



## تحلیل عددی و تجربی پدیده گیر در موقعیت‌دهی قطعه‌کار با مقطع دایروی بر روی سطح افقی

ستار حضرتی<sup>۱</sup>، هادی پروز<sup>۲\*</sup> و سید وحید حسینی<sup>۲</sup><sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و مکانرونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶

## چکیده

وقوع گیر قطعه‌کار در قید و بند می‌تواند منجر به عدم موقعیت‌دهی صحیح قطعه‌کار، آسیب به قطعه‌کار و حتی اجزای قید و بند شود. هدف از اجرای پژوهش حاضر، بررسی عددی و تجربی وقوع گیر قطعه‌کار با مقطع دایروی در قید و بند با مطالعه مکانیزم قطعه‌کار با مقطع دایروی - اهرم است. برای این منظور، محاسبه مقدار پیمایش قطعه‌کار برای وقوع پدیده گیر و مقایسه نتایج تجربی با پیش‌بینی‌های عددی مدنظر است. لذا، تحلیل عددی پدیده گیر قطعه‌کار با مقطع دایروی بر روی سطح افقی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. برای صحت‌سنجی پیش‌بینی تحلیل‌های عددی، یک مجموعه آزمایشگاهی به همراه سه قطعه‌کار با مقاطع دایروی با قطرهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر طراحی و ساخته شد. آزمایش‌های تجربی برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک بین قطعه‌کار دایروی، سطح پایه و اهرم انجام شد. پس از اندازه‌گیری ضرایب اصطکاک، مسافت پیمایش قطعه‌کار برای وقوع گیر، با استفاده از روش‌های تصویربرداری و خط‌کش مدرج نصب شده روی مجموعه آزمایشگاهی و داده‌برداری به کمک انکودر زاویه‌ای، اندازه‌گیری شد. با مقایسه بین نتایج آزمایش‌های تجربی و پیش‌بینی تحلیل عددی، بیشینه مقدار خطای مسافت پیمایش قطعه‌کار تا وقوع گیر، برای قطعه‌کار با قطر ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر، به ترتیب برابر با ۱۲/۴٪، ۶/۱۸٪ و ۸/۵۳٪ بدست آمد.

**کلمات کلیدی:** آنالیز گی؛ پدیده گیر؛ جاساز و سوراخ؛ ضریب اصطکاک؛ قطعه‌کار دایروی.

## Numerical and experimental analysis of Jamming Phenomenon in Positioning of Circular-Section Workpiece on Horizontal Surface

Sattar Hazrati<sup>1</sup>, Hadi Parvaz<sup>2\*</sup> and Seyed Vahid Hoseyni<sup>2</sup><sup>1</sup> M.Sc., Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran<sup>2</sup> Assist. Prof., Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

### Abstract

Workpiece jamming in a fixture may cause improper positioning, damage to the workpiece, and even the fixturing elements. The present study focuses on the numerical and experimental analysis of workpiece jamming with the circular cross-section in a fixture to calculate the jamming-in travel of the workpiece. For this purpose, numerical analysis of a circular workpiece on the horizontal surface was conducted using Abaqus software. To validate the numerical predictions, an experimental setup was designed and fabricated with three circular cross-section workpieces with diameters of 40 mm, 50 mm, and 60 mm. Experimental tests were conducted to measure the friction coefficient between the circular workpiece, base plate, and palm. After the measurement of the friction coefficients, the jamming-in travel of the workpiece was measured using image processing techniques, a calibrated ruler installed on the setup, and an angular encoder. By comparing the experimental results of jamming-in travel to the predictions of the numerical model, the worst-case error values were determined as 12.4%, 6.18%, and 8.53% for workpieces with diameters of 40 mm, 50 mm, and 60 mm, respectively.

**Keywords:** Jamming analysis; Jamming Phenomenon; Peg in hole; Friction Coefficient; Circular workpiece.

## ۱- مقدمه

قید و بندها<sup>۱</sup> یکی از مهمترین و اصلی‌ترین عوامل حفظ‌کننده و تامین‌کننده دقت در ساخت، مونتاژ و تولید انواع قطعات صنعتی محسوب می‌شوند. اجزای اصلی قید و بندها از جاسازها<sup>۲</sup>، تکیه‌گاه‌ها<sup>۳</sup> و بست‌ها<sup>۴</sup> تشکیل شده است. مفهوم اصلی جاسازی، سلب درجات آزادی قطعات به منظور انجام عملیات مورد نظر است. اصل جاسازی<sup>۵</sup> ۱-۲-۳، یکی از مهمترین اصول طراحی سیستم جاساز است که در آن، با استفاده از شش جاساز، نه درجه آزادی قطعه‌کار محدود می‌شود. هرگونه عامل اغتشاش احتمالی که موجب از دست رفتن دقت شود، به تولید محصولات معیوب و به تبع آن افزایش هزینه‌های تولید منجر خواهد شد. یکی از عیوب شایع که می‌تواند بدلائیل نقایص طرح جاسازی قید و بند، طراحی نامناسب مسیر بارگذاری یا باربرداری قطعه‌کار یا خطای اپراتور خصوصاً در قطعاتی با سطوح دوار رخ دهد، وقوع پدیده گیر است. عموماً استفاده از اصل ۱-۲-۳ در طراحی سیستم‌های جاسازی قطعات، شرایط را برای وقوع پدیده گیر در قید و بندها فراهم می‌کند.

دو دسته از تئوری‌ها برای مطالعه پدیده گیر قطعه‌کار، در علم رباتیک و طراحی قید و بندها مطرح است. دسته اول بر پایه معادلات دینامیک حرکت و بررسی سرعت و شتاب اجسام صلب در برخورد با یکدیگر بنا نهاده شده است. دسته دوم بر اساس اصل کمینه اندازه نیروها و حل یک مساله بهینه‌سازی به مطالعه پدیده گیر می‌پردازند. پدیده گیر منحصراً در سیستم‌های ثابت رخ نمی‌دهد؛ بلکه ممکن است در هنگام گرفتن اشیاء یا موقعیت‌دهی در سیستم‌های رباتیک نیز اتفاق بیفتد. وقوع پدیده گیر در چنین سیستم‌هایی ممکن است باعث آسیب‌های شدید و جبران‌ناپذیری به قطعه‌کار، عناصر قید و بند و اجزا سیستم‌های رباتیک گردد.

همچنین، مکانیزم‌های دوتاماسی که معمولاً برای گرفتن یا قراردادن قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرند، مستعد گیرکردن هستند. در چنین سیستم‌هایی، تعیین شرایطی که در آن پدیده گیر رخ می‌دهد، برای اهداف تحقیقاتی و کاربردهای صنعتی ضروری به نظر می‌رسد. یکی از مسائلی که

به عنوان مطالعه موردی پدیده گیر مورد استفاده قرار می‌گیرد، مساله قطعه‌کار دایروی و اهرم است [۱]. در این مساله حرکت دورانی یک اهرم منجر به حرکت خطی قطعه‌کار دایروی بر روی سطح افقی شده و این قطعه‌کار پس از طی مسافتی مشخص، بدلیل وجود اصطکاک بین سطح قطعه‌کار با سطوح اهرم اعمال نیرو و سطح افقی دچار گیر شده و از حرکت باز می‌ایستد. گرفتن یا قرار دادن قطعه‌کار با هندسه دایروی یک فرایند رایج در طراحی قید و بندها و سیستم‌های رباتیکی محسوب می‌شود. قطعه‌کارهای با مقطع دایروی کاربردهای گسترده‌ای در صنعت، در سیستم‌های مونتاژ رباتیک، مونتاژ اتوماسیون، در علوم پزشکی مانند قراردادن سلول‌ها در سیستم‌های جراحی رباتیک، انتخاب و موقعیت‌دهی محل لنزها با استفاده از پنس در جراحی چشم و غیره دارند. بنابراین، تعیین شرایطی که در آن ممکن است هنگام قراردادن قطعه‌کار با مقطع دایروی، پدیده گیر رخ دهد ضروری به نظر می‌رسد. پژوهش‌های متعددی در زمینه آنالیز پدیده گیر قطعه‌کار در حین بارگذاری یا باربرداری آن در قید و بند یا گرفتن اشیاء بصورت دستی یا رباتیک انجام شده است. معمولاً، اکثر پژوهش‌ها به مدل‌سازی تحلیلی و تعیین شرایط وقوع پدیده گیر پرداخته و پیش‌بینی‌های تحلیلی را با استفاده از مطالعه موردی جاساز-سوراخ و بلوک-دست با نتایج تحقیقات منتشر شده قبلی مقایسه کرده‌اند.

پروز [۱]، در پژوهشی یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی گیر قطعه‌کار با مقطع دایروی را در هنگام قرارگیری آن بر روی سطح افقی پیشنهاد داده است. در تحلیل نظری، دو مدل ریاضی شامل تحلیل نیرو و اصل کمترین اندازه جواب، ارائه و تجزیه و تحلیل نیرو بر اساس معادلات تعادل نیرو در حالت استاتیکی ارائه شده است. تجزیه و تحلیل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار آدامز<sup>۶</sup> برای صحت‌سنجی پیش‌بینی‌های نظری انجام شد. پروز و بوداکی [۲]، از مدل هندسی قید و بند برای بررسی تأثیر طرح جاسازهای قطعه‌کار بر روی خطای موقعیت‌دهی قطعات صلب با هندسه چندوجهی و شکل آزاد استفاده کردند. آزمایش‌های تجربی برای صحت‌سنجی نتایج تحلیلی استفاده شد. سهرابی‌فرد و ناطق [۳]، پایداری و سفتی تماس قطعه‌کار در داخل فیکسچر را در شرایط مختلف ماشین‌کاری مورد

<sup>4</sup> Clamps

<sup>5</sup> Locating Principle

<sup>6</sup> Aams

<sup>1</sup> Jigs & Fixturers

<sup>2</sup> Locators

<sup>3</sup> Supports

هوشمند، برپایه شبکه‌های عصبی پیشنهاد شده، از طریق یک نمونه پیش‌مونتاز پنل هواپیما اعتبارسنجی شد که می‌توانست درستی شکل آیرودینامیکی پنل‌ها را به‌طور موثر تضمین نماید. کیم و سئو [۱۰]، آنالیز تحلیلی برای مدل‌سازی مونتاز یک جسم شبیه به جاساز در سوراخ کم عمق را مطالعه کرده و شرایط وقوع گیر در این سیستم‌ها را تعیین کردند. با جاسازی باتری در گوشی تلفن همراه، برای راستی‌آزمایی پیش‌بینی تئوری دیاگرام‌های نیرو و گشتاور با اجرای آزمایش تجربی استفاده شد. پروز [۱۱]، در پژوهشی آنالیز تحلیل تئوری و عددی پدیده گیر قطعه‌کار در قید و بند را با استفاده از مطالعه موردی بلوک و دست انجام داد. برای مطالعه تحلیلی، تئوری بر پایه اصل کمینه اندازه نیروها استفاده شد که با اجرای آنالیز نیرویی و محاسبه نیروهای عکس‌العمل در تکیه‌گاه‌ها به پیش‌بینی وقوع گیر پرداخته شد. برای صحت‌سنجی پیش‌بینی‌های تحلیلی، آنالیز عددی توسط نرم‌افزار ادمز برای مطالعه موردی بلوک و دست انجام شد. اورنگا و همکاران [۱۲]، یک استراتژی برای روش ارزیابی اثرات استفاده از سنسورهای نیرو-گشتاور برای یک سیستم جاساز-سوراخ دوگانه و شبکه‌های عصبی پیشنهاد دادند. در این پژوهش نشان داده شد که نسبت موفقیت فرآیند مونتاز با استفاده از حسگرهای دوگانه نیرو-گشتاور و شبکه‌های عصبی بطور گسترده بهبود یافته است. لی و همکاران [۱۳]، روش‌هایی مبتنی بر کنترل نیرو برای ایجاد رفتار سازگار پیچیده به منظور مقابله با وارپانس‌های شکل و موقعیت مورد مطالعه قرار داده و یک روش تحقیقاتی چند مرحله‌ای جهت جستجوی کارآمد برای موقعیت واقعی سوراخ پیشنهاد دادند. در این پژوهش مشکل مونتاز جاساز در سوراخ نامنظم با قیود جزئی، مطالعه شد که در بسیاری از سیستم‌های مکانیکی با حرکت داخلی یافت می‌شوند. یاماگاکا و همکاران [۱۴]، یک سیستم مشارکتی انسان و ربات با سرعت و دقت بالا با استفاده از یک دست پرسرعت و یک دوربین پرسرعت را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها روش‌های سنجش بصری و کنترل دست ربات را پیشنهاد دادند و پایداری سیستم مشارکتی و خطای مشارکتی را بررسی کردند. حرکت مشارکتی و خطای مشترک بر اساس نتایج تحلیل و عملکرد کنترل با سرعت فریم‌های مختلف ارزیابی شد. تورو و همکاران [۱۵]، رویکردهای تحقیقاتی برای خودکارسازی فرآیند چیدمان وسایل را با استفاده از بهینه‌سازی اصل ۱-۲-۳ ارائه

بررسی قرار دادند. در این پژوهش، از طریق تعریف مدل ریاضی سیستم قطعه‌کار-فیکسچر و محاسبه ماتریس‌های سفتی تماس و سفتی فیکسچر، نتایج تغییرات در پارامترهای مختلف ماشین‌کاری بر حسب سفتی سیستم قطعه‌کار-فیکسچر مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. کلارک و همکاران [۴]، با ارائه راهبردهای مختلف از مطالعه موردی جاساز و سوراخ برای ارزیابی عملکرد ربات پوشیدنی دو بازویی و تحلیل‌های کنترلی با قابلیت کنترل رباتیک از راه دور استفاده کردند. یک مدل تحلیلی برای کنترل ربات ارائه شد و با پوشیدن ربات توسط افراد مختلف و اجرای فرآیند مونتاز یک جعبه دارای سوراخ در یک جاساز، عملکرد مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. ژانگ و همکاران [۵]، با استفاده از مکانیزم جاساز و سوراخ، یک استراتژی برای ارزیابی عملکرد سیستم کنترل امیدانس برای یک ربات دو بازویی ارائه کرده و قابلیت‌های آن را با استفاده از اجرای آزمایش تجربی جاساز و سوراخ با ربات بررسی کردند. دو و همکاران [۶]، از یک مطالعه موردی شبیه مکانیزم جاساز و سوراخ برای سنجش قابلیت‌های راهبرد پیشنهادی برای کنترل خود-تطبیقی جهت‌گیری قطعات بزرگ مونتازی استفاده کردند. آزمایش‌های تجربی در این پژوهش برای سنجش عملکرد راهبردهای پیشنهادی کنترلی با استفاده از اندازه‌گیری نیرو و گشتاور سه‌بعدی و مقایسه آن‌ها با مقادیر پیش‌بینی شده از تحلیل اجرا شد. لیو و همکاران [۷]، یک روش مونتاز جاساز در سوراخ را برای کاهش اصطکاک خطی پیشنهاد دادند و برای افزایش سهولت مونتاز جاساز و سوراخ و کاهش اصطکاک خطی بین آن‌ها، ایده استفاده از حرکت پیچ و مهره را مطرح کردند. دیاگرام‌های نیرو و گشتاور پیش‌بینی شده از تحلیل با استفاده از آزمایش تجربی و اندازه‌گیری مقادیر نیرو و گشتاور از سنسور نصب شده در انتهای بازوی ربات راستی‌آزمایی شد. لوئیس و همکاران [۸]، با طراحی، ساخت و تحلیل فیکسچری با آرایش خطی بست‌ها، برای جوشکاری نقطه‌ای اغتشاشی-اصطکاکی، ضمن حفظ لبه‌های قطعه‌کار در یک موقعیت صحیح و کنترل اعوجاج، کیفیت جوشکاری فرآیند FSW را بهبود بخشیدند. منگ و همکاران [۹]، با بهینه‌سازی لی‌اوت هوشمند، فیکسچری انعطاف‌پذیر با قابلیت تنظیم مجدد، برای مونتاز پنل‌های چندگانه هواپیما طراحی کردند که می‌توانست با هزینه پایین و انعطاف‌پذیری بالا، پیش‌مونتاز پنل‌های چندگانه را میسر سازد. روش بهینه‌سازی لی‌اوت

طراحی و ساخت یک مجموعه آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌های مرتبط است.

بر این اساس در ادامه مقاله در بخش ۲، به مدل‌سازی آنالیز عددی پدیده گیر با استفاده از نرم‌افزار المان محدود و اشاره‌ای گذرا به یکی از تحلیل‌های ارائه شده در پژوهش‌های پیشین (صرفاً برای استفاده از نتایج آن در بخش ۴) پرداخته می‌شود. در بخش ۳، به نحوه ساخت مجموعه آزمایشگاهی و اجرای آزمایش‌های مربوطه پرداخته خواهد شد. مقایسه نتایج آنالیز عددی و تحلیل ارائه شده در پژوهش‌های پیشین و نتایج بدست‌آمده از آزمایش‌های تجربی شالوده بخش ۴ خواهد بود. نهایتاً، نتیجه‌گیری و پیشنهادها شاکله اصلی بخش ۵ را تشکیل خواهد داد.

## ۲- آنالیز عددی

برای ارزیابی و شبیه‌سازی عددی پدیده گیر معمولاً چندین مطالعه موردی استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به قطعه‌کار با مقطع دایروی و هرم (دست) اشاره کرد. شکل ۱ نشان‌دهنده مدل این مطالعه موردی است. با اعمال حرکت چرخشی به هرم (دست)، در حالت اولیه  $\theta = 90^\circ$ ، قطعه‌کار از نقطه  $X = 0$ ، شروع به حرکت در راستای محور  $X$  می‌کند. با پیشروی بیشتر قطعه‌کار و رسیدن آن به مقدار مشخص، گیر اتفاق می‌افتد. هدف محاسبه مقدار حرکت قطعه‌کار برای وقوع گیر است. شکل‌بندی مساله قطعه‌کار دایروی و هرم دقیقاً منطبق بر شکل‌بندی ارائه شده در پژوهش [۱] است تا نتایج آنالیز عددی قابل قیاس با نتایج تئوری‌های ارائه شده باشد.

برای اجرای تحلیل عددی، ابتدا مقادیر ورودی مورد نیاز برای تحلیل عددی، از آزمایش‌های تجربی، اندازه‌گیری شده و با جاگذاری آن‌ها در تحلیل عددی، شبیه‌سازی انجام شد. شکل ۱ نشان‌دهنده مدل استفاده شده برای اجرای آنالیز المان محدود در فرایند مذکور، شامل اجزا قطعه‌کار با مقطع دایروی، هرم، پین و سطح پایه است. شبیه‌سازی برای سه قطعه‌کار با قطرهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر با ضخامت ۵ میلی‌متر انجام شد. برای شبیه‌سازی فرایند از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شد. در سه شبیه‌سازی مذکور، با توجه به قطر قطعات از کوچک به بزرگ، یک قطعه مکعب مستطیل به ترتیب با ابعاد  $120 \times 5 \times 2$ ،  $150 \times 5 \times 2$  و  $180 \times 5 \times 2$  میلی‌متر به عنوان سطح پایه و هرم و یک پین با ابعاد  $5 \times 5 \times 0.5$  میلی‌متر

کردند در این پژوهش از نقشه‌های توپوگرافی تولید شده از داده‌های طراحی ورق فلزی به عنوان ورودی برای یک شبکه عصبی کانولوشنال استفاده شد. این چارچوب یک رویکرد امیدوارکننده برای خودکارکردن پیچیده چیدمان وسایل در طراحی ورق فلزی ارائه داد. داس و ناگس [۱۶]، با طراحی و ساخت فیکسچری برای تست خمشی ستون فقرات کمر، تاثیر روش‌های جراحی کمر به دلیل تنگی کانال ستون فقرات، درمان استاندارد جراحی و رفع فشار کانال نخاعی را مورد بررسی قرار دادند و کارایی فیکسچر طراحی شده با مقایسه نتایج بدست‌آمده در شرایط مختلف جراحی ارزیابی شد.

با توجه به پیشینه پژوهش‌های ذکر شده، اکثر پژوهش‌ها در زمینه مطالعه پدیده گیر، مدل‌سازی تحلیلی پدیده گیر را در شرایط شبه‌استاتیک یا دینامیک انجام داده و پیش‌بینی‌های تحلیل را با نتایج پژوهش‌های پیشین مقایسه کرده‌اند. پژوهش اجرا شده در [۱] را می‌توان به عنوان مرتبط‌ترین مقاله در زمینه اجرا شده در پژوهش حاضر برشمرد.

با توجه به مطالعه پیشینه پژوهش مربوطه، هیچ‌گونه تحلیل نرم‌افزاری المان محدود و آزمایش تجربی برای صحت-سنجی پیش‌بینی نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزاری در زمینه پدیده گیر قطعه‌کار در موقعیت‌دهی قطعه دایروی بر روی سطح افقی گزارش نشده است. بنابراین این پژوهش هم از نظر انجام آزمایش تجربی و هم از جانب تحلیل نرم‌افزاری توسط نرم‌افزار المان محدود دارای نوآوری است.

پیش‌بینی مسافت پیمایش برای وقوع گیر، درمکانیزم قطعه‌کار دایروی و هرم [۱]، یک مساله معین استاتیک، محسوب می‌شود ولی به دلیل وجود غلتش در مساله مذکور برای پیش‌بینی طول ورود به گیر، از تحلیل نرم‌افزاری باید استفاده شود.

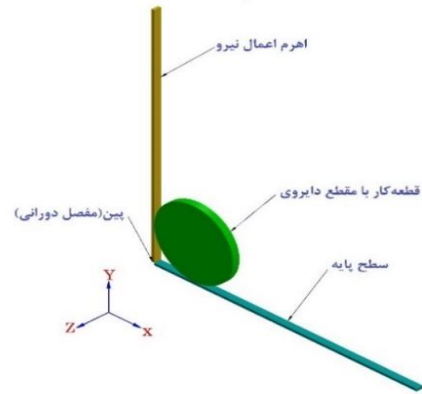
در این پژوهش سعی خواهد شد که وقوع پدیده گیر قطعه‌کار با مقطع دایروی در هنگام قرارگیری آن بر روی سطح افقی، توسط نرم‌افزار المان محدود شبیه‌سازی و تحلیل شود. سپس، برای صحت‌سنجی نتایج، آزمایش‌های مورد نیاز بررسی و انجام شده و نتایج بدست‌آمده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری با یکدیگر مقایسه می‌شود. هدف از ارائه این پژوهش، محاسبه مقدار پیمایش قطعه‌کار برای وقوع پدیده گیر در مکانیزم قطعه‌کار با مقطع دایروی-هرم، با استفاده از

تماس قطعه کار و سطح پایه، برای قطعه کار با قطر ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی متر به ترتیب برابر ۰/۱۰، ۰/۱۱ و ۰/۱۰ تعریف شد. همچنین، ضریب اصطکاک برابر با ۰/۱۰ برای سطح تماس قطعه کار و سطح اهرم برای کلیه قطعات تعریف شد. برای قطعه کار، اهرم و سطح پایه قید صلبیت اعمال شد. مقدار شتاب جاذبه زمین برابر با ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه در جهت  $-Y$  تعریف و به مدل اعمال شد. مقدار نیروی اعمالی از سمت اهرم به قطعه کار برابر ۲۰۰ نیوتن تعریف شد. شرایط مرزی برای سطح پایه و پین به صورت گرفتن تمام درجات آزادی خطی و دورانی، برای قطعه کار به صورت گرفتن درجات آزادی خطی در راستای  $Y$  و  $Z$  و درجات آزادی دورانی حول محوره های  $X$  و  $Y$  تعریف شد. حرکت دورانی اهرم با سرعت زاویه ای ۳۰ درجه در ثانیه حول محور  $-Z$ ، در نقطه مفصل اعمال شد. کلیه اجزا در این شبیه سازی مش بندی شدند. مش بندی مدل، از نوع المان C3D8R است که یک المان استاندارد سه بعدی هشت گره از نوع انتگرال گیری کاهش یافته است. قطعه کار با اندازه مش ۰/۹ میلی متر مش بندی شد. سپس شبیه سازی فرایند مذکور اجرا شد و نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی به دست آمده از آزمایش های تجربی مقایسه شد که در بخش ۴ به آن ها اشاره می شود.

### ۳- آزمایش تجربی

برای صحت سنجی و راستی آزمایی پیش بینی تحلیل پیشنهادی در این پژوهش، ابتدا یک مجموعه آزمایشگاهی برای مکانیزم قطعه کار با مقطع دایروی - اهرم به کمک نرم افزار سالیدورکس<sup>۳</sup> طراحی شد. مدل این مجموعه در شکل ۲ قابل مشاهده است.

در محیط نرم افزار طراحی شد. کلیه ابعاد هندسی اجزا فوق، در نرم افزار آباکوس مطابق سیستم SI بر حسب متر طراحی شدند.



شکل ۱- نمای مدل استفاده شده در آنالیز عددی

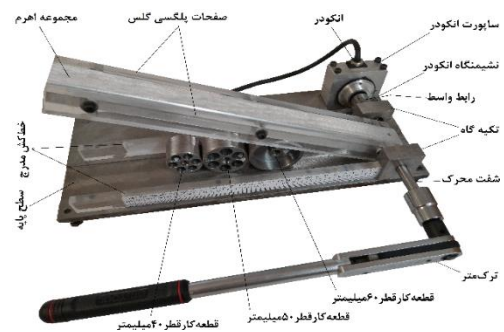
جنس قطعه کار دایروی، سطح پایه و پین از فولاد کم-کربن و جنس اهرم از آلومینیوم در نظر گرفته شد. کلیه قطعات در نرم افزار بصورت قطعات سه بعدی و تغییر شکل پذیر طراحی شدند. خواص الاستیک اجزای مدل شامل دانسیته، مدول یانگ و ضریب پواسان در نرم افزار برای جنس های فولاد کم کربن به ترتیب برابر با ۷۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب،  $۱۰^۹ \times ۲۰۰$  پاسکال و ۰/۳ برای آلومینیوم به ترتیب برابر با ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب،  $۱۰^۹ \times ۷۰$  پاسکال و ۰/۳ تعریف شد. برای هر یک از جنس ها یک مقطع تعریف شد و خواص مذکور به صورت مجزا توسط این مقاطع به اجزای شبیه سازی اختصاص داده شد. مونتاژ اجزای مدل شبیه سازی و نحوه قرارگیری اجزا نسبت به هم، مطابق شکل ۱ انجام شد. برای شبیه سازی فرایند مذکور، حلگر دینامیکی اکسپلیسیت<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گرفت. تماس سطح به سطح اصطکاکی برای سطح قطعه کار با سطوح اهرم و سطح پایه و تماس سطح به سطح بدون اصطکاک برای سطح پین با سطح داخلی سوراخ اهرم تعریف شد. برای اطمینان از این که اجزا در حین آنالیز داخل یکدیگر نفوذ نداشته باشند، شرط تماس این دو سطح از نوع تماس سخت<sup>۲</sup> انتخاب شد. در هر شبیه سازی، مقادیر ضریب اصطکاک اندازه گیری شده از آزمایش های تجربی، بین سطح

<sup>3</sup> Solidworks

<sup>1</sup> Dynamic,Explicit

<sup>2</sup> Hard Contact

فرآیند ساخت شروع شد. برای این منظور، سطح پایه از یک ورق با جنس فولاد کم‌کربن، با ابعاد  $10 \times 190 \times 410$  میلی-متر بریده شد و با استفاده از عملیات فرزکاری، به ابعاد نهایی رسانده شد. یک شیار به عرض ۵۵ میلی‌متر و عمق  $1/8$  میلی-متر در راستای طولی سطح پایه برای مسیر حرکت قطعه‌کار دایروی و یک سوراخ مستطیلی شکل با ابعاد  $40 \times 74$  میلی‌متر به منظور نصب مجموعه انکودر، در سطح پایه با استفاده از عملیات فرزکاری براده‌برداری شد. سه عدد قطعه‌کار با مقطع دایروی از جنس St37 با قطرهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر با پهنای ۳۰ میلی‌متر توسط عملیات تراشکاری ساخته شد. اهرم اعمال نیرو از جنس آلومینیوم با ابعاد  $20 \times 30 \times 350$  میلی‌متر با استفاده از فرزکاری کلیه سطوح ساخته شد. در سطح پیشانی اهرم یک عدد فلاویز M5 برای نصب پیچ آویز به منظور اندازه-گیری ضریب اصطکاک سطح قطعه‌کار و سطح اهرم ایجاد شد. دو عدد صفحه از جنس پلگسی گلس، با ابعاد  $10 \times 25 \times 350$  میلی‌متر برای نصب در سطوح جانبی اهرم به منظور اطمینان از حرکت یک بعدی قطعه‌کار با استفاده از فرزکاری ساخته شد. دو صفحه از جنس پلگسی گلس، با ابعاد  $10 \times 20 \times 320$  میلی‌متر به عنوان خط‌کش مدرج فرزکاری شد و صفحه کاغذی مدرج شده روی این صفحات پلگسی گلس چسبانده شد. شفت محرک از فولاد CK45 با قطر ۱۲ میلی‌متر و طول ۱۷۰ میلی‌متر به عنوان مفصل دورانی اهرم اعمال نیرو برای نصب بر روی تکیه‌گاه‌ها ماشین‌کاری شد. رابط واسط از جنس St37 با قطر ۲۲ میلی‌متر و طول ۲۰ میلی‌متر برای اتصال شفت محرک به انکودر ساخته شد. دو تکیه‌گاه برای تثبیت شفت محرک، با ابعاد  $40 \times 40 \times 20$  میلی‌متر ساخته شد و داخل هر یک از آن‌ها یک بلبرینگ شعاعی برای اطمینان از سهولت حرکت زاویه‌ای شفت محرک نصب شد. برای انکودر، یک ساپورت از جنس آلومینیوم با ابعاد کلی  $28 \times 70 \times 64$  میلی‌متر با استفاده از فرزکاری ساخته و به دو کفه بالایی و پایینی مجزا تقسیم شد. یک صفحه به عنوان نشیمنگاه ساپورت انکودر از ورق با جنس St37 بریده شد و با استفاده از فرزکاری به ابعاد نهایی  $5 \times 56 \times 84$  میلی‌متر رسانده شد. صفحه نشیمنگاه با اتصال پیچی به سطح زیرین سطح پایه مونتاژ شد. دو تکیه‌گاه در دو طرف شیار سطح پایه و شفت محرک داخل بلبرینگ‌های شعاعی تکیه‌گاه اول و دوم و



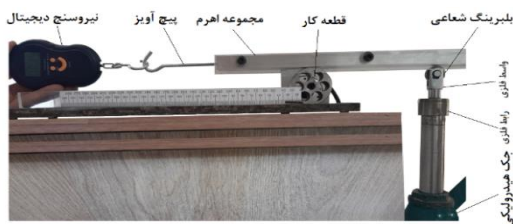
شکل ۲- مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده برای مکانیزم قطعه‌کار دایروی و اهرم

این مجموعه شامل یک قطعه‌کار با مقطع دایروی و اهرم است که با شروع حرکت چرخشی اهرم، قطعه‌کار در راستای یک شیار با مقدار بسیار اندکی تو رفتگی (که بر روی سطح پایه ایجاد شده است) به سمت جلو به حرکت در می‌آید. اهرم اعمال نیرو، حرکت زاویه‌ای را توسط یک شفت محرک به قطعه‌کار اعمال می‌کند. گشتاور اعمالی به این شفت توسط یک ترک‌متر اندازه‌گیری می‌شود. قطعه‌کار دایروی با اعمال نیرو توسط اهرم، پس از به حرکت درآمدن و لغزیدن بر روی سطح پایه، پس از طی مسافتی مشخص، دچار گیر شده و از حرکت باز می‌ایستد. دو تکیه‌گاه برای شفت محرک در دو طرف شیار روی سطح پایه در نظر گرفته شده است. برای سهولت حرکت زاویه‌ای شفت محرک، داخل هر یک از این تکیه‌گاه‌ها یک عدد بلبرینگ شعاعی نصب شده است. یک انکودر زاویه‌ای ساخت شرکت کویو الکترونیکس<sup>۱</sup> سری TRD - N توسط یک رابط واسط بصورت کاملاً هم محور به شفت محرک متصل شده است. از این انکودر برای خواندن زاویه چرخش اهرم، سرعت دورانی میله اعمال گشتاور و محاسبه زاویه ورود به گیر استفاده می‌شود. دو عدد خط‌کش مدرج هم برای خواندن مسافت طی شده بر روی سطح پایه نصب شده است. در این مکانیزم مسافت طی شده برای وقوع گیر با استفاده از داده‌های خروجی انکودر و خط‌کش مدرج اندازه‌گیری شد.

برای ساخت مجموعه آزمایشگاهی، پس از طراحی مدل سه‌بعدی، نقشه‌های اجرایی از هر یک از قطعات آماده گردید و

<sup>۱</sup> Koyo Electronics TRD-N Series

برای تشخیص وقوع لغزش توسط دو کاربر انجام شد. یکی از کاربرها وظیفه اعمال نیروی کششی به قطعه کار و دیگری وظیفه تشخیص وقوع لغزش را داشت. بدین صورت که کاربر دوم، با مشاهده وقوع اولین لغزش آن را با صدا اعلام می نمود. با توجه به ذخیره صدا و تصویر آزمایش در فیلم ضبط شده و سپس پخش فیلم به صورت آهسته در انتهای هر آزمایش، با شنیدن اولین صدای کاربر مبنی بر وقوع لغزش، مقدار نیرو در همان لحظه به عنوان کمینه نیروی لازم برای وقوع لغزش، ثبت و ضریب اصطکاک برای هر تکرار آزمایش محاسبه شد. در آزمایش دوم، پس از تعیین دقیق وزن مجموعه اهرم و پیچ آویز، برای اندازه گیری ضریب اصطکاک بین سطح قطعه کار و اهرم، از آزمون کشش سطح اهرم روی سطح قطعه کار و اندازه گیری حداقل نیروی لازم برای شروع لغزش استفاده شد. در این آزمایش طراحی آزمایش و مکانیزم تشخیص وقوع لغزش کاملاً مشابه آزمایش اول بود. شکل ۴ نشان دهنده شکل بندی اجرای این آزمایش است.



شکل ۴- اندازه گیری ضریب اصطکاک سطح تماس قطعه کار و اهرم

در این آزمایش از یک جک هیدرولیک دستی، که بر روی رام آن یک بلبرینگ شعاعی نصب شده بود، برای کنترل دقیق ارتفاع و تراز کردن اهرم استفاده شد. یک پیچ آویز به روزه انتهای اهرم بسته شد و مجموعه اهرم روی دو تکیه گاه قطعه کار دایروی و بلبرینگ شعاعی، به صورت کاملاً تراز شده قرار گرفت. مقادیر ضرایب اصطکاک در سه موقعیت مختلف اهرم و در دو زاویه ۰ و ۱۸۰ درجه قطعه کار، به تعداد ۹ بار در هر زاویه اندازه گیری شد. با این تفاوت که به دلیل تحمل وزن مجموعه اهرم توسط دو تکیه گاه،  $F_n$  نیروی عمود بر سطح تماس یا نیروی عکس العمل تکیه گاه اول برابر نصف وزن مجموعه اهرم و پیچ آویز در نظر گرفته شد.

مجموعه اهرم نصب شد. انکودر زاویه ای داخل ساپورت مونتاژ و بر روی سطح پایه نصب شد. خط کش های مدرج در دو طرف شیار طولی سطح پایه نصب شدند. در این پژوهش سه آزمایش برای اندازه گیری ضرایب اصطکاک بین سطح قطعه کار با سطوح اهرم و سطح پایه و مقدار مسافت طی شده برای وقوع لغزش انجام شد. در آزمایش اول، پس از تعیین دقیق وزن قطعات، برای اندازه گیری ضریب اصطکاک بین سطح قطعه کار و سطح پایه، از آزمون کشش سطح قطعه کار روی سطح پایه و اندازه گیری حداقل نیروی لازم برای شروع لغزش قطعه کار استفاده شد. برای این منظور، مقادیر ضرایب اصطکاک در دو زاویه صفر و ۱۸۰ درجه قطعه کار در سه موقعیت مختلف سطح پایه اندازه گیری شد. آزمایش ها در هر زاویه به تعداد ۹ بار تکرار شدند. سپس، مقدار میانگین همه این مقادیر به عنوان ضریب اصطکاک نهایی در نظر گرفته شد. شکل ۳ نشان دهنده شکل بندی اجرای این آزمایش است.



شکل ۳- اندازه گیری ضریب اصطکاک سطح تماس قطعه کار و سطح پایه

در این آزمایش با قراردادن قطعه کار روی سطح پایه و تماس آن دو در زاویه های مذکور، مقادیر ضریب اصطکاک<sup>۱</sup> با استفاده از آزمون کششی اندازه گیری شد. در این آزمایش از یک نیروسنج دیجیتال با دقت اسمی یک گرم استفاده شد. پس از اندازه گیری حداقل نیروی لازم برای شروع لغزش قطعه کار، با لحاظ کردن وزن قطعات و استفاده از رابطه  $\mu = F_t / F_n$  مقدار ضریب اصطکاک محاسبه شد. در این رابطه،  $F_t$  حداقل نیروی کششی لازم برای شروع لغزش و  $F_n$  نیروی عمود بر سطح تماس یا نیروی عکس العمل است. مکانیزم تشخیص وقوع لغزش قطعه کار روی سطح پایه به دلیل محدودیت های مالی و عدم وجود روش یا سنسوری

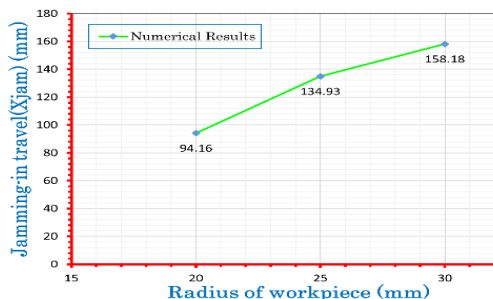


مجموعه اهرم، توسط خط‌کش مدرج نصب شده بر روی مجموعه آزمایشگاهی ثبت شد.

مقدار مسافت طی‌شده قطعه‌کار برای وقوع گیر با استخراج داده‌های خروجی انکودر و داشتن زاویه گیر محاسبه شد و با مقادیر خوانده‌شده از خط‌کش مدرج مقایسه شد. آزمایش‌ها برای هر قطعه‌کار به تعداد ۱۰ بار تکرار شد و سپس با میانگین‌گیری از هر دو روش، مقدار مسافت پیمایش قطعه‌کار برای وقوع گیر، برای هر قطعه‌کار محاسبه شد و با نتایج تحلیل عددی مقایسه شد.

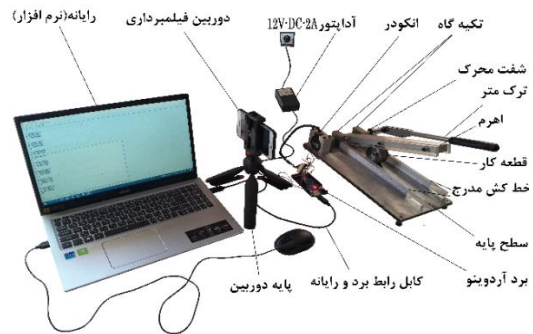
#### ۴- نتایج و بحث

در این بخش به نتایج بدست‌آمده از تحلیل‌های عددی و آزمایش‌های تجربی پرداخته شده است. در بخش نتایج تحلیل عددی، مسافت پیمایش قطعه‌کار برای وقوع گیر در مکانیزم قطعه‌کار با مقطع دایروی و اهرم با استفاده از تحلیل عددی توسط نرم‌افزار آباکوس پیش‌بینی شد. برای مقایسه پیش‌بینی آنالیز عددی با نتایج تجربی، ابتدا مقادیر ورودی مورد نیاز برای تحلیل عددی از آزمایش‌های تجربی اندازه‌گیری شد و با جاگذاری آن‌ها در تحلیل عددی و اجرای شبیه‌سازی، نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. با تعریف خواص و ویژگی‌های اجزاء تعیین نوع حلگر، در نظر گرفتن مقادیر تجربی ضریب اصطکاک سطح قطعه‌کار با سطوح اهرم و سطح پایه، تعریف مقدار نیروی وارده از اهرم به قطعه‌کار و اعمال شرایط مرزی و بارگذاری، مطابق مشخصات و مقادیر ذکرشده در بخش ۲، مسافت پیمایش قطعه‌کار برای وقوع گیر برای هر سه قطعه‌کار دایروی با قطرهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر از تحلیل پیشنهادی مطابق نمودار شکل ۶ محاسبه شد.



شکل ۶- نتایج آنالیز عددی قطعه‌کارهای دایروی

در آزمایش سوم، مسافت پیمایش قطعه‌کار برای وقوع گیر از طریق تکنیک‌های تصویر برداری، با استفاده از خط‌کش مدرج نصب شده بر روی مجموعه آزمایشگاهی و استفاده از داده‌برداری اطلاعات خروجی انکودر اندازه‌گیری شد. برای انجام این آزمایش از رایانه (نرم‌افزار)، مجموعه آزمایشگاهی ساخته‌شده با قطعات‌کار با مقطع دایروی، انکودر کویوالکترونیکس، برد آردوینو<sup>۱</sup>، آداپتور 12V - DC - 2A، کابل رابط برد و رایانه، ترک‌متر، دوربین فیلمبرداری، پایه دوربین مطابق شکل ۵ استفاده شد.

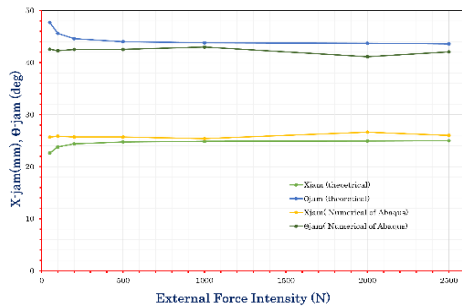


شکل ۵- مجموعه آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری طول وقوع گیر در مکانیزم قطعه‌کار با مقطع دایروی و اهرم

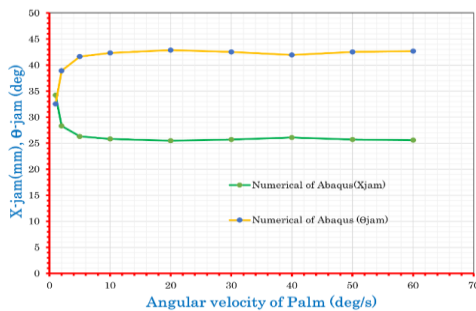
برای اجرای آزمایش ابتدا ارتباط تجهیزات الکتریکی فوق به یکدیگر برقرار شد. خروجی انکودر توسط ۱۲ رشته سیم به برد آردوینو و آداپتور متصل شد. پس از آماده شدن نرم‌افزار، اهرم اعمال نیرو توسط یک گونیای دقیق در حالت قائم قرار داده شد و زاویه انکودر در موقعیت قائم به عنوان رفرنس، به منظور محاسبه تجربی زاویه گیر در آزمایش‌ها داده‌برداری شد. سپس، قطعه‌کار بر روی سطح پایه قرار گرفت و با حرکت چرخشی شفت محرک توسط ترک‌متر، مجموعه اهرم به قطعه‌کار، نیرو اعمال کرده و قطعه‌کار پس از طی مسافتی مشخص متوقف شد. با توجه به اتصال انکودر به برد آردوینو و رایانه، زاویه اهرم در موقعیت ابتدا و انتهای آزمایش با استفاده از انکودر و نرم‌افزار هایپرترمینال داده‌برداری و ذخیره‌سازی شد. تمام مراحل آزمایش توسط دوربین، فیلم‌برداری شد و مقدار پیمایش قطعه‌کار پس از وقوع گیر و قبل از برداشتن نیروی

<sup>۱</sup> Arduino-Mega2560





(ج)



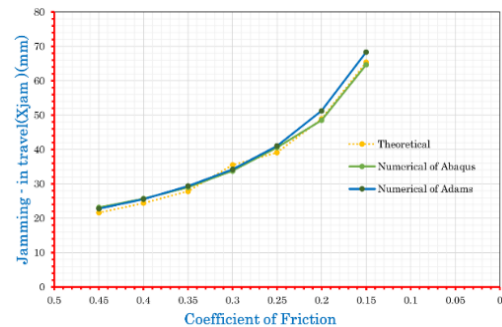
(د)

شکل ۷- مقایسه نتایج شبیه‌سازی طول ورود به گیر توسط نرم‌افزار آباکوس با نتایج تحلیل نرم‌افزاری و تئوری‌های ارائه شده در مرجع [۱]، براساس پارامترهای ضریب اصطکاک، شعاع قطعه‌کار، نیرو و سرعت زاویه‌ای

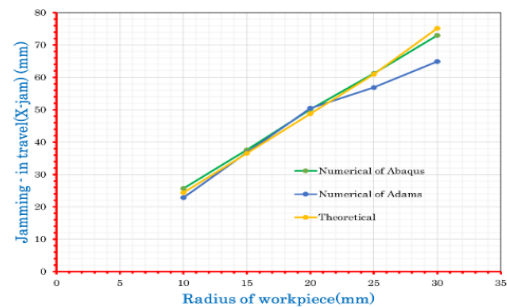
با افزایش اصطکاک، نیروی مقاوم در برابر حرکت قطعه‌کار افزایش یافته و قطعه‌کار پس از طی مسافت کوتاه‌تر دچار گیر می‌شود. بنابراین، افزایش ضریب اصطکاک سبب کاهش مسافت پیمایش قطعه‌کار برای وقوع پدیده گیر می‌شود و همین‌طور بدیهی است که با افزایش شعاع قطعه‌کار در ضریب اصطکاک ثابت، مقدار مسافت پیمایش قطعه‌کار برای وقوع پدیده گیر افزایش می‌یابد که منطبق بر فیزیک مساله است. وقوع گیر، در پیمایش مشخص قطعه‌کار، منجر به افزایش شدید نیرو می‌شود و این افزایش نیرو هیچ تاثیری در رفع گیر و حرکت مجدد قطعه‌کار نخواهد داشت. با افزایش جرم قطعه‌کار، نیروی وارده از طرف اهرم نیز به تناسب آن بیشتر شده و قطعه‌کار حرکت را تا جایی ادامه می‌دهد که به لحاظ سینماتیکی وارد محدوده گیر شود. در چنین حالتی، قطعه‌کار (با هر جرمی) حرکت را بر روی سطح افقی انجام داده و پس از حرکت به اندازه مشخص، درجه آزادی آن بصورت سینماتیکی از بین رفته و دچار گیر می‌شود. به این دلیل،

همچنین با استفاده از نتایج تحلیل نرم‌افزاری و تئوری‌های ارائه شده در مرجع [۱]، علاوه بر صحنه‌گذاری و درستی اجرای فرایند پیش‌بینی تحلیل عددی با نرم‌افزار آباکوس، تاثیر پارامترهای ضریب اصطکاک، شعاع قطعه‌کار، نیرو، سرعت زاویه‌ای بر مسافت طی شده برای وقوع گیر توسط نرم‌افزار آباکوس بررسی شد. برای این منظور، ضریب اصطکاک از ۰/۱۵ تا ۰/۴، شعاع قطعه‌کار از ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر، نیروی وارده بر قطعه‌کار از سوی اهرم از ۵۰ تا ۲۵۰۰ نیوتن و سرعت زاویه‌ای از ۱ تا ۶۰ درجه در ثانیه در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل عددی با نرم‌افزار آباکوس مطابق دیاگرام‌های شکل ۷ در تطابق کامل با نتایج تحلیل‌ها و تئوری‌های ارائه شده در این مرجع بود.

مطابق نمودارهای (الف) و (ب) شکل ۷، افزایش ضریب اصطکاک و شعاع قطعه‌کار به ترتیب منجر به کاهش و افزایش مقدار مسافت پیمایش قطعه‌کار برای وقوع پدیده گیر می‌شود. همچنین، مطابق نمودارهای (ج) و (د) همین شکل، افزایش نیرو و سرعت زاویه‌ای تاثیری بر مسافت طی شده قطعه‌کار برای وقوع گیر ندارند [۱].



(الف)



(ب)

۰/۱۰۲، ۰/۱۰۳ و ۰/۱۰۴ با انحراف استاندارد ۰/۰۱۲۸، ۰/۰۰۸۲ و ۰/۰۱۱۵ به دست آمد که نشان از تکرارپذیری خوب آزمایشات است.

جدول ۲- نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری ضریب اصطکاک بین سطح تماس قطعه‌کار و سطح اهرم

تکرار	قطر ۴۰ م م		قطر ۵۰ م م		قطر ۶۰ م م	
	°۱۸۰	°۰	°۱۸۰	°۰	°۱۸۰	°۰
۱	۰/۰۹۰	۰/۱۰۳	۰/۱۰۳	۰/۱۰۳	۰/۱۰۳	۰/۰۹۰
۲	۰/۱۰۳	۰/۱۰۳	۰/۱۱۵	۰/۱۰۳	۰/۰۹۰	۰/۱۰۳
۳	۰/۰۹۰	۰/۰۹۰	۰/۰۹۰	۰/۱۰۳	۰/۱۱۵	۰/۱۰۳
۴	۰/۱۰۳	۰/۱۰۳	۰/۱۰۳	۰/۱۰۳	۰/۰۹۰	۰/۱۱۵
۵	۰/۰۹۰	۰/۰۷۷	۰/۱۱۵	۰/۱۱۵	۰/۰۹۰	۰/۱۲۸
۶	۰/۱۰۳	۰/۱۰۳	۰/۰۹۰	۰/۱۰۳	۰/۰۹۰	۰/۱۰۳
۷	۰/۱۱۵	۰/۱۱۵	۰/۱۰۳	۰/۱۱۵	۰/۱۰۳	۰/۱۱۵
۸	۰/۱۰۳	۰/۱۰۳	۰/۱۲۸	۰/۰۹۰	۰/۱۰۳	۰/۱۱۵
۹	۰/۱۱۵	۰/۱۱۵	۰/۱۱۵	۰/۱۰۳	۰/۱۰۳	۰/۱۱۵
میانگین	۰/۱۰۱	۰/۱۰۳	۰/۱۰۳	۰/۱۰۴	۰/۱۰۰	۰/۱۰۸
اصطکاک ضریب	۰/۱۰۲		۰/۱۰۳		۰/۱۰۴	
استاندارد انحراف	۰/۰۱۲۸		۰/۰۰۸۲		۰/۰۱۱۵	

برای صحت‌سنجی نتایج آنالیز عددی، مسافت طی‌شده برای وقوع گیر با استفاده از میانگین داده‌های خروجی انکودر و خط‌کش مدرج نصب شده بر روی مجموعه آزمایشگاهی برای سه قطعه‌کار با قطرهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نتایج در جداول ۳، ۴ و ۵ ارائه شده است.

جدول ۳- مسافت پیمایش تجربی قطعه‌کار ۴۰ میلی‌متر

تکرار	انکودر	خط‌کش مدرج
۱	۱۰۸/۰۷	۱۱۰
۲	۱۰۸/۰۷	۱۱۰
۳	۱۰۴/۳۴	۱۰۶
۴	۱۰۳/۷۸	۱۰۵
۵	۱۰۸/۰۷	۱۱۰
۶	۱۰۰/۸۶	۱۰۲
۷	۱۰۰/۸۶	۱۰۲

تغییری در مقدار مسافت پیمایش قطعه‌کار برای ورود به گیر، ناشی از جرم قطعه‌کار و سرعت زاویه‌ای اهرم مشاهده نمی‌شود. برای پیش‌بینی مسافت طی‌شده برای وقوع گیر با تحلیل عددی، ضریب اصطکاک بین سطح تماس قطعه‌کار با سطوح اهرم و سطح پایه، مطابق روشی که در بخش ۳ به آن پرداخته شد، انجام گردید. نتایج در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. برای محاسبه ضریب اصطکاک، جرم قطعه‌کار با قطر ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۱۰۵/۳، ۲۴۸/۵ و ۲۳۷/۵ گرم اندازه‌گیری شد. جرم مجموعه اهرم و پیچ آویز نیز برابر با ۷۸۰ گرم با ترازوی دقیق آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد.

جدول ۱- نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری ضریب اصطکاک بین سطح تماس قطعه‌کار و سطح پایه

تکرار	قطر ۴۰ م م		قطر ۵۰ م م		قطر ۶۰ م م	
	°۱۸۰	°۰	°۱۸۰	°۰	°۱۸۰	°۰
۱	۰/۱۰۰	۰/۱۰۶	۰/۱۰۹	۰/۱۲۱	۰/۱۰۵	۰/۱۰۵
۲	۰/۱۰۶	۰/۱۰۰	۰/۱۰۵	۰/۱۱۳	۰/۱۰۱	۰/۱۰۱
۳	۰/۱۰۰	۰/۱۰۶	۰/۱۱۳	۰/۱۰۹	۰/۱۰۵	۰/۱۰۱
۴	۰/۱۰۶	۰/۱۰۰	۰/۱۱۳	۰/۱۰۱	۰/۱۰۵	۰/۱۰۵
۵	۰/۱۰۰	۰/۱۰۶	۰/۱۱۷	۰/۱۰۹	۰/۰۹۷	۰/۱۰۵
۶	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۱۲۱	۰/۱۱۳	۰/۱۰۵	۰/۱۰۱
۷	۰/۱۰۶	۰/۱۰۶	۰/۱۱۳	۰/۱۲۱	۰/۰۹۷	۰/۱۰۵
۸	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۱۲۱	۰/۱۱۳	۰/۱۰۱	۰/۱۰۱
۹	۰/۱۰۶	۰/۱۰۶	۰/۱۰۹	۰/۱۱۷	۰/۱۰۵	۰/۱۰۵
میانگین	۰/۱۰۳	۰/۱۰۳	۰/۱۱۳	۰/۱۱۴	۰/۱۰۲	۰/۱۰۳
اصطکاک ضریب	۰/۱۰۳		۰/۱۱۴		۰/۱۰۳	
استاندارد انحراف	۰/۰۰۳۴		۰/۰۰۴۹		۰/۰۰۲۹	

مطابق جدول ۲، میانگین ضریب اصطکاک برای سطح تماس قطعه‌کارهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر با سطح پایه، به ترتیب برابر ۰/۱۰۳، ۰/۱۱۴ و ۰/۱۰۳ با انحراف استاندارد ۰/۰۰۳۴، ۰/۰۰۴۹ و ۰/۰۰۲۹ به دست آمد که نشان از تکرارپذیری خوب آزمایشات است. همین‌طور مطابق جدول ۳، میانگین ضریب اصطکاک تجربی برای سطح تماس اهرم با سطح قطعه‌کارهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر به ترتیب برابر

۱۷۱	۱۶۸/۸۰	۸
۱۷۰	۱۶۸/۱۷	۹
۱۸۰	۱۷۸/۳۹	۱۰
۱۷۲/۷	۱۷۰/۶۳	میانگین
۱۷۱/۶۷		مسافت طی شده تجربی

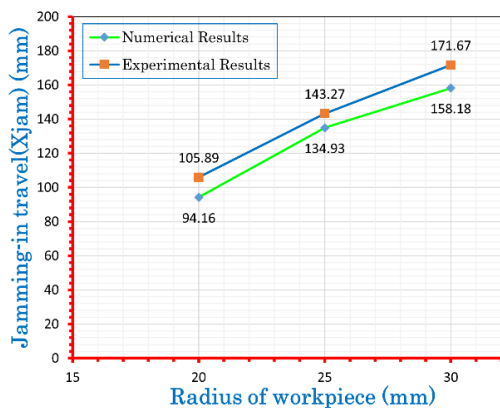
۱۰۶	۱۰۴/۳۴	۸
۱۱۰	۱۰۸/۰۷	۹
۱۰۶	۱۰۴/۳۴	۱۰
۱۰۶/۷	۱۰۵/۰۸	میانگین
۱۰۵/۸۹		مسافت طی شده تجربی

مطابق جدول ۵ نیز مسافت طی شده قطعه کار قطر ۶۰ میلی متر برای وقوع گیر برابر ۱۷۱/۶۷ میلی متر با بیشینه مقدار خطا بین داده‌های جمع‌آوری شده توسط انکودر و خطکش مدرج برابر با ۱/۲٪ به دست آمد. با توجه به آنالیزهای عددی و آزمایش‌های تجربی، مسافت طی شده قطعه کارهای قطر ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی متر مطابق نمودار شکل ۸ محاسبه شد.

مطابق جدول ۳، مسافت طی شده قطعه کار قطر ۴۰ میلی متر برای وقوع گیر برابر با ۱۰۵/۸۹ میلی متر با بیشینه مقدار خطا بین داده‌های جمع‌آوری شده توسط انکودر و خطکش مدرج برابر با ۱/۱۵٪ به دست آمد.

جدول ۴- مسافت پیمایش تجربی قطعه کار ۵۰ میلی متر

خطکش مدرج	انکودر	تکرار
۱۴۵	۱۴۲/۸۷	۱
۱۴۴	۱۴۲/۱۹	۲
۱۴۳	۱۴۱/۵۲	۳
۱۴۸	۱۴۶/۶۸	۴
۱۴۴	۱۴۲/۱۹	۵
۱۴۸	۱۴۶/۶۸	۶
۱۴۰	۱۳۸/۶۲	۷
۱۳۹	۱۳۷/۹۸	۸
۱۴۵	۱۴۲/۸۷	۹
۱۴۵	۱۴۲/۸۷	۱۰
۱۴۴/۱	۱۴۲/۴۵	میانگین
۱۴۳/۲۷		مسافت طی شده تجربی



شکل ۸- مقایسه پیش‌بینی تحلیل عددی با نتایج تجربی

با مقایسه نتایج آنالیز عددی و نتایج تجربی، مقدار مسافت طی شده برای قطعه کار قطر ۴۰ میلی متر با بیشینه خطای ۱/۲۴٪، برای قطعه کار قطر ۵۰ میلی متر با بیشینه خطای ۶/۱۸٪ و برای قطعه کار قطر ۶۰ میلی متر با بیشینه خطای ۸/۵۳٪ محاسبه شد.

مطابق جدول ۴، مسافت طی شده قطعه کار قطر ۵۰ میلی متر برای وقوع گیر برابر ۱۴۳/۲۷ میلی متر با بیشینه مقدار خطا بین داده‌های جمع‌آوری شده توسط انکودر و خطکش مدرج برابر با ۱/۱۵٪ به دست آمد.

جهت اطمینان از مستقل بودن نتایج تحلیل از ابعاد مش، مطالعه همگرایی برای قطعات مذکور با اندازه مش‌های مختلف انجام شد. جدول ۶ نشان‌دهنده مطالعه همگرایی قطعه ۵۰ میلی متر است.

جدول ۵- مسافت پیمایش تجربی قطعه کار ۶۰ میلی متر

خطکش مدرج	انکودر	تکرار
۱۷۰	۱۶۸/۱۰	۱
۱۷۳	۱۶۹/۹۵	۲
۱۷۱	۱۶۸/۸۰	۳
۱۷۰	۱۶۸/۱۷	۴
۱۷۱	۱۶۸/۸۰	۵
۱۷۱	۱۶۸/۸۰	۶
۱۸۰	۱۷۸/۳۹	۷

## جدول ۶- نتایج آنالیز استقلال شبیه‌سازی از اندازه مش

بندی (نتایج برای قطعه‌کار با قطر ۵۰ میلی‌متر)	
طول ورود به گیر (میلی‌متر)	اندازه مش (میلی‌متر)
۵۹/۳	۱۰
۹۵/۹	۵
۹۶/۵	۳
۱۰۱/۶۴	۱
۱۳۴/۹۳	۰/۹
۱۳۵/۲۳	۰/۳

منابع خطا در اجرای آزمایش‌های تجربی شامل موارد زیر است:

- خطا در اندازه‌گیری ضرایب اصطکاک بین سطح قطعه‌کار با سطوح اهرم و سطح پایه.
- خطا در یکسان نبودن ضریب اصطکاک در نقاط مختلف سطح قطعه‌کار و سطوح اهرم و سطح پایه.
- خطا در فرایند اجرای آزمایش‌های تجربی.
- خطای حاصل از اندازه‌گیری نیروسنج دیجیتال.
- خطا در داده‌برداری توسط انکودر و خوانش خط‌کش مدرج نصب شده روی مجموعه آزمایشگاهی.

البته برخی از این خطاها با تکرار آزمایش تا حد قابل قبول کاهش داده شد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تحلیل عددی و تجربی وقوع پدیده گیر قطعه-کار در قید و بند با استفاده از مطالعه مکانیزم قطعه‌کار دایروی و اهرم اجرا شد. مسافت طی شده قطعه‌کار برای وقوع گیر، از تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، برای قطعه‌کارهای مختلف با قطرهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر، به ترتیب برابر ۹۴/۱۶، ۱۳۴/۹۳ و ۱۵۸/۱۸ میلی‌متر محاسبه شد.

همچنین از تحلیل‌های ارائه شده در مرجع [۱]، برای صحت‌گذاری فرایند تحلیل عددی با نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. علاوه بر تطابق کامل نتایج تحلیل عددی توسط آباکوس با تحلیل‌ها و تئوری‌های ارائه شده در مرجع مذکور، با بررسی منحنی‌ها و نتایج حاصل از تحلیل عددی، تاثیر پارامترهای

ضریب اصطکاک، شعاع قطعه‌کار، نیروی اهرم، جرم قطعه‌کار و سرعت زاویه‌ای اهرم مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- افزایش ضریب اصطکاک و شعاع قطعه‌کار به ترتیب منجر به کاهش و افزایش پیمایش قطعه‌کار با مقطع دایروی برای ورود به گیر می‌شود.
  - افزایش نیرو، سرعت زاویه‌ای و جرم قطعه‌کار تاثیری بر مسافت طی شده برای وقوع گیر ندارند.
- پیش‌بینی مقدار مسافت پیمایش قطعه‌کار برای وقوع گیر از آنالیزهای عددی، با اجرای آزمایش‌های تجربی، صحت-سنجی شد. برای این منظور، مجموعه آزمایشگاهی ساخته شد و پس از اجرای آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری ضریب اصطکاک، آزمایش‌های اصلی برای اندازه‌گیری مسافت پیمایش قطعه‌کار برای وقوع گیر با استفاده از دو روش داده‌برداری از اطلاعات خروجی انکودر و خط‌کش مدرج نصب شده بر روی مجموعه آزمایشگاهی انجام شد. مسافت طی شده قطعه‌کار برای وقوع گیر، از آزمایشات تجربی برای قطعه‌کارهای مختلف با قطرهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر به ترتیب برابر ۱۰۵/۸۹، ۱۴۳/۲۷ و ۱۷۱/۶۷ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. و نتایج آنالیز عددی با نتایج تجربی مقایسه گردید.
- استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری با دقت بسیار بالا در اندازه‌گیری مسافت طی شده قطعه‌کار برای وقوع پدیده گیر، استفاده از نیروسنج‌های با دقت بسیار بالا برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک و استفاده از تحلیل پیشنهادی برای پیش‌بینی وقوع گیر قطعه‌کار در قید و بند در حالت سه‌بعدی و اجرای آزمایش تجربی در حالت سه‌بعدی برای صحت‌سنجی نتایج را می‌توان به عنوان پیشنهادهایی برای اجرای پژوهش‌های آتی در این زمینه معرفی کرد.

## ۶- مراجع

- [1] Parvaz, H. (2020). Theoretical and Numerical Analysis of Jamming Phenomenon in Positioning of Circular Workpiece on Horizontal Surface. *AUT J. Mech. Eng.*, 4(4), 553-564.
- [2] Parvaz, H., & Bodaghy Aleny, M. (2020). Analysis of workpiece locating error using geometric fixture model: A theoretical and experimental study. *AUT J. Mech. Eng.*, 4(2), 229-240.
- [3] Sohrabifard, M., & Nategh, M. J. (2023). Investigation of the stability and contact stiffness of

- [10] Kim, C. H., & Seo, J. (2019). Shallow-depth insertion: Peg in shallow hole through robotic in-hand manipulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2), 383-390.
- [11] H. Parvaz, Theoretical and numerical investigation of workpiece jamming in fixture using block and palm case study, *Iran. J. Manufac. Eng.*, Vol.6, No. 3, pp. 20-27, 2019 (in Persian)
- [12] Ortega-Aranda, D., Jimenez-Vielma, J. F., Saha, B. N., & Lopez-Juarez, I. (2021). Dual-arm peg-in-hole assembly using DNN with double force/torque sensor. *Applied Sciences*, 11(15), 6970.
- [13] Li, W., Cheng, H., Li, C., & Zhang, X. (2021). Robotic Assembly for Irregular Shaped Peg-in-Hole with Partial Constraints. *Applied Sciences*, 11(16), 7394.
- [14] Yamakawa, Y., Matsui, Y., & Ishikawa, M. (2021). Development of a real-time human-robot collaborative system based on 1 khz visual feedback control and its application to a peg-in-hole task. *Sensors*, 21(2), 663.
- [15] Villena Toro, J., Wiberg, A., & Tarkian, M. (2023). Application of optimized convolutional neural network to fixture layout in automotive parts. *The Int. J. Adv. Manufac. Tech.*, 126(1-2), 339-353.
- [16] Das, S. K., & Nagesh, P. (2023). Design and Development of Fixture for Flexural Testing of Lumbar Spine. *J. The Institut. Engrs (India): Series C*, 104(3), 495-501.
- workpiece inside fixture in different machining conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: J. Mech. Eng. Science*, 09544062231153749.
- [4] Clark, J. P., Lentini, G., Barontini, F., Catalano, M. G., Bianchi, M., & O'Malley, M. K. (2019, May). On the role of wearable haptics for force feedback in teleimpedance control for dual-arm robotic teleoperation. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 5187-5193). IEEE.
- [5] Zhang, F., Qu, J., Liu, H., & Fu, Y. (2019). A multi-priority control of asymmetric coordination for redundant dual-arm robot. *Int. J. Humanoid Robotics*, 16(02), 1950008.
- [6] Du, F., Wen, K., & Yu, H. (2019). A self-adaptive alignment strategy for large components based on dynamic compliance center. *Assembly automation*, 39(2), 345-355.
- [7] Liu, Z., Song, L., Hou, Z., Chen, K., Liu, S., & Xu, J. (2019). Screw insertion method in peg-in-hole assembly for axial friction reduction. *IEEE Access*, 7, 148313-148325.
- [8] Lewis, K., Dhas, J., & Pandiyarajan, R. (2023, May). Design, fabrication and analysis of linear clamping fixture for friction stir spot welding. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2492, No. 1). AIP Publishing.
- [9] Meng, S., Zheng, L., Fan, W., Wang, X., & Zhou, J. (2023). Intelligent layout optimization of reconfigurable flexible fixture for assembling multiple aircraft panels. *Int. J. Adv. Manufac. Tech.*, 126(3-4), 1261-1278.