



Investigating Dynamics of the Cubesat Inside the P-Pod Considering Affecting Parameters

Arezoo Esmaeili^{1*}, Moharram Shameli² , Seyed Tohid Khandani Kuzehkonan³, Gholamreza Hashemi⁴

¹ PhD Student, Iranian Space Research Institute, Tabriz, Iran. esmaeili36@yahoo.com

² Assistant Professor, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran. (*Correspondence: m.shameli@isrc.ac.ir)

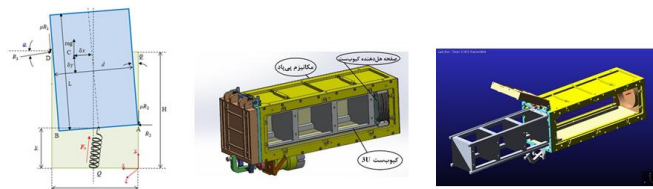
³ Assistant Professor, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran. khandani@ut.ac.ir

⁴ Master's Degree, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran. farzin.hashemi@gmail.com

HIGHLIGHTS

- Analytical modeling of dynamic of the cubesat inside P-POD
- Validation of analytical modeling by experimental test and numerical simulation
- Increasing the output linear velocity and decreasing the output angular velocity for gravity condition comparing the zero gravity condition

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 08 April 2026

Received in revised form: 27 May 2026

Accepted: 18 June 2026

Available online: 27 May 2026

*Correspondence:

m.shameli@isrc.ac.ir

Keywords:

Analytical Modeling

Cubesat

P- Pod Mechanism

Angular Velocity

Gravity Acceleration

ABSTRACT

In order to meet the requirements of cubic satellite missions, it is necessary to study and investigate the motion of the cube-sat inside the P-pod and its separation velocity. In this paper, the movement of a CubeSat inside the P-POD until the complete departure has been investigated using analytical modeling. Due to the performance of P-Pod in weightless conditions, the motion of CubeSat is studied in two conditions namely, with and without gravitational acceleration. For this purpose, the motion of the desired system is modeled using dynamic equations, and then the effect of gravity, the position of the center of mass (CG), the coefficient of friction and gap between the wall of the cube set and the P-pod on the angular velocity and the linear velocity of the 3U cube-sat has been analyzed in the direction of its motion and at the departure. Then, the P-Pod mechanism was manufactured along with the cube-set and an experimental test was conducted to validate the analytical modeling. The results show an acceptable agreement between the analytical modeling results and the experimental ones. It was observed that the increase in the deviation from the CG in the direction perpendicular to the motion, the decrease in the deviation from the CG in the direction of the cube-sat motion and the increase in the deviation from the CG to pusher plate in the direction of the cube-sat motion increase the angular velocity and decrease the output linear velocity. In addition, decreasing the friction coefficient and increasing the gap between the cube-sat wall and P-pod has led to an increase in the angular velocity and linear velocity of the cube-sat. Moreover, the gravitational acceleration results in increasing the linear velocity and decreasing the angular velocity.

Cite this article: Esmaeili A, Shameli M , Khandani Kuzehkonan S T, Hashemi Gh. Investigating Dynamics of the Cubesat Inside the P-Pod Considering Affecting Parameters. Journal of Aerospace Mechanics. 2025; 22 (2): 13-24.

DOI: <https://doi.org/10.47176/MAJ.2026.1557>

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein Comprehensive University.





بررسی دینامیک کیوبست در داخل پی‌پاد با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر آن

آرزو اسماعیلی^۱، محرم شاملی^{۲*}، سید توحید خندانی کوزه‌کنان^۳، غلامرضا هاشمی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران. esmaeili36@yahoo.com

^۲ استادیار، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران. (نویسنده مسئول): m.shameli@isrc.ac.ir

^۳ استادیار، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران. khandani@ut.ac.ir

^۴ کارشناسی ارشد، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران. farzin.hashemi@gmail.com

برجسته‌ها

- مدل‌سازی تحلیلی حرکت دینامیکی کیوبست در داخل پی‌پاد
- صحنه‌سنجی مدل‌سازی تحلیلی با آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی
- افزایش سرعت خطی خروجی و کاهش سرعت زاویه‌ای خروجی باوجود شتاب گرانش نسبت به حالت بدون گرانش

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۹ فروردین ۱۴۰۵

بازنگری: ۰۶ خرداد ۱۴۰۵

پذیرش: ۲۸ خرداد ۱۴۰۵

ارائه آنلاین: ۱۳ تیر ۱۴۰۵

*نویسنده مسئول:

m.shameli@isrc.ac.ir

کلید واژه‌ها:

مدل‌سازی تحلیلی

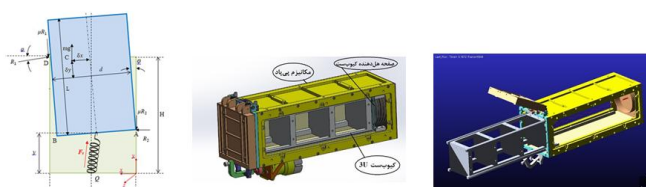
کیوبست

مکانیزم پی‌پاد

سرعت زاویه‌ای

شتاب گرانش

چکیده گرافیکی



چکیده

برای برآورده کردن الزامات مأموریت‌های ماهواره‌های مکعبی لازم است حرکت کیوبست داخل پی‌پاد و سرعت جدایش آن مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. در این مقاله حرکت کیوبست در داخل پی‌پاد تا لحظه خروج کامل با استفاده از مدل‌سازی تحلیلی بررسی شده است. به دلیل عملکرد پی‌پاد در شرایط بی‌وزنی، حرکت کیوبست در دو حالت با و بدون شتاب گرانش مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور حرکت سیستم مورد نظر با استفاده از معادلات دینامیکی مدل‌سازی شده و در ادامه تأثیر گرانش، موقعیت خروج از مرکز جرم (CG)، ضریب اصطکاک و لقی بین دیواره کیوبست و پی‌پاد بر روی سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی کیوبست U3 در راستای حرکت آن و در لحظه خروج بررسی شده است. سپس مکانیزم پی‌پاد به همراه نمونه کیوبست ساخته شده و آزمون تجربی برای صحنه‌سنجی مدل‌سازی تحلیلی انجام گرفته است. نتایج نشان‌دهنده تطابق قابل قبول مدل‌سازی تحلیلی و آزمون تجربی است. مشاهده می‌شود که افزایش خروج از مرکزیت CG در راستای عمود بر حرکت و کاهش خروج از مرکزیت CG در راستای حرکت کیوبست و افزایش خروج از مرکزیت CG به سمت صفحه هل دهنده کیوبست باعث افزایش سرعت زاویه‌ای و کاهش سرعت خطی خروجی می‌شود. علاوه بر این، کاهش ضریب اصطکاک و افزایش لقی مابین دیواره کیوبست و پی‌پاد منجر به افزایش سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی خروجی کیوبست شده است. همچنین وجود شتاب گرانش باعث افزایش سرعت خطی و کاهش سرعت زاویه‌ای خروجی شد.

استناد: اسماعیلی، آرزو، شاملی، محرم^۱، خندانی کوزه‌کنان، سید توحید، هاشمی، غلامرضا. بررسی دینامیک کیوبست در داخل پی‌پاد با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر آن. مکانیک هوا فضا. (۱۴۰۵)؛ ۲۲ (۲): ۲۴-۱۳.

<https://doi.org/10.47176/MAJ.2026.1557>

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).



1- مقدمه

کیوبست‌ها یا ماهواره‌های مکعبی یکی از انواع پیکو ماهواره‌ها هستند که با جرم نسبی کم در مقایسه با سایر انواع ماهواره‌ها قابلیت استفاده به صورت محموله جانبی در مأموریت‌های پرتاب را دارند. هزینه و زمان آماده‌سازی پایین و قابلیت بالای ایجاد منظومه ماهواره‌ای از جمله مزیت‌های اصلی این نوع از ماهواره‌ها هستند. کیوبست‌ها همانند سایر ماهواره‌ها جهت قرارگیری در موقعیت مداری مناسب، نیاز به پرتابگر دارند. عموماً به دلیل جرم کم، کیوبست‌ها به عنوان مأموریت جانبی در پرتاب‌ها در نظر گرفته می‌شوند؛ بنابراین جهت نگهداری ایمن از کیوبست در پرتاب و تزریق مداری در موقعیت مناسب، نیازمند استفاده از تجهیز دیگری هستند. این تجهیز با نام پی‌پاد یا سیستم توزیع مداری پیکو ماهواره‌ها^۱ شناخته می‌شود.

همانند سایر تجهیزات فضایی، پی‌پادها نیز نیازمند طراحی و ساخت دقیق هستند تا بتوانند عملکرد مناسب در راستای اجرای مأموریت محوله داشته باشند؛ بنابراین طبق استانداردهای مختلف فضایی، لازم است عملکرد مناسب این تجهیز در آزمایشگاه و محیط مربوطه آزموده شده تا اطمینان کامل از عملکرد آن حاصل شود.

به دلیل اقبال روزافزون به استفاده از ماهواره‌های مکعبی و مزایای پرشمار آنها، تحقیقات گسترده‌ای در ارتباط با این نوع از ماهواره‌ها انجام شده و می‌شود [1-3]. ساختار کیوبست‌ها، کاربرد آنها، نحوه ارتباط با مرکز و یکدیگر، پرتاب‌کننده و پی‌پادها و دینامیک پرتابی آنها و همچنین رفتار دینامیکی پی‌پادها قبل، حین و بعد از پرتاب از جمله مهم‌ترین مباحث مطروح بوده که با مرور ادبیات فن مشاهده می‌گردد. علاوه بر این رفتار ارتعاشی بر عملکرد ماهواره‌ها و پی‌پادها تأثیرگذار است که با استفاده از ایزولاتور مابین پی‌پاد و پرتابگر می‌توان این رفتار ارتعاشی را کنترل کرد [4 و 5].

صفرآبادی و همکاران [6] تأثیر خواص مودال یک ماهواره مکعبی کوچک بر بارهای استاتیکی معادل (ناشی از ترکیب بارهای شبه‌استاتیکی و دینامیکی در زمان پرتاب) مورد بررسی قرار دادند. همچنین روستا و همکاران [7] امکان کاهش جرم سازه یک میکرو ماهواره مکعبی دوطبقه با سازه قاب و پوسته را مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند با تغییر طراحی سازه از ایزوگرید به سازه ساندویچی و بهینه‌کردن خواص سازه جدید، جرم به طور قابل توجهی کاهش یافته و خواص مودال سازه بهبود می‌یابد.

در میحث دینامیک رهاسازی کیوبست‌ها که کار حاضر نیز در این زمینه است، می‌توان به تحقیق نیسون و همکاران [8] اشاره نمود که پس از معرفی کیوبست‌ها به بررسی یک پی‌پاد

استاندارد همراه با تغییرات بالقوه‌ای که نیازهای مختلف مأموریت‌های گوناگون را برآورده می‌کند، پرداختند.

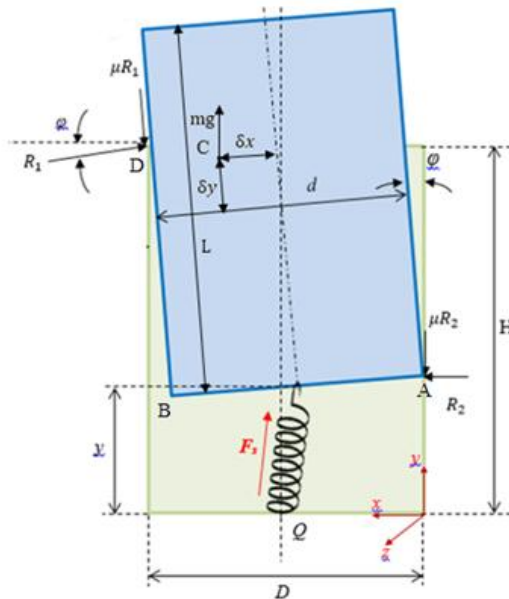
هیلر [9] در کار خود طراحی یک مکانیزم جدایش کیوبست را به طور کامل شرح می‌دهد. در این تحقیق ابتدا محدوده و الزامات پروژه بیان شده و در ادامه چندین رویکرد برای برآورده کردن این الزامات و بررسی بیشتر در مورد محاسبات و تجزیه و تحلیل و روش‌های تست مکانیزم مورد بحث قرار می‌گیرد. گو و همکاران [10] در سال 2019 با استفاده از مدل‌های یک درجه آزادی و سه درجه آزادی، فرایند دینامیک رهاسازی کیوبست برای مراحل مختلف توزیع را توصیف نموده و سرعت زاویه‌ای جداسازی اولیه را تخمین زدند. در طول پرتاب، نیروهای دینامیکی زیادی بر کیوبست‌ها اعمال می‌شود. پی‌پاد نقش مهمی را به عنوان رابط بین پرتاب‌کننده و کیوبست ایفا کرده و از کیوبست در برابر نیروهای دینامیکی در حین پرتاب حفاظت می‌کند. ارشد و همکاران [11] در مطالعه خود، یک پی‌پاد را مدل نموده و با استفاده از روش اجزای محدود، ارزیابی بارگذاری دینامیکی و استاتیکی روی ساختار آن را انجام دادند. همچنین پی‌پاد از نظر نواحی تمرکز تنش و فرکانس‌های مودال بررسی شده و بهبودهایی برای آن پیشنهاد می‌شود.

علاوه بر این بار سوم به همراه همکاران خود [12] عملکرد استاتیکی و دینامیکی سازه پی‌پاد را در طول مرحله پرتاب با در نظر داشتن محدودیت‌های اعمال شده بر آن، بررسی نمودند. بدین منظور پاسخ استاتیکی سازه با استفاده از روش اجزای محدود در برابر بارهای شبه‌استاتیکی و تصادفی در هر یک از سه جهت پرواز به طور جداگانه بررسی شد. همچنین انطباق فرکانس‌های طبیعی طولی و جانبی سازه با الزامات پرتابگر و تحلیل عمر خستگی در این کار انجام گرفت. در مبحث بهینه‌سازی مکانیزم رهاسازی کیوبست‌ها می‌توان به کارهای ژانگ و همکاران [13] و لیو و همکاران [14] اشاره نمود. در کار اول برای رهاسازی بدون تداخل و برآورده کردن الزامات اولیه مداری، طراحی فرایند رهاسازی و بهینه‌سازی پارامترها انجام شده است. لیو نیز در مقاله خود، یک روش جدید برای بهینه‌سازی پارامترهای مکانیزم پی‌پاد به نام روش بهینه‌سازی حداقل گشتاور خارجی معرفی کردند.

از کارهای دارای نوآوری نیز می‌توان از تحقیق یو و همکاران [15] نام برد که برای رهاسازی چندین کیوبست قرارداد شده در یک پی‌پاد به صورت کنترل شده، یک طراحی مبتنی بر فنر آلایژ حافظه‌دار ارائه کردند تا ماهواره‌های متفاوت با سرعت جداسازی یکسان از طریق فنرهای ترکیبی در مدار تزریق شوند. اجزای کلیدی پی‌پاد بهینه شده و ویژگی‌های سینماتیک آن با کمک شبیه‌سازی و تحلیل سینماتیک به دست آمده و نتایج آزمون، عملی بودن طرح و صحت شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

¹Poly-Picosatellite Orbital Deployer

$$\begin{aligned}
 & -(R_2 \cos \varphi + \mu R_2 \sin \varphi) \left(\frac{L}{2} + \delta y \right) \\
 & - (R_2 \sin \varphi + \mu R_2 \cos \varphi) \left(\frac{d}{2} + \delta x \right) + F_s \cos(\alpha + \varphi) \delta x \\
 & + F_s \sin(\alpha + \varphi) \left(\frac{L}{2} + \delta y \right) \\
 & + \mu R_1 \left(\frac{d}{2} - \delta x \right) \\
 & - R_1 \left(BD - \frac{L}{2} - \delta y \right) = J \ddot{\varphi}
 \end{aligned} \quad (6)$$



شکل ۱: دیاگرام آزاد نیروهای وارده بر کیوبست در داخل پی‌پاد

به‌طوری که R_1 و R_2 نیروهای تکیه‌گاهی وارد بر دیواره کیوبست از طرف پی‌پاد، φ زاویه دیواره کیوبست با دیواره پی‌پاد، نیروی F_s وارده بر انتهای کیوبست از طرف فنر، α زاویه نیروی فنر با خط قائم، m جرم کیوبست، L طول کیوبست، d عرض سطح مقطع کیوبست، μ ضریب اصطکاک بین دیواره کیوبست و پی‌پاد، J ممان اینرسی جرمی کیوبست، δx خروج از مرکز CG در راستای x و δy خروج از مرکز CG در راستای y است. همچنین معادلات قید برای سیستم مطابق روابط (7) و (8) است.

$$x_A = 0 \quad (7)$$

$$BD \sin \varphi + d \cos \varphi = D \quad (8)$$

لازم به ذکر است که در رابطه (8) بیانگر عرض پی‌پاد است. در تحلیل دینامیکی دوبعدی استفاده از سه درجه آزادی برای تحلیل حرکت سیستم کافی است. در این تحلیل به دلیل وجود دو قید مابین درجات آزادی (برخورد کیوبست با دیواره‌های پی‌پاد)، درجه آزادی سیستم از سه درجه آزادی (زاویه مابین کیوبست و دیواره پی‌پاد و مختصات حرکت مرکز جرم کیوبست در راستای طولی و عرضی پی‌پاد) به یک درجه آزادی کاهش پیدا می‌کند.

وادیم یودنسیو [16] نیز معادلات حرکت کیوبست در داخل پی‌پاد را به‌صورت دینامیکی بدون در نظر گرفتن اصطکاک و گرانث، مدل‌سازی کرده و پارامترهای مؤثر بر حرکت آن را بررسی کرده است.

علاوه بر این لیم و همکاران [17] در مورد چالش ناسازگاری سیستم‌های توزیع‌کننده ریلی و زبانه‌ای مطالعه کردند. آنها یک توزیع‌کننده ماهواره مکعبی دو منظور را توسعه دادند که بتواند هر دو پیکربندی ریلی و زبانه‌ای ماهواره را در خود جای دهد. یانگ خو و همکاران [18] نیز یک توزیع‌کننده نوآورانه با مکانیزم باز کردن درب الکترومغناطیسی دوگانه طراحی کردند. این مکانیزم مزایای ساختار ساده، زمان پاسخ کوتاه، هزینه کم و قابلیت اطمینان بالا را دارد.

در این مقاله بررسی تحلیلی حرکت یک کیوبست 3U در داخل پی‌پاد از طریق معادلات دینامیکی انجام گرفته است. در ادامه با انجام آزمون‌های تجربی بر روی مکانیزم پی‌پاد و نمونه کیوبست ساخته شده، نتایج به‌دست‌آمده صحت‌سنجی می‌شود. لازم به ذکر است که آزمون‌های تجربی در شرایط وجود شتاب گرانث انجام می‌شوند. با توجه به عملکرد پی‌پاد در شرایط بی‌وزنی، باید اثر نیروی گرانث از نتایج حذف شده تا تخمین مناسبی در وضعیت بی‌وزنی به دست آید. بدین منظور اثر شتاب گرانث بر سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای خروجی کیوبست بررسی می‌شود. بررسی اثر گرانث و خروج از مرکز جرم بر روی سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای کیوبست در لحظه خروج کیوبست از پی‌پاد، از نوآوری‌های این مقاله است. همچنین اثر ضریب اصطکاک و لقی بین کیوبست و پی‌پاد بر سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی خروجی بررسی می‌شود.

2- معادلات دینامیکی حرکت کیوبست در داخل پی‌پاد

در این قسمت حرکت کیوبست در داخل مکانیزم پی‌پاد با استفاده از معادلات دینامیک خطی مدل‌سازی می‌شود. شکل (1) دیاگرام آزاد نیروهای وارده بر کیوبست در داخل پی‌پاد را نشان می‌دهد.

معادلات تعادل حرکت با استفاده از نیروهای وارده بر کیوبست در جهات x، y و حول محور z به‌صورت روابط (1) الی (3) است.

$$\Sigma F_x = m \ddot{x}_c \quad (1)$$

$$\Sigma F_y = m \ddot{y}_c \quad (2)$$

$$\Sigma M_c = J \ddot{\varphi} \quad (3)$$

با جای‌گذاری نیروها و گشتاورهای مربوط در روابط (1) الی (3)، روابط (4) الی (6) به دست می‌آیند:

$$R_2 - R_1 \cos \varphi - \mu R_1 \sin \varphi - F_s \sin \alpha = m \ddot{x}_c \quad (4)$$

$$mg + F_s \cos \alpha + R_1 \sin \varphi - \mu R_1 \cos \varphi - \mu R_2 = m \ddot{y}_c \quad (5)$$

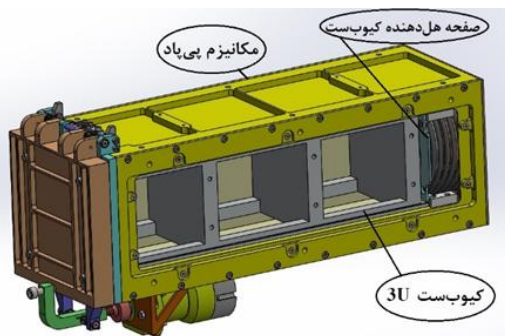
3- صحنه‌سنجی مدل‌سازی تحلیلی با استفاده از آزمون تجربی

در این قسمت مدل‌سازی تحلیلی انجام گرفته توسط آزمون تجربی صحنه‌سنجی می‌شود. بدین منظور مجموعه پی‌پاد و نمونه کیوبست با مشخصات جدول (1) ساخته شده و مورد آزمون قرار می‌گیرد.

لازم به ذکر است که خروج از مرکز در نمونه کیوبست ساخته شده برابر صفر است. شکل (2) شماتیک مکانیزم پی‌پاد را نشان می‌دهد.

جدول 1: مشخصات هندسی مجموعه مکانیزم پی‌پاد و کیوبست

واحد	مقادیر پارامترهای فیزیکی	پارامترهای فیزیکی سیستم
m	0/1	عرض ریل کیوبست
m	0/3	طول کیوبست
Kg	2	جرم کیوبست
m	0/1005	عرض ریل پی‌پاد
m	0/329	طول پی‌پاد
m	0.120	عرض پی‌پاد
m	0.2	ارتفاع پی‌پاد
Kg	3.5	جرم پی‌پاد
m	0/540	طول فشردگی اولیه فنر
N/m	170	سفتی فنر پی‌پاد



شکل 2: شماتیک مکانیزم پی‌پاد

برای انجام آزمون تجربی، مجموعه مونتاژی مکانیزم پی‌پاد بر روی تجهیزات آزمون نصب شده، برچسب‌های هدف برای رصد دقیق حرکت و واکنش پی‌پاد و محموله، چسبانده شده و با قراردادن کیوبست در داخل محفظه پاد، فنر داخلی مجموعه فشرده می‌شود. پین پولر و قطعات نگهدارنده درب، وظیفه بسته نگه‌داشتن درب را بر عهده دارند. با اعمال جریان با ولتاژ تعیین شده، پین پولر عمل کرده و با رهاشدن درب، محموله به کمک نیروی فنر داخلی به بیرون پرتاب می‌گردد. فرایند تست توسط

با استفاده از سه معادله حرکتی روابط (4) الی (6) و معادلات قید (7) و (8) و استفاده از روش حل رانگ کوتای مرتبه 4، درجه آزادی سیستم تعیین می‌شود. در ادامه حرکت به دلیل غالب بودن حرکت خطی بر حرکت دورانی، نیروی وارده از طرف یک دیواره پی‌پاد صفر شده و در نتیجه کیوبست از این دیواره جدا می‌شود. در این حالت سیستم دینامیکی یک سیستم دو درجه آزادی بوده و معادلات حرکت به صورت معادلات (9) الی (11) است.

$$R_2 - F_s \sin \alpha = m\ddot{x}_c \quad (9)$$

$$mg + F_s \cos \alpha - \mu R_2 = m\ddot{y}_c \quad (10)$$

$$-(R_2 \cos \varphi + \mu R_2 \sin \varphi) \left(\frac{L}{2} + \delta y \right) - (R_2 \sin \varphi + \mu R_2 \cos \varphi) \left(\frac{d}{2} + \delta x \right) + F_s \cos(\alpha + \varphi) \delta x + F_s \sin(\alpha + \varphi) \left(\frac{L}{2} + \delta y \right) = J\ddot{\varphi} \quad (11)$$

$$-(R_2 \sin \varphi + \mu R_2 \cos \varphi) \left(\frac{d}{2} + \delta x \right) + F_s \cos(\alpha + \varphi) \delta x + F_s \sin(\alpha + \varphi) \left(\frac{L}{2} + \delta y \right) = J\ddot{\varphi}$$

در این حالت معادله قید مربوط به یک دیواره نیز به صورت رابطه (12) است.

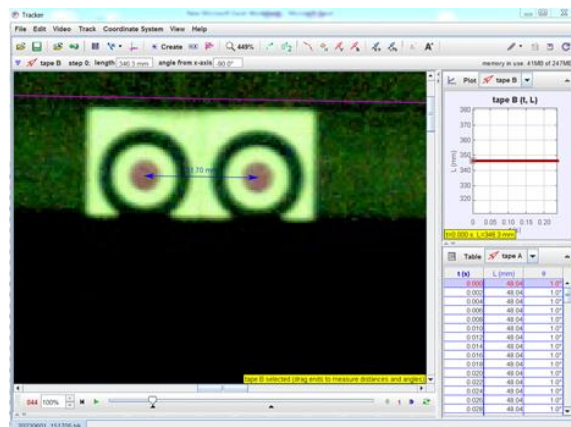
$$x_A = 0 \quad (12)$$

برای حل این دسته از معادلات نیز از روش رانگ کوتای مرتبه 4 استفاده شده است. لازم به ذکر است صفحه متصل به فنر در نزدیکی انتهای حرکت متوقف شده و نیروی فنر از این قسمت تا خروج کامل کیوبست صفر در نظر گرفته می‌شود. در واقعیت نیروی فنر از طریق صفحه هل دهنده کیوبست نشان داده شده در شکل 2 به صورت نیروی توزیع شده اعمال می‌شود. همچنین این نیرو می‌تواند تحت تأثیر شتاب‌های دینامیکی و گرایان جاذبه (هر چند ضعیف در جاذبه پایین) جابه‌جا شود. باین حال در این مقاله به دلیل ساده‌سازی تحلیل دوبعدی، نقطه اثر نیروی فنر به صورت متمرکز فرض شده است.

می‌توان گفت که مدل‌سازی دینامیکی با استفاده از مدل دوبعدی نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد؛ اما باین حال در نظر گرفتن دینامیک کیوبست به صورت سه‌بعدی و افزایش درجات آزادی باعث کاهش خطای نتایج به دست آمده شده و مدل‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود؛ اما پیچیدگی مدل و زمان محاسبات نیز بالاتر می‌رود. علاوه بر این اثرات حرکت مداری به دلیل سرعت خروج پایین نسبت به سرعت مداری ناچیز فرض شده است. به بیان دیگر شبیه‌سازی انجام گرفته در این مقاله معادل حرکت نسبی کیوبست به پی‌پاد است.

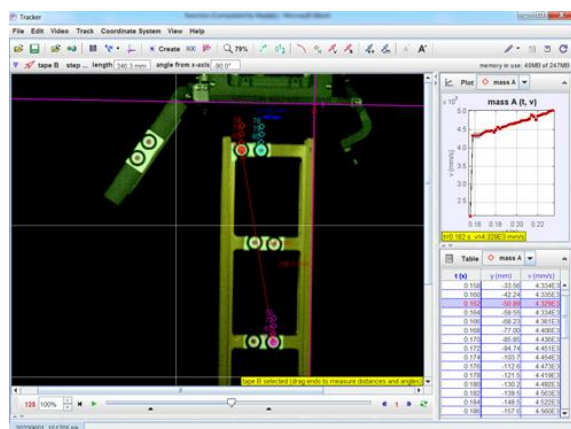
در ادامه با حل معادلات دینامیکی، سرعت زاویه‌ای خروجی و سرعت خطی خروجی مرکز جرم به دست آمده و تأثیر شتاب گرانش، خروج از مرکز جرم کیوبست و اصطکاک و لقی بین کیوبست و پی‌پاد بر روی سرعت خطی و سرعت دورانی کیوبست بررسی می‌شود.

روی کیوبست که دارای فاصله مرکز به مرکز $21/7 \text{ mm}$ هستند، استفاده می‌شود. این مرحله در شکل (4) نشان داده شده است.



شکل 4: کالیبراسیون ابعادی فیلم آزمون

در ادامه تارگت یا تارگت‌های متعدد نصب شده روی کیوبست توسط نرم افزار انتخاب شده و سرعت این نقاط بر حسب زمان توسط نرم افزار محاسبه می‌شود. این نقاط و سرعت آن‌ها در شکل (5) نشان داده شده است.



شکل 5: انتخاب تارگت‌ها در فریم‌های متوالی و اندازه‌گیری سرعت نشان داده شده در نمودارها

نتایج آزمون تجربی و مدل‌سازی تحلیلی سرعت خطی کیوبست در حضور شتاب گرانش در جدول (2) نشان داده شده است. لازم به ذکر است، نتایج آزمون تجربی میانگین چندین مرتبه تکرار آزمون است. همچنین در محاسبات مربوط به مدل‌سازی تحلیلی ضریب اصطکاک بین دیواره کیوبست و پی‌پاد $0/7$ در نظر گرفته شد [19]. لازم به ذکر است تغییرات ضریب اصطکاک با سرعت لغزشی و نیروی نرمال در مسئله مورد بررسی محدود بوده و برای جلوگیری از پیچیده شدن مدل‌سازی ارائه شده، این ضریب ثابت در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف نسبی سرعت خطی تجربی و سرعت خطی تحلیلی در حدود 13 درصد است. با حذف اثر گرانش با استفاده از معادلات دینامیکی حرکت، سرعت رهپایش

دوربین سرعت بالا تصویربرداری شده و به کمک نرم افزار Tracker تصاویر ضبط شده تحلیل گردیده و مقادیر سرعت، شتاب و نرخ انحراف به دست می‌آید. لازم به ذکر است نتایج به دست آمده تا این مرحله برای وضعیتی است که شتاب گرانش وجود دارد. نمایی از آزمون تجربی مکانیزم پی‌پاد و کیوبست در شکل (3) نشان داده شده است.



(1)



(2)



(3)

شکل 3: آزمون تجربی مکانیزم پی‌پاد و کیوبست

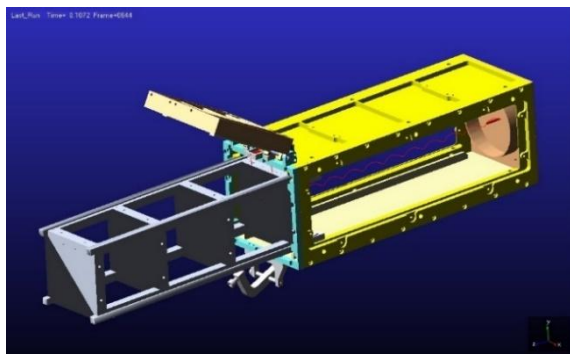
1-3- سرعت جدایش کیوبست

جهت اندازه‌گیری سرعت جدایش لازم است تا فیلم‌های تهیه شده از آزمون مورد تحلیل قرار گیرد. برای این کار از نرم افزار Tracker استفاده می‌شود. در مرحله اول لازم است ابتدا فیلم‌های تهیه شده از منظر سرعت فیلم‌برداری و ابعادی کالیبره شوند. سرعت فیلم‌برداری توسط گزینه مناسب به نرم افزار معرفی شده و جهت کالیبراسیون ابعادی تصاویر، از تارگت‌های نصب شده

مشاهده می‌شود اختلاف سرعت زاویه‌ای تحلیلی با سرعت زاویه‌ای تجربی در حدود 16 درصد است. با حذف اثر گرانش در مدل‌سازی تحلیلی، سرعت زاویه‌ای برابر $5/67 \text{ deg/s}$ حاصل می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود وجود شتاب گرانش منجر به کاهش حدود 6 درصد سرعت زاویه‌ای شده است. باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود نتایج مدل‌سازی تحلیلی باتوجه‌به فرضیات و منابع مختلف خطا تطابق قابل‌قبولی با نتایج آزمون تجربی دارد.

4- شبیه‌سازی دینامیکی حرکت کیوبست در داخل پی‌پاد

در این قسمت شبیه‌سازی کامل تزریق کیوبست در مدار و حرکت دینامیکی رهایش در و خروج ماهواره از پاد توسط نرم‌افزار تحلیل دینامیکی ADAMS انجام شده است. در شکل (7) نمای کلی مدل پی‌پاد و کیوبست نشان‌داده‌شده است.



شکل 7: نمای کلی مدل پی‌پاد و کیوبست

برای شبیه‌سازی سینماتیکی پی‌پاد و کیوبست، قيود بین قطعات در نرم‌افزار اعمال شده و سپس جنس قطعات بر اساس جرم و مشخصات فیزیکی آنها اعمال می‌شود. در گام بعدی مشخصات فنر اصلی و فنرهای لولها بر اساس طراحی انجام شده، اضافه می‌شوند. با اعمال نیرو به سیم SMA موجود در داخل مجموعه پین - پولر که به‌عنوان مکانیزم رهایش در، وظیفه باز نمودن آن را بر عهده دارد، در رها شده و نیروی فشاری ناشی از فشردگی فنر اصلی به ماهواره منتقل شده و باعث هدایت ماهواره به بیرون از پاد و تزریق در مدار می‌شود. نمودار سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی کیوبست با تغییرات زمان در شکل (8) نشان‌داده‌شده است. لازم به ذکر است شرایط شبیه‌سازی مشابه شرایط آزمون تجربی است.

کیوبست طبق شبیه‌سازی انجام شده در مدت زمان $0/1 \text{ s}$ به طور کامل از پی‌پاد خارج شده و در مدار تزریق می‌شود. باتوجه‌به شکل (8) مشاهده می‌شود که سرعت زاویه‌ای کیوبست در لحظه خروج از پی‌پاد برابر با 6 deg/s و سرعت خطی آن در این لحظه برابر با 5 m/s است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج

برابر $4/22 \text{ m/s}$ حاصل می‌شود. مشاهده می‌شود با حضور شتاب گرانشی سرعت خطی در حدود 15 درصد افزایش پیدا کرده است.

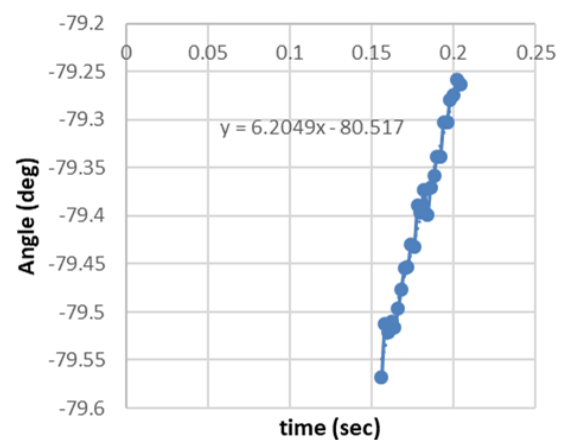
جدول 2: نتایج آزمون تجربی و مدل‌سازی تحلیلی سرعت خطی کیوبست در حضور شتاب گرانش

واحد	آزمون تجربی	مدل‌سازی تحلیلی	
m/s	4/3	4/85	سرعت خطی
13/4%			خطای نسبی

2-3- نرخ انحراف

برای اندازه‌گیری نرخ انحراف بین تارگت‌های ایجاد شده در مرحله قبل خطوط یا نوارهایی در نرم‌افزار ایجاد شد. زاویه این نوارها با خط افق تصویر که ثابت است، باگذشت زمان تغییر کرده و شیب این تغییرات برابر نرخ انحراف است.

برای تعیین نرخ انحراف در راستای Z نوار بین تارگت‌های قرمز و بنفش (شکل (5)) در نرم‌افزار ایجاد شده و زاویه این نوار با سطح افق تصویر پایش می‌شود. شیب تغییرات این زاویه باگذشت زمان نرخ انحراف در این راستا است. زاویه بین این نوار و خط افق برحسب زمان در شکل (6) نشان‌داده‌شده است.



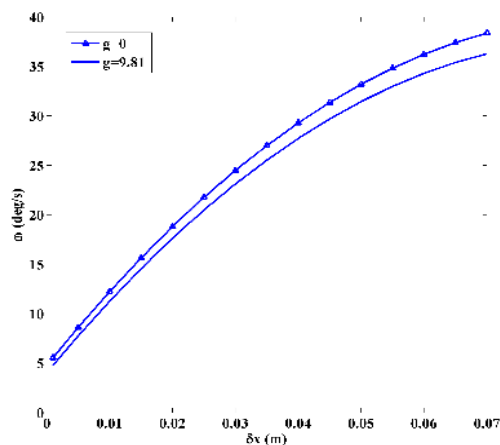
شکل 6: زاویه بین نوار D و خط افق

جدول (3) نتایج آزمون تجربی و مدل‌سازی تحلیلی برای سرعت زاویه‌ای خروجی کیوبست در حضور شتاب گرانشی را نشان می‌دهد. داده‌های آزمون تجربی همچون سرعت خطی به‌صورت میانگین محاسبه شده است.

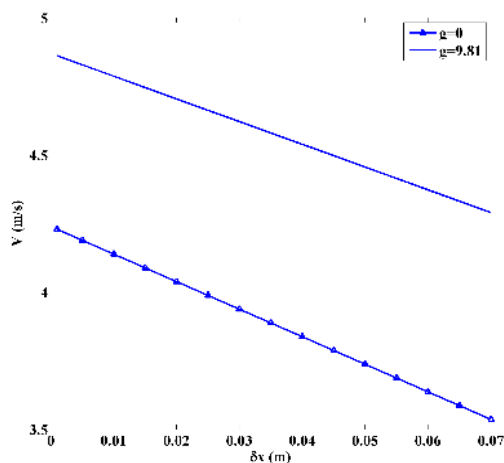
جدول 3: نتایج آزمون تجربی و مدل‌سازی تحلیلی سرعت زاویه‌ای کیوبست در حضور شتاب گرانش

واحد	آزمون تجربی	مدل‌سازی تحلیلی	
deg/s	6/2	5/34	سرعت زاویه‌ای
16%			خطای نسبی

است. همچنین نرخ این افزایش سرعت با افزایش مقدار خروج از مرکز کاهش می‌یابد. علاوه بر این افزایش خروج از مرکز، سرعت خطی خروجی را کاهش داده است. با اینکه این کاهش سرعت به صورت خطی اتفاق می‌افتد؛ اما تغییر قابل ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود. می‌توان گفت با افزایش خروج از مرکز در راستای x حرکت دورانی کیوبست غالب بر حرکت خطی شده و بدین ترتیب افزایش سرعت دورانی منجر به کاهش سرعت خطی می‌شود. همچنین وجود شتاب گرانش باعث افزایش شتاب در راستای حرکت شده و این عامل باعث افزایش سرعت خطی خروجی و کاهش سرعت زاویه‌ای خروجی شده است. با افزایش خروج از مرکزیت مرکز جرم در راستای x ، کاهش سرعت زاویه‌ای نسبت به حالت بدون شتاب گرانش افزایش یافته درحالی‌که افزایش سرعت خطی خروجی نسبت به حالت بدون شتاب گرانش تقریباً ثابت و در حدود ۱۵ درصد است.



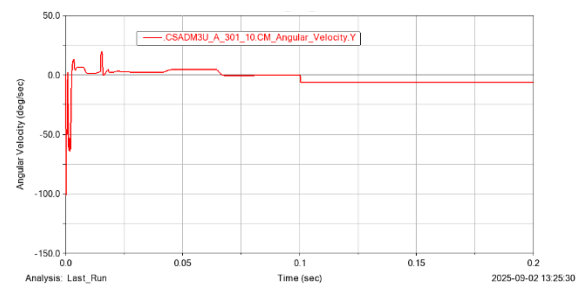
(الف)



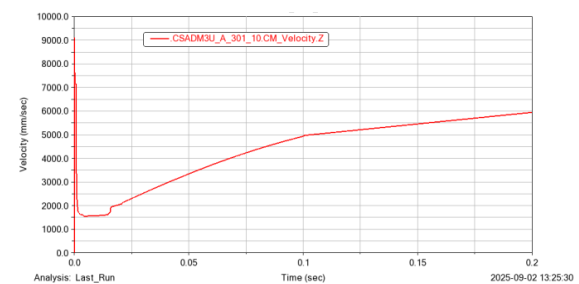
(ب)

شکل ۹: الف- تغییرات سرعت زاویه‌ای خروجی کیوبست، ب- تغییرات سرعت خطی خروجی کیوبست در مقابل تغییرات خروج از مرکزیت مرکز جرم در راستای x در حالت با و بدون وجود شتاب گرانشی

مدلسازی تحلیلی بیانگر خطای در حدود ۱۲ درصد برای سرعت زاویه‌ای و ۳ درصد برای سرعت خطی است که در محدوده قابل قبول قرار دارد.



(الف)



(ب)

شکل ۸: الف- تغییرات سرعت زاویه‌ای کیوبست در مقابل تغییرات زمان، ب- تغییرات سرعت خطی کیوبست در مقابل تغییرات زمان

۵- نتایج مدل‌سازی دینامیکی حرکت کیوبست در داخل پی‌پاد

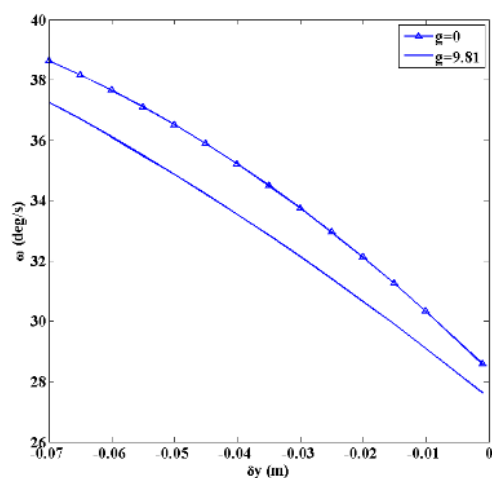
در این قسمت تأثیر وجود شتاب گرانش بر تغییرات سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای کیوبست ۳U در لحظه خروج از پی‌پاد به‌ازای تغییرات خروج از مرکز CG، تغییرات ضریب اصطکاک و لقی بین دیواره کیوبست و پی‌پاد با استفاده از مدل‌سازی تحلیلی انجام گرفته بر اساس معادلات دینامیکی حرکت بررسی می‌شود. پارامترهای فیزیکی در نظر گرفته شده برای کیوبست و پی‌پاد مطابق جدول ۱ است. در این مقاله حالت بدون گرانش به صورت شتاب گرانشی برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین ضریب اصطکاک ثابت در نظر گرفته شده است.

در ابتدا اثر شتاب گرانش و خروج از مرکز برای مرکز جرم در راستای x بر روی سرعت زاویه‌ای خروجی و سرعت خطی خروجی کیوبست بررسی می‌شود. نتایج این بررسی در شکل (۹) نشان داده شده است. در این تحلیل δy برابر ۰/۰۷ m، ضریب اصطکاک برابر ۰/۷ و لقی بین دیواره پی‌پاد و کیوبست ۰/۰۰۰۵ m در نظر گرفته شده است.

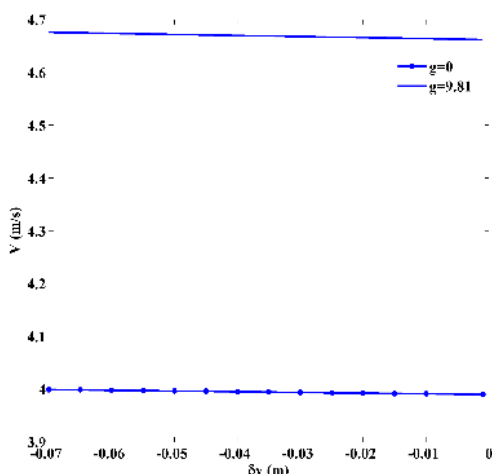
همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش خروج از مرکزیت مرکز جرم در راستای x باعث افزایش سرعت زاویه‌ای خروجی به صورت غیرخطی شده است. به‌طوری‌که با افزایش خروج از مرکزیت تا ۰/۰۷ m، سرعت زاویه‌ای تا حوالی ۳۵ deg/s افزایش پیدا کرده

کرده است. لازم به ذکر است که کاهش سرعت زاویه‌ای خروجی به صورت غیرخطی و افزایش نسبی سرعت خطی خروجی تقریباً خطی است. باین حال تغییر قابل ملاحظه‌ای در نمودار سرعت خطی مشاهده نمی‌شود. در این حالت نیز مشابه حالت قبل، وجود شتاب گرانش باعث افزایش سرعت خطی خروجی و کاهش سرعت زاویه‌ای خروجی شده است.

تأثیر تغییرات خروج از مرکز CG در راستای y به سمت صفحه هل دهنده کیوبست و همچنین تأثیر شتاب گرانش بر سرعت زاویه‌ای خروجی و سرعت خطی خروجی در شکل (11) بررسی می‌شود. لازم به ذکر است δx برابر 0/02 m، ضریب اصطکاک برابر 0/7 و لقی بین دیواره پی‌پاد و کیوبست 0/0005 m نظر گرفته شده است.



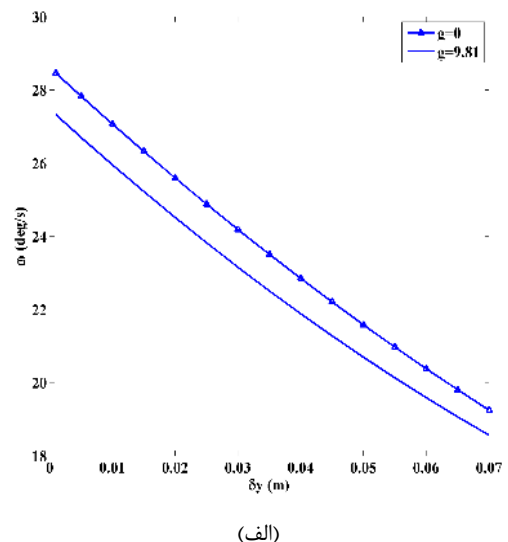
(الف)



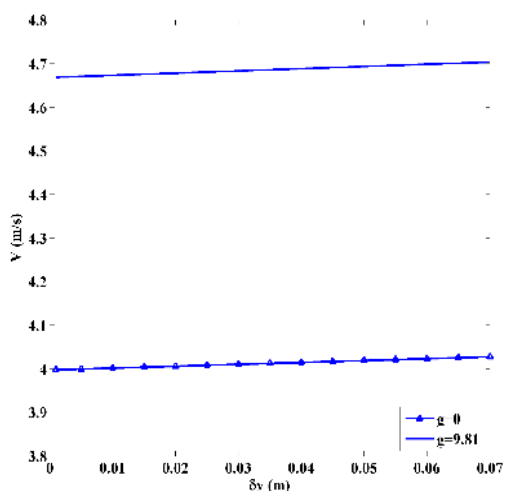
(ب)

شکل 11: الف- تغییرات سرعت زاویه‌ای خروجی کیوبست، ب- تغییرات سرعت خطی خروجی کیوبست در مقابل تغییرات خروج از مرکز CG در راستای y به سمت صفحه هل دهنده کیوبست در حالت با و بدون وجود شتاب گرانشی

در ادامه تأثیر تغییرات خروج از مرکز CG در راستای y و همچنین تأثیر شتاب گرانش بر سرعت زاویه‌ای خروجی و سرعت خطی خروجی بررسی می‌شود. این تغییرات در شکل (10) نشان داده شده است. در این تحلیل نیز δx برابر 0/02 m، ضریب اصطکاک برابر 0/7 و لقی بین دیواره پی‌پاد و کیوبست 0/0005 m در نظر گرفته شده است.



(الف)



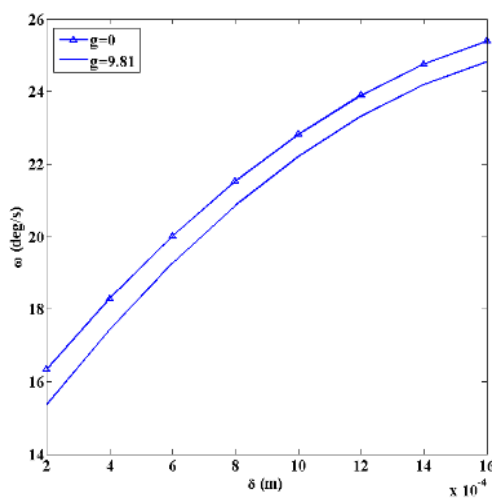
(ب)

شکل 10: الف- تغییرات سرعت زاویه‌ای خروجی کیوبست، ب- تغییرات سرعت خطی خروجی کیوبست در مقابل تغییرات خروج از مرکز CG در راستای y در حالت با و بدون وجود شتاب گرانشی

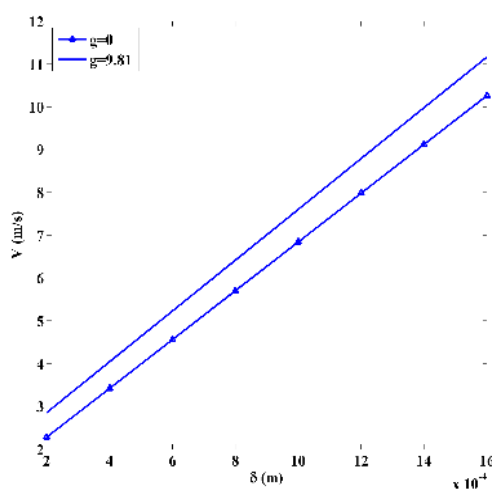
با مشاهده شکل (10) می‌توان گفت افزایش خروج از مرکز CG در راستای y باعث غالب بودن حرکت خطی بر حرکت دورانی کیوبست شده و این عامل باعث کاهش سرعت زاویه‌ای خروجی و افزایش نسبی سرعت خطی خروجی می‌شود. به طوری که در حالت وجود شتاب گرانش با افزایش خروج از مرکز تا 0/07 m، سرعت زاویه‌ای از 27 deg/s تا محدوده 19 deg/s کاهش پیدا

با مشاهده شکل (12) می‌توان گفت افزایش ضریب اصطکاک بین دیواره کیوبست و دیواره پی‌پاد تا 0/9 باعث کاهش سرعت زاویه‌ای خروجی (در دو حالت با و بدون وجود شتاب گرانش) تا 12 درصد و همچنین کاهش سرعت خطی خروجی تا محدوده 5 درصد می‌شود. همچنین وجود شتاب گرانش به علت غالب شدن حرکت خطی بر حرکت دورانی باعث افزایش سرعت خطی خروجی و کاهش سرعت دورانی خروجی می‌شود.

لقی بین دیواره کیوبست و پی‌پاد پارامتر دیگر تأثیرگذار بر سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای کیوبست است. شکل (13) تغییرات سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی خروجی کیوبست را به‌ازای تغییرات این لقی و همچنین در دو حالت باوجود شتاب گرانش و بدون وجود آن نشان می‌دهد. در این نمودار δx برابر 0/02 و δy برابر 0/07 m و ضریب اصطکاک برابر 0/7 در نظر گرفته شده است.



(الف)

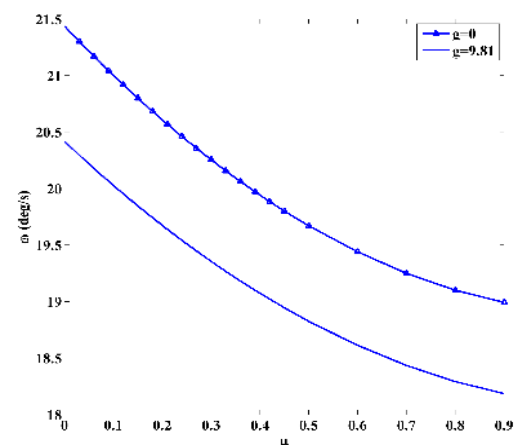


(ب)

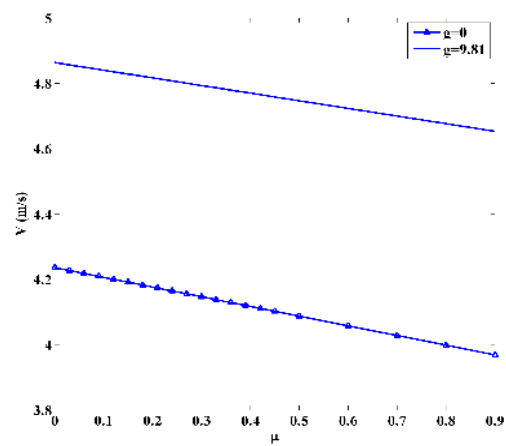
شکل 13: الف- تغییرات سرعت زاویه‌ای خروجی کیوبست، ب- تغییرات سرعت خطی خروجی کیوبست در مقابل تغییرات لقی بین دیواره کیوبست و پی‌پاد در حالت با و بدون وجود شتاب گرانشی

مشاهده می‌شود با حرکت مرکز جرم به سمت صفحه هل دهنده کیوبست، سرعت زاویه‌ای خروجی به‌صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. به‌طوری که افزایش خروج از مرکز CG تا 0/07 m حالت با شتاب گرانشی باعث افزایش سرعت زاویه‌ای خروجی از 29 deg/s تا 37 deg/s می‌شود. علاوه بر این در حالت بدون شتاب گرانشی سرعت زاویه‌ای از 28 deg/s تا 38 deg/s درجه بر ثانیه افزایش پیدا می‌کند. همچنین تغییر قابل‌ملاحظه‌ای بر روی سرعت خطی خروجی کیوبست با تغییر خروج از مرکز CG به سمت صفحه هل دهنده کیوبست مشاهده نمی‌شود. وجود شتاب گرانش نیز باعث کاهش سرعت دورانی خروجی و افزایش سرعت خطی خروجی می‌شود.

شکل (12) نیز تأثیر تغییرات ضریب اصطکاک به همراه تأثیر وجود شتاب گرانش بر سرعت زاویه‌ای خروجی و سرعت خطی خروجی کیوبست را نشان می‌دهد. در این قسمت نیز δx برابر 0/02 m، δy برابر 0/07 m و لقی بین دیواره پی‌پاد و کیوبست 0/0005 m است.



(الف)



(ب)

شکل 12: الف- تغییرات سرعت زاویه‌ای خروجی کیوبست، ب- تغییرات سرعت خطی خروجی کیوبست در مقابل تغییرات ضریب اصطکاک در حالت با و بدون وجود شتاب گرانشی

ست و راستای عمود بر آن، ضریب اصطکاک و لقی بین دیواره کیوبست و پی‌پاد بر سرعت خطی خروجی کیوبست و سرعت زاویه‌ای خروجی آن به همراه تأثیر وجود شتاب گرانش بررسی شد. مشاهده شد افزایش خروج از مرکزیت مرکز جرم در راستای عمود بر حرکت کیوبست، کاهش خروج از مرکزیت مرکز جرم در راستای حرکت کیوبست، افزایش خروج از مرکزیت مرکز جرم در راستای حرکت کیوبست به سمت صفحه هل دهنده، کاهش ضریب اصطکاک و افزایش لقی مابین دیواره کیوبست و پی‌پاد منجر به افزایش سرعت زاویه‌ای خروجی کیوبست شد. همچنین کاهش خروج از مرکزیت مرکز جرم در راستای عمود بر حرکت کیوبست، افزایش خروج از مرکزیت مرکز جرم در راستای حرکت کیوبست، کاهش ضریب اصطکاک و افزایش لقی مابین دیواره کیوبست و پی‌پاد، سرعت خطی خروجی کیوبست را افزایش داد. علاوه بر این وجود شتاب گرانش باعث افزایش شتاب در راستای حرکت شده و این عامل باعث افزایش سرعت خطی خروجی و کاهش سرعت زاویه‌ای خروجی شد.

7- فهرست علائم

d	عرض سطح مقطع کیوبست، m
F_s	نیروی وارده بر انتهای کیوبست از طرف فنر، m
J	ممان اینرسی جرمی کیوبست، Kg m^2
L	طول کیوبست، m
m	جرم کیوبست، Kg
R_1	نیروی تکیه‌گاهی وارد بر دیواره کیوبست از طرف پی-پاد، N
R_2	نیروی تکیه‌گاهی وارد بر دیواره کیوبست از طرف پی-پاد، N
α	زاویه نیروی فنر با خط قائم، rad
δx	خروج از مرکز CG در راستای x، m
δy	خروج از مرکز CG در راستای y، m
μ	ضریب اصطکاک بین دیواره کیوبست و پی‌پاد
φ	زاویه دیواره کیوبست با دیواره پی‌پاد، rad

8- مراجع

- [1] Ahangarani Farahani A, Ghasemi Estahbanati s and et all. Energy Optimization in Detumbling Mode of Cubesat Based on Genetic Algorithm. Aerospace Mechanics. 2025; 20 (4). DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1403.20.4.2.0> [In Persian]
- [2] Moradi M, Moosavian S, Daneshvar A. Orbital Dynamics Modeling, Based On Separating Orbital Elements To Control Low-Altitude Satellites. 2011; 7 (1). DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1390.7.1.4.5> [In Persian]
- [3] Salarieh H and Khalesi R, Simultaneous Attitude and Orbit Determination Using Sensor Fusion Algorithm

همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش لقی بین دیواره پی‌پاد و دیواره کیوبست منجر به افزایش سرعت زاویه‌ای خروجی کیوبست به‌صورت غیرخطی شده است. به‌طوری که با افزایش لقی تا $0/0016 \text{ m}$ ، سرعت زاویه‌ای تا محدوده 25 deg/s افزایش پیدا کرده است. همچنین افزایش لقی باعث افزایش سرعت خطی خروجی کیوبست به‌صورت خطی تا محدوده 11 m/s شده است. لازم به ذکر است در این حالت نیز وجود شتاب گرانشی باعث کاهش سرعت زاویه‌ای و افزایش سرعت خطی شده است. در ریز گرانش شتاب گرانشی بسیار نزدیک به صفر است، اما به دلیل وجود جاذبه‌های کوچک (مثل جاذبه زمین یا اجسام دیگر) کاملاً صفر نمی‌شود. مسلماً این مسئله بر دینامیک سیستم تأثیرگذار است، اما با بررسی تأثیر وجود ریز گرانش بر سیستم برای یک حالت نمونه که در آن δx برابر $0/02$ متر، δy برابر $0/07$ ، ضریب اصطکاک برابر $0/7$ و لقی بین دیواره پی‌پاد و کیوبست $0/0005 \text{ m}$ است، مشاهده می‌شود که سرعت زاویه‌ای $0/8$ درصد و سرعت خطی $0/2$ درصد کاهش پیدا می‌کند؛ بنابراین در نظر گرفتن شتاب گرانش برابر با صفر در شرایط واقعی تأثیر چشمگیری بر نتایج ندارد.

علاوه بر این در محث عدم قطعیت پارامترهای تأثیرگذار، بررسی‌های انجام‌گرفته نشان می‌دهد عدم قطعیت $\pm 0/005 \text{ m}$ در خروج از مرکز δx باعث تغییرات $\pm 3 \text{ deg/s}$ در سرعت زاویه‌ای و $\pm 0/05 \text{ m/s}$ در سرعت خطی و عدم قطعیت $\pm 0/005 \text{ m}$ در خروج از مرکز δy باعث تغییرات $\pm 1 \text{ deg/s}$ در سرعت زاویه‌ای و $\pm 0/01 \text{ m/s}$ در سرعت خطی می‌شود. همچنین عدم قطعیت $0 \pm 0/02 \text{ deg/s}$ در ضریب اصطکاک نیز به ترتیب باعث تغییرات $\pm 0/02 \text{ m/s}$ در سرعت زاویه‌ای و $\pm 0/1$ درجه بر ثانیه و $\pm 0/02 \text{ m/s}$ در سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی شده و عدم قطعیت $\pm 0/00005 \text{ m}$ متر در لقی نیز به ترتیب باعث تغییرات $\pm 0/3 \text{ deg/s}$ و $\pm 0/2 \text{ m/s}$ در سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی می‌شود. همچنین لازم به ذکر است که فنر مورد استفاده در این مکانیزم با استفاده از نرم‌افزار مخصوص طراحی شده و در ساخت آن از ماده استاندارد آنالیز شده استفاده شده است. علاوه بر این برای اطمینان، آزمون‌های عملکردی برای بررسی سفتی فنر بعد از ساخت آن انجام‌گرفته است؛ بنابراین بحث عدم قطعیت برای پارامتر سفتی فنر باتوجه به دقت در ساخت و اندازه‌گیری‌های دقیق تجربی بسیار ناچیز است.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله حرکت کیوبست 3U در داخل پی‌پاد از طریق معادلات دینامیکی بررسی شد. همچنین برای صحت‌سنجی معادلات از آزمون تجربی استفاده شد. بدین منظور پی‌پاد و نمونه کیوبست موردنظر ساخته شده و مورد آزمون تجربی قرار گرفت. نتایج حاکی از تطابق قابل‌قبول نتایج تحلیلی و نتایج تجربی است. در ادامه اثر خروج از مرکز CG در راستای حرکت کیوبست-

- [18] Xu Y and et all. Design and verification of CubeSat deployer with the dual redundancy electromagnetic open door mechanism. *Journal of Physics*. 2024; 2691.
- [19] Tullino S. K. Testing and evaluating deployment profiles of the canisterized satellite dispenser (CSD). M.S. thesis, Dept. Astronautical. Eng., Air Univ., Ohio, United States, 2017. DOI:10.2514/6.2017-0850
- Based on the Dynamic of Satellite and Star Tracker. 2020; 13 (4).DOR: 20.1001.1.26455323.1396.13.4.5.4 [In Persian]
- [4] Safarabadi M and et all. Design of micro-vibration isolation system for a remote-sensing satellite payload using viscoelastic materials. *Engineering Solid Mechanics* . 2020; 8. DOI:10.5267/j.esm.2019.8.003
- [5] Emami H, Farahani F and Safarabadi M. Influence of modal effective mass distribution on the static and dynamic behavior of a satellite structure under base excitations. *Material Science Research India*. 2008; 5 (2). DOI:10.13005/msri/50201
- [6] Safarabadi M and Bazargan S. Prediction of equivalent static loads act on a micro satellite via modal analysis. *Engineering Solid Mechanics*. 2015; 3. DOI:10.5267/j.esm.2015.2.004
- [7] Roosta M and Safarabadi M. Study of mass reduction- possibility of a cubic microsatellite by replacing isogrid structure with sandwich panel structure using finite element analysis. *Modares Mechanical Engineering*. 2016; 16 (9), (in Persian).
- [8] Nason I, puig-suari J, Twigg R. Development of a Family of Picosatellite Deployers Based on the CubeSat Standard. *Proceedings, IEEE Aerospace Conference, USA*, 2002. DOI:10.1109/AERO.2002.1036865
- [9] Hiller R. Design of a CubeSat Separation Mechanism. Research thesis, Dept. Mechanical. Eng., Western Michigan Univ., United States, 2017.
- [10] Guo J, Zhang J and et all. Modeling of the CubeSat deployment and initial separation angular velocity estimation. *Aerospace Science and Technology*. 2019; 95. DOI:10.1016/j.ast.2019.105477
- [11] Arshad M. A, Mehmood R, khan H. Dynamic Analysis of 3U deployer (iPOD) Structure. 2021 Seventh International Conference on Aerospace Science and Engineering (ICASE), Pakistan, 2021. DOI:10.1109/ICASE54940.2021.9904095
- [12] Barsoum G. I, Ibrahim H. H, fawzy M. A. Static and Random Vibration Analyses of a University CubeSat Project. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1264. DOI:10.1088/1742-6596/1264/1/012019
- [13] Zhang J, Zhou J, Deng Y. CubeSat Separation Parameter Optimization. 12th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), Australia, 2018.
- [14] Liu Y, Teng L and Jin Zh. An optimization method of separation parameters for picosatellite by minimizing external moment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1634.
- [15] Yang F, Yue H, Wang G. and et. al. The Design and Analysis of Picosatellite Deployer with Controllable Release Function. *IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, China, 2017. DOI:10.1109/ICInfA.2017.8078969
- [16] Yudinsev V. Cubesat Separation Dynamics. *Latin American IAA Cubesat Workshop*, Brazil, 2016.
- [17] Lim Q and et all. Design and Development of a Dual-Use Satellite Deployer. 38th Annual Small Satellite Conference, USA, 2024. DOI:10.26077/ktj9-a529

