

طراحی سامانه حرکتی الکترومکانیکی شبیه‌ساز پروازی هواپیما

حسن عیسوند^۱، حامد آدمی^۲ و علی نوری^۳

دانشکده مهندسی هوافضا

دانشگاه هوایی شهید ستاری

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۲۸)

چکیده

شبیه‌سازهای پروازی هواپیما دارای سامانه حرکتی نقش مهمی در بهبود کیفیت آموزشی، افزایش ایمنی پرواز و کاهش هزینه‌های آموزشی را دارند. مکانیزم استوارت، یکی از سامانه‌های حرکتی در شبیه‌سازها می‌باشد. این مکانیزم شش درجه آزادی به دلیل مستقل نبودن درجات آزادی حرکتی سازه، از لحاظ تحلیل دینامیکی و کنترلی دارای پیچیدگی‌های خاص خود می‌باشد. در این مقاله یک سامانه حرکتی الکترومکانیکی شش درجه آزادی، به صورت کامل طراحی و تحلیل شده است. با در نظر گرفتن سرعت‌ها و شتاب‌های خطی و دورانی، وزن مجموعه کابین و روابط سینماتیکی دستگاه، حرکت‌های فضای کاری سکو آنالیز شده و موقعیت، سرعت و شتاب در هر لحظه محاسبه می‌شود. اثر پارامترهای مختلف مانند زوایای رول، یاو، پیچ، سرعت و شتاب خطی و زاویه ای سکوی بالایی بر روی نیرو و سرعت عملگرها به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از نیروهای وزن و شتاب‌های دینامیکی به دست آمده، توان الکتروموتور، طول و قطر بال اسکرو، تغییر طول پایه‌ها، سکوی پایینی و پایه‌های رابط تحلیل و طراحی شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌ساز پرواز هواپیما، سامانه حرکتی الکترومکانیکی، مکانیزم استوارت، سینماتیک و دینامیک

Design of Electromechanical Motion System for an Aircraft Flight Simulator

H. Isvand, H. Adami and A. Nouri

Aerospace Engineering Shahid Satatry

Aeronautical University of Science and Technology

(Received:11/July/2017 ; Accepted:19/September/2018)

ABSTRACT

Aircraft flight simulators with motion systems play a major role in improving education quality, flight safety and reducing training costs. Stewart mechanism is one of the simulator motion systems, which is a six-degree of freedom mechanism with coupled structures which makes its dynamical control analysis become more complicated. In this research, an electro-mechanical motion mechanism with six degrees of freedom has been completely analyzed and designed. With respect to the translational and rotational velocity and acceleration, and weight of cabin complex, kinematic relations of the machine, motions in work space with moving platform have been analyzed to calculate the positions, velocity and acceleration at any moments. The effects of various parameters such as roll, yaw, pitch, the linear and angular velocity and acceleration of the top platform on the force and speed of the operators are numerically studied finally. its components, namely electro-motor power, the length and diameter of ball screw, legs length, lower platform, and leg linkage variations are, were analyzed and designed.

Keywords: Airplane Flight Simulator, Electro-mechanical Motion System, Stewart Mechanism, Kinematics and Dynamics

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): isvand@chmail.ir

۲- کارشناس ارشد: adamihamed@gmail.com

۳- استادیار: anouri@ssau.ac.ir

۱- مقدمه

می‌گردید. ارتباط این دو صفحه از طریق عملگرهای هیدرولیکی و به موازات آن جفت‌های سه درجه آزادی انجام می‌گرفت [۳]. یک مکانیزم استوارت شامل دو سکو بوده که به وسیله تعدادی از عملگرهای موازی حرکت می‌کنند. دیودون و همکاران یک تبدیلی از عملگرها را به دست آوردند و با نتایج تجربی سکوی استوارت که در شبیه‌ساز ناسا موجود بود، مقایسه نمودند [۴]. اولین بررسی و مطالعه جامع روی سکوی استوارت بوسیله فیشر^۳ در سال ۱۹۸۶ انجام گرفت [۵]. هانت^۴ مطالعات منظمی روی بازوهای موازی روبات‌ها انجام داد و سینماتیک سازه‌های این نوع ربات‌ها را ارائه نمود [۶]. پس از نوآوری شبیه‌ساز هواپیما در سال ۱۹۶۵، مکانیزم‌های موازی توسط محققان به دلیل نیازهای فناورانه بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۷]. تحلیل سینماتیکی و دینامیکی یک ربات موازی ۴ درجه آزادی، به وسیله پاکزاد و محبوب‌خواه انجام گرفت. آنها نقاط تکین مکانیزم را نیز به دست آوردند [۸].

اولین نوع شبیه‌ساز شش درجه آزادی در سال ۱۹۷۷ ساخته شد. پس از سال ۱۹۷۰ تلاش‌های فراوانی برای بهینه‌سازی سامانه شبیه‌سازها و همچنین اضافه کردن ادوات تکمیلی به آنها صورت گرفت. به هر حال به جهت عدم وجود تست‌های پروازی واقعی برای مانورهای پروازی خاص استانداردهای مذکور در حدود ۱۵ سال بدون تغییر باقی ماند. تقاضاهای مکرر از شرکت‌های هواپیمایی برای هر چه گسترده شدن سامانه‌های شبیه‌ساز و به حداقل رساندن زمان پرواز واقعی با هواپیما وجود دارد. مهم‌ترین بخش شبیه‌سازهای پرواز کاهش تاخیرات زمانی در پاسخ‌های سامانه حرکتی و نیاز به حل معادلات و پارامترهای پیچیده همگام با مسائل سامانه بصری- حرکتی و مدل‌سازی است [۹]. در سال ۱۹۹۰، گاسلین^۵ روشی را برای تحلیل مکانیزم‌های موازی شش درجه آزادی ارائه نمود [۱۰]. ماسوری^۶ و همکاران روشی را برای محاسبه فضای کاری سکوی استوارت با در نظر گرفتن اثرات پارامترهایی مانند طول بازو، محل اتصال و طراحی ابعادی فضای کاری ارائه

توجه زیاد به مقوله ایمنی و مسائل زیست محیطی موجب توسعه روزافزون سامانه‌های شبیه‌سازی پرواز شده است. شبیه‌سازهای پروازی به‌منظور کاهش پروازهای آموزشی و پژوهش و در نتیجه کاهش سوخت و کاهش هزینه‌های عملیاتی هواپیما، و همچنین به حداقل رساندن آلودگی و سر و صدا به کار گرفته می‌شوند اگر دستگاه شبیه‌سازی به درستی طراحی شده باشد، رفتار خلبان در هواپیما در شبیه‌ساز ارزیابی می‌شود، که اجازه می‌دهد آموزش، تحقیق و توسعه با هزینه خیلی کمتری انجام گیرد [۱۱]. اولین شبیه‌ساز کامل پروازی توسط یک شرکت هواپیمایی برای اولین بار در سال ۱۹۴۸ راه‌اندازی شد. شرکت هواپیمایی پان امریکن^۱ یک هواپیمای بوئینگ ۳۷۷ را در سامانه آموزش خود به کار گرفت. بیشتر شبیه‌سازهای پروازی در آن زمان سامانه حرکت نداشتند لذا از طریق بارگذاری کنترلی سعی بر آن بود تا احساس واقعی پرواز برای خلبانان ایجاد گردد. با افزایش اطلاعات پرواز و تجارب وابسته به تدریج کامپیوترهای آنالوگ گلوگاه پیشرفت شبیه‌سازها شدند. لذا این امر احساس نیاز و به تدریج ورود کامپیوترهای دیجیتال به سامانه‌های شبیه‌ساز را باعث گردید. به هر حال تا پارامترهای مکانیکی سامانه حرکتی به‌طور مستقیم وارد مجموعه نمی‌شد، احساس طبیعی پرواز و امکان اخذ اطلاعات دقیق از تست‌های پروازی با شبیه‌ساز میسر نمی‌گردید [۲].

در سال ۱۹۵۹ اولین سامانه حرکتی تحقیقاتی در ناسا طراحی و ساخته شد. پس از آن شبیه‌سازهای دورانی سانتریفوژ ساخته شد. به تدریج سامانه حرکت چندبعدی با به‌کارگیری در شبیه‌سازهای هواپیماهای پهن‌پیکر مثل B747 قدم به عرصه این صنعت گذاردند. اولین سامانه شش درجه آزادی تحقیقاتی ناسا در سال ۱۹۶۴ به کار گرفته شد. در اواخر ۱۹۶۴ سامانه هیدرولیکی موازی و مرکب وارد مجموعه شبیه‌سازها گردید. این سامانه که به نام سکوی استوارت-گوق^۲ معروف بود مرکب از دو صفحه بالا و پایین بود که صفحه بالا متحرک و صفحه پایین ثابت طراحی

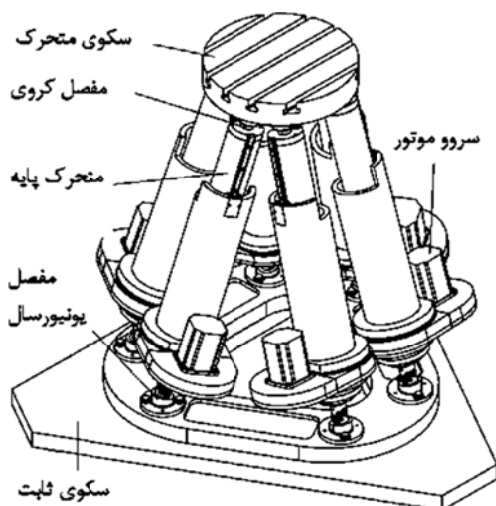
3- Fichter
4- Hunt
5- Gosselin
6- Masory

1- Pan American
2- Stewart and Gough

سرعت و شتاب خطی و زاویه‌ای سکوی بالایی بر روی نیرو و سرعت عملگرها به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. سامانه‌های حرکتی شبیه‌سازهای پروازی هواپیما از نوع هیدرولیکی است که در داخل کشور نیز استفاده می‌شود. سامانه حرکتی طراحی شده در این تحقیق از نوع الکترومکانیکی با وزن محموله متوسط به بالا (۳ تن به بالا) است که محدودیت‌ها و مشکلات سامانه هیدرولیکی را نداشته و هزینه ساخت و نت (نگهداری و تعمیر) بیش از ۵۰ درصد کاهش یافته است.

۲- شرح و توصیف مدل

مدل مدنظر در این مقاله، یک مکانیزم شش درجه آزادی با زنجیره سینماتیکی موازی است در شکل ۱ نشان داده شده است. زنجیره سینماتیکی این مکانیزم شامل یک مفصل یونیورسال، یک محرک، یک مفصل کروی است که سکوی متحرک را به سکوی ثابت متصل می‌کند. مجموع شش زنجیره سینماتیکی به سکوی متحرک ماشین شش درجه آزادی حرکتی می‌دهند. حرکت در پایه‌ها توسط سروو موتور^۸ ایجاد و از طریق بال اسکرو^۹ تبدیل به حرکت خطی در راستای طول پایه می‌گردد. حرکت هم‌زمان و هماهنگ شش پایه سکوی متحرک بالایی را در موقعیت مناسب در فضا قرار می‌دهد.



شکل (۱): مکانیزم سکوی استوارت [۱].

نمودند [۱۱]. داسگوپتا^۱ و همکاران مسیر تکینگی سکوی استوارت را مورد بررسی قرار دادند. آنها با در نظر گرفتن دو نقطه، مسیر تکینگی بین این دو نقطه را به دست آوردند [۱۲]. زای^۲ در سال ۲۰۰۱ روی یک هگزاپاد^۳ به پایه‌های با طول ثابت تحقیق نمودند و سه نوع هگزاپاد را با هم مقایسه نمود [۱۳]. وانگ^۴ و همکاران الگوریتمی را برای تعیین فضای کاری ماشین ابزار موازی بر مبنای نقطه برش به دست آوردند [۱۴]. دینگ^۵ و همکاران با استفاده از یک روش ساده شده سفتی که ترکیبی از دو روش تحلیل و عددی بود مکانیزم شش درجه آزادی استوارت را مورد مطالعه قرار دادند [۱۵]. تحلیل دینامیکی سیستم مکانیزم استوارت با شش درجه آزادی به وسیله دامیک و کوهدر^۶ با استفاده از روش مدل اجزا گراف باند مورد مطالعه قرار گرفت [۱۶].

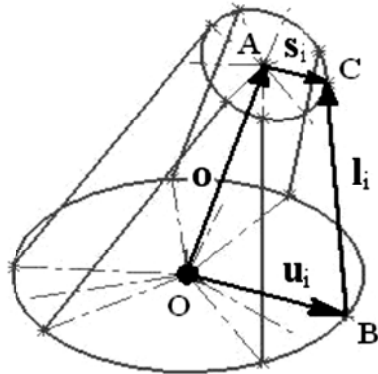
در شبیه‌سازها می‌توان از عملگرهای هیدرولیکی، نیوماتیکی و الکتریکی به عنوان نیروی محرک استفاده نمود. عملگرهای الکتریکی بهترین گزینه برای سرعت‌های بالا و بار کم است این در حالی است که عملگرهای هیدرولیکی برای سرعت‌های کم و بارهای زیاد مناسب‌اند. عملگرهای پنوماتیکی همانند عملگرهای هیدرولیکی هستند با این تفاوت که اغلب برای بارهای زیاد مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. به طور کلی عملگرهای الکتریکی به علت کنترل پذیری بالاتر بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. بعضی از مبدل‌ها عملکرد خطی داشته (مانند عملگرها) و برخی دیگر حرکت دورانی دارند (مانند الکتروموتورها).

در این مقاله معادلات سینماتیکی و دینامیکی یک مکانیزم شش درجه آزادی مربوط به مکانیزم استوارت به دست آمده سپس با تعیین نیروها و گشتاورها، طراحی قسمت‌های مختلف شبیه‌ساز انجام شده است. همچنین نقاط تکین مکانیزم نشان داده شده و نیز در پایان خروجی مکانیزم در نرم افزار متلب- سیم‌مکانیک^۷ نشان داده شده است. اثر پارامترهای مختلف مانند زوایای رول، یاء، پیچ،

- 1- Dasgupta
- 2- Xi
- 3- Hexapods
- 4- Wang
- 5- Ding
- 6- Damic and Cohodar
- 7- ATLAB/SimMechanics

8- Servo-Motor
9- Ball Screw

$$o = [x \ y \ z]^T \quad (۱)$$



شکل (۳): زنجیره برداری پایه i ام [۷].

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، دستگاه مختصات (X,Y,Z) در نقطه O به سکوی ثابت پایین متصل بوده و مختصات محلی (x,y,z) در نقطه A روی سکوی بالایی قرار دارد. موقعیت سکوی متحرک را می‌توان با بردار موقعیت در نقطه A و سه زاویه رول^۱، پیچ^۲ و یاو^۳ (ϕ, ψ, θ) می‌توان بیان نمود. بنابراین، محل و جهت سکوی بالایی در مختصات کارترین به‌وسیله $X_A = [A_x, A_y, A_z, \phi, \psi, \theta]$ مشخص می‌گردد. با استفاده از شکل ۱ و برای زنجیره برداری نشان داده شده، می‌توان رابطه زیر را نوشت:

$$o + R s_i = u_i + l_i \quad (۲)$$

که R ماتریس دوران می‌باشد و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & -s\phi c\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \quad (۳)$$

که $c = \cos$ و $s = \sin$

از رابطه (۲) می‌توان رابطه برداری پایه i ام را که مطابق زیر است، به دست آورد.

$$l_i = o + R s_i - u_i \quad (۴)$$

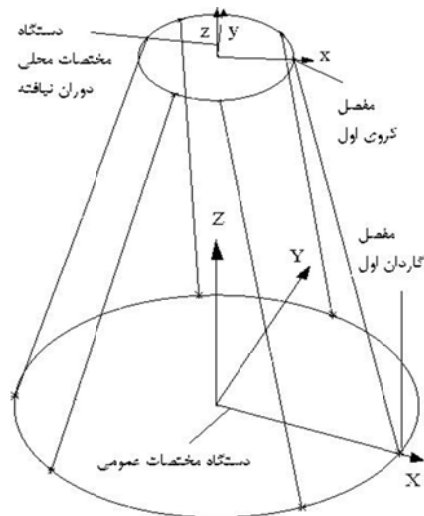
رابطه (۴) که از زنجیره برداری نشان داده شده در شکل ۲ به دست آمد برای حل سینماتیک معکوس مکانیزم و به دست آوردن بردار پایه i ام با در دست داشتن موقعیت سکوی بالایی به کار می‌رود. منظور از موقعیت سکوی بالایی

۳- معادلات سینماتیک و دینامیکی شبیه‌ساز

در این بخش به استخراج معادلات سینماتیکی و دینامیکی شبیه‌ساز پرداخته می‌شود.

۳-۱- معادلات سینماتیکی

در مکانیزم هگزاپاد که در شکل ۲ نشان داده شده است، دو پارامتر موقعیت سکوی بالایی و طول پایه‌های مکانیزم توسط سینماتیک مکانیزم به یکدیگر مرتبط می‌شوند، به این معنی که با معلوم بودن هر یک، دیگری را می‌توان به دست آورد. برای یک موقعیت مشخص از سکوی بالایی یک مجموعه منحصر به فرد از طول پایه‌ها از طریق سینماتیک معکوس مکانیزم به دست می‌آید. لذا سینماتیک معکوس مکانیزم، موقعیت مشخص مکانیزم را به طول پایه‌ها تبدیل می‌کند. منظور از موقعیت مکانیزم ترکیبی از مکان سکوی بالایی در دستگاه مختصات عمومی و جهت آن در دستگاه مختصات محلی است.



شکل (۲): دستگاه مختصات عمومی و دستگاه مختصات محلی دوران نیافته در مکانیزم هگزاپاد.

در شکل ۳ بردار u_i بردار مفصل گاردان i ام در دستگاه مختصات عمومی، O بردار مکان سکوی بالایی در دستگاه مختصات عمومی، s_i بردار مفصل کروی i ام است که در دستگاه مختصات محلی دوران یافته تعریف می‌شود و l_i بردار پایه i ام است. ماتریس مجموعه بردارهای u_i, s_i که با U و S نمایش داده می‌شوند با در نظر گرفتن پارامترهای طراحی پیکره به دست می‌آیند. بردار 0 نیز به صورت زیر تعریف می‌شود.

1- Roll
2- Pitch
3- Yaw

با استفاده از تعریف فوق، حل سینماتیک مستقیم به ریشه‌یابی تابعی برداری پیوند می‌خورد. در این‌جا روش عددی نیوتن-رافسون برای یافتن \bar{p} که ریشه تابع $F(p)$ است به خدمت گرفته شده است. روش عددی نیوتن-رافسون که بر پایه الگوریتم تکرار استوار است، از یک حدس اولیه (p_0) شروع کرده و پس از n تکرار به شرط همگرایی به اندازه بازه مشخص شده به جواب (\bar{p}) نزدیک می‌شود. در هر مرحله تکرار p_i از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$p_i = p_{i-1} - \left(\frac{dF(p_{i-1})}{dp} \right)^{-1} F(p_{i-1}) \quad (8)$$

می‌توان نشان داد که:

$$\frac{dF(p_{i-1})}{dp} = J_v \times R' \quad (9)$$

که در آن، J_v ماتریس ژاکوبین سرعت و R' ماتریس دوران دوم مکانیزم است. و R' مطابق زیر است.

$$R' = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ & 1 & 0 & s\theta \\ 0_{3 \times 3} & 0 & c\phi & -s\phi c\theta \\ & 0 & s\phi & c\phi c\theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

که در آن، I ماتریس یکه، 0 ماتریس صفر است. رابطه (۸) به شرط همگرایی پس از n تکرار به \bar{p} نزدیک می‌شود.

جهت محاسبه سرعت پایه‌ها از رابطه سینماتیک معکوس و بردار طول یک پایه کمک گرفته می‌شود. با مشتق‌گیری از رابطه (۴) نسبت به زمان سرعت پایه‌ها را مشخص می‌کند.

$$\dot{l}_i = \dot{o} + \frac{d}{dt}(R s_i) - \dot{u}_i \quad (11)$$

که در رابطه فوق، علامت نقطه بالای یک متغیر به معنی مشتق آن نسبت به زمان است. از آنجایی که طول بردار s_i که در دستگاه مختصات محلی تعریف می‌شود و بردار مفصل کروی i ام است، تغییر نمی‌کند، مشتق آن تنها دارای ترم دورانی خواهد بود که سرعت تحت تأثیر دوران یک بردار مطابق رابطه زیر مشخص می‌شود.

$$v = \omega \times r \quad (12)$$

که در آن، r بردار مکان است که اندازه آن ثابت می‌باشد و ω بردار سرعت دورانی r می‌باشد و v بردار سرعت حاصل از

مکان مرکز سکوی متحرک بالایی که با o مشخص می‌شود و جهت سکوی بالایی که R را تعیین می‌کند، می‌باشد.

حل سینماتیک مستقیم در مکانیزم هگزپاد بر خلاف حل سینماتیک معکوس که توسط رابطه (۳) میسر می‌شود، به کمک یک رابطه تحلیلی ناممکن است چراکه در زنجیره برداری یک پایه (رابطه (۲)) بردار موقعیت p به طور صریح وجود ندارد بلکه پارامترهای زاویه‌ای آن داخل ماتریس دوران اول قرار می‌گیرند که به دست آوردن آن‌ها را توسط یک رابطه تحلیلی ناممکن می‌سازد.

از روش حل عددی سینماتیک مستقیم بر پایه روش حل عددی نیوتن-رافسون^۱ برای بدست آوردن یافتن ریشه یک معادله استوار است.

تابعی برداری برای یک پایه تعریف می‌شود که با $\tau(p)$ نمایش داده شده و مطابق زیر ارائه می‌شود.

$$\tau(p) = [l_1 \quad l_2 \quad l_3 \quad l_4 \quad l_5 \quad l_6]^T \quad (5)$$

که در آن p بردار موقعیت سکوی بالایی و l_i بردار پایه i ام است که از رابطه (۳) به دست می‌آید. تابع $\tau(p)$ از حل سینماتیک معکوس مکانیزم به دست می‌آید. در روش حل سینماتیک مستقیم بردار موقعیتی مطلوب است که در آن تابع مجموعه طول پایه‌ها برابر $\bar{\tau}$ ، برداری مشخص باشد. در اینجا این بردار موقعیت با \bar{p} نمایش داده می‌شود. $\bar{\tau}$ نیز مطابق زیر تعریف می‌شود.

$$\bar{\tau} = [\bar{l}_1 \quad \bar{l}_2 \quad \bar{l}_3 \quad \bar{l}_4 \quad \bar{l}_5 \quad \bar{l}_6]^T \quad (6)$$

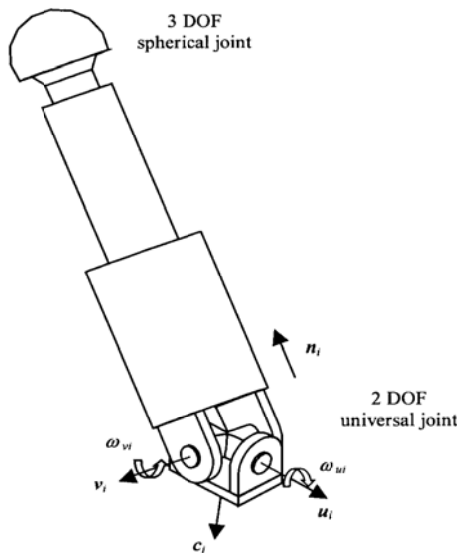
که در آن، l_i طول پایه i ام است. تابع برداری $F(p)$ مطابق زیر تعریف می‌شود.

$$F(p) = \tau(p) - \bar{\tau} \quad (7)$$

تابع F که تابعی برداری برحسب بردار موقعیت (p) است، برابر اختلاف بردار پایه‌ها در موقعیت p با بردار $\bar{\tau}$ است. در موقعیتی که در آن، $F = 0$ باشد، بردار پایه‌ها با $\bar{\tau}$ برابر است ($\tau(\bar{p}) = \bar{\tau}$). همان‌گونه که از تعریف سینماتیک مستقیم نیز بر می‌آید، به دست آوردن بردار \bar{p} هدف حل سینماتیک مستقیم مکانیزم است.

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & c\phi & s\phi c\theta \\ 0 & s\phi & -c\phi s\theta \\ 1 & 0 & c\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\dot{\phi}s\phi & \dot{\phi}c\phi s\theta + \dot{\theta}s\phi c\theta \\ 0 & \dot{\phi}c\phi & \dot{\phi}s\phi s\theta - \dot{\theta}c\phi c\theta \\ 1 & 0 & -\dot{\theta}s\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (17)$$

در شکل ۴ مفصل یونیورسال و کروی عملگر نشان داده شده است. مفصل یونیورسال که به سکوی ثابت پایینی متصل است دو درجه آزادی بوده و مفصل کروی متصل شده به سکوی متحرک بالایی دارای دو درجه آزادی می‌باشد.



شکل (۴): مفصل عملگر مکانیزم استوارت [۱۸].

بردار یکه u_i در راستای محور دوران ثابت مفصل یونیورسال و بردار یکه v_i در راستای چرخش دیگر مفصل، عمود بر بردار یکه u_i می‌باشد. ω_i سرعت زاویه‌ای پایه i مفصل یونیورسال، دارای دو مؤلفه در راستای u_i و v_i بوده و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\omega_i = \omega_{ui}u_i + \omega_{vi}v_i \quad (18)$$

که مقدار این دو مؤلفه از رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \omega_{ui} &= -(\dot{s} - \dot{l}n_i) \cdot v_i / (l_i n_i \cdot c_i) \\ \omega_{vi} &= -(\dot{s} - \dot{l}n_i) \cdot u_i / (l_i n_i \cdot c_i) \end{aligned} \quad (19)$$

که c_i و \dot{s} از رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$c_i = u_i \times v_i, \quad \dot{s} = \omega_1 \times l_1 n_1 + \dot{l}_1 n_1 \quad (20)$$

دوران Γ است. با تعمیم رابطه فوق به بردار مکان یک مفصل کروی رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\frac{d}{dt}(R_{S_i}) = \omega \times (R_{S_i}) \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، ω بردار سرعت دورانی سکوی بالایی در دستگاه مختصات عمومی است. سرعت دورانی سکوی بالایی در دستگاه مختصات محلی به صورت زیر می‌باشد:

$$\bar{\omega} = \omega_x i + \omega_y j + \omega_z k = \dot{\phi} i + \dot{\theta} j + \dot{\psi} k \quad (14)$$

با جای‌گذاری رابطه (۱۲) در رابطه (۱۰)، رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$\dot{I}_i = \dot{\theta} + \omega \times (R_{S_i}) \quad (15)$$

رابطه (۱۵) بردار سرعت پایه i ام در دستگاه مختصات عمومی را نشان می‌دهد، که در آن، ω بردار سرعت دورانی بردار R_{S_i} در دستگاه مختصات عمومی است. باید توجه شود که چون بردار S_i داخل صفحه سکوی بالایی قرار دارد و همواره نسبت به آن ثابت است. بردار سرعت دورانی مربوط به S_i با بردار سرعت دورانی سکوی متحرک بالایی مکانیزم همگراپاد یکی است. لذا بردار ω در رابطه (۱۵) همان بردار سرعت دورانی سکوی بالایی است.

برای تعیین سرعت یک جسم در فضای کارترین به جهت و اندازه سرعت نیز وابسته است که رابطه (۱۵) این دو مشخصه از سرعت پایه‌ها را تأمین می‌کند. سرعت یک پایه توسط سرعت دوران سرو موتور مربوط به آن تأمین می‌گردد که این امر مستلزم آن است که اندازه سرعت تغییر طول پایه مشخص باشد. سرعت تغییر طول هر پایه با در نظر گرفتن گام بال اسکرو به سرعت دوران سرو موتور تبدیل می‌شود که به عنوان یک فرمان کنترلی به سرو سامانه ارسال می‌گردد. لذا لازم است تا اندازه سرعت در راستای طول پایه‌ها بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

سرعت زاویه‌ای $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ و شتاب زاویه‌ای $\alpha = (\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)^T$ که سکوی بالایی نسبت به چارچوب ثابت دارند، به صورت زیر بیان می‌گردند [۱۷].

$$\omega = \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & c\phi & s\phi c\theta \\ 0 & s\phi & -c\phi s\theta \\ 1 & 0 & c\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (16)$$

شتاب زاویه‌ای سکوی متحرک با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

که در آن بردار سرعت خطی سکوی بالایی و ω بردار سرعت زاویه‌ای میز بالایی در دستگاه مختصات عمومی می‌باشند. ماتریس ژاکوبین سرعت مکانیزم J_v طبق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$J_v = \begin{bmatrix} n_1^T & \{Rs_1 \times n_1\}^T \\ n_2^T & \{Rs_2 \times n_2\}^T \\ n_3^T & \{Rs_3 \times n_3\}^T \\ n_4^T & \{Rs_4 \times n_4\}^T \\ n_5^T & \{Rs_5 \times n_5\}^T \\ n_6^T & \{Rs_6 \times n_6\}^T \end{bmatrix} \quad (29)$$

که در آن، s_i ، n_i و R به ترتیب بردار موقعیت مفصل کروی i ام در دستگاه مختصات محلی دوران یافته، بردار یک پایه i ام در دستگاه مختصات عمومی، و ماتریس دوران نامیده می‌شوند. رابطه (۲۶) را می‌توان یک دستگاه معادلات خطی فرض کرد که از حل آن سرعت پایه‌ها حاصل می‌شود.

برای محاسبه شتاب زاویه‌ای پایه i در مفصل یونیورسال، می‌توان از رابطه (۱۸) نسبت به زمان مشتق گرفت بنابراین،

$$\alpha_i = \alpha_{ui} u_i + \alpha_{vi} v_i + \omega_{ui} \omega_{vi} c_i \quad (30)$$

که

$$\alpha_{ui} = -\dot{s}'_i \cdot v_i / (l_i n_i \cdot c_i) \quad (31)$$

$$\alpha_{vi} = -\dot{s}'_i \cdot u_i / (l_i n_i \cdot c_i)$$

و

$$\begin{aligned} \ddot{s}'_i &= \ddot{s}_i - \omega_{ui} \omega_{vi} l_i c_i \times n_i - \dot{l}_i n_i - 2\dot{l}_i \omega_i \times n_i \\ &- l_i \omega_i \times (\omega_i \times n_i) \\ \ddot{s}_i &= \alpha_i \times n_i l_i + \omega_i \times (\omega_i \times l_i n_i) + 2\omega_i \times \dot{l}_i \cdot n_i + \dot{l}_i n_i \\ \ddot{l}_i &= \ddot{s}_i \cdot n_i - l_i (\omega_i \times (\omega_i \times n_i)) \cdot n_i \end{aligned} \quad (32)$$

α_i شتاب زاویه‌ای پایه i ، ω و α به ترتیب سرعت و شتاب زاویه‌ای سکوی متحرک می‌باشند. برای مفصل کروی سه درجه آزادی پایه i ، سرعت و شتاب زاویه‌ای از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \omega_i &= \omega_{ui} u_i + \omega_{vi} v_i + (\omega_i \cdot c_i) c_i \\ \alpha_i &= \alpha_{ui} u_i + \alpha_{vi} v_i + (\alpha \cdot c_i) c_i + \omega_{ui} \omega_{vi} c_i - \\ &2\omega_{ui} (\omega \cdot v_i) c_i - \omega_{vi} (\omega \cdot v_i) u_i + (\omega \cdot v_i) (\omega \cdot u_i) c_i \\ &+ (\omega \cdot v_i) (\omega \cdot c_i) u_i \end{aligned} \quad (33)$$

۳-۲- معادلات دینامیکی

نیروهای وارد به سکوی بالایی را می‌توان به دو دسته کلی نیروهای داخلی و خارجی مکانیزم تقسیم کرد. نیروهای

سرعت تغییر طول پایه‌ها را می‌توان با استفاده از حاصل ضرب داخلی بردار سرعت پایه در بردار یک پایه طول پایه مطابق زیر به دست آورد.

$$\dot{l}_i = \dot{l} \cdot n_i \quad (21)$$

در رابطه فوق، \dot{l}_i اندازه تصویر بردار سرعت پایه i ام در راستای طول آن را نشان می‌دهد. این اندازه تصویر همان سرعت تغییر طول پایه i ام است.

مکانیزم هگزاپاد دارای شش پایه است که می‌توان از سرعت تغییر طول پایه‌ها برداری مطابق زیر تعریف کرد.

$$z = [\dot{l}_1 \quad \dot{l}_2 \quad \dot{l}_3 \quad \dot{l}_4 \quad \dot{l}_5 \quad \dot{l}_6]^T \quad (22)$$

در این رابطه Z بردار مجموعه سرعت پایه‌ها نامیده می‌شود و فضای برداری شش‌بعدی را ایجاد می‌کند که در اینجا فضای برداری سرعت تغییر طول پایه‌ها نامیده می‌شود. از بسط رابطه مربوط به \dot{l}_i ، رابطه زیر به دست می‌آید [۵].

$$\dot{l}_i = \dot{o} \cdot n_i + \omega \times (Rs_i) \cdot n_i \quad (23)$$

با استفاده از رابطه جابجایی ضرب بردارها، رابطه مربوط به سرعت تغییر طول پایه i ام مطابق زیر تغییر می‌کند.

$$\dot{l}_i = \dot{o} \cdot n_i + \omega \cdot (Rs_i \times n_i) \quad (24)$$

که به فرم ماتریسی می‌توان آن را مطابق زیر نوشت.

$$\dot{l}_i = [n_i]^T [\dot{o}] + [Rs_i \times n_i]^T [\omega] \quad (25)$$

و از ترکیب شش رابطه‌ای که برای هر کدام از پایه‌ها به دست آمده، رابطه کلی زیر به وجود می‌آید.

$$\begin{bmatrix} \dot{l}_1 \\ \dot{l}_2 \\ \dot{l}_3 \\ \dot{l}_4 \\ \dot{l}_5 \\ \dot{l}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1^T & \{Rs_1 \times n_1\}^T \\ n_2^T & \{Rs_2 \times n_2\}^T \\ n_3^T & \{Rs_3 \times n_3\}^T \\ n_4^T & \{Rs_4 \times n_4\}^T \\ n_5^T & \{Rs_5 \times n_5\}^T \\ n_6^T & \{Rs_6 \times n_6\}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{o} \\ \omega \end{bmatrix} \quad (26)$$

رابطه (۲۱) را می‌توان به صورت زیر نشان داد [۳]:

$$z = J_v v \quad (27)$$

که در آن Z بردار سرعت پایه‌ها، J_v ماتریس ژاکوبین سرعت مکانیزم و v بردار سرعت میز بالایی بوده و به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$v = [\dot{o}^T \quad \omega^T]^T \quad (28)$$

$$\begin{cases} f_1 n_{1x} + \dots + f_6 n_{6x} = g_x \\ f_1 n_{1y} + \dots + f_6 n_{6y} = g_y \\ f_1 n_{1z} + \dots + f_6 n_{6z} = g_z \\ m_{1x} + \dots + m_{6x} = m_x \\ m_{1y} + \dots + m_{6y} = m_y \\ m_{1z} + \dots + m_{6z} = m_z \end{cases} \quad (36)$$

که در آن، n_{ix} مؤلفه بردار یکه پایه i ام در راستای محور x است و m_{iz}, m_{iy}, m_{ix} بردار ممان نیروی f_i حول مرکز میز بالایی می‌باشند. می‌توان نشان داد که ممان نیروی f_i حول مرکز میز بالایی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$m_i = r_i \times f_i \quad (37)$$

که در آن، r_i بردار فاصله f_i تا مرکز است. شکل ۳ تصویر شماتیک مکانیزم و بردارهای مفاصل کروی (s) را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان r_i را چنین تعریف کرد.

$$r_i = R s_i \quad (38)$$

این رابطه نشان می‌دهد که s_i در دستگاه مختصات محلی دوران یافته و r_i در دستگاه مختصات عمومی تعریف می‌شود. لذا به کمک روابط (۳۷) و (۳۸) می‌توان رابطه (۳۶) را مطابق زیر بازنویسی کرد.

$$M_i = R s_i \times f_i n_i \quad (39)$$

و با جای گذاری این رابطه در معادله (۳۶) خواهیم داشت.

$$\begin{cases} f_1 n_{1x} + \dots + f_6 n_{6x} = g_x \\ f_1 n_{1y} + \dots + f_6 n_{6y} = g_y \\ f_1 n_{1z} + \dots + f_6 n_{6z} = g_z \\ \{R s_1 \times f_1 n_1\}_x + \dots + \{R s_6 \times f_6 n_6\}_x = m_x \\ \{R s_1 \times f_1 n_1\}_y + \dots + \{R s_6 \times f_6 n_6\}_y = m_y \\ \{R s_1 \times f_1 n_1\}_z + \dots + \{R s_6 \times f_6 n_6\}_z = m_z \end{cases} \quad (40)$$

می‌توان از f_i ها از سه معادله آخر رابطه (۴۰) فاکتور گرفت و آن را در قالب ماتریس (یک دستگاه معادلات خطی) به صورت زیر نوشت:

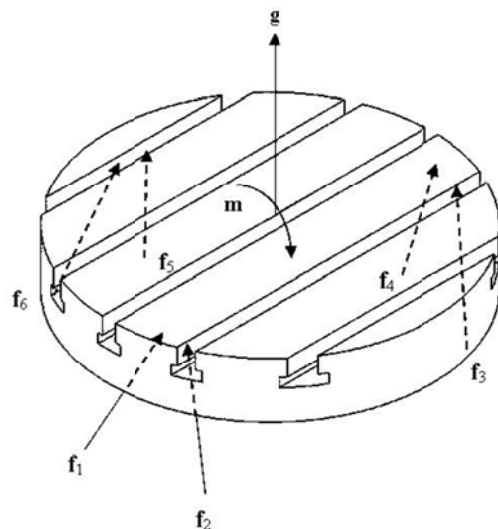
$$\begin{bmatrix} n_{1x} & n_{2x} & n_{3x} & n_{4x} & n_{5x} & n_{6x} \\ n_{1y} & n_{2y} & n_{3y} & n_{4y} & n_{5y} & n_{6y} \\ n_{1z} & n_{2z} & n_{3z} & n_{4z} & n_{5z} & n_{6z} \\ \{R s_1 \times n_1\}_x & \dots & \{R s_6 \times n_6\}_x & & & \\ \{R s_1 \times n_1\}_y & \dots & \{R s_6 \times n_6\}_y & & & \\ \{R s_1 \times n_1\}_z & \dots & \{R s_6 \times n_6\}_z & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \\ m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (41)$$

ماتریس ضرایب دستگاه معادلات فوق ماتریس تبدیل نیرو نامیده می‌شود و می‌توان آن را به طور مختصر به صورت زیر نوشت [۱۴]:

داخلی مکانیزم توسط محرکه‌ها ایجاد می‌شود در حالی که نیروهای خارجی شامل وزن و نیروی اینرسی می‌شود. اگر برآیند نیروهای داخلی مکانیزم به مرکز سکوی بالایی منتقل شود برداری را می‌توان تشکیل داد که شامل سه مؤلفه نیرو و سه مؤلفه ممان است. که، بردار برآیند نیروهای داخلی مکانیزم نامیده می‌شود. شکل ۵ تصویری از نیروهای داخلی مکانیزم و بردار برآیند را ارائه می‌دهد. در این شکل، نیروی g و ممان m برآیند نیرو و ممان داخلی مکانیزم است که به صورت برداری مطابق زیر تعریف می‌شود. بردار برآیند نیز که با w نشان داده می‌شود به صورت زیر تعریف می‌شود [۷].

$$\begin{aligned} f &= [F_x \quad F_y \quad F_z]^T \\ m &= [M_x \quad M_y \quad M_z]^T \end{aligned} \quad (34)$$

نیروهای f_1, \dots, f_6 نیز نیروهای عکس‌العمل پایه‌ها می‌باشند.



شکل (۵): میز بالایی و نیروهای اعمال شده به آن.

از آنجایی که نیروهای وارد شده به پایه‌ها (محرکه‌ها) تنها در دو انتهای آن‌ها عمل می‌کنند، لذا پایه‌ها عضوهای دو نیرویی به شمار رفته بنابراین راستای نیروهای اعمال شده به آن‌ها با راستای خود پایه‌ها یکی می‌باشد. لذا می‌توان نیروی f_i را به صورت زیر تعریف کرد [۳].

$$f_i = f_i n_i \quad (35)$$

که در آن، n_i بردار یکه پایه i ام است. رابطه زیر مؤلفه‌های بردار برآیند را نشان می‌دهد.

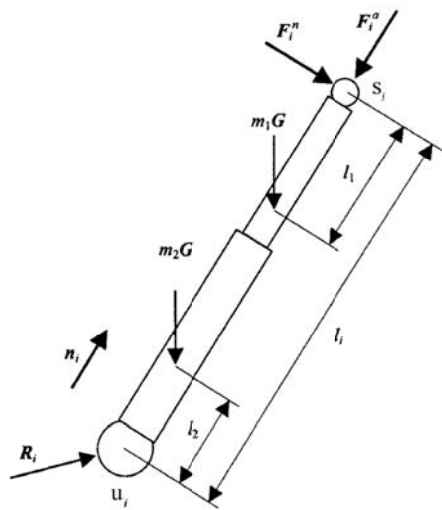
شامل نیروهای گرانشی در قسمت‌های ۱ و ۲ و نیروها و گشتاورهای وارد شده به مفصل می‌باشند. با استفاده از معادلات (۴۵) و (۴۶) می‌توان نوشت:

$$N_i = I_i n_i \times F_i^n + m_i c_i \quad (47)$$

که N_i از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$N_i = -m_1(l_i - l_1)n_i \times G - m_2 l_2 n_i \times G + (\bar{I}_1 + \bar{I}_2)\alpha_i \quad (48)$$

$$- (\bar{I}_1 + \bar{I}_2)\omega_i \times \omega_i + m_1(l_i - l_1)n_i \times a_{i1} + m_2 l_2 n_i \times a_{i2}$$



شکل (۶): مؤلفه نیروهای وارد شده به مفصل i.

برای عملگرهای متقارن محوری، تانسورهای ممان اینرسی \bar{I}_1 و \bar{I}_2 را می‌توان با استفاده از مقادیر اسکالر \bar{I}_{aa1} ، \bar{I}_{aa2} ، \bar{I}_{nn1} و \bar{I}_{nn2} که به ترتیب نشان دهنده ممان اینرسی جرمی در امتداد محوری و عمود بر جهت عملگر مربوط به قسمت‌های ۱ و ۲ می‌باشند.

$$(\bar{I}_1 + \bar{I}_2)\alpha_i = (\bar{I}_{aa1} + \bar{I}_{aa2})(\alpha_i \cdot n_i)n_i + (\bar{I}_{nn1} + \bar{I}_{nn2})n_i \times (\alpha_i \times n_i) \quad (49)$$

$$(\bar{I}_1 + \bar{I}_2)\omega_i = (\bar{I}_{aa1} + \bar{I}_{aa2} - \bar{I}_{nn1} - \bar{I}_{nn2})(\omega_i \cdot n_i)n_i \quad (50)$$

با تعیین شدن m_i و جای‌گذاری در معادله (۴۸) می‌توان نوشت:

$$F_i^n = (N_i \times n_i - m_i c_i \times n_i) / l_i \quad (51)$$

که

$$m_i = (N_i \cdot n_i) / (c_i \cdot n_i) \quad (52)$$

برای مفاصل کروی بدون اصطکاک، در معادله (۵۰) ترم m_i صفر می‌گردد. بنابراین، فقط ترم $(\bar{I}_{nn1} + \bar{I}_{nn2})(\alpha_i \times n_i)$ غیر صفر می‌باشند.

$$J_f = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & n_3 & n_4 & n_5 & n_6 \\ \{Rs_1 \times n_1\} & \dots & \{Rs_6 \times n_6\} \end{bmatrix} \quad (42)$$

رابطه (۴۳) بیانگر یک تبدیل ماتریسی است که فضای برداری نیروهای پایه‌ها را به فضای برداری نیرو و ممان برآیند مکانیزم تبدیل می‌کند.

۳-۳- معادلات دینامیکی عملگر

در این قسمت بردارهای شتاب a_{i1} و a_{i2} مربوط به قسمت‌های دورانی و ایستای عملگر الکترومکانیکی (شکل ۶) تعیین می‌گردند. قسمت ۱ شامل پیچ و شفت خروجی بوده و دارای حرکت دورانی و انتقالی بوده و قسمت ۲ شامل قسمت‌های دیگر بوده که فقط حرکت چرخشی دارد. شتاب مرکز ثقل قسمت‌های ۱ و ۲ از روابط زیر به دست می‌آیند [۱۸].

$$a_{i1} = (l_i - l_1)\omega_i \times (\omega_i \times n_i) + (l_i - l_1)\alpha_i \times n_i + 2\omega_i \times \dot{l}_i n_i + \ddot{l}_i n_i \quad (43)$$

$$\alpha_{i2} = l_2 \omega_i \times (\omega_i \times n_i) + l_2 \alpha_i \times n_i$$

که l_1 و l_2 طول بین مرکز ثقل قسمت‌های ۱ و ۲ و نقاط اتصال آنها در نقاط a_i و b_i به ترتیب می‌باشند. نیروی وارد شده به مفصل i در محل اتصال با سکوی متحرک را می‌توان به دو مؤلفه (شکل ۶) یک در راستای محور F_i^a و دیگری عمود بر آن F_i^n تجزیه نمود:

$$F_i = F_i^a + F_i^n \quad (44)$$

گشتاور وارد شده به مفصل i را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$M_i = m_i c_i \quad (45)$$

که c_i بردار یکه عمود بر دو محور مفصل یونیورسال و m_i مقدار گشتاور عکس‌العمل در این مفصل می‌باشند. میله i همچنین تحت مؤلفه‌های نیروی گرانشی $m_1 G$ و $m_2 G$ در مراکز ثقل قسمت‌های ۱ و ۲ به ترتیب قرار دارد و $G = (0, -g, 0)^T$ که شتاب جاذبه می‌باشد.

بنابراین، برای پایه i می‌توان معادلات نیرو و گشتاور را به صورت زیر نوشت [۱۹]:

$$m_1(l_i - l_1)n_i \times G + m_2 l_2 n_i \times G + l_i n_i \times F_i^n + M_i = (\bar{I}_1 + \bar{I}_2)\alpha_i - (\bar{I}_1 + \bar{I}_2)\omega_i \times \omega_i + m_1(l_i - l_1)n_i \times a_{i1} + m_2 l_2 n_i \times a_{i2} \quad (46)$$

که \bar{I}_1 و \bar{I}_2 به ترتیب تانسور ممان اینرسی قسمت‌های ۱ و ۲ در مختصات مرجع O می‌باشند. سمت چپ معادله (۴۰)

$$f_i = m_i a_{i1} \cdot n_i - f_i^a - m_i G \cdot n_i \quad (60)$$

نیروی برداری F ، شامل شش مؤلفه نیروی عملگرها بوده و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$F = (f_1, \dots, f_6)^T \quad (61)$$

با استفاده از معادله (۶۱) می‌توان نوشت:

$$F = \begin{pmatrix} m_1 (a_{11} - G) n_1 \\ \vdots \\ m_6 (a_{66} - G) n_6 \end{pmatrix} - J_v C \quad (62)$$

بردار نیرو و گشتاور به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\tau = (f_x, f_y, f_z, \tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi) \quad (63)$$

با استفاده از ماتریس ژاکوبین

$$\tau = J^T F, \quad J = J_v J_1 \quad (64)$$

که

$$J_1 = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & & \\ & 0 & c\phi & s\phi s\theta \\ 0_{3 \times 3} & 0 & s\phi & -c\phi s\theta \\ & 1 & 0 & c\theta \end{bmatrix} \quad (65)$$

و

$$\tau = J^T \begin{pmatrix} m_1 (a_{11} - G) n_1 \\ \vdots \\ m_6 (a_{66} - G) n_6 \end{pmatrix} - J_2^T C \quad (66)$$

معادله (۶۵) حل تحلیلی دینامیک مکانیزم استوارت در مختصات کارترین را می‌دهد.

۳-۴- نقطه تکین مکانیزم

به لحاظ حرکتی (از منظر سرعت) در یک نقطه تکین، مکانیزم یا درجه آزادی به دست می‌آورد و یا درجه آزادی از دست می‌دهد. همچنین، از لحاظ نیرویی نیز در یک نقطه تکین تعداد پایه‌های مکانیزم یا برای حفظ تعادل استاتیکی کفایت نمی‌کنند و یا این‌که قید اضافی اعمال می‌کنند. به سادگی می‌توان برداشت کرد که عدم تعادل استاتیکی به مفهوم به دست آوردن درجه آزادی مکانیزم تلقی می‌شود. این‌که سکوی بالایی از نظر استاتیکی نامعین است نیز به مفهوم از دست دادن درجه آزادی محسوب می‌شود. لذا مفاهیم ناپایداری از دو منظر نیرو و سرعت یکسان است. ناپایداری حرکتی در مکانیزم هگزپاد به زبان ریاضی به صفر بودن دترمینان ماتریس ژاکوبین سرعت مکانیزم (رابطه ۲۹) تعبیر می‌شود. همین‌طور روابط ریاضی برای بررسی ناپایداری استاتیکی مکانیزم، صفر بودن دترمینان ماتریس تبدیل نیرویی مکانیزم می‌باشد. بنابراین، در این حالت‌ها مکانیزم، در حالت تکین قرار دارد [۱۲]. این مطلب به این

با تعیین نمودن مؤلفه نیروی عمودی F_i^n و گشتاور عکس‌العمل M_i منتقل شده به مفصل یونیورسال، می‌توان مؤلفه بار محوری نیروی F_i^a را از رابطه زیر به دست آورد:

$$F_i^a = f_i^a n_i \quad (53)$$

که f_i^a شامل مقدار و علامت F_i^a می‌باشد. شش معادله با مقادیر اسکالر f_i^a را می‌توان با جمع مؤلفه‌های نیرو و گشتاور وارد شده به سکوی بالایی توسط شش پایه را به دست آورد [۱۸ و ۲۰]:

$$\sum_{i=1}^6 f_i n_i - \sum_{i=1}^6 F_i^n + m_p G = m_p \ddot{x}_g \quad (54)$$

$$m_p \bar{r} \times G - \sum_{i=1}^6 f_i^a R a_i \times n_i - \sum_{i=1}^6 R a_i \times F_i^n - \sum_{i=1}^6 M_i \quad (55)$$

$$= \bar{I}_p \alpha - \bar{I} \omega \times \omega + m_p (\bar{r} \times \ddot{x}_g)$$

که m_p جرم سکوی متحرک بوده و \ddot{x}_g شتاب مرکز ثقل می‌باشند، که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\ddot{x}_g = \ddot{0} + \alpha \times \bar{r} + \omega \times (\omega \times \bar{r}), \quad \bar{r} = R r_A \quad (56)$$

که، r_A بردار مرکز ثقل سکوی بالایی نسبت به مختصات A ، بوده و \bar{I}_p ممان اینرسی جرمی سکوی متحرک نسبت به مختصات کلی O می‌باشد. رابطه آن با ممان اینرسی جرمی سکوی بالایی در مختصات A از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\bar{I}_p = R I_p R^T \quad (57)$$

معادلات (۵۴) و (۵۵) یک دستگاه معادلات خطی شش تایی به صورت زیر تشکیل می‌دهند:

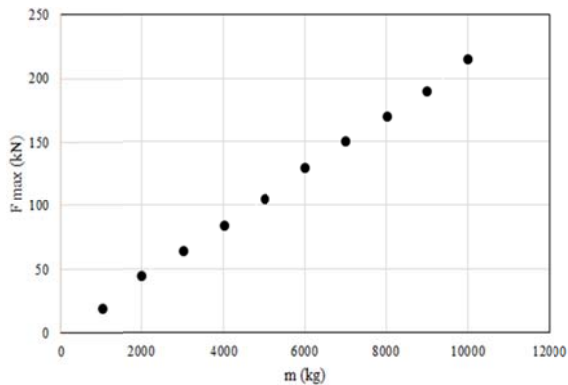
$$\begin{pmatrix} f_1^a \\ \vdots \\ f_6^a \end{pmatrix} = J_v C \quad (58)$$

که J_v ژاکوبین سرعت بوده و C از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۸]:

$$C = \begin{Bmatrix} m_p \ddot{x}_g - m_p G - \sum_{i=1}^6 F_i^n \\ m_p \bar{r} \times G - m_p (\bar{r} \times \ddot{x}_g) - \bar{I}_p \alpha - \bar{I} \omega \times \omega \\ - \sum_{i=1}^6 R a_i \times F_i^n - \sum_{i=1}^6 M_i \end{Bmatrix} \quad (59)$$

باید توجه داشت که در مفصل یونیورسال M_i از پایه به میله منتقل می‌شود. برای مفصل کروی $\sum_{i=1}^6 M_i$ در معادلات (۵۵) و (۵۹) صفر می‌باشد. نیروی f_i که به صورت محوری توسط مکانیزم بال اسکرو به مهره اعمال می‌گردد، برابر با مجموع نیروهای محوری اعمال شده به میله لوله‌ای شکل و پیچ (قسمت ۱) می‌باشد.

شتاب‌های داده شده خطی و زاویه‌ای داده شده در جدول، و وزن محوله و متعلقات، نیروی وارد شده بر سکوی بالایی مکانیزم محاسبه می‌شود. تحلیل نیرو برای وزن‌های مختلف کابین با توجه به سرعت و شتاب جدول ۱ انجام شده است. در جدول ۲ بیشینه نیروی وارد شده توسط هر پایه به سکوی بالایی به‌ازای وزن‌های مختلف کابین نشان داده شده است. همچنین ماکزیمم نیرو به‌ازای وزن‌های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل نیرویی مکانیزم نشان می‌دهد که برای وزن 3000 kg بیشترین نیروی وارد شده به یک پایه برابر 65 kN است. همچنین ماکزیمم سرعت مورد نیاز برای به‌حرکت درآوردن یک پایه 300 mm/sec است.



شکل (۷): نیروی ماکزیمم وارد شده به سکوی بالایی به‌ازای وزن‌های مختلف کابین.

خاطر است که در یک نقطه تکین مکانیزم درجه آزادی از دست می‌دهد به این مفهوم که مکانیزم آزادی لازم برای حرکت نرم و پیوسته را از دست می‌دهد و درواقع قفل می‌کند. حتی در نزدیکی یک نقطه تکین نیز مکانیزم دچار مشکل خواهد بود چرا که نیروهای اعمال شده به پایه‌ها بسیار بزرگ است. به‌عبارت بهتر می‌توان گفت که نزدیک نقطه تکین پایه‌ها به یکدیگر نیرو اعمال می‌کنند و این تنها به سبب موقعیت مکانیزم در وضعیت خاص است که اصطلاحاً آن‌را حالت تکین می‌نامند. لذا تحلیل نیرویی و سرعتی مکانیزم در فضای کاری آن در مرحله طراحی اهمیت بسیاری دارد.

۴- طراحی اجزاء سازه

سرعت‌ها و شتاب‌های خطی و زاویه‌ای مورد نظر در طراحی این مکانیزم در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱): شتاب و سرعت در نظر گرفته شده در طراحی.

	عرضی	طولی	عمودی	Pitch	Roll	Yaw
سرعت	۲۴ in/s	۲۴ in/s	۲۴ in/s	۱۵ deg/s	۱۵ deg/s	۱۵ deg/s
شتاب	۰/۶ g	۰/۶ g	۰/۶ g	۵۰ deg/s ²	۵۰ deg/s ²	۵۰ deg/s ²

مقادیر شتاب نشان داده شده در جدول ۱، شتاب در نظر گرفته شده در طراحی دستگاه شبیه‌ساز بوده و با توجه به

جدول (۲): نیروهای وارد شده به سکوی بالایی به‌ازای وزن‌های مختلف کابین.

وزن (kg)	پایه اول (kN)	پایه دوم (kN)	پایه سوم (kN)	پایه چهارم (kN)	پایه پنجم (kN)	پایه ششم (kN)	ماکزیمم نیرو (kN)
۱۰۰۰	۵/۸۸	۵/۸۸	۱۵/۶۸	۱/۳۷	۱/۳۷	۱/۳۷	۲۰
۲۰۰۰	۱۱/۷۶	۱۱/۷۶	۳۱/۳۶	۴/۳۶	۴/۳۶	۴/۳۶	۴۵
۳۰۰۰	۱۷/۶۴	۱۷/۶۴	۴۷/۰۴	۸/۵۸	۸/۵۸	۸/۵۸	۶۵
۴۰۰۰	۲۳/۵۲	۲۳/۵۲	۶۲/۷۲	۱۳/۵۸	۱۳/۵۸	۱۳/۵۸	۸۵
۵۰۰۰	۲۹/۴	۲۹/۴	۷۸/۴	۲۰/۰۹	۲۰/۰۹	۲۰/۰۹	۱۰۵
۶۰۰۰	۳۵/۲۸	۳۵/۲۸	۹۴/۰۸	۲۷/۲۲	۲۲/۲۲	۲۲/۲۲	۱۳۰
۷۰۰۰	۴۱/۱۶	۴۱/۱۶	۱۰۹/۷	۳۵/۲	۳۵/۲	۳۵/۲	۱۵۰
۸۰۰۰	۴۷/۰۴	۴۷/۰۴	۱۲۵/۴	۴۳/۹۸	۴۳/۹۸	۴۳/۹۸	۱۷۰
۹۰۰۰	۵۲/۹۲	۵۲/۹۲	۱۴۱/۱	۵۳/۵۲	۵۳/۵۲	۵۳/۵۲	۱۹۰
۱۰۰۰۰	۵۸/۸	۵۸/۸	۱۵۶/۸	۶۳/۷۹	۶۳/۷۹	۶۳/۷۹	۲۱۵

که در آن، P گام پیچ بال اسکرو است که برابر 10 mm در نظر گرفته شده است. ω نیز سرعت دورانی الکتروموتور برحسب دور بر دقیقه است. به این ترتیب سرعت مورد نیاز الکتروموتور برابر 1800 rpm است. برای محاسبه توان مورد نیاز الکتروموتور از رابطه زیر استفاده شده است.

$$P = F \times V = 65 \times 0.3 = 19.5 \text{ kW} \quad (68)$$

بنابراین، الکتروموتور مورد نیاز، یک الکتروموتور با حداکثر دور 2000 rpm و توان 20 kW است. در جدول ۳ توان الکتروموتور مورد نیاز با توجه به وزن‌های مختلف کابین نشان داده است. همچنین نمودار این پارامترها در شکل ۸ نیز نشان داده شده است.

جدول (۳): توان الکتروموتور به‌ازای وزن‌های مختلف کابین.

وزن (Ton)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
توان (KW)	۶	۱۳/۵	۱۹/۵	۲۵/۵	۳۱/۵	۳۹	۴۵	۵۱	۵۷	۶۴/۵

تحلیل سینماتیک برای دورترین نقطه فضای کاری نشان می‌دهد که بیشترین طول مورد نیاز برای یک پایه حدود ۰/۳ m کمترین کورس مورد نیاز پایه نیز از قرار گرفتن مکانیزم در موقعیت اولیه آن و در پایین‌ترین ارتفاع آن است. پایین‌ترین ارتفاع اسکرو ۱/۵ m در نظر گرفته شده است. حل مساله سینماتیک معکوس نشان می‌دهد کوتاه‌ترین طول مورد نیاز پایه ۱/۵۱۳ m است. بنابراین، کورس مورد نیاز پایه برابر ۱/۵ خواهد بود. تعیین قطر محور بال اسکرو از طراحی برای کمانش آن محاسبه می‌شود. نیروی محوری بحرانی که باعث می‌شود پیچ بال اسکرو در آستانه کمانش قرار گیرد از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$P_{cr} = \frac{k\pi^2 EI}{l^2} \quad (69)$$

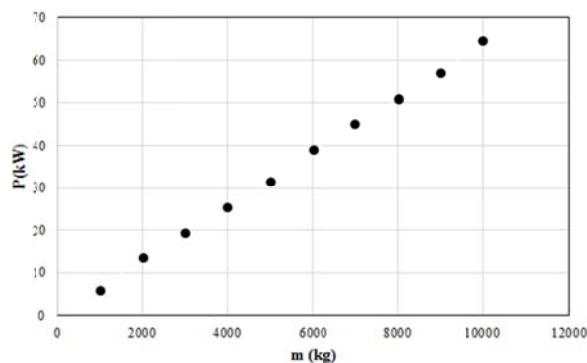
که در آن، k ضریب مربوطه به نحوه یاتاقان‌بندی بال اسکرو (شرایط تکیه‌گاهی) $k=0/25$ برای یک ستون یک سرگیردار و یک سرآزاد، E مدول الاستیسیته 206 GPa برای فولاد آلیاژی، I ممان اینرسی سطح مقطع پیچ، و L طولی از پیچ که در معرض کمانش قرار دارد. L در یک پایه هگزایاد همان طول کورس آن می‌باشد. با جای‌گذاری مقادیر پارامترها در رابطه فوق قطر مورد نیاز پیچ بال اسکرو را به‌دست می‌آید که در رابطه زیر ارائه شده است.

$$d = \sqrt[4]{\frac{64 \times l^2 \times P_{cr}}{0.25 \times \pi^3 \times E}} = \sqrt[4]{\frac{65 \times 1.5^2 \times 190000}{0.25 \times \pi^3 \times 206 \times 10^9}} = 49.1 \text{ mm} \quad (70)$$

۱-۴- طراحی الکتروموتور

برای یک مکانیزم با توجه به سرعت و شتاب مورد نظر سکوی بالایی و نیز وزن سازه‌ای که بر روی سکوی قرار می‌گیرد، نیروی اعمال شده و نیز سرعت مورد نیاز عملگر، با توجه به موقعیت مکانی سکوی بالایی به‌دست می‌آیند. نتایج به‌دست آمده، نشان می‌دهند که، در بدترین وضعیت، این نیرو 65 kN و سرعت 300 mm/s است. تعداد دور لازم موتور در یک دقیقه، که یکی از پارامترهای انتخاب موتور است، از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$\omega = \frac{300 \times 60}{P} = 1800 \text{ rpm} \quad (67)$$



شکل (۸): توان الکتروموتور به‌ازای وزن‌های مختلف کابین.

۲-۴- طراحی محور بال اسکرو

وظیفه محور بال اسکرو تبدیل حرکت دورانی الکتروموتور به حرکت خطی در پایه‌ها است. قطر و طول محور در طراحی مدنظر است. طول محور از کورس حرکتی پایه به دست می‌آید. کورس حرکتی پایه از محدوده فضای کاری مورد نظر به‌دست می‌آید که از ملزومات طرح بوده است. (جدول ۴).

جدول (۴): محدوده فضای کاری مورد نظر در طرح.

چرخش	چرخش	چرخش	عمودی	عرضی	طولی	
عرضی	طولی	عمودی	عمودی	عرضی	طولی	فضای کاری
±۲۶ deg	±۲۲ deg	±۲۶ deg	±۳۲ in	۴۸ in	۴۸ in	

۵-۱- بررسی اثر پارامترهای مختلف بر نیرو و سرعت عملگرها

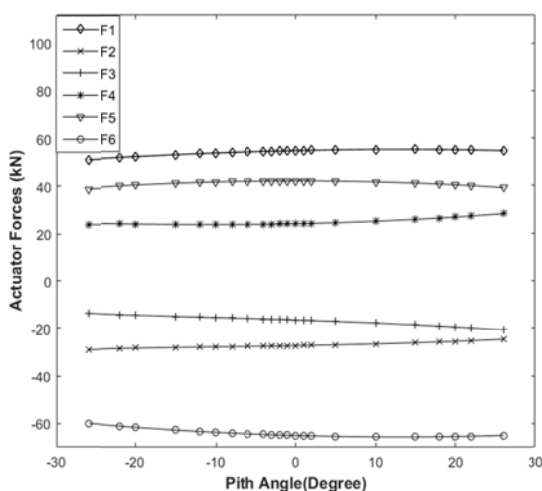
به‌منظور به‌دست آوردن نتایج عددی اثر پارامترهای مختلف مربوط به سکوی بالایی، موقعیت سکو بالایی همانند جدول ۵ در نظر گرفته شده است.

جدول (۵): موقعیت در نظر گرفته شده برای سکوی بالایی.

طول	عرضی	عمودی	چرخش عمودی	چرخش طولی	چرخش عرضی
۱/۱۸۰۸ m	۱/۱۸۰۸ m	۰/۷۳۶۶ m	-۱۸ deg	۲۲ deg	-۱۸ deg

۵-۱-۱- اثر زاویه پیچ

نمودارهای سرعت و نیروهای وارده بر شش عملگر برای حالتی از موقعیت سکوی بالایی مطابق جدول ۵ که فقط زاویه پیچ متغیر می‌باشد، در اشکال ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. مشاهده اشکال نشان می‌دهند که نیروهای وارده به بعضی از عملگرها با افزایش زاویه پیچ، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابند. همچنین سرعت عملگرها به‌جز عملگر ۱ و ۲، با افزایش زاویه پیچ کاهش می‌یابند.



شکل (۱۱): نیروهای وارد شده به عملگرها با تغییر زاویه پیچ.

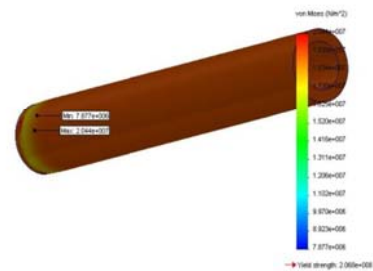
پیچ.

با در نظر گرفتن ضریب اطمینان می‌توان گفت که قطر مورد نیاز پیچ بال اسکرو برابر ۶۰ mm است. با در نظر گرفتن ابعاد و اندازه‌های موجود در بازار قطر ۶۳ mm پیشنهاد می‌شود.

۴-۳- طراحی غلاف پایه

برای چک کردن طراحی این عضو از تحلیل المان محدود استفاده شده است که شکل ۹ توزیع تنش فون-میسز^۱ در این عضو را نشان می‌دهد نیروی اعمال شده به این عضو همان‌گونه که قبلاً نیز ارائه شد معادل ۶۵ kN در نظر گرفته شده است. ضریب اطمینان به‌دست آمده از تحلیل المان محدود برابر ۱۰ است که نشان دهنده ایمن بودن طرح می‌باشد.

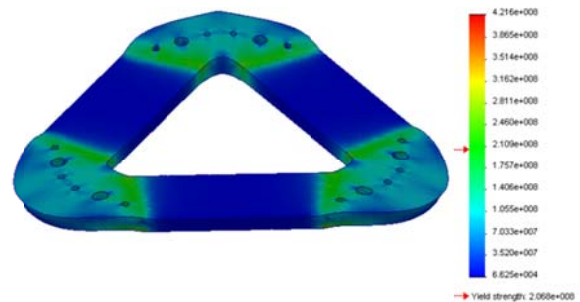
Model Name: Cover
Study Name: COGMCopressStudy
Part Type: Static node driven Part
Deformation Scale: 388.432



شکل (۹): توزیع تنش فون میسز در قطعه.

۴-۴- طراحی سکوی پایینی

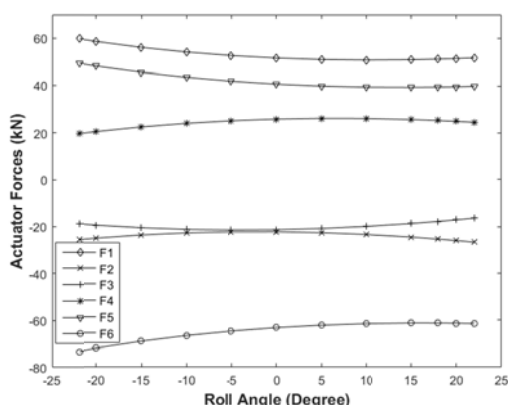
برای محاسبه تنش سکوی پایینی، از تحلیل المان محدود کمک گرفته شده است که تنش فون میسز آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نیروی اعمال شده به این عضو همان‌گونه که قبلاً نیز ارائه شد معادل ۶۵ kN در نظر گرفته شده است.



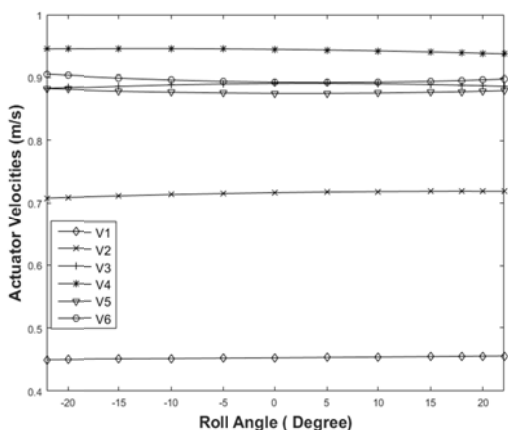
شکل (۱۰): توزیع تنش فون میسز سکوی پایینی.

۵-۱-۳- اثر زاویه رول

شکل‌های ۱۵ و ۱۶ اثر تغییر زاویه رول بر نیرو و سرعت عملگرها را نشان می‌دهند. نتایج برای همان موقعیت سکوی بالایی (جدول ۵)، به جز این که زاویه رول در این حالت متغیر است، نشان داده شده است. مشاهده نتایج، نشان می‌دهند که نیروهای وارده به بعضی از عملگرها با افزایش زاویه رول، ابتدا کاهش و سپس افزایش و در بعضی دیگر از عملگرها بر عکس می‌باشد.



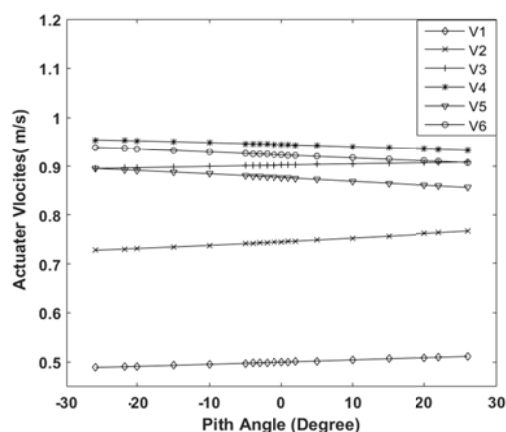
شکل (۱۵): نیروهای وارده به عملگرها با تغییر زاویه رول.



شکل (۱۶): سرعت‌های مربوط به عملگر با تغییر زاویه رول

۵-۱-۴- اثر شتاب خطی سکوی بالایی

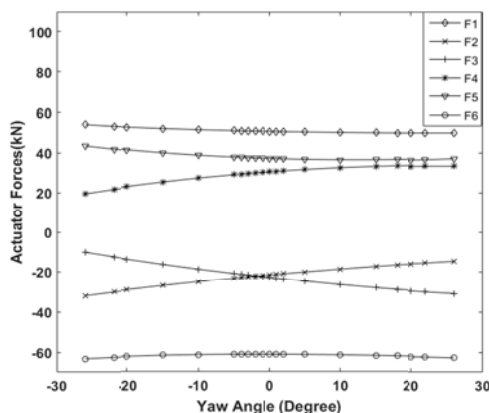
برای بررسی اثر سرعت و شتاب خطی و زاویه‌ای موقعیت سکوی بالایی مطابق جدول ۵ می‌باشند. شکل ۱۷ نیروهای وارد بر شش عملگر برحسب شتاب خطی (با ثابت مانده شتاب‌های زاویه‌ای سکوی بالایی) را نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که نیروی وارد شده به همه عملگرها به جز عملگر سوم با افزایش شتاب خطی سکوی بالایی، افزایش می‌یابد. که کاهش در نیروی عملگر سوم به خاطر موقعیت در نظر گرفته برای سکوی بالایی می‌باشد.



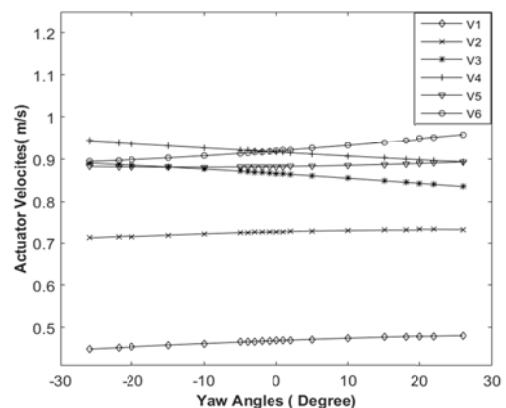
شکل (۱۷): سرعت‌های مربوط به عملگر با تغییر زاویه پیچ

۵-۱-۲- اثر زاویه یاو

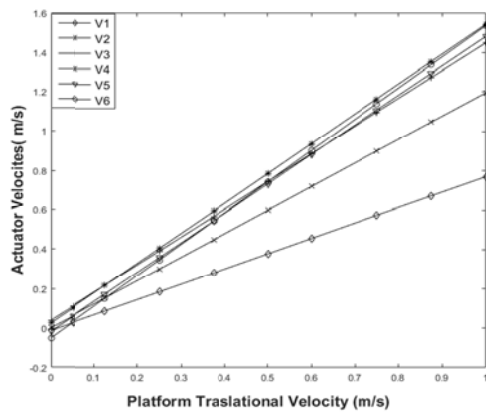
اثر تغییر زاویه یاو بر نیروها و سرعت عملگرها در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ برای همان موقعیت سکوی بالایی (جدول ۶) به جز این که زاویه یاو در این حالت متغیر بوده، نشان داده شده است. نتایج، نشان می‌دهند که نیروهای وارده به بعضی از عملگرها با افزایش زاویه یاو، ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابند.



شکل (۱۸): نیروهای وارد شده به عملگرها با تغییر زاویه یاو.



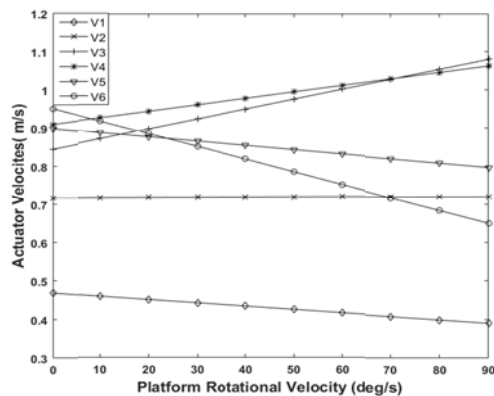
شکل (۱۹): سرعت‌های مربوط به عملگرها با تغییر زاویه یاو.



شکل (۱۹): نمودار تغییرات سرعت عملگرها بر حسب سرعت خطی سکوی بالایی.

۵-۱-۷- اثر سرعت زاویه‌ای سکوی بالایی

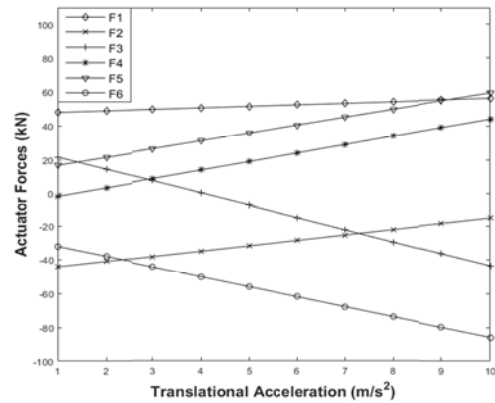
شکل ۲۰ سرعت‌های مربوط به عملگرها با تغییر سرعت زاویه‌ای سکوی بالایی (با ثابت مانده سرعت خطی سکو) را نشان می‌دهد بررسی نتایج به دست آمده، نشان می‌دهند که با تغییر سرعت زاویه‌ای سکو، سرعت خطی بعضی از عملگرها افزایش و بعضی دیگر نیز کاهش می‌یابد.



شکل (۲۰): نمودار تغییرات سرعت عملگرها بر حسب سرعت دورانی سکوی بالایی.

۶- شبیه‌سازی

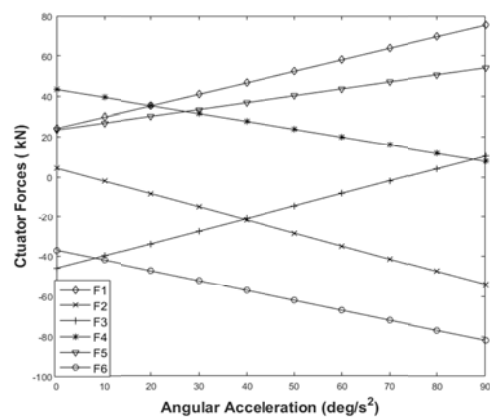
برای شبیه‌سازی از مدول سیم‌مکانیک نرم افزار متلب استفاده شده است. دلیل استفاده از آن، وجود قابلیت‌های منحصر به فرد آن در مدل‌سازی سامانه‌های مکانیکی از جمله مکانیزم‌ها و سازه‌ها و قابلیت آن در شبیه‌سازی سینماتیک آن است. مجموعه یک پایه شامل قسمت بالایی پایه، قسمت پایینی پایه و مفاصل مربوطه در شکل ۲۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل پیداست، یک پایه



شکل (۱۷): نیروهای وارد بر عملگرها بر حسب شتاب خطی سکوی بالایی.

۵-۱-۵- اثر شتاب زاویه‌ای سکوی بالایی

شکل ۱۸ نیروهای وارد بر شش عملگر بر حسب شتاب زاویه‌ای سکوی بالایی (با ثابت مانده شتاب‌های خطی سکو) را نشان می‌دهد. مشاهده نمودار نشان می‌دهد که نیروی وارد شده به همه عملگرها به جز عملگر سوم با افزایش شتاب خطی سکوی بالایی، افزایش می‌یابد. که کاهش در نیروی عملگر چهارم به خاطر موقعیت در نظر گرفته برای سکو بالایی می‌باشد.



شکل (۱۸): نیروهای وارد بر عملگرها با تغییر شتاب زاویه‌ای سکوی بالایی.

۵-۱-۶- اثر سرعت خطی سکوی بالایی

شکل ۱۹ سرعت‌های مربوط به عملگرها با تغییر سرعت خطی سکوی بالایی (با ثابت مانده سرعت زاویه‌ای سکو) را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده، نشان می‌دهند سرعت همه عملگرها با افزایش سرعت خطی سکوی، افزایش می‌یابند

۷- نتیجه‌گیری

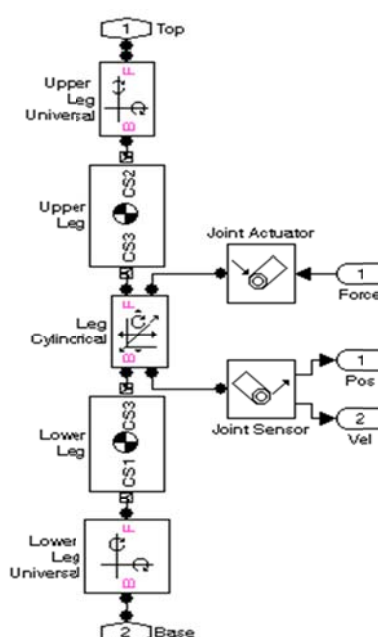
در این مقاله معادلات سینماتیکی و دینامیکی مکانیزم استوارت به‌طور کامل به‌دست آمده سپس با تعیین نیروها و گشتاورها، طراحی قسمت‌های مختلف شبیه‌ساز انجام شده است. سامانه حرکتی طراحی شده در این تحقیق از نوع الکترومکانیکی با وزن محموله متوسط به بالا (۳ تن به بالا) است که محدودیت‌ها و مشکلات سامانه هیدرولیکی را نداشته و هزینه ساخت و نت (نگهداری و تعمیر) بیش از ۵۰ درصد کاهش یافته است.

با توجه به سرعت‌ها و شتاب‌های خطی و زاویه‌ای و همچنین وزن کابین، از حداکثر نیروی وارد شده بر هر پایه و همچنین حداکثر سرعت به‌دست آمده برای محاسبه توان الکتروموتور مورد نیاز و انتخاب الکتروموتور مناسب استفاده شده است. سپس با توجه به کورس حرکتی پایه که از محدوده فضای کاری مورد نظر به‌دست می‌آید، طول شفت بال اسکرو و با استفاده از رابطه کمناش و بیشترین نیروی محوری وارد شده به پایه، قطر آن نیز تعیین شده است. سپس طراحی سکوی پایینی و غلاف پایه نیز با استفاده از نرم‌افزار انسیس با توجه به حداکثر بار وارده به پایه انجام گرفت. محاسبات برای وزن کابین از ۱۰۰۰-۱۰۰۰۰ kg انجام شد که در این شرایط، ماکزیمم نیروی وارد بر یک پایه از ۲۰-۲۱۵ kN تغییر می‌کند. همچنین توان موتور مورد نیاز در محدوده ۶-۶۴/۵ kW به‌دست آمد. قطر پیچ بال اسکرو نیز در محدوده ۲۶/۶۴-۶۶/۳۵ mm محاسبه گردید. اثر زوایای پیچ، رول و یاو، سرعت و شتاب خطی و زاویه‌ای سکوی بالایی بر روی نیرو و سرعت عملگرها نیز نشان داده شده است. در پایان در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی حرکتی مکانیزم انجام گرفت.

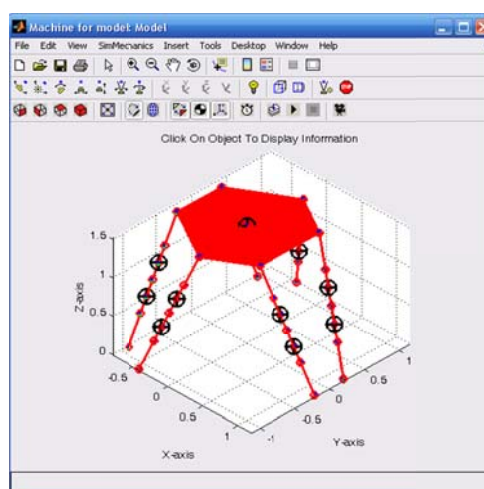
۸- منابع

1. Advani, S. K. "Simulating Aircraft Motions", MS Thesis, Delft University of Technology, Netherland, 1998.
2. Pattinson, J., Lowenberg, M.H. and Goman, M. G. "Multi-Degree-of-Freedom Wind-Tunnel Maneuver Rig for Dynamic Simulation and Aerodynamic Model Identification", Journal of Aircraft, Vol. 50, No. 2, pp. 551-566. 2012.
3. Lee, T. Y., Shim, J. K. "Forward Kinematics of the General 6-6 Stewart Platform Using Algebraic Elimination", Mechanism and Machine Theory, Vol. 36, pp. 1073-1085, 2001.

شامل قسمت پایینی، قسمت بالایی، دو مفصل دو درجه آزادی و یک مفصل ترکیبی خطی و دورانی است. قسمت پایینی پایه شامل مجموعه قطعات نگهدارنده پایه و یاتاقان‌های آن است. قسمت بالایی نیز شامل پیچ بال اسکرو، مهره آن، و یک غلاف فولادی است که حرکت مهره را به سکوی بالایی منتقل می‌نماید. مدول متلب-سیم‌مکانیک قادر است خروجی را به‌صورت گرافیکی و حرکت را به‌صورت انیمیشن نمایش دهد. در شکل ۲۲ تصویری از خروجی مکانیزم نشان داده شده است.



شکل (۲۱): مدل مکانیکی مجموعه یک پایه.



شکل (۲۲): نمایش گرافیکی مکانیزم و حرکت آن در

MATLAB/SimMechanics

13. Xi, F. "A Comparison Study on Hexapods with Fixed-Length Legs", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, pp. 1735–1748, 2001.
14. Wang, Z., Liu, W. and Lei, Y. "A Study on Workspace, Boundary Workspace Analysis and Work Piece Positioning for parallel Machine Tools", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 36, pp. 605–622, 2001.
15. Ding, B., Cazzolato, B.S., Stanley, R.M., Grainger, S. and Costi, J.J., "Stiffness Analysis and Control of a Stewart Platform-Based Manipulator with Decoupled Sensor-Actuator Locations for Ultrahigh Accuracy Positioning Under Large External Loads", *J. of Dyn. Sys. Measurement, and Control*, Vol. 136, pp. 061008-1-12, 2014.
16. Damic, V. and Cohodar, M. "Dynamic Analysis of Stewart Platform by Bond Graphs", *Procedia Engineering*, Vol. 100, pp. 226-233, 2015.
17. Li, D. and Salcudean, S. E. "Modeling, Simulation, and Control of a Hydraulic Stewart Platform", *Proceedings of International Conference on Robotics and automation, IEEE International Conference*, 1997.
18. Harib, K. and Srinivasa, K.N., "Kinematic and Dynamic Analysis of Stewart Platform based Machine Tool Structures", *Robotica*, Vol. 21, pp. 541-554, 2003.
19. Ji, Z. "Study of the Effect of Leg Inertia in Stewart Platform", *Proc. of the IEEE Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 212–226, 1993.
20. Oftadeh, R., Aref, M.M. and Taghirad, H. "Modeling Simulation & Control of 6-DOF Parallel Manipulator using PID Controller and Compensator", *Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems*, Kanpur, India Deno, 2014.
4. Dieudonne, J. E., Parrish, R. V. and Barduscb, R. E. et al. "An Actuator Extension Transformation for a Motion Simulator and an Inverse Transformation Applying Newton-Raphson Method", *NASA Technical Report D-7067*, 1972.
5. Fichter, E.F. "A Stewart Platform Based Manipulator: General Theory and Practical Considerations" *International Journal of Robotics Research*, Vol. 5, No. 2, pp. 157–182, 1986.
6. Hunt, K.H. "Structural Kinematics of in-Parallel-Actuated Robot Arms", *Trans. ASME J. Mech. Transmis. Autom. Des.* Vol. 105, pp. 705--712, 1983.
7. Merlet, J.P., Gosselin, C.M., and Mouly, N. "Workspace of Planar Parallel Manipulators", *Mechanism and Machine Theory*", Vol. 33, No.1, pp. 7–20, 1998.
8. Pakzad, P., Mahboubkhah "Kinematic and Dynamic Analysis of 2-PR(Pa)U-2-PR(Pa)R Parallel Mechanism", *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-17, 2018. (in Persian)
9. Carretero, J.G.H., Nieto, F.J.S. and Cordón, R.R. "Aircraft Trajectory Simulator Using a three Degrees of Freedom Aircraft Point Mass Model", *In Proceedings of the 3rd International Conference on Application and Theory of Automation in Command and Control Systems*, pp. 114-117, ACM, 2013.
10. Gosselin, C. "Determination of a Workspace of 6-DOF Parallel Manipulators", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 112, pp. 331–336, 1990.
11. Masory, O. and Wang, J. "Workspace Evaluation of Stewart Platforms", *Advanced Robotics*, Vol. 9, No. 4, pp. 443–461, 1995.
12. Dasgupta, B. and Mruthyunjaya, T.S. "Singularity-free Path Planning for the Stewart Platform Manipulator", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 33, No. 6, pp. 711-725, 1998.