



تحلیل تئوری و عددی گیر قطعه کار در فیکسچر با استفاده از مساله بلوک و دست

هادی پروز

استادیار، مهندسی مکانیک - ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
شاهرود، صندوق پستی 3619995161، h.parvaz@shahroodut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 30 آبان 1397
پذیرش: 28 دی 1397
ارائه در سایت: مرداد 1398

کلیدواژه‌گان:

بلوک و دست
گیر قطعه کار
قید و بند
آنالیز عددی
نرم افزار آدمز

گیر قطعه کار به صورت سلب ناگهانی و ناخواسته درجه آزادی آن در حین بارگذاری و باربرداری در فیکسچر تعریف می‌شود. مطالعه پدیده گیر قطعه کار در قید و بند و پیش‌بینی وقوع آن در مرحله طراحی، منجر به بازبینی طرح فیکسچر و به تبع آن کاهش هزینه‌های ساخت و عواقب احتمالی ناشی از گیر قطعه کار در قید و بند می‌شود. هدف از اجرای پژوهش حاضر، بررسی عددی وقوع گیر قطعه کار در قید و بند با استفاده از مطالعه موردی بلوک و دست و مقایسه نتایج آن با پیش‌بینی‌های تئوری است. برای این منظور، آنالیز عددی مساله بلوک و دست با استفاده از نرم‌افزار تحلیل دینامیکی آدمز اجرا شده است. نتیجه بدست‌آمده از اجرای آنالیز عددی بیانگر این است که بلوک با حرکت به اندازه 0/754 دچار گیر می‌شود. نتایج آنالیز عددی با پیش‌بینی‌های ارائه‌شده توسط تئوری‌های پیشین که عمدتاً از دو روش محاسبات دینامیکی سرعت و شتاب در نقاط تماس و اصل کمینه اندازه نیروها بهره می‌گیرند، مقایسه گردید. نتیجه بر آن شد که طول وقوع گیر در آنالیز عددی، تطابق کاملی با پیش‌بینی تئوری ارائه‌شده بر اساس محاسبات دینامیکی سرعت و شتاب دارد. همچنین، اثرات پارامترهای مؤثر در مساله شامل ضریب اصطکاک بین قطعه کار و سطح زمین، سرعت دوران اهرم دست و جرم بلوک بر روی طول ورود به گیر مورد ارزیابی قرار گرفت.

Theoretical and numerical investigation of workpiece jamming in fixture using block and palm case study

Hadi Parvaz

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
P.O.B. 361999-95161 Shahrood, Iran, h.parvaz@shahroodut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 21 November 2018
Accepted 18 January 2019
Available August 2019

Keywords:

Adams
Block and Palm
Fixture Design
Jamming
Numerical Analysis

Abstract

Jamming is defined as sudden and unwanted immobilization of workpiece during its loading/unloading into the fixture. Investigation of workpiece jamming in fixture and prediction of its occurrence during fixture design process may induce to modification of the fixturing plan, reduction of the fixture fabrication costs and decreasing of the jamming-related consequences. The present study focuses on the numerical investigation of workpiece jamming in fixture using block and palm case study and comparison of its results to the theoretical predictions. For this purpose, numerical analysis of block and palm case study is conducted using Adams[®] software. Results of numerical analysis represent that jamming is occurred for block by traveling of distance equal to 0.754 on the horizontal surface. Numerical results are compared to the theoretical predictions. Theories for prediction of jamming incorporate two main methods; first, development of dynamics equation for calculation of velocity and acceleration at the contact points and second, the minimum norm principle. Agreement of the numerical results to the predictions of the first-category theoretical analyses (calculation of the velocity and acceleration at the contact points) confirmed the accuracy of the numerical results. Also, effects of the parameters including coefficient of friction between the workpiece and base plate, angular velocity of palm and mass of block are studied on the block's jamming distance.

1- مقدمه

المان‌های قید و بند³ و صحت‌سنجی⁴ اجرا می‌گردد. مهمترین مازول طراحی قید و بند همان طرح‌ریزی آن است که در این مرحله، درباره اطلاعات کلی عملکرد فیکسچر، نحوه جاسازی و بست قطعه کار، نوع المان‌های مورد استفاده در ساختار قید و

قید و بندها یکی از اصلی ترین عناصر تامین دقت در ساخت و تولید قطعات به شمار می روند. طراحی قید و بندها در چهار مرحله طرح‌ریزی ستاپ‌ها¹، طرح‌ریزی قید و بندها²، طراحی

³ Element design

⁴ Verification

¹ Setup planning

² Fixture planning

Please cite this article using:

H. Parvaz, Theoretical and numerical investigation of workpiece jamming in fixture using block and palm case study, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 20-27, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تماس اصطکاکی اجسام صلب را در کارکردهای موقعیت‌دهی تعیین کردند. با فرض اینکه تمام تماس‌ها در ابتدا در حالت لغزش قرار دارند، شرط وقوع گیر به صورت تغییر حالت حداقل یکی از تماس‌ها به غلتش عنوان گردید. مطالعات موردی شامل مسأله سوراخ-جاساز و بلوک-دست برای ارزیابی مدل استفاده گردید. بالکوم و ترینکل [5] مدلی تئوری بر اساس معادلات نیوتن-اولیبر برای تعیین آچار⁴های خارجی که سازگار با حالت‌های تعیین‌شده در نقاط تماس بین اجسام صلب باشند، در کارکرد قید و بند ارائه نمودند. لیو و وانگ [6] از روش گام زمانی با محاسبه مقادیر سرعت نسبی اجسام در تماس و تعیین نیروهای اصطکاکی برای حل مساله تماس اصطکاکی اجسام صلب استفاده کردند. نتیجه بدست‌آمده از حل، در تطابق مناسبی با نتایج حاصل از روش‌های بر پایه مساله مکمل جفت-نشده گزارش گردید. در [7]، مدلی برای پیش‌بینی وقوع گیر در تماس بین دو جسم صلب تحت نیروی خارجی ارائه گردید. مدل‌سازی بر مبنای اصل عدم وقوع گیر با وجود تماس‌های در حالت لغزش بنا نهاده شد. نتیجه اجرای مدل بر آن شد که نیروهای خارجی که منجر به وقوع حالت لغزش در نقاط تماس شوند، امکان وقوع گیر را از بین می‌برند. نتایج اجرای مدل بر روی مطالعه موردی بلوک-دست با نتایج بدست‌آمده در مطالعات پیشین مورد ارزیابی قرار گرفت. فلیکینگر و همکاران [8] به بررسی و مقایسه روش‌های شبیه‌سازی تماس اجسام صلب در محیط تعاملی پرداختند. با بررسی روش‌های مختلف، نتیجه مقایسه بین دو روش هندسه دقیق چندوجهی⁵ و استوارت-ترینکل⁶ بر آن شد که روش اول نیاز به گام‌های زمانی زمانی کوچکتر جهت نیل به دقت روش استوارت-ترینکل دارد. پروز و ناطق [9] مدلی چابک برای پیش‌بینی وقوع گیر در کارکرد قید و بند بر مبنای اصل کمینه اندازه نیروها ارائه کردند. حصول جواب برای تئوری اشاره‌شده در پژوهش به‌عنوان شرط وقوع گیر قطعه‌کار در قید و بند عنوان گردید. مطالعه موردی بلوک-دست برای ارزیابی توانایی مدل استفاده گردید و نتایج بدست آمده با نتایج پژوهش‌های پیشین مورد مقایسه قرار گرفت.

2- بیان مسئله، نوآوری و ذکر اهداف

مدل‌سازی تحلیلی فرآیند گیر قطعه‌کار در قید و بند توسط دو دسته از تئوری‌ها اجرا شده است. در دسته اول، معادلات

بند، نحوه بارگذاری و باربرداری قطعه‌کار در قید و بند، طراحی سیستم‌های جاسازی، بست و تکیه‌گاهی تصمیم‌گیری به‌عمل می‌آید. بارگذاری قطعه‌کار در قید و بند معمولاً توسط کارگر یا ربات انجام می‌شود که تأمین سهولت اجرای این فرآیند بر عهده طرح‌ریز قید و بند است. گیر قطعه‌کار پدیده‌ای ناخواسته است که در حین بارگذاری یا باربرداری آن در قید و بند اتفاق افتاده و با سلب ناگهانی درجات آزادی قطعه، منجر به توقف حرکت شده و مانع از بارگذاری یا باربردای صحیح قطعه‌کار در فیکسچر می‌شود. این پدیده معمولاً در کارکردهایی مشاهده می‌شود که تعداد عوامل محدودکننده حرکت در یک یا چند راستا، بیشتر از واحد باشد. به عنوان مثال، وجود سه عامل (جاسازهای پایه در سیستم جاسازی 1-2-3) در راستای مشخص اعمال شده به قطعه‌کار می‌تواند منجر به وقوع گیر قطعه‌کار در حین بارگذاری آن در قید و بند گردد.

پژوهش‌های متعددی در زمینه آنالیز پدیده گیر قطعه‌کار حین بارگذاری در قید و بند یا گرفتن اشیا در رباتیک گزارش شده است. تحلیل این پدیده معمولاً با استفاده از معادلات دینامیک تماس اصطکاکی اجسام صلب و یا در حالت شبه استاتیکی¹ انجام می‌شود. در این نوع از تحلیل، تعیین نوع تماس‌های اصطکاکی بین قطعات درگیر (از نظر غلتشی یا لغزشی بودن) معیار اصلی برای پیش‌بینی وقوع گیر قطعه به‌شمار می‌رود [1]. پنگ و همکاران [2] با فرض اینکه تمام تماس‌های بین قطعه و المان‌های قید و بند در ابتدای تحلیل در حالت غلتش قرار دارند، مدلی را برای محاسبه مقادیر سرعت و شتاب در نقطه تماس بین اجسام صلب درگیر ارائه کردند. با شکل‌بندی مدل در قالب یک مساله مکملی جفت نشده² و فرض اصطکاک غیرخطی کولمب در نقاط تماس، مساله حل گردید. نتیجه بر آن شد که همواره جوابی برای مساله تماس اصطکاکی اجسام صلب با نقاط تماس در حالت اولیه غلتشی وجود دارد. در [3]، مساله تماس اصطکاکی اجسام صلب به دو دسته گیر و گوه‌ای‌شدن³ تقسیم شد. گوه‌ای شدن به نوع خاصی از گیر در حالت استاتیکی اطلاق گردید که در آن، نیروهای عکس‌العمل ایجادشده در جسم صلب به‌صورت وابسته خطی باشند. با نوشتن معادلات دینامیکی و استخراج مدل، شرایط لازم برای وقوع گیر بر اساس مقادیر سرعت و شتاب در نقاط تماس تعیین گردید. ترینکل و همکاران [4] با فرض اعمال بار بصورت شبه‌استاتیکی، شرایط عدم وقوع گیر در

⁴ Wrench

⁵ Polyhedral Exact Geometry

⁶ Stewart-Trinkle

¹ Quasi-static

² Uncoupled Complementarity Problem

³ Wedging

سرعت و شتاب اجسام صلب در برخورد با یکدیگر بنا نهاده شده است. دسته دوم از تئوری‌ها که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است، به مطالعه پدیده گیر بر اساس اصل کمینه اندازه نیروها می‌پردازند. در این اصل، پس از محاسبه نیروهای عکس-العمل در نقاط تماس، شرط لازم برای وقوع پدیده گیر تعیین می‌شود. پیاده‌سازی این دسته از تئوری‌ها معمولاً منجر به یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی مرتبه چهار می‌گردد که در رابطه (1) قابل مشاهده است:

کمینه‌سازی:

$$\begin{aligned} \phi &= \text{norm}(RF) \\ RF &= (RF_1, RF_2, \dots, RF_6) \\ RF_i &= (RF_i^n, RF_i^{t_1}, RF_i^{t_2}) \end{aligned}$$

قیدها:

$$\begin{aligned} T\phi + W_e &= 0 \\ (RF_i^n) &> 0 \\ \sqrt{(RF_i^{t_1})^2 + (RF_i^{t_2})^2} &< \mu(RF_i^n) \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن، ϕ اندازه بردار نیروی عکس‌العمل برآیند حاصل از نیروهای عکس‌العمل در تمام جاسازها، RF_i نیروی عکس‌العمل در جاساز نام، RF_i^n ، $RF_i^{t_1}$ و $RF_i^{t_2}$ مولفه‌های نیروی عکس‌العمل در جاساز نام در راستاهای نرمال (n)، مماسی اول (t_1) و مماسی دوم (t_2)، T ماتریس تبدیل دستگاه مختصات محلی ($n - t_1 - t_2$) بر روی هریک از جاسازها به دستگاه مختصات جهانی قطعه‌کار ($X - Y - Z$)، W_e آچار برآیند حاصل از بارهای خارجی و μ ضریب اصطکاک کولمب بین قطعه‌کار و جاسازها است. قید اول مسأله بهینه‌سازی بیانگر تعادل استاتیکی بین آچارهای خارجی و داخلی در سیستم مختصات جهانی است. قید دوم شرط اصلی حفظ تماس بین قطعه‌کار و جاساز بوده و قید سوم برای در نظر گرفتن اصطکاک کولمب در مساله لحاظ شده است. نحوه محاسبه ماتریس تبدیل T در [9] ارائه شده است. چنانچه مسأله بهینه‌سازی ارائه‌شده در رابطه (1) به جواب مشخصی برسد، بیانگر ارضا شدن تمام قیود بهینه‌سازی بوده و این موضوع بیانگر وقوع حالت گیر در شکل‌بندی مسأله است. اگر مسأله بهینه‌سازی به جواب نرسد، یکی از قیود (معمولاً قید مرتبط با اصطکاک کولمب) نقض شده است که بیانگر وقوع حالت لغزش در یک یا چند نقطه تماس است. بعبارت دیگر، امکان وقوع گیر در این حالت وجود ندارد.

4- شبیه‌سازی عددی گیر

برای ارزیابی مدل‌های ارائه‌شده معمولاً چندین مطالعه موردی

دینامیک حرکت شامل معادلات سرعت و شتاب در محل تماس قطعه‌کار با عوامل محدودکننده حرکت نوشته شده و شرایط لازم برای وقوع گیر بر اساس مقادیر سرعت و شتاب نسبی بین قطعه‌کار و این عوامل جاسازی تعیین می‌شود. دسته دوم از تئوری‌ها، وقوع گیر را با استفاده از اصل کمینه اندازه نیروها و حل یک مسأله بهینه‌سازی پیش‌بینی می‌کنند که نیل به جواب برای این مسأله، بیانگر وقوع گیر است. برای صحت‌سنجی پیش‌بینی‌های تئوری، چندین مسأله به عنوان مطالعه موردی استفاده می‌شوند که مساله بلوک و دست در دسته‌بندی این مسائل قرار می‌گیرد. در این مساله، حرکت دورانی یک اهرم منجر به حرکت خطی بلوک بر روی سطح تکیه‌گاه می‌شود. بلوک پس از طی مسافت مشخصی بر روی سطح تکیه‌گاه دچار گیر شده و از حرکت باز می‌ایستد. مقدار این مسافت برای مشاهده پدیده گیر در مساله بلوک و دست (با شکل‌بندی مشخص) از تحلیل‌های بر پایه معادلات دینامیکی و اصل کمینه اندازه نیروها به ترتیب برابر با 0/75 و 0/25 گزارش شده است.

با مطالعه پیشینه پژوهش ارائه‌شده، مسافت حرکت بلوک برای مشاهده پدیده گیر در مساله بلوک و دست دارای دو مقدار متفاوت از تئوری‌های ارائه شده است. از سوی دیگر، هیچ گزارشی مبنی بر اجرای آنالیز عددی و شبیه‌سازی رفتار بلوک در این مساله ارائه نشده است. لذا، هدف از اجرای پژوهش حاضر، بررسی عددی گیر قطعه‌کار در مساله بلوک و دست برای محاسبه مقدار پیمایش بلوک برای وقوع پدیده گیر است. برای این منظور، مدل‌سازی و شبیه‌سازی حرکت در نرم‌افزار تحلیل دینامیکی آدمز¹ اجرا می‌شود. شکل‌بندی این مساله در نرم‌افزار دقیقاً بر اساس فرضیات ارائه‌شده در مدل‌سازی‌های تحلیلی اجرا شده است تا نتایج قابلیت قیاس با پیش‌بینی‌های تحلیلی را داشته باشند. نتایج بدست‌آمده از آنالیز عددی با پیش‌بینی‌های تئوری مورد مقایسه قرار گرفته و خطاهای احتمالی مورد بررسی و آنالیز قرار گرفته شده است.

3- تئوری گیر

همان‌گونه که عنوان گردید، دو دسته از تئوری‌ها برای مطالعه پدیده گیر قطعه‌کار در کارکردهای قید و بند یا موقعیت‌دهی در علم رباتیک مطرح است. دسته اول که پیشینه طولانی‌تری را نیز داراست، بر پایه معادلات دینامیک حرکت و بررسی

¹ Adams

هدف از پژوهش حاضر تعیین مقدار این پارامتر با استفاده از شبیه‌سازی عددی مسأله با شکل‌بندی مشابه است. برای این منظور، نرم‌افزار ادمز نسخه 2016 برای شبیه‌سازی انتخاب و استفاده گردید. بلوک به ابعاد $20 \times 10 \times 2/5$ میلی‌متر با نقطه گوشه مکعب مستطیل در مبدأ مختصات رسم گردید. جرم بلوک برابر با 1 کیلوگرم در نقطه مرکز ثقل اعمال شد. قطعه مکعب مستطیل به ابعاد $40 \times 1 \times 5$ میلی‌متر به‌عنوان زمین¹ ایجاد شد. شکل 2 نشان‌دهنده مدل مونتاژی از مطالعه موردی بلوک و دست در نرم‌افزار ادمز است. نهایتاً، لینک دو سرگرد به ابعاد $20 \times 5 \times 1$ میلی‌متر به‌عنوان اهرم در موقعیت مناسب رسم گردید. پس از تعریف مارکر²های لازم بر روی هر یک از قطعات، دو مفصل انتقالی خطی³ و دورانی⁴ بین قطعات تعریف شد. مفصل انتقالی خطی بین بلوک و زمین در راستای محور X بر روی سطح زمین تعریف شد. ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی برای این مفصل، بین بلوک و زمین به ترتیب برابر با $0/7$ و $0/5$ و پارامتر سرعت انتقال از حالت اصطکاک ایستایی به جنبشی⁵ برابر با 1 میلی‌متر بر ثانیه تعریف گردید. سرعت حرکت دورانی اهرم نیز به‌گونه‌ای تنظیم گردید که سرعت خطی بلوک بلافاصله پس از شروع حرکت از مقدار 1 میلی‌متر بر ثانیه بیشتر شود. با این تنظیمات، مقدار ضریب اصطکاک ایستایی تأثیری بر مسأله نداشته و اطمینان حاصل می‌شود که بلوک از ابتدای حرکت، وارد محدوده اصطکاک جنبشی (با $\mu = 0/5$) شده است. مفصل دورانی بدون اصطکاک بین لینک اهرم و زمین در نقطه ابتدای اهرم تعریف گردید. این مفصل نقش تکیه‌گاه پینی را برای اهرم بازی می‌کند که اجازه دوران لینک حول نقطه مفصل در راستای Z را فراهم می‌نماید.

استفاده می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به مطالعه وقوع گیر در مجموعه بلوک و دست اشاره نمود. شکل 1 نشان‌دهنده مدل این مطالعه موردی است. با اعمال حرکت چرخشی به اهرم (دست)، بلوک شروع به حرکت خطی در راستای محور X می‌کند. با پیشروی بیشتر بلوک و رسیدن آن به مقدار مشخص، گیر اتفاق می‌افتد. هدف محاسبه مقدار حرکت بلوک برای وقوع گیر (x_{jam}) است. شکل‌بندی مسأله بلوک و دست دقیقاً منطبق بر شکل‌بندی ارائه‌شده در پژوهش‌های [4, 7] است تا نتایج آنالیز عددی قابل قیاس با نتایج تئوری‌های ارائه‌شده باشد. شکل‌بندی ارائه‌شده شامل بلوک، اهرم (دست)، دو سیستم مختصات محلی $(n-t)$ در نقاط A و B و نهایتاً، سیستم مختصات جهانی $(X-Y)$ در نقطه اتصال اهرم به زمین است. بلوک مورد مطالعه دارای طول و عرض به ترتیب به اندازه دو و یک واحد است که در شکل با نمادهای a و b نشان داده شده‌اند. جرم بلوک واحد در نظر گرفته می‌شود که همواره در نقطه $(0.5, 1, x)$ ، که مرکز ثقل بلوک $(C.G.)$ است، نیروی ثقلی در راستای $-Y$ به بلوک وارد می‌کند. ضریب اصطکاک بین کل سطح زیرین بلوک و زمین برابر با $0/5$ در نظر گرفته می‌شود. لازم بذکر است که در هر دو دسته از تئوری‌ها برای ساده‌سازی حل مسأله، فرض بر این است که تماس بلوک با زمین در دو نقطه ابتدا و انتهای بلوک (نقاط A و B در شکل 1) برقرار می‌شود. با شروع حرکت چرخشی اهرم از حالت اولیه $\theta = 90^\circ$ ، بلوک از نقطه $x = 0$ شروع به حرکت خطی کرده و با پیمایش مسافت مشخصی (به نام x_{jam}) دچار گیر می‌شود. مقدار این پارامتر برای مطالعه موردی بلوک و دست در مرجع [4] با فرض شرایط شبه‌استاتیکی مسأله برابر با $x_{jam} = 0/75$ در مرجع [7] با استفاده از تئوری دینامیک برخورد اجسام صلب برابر با $x_{jam} = 0.25$ و در مرجع [9] با استفاده از تئوری کمینه اندازه نیروها برابر با $x_{jam} = 0/25$ گزارش شده است.

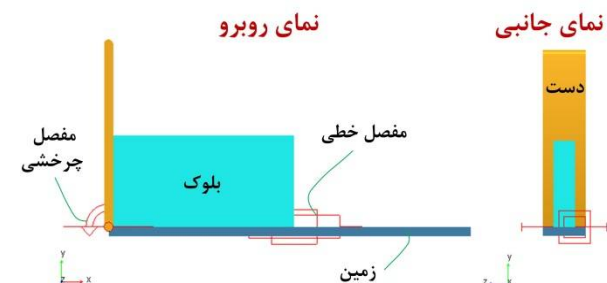


Fig. 2 The assembled model of the block and palm case study in Adams software

شکل 2 مدل مونتاژی شده مطالعه موردی بلوک و دست در نرم‌افزار ادمز

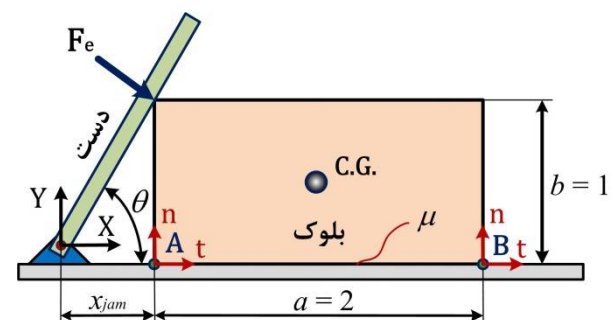


Fig. 1 Model of the block and palm case study

شکل 1 مدل مطالعه موردی بلوک و دست

¹ Ground

² Marker

³ Translational

⁴ Revolute

⁵ Stiction Transition Velocity

5- نتایج و بحث

قبل از ارائه نتایج بدست‌آمده از اجرای شبیه‌سازی و مقایسه آن با مقادیر پیش‌بینی‌شده از تئوری، نحوه تشخیص وقوع گیر در نرم‌افزار ادمز باید مشخص گردد. وقوع گیر در شبیه‌سازی بصورت ناپیوستگی و نوسان در منحنی سرعت بلوک دیده می‌شود. به‌عنوان مثال، شکل 3 نشان‌دهنده نمونه‌ای از منحنی سرعت بلوک بر اساس زمان حل در مسأله بلوک و دست با شکل‌بندی ارائه‌شده است. سرعت بلوک با شیب ملایمی در حال افزایش است که با ورود به منطقه مشخصی، دچار نوسان سرعت شدید می‌شود. وقوع اولین نوسان در سرعت بلوک بیانگر وقوع اولین گیر است.

همان‌گونه که از شکل 3 برمی‌آید، وقوع نوسان در سرعت بلوک در بازه زمانی مشخصی اتفاق می‌افتد. از آنجا که هدف از مطالعه گیر نیز تعیین دقیق موقعیت وقوع اولین گیر قطعه می‌باشد، لذا معیار تشخیص وقوع گیر در شبیه‌سازی با نرم‌افزار ادمز نیز مشاهده اولین نوسان در سرعت بلوک خواهد بود. شکل 4 نشان‌دهنده نتایج اجرای شبیه‌سازی برای مقدار حرکت بلوک در راستاهای X ، Y و Z برای وقوع گیر است. همان‌گونه که از شکل نیز مشخص است، بلوک در راستای X از $x_0 = 10.5\text{mm}$ شروع به حرکت کرده است. با بررسی دقیق منحنی سرعت بلوک، زمان دقیق وقوع اولین نوسان مشخص گردید. با انتقال این زمان به منحنی مکان بلوک، وقوع اولین گیر در $x_1 = 18.04\text{mm}$ مشاهده گردید.

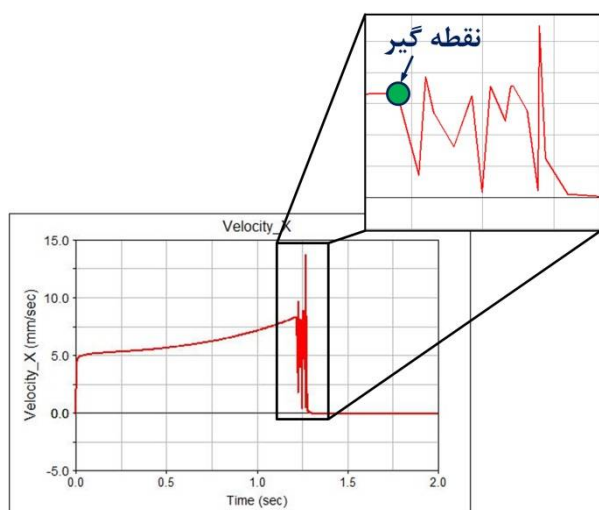


Fig. 3 Curve of block velocity along X axis and its instability at jamming instant

شکل 3 منحنی سرعت حرکت بلوک در راستای X و نوسان آن در لحظه وقوع گیر

لذا، می‌توان مقدار حرکت بلوک برای وقوع گیر را بصورت

حرکت دورانی¹ با سرعت 30 درجه در ثانیه بر روی اهرم دست در نقطه مفصل اعمال گردید. با اعمال این سرعت ثابت به لینک، سرعت اولیه خطی بلوک تقریباً برابر با $5/2$ میلی‌متر بر ثانیه خواهد بود. از آنجا که مقدار سرعت حرکت خطی بلوک از مقدار سرعت انتقالی اصطکاک از حالت ایستایی به حالت جنبشی بیشتر است، لذا بلوک حتماً از ابتدای حرکت وارد محدوده اصطکاک جنبشی شده و ضریب اصطکاک بین سطح بلوک و زمین در تمام طول حرکت برابر با $0/5$ خواهد بود.

تماس² بین اهرم و بلوک بصورت تماس سالیید³ به سالیید با ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی به اندازه $0/7$ و $0/5$ تعریف گردید. مشخصاً، ناحیه اصطکاک ایستایی بلافاصله با شروع حرکت تماسی بین اهرم و بلوک پیمایش شده و کل حرکت نسبی بین این دو قطعه در منطقه اصطکاک جنبشی با $\mu = 0/5$ خواهد بود. بر اساس مقادیر ارائه شده در [10، 11] برای تعیین ضرایب ثابت در تماس و همچنین تنظیم ضرایب مناسب برای شکل‌بندی مساله حاضر، سفتی تماس، ضریب نیرو⁴، ضریب میرایی و عمق نفوذ اجسام در تماس به ترتیب برابر با 10^8 ، $2/2$ ، 10^5 و 10^{-2} تعریف گردید. لازم بذکر است که با تغییر مقدار هریک از این پارامترها، تأثیر چندانی بر روی نتایج خروجی مشاهده نگردید.

همچنین، سرعت انتقال از حالت اصطکاک چسبنده به لغزنده و سرعت انتقال اصطکاک⁵ برابر با 0.1mm/s و 0.2mm/s وارد شد. لازم به‌ذکر است که با شروع حرکت از سرعت صفر به سرعت انتقال از حالت اصطکاک چسبنده به لغزنده (V_s)، ضریب اصطکاک بین سطوح از صفر به ضریب اصطکاک ایستایی (μ_s) افزایش می‌یابد. با ادامه حرکت و افزایش سرعت به سرعت انتقال اصطکاک (V_d)، ضریب اصطکاک از μ_s به ضریب اصطکاک جنبشی (μ_d) کاهش می‌یابد. لذا، همواره شرط $V_d > V_s$ برقرار بوده و مقدار این دو پارامتر، عدد به مراتب کوچکی وارد می‌شود تا اطمینان حاصل شود که حرکت با مقادیر ضرایب اصطکاک وارد شده با μ_s و μ_d انجام می‌شود. مقدار شتاب جاذبه زمین نیز برابر با 9806mm/s^2 در جهت $-Y$ تعریف و به مدل اعمال گردید. با اعمال فرضیات فوق، مدل با استفاده از نوع شبیه‌سازی دینامیک حل گردید و مقدار پارامتر x_{jam} در حالات مختلف اندازه‌گیری شد.

¹ Motion

² Contact

³ Solid

⁴ Force Exponent

⁵ Friction Transition Velocity

شکل 5 نشان‌دهنده تأثیر پارامتر ضریب اصطکاک بر روی طول ورود به گیر بلوک است که از شبیه‌سازی و تئوری بر پایه اصل کمینه اندازه نیروها بدست آمده است. محدوده [0.3-0.6] برای ضریب اصطکاک در نظر گرفته شده است تا تأثیر آن بر روی x_{jam} مطالعه گردد. مطابق با آنچه از نمودارهای شکل 5 برمی‌آید، با کاهش ضریب اصطکاک، مقدار حرکت بلوک برای ورود به گیر افزایش یافته است که این موضوع دقیقاً منطبق بر فیزیک مسأله است. به عبارت دیگر، با کاهش اصطکاک، نیروی مقاوم در برابر حرکت بلوک کاهش یافته و بلوک پس از پیمایش مسافت بیشتر دچار گیر می‌شود.

هدف از ارائه نمودارهای شکل 5، بررسی نتایج شبیه‌سازی از دیدگاه قانون افزایش طول ورود به گیر با کاهش ضریب اصطکاک است که به‌وضوح قابل مشاهده است. هرچند طول ورود به گیر پیش‌بینی شده از تئوری بر پایه اصل کمینه اندازه نیروها متفاوت با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی است، ولیکن، شیب افزایش این طول با کاهش ضریب اصطکاک برای هردوی این نتایج دارای انطباق مناسبی است.

با مطالعه اثر جرم بلوک و سرعت دورانی اهرم بر روی طول ورود به گیر در شبیه‌سازی، نتیجه بر آن می‌شود که این دو پارامتر تأثیری بر روی x_{jam} ندارند. این موضوع را می‌توان در دیگرام‌های شکل 6 نیز مشاهده نمود. این نتیجه در تناقض با نتیجه بدست آمده در [9] است. در [9]، برای محاسبه طول ورود به گیر با استفاده از اصل کمینه اندازه نیروها، عنوان گردیده است که افزایش جرم بلوک و نیروی وارده بر بلوک از طرف اهرم، باعث (به ترتیب) کاهش و افزایش طول ورود به گیر می‌شود.

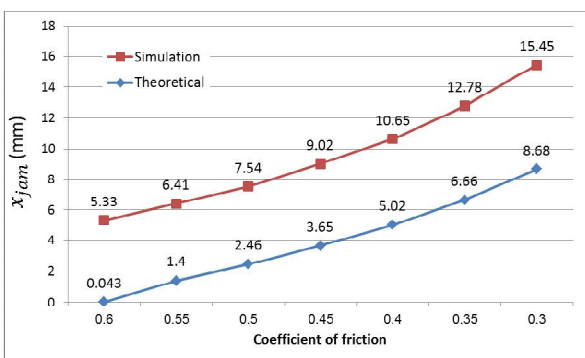


Fig. 5 Effect of coefficient of friction on jamming-in travel of block obtained from theoretical model and simulation

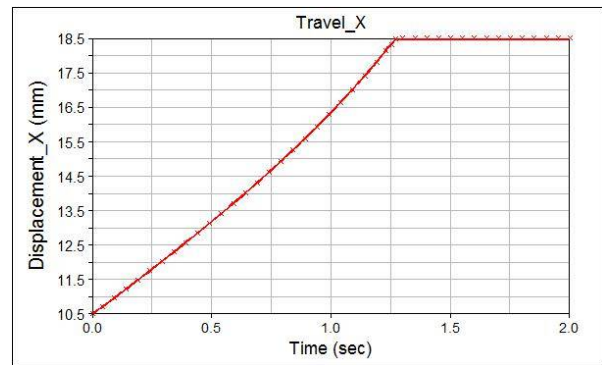
شکل 5 تأثیر پارامتر ضریب اصطکاک بر روی طول ورود به گیر در مطالعه موردی بلوک و دست از تئوری کمینه اندازه نیروها و شبیه‌سازی

لازم بذکر است که آنالیز ارائه‌شده، آنالیز نیرویی بوده و با

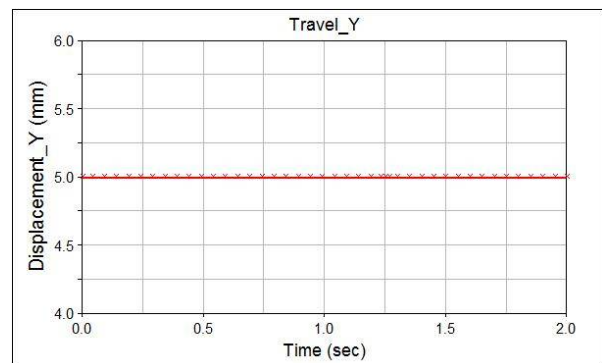
زیر محاسبه نمود:

$$x_{jam} = x_1 - x_0 = 7.54\text{mm} = 0.754\text{cm} \quad (2)$$

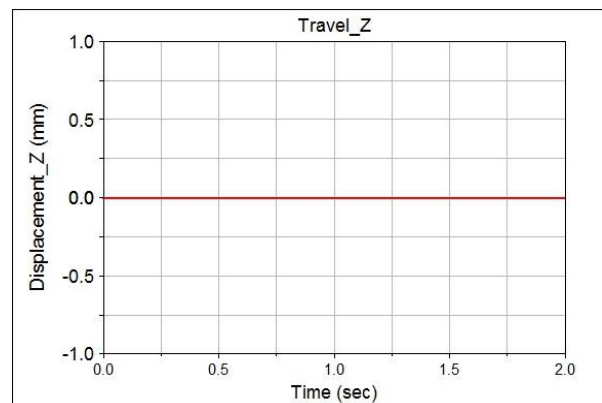
از شکل 4 همچنین برمی‌آید که بلوک در راستاهای Y و Z حرکت ندارد که مطابق با هندسه و شکل‌بندی مسأله است. با مقایسه مقدار بدست آمده برای x_{jam} با مقادیر گزارش‌شده در [5]، مشاهده می‌شود که نتیجه بدست‌آمده مطابقت تقریباً کاملی با مقدار گزارش‌شده در آن پژوهش دارد.



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 4 Simulation results obtained from Adams software for jamming-in length at block and palm case study in (a) X (b) Y , and (c) Z , directions

شکل 4 نتایج شبیه‌سازی برای طول ورود به گیر در مطالعه موردی بلوک و دست از نرم‌افزار ادمز در راستای X (الف) و Y (ب) و Z (ج)

اهرم دست نیز به تناسب آن بیشتر شده و بلوک پیمایش را تا جایی ادامه می‌دهد که به لحاظ سینماتیکی وارد محدوده گیر شود. به عبارت دیگر، سرعت زاویه‌ای اهرم (صرف نظر از جرم بلوک) همواره می‌تواند حالت لغزشی را بین بلوک و سطح زمین برقرار کند. در چنین حالتی، بلوک (با هر جرمی) حرکت لغزشی را بر روی سطح زمین انجام داده و پس از پیمایش به اندازه مشخص، درجه آزادی آن بصورت سینماتیکی از بین رفته و دچار گیر می‌شود. به این دلیل، تغییری در x_{jam} ناشی از جرم بلوک و سرعت زاویه‌ای اهرم دست مشاهده نمی‌شود.

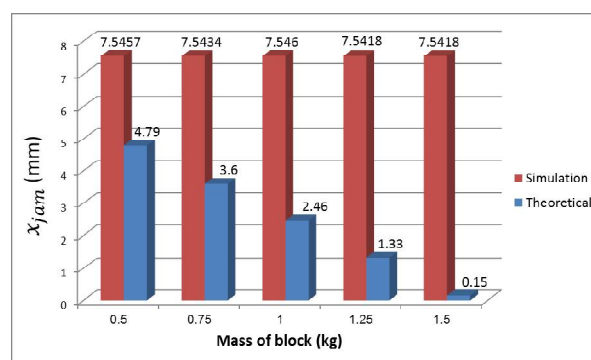
6- نتیجه گیری

در این مقاله، آنالیز تحلیلی و عددی پدیده گیر قطعه کار در قید و بند با استفاده از مطالعه موردی بلوک و دست انجام گردید. 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 می‌پرداخت. آنالیز عددی با استفاده از نرم‌افزار ادمز اجرا گردید و نتایج بدست‌آمده از آن برای طول ورود به گیر در مطالعه موردی بلوک و دست با پیش‌بینی‌های تئوری مورد قیاس قرار گرفت. با شکل‌بندی مشابه، طول پیمایش بلوک برای ورود به گیر از شبیه‌سازی برابر با 0/754 بدست آمد. این مقدار در تطابق کامل با نتایج تئوری ارائه‌شده در پژوهش‌های پیشین بود. بررسی منحنی‌های سرعت بلوک بر حسب زمان، نتیجه بر آن شد که وقوع گیر بصورت ناپیوستگی و نوسان در سرعت بلوک خودنمایی می‌کند. اولین تغییر ناگهانی در سرعت بلوک به‌عنوان معیار مناسبی برای وقوع گیر استفاده گردید. همچنین، تأثیر پارامترهای ضریب اصطکاک، جرم بلوک و سرعت زاویه‌ای اهرم بر روی طول ورود به گیر مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه بر آن شد که کاهش ضریب اصطکاک منجر به افزایش پیمایش بلوک برای ورود به گیر می‌شود که این موضوع در تطابق کامل با نتایج تئوری پژوهش‌های پیشین بود. همچنین، مشاهده گردید که جرم بلوک و سرعت زاویه‌ای اهرم تأثیری بر روی طول ورود به گیر ندارند که نتیجه به‌ظاهر متناقض با نتایج تئوری ارائه‌شده در پژوهش‌های پیشین بود. علت این تناقض نیز که به تفاوت ماهیت آنالیز نیرویی و آنالیز سینماتیکی بر می‌گشت، مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه بر آن شد که در محاسبات تئوری، برای مطالعه اثرات جرم بلوک و نیروی وارده از اهرم به بلوک، به ترتیب نیروی وارده و جرم بلوک ثابت فرض شده بود. حال آنکه، در آنالیز سینماتیکی،

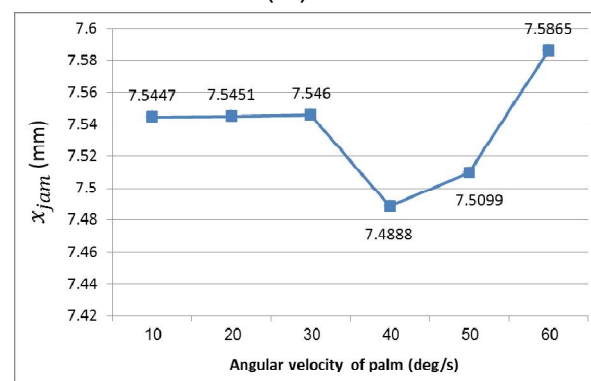
محاسبه مقادیر نیروهای عکس‌العمل، به پیش‌بینی وقوع گیر می‌پردازد. در تحلیل ارائه‌شده برای بررسی اثر جرم بلوک، مقدار نیروی وارده ثابت فرض شده است. واضح است که با ثابت نگهداشتن نیرو و افزایش جرم بلوک، مقدار حرکت بلوک برای ورود به گیر کاهش می‌یابد. همچنین، در محاسبه اثر نیروی وارده بر x_{jam} مقدار جرم بلوک ثابت فرض شده است.

در این موضوع نیز می‌توان به آسانی ابراز نمود که افزایش نیروی وارده با ثابت نگهداشتن جرم بلوک منجر به افزایش پیمایش بلوک جهت ورود به گیر خواهد شد.

از سوی دیگر، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پارامترهای جرم بلوک و سرعت زاویه‌ای اهرم دست تقریباً هیچ تأثیری بر روی طول ورود به گیر ندارند. علت این تفاوت در نتیجه‌ها، به ماهیت آنالیزها برمی‌گردد. ماهیت آنالیز اجرا شده در نرم‌افزار، تحلیل سینماتیکی (بدون در نظر گرفتن نیروها) است.



(الف)



(ب)

Fig. 6 Effects of (a) mass of block, and (b) angular velocity of palm on simulation results and their comparison to the theoretical predictions

شکل 6 تأثیر پارامترهای (الف) جرم بلوک و (ب) سرعت زاویه‌ای اهرم بر روی نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن با پیش‌بینی تئوری

برای توجیه این تناقض می‌توان این‌گونه بیان نمود که در این نوع تحلیل، با افزایش جرم بلوک، نیروی وارده از طرف

International Journal of Robotics Research, Vol. 21, No. 12, pp. 1053–1066, 2002.

- [6] T. Liu, M.Y. Wang, Computation of three-dimensional rigid body dynamics with multiple unilateral contacts using time-stepping and Gauss-Seidel methods, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 19–31, 2005.
- [7] T. Liu, M.Y. Wang, K.H. Low, Non-jamming conditions in multi-contact rigid-body dynamics, *Multibody System Dynamics*, Vol. 22, No. 3, pp. 269–295, 2009.
- [8] D.M. Flickinger, J. Williams, J.C. Trinkle, Performance of a method for formulating geometrically exact complementarity constraints in multibody dynamic simulation, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-12, 2014.
- [9] H. Parvaz, M.J. Nategh, Development of an efficient method of jamming prediction for designing locating systems in computer-aided fixture design, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 86, No. 9-12, pp. 2459-2471, 2016.
- [10] Adams Team of MSC Software, *Adams tutorial kit for mechanical engineering courses*, Second Edition, pp. 110-112, MSC software, CA, USA.
- [11] S. Frimpong, M. Thiruvengadam, Contact and joint forces modeling and simulation of crawler-formation interactions, *Journal of Powder Metallurgy & Mining*, Vol. 4, No. 2, pp. 135–149, 2015.

بحث نیرویی مطرح نیست و حرکت اهرم با هر سرعت زاویه‌ای می‌تواند بلوک را (با هر جرمی) وارد محدوده لغزش کرده و وادار به پیمایش نماید تا زمانی که درجات آزادی سینماتیکی آن سلب شده و وارد محدوده گیر شود.

مطالعه تجربی وقوع گیر در مطالعه موردی بلوک و دست همراه با بررسی اثرات پارامترهای مؤثر می‌تواند به‌عنوان پیشنهاد برای ادامه پژوهش در این زمینه مطرح گردد.

7- مراجع

- [1] J.C. Trinkle, D.C. Zeng, Prediction of the quasistatic planar motion of a contacted rigid body, *IEEE Transactions on Robotics and Automation Society*, Vol. 11, No. 2, pp. 229–246, 1995.
- [2] J.S. Pang, J.C. Trinkle, G. Lo, A complementarity approach to a quasistatic multi-rigid-body contact problem, *Computational Optimization and Applications*, Vol. 5, No. 2, pp. 139–154, 1996.
- [3] P.E. Dupont, S.P. Yamajako, Jamming and wedging in constrained rigid body dynamics, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego, CA, USA, May 08-13, 1994.
- [4] J.C. Trinkle, S.L. Yeap, L. Han, When quasistatic jamming is impossible, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, MN, USA, Apr 22-28, 1996.
- [5] D.J. Balkcom, J.C. Trinkle, Computing wrench cones for planar rigid body contact tasks,