش خطی (Linear perturbation) و از نوع فرکانس تعریف شده و درخواست حل برای شش مود ارتعاشی صادر شد. مسأله با شرایط مرزی و مش‌بندی مشابه با حل استاتیکی با استفاده از یک رایانه با پردازنده هشت هسته‌ای و رم هشت گیگابایت حل شد.

۴- نتایج و بحث

برای مقایسه مقادیر نیروهای عکس‌العمل محاسبه‌شده از تحلیل با مقادیر متناظر آن‌ها از شبیه‌سازی، ابتدا باید مقادیر نیرو و گشتاور ماشین‌کاری محاسبه شود. برای این منظور از تحلیل ارائه‌شده در بخش ۲ استفاده شده و کدنویسی در نرم‌افزار متلب برای محاسبه دقیق مقادیر مؤلفه‌های نیروی ماشین‌کاری و مقدار گشتاور ماشین‌کاری انجام شد. برای صحت‌سنجی نتایج حاصل برای نیرو و گشتاور ماشین‌کاری، فرضیات و مقادیر شاخصه‌های ورودی منطبق بر دو نمونه مطالعه موردی ارائه‌شده در مرجع^[20] استفاده شد. این فرضیات در جدول ۱ نشان داده شده است. با جاگذاری پارامترهای جدول ۱ در کد نوشته‌شده و اجرای آن، مقادیر مؤلفه‌های نیروی ماشین‌کاری در سه جهت X ، Y و Z همراه با گشتاور ماشین‌کاری برای دو مطالعه موردی مزبور به‌صورت شکل ۴ قابل مشاهده است.

شده به قطعه‌کار اعمال شدند. مؤلفه‌های نیروی ماشین‌کاری همراه با گشتاور ماشین‌کاری، که در هر دور کامل ابزار از مدل تحلیلی ارائه‌شده در بخش ۲ به‌دست آمده بود، در موقعیت مشخص حرکت ابزار بر روی مسیر ماشین‌کاری و بر روی مسیری که نقطه مرکز ابزار پیمایش می‌کرد، به قطعه‌کار اعمال شد. مقدار دقیق نیروها و گشتاور ماشین‌کاری که در یک فایل ذخیره شده بود، توسط کد پایتون در هر پیشروی ابزار خوانده شده و به قطعه‌کار اعمال گردید. لازم به‌ذکر است که میزان پیشروی ابزار (برای مطالعه موردی اول در جدول ۲) برابر با $0/05$ میلی‌متر بر دور به ازای هر لبه ($0/2$ میلی‌متر بر دور برای ابزار با چهار لبه برنده) است که معادل $0/00055$ میلی‌متر بر هر درجه دوران ابزار خواهد بود. هرچند مقدار نیرو و گشتاور ماشین‌کاری در هر درجه از دوران ابزار به‌صورت تحلیلی وجود دارد، ولی اجرای شبیه‌سازی در هر درجه از دوران ابزار منطقی بنظر نمی‌رسد. چراکه اولاً امکانات سخت‌افزاری بالایی را نیاز خواهد داشت و ثانیاً جواب‌هایی که برای نیروهای عکس‌العمل به‌دست می‌آید، با تغییرات یک درجه‌ای دوران ابزار تغییر چندانی نخواهد کرد. از سوی دیگر، امکان اعمال نیرو صرفاً بر روی نقاط گره در شبکه‌بندی قطعه‌کار وجود دارد. هرچقدر شبکه‌بندی مدل ریزتر شود، امکان اعمال نیرو در نقاط بیشتری فراهم می‌شود. ولیکن، ریز کردن بیش از اندازه مش‌بندی منجر به افزایش قابل توجه حجم محاسبات می‌شود. با توجه به تمامی این ملاحظات، مش‌بندی مدل قطعه‌کار با نوع جزء $C3D20R$ ، که یک جزء شش‌وجهی ۲۰ گره هیبرید است، با اندازه بیشینه مش برابر با ۵ میلی‌متر انجام شد. مدل مش‌بندی شده در شکل ۳ قابل مشاهده است.

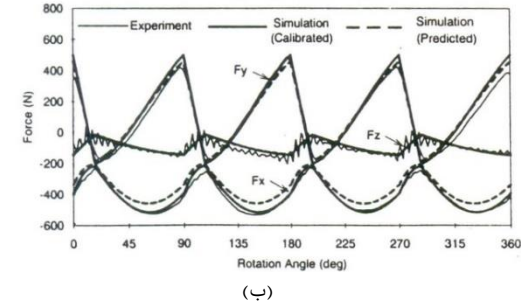
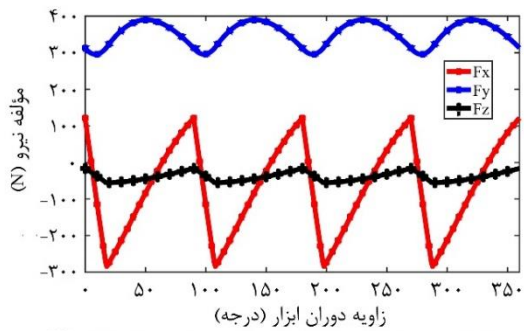
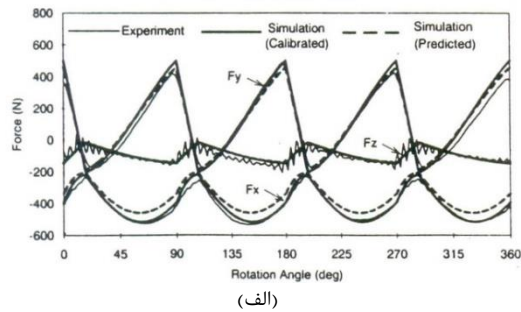
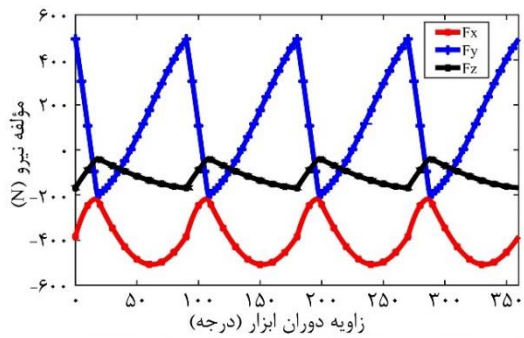
اندازه مش بر روی خط پیمایش ابزار روی قطعه‌کار برابر با $3/08$ میلی‌متر به‌دست آمده است. با توجه به اینکه در اجزا استفاده شده، امکان اعمال نیرو در گره موجود در وسط اجزا نیز وجود دارد، نیرو را می‌توان در فواصل $1/54$ میلی‌متر به قطعه‌کار اعمال کرد. این فاصله دقت کافی را برای محاسبه مقادیر نیروهای عکس‌العمل و مقایسه آن‌ها با مقادیر تحلیلی فراهم می‌کند. لذا، نیروها و گشتاور



شکل ۳) مدل مش‌بندی شده قطعه‌کار همراه با اندازه مش در طول مسیر ماشین‌کاری

جدول ۱) فرضیات و مقادیر پارامترهای ورودی برای دو مطالعه موردی

پارامتر	واحد	مطالعه موردی	
		اول	دوم
قطر ابزار، D	mm	۱۹/۰۵	۱۹/۰۵
تعداد لبه ابزار، N	-	۴	۴
زاویه مارپیچ ابزار، β	$^\circ$	۳۰	۳۰
عمق ماشین کاری، a	mm	۵/۰۸	۵/۰۸
پیشروی، c	mm/rev-tooth	۰/۰۵	۰/۰۱۲۷
حالت درگیری	-	نصف درگیری	نصف درگیری
نوع فرزکاری	-	مخالف	موافق
نوع روانکاری	-	خشک	خشک
زاویه شروع درگیری، ϕ_{st}	$^\circ$	۰	۹۰
زاویه پایان درگیری، ϕ_{ex}	$^\circ$	۹۰	۱۸۰
ثوابت برش کاری	K_{tc}	-	۱۷۳۱
	K_{rc}	-	۳۱۷
	K_{ac}	-	۶۲۳
	K_{te}	-	۲۲/۷
	K_{re}	-	۴۴/۵
	K_{ae}	-	۲/۴
زاویه براده ابزار، α	$^\circ$	۱۲	۰
سرعت برش	m/min	۳۰	۳۰
جنس قطعه کار	-	Ti ₆ Al ₄ V	Ti ₆ Al ₄ V
جنس ابزار	-	کاربیدی	کاربیدی



شکل ۴) مقایسه نتایج حاصل از پیاده سازی تحلیل با نتایج ارائه شده در مرجع [20] برای مؤلفه های نیرو و گشتاور ماشین کاری در مطالعه موردی (الف) اول و (ب) دوم (با فرضیات ارائه شده در جدول ۱)

مؤلفه مماسی نیرو همراه با گشتاور ماشین کاری برای دو مطالعه موردی مذکور در شکل ۵ قابل مشاهده است.

موقعیت، جهت و اندازه نیروی بست ها، مؤلفه های نیروی ماشین کاری و گشتاور ماشین کاری در هر لحظه هستند. مقادیر این پارامترها در جدول ۲ نشان داده شده است.

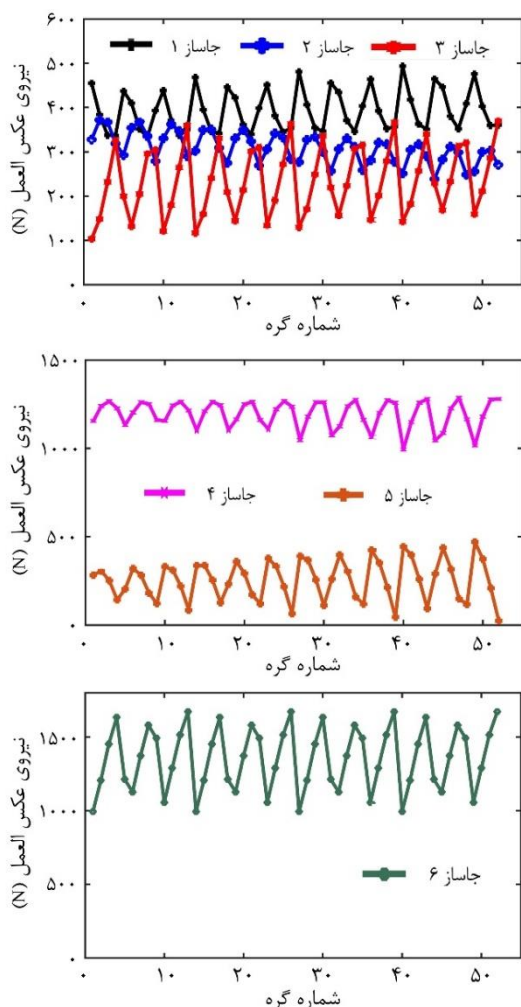
برای محاسبه نیروهای عکس العمل در جاسازهای شش گانه برای قطعه کار ارائه شده در شکل ۱، تحلیل ارائه شده در بخش ۲ استفاده شد. کد این تحلیل در نرم افزار متلب نوشته شده و ورودی های لازم اعمال شد. ورودی های مسئله شامل موقعیت و جهت جاسازها،

هریک از شکل های ۴ (الف) و ۴ (ب) مشتمل بر دو گراف است که گراف اول نشان دهنده نتایج حاصل از پیاده سازی تحلیل ارائه شده در بخش ۲ برای نیروهای ماشین کاری در سه جهت X ، Y و Z بوده و گراف دوم نشان دهنده نتایج ارائه شده در مرجع [20] با فرضیات و ورودی های کاملاً مشابه است. با مقایسه منحنی های به دست آمده برای مؤلفه های نیروی ماشین کاری در هر بار دوران کامل ابزار در مطالعه های موردی اول و دوم با منحنی های ارائه شده در مرجع [20] می توان نتیجه گرفت که کد نوشته شده کاملاً صحیح بوده و نتایج آن در تحلیل نیروهای عکس العمل قابل استفاده است. با توجه به اینکه نتایج در قالب داده های عددی در مرجع [20] گزارش نشده است، امکان مقایسه عدد به عدد بین نتایج تحلیل پیاده سازی شده و نتایج ارائه شده در مرجع مزبور وجود ندارد. ولیکن، با مقایسه نمودارها می توان به صحت نتایج تحلیل پیاده سازی شده در پژوهش حاضر پی برد.

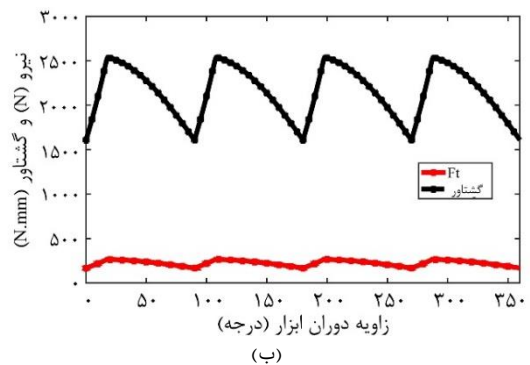
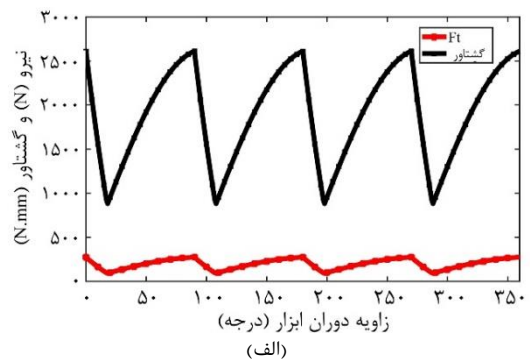
با توجه به اینکه نیروهای ماشین کاری در تحلیل ارائه شده در بخش ۲ در نقطه درگیری بین ابزار و قطعه کار در جهات مماسی، شعاعی و محوری محاسبه می شوند، با انتقال این مؤلفه ها به نقطه مرکز ابزار، ضمن محاسبه مؤلفه های ماشین کاری در سه جهت X ، Y و Z ، گشتاور ماشین کاری نیز ناشی از مؤلفه مماسی نیرو ایجاد می شود. مقدار و جهت این گشتاور نقش تعیین کننده ای در مقادیر نیروهای عکس العمل در جاسازها دارد. با توجه به صحت مقادیر مؤلفه های نیروی ماشین کاری، با محاسبه اندازه مؤلفه مماسی می توان گشتاور ماشین کاری را با استفاده از رابطه (۵) در هر یک از مطالعات موردی اول و دوم محاسبه نمود. منحنی های مربوط به

این وجود می‌توان از تحلیل اجزا محدود برای محاسبه مقدار دقیق این نیروها استفاده کرد. برای اینکه امکان مقایسه بین نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی وجود داشته باشد، نیروهای عکس‌العمل تحلیلی دقیقاً در شرایط و شکل‌بندی مشابه با شرایط شبیه‌سازی محاسبه شدند. از آنجا که ۵۲ نقطه گره در مسیر ماشین‌کاری وجود دارد، اندازه نیروهای عکس‌العمل در حالتی که نیروها و گشتاور ماشین‌کاری در این نقاط اعمال می‌شوند، محاسبه شد.

شکل ۶ نشان‌دهنده مقادیر مؤلفه عمودی نیروی عکس‌العمل در جاسازهای شش‌گانه در پیمایش ابزار بر روی مسیر ماشین‌کاری نشان داده شده در شکل ۳ است. لازم به ذکر است که در محاسبه نیروهای عکس‌العمل در این شکل، از نیروهای ماشین‌کاری به‌دست آمده در شکل ۴(الف)، که حالت فرزکاری مخالف است، استفاده شده است. مقادیر نیروهای عکس‌العمل در هریک از جاسازهای شش‌گانه همراه با نوسان برلحظه آن در شکل ۶ مشخص است. علت نوسان در مقادیر نیروهای عکس‌العمل بر روی جاسازها، تغییرات دوره‌ای است که نیرو و گشتاور اعمالی توسط



شکل ۶) اندازه برلحظه نیروهای عکس‌العمل در جاسازهای شش‌گانه محاسبه شده از تحلیل با اعمال نیروها و گشتاور ماشین‌کاری مطابق با شکل ۴(الف) و نیروهای بست با اندازه ۱۵۰۰ نیوتن



شکل ۵) نتایج حاصل از پیاده‌سازی تحلیل برای مؤلفه مماسی نیرو و گشتاور ماشین‌کاری در مطالعه موردی (الف) اول و (ب) دوم (با فرضیات ارائه شده در جدول ۲)

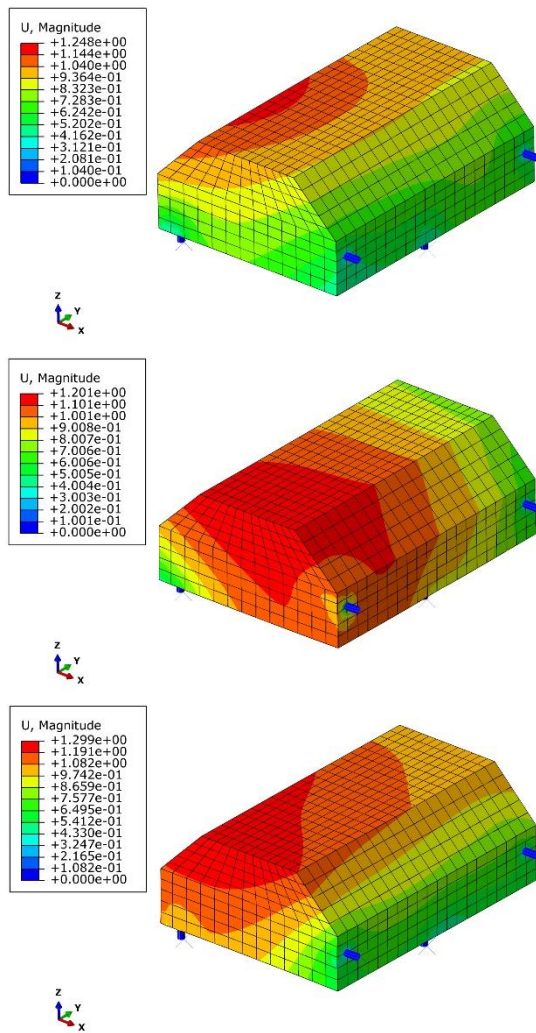
جدول ۲) پارامترهای ورودی تحلیل ارائه شده برای محاسبه نیروهای عکس‌العمل

پارامتر	واحد	اندازه
سیستم جاسازی	mm	$r = [-65, -90, 0], n = [0, 0, 1]$ $t_1 = [1, 0, 0], t_2 = [0, 1, 0]$
		$r = [65, 0, 0], n = [0, 0, 1]$ $t_1 = [1, 0, 0], t_2 = [0, 1, 0]$
		$r = [-65, 90, 0], n = [0, 0, 1]$ $t_1 = [1, 0, 0], t_2 = [0, 1, 0]$
		$r = [75, -90, 25], n = [-1, 0, 0]$ $t_1 = [0, 1, 0], t_2 = [0, 0, 1]$
		$r = [75, 90, 25], n = [-1, 0, 0]$ $t_1 = [0, 1, 0], t_2 = [0, 0, 1]$
		$r = [-65, -100, 25], n = [0, 1, 0]$ $t_1 = [1, 0, 0], t_2 = [0, 0, 1]$
سیستم بست	mm, N	$r = [-65, 3.64, 50], \ C_1\ = 1500 \text{ N}$ $n = [\cos 45^\circ, 0, -\sin 45^\circ]$
		$r = [5, 100, 24], \ C_2\ = 1500 \text{ N}$ $n = [0, -1, 0]$
مرکز ثقل قطعه‌کار	mm	$[0, 0, 34.79]$
نیروهای ماشین‌کاری	N	$F_x(\phi)$
		$F_y(\phi)$
		$F_z(\phi)$
گشتاور ماشین‌کاری	N.mm	$T(\phi)$

با جاگذاری مقادیر ورودی‌ها، اندازه نیروهای عکس‌العمل در هریک از نقاط جاسازی محاسبه شد. بر اساس نتایج ارائه شده در مرجع [18]، نتایج حاصل از تحلیل به روش اصل کمینه اندازه نیروها صرفاً برای مؤلفه عمودی نیروی عکس‌العمل صحیح بوده و دقت کافی را برای محاسبه مؤلفه‌های مماسی ندارد. لازم به ذکر است که اندازه مؤلفه‌های مماسی نیروی عکس‌العمل معمولاً کم است؛ با

نیروهای عکس‌العمل در نقاط جاسازی پرداخت. به‌عنوان مثال، نیروها و گشتاور ماشین‌کاری را در حالت استفاده از ابزارهای سرکروی می‌توان از تحلیل ارائه‌شده در مرجع [19] محاسبه کرده و به مدل تحلیلی اعمال نمود.

برای صحت‌سنجی پیش‌بینی تحلیلی از مدل‌سازی عددی استفاده شد. ابتدا، آنالیز فرکانس بر روی مجموعه قطعه‌کار و جاسازها انجام شد و شکل مودها همراه با فرکانس طبیعی در هریک از آن‌ها محاسبه شد. نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به داده‌های جدول ۲، سرعت برشی برای هر دو مطالعه موردی برابر با ۳۰ متر بر دقیقه است. با در نظر گرفتن قطر ابزار برابر با ۱۹/۰۵ میلی‌متر، مقدار دور ابزار برابر با ۵۰۱ دور بر دقیقه (معادل با ۸/۳۵ دور بر ثانیه) به‌دست می‌آید. از آنجا که ابزار دارای چهار لبه برنده است، فرکانس تحریک اعمالی به قطعه‌کار برابر با ۳۳/۴ هرتز خواهد بود. با مقایسه این فرکانس تحریک با فرکانس‌های طبیعی قطعه‌کار در مودهای اول، دوم و سوم (شکل ۷) که به ترتیب برابر



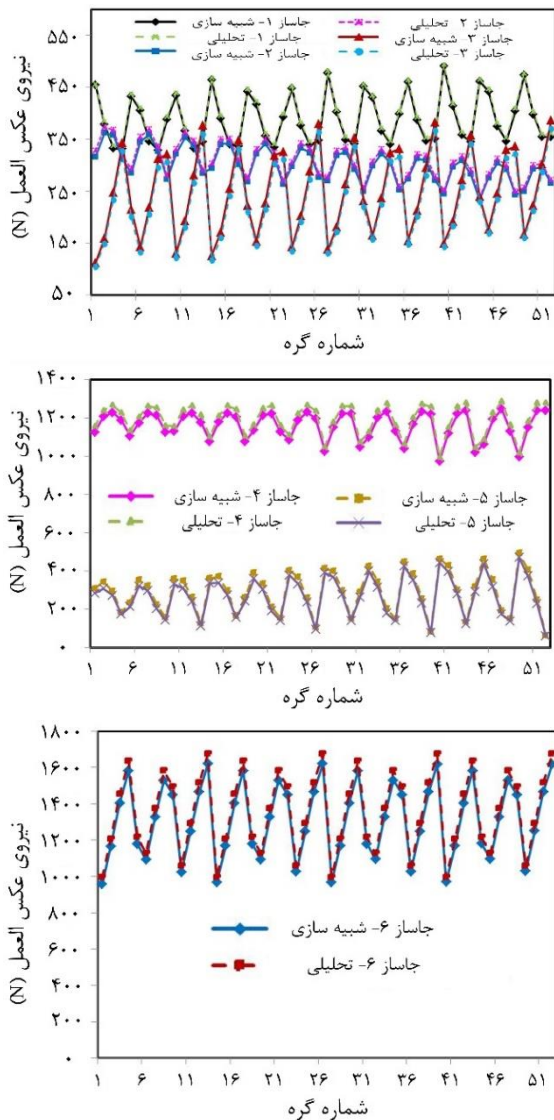
شکل ۷) نتایج حاصل از آنالیز فرکانس مجموعه قطعه‌کار و جاسازها همراه با شکل مودهای اول، دوم و سوم و فرکانس‌های طبیعی در هریک از مودها

ابزار به قطعه‌کار وارد می‌آورد. مقادیر این نیروها و گشتاور که در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند، در هر لحظه از دوران ابزار تغییر می‌کنند. اعمال این نیروها و گشتاور به قطعه‌کار توسط ابزار منجر به ایجاد نیروهای عکس‌العمل نوسانی می‌شود. نامنظم بودن نوسان نیروهای عکس‌العمل در جاسازها نیز کاملاً طبیعی است. هرچند مقدار نیروها و گشتاور ماشین‌کاری به‌صورت دوره‌ای و در دامنه منظمی تغییر می‌کند، ولی با توجه به تغییر موقعیت اعمال آن‌ها بر قطعه‌کار در هر لحظه، درصدی از نیرو و گشتاور که توسط هر جاساز تحمل می‌شود، تغییر می‌کند. لذا، نوسان نیروهای عکس‌العمل و نامنظم بودن آن با توجه به ذات مسأله یک پدیده طبیعی است.

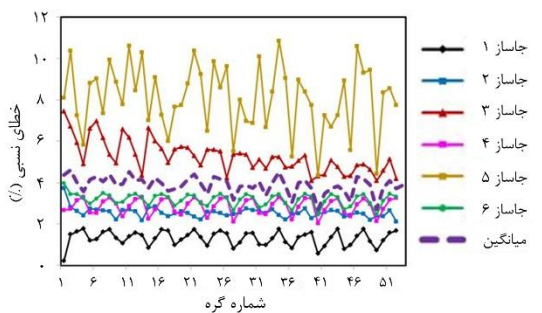
اندازه نیروهای عکس‌العمل در جاسازهای پایه (جاسازهای شماره ۱، ۲ و ۳) نسبتاً پایین‌تر از بقیه جاسازها است. اندازه این نیروها به مقدار مؤلفه نیروی ماشین‌کاری و نیروی بست اول در راستای Z بستگی دارد. از آنجا که مقدار نیروی محوری ماشین‌کاری معمولاً کمتر از مؤلفه‌های شعاعی و مماسی است، مقدار نیروهای عکس‌العمل بر روی جاسازهای پایه نیز کمتر از سایر جاسازها است.

اندازه مؤلفه‌های نیروی ماشین‌کاری و بست در راستاهای X و Y همراه با اندازه و جهت گشتاور ماشین‌کاری مستقیماً بر روی اندازه نیروهای عکس‌العمل در جاسازهای کناری و توقف اثر می‌گذارد. با تحلیل منحنی‌های اندازه نیروی عکس‌العمل در جاسازهای شماره ۴ و ۵ می‌توان مشاهده نمود که اندازه نیروی عکس‌العمل در جاساز شماره ۴ به مراتب بیشتر از جاساز شماره ۵ است. علت این اختلاف مربوط به جهت گشتاور ماشین‌کاری است. با توجه به شکل ۴ و با در نظر گرفتن فرکانس مخالف و جهت گشتاور ماشین‌کاری ناشی از آن، که به‌صورت ساعتگرد با دید از بالا است، می‌توان به راحتی نتیجه گرفت که نیروی تحمل‌شده توسط جاساز شماره ۴ باید بیشتر از جاساز شماره ۵ باشد. اندازه نیروی عکس‌العمل در جاساز شماره ۶ نیز به بزرگی نیروی بست شماره ۲، بزرگی و جهت مؤلفه‌های نیروی ماشین‌کاری در راستای X و Y و همچنین اندازه و جهت گشتاور ماشین‌کاری بستگی دارد. از آنجا که بزرگی نیروی بست برابر با ۱۵۰۰ نیوتن بوده و بخشی از مؤلفه‌های نیرو و گشتاور ماشین‌کاری در لحظات مختلف بر روی آن اثر می‌کند، مقدار نیروی عکس‌العمل جاساز در هر لحظه با استفاده از بهینه‌سازی اجرا شده به‌صورت منحنی نشان داده شده در شکل ۶ به‌دست آمده است. لازم به‌ذکر است که در پژوهش حاضر، نیروها و گشتاور ماشین‌کاری برای حالت فرزکاری با تیغ فرز انگشتی ماریچی محاسبه شده و در مدل تحلیلی اعمال شد. در صورت تغییر نوع ابزار به حالت‌های دیگر همچون ابزارهای سرکروی و یا حتی تغییر نوع عملیات ماشین‌کاری به سوراخ‌کاری نیز به‌راحتی می‌توان مقادیر نیروها و گشتاور ماشین‌کاری را از مدل‌های تحلیلی یا نیمه‌تحلیلی ارائه‌شده برای آن عملیات یا آن ابزار خاص محاسبه نمود و با اعمال نیروها و گشتاورهای به‌دست‌آمده به قطعه‌کار، به محاسبه

انرژی داخلی کل در طول مدت زمان شبیه‌سازی است. اندازه‌مش-بندی در بازه [۵-۱۰] میلی‌متر تغییر کرد که معادل بازه [۲۶۰۰-۱۸۰۰۰] برای تعداد اجزای مدل بود. اندازه‌مش بالاتر از ۱۰ میلی‌متر دارای



شکل ۸) مقایسه مقادیر تحلیلی و عددی نیروهای عکس‌العمل در جاسازهای شش‌گانه



شکل ۹) مقادیر خطای بدست‌آمده از تحلیل ارائه‌شده برای نیروهای عکس‌العمل در جاسازهای شش‌گانه و مقدار میانگین خطای شش جاساز در هر بار شبیه‌سازی در هر نقطه‌گه

با ۲۳۲۲، ۲۴۳۷ و ۲۵۰۸ هرتز است، می‌توان نتیجه گرفت که شرایط ماشین‌کاری کاملاً پایدار بوده و امکان وقوع رزونانس و ابزار لرزه وجود ندارد. لازم به‌ذکر است که فرکانس طبیعی قطعه در موده‌های چهارم تا ششم به ترتیب برابر با ۳۵۱۵، ۳۸۰۸ و ۴۱۲۰ هرتز به‌دست آمد. با توجه به دور بودن فرکانس تحریک از فرکانس طبیعی قطعه‌کار، می‌توان از حل‌گر استاتیکی در هر لحظه از دوران ابزار برای محاسبه نیروهای عکس‌العمل در جاسازها استفاده نمود. برای مقایسه پیش‌بینی تحلیلی با نتایج شبیه‌سازی، منحنی‌های شکل ۸ رسم شدند. در این منحنی‌ها، می‌توان اختلاف داده‌های تحلیلی و شبیه‌سازی را در جاسازهای پایه، کناری و توقف مشاهده نمود. با مقایسه منحنی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر پیش-بینی تحلیلی انطباق مناسبی با نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی دارند. با این وجود، خطای پیش‌بینی تحلیلی در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی بایستی محاسبه شده و علت وقوع خطاها بررسی شود. با فرض اینکه مقادیر نیروهای عکس‌العمل از شبیه‌سازی صحیح هستند، مقادیر خطا در پیش‌بینی تحلیل ارائه‌شده محاسبه شد. مقادیر این خطا در محاسبه نیروی عکس‌العمل در هر یک از نقاط جاسازی همراه با مقدار خطای میانگین در محاسبه نیروی عکس-العمل در تمام نقاط جاسازی در هر بار اجرای شبیه‌سازی در نقاط گره محاسبه شد. نتیجه در قالب منحنی‌های شکل ۹ نشان داده شده است.

مقدار خطای متوسط در محاسبه نیروی عکس‌العمل در تمام نقاط جاسازی در هر بار اجرای شبیه‌سازی با اعمال نیروهای ماشین-کاری در نقاط گره در قالب منحنی خط‌چین در شکل ۹ نشان داده شده است. بیشینه مقدار این خطا برابر با ۴/۶ درصد است. همچنین، بیشینه مقدار خطا در محاسبه مؤلفه عمودی نیروی عکس‌العمل در جاساز شماره پنج برابر با ۱۰/۹ درصد بدست آمد. مقدار نسبتاً کم خطا در پیش‌بینی تحلیلی بیانگر قابلیت استفاده از خروجی‌های آن در قالب یک داده قابل اعتماد در مراحل مختلف طراحی قید و بندها است.

منابع احتمالی خطا در محاسبه مقادیر نیروهای عکس‌العمل از تحلیل پیشنهادی شامل فرض صلب کامل بودن قطعه‌کار، صلبیت کامل جاسازها، فرض اعمال نیروهای بست و نیروها و گشتاور ماشین‌کاری به‌صورت متمرکز است. این در حالی است که قطعه‌کار در فضای واقعی دارای درجه‌ای از صلبیت بوده و امکان تغییر شکل در اثر نیروهای وارده بر آن را دارد که این تغییر شکل اثر مستقیمی بر روی سطح تماس واقعی بین قطعه‌کار و جاسازها در نقطه تماس داشته و بر روی بزرگی نیروی عکس‌العمل تأثیر مستقیم دارد. همچنین، فرض صلبیت کامل جاسازها و متمرکز بودن نیروها و گشتاورهای ماشین‌کاری در تحلیل نیز منجر به ایجاد خطا در محاسبه نیروهای عکس‌العمل خواهد شد.

شکل ۱۰ نشان‌دهنده منحنی‌های آنالیز استقلال شبیه‌سازی انجام شده از اندازه‌مش و همچنین منحنی‌های انرژی جنبشی و

تحلیل و شبیه‌سازی، نتیجه بر آن شد که پیش‌بینی تحلیل تا حد زیادی منطبق بر نتایج شبیه‌سازی است. در مدل استفاده شده به- عنوان مطالعه موردی، بیشینه خطا در جاساز شماره پنج به‌دست آمد که برابر با ۱۰/۹ درصد بود. همچنین، بیشینه مقدار خطای متوسط در محاسبه نیروی عکس‌العمل در تمام نقاط جاسازی در هربار اجرای شبیه‌سازی با اعمال نیروها و گشتاور ماشین‌کاری در نقاط گره برابر با ۴/۶ درصد به‌دست آمد. مقادیر کم خطا نشان- دهنده دقت بالای تحلیل ارائه‌شده در محاسبه مؤلفه عمودی نیروهای عکس‌العمل در نقاط جاسازی قطعه‌کار است. منحنی- های به‌دست آمده برای اندازه برلحظه نیروهای عکس‌العمل در جاسازها یک داده ارزشمند در طراحی قید و بند به‌شمار می‌روند. از مقدار متوسط (یا بیشینه) نیروی عکس‌العمل در هریک از جاسازها می‌توان برای طراحی استاتیکی جاسازها، بدنه قید و بند و حتی طراحی روش اتصال جاسازها به بدنه استفاده نمود. همچنین، از مقادیر این نیروها می‌توان در بازطراحی چیدمان جاسازی و بست برای تقسیم بهینه نیروهای خارجی بر روی همه جاسازها و یکنواخت شدن تحمل نیروهای خارجی توسط جاسازها استفاده نمود.

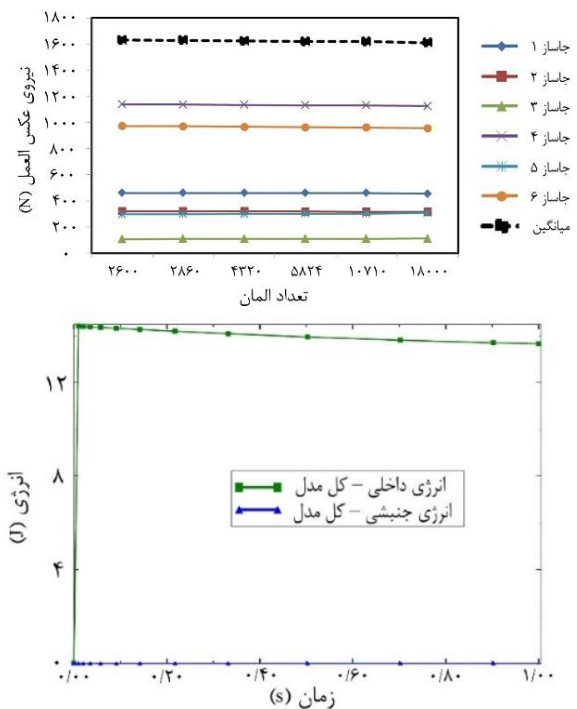
به‌عنوان پژوهش‌های آینده، نویسندگان مقاله در حال طراحی و ساخت مجموعه آزمایشگاهی برای اجرای آزمون‌های تجربی با هدف صحت‌سنجی پیش‌بینی تحلیلی و نتایج عددی هستند. همچنین، مطالعه تأثیر پارامترهای ابزار همچون شعاع نوک ابزار و نوع روانکاری در عملیات ماشین‌کاری بر روی مقادیر نیروها و گشتاور ماشین‌کاری و نهایتاً مقادیر نیروهای عکس‌العمل می- تواند به‌عنوان زمینه‌ای فعال برای پژوهش‌های آتی مدنظر قرار گیرد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده و همچنین جهت بررسی یا چاپ برای نشریه دیگری فرستاده نشده است. همچنین، محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان و صحت نتایج آن نیز بر عهده آن‌ها است. **تعارض منافع:** بدینوسیله نویسندگان اعلام می‌کنند که این اثر حاصل یک پژوهش مستقل بوده و هیچگونه تضاد منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگری ندارد.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: پژوهش حاضر هیچ حمایت مالی از سوی سازمان‌ها و نهادهای دریافت نکرده است.



شکل ۱۰) منحنی‌های آنالیز استقلال شبیه‌سازی از اندازه مش و منحنی‌های انرژی جنبشی و انرژی داخلی کل

دقت کافی نبوده و کاهش اندازه مش به پایین‌تر از ۵ میلی‌متر منجر به افزایش قابل توجه حجم معادله‌ها به‌صورتی می‌شد که امکان حل وجود نداشت. با مشاهده گراف‌های شکل ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که نتایج شبیه‌سازی مستقل از اندازه مش‌بندی است. همچنین، گراف دوم در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که تقریباً هیچ انرژی جنبشی در قطعه‌کار ذخیره نشده و آنالیز در حالت استاتیک کامل انجام شده است. این دو گراف می‌تواند به‌عنوان مؤیدی بر دقت کافی تنظیمات مدل شبیه‌سازی و نتایج خروجی آن باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل تحلیلی بر پایه اصل کمینه انرژی نیروها برای محاسبه مقادیر برلحظه نیروهای عکس‌العمل در نقاط تماس بین قطعه‌کار و جاسازها برای یک قطعه‌کار با هندسه چندوجهی با در نظر گرفتن نیروها و گشتاور ماشین‌کاری ارائه شد. مقادیر نیروها و گشتاور ماشین‌کاری با استفاده از مدل ارائه‌شده در یک پژوهش پیشین و با اجرای کدنویسی‌های لازم محاسبه شده و از عملکرد آن اطمینان حاصل شد. برای راستی‌آزمایی پیش‌بینی تحلیلی از شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار اجزا محدود استفاده گردید. با مقایسه مقادیر مؤلفه عمودی نیروی عکس‌العمل در جاسازها از

۶- فهرست علائم

a	طول درگیری لبه ابزار با قطعه‌کار در راستای محور ابزار، mm	r_i	ردار موقعیت جاساز نام، m
c	بیشینه ضخامت براده تغییر شکل نیافته، mm	R	ردار برآیند نیروهای عکس‌العمل، N
C, G	مختصات مرکز ثقل قطعه‌کار، mm	R_i	نیروی عکس‌العمل در جاساز نام، N
C_{1x} و C_{1z}	مؤلفه بردار بست در راستای X و Z، N	R_{i_n}	مؤلفه عمودی نیروی عکس‌العمل در جاساز نام، N

بردار برآیند مؤلفه مماسی نیروی عکس‌العمل، N	RF_i^f	ضخامت المان در نظر گرفته شده در راستای عمود بر محور ابزار، mm	dz
مؤلفه مماسی اول نیروی عکس‌العمل در جاساز نام، N	$R_{i_{t1}}$	قطر ابزار، mm	D
مؤلفه مماسی دوم نیروی عکس‌العمل در جاساز نام، N	$R_{i_{t2}}$	مدول یانگ، GPa	E
گشتاور ماشین‌کاری، N.mm	T_c	سرعت پیشروی، mm/rev	f
پهنای ماشین‌کاری، mm	w	بردار نیرو، N	F
بردار آچار برآیند خارجی	W_e	مؤلفه نیروی ماشین‌کاری در راستاهای محوری، مماسی و شعاعی، N	F_r, F_t, F_a
آچار نیروی بست	W_c	مؤلفه نیروی ماشین‌کاری در راستاهای X، Y و Z، N	F_x, F_y, F_z
آچار وزن قطعه‌کار	W_g	ضخامت براده تغییر شکل نیافته در زاویه درگیری ϕ ، mm	$h(\phi)$
آچار نیروی ماشین‌کاری	W_m	اندیس جاساز	i
عمق درگیری لحظه‌ای بین ابزار و قطعه‌کار، mm	z	شماره لبه برنده ابزار	j
طول درگیری لحظه‌ای لبه زام، mm	$[z_{j,1} - z_{j,2}]$	ماتریس تبدیل کلی از مختصات محلی به جهانی	J
	علائم یونانی	ماتریس تبدیل از مختصات محلی به جهانی برای جاساز نام	J_i
زاویه براده ابزار	α	مؤلفه ماتریس تبدیل از مختصات محلی به جهانی در راستای عمود برای جاساز نام	$J_{i\alpha}$
زاویه ماریجیج ابزار	β	مؤلفه ماتریس تبدیل از مختصات محلی به جهانی در راستای مماسی اول برای جاساز نام	$J_{i\beta}$
ضریب اصطکاک	μ	مؤلفه ماتریس تبدیل از مختصات محلی به جهانی در راستای مماسی دوم برای جاساز نام	$J_{i\mu}$
نسبت پواسون	ν	ثوابت نیروی برش‌کاری مرتبط با برش‌کاری در راستای (به ترتیب) مماسی، شعاعی و محوری	K_{tc}, K_{rc}, K_{ac}
زاویه درگیری لحظه‌ای بین ابزار و قطعه‌کار	ϕ	ثوابت نیروی برش‌کاری مرتبط با لبه ابزار در راستای (به ترتیب) مماسی، شعاعی و محوری	K_{te}, K_{re}, K_{ae}
زاویه پایان درگیری ابزار با قطعه‌کار	ϕ_{ex}	جاسازهای اول، دوم تا ششم	L_1, L_2, \dots, L_6
زاویه درگیری لحظه‌ای لبه برنده زام ابزار در عمق درگیری z	$\phi_r(z)$	بردار گشتاور، N.m	M
زاویه گام ابزار	ϕ_p	جهت عمودی، مماسی اول و مماسی دوم در هر جاساز	$\hat{n}, \hat{t}_1, \hat{t}_2$
زاویه شروع درگیری ابزار با قطعه‌کار	ϕ_{st}	بردار نرمال جاساز نام	n_i
زاویه تاخیر	ψ	تعداد لبه برنده ابزار	N
سرعت دوران ابزار، rpm	ω	بردار موقعیت اعمال نیرو، m	r

8- Halevi G, Weill R. Principles of process planning: a logical approach. Springer Science & Business Media; 1994.

9- Kaya N. Machining fixture locating and clamping position optimization using genetic algorithms. Computers in industry. 2006;57(2):112-20.

10- Satyanarayana S, Melkote SN. Finite element modeling of fixture-workpiece contacts: single contact modeling and experimental verification. International journal of machine tools and manufacture. 2004; 44(9):903-13.

11- Wang Y, Chen X, Liu Q, Gindy N. Optimisation of machining fixture layout under multi-constraints. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006;46(12-13):1291-300.

12- Chen W, Ni L, Xue J. Deformation control through fixture layout design and clamping force optimization. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008;38(9-10):860.

13- Parvaz H, Nategh MJ. A pilot framework developed as a common platform integrating diverse elements of computer aided fixture design. International Journal of Production Research. 2013;51(22):6720-32. 14 Jiang K, Zhou X, Li M, Kong X. A multi-objective optimization and decision algorithm for locator layout continuous searching in checking fixture design. The International

منابع

- 1- Chou YC, Chandru V, Barash MM. A mathematical approach to automatic configuration of machining fixtures: analysis and synthesis.
- 2- Lee SH, Cutkosky MR. Fixture planning with friction.
- 3- Cai W, Hu SJ, Yuan J. Deformable sheet metal fixturing: Principles, algorithms, and simulations. In The 1994 International Mechanical Engineering Congress and Exposition 1994 (pp. 13-20).
- 4- Marin RA, Ferreira PM. Optimal placement of fixture clamps: Minimizing the maximum clamping forces. J. Manuf. Sci. Eng.. 2002;124(3):686-94.
- 5- Hurtado JF, Melkote SN. A model for synthesis of the fixturing configuration in pin-array type flexible machining fixtures. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2002;42(7):837-49.
- 6- Kang Y, Rong Y, Yang JC. Computer-aided fixture design verification. Part 3. Stability analysis. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2003;21(10-11):842-9.
- 7- Kaya NE, Öztürk F. The application of chip removal and frictional contact analysis for workpiece-fixture layout verification. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2003; 21(6):411-9.

- Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013;67(1-4):357-66.
- 15- Xiong L, Molfino R, Zoppi M. Fixture layout optimization for flexible aerospace parts based on self-reconfigurable swarm intelligent fixture system. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013;66(9-12):1305-13.
- 16- Parvaz H, Nategh MJ. Development of locating system design module for freeform workpieces in computer-aided fixture design platform. Computer-Aided Design. 2018;104:1-4.
- 17- Nategh MJ, Parvaz H. Development of computer aided clamping system design for workpieces with freeform surfaces. Computer-Aided Design. 2018 ;95:52-61.
- 18- Parvaz H. Analytical and numerical investigation of reaction forces in fixturing of the rigid workpiece with polyhedral geometry. Journal of Solid and Fluid Mechanics. 2020;10(1):17-29.
- 19- Altintas Y, Ber AA. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. Appl. Mech. Rev.. 2001;54(5):B84-.
- 20- Budak E, Altintas Y. Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data. ASME PROD ENG DIV PUBL PED, ASME, NEW YORK, NY,(USA), 1993, 1993;64:453-60.
- 21- Welsch G, Boyer R, Collings EW, editors. Materials properties handbook: titanium alloys. ASM international; 1993.