

دینامیک معکوس بازوی ماهر استوارت - گوف با کاربرد در سامانه‌های شبیه‌ساز پرواز

ابولفتح نیک‌رنجبر

استادیار، دانشکده مکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، کرج، a.nikranjbar@kiauo.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۱۳

چکیده

پیش‌بینی مناسب اندازه نیروها در عملگرهای خطی با اهداف انتخاب موتورهای مناسب و یا طراحی سازه سامانه حرکتی شبیه‌سازهای پرواز، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. در این مقاله تحلیل دینامیک معکوس سامانه حرکتی ۶ درجه آزادی استوارت - گوف با رویکرد نیوتن - اولر مطابق با فرمول‌بندی اجزای بازوی ماهر و سکوی متحرک با چشم انداز کاربرد در شبیه‌سازهای پرواز ارائه شده است. در شبیه‌سازی سامانه نرم‌افزاری تهیه شده از نتایج خروجی سامانه حرکت‌ساز شبیه‌ساز پرواز کنترل پیش‌بین بر پایه سینماتیک معکوس سامانه حرکتی در مانور نمونه به عنوان ورودی مدل دینامیک معکوس جهت محاسبه نیروهای دینامیکی و استاتیکی عملگرها استفاده شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی، نشان‌دهنده اختلاف قابل توجه و کاملاً نامتناسب نیروهای عملگرها در بارگذاری استاتیک و دینامیک متناظر با سینماتیک معکوس مورد نظر را داشته و ضرورت توجه به نیروهای دینامیکی حاصل از حل سینماتیک معکوس در طراحی مکانیزم و انتخاب عملگرها را محرز می‌نماید.

واژگان کلیدی

دینامیک معکوس، سینماتیک معکوس، سکوی استوارت - گوف، شبیه‌ساز پرواز، سامانه حرکت‌ساز پیش‌بین.

۱. مقدمه

سمت ارائه رویکردهای کارآمد در استفاده از سینماتیک معکوس سامانه حرکتی در سیستم حرکت‌ساز بوده است، ولی به همین نسبت سهم کمتری از پژوهش‌های منتشر شده به تحلیل دینامیک معکوس این مکانیزم پرکاربرد تخصیص یافته‌اند [۱]. وظیفه سامانه حرکت‌ساز در شبیه‌سازها، تحلیل حرکت‌های از پیش تعیین شده برای ایجاد حس حرکتی مطلوب است. در همین راستا، تخمین مناسب نیروهای آنی مورد نیاز در عملگرها از وجوه مختلف اعم از انتخاب موتورهای الکتریکی، عملگرهای خطی هیدرولیک یا پنوماتیک با قدرت مناسب و نیز تامین اطلاعات

بازوی ماهر موازی ۶ درجه آزادی استوارت - گوف^۱ با ویژگی‌های قابل توجه نظیر نسبت نیرو به وزن، سختی، سرعت و دقت بالا در مقایسه با بازوهای ماهر سری، از پرکاربردترین سامانه‌های حرکتی در شبیه‌سازهای پرواز محسوب می‌شود. امروزه با درک لزوم توسعه حرکت به شبیه‌سازهای پرواز با هدف ایجاد هر چه واقعی‌تر حس حرکت، سامانه‌های حرکتی به عنوان جزء جدایی‌ناپذیری از سامانه‌های حرکت‌ساز محسوب می‌شوند. اگر چه ضرورت کاربرد بهینه فضای کاری سامانه حرکتی، موجب گرایش پژوهش‌ها به

طراحی سازه شبیه‌ساز نیز از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. مرور پژوهش‌های منتشر شده نشان از تلاش محققان در ورود به این عرصه به دلیل اهمیت حل مسئله دینامیک معکوس بازوی ماهر استوارت دارد. اگر چه در حوزه شبیه‌سازهای پرواز به علت توسعه رویکردهای سامانه‌های حرکت‌ساز، ضرورت مطالعه دینامیک معکوس در پاسخ‌گویی به نیازهای طراحی یک پارچه سامانه‌های حرکت‌ساز کماکان حس می‌شود.

رویکردهای مدل‌سازی پایه در تحلیل دینامیک سیستم‌های مکانیکی شامل روش نیوتن - اولر با توجه به اثر اینرسی عملگرها در دینامیک سکوی استوارت، اصل کار مجازی و روش لاگرانژ مبتنی بر مفهوم کار و انرژی، مورد توجه محققین این عرصه بوده‌اند. در همین راستا پژوهش داگپوستا و میرتیونجای در مرجع [۲] از جمله منابع مرتبط با استفاده از رویکرد نیوتن - اولر محسوب می‌شود. اگر چه در برخی مراحل نظیر تعریف چارچوب‌های محلی عملگرها با سایر منابع نظیر [۳، ۴] اختلاف مشاهده می‌شود که به نظر، محل توجه و مطالعه مقایسه‌ای است. رویکرد نیوتن - اولر به عنوان رویکرد اصلی در فرمول‌بندی دینامیک معکوس بازوی ماهر استوارت در پژوهش‌های [۴، ۵] مورد استفاده قرار گرفته است.

حل مسئله دینامیک معکوس بازوی ماهر استوارت - گوف از روش‌های کار مجازی و روش لاگرانژ نیز مورد توجه محققین بوده است. در همین راستا تسای مسئله دینامیک معکوس بازوی ماهر استوارت - گوف از روش کار مجازی را مورد مطالعه قرار داده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در تخمین نیروهای عملگرها برای دو مسیر سکوی متحرک را ارائه نمود [۶]. همچنین کلانی و همکاران فرمول‌بندی دینامیک مستقیم و معکوس بازوی ماهر استوارت - گوف با رویکرد کار مجازی را با ویژگی‌های افزایش دقت همراه با کاهش زمان محاسباتی ارائه نمودند [۷].

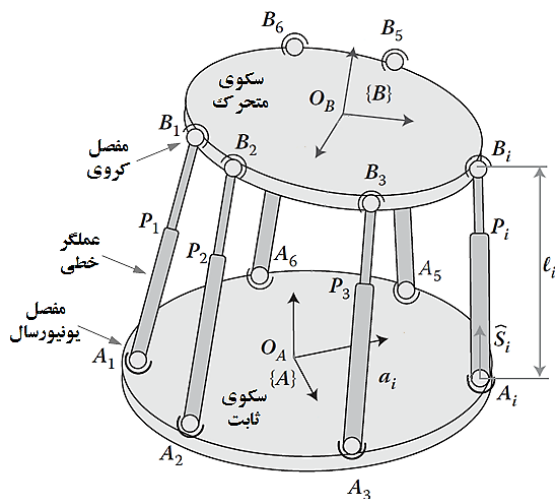
به عنوان نمونه‌هایی از تحقیقات منتشر شده در حل مسئله دینامیک بازوی ماهر استوارت با استفاده از روش لاگرانژ می‌توان به مقاله خلیل و گیگن با هدف کاربرد کنترل [۸] و مقاله مستشاری و همکاران در فرمول‌بندی دینامیک معکوس بازوی ماهر استوارت - گوف اشاره نمود [۹]. صحت سنجی نتایج در مورد اخیر بر اساس دو روش مقایسه با نتایج روش کار مجازی و استفاده از نرم افزارهای تجاری بوده است.

پیچیدگی ذاتی مدل‌سازی بازوی ماهر استوارت به علت ساختار حلقه بسته و قیود سینماتیک، موجب تلاش محققان در ارائه رویکردهای محاسباتی با ویژگی‌های سرعت بالا و حجم محاسباتی کم شده است. در مرجع [۱۰] رویکرد ممتوم تعمیم یافته در مدل‌سازی دینامیکی بازوی ماهر استوارت ارائه شده است. نتایج این رویکرد در مقایسه با حجم محاسباتی روش لاگرانژ و مزیت این روش در کاهش حجم محاسبات عبارت‌های شتاب کوریولیس و جانب مرکز عملگرها اعلام شده است. برخی مقالات از تلاش در کاهش زمان محاسبات دینامیک معکوس بازوی استوارت از رویکرد نیوتن - اولر دارد. در مرجع [۱۱] محمودی و همکاران در راستای کاهش بخشی از محاسبات شامل انتقال بین مختصات بدنی و ثابت و مدل‌سازی اثرات ژیرسکوپیک عملگرها به منظور بهبود سرعت و دقت نتایج، پیشنهاد نموده‌اند. در پژوهش دیگری پدramمهر و محبوب‌خواه تحلیل دینامیک معکوس سکوی استوارت از روش نیوتن - اولر را با الهام از رویکرد مرجع [۴] ارائه نموده‌اند [۱۲]. مجموعه مناسبی از تحلیل‌های سینماتیک، استاتیک و دینامیک بازوهای ماهر موازی از جمله بازوی ماهر استوارت توسط تقی‌راد ارائه شده است [۳] که به علت جامع بودن مرجع، در تهیه این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین به دلیل رویکرد یکپارچه‌سازی فرمول‌بندی مسئله دینامیک معکوس بازوی ماهر استوارت در مرجع [۲]، از این رویکرد جهت جمع‌بندی روابط دینامیک معکوس بازوی ماهر استفاده شده است.

لازم به ذکر است که به علت ویژگی ذاتی سامانه‌های حرکت‌ساز، بردار حالت پیکربندی سکوی متحرک در طی زمان همواره در دسترس است. بنابراین دینامیک معکوس سامانه حرکتی با در دسترس بودن پارامترهای سینماتیکی بازوی ماهر، بصورت صریح قابل حل است. در مقاله حاضر حل مسئله دینامیک معکوس بازوی ماهر استوارت با کاربرد در شبیه‌سازهای پرواز ارائه شده است که به عنوان توسعه پژوهش‌های تدوین سامانه‌های حرکت‌ساز مرجع [۱] محسوب می‌شود. روش مورد استفاده در برپایی مدل دینامیک معکوس بر پایه روش نیوتن - اولر و متکی بر مرجع [۳] بوده و در مرحله نهایی از رویکرد مرجع [۲] در یکپارچه‌سازی روابط استفاده شده است.

بر این اساس نرم افزار شبیه‌سازی یکپارچه طراحی سامانه حرکت‌ساز با حل کننده همزمان دینامیک معکوس و امکان

$$\begin{aligned} r_{13} &= \cos(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) + \sin(\phi) \sin(\psi) \\ r_{21} &= \cos(\theta) \sin(\psi) \\ r_{22} &= \sin(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) + \cos(\phi) \cos(\psi) \\ r_{23} &= \cos(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) - \sin(\phi) \cos(\psi) \\ r_{31} &= -\sin(\phi) \\ r_{32} &= \sin(\phi) \cos(\theta) \\ r_{33} &= \cos(\phi) \cos(\theta) \end{aligned}$$



شکل ۱. سکوی استوارت - گوف با نمادگذاری‌ها و چارچوب‌های نصب شده بر سکوی ثابت و متحرک [۳]

تحلیل سینماتیک معکوس سکوی استوارت بر پایه تعیین طول آنی عملگرهای خطی $l = [l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6]^T$ با فرض معلوم بودن بردار موقعیت ${}^A P$ و جهت‌گیری سکوی متحرک بصورت ماتریس دوران ${}^A R_B$ ، استوار است. بدین منظور حلقه بسته برداری موقعیت عملگر نمونه در پیکربندی دلخواه مطابق شکل (۲) بصورت زیر تعریف می‌شود [۳]:

$$l_i {}^A \hat{s}_i = {}^A P + {}^A b_i - {}^A a_i = {}^A P + {}^A R_B {}^B b_i - {}^A a_i, \quad i = 1, \dots, 6 \quad (2)$$

که نقاط اتصال مفصلی عملگر با سکوی ثابت و متحرک به ترتیب با بردارهای a_i و b_i ، طول و راستای عملگر خطی با l و بردار یکه \hat{s}_i و مبدأ مختصات متحرک $\{B\}$ با بردار ${}^A P (= [x \ y \ z]^T)$ نشان داده شده‌اند. پیش بالانویس A جهت تأکید بر توصیف کلیه متغیرهای برداری در مختصات ثابت $\{A\}$ است.

استفاده از نتایج شبیه‌سازی در اهداف کنترل سامانه حرکتی با هدف تعیین میزان حرکت عملگرها و نیروهای لازم برای مانور مورد نظر با حل کننده کنترل مدل پیش‌بین فراهم گردیده است. در شبیه‌سازی، از نتایج خروجی سامانه حرکت‌ساز شبیه‌ساز پرواز کنترل پیش‌بین در مانور شیب - طولی به عنوان ورودی مقادیر سینماتیک مدل دینامیک معکوس جهت محاسبه نیروهای دینامیکی و استاتیکی عملگرها استفاده شده است. همچنین بنا به ماهیت رویکرد حل زمان واقعی مبتنی بر حل گام به گام و وابستگی به مقادیر آنی متغیرهای حالت توصیف کننده پیکربندی سامانه حرکتی، توجه کافی در بهره‌گیری از روش‌های محاسباتی و شیوه‌های برنامه‌نویسی مناسب به منظور کاهش حداکثری زمان محاسباتی شده است.

مقایسه نتایج شبیه‌سازی، نشان دهنده اختلاف قابل توجه و کاملاً نامتناسب در بارگذاری استاتیک و دینامیک حسب مانور مورد نظر را داشته و ضرورت توجه به پیش‌بینی نیروهای دینامیکی حاصل از حل سینماتیک معکوس در طراحی مکانیزم شبیه‌ساز و انتخاب عملگرها را محرز می‌نماید.

۲. بازوی ماهر استوارت - گوف

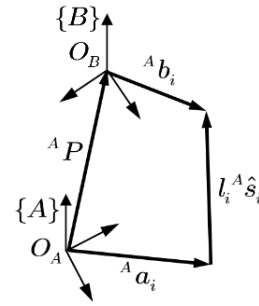
تحلیل بازوی ماهر استوارت - گوف در دو بخش سینماتیک و دینامیک ارائه می‌شود.

۲-۱. سینماتیک معکوس موقعیت

در شکل (۱) تصویر مفهومی سکوی استوارت-گوف ارائه شده است. مطابق شکل این سامانه متشکل از سکوی متحرک (بالایی)، سکوی ثابت (پایینی) و شش عملگر خطی است. دو سکو توسط عملگرهای خطی از طریق مفاصل کروی و یونیورسال، در نقاط A_i و B_i که $i = 1, 2, \dots, 6$ به یکدیگر متصل می‌شوند. با هدف مطالعه سینماتیک سکوی متحرک، چارچوب $\{A\}$ بر روی سکوی ثابت و مختصات متحرک $\{B\}$ بر روی سکوی بالایی نصب و جهت‌گیری سکوی متحرک نسبت به سکوی ثابت توسط ماتریس دوران ${}^A R_B$ توصیف می‌شود. ماتریس دوران با رویکرد استفاده از زوایای اویلر $(\psi \ \theta \ \phi)$ مطابق رابطه زیر است [۳]:

$${}^A R_B = R_z(\psi) R_y(\theta) R_x(\phi) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos(\psi) \cos(\theta) \\ r_{12} &= \sin(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) - \cos(\phi) \sin(\psi) \end{aligned}$$



شکل ۲. حلقه بسته برداری موقعیت عملگر نمونه

۲-۲. نرخ سینماتیک معکوس موقعیت

رابطه نرخ زمانی سینماتیک معکوس موقعیت از مشتق زمانی رابطه حلقه بسته مکانی (۲) برای عملگر نمونه حاصل می‌شود. با برخی عملیات برداری، رابطه نرخ سینماتیک معکوس سامانه حرکتی به شکل مناسب محاسباتی زیر ارائه شده است [۳]:

$${}^A \hat{s}_i \cdot {}^A v_p + ({}^A b_i \times {}^A \hat{s}_i) {}^A \omega = \dot{l}_i \quad (3)$$

که در آن \dot{l}_i نرخ تغییرات زمانی طول عملگر نمونه است. همچنین ω بردار سرعت زاویه‌ای سکوی متحرک و ${}^A v_p (= [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T)$ سرعت انتقالی نقطه P است که هر دو در مختصات ثابت $\{A\}$ تعریف شده‌اند.

با حذف پیش بالا نویسی A برای سادگی و مرتب کردن رابطه (۳) در قالب ماتریسی، بیان کلی ژاکوبین به عنوان تبدیل نرخ زمانی مختصات مفصلی با مختصات فضای عملیاتی مطابق رابطه ذیل حاصل می‌شود [۳، ۴، ۸]:

$$\dot{l} = J_1 [v_p, \omega]^T \quad (4)$$

که در آن بردار سرعت انتقالی سامانه حرکتی، ω بردار سرعت زاویه‌ای سکوی متحرک، $\dot{l} (= [\dot{l}_1, \dot{l}_2, \dot{l}_3, \dot{l}_4, \dot{l}_5, \dot{l}_6]^T)$ بردار تغییر طول زمانی عملگرها و J_1 ماتریس ژاکوبین با ابعاد (6×6) مطابق رابطه ذیل است:

$$J_1 = \begin{bmatrix} \hat{s}_1^T & (b_1 \times \hat{s}_1)^T \\ \hat{s}_2^T & (b_2 \times \hat{s}_2)^T \\ \vdots & \vdots \\ \hat{s}_6^T & (b_6 \times \hat{s}_6)^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در آن b_i بردار موقعیت مفصل B_i در چارچوب مرجع $\{A\}$ است.

به توجه به استفاده متداول از زوایای اوپلر برای توصیف جهت‌گیری سکوی متحرک در کاربردهای سامانه‌های شبیه‌ساز، بازنویسی بردار سرعت زاویه‌ای $\omega (= [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T)$ بر حسب نرخ تغییرات زوایای اوپلر $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ ضروری است. بدین

منظور با مشتق زمانی از ${}^A R_B$ در رابطه (۱) و استفاده از عملگر پاد متقارن [۴]، بردار سرعت زاویه‌ای بر حسب نرخ زوایای اوپلر مطابق رابطه زیر خواهد بود [۴، ۹]:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \cos(\theta) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (6)$$

با جایگذاری از (۶) در رابطه (۴) و مرتب کردن آن، رابطه نرخ زمانی سینماتیک معکوس سامانه حرکتی حاصل می‌شود [۴]:

$$\dot{l} = J_1 J_2 [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T \quad (7)$$

که در آن \dot{x} ، \dot{y} ، \dot{z} مولفه‌های سرعت انتقالی مبدأ مختصات سکوی متحرک، $\dot{\phi}$ ، $\dot{\theta}$ و $\dot{\psi}$ نرخ زوایای اوپلر، J_1 مطابق رابطه (۵) و J_2 بصورت ماتریس ذیل تعریف می‌شود [۴، ۱۱]:

$$J_2 = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & & 0_{3 \times 3} \\ & 1 & 0 & \sin(\theta) \\ 0_{3 \times 3} & 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \cos(\theta) \\ & 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (8)$$

۲-۳. تحلیل استاتیکی بازوی ماهر استوارت - گوف

مطابق شکل (۳)، «پیچ و تاب» سکوی متحرک بازوی ماهر استوارت توسط بردار $\chi = ([v_p, \omega]^T) \in \mathcal{R}^6$ توصیف می‌شود که در آن v_p و ω مطابق شرح رابطه (۴) می‌باشند. همچنین مجموعه نیرو - گشتاور وارده از بازوی ماهر به محیط در نقطه O_B توسط بردار $\mathcal{F}_s = ([f, n]^T) \in \mathcal{R}^6$ نشان داده می‌شوند که در آن f بیانگر بردار نیرو و n بردار گشتاور اعمال شده به محیط است. همچنین کلیه عملگرها بصورت مشابه فرض شده و نیروی عملگر f_i تنها نیروی وارد بر آنها می‌باشد. بنابراین، فرض نیروی استاتیکی در راستای محور عملگر \hat{s}_i منطقی بوده و عملگر در معرض نیروی کششی یا فشاری f_i قرار خواهد داشت.

در شرایط تعادل استاتیکی، رابطه نیرو - گشتاور برای سکوی متحرک بصورت زیر بیان می‌شود [۲، ۳]:

$$f + \sum_{i=1}^6 f_i \hat{s}_i = 0 \quad (9)$$

$$n + \sum_{i=1}^6 b_i \times f_i \hat{s}_i = 0 \quad (10)$$

که در آن f و n به ترتیب بردارهای نیرو و گشتاور خارجی وارد بر سکوی متحرک هستند. با ادغام و بازنویسی روابط (۹) و (۱۰) در قالب ماتریسی، استاتیک معکوس بازوی ماهر استوارت حاصل می‌شود:

$$J_1^T \tau_s = \mathcal{F}_s \quad (11)$$

فرض عدم امکان حرکت زاویه‌ای عملگرها در راستای محور طولی، فرض منطقی در بازوی ماهر استوارت با مفصل یونیورسال است که در مطابقت با محدودیت فیزیکی حرکت سکوی استوارت قرار دارد. به بیان ریاضی، این محدودیت به معنی تعامد بردار ω_i با بردار راستای عملگر \hat{s}_i است که در قالب قیود سینماتیکی زیر تعریف می‌شود:

$$\omega_i \cdot \hat{s}_i = \dot{\omega}_i \cdot \hat{s}_i = 0 \quad (15)$$

بنابراین با توجه به رابطه (۱۵) می‌توان نوشت:

$$\hat{s}_i \times (\omega_i \times \hat{s}_i) = \omega_i \quad (16)$$

بدین ترتیب امکان محاسبه سرعت زاویه‌ای عملگر نمونه با ضرب خارجی هر یک از روابط (۱۲) یا (۱۴) در بردار \hat{s}_i و کاربرد رابطه (۱۶) بصورت زیر فراهم می‌شود [۳]:

$$\omega_i = \frac{1}{l_i} [\hat{s}_i \times v_p + \hat{s}_i \times (\omega \times b_i)] = \frac{1}{l_i} (\hat{s}_i \times v_{b_i}) \quad (17)$$

در تحلیل دینامیکی عملگرها و سکوی متحرک، دیاگرام آزاد سکوی متحرک استوارت در شکل (۴الف) و مجموعه سیلندر و پیستون عملگر نمونه مطابق شکل (۴ب) ترسیم شده‌اند.

مطابق شکل m_{i_1} ، m_{i_2} ، c_{i_1} ، c_{i_2} به ترتیب جرم‌ها و فواصل مرکز جرم سیلندر و پیستون عملگر نمونه که از مفصل اتصال به سکوی پایه و متحرک اندازه‌گیری می‌شوند، هستند. بر این اساس، موقعیت مراکز جرم سیلندر و پیستون در مختصات مرجع مطابق روابط ذیل بیان می‌شوند [۳]:

$$p_{i_1} = a_i + c_{i_1} \hat{s}_i \quad (18)$$

$$p_{i_2} = a_i + (l_i - c_{i_2}) \hat{s}_i \quad (19)$$

با مشتق‌گیری از روابط (۱۸) و (۱۹)، روابط سرعت انتقالی مراکز جرم سیلندر و پیستون نمونه مطابق ذیل حاصل می‌شوند [۳]:

$$v_{i_1} = c_{i_1} (\omega_i \times \hat{s}_i) \quad (20)$$

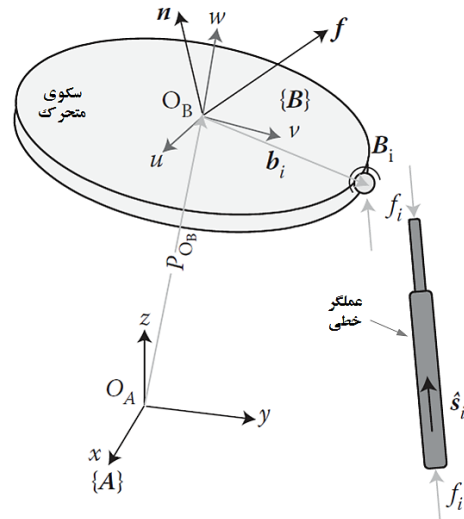
$$v_{i_2} = (l_i - c_{i_2}) (\omega_i \times \hat{s}_i) + \dot{l}_i \hat{s}_i \quad (21)$$

برای تعیین شتاب انتقالی سیلندر و پیستون نمونه، با مشتق‌گیری از رابطه (۲۰):

$$a_p + \dot{\omega} \times b_i + \omega \times (\omega \times b_i) = \dot{l}_i \hat{s}_i + 2\dot{l}_i (\omega_i \times \hat{s}_i) + l_i (\dot{\omega}_i \times \hat{s}_i) + l_i [\omega_i \times (\omega_i \times \hat{s}_i)] \quad (22)$$

و جایگذاری از شتاب نقطه واسط B_i مطابق:

که در آن J_1^T ترانهاده ماتریس ژاکوبین، بردار نیروی استاتیکی عملگرها و $\tau_s (= [f_1, f_2, \dots, f_6]^T)$ بردار نیرو - گشتاور وارد از سکو به محیط هستند.



شکل ۳. دیاگرام جسم آزاد سکوی متحرک و عملگر نمونه استوارت در تحلیل استاتیکی

۳. تحلیل دینامیک بازوی ماهر استوارت - گوف

۳-۱. سینماتیک اجزای عملگرهای خطی

در تحلیل دینامیکی سکوی استوارت با استفاده از رویکرد نیوتن - اولر، بیان شتاب‌های خطی و زاویه‌ای سکوی متحرک و عملگرهای خطی بصورت تابعی از شتاب‌های خطی و زاویه‌ای سکوی متحرک یعنی بردار $([v_p, \dot{\omega}]^T)$ لازم است. در دست‌یابی به این هدف، از پارامترهای سینماتیکی مفصل اتصال عملگر نمونه i ام با سکوی متحرک به عنوان نقطه کمکی استفاده می‌شود. بدین منظور با مشتق‌گیری از رابطه (۲) و بازنویسی آن بصورت:

$$v_p + \omega \times b_i = \dot{l}_i \hat{s}_i + l_i (\omega_i \times \hat{s}_i) \quad (12)$$

و استفاده از سرعت نقطه واسط v_{b_i} به عنوان بردار سرعت گره B_i مطابق:

$$v_{b_i} = v_p + \omega \times b_i \quad (13)$$

رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$v_{b_i} = \dot{l}_i \hat{s}_i + l_i (\omega_i \times \hat{s}_i) \quad (14)$$

که در آن ω_i سرعت زاویه‌ای عملگر در چارچوب مرجع $\{A\}$ است.

با ضرب خارجی طرفین رابطه (۲۲) در \hat{s}_i با هدف حذف \dot{l}_i و استفاده از رابطه (۲۳)، شتاب زاویه‌ای عملگر نمونه بدست می‌آید [۳]:

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{l_i} (\hat{s}_i \times a_{b_i} - 2\dot{l}_i \omega_i) \quad (27)$$

با مهیا شدن روابط سینماتیکی لازم، عبارت‌های شتاب خطی مراکز جرم سیلندر و پیستون عملگر نمونه از مشتق زمانی (۲۰) و (۲۱) مطابق روابط ذیل حاصل می‌شوند [۳]:

$$a_{i_1} = c_{i_1} [\dot{\omega}_i \times \hat{s}_i + \omega_i \times (\omega_i \times \hat{s}_i)] \quad (28)$$

$$a_{i_2} = (l_i - c_{i_2}) [\dot{\omega}_i \times \hat{s}_i - (\omega_i \cdot \omega_i) \hat{s}_i] + 2\dot{l}_i (\omega_i \times \hat{s}_i) + \ddot{l}_i \hat{s}_i \quad (29)$$

۳-۲. دینامیک اجزای عملگرهای خطی

در تحلیل دینامیکی، اجزای عملگرهای خطی یعنی سیلندر و پیستون متقارن محوری با مرکز جرم در میانه طول آنها فرض می‌شوند. مطابق دیاگرام آزاد عملگر نمونه شکل (۴ب)، نیروی عکس العمل در مفاصل ثابت A_i با نماد f_{a_i} ، نیروی عکس العمل در مفاصل متحرک B_i با نماد f_{b_i} و نیروی داخلی و گشتاور بین سیلندر و پیستون به ترتیب با f_{c_i} و M_{c_i} در نظر گرفته می‌شوند. همچنین نیرو و گشتاور خارجی وارد بر سکوی متحرک در مبدأ مختصات متحرک O_B فرض شده و با نماد $F_d (= [f_d, n_d]^T)$ نمایش داده می‌شود. با هدف تعیین نیروهای داخلی و برهم کنش اجزای عملگرهای خطی، سیستم مختصات محلی عملگرها با مبدأ مختصات منطبق بر مفاصل پایه A_i با بردارهای \hat{t}_i و \hat{r}_i علاوه بر \hat{s}_i بصورت ذیل تعریف می‌شوند:

$$\hat{t}_i = \frac{\hat{s}_i \times a_i}{\|\hat{s}_i \times a_i\|} \quad (30)$$

$$\hat{r}_i = \hat{s}_i \times \hat{t}_i \quad (31)$$

که در آن $\|\cdot\|$ عملگر نرم مرتبه دو یا اقلیدسی است. برای توصیف دینامیک اجزای عملگرهای خطی از رویکرد نیوتن - اولر با رعایت فرضیات بیان شده استفاده شده است که در همین رابطه برای جزء سیلندر عملگر، به صورت زیر بیان می‌شوند [۳]:

$$\sum c_{i_1} F_{ext} = m_{i_1} a_{i_1} = f_{a_i} - f_{c_i} + m_{i_1} g \quad (32)$$

$$\sum c_{i_1} n_{ext} = {}^A I_{c_{i_1}} \dot{\omega}_i + \omega_i \times {}^A I_{c_{i_1}} \cdot \omega_i = c_{i_1} (-\hat{s}_i \times f_{a_i}) + d_{i_1} (\hat{s}_i \times -f_{c_i}) - M_{c_i} \quad (33)$$

$\sum c_{i_1} F_{ext}$ برآیند نیروهای خارجی وارد بر مرکز جرم و $\sum c_{i_1} n_{ext}$ برآیند گشتاورهای خارجی حول مرکز جرم جزء

$$a_{b_i} = a_p + \dot{\omega} \times b_i + \omega \times (\omega \times b_i) \quad (23)$$

شتاب طولی راستای عملگر (\dot{l}_i) از ضرب داخلی رابطه (۲۲) در بردار \hat{s}_i و استفاده از قید سینماتیکی (۱۵) حاصل می‌شود [۳]:

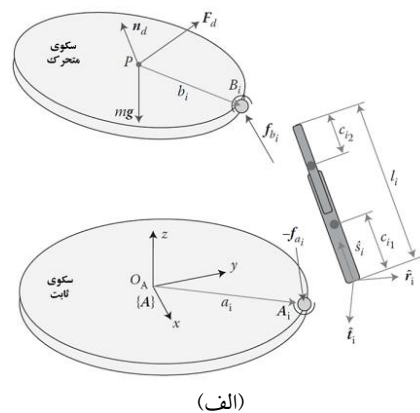
$$\dot{l}_i = a_p \cdot \hat{s}_i + (\dot{\omega} \times b_i) \cdot \hat{s}_i + [\omega \times (\omega \times b_i)] \cdot \hat{s}_i - l_i [\omega_i \times (\omega_i \times \hat{s}_i)] \cdot \hat{s}_i \quad (24)$$

با بازنویسی عبارت آخر در رابطه (۲۴) با استفاده از رابطه (۱۶) و تعامد \hat{s}_i و ω_i بصورت ذیل:

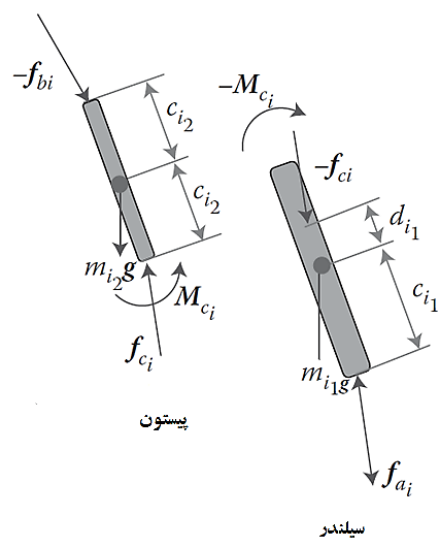
$$[\omega_i \times (\omega_i \times \hat{s}_i)] \cdot \hat{s}_i = -\omega_i \cdot \omega_i \quad (25)$$

و جایگذاری در رابطه (۲۴) و استفاده از خاصیت «ضرب عددی سه گانه بردارها»^۳، شتاب طولی پیستون عملگر نمونه از رابطه (۲۴) مطابق ذیل حاصل می‌شود [۳]:

$$\ddot{l}_i = a_{b_i} \cdot \hat{s}_i + l_i (\omega_i \cdot \omega_i) = a_p \cdot \hat{s}_i + (b_i \times \hat{s}_i) \cdot \dot{\omega} + [\omega \times (\omega \times b_i)] \cdot \hat{s}_i + l_i (\omega_i \cdot \omega_i) \quad (26)$$



(الف)



(ب)

شکل ۴. دیاگرام جسم آزاد سکوی متحرک و مجموعه سیلندر و پیستون عملگر نمونه سکوی استوارت در تحلیل دینامیکی [۳]

برای فرمول بندی دینامیک معکوس سکوی استوارت، حذف نیروهای داخلی f_{a_i} و f_{c_i} در روابط (۳۲)، (۳۳)، (۳۶) و (۳۷) ضروری است. بدین منظور f_{a_i} از رابطه (۳۲) بصورت تابعی از f_{c_i}

$$f_{a_i} = f_{c_i} + m_{i_1}(a_{i_1} - g) \quad (41)$$

و f_{c_i} از رابطه (۳۶) بصورت تابعی از f_{b_i} مطابق ذیل:

$$f_{c_i} = f_{b_i} + m_{i_2}(a_{i_2} - g) \quad (42)$$

بازنویسی می شوند.

با ضرب خارجی روابط (۴۱) و (۴۲) در \hat{s}_i بصورت:

$$\hat{s}_i \times f_{a_i} = \hat{s}_i \times f_{c_i} + m_{i_1} \hat{s}_i \times (a_{i_1} - g) \quad (43)$$

$$\hat{s}_i \times f_{c_i} = \hat{s}_i \times f_{b_i} + m_{i_2} \hat{s}_i \times (a_{i_2} - g)$$

و جایگذاری از روابط $\hat{s}_i \times f_{c_i}$ و $\hat{s}_i \times f_{a_i}$ در مجموع روابط

(۳۳) و (۳۷) و مرتب نمودن آن:

$${}^A I_{eq} \dot{\omega}_i + \omega_i \times {}^A I_{eq} \cdot \omega_i = -c_{i_1} m_{i_1} \hat{s}_i \times (a_{i_1} - g) - (l_i - c_{i_2}) m_{i_2} \hat{s}_i \times (a_{i_2} - g) - l_i (\hat{s}_i \times f_{b_i}) \quad (44)$$

و بازنویسی آن بصورت مناسبتر، دینامیک عملگرها مطابق

ذیل حاصل می شود [۳]:

$${}^A I_{eq} \dot{\omega}_i + \omega_i \times {}^A I_{eq} \cdot \omega_i = -c_{i_1} m_{i_1} (\hat{s}_i \times a_{i_1}) - (l_i - c_{i_2}) m_{i_2} (\hat{s}_i \times a_{i_2}) - l_i (\hat{s}_i \times f_{b_i}) + l_i m_{g_e} (\hat{s}_i \times g) \quad (45)$$

که در آن:

$${}^A I_{eq} = {}^A I_{c_{i_1}} + {}^A I_{c_{i_2}} \quad (46)$$

$$m_{g_e} = \frac{1}{l_i} [m_{i_1} c_{i_1} + m_{i_2} (l_i - c_{i_2})]$$

۳-۳. دینامیک سکوی ماهر

با فرض مرکز جرم سکوی متحرک واقع در نقطه P و جرم m و ممان اینرسی ${}^A I_{eq}$ برای آن، روابط نیوتن - اولر برای سکوی متحرک مطابق روابط ذیل بیان می شوند [۲-۴]:

$$\sum {}^P F_{ext} = ma_p = \sum_{i=1}^6 f_{b_i} + mg + f_d \quad (47)$$

$$\sum {}^P n_{ext} = {}^A I_p \dot{\omega} + \omega \times {}^A I_p \cdot \omega = \sum_{i=1}^6 b_i \times f_{b_i} + n_d \quad (48)$$

که در آن $\sum {}^P F_{ext}$ و $\sum {}^P n_{ext}$ به ترتیب برآیند نیروها و

گشتاورهای خارجی وارد بر سکوی متحرک نسبت به نقطه P و

ممان اینرسی ${}^A I_p$ در چارچوب مرجع $\{A\}$ تعریف و بصورت ذیل

محاسبه می شود:

$${}^A I_p = {}^A R_B {}^B I_p {}^A R_B^T \quad (49)$$

سیلندر هستند. همچنین شتاب مرکز جرم جزء سیلندر مطابق رابطه (۲۸)، سرعت و شتاب زاویه‌ای عملگر مطابق روابط (۱۷) و (۲۷) و d_{i_1} مطابق رابطه ذیل تعریف می شوند:

$$d_{i_1} = l_i - c_{i_1} - 2c_{i_2} \quad (34)$$

لازم به ذکر است که ${}^A I_{c_{i_1}}$ تانسور ممان اینرسی جزء سیلندر

در چارچوب همراستا با مختصات مرجع $\{A\}$ با مبدأ مختصات

واقع در c_{i_1} است. با توجه به تغییر جهت گیری چارچوب عملگر

$\{A_i\}$ با مبدأ واقع در c_{i_1} نسبت به چارچوب مرجع $\{A\}$ ، تانسور

ممان اینرسی ${}^A I_{c_{i_1}}$ در پیکربندی آنی بازوی ماهر با استفاده از

قاعده انتقال دورانی ماتریس اینرسی حول چارچوب عملگر $\{A_i\}$

به چارچوب مرجع $\{A\}$ مطابق رابطه ذیل محاسبه می شود:

$${}^A I_{c_{i_1}} = {}^A R_{A_i} {}^A I_{c_{i_1}} {}^A R_{A_i}^T \quad (35)$$

به روش مشابه روابط نیوتن - اولر برای جزء پیستون مطابق

ذیل بیان می شوند [۳]:

$$\sum {}^{c_{i_2}} F_{ext} = m_{i_2} a_{i_2} = f_{c_i} - f_{b_i} + m_{i_2} g \quad (36)$$

$$\sum {}^{c_{i_2}} n_{ext} = {}^A I_{c_{i_2}} \dot{\omega}_i + \omega_i \times {}^A I_{c_{i_2}} \cdot \omega_i = c_{i_2} (-\hat{s}_i \times f_{c_i}) + c_{i_2} (\hat{s}_i \times -f_{b_i}) + M_{c_i} \quad (37)$$

که در آن:

$${}^A I_{c_{i_2}} = {}^A R_{A_i} {}^A I_{c_{i_2}} {}^A R_{A_i}^T \quad (38)$$

${}^A I_{c_{i_2}}$ و ${}^A I_{c_{i_1}}$ به ترتیب تانسورهای ممان اینرسی اجزای

سیلندر و پیستون عملگر نمونه در مختصات $\{A\}$ و $\{A_i\}$ و ${}^A R_{A_i}$

ماتریس تبدیل (دوران) از مختصات محلی به مختصات مرجع

$\{A\}$ هستند. همچنین شتاب مرکز جرم جزء پیستون مطابق رابطه

(۲۹) تعریف می شود.

با توجه به اینکه چارچوب محلی $\{A_i\}$ با بردارهای \hat{s}_i ، \hat{t}_i

و \hat{r}_i بر روی عملگر نمونه الصاق شده است، ماتریس تبدیل دوران

${}^A R_{A_i}$ طبق تعریف بصورت ذیل تعریف می شود [۲-۴، ۷]:

$${}^A R_{A_i} = \begin{bmatrix} \hat{s}_i \cdot \hat{x} & \hat{t}_i \cdot \hat{x} & \hat{r}_i \cdot \hat{x} \\ \hat{s}_i \cdot \hat{y} & \hat{t}_i \cdot \hat{y} & \hat{r}_i \cdot \hat{y} \\ \hat{s}_i \cdot \hat{z} & \hat{t}_i \cdot \hat{z} & \hat{r}_i \cdot \hat{z} \end{bmatrix} \quad (39)$$

که \hat{x} ، \hat{y} و \hat{z} بردارهای بکه چارچوب مرجع $\{A\}$ هستند.

در صورت تقارن اجزای عملگر، ${}^A I_{c_{i_1}}$ ماتریس قطری با

ممان‌های اصلی بر روی قطر اصلی با ساختار ذیل است:

$${}^A I_{c_i} = \begin{bmatrix} I_{xx_i} & 0 & 0 \\ 0 & I_{xx_i} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz_i} \end{bmatrix} \quad (40)$$

۳-۴. دینامیک معکوس سکوی ماهر

حل مسئله دینامیک معکوس سکوی استوارت مستلزم تعیین نیروهای عملگرهای خطی در راستای محور طولی آنها است. برای دست یابی به این هدف، استخراج نیروهای f_{b_i} , $i = 1, 2, \dots, 6$ از روابط (۴۷) و (۴۸) ضروری است. با توجه به ساختار رابطه (۴۸)، بازنویسی عبارت $b_i \times f_{b_i}$ برای دست یابی به رابطه صریحی از f_{b_i} لازم است. این هدف از ترکیب رابطه (۴۵) برای دینامیک اجزای عملگر نمونه با رابطه (۴۸) به روش ذیل حاصل می‌شود. با مرتب کردن رابطه (۴۵) و ضرب خارجی آن از چپ در \hat{s}_i

$$\hat{s}_i \times (\hat{s}_i \times f_{b_i}) = -\frac{1}{l_i} (\hat{s}_i \times C_i) \quad (50)$$

که:

$$C_i = {}^A I_{eq} \dot{\omega}_i + \omega_i \times {}^A I_{eq} \cdot \omega_i + c_{i_1} m_{i_1} (\hat{s}_i \times a_{i_1}) + (l_i - c_{i_2}) m_{i_2} (\hat{s}_i \times a_{i_2}) - l_i m_{g_e} (\hat{s}_i \times g) \quad (51)$$

و استفاده از قاعده «ضرب خارجی سه گانه بردارها»^۴، سمت

چپ رابطه (۵۰) بصورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$f_{b_i} = \hat{s}_i (\hat{s}_i \cdot f_{b_i}) + \frac{1}{l_i} (\hat{s}_i \times C_i) = \hat{s}_i f_{b_i}^s + \frac{1}{l_i} (\hat{s}_i \times C_i) = \hat{s}_i f_{b_i}^s + K_i \quad (52)$$

که در آن عبارت اسکالر $f_{b_i}^s (= \hat{s}_i \cdot f_{b_i})$ اندازه تصویر نیروی f_{b_i} در راستای عملگر است.

با تعیین f_{b_i} از رابطه (۵۲) و جایگذاری در روابط (۴۷) و (۴۸):

$$\sum_{i=1}^6 (\hat{s}_i f_{b_i}^s + K_i) + mg + f_d = ma_p \quad (53)$$

$$\sum_{i=1}^6 b_i \times (\hat{s}_i f_{b_i}^s + K_i) + n = {}^A I_P \dot{\omega} + \omega \times {}^A I_P \cdot \omega \quad (54)$$

و مرتب کردن روابط:

$$\sum_{i=1}^6 (\hat{s}_i) f_{b_i}^s = -\sum_{i=1}^6 (K_i) - f_d + m(a_p - g) \quad (55)$$

$$\sum_{i=1}^6 (b_i \times \hat{s}_i) f_{b_i}^s = -\sum_{i=1}^6 (b_i \times K_i) - n_d + {}^A I_P \dot{\omega} + \omega \times {}^A I_P \cdot \omega \quad (56)$$

و بازنویسی آنها در قالب ماتریسی :

$$J_1^T f_b^s = \mathcal{H}_d \quad (57)$$

دینامیک معکوس سکوی استوارت حاصل می‌گردد که در آن J_1^T ترانهاده ماتریس ژاکوبین، $f_b^s (= [f_{b_1}^s, f_{b_2}^s, \dots, f_{b_6}^s]^T)$ بردار نیروی دینامیک عملگرها در مفاصل اتصال با سکوی متحرک و \mathcal{H}_d بردار نیرو - گشتاور وارد به سکو از محیط همراه با اثرات دینامیک سکوی متحرک و اجزای عملگرها مطابق ذیل است:

$$\mathcal{H}_d = \quad (58)$$

$$-\left[\begin{array}{c} \sum_{i=1}^6 (K_i) + f_d - m(a_p - g) \\ \sum_{i=1}^6 (b_i \times K_i) + n_d - {}^A I_P \dot{\omega} - \omega \times {}^A I_P \cdot \omega \end{array} \right]$$

با تعیین $f_{b_i}^s$ برای عملگر نمونه، نیروی عملگر τ_i برحسب $f_{b_i}^s$ و عبارتهای سینماتیکی بازو مطابق رابطه ذیل محاسبه می‌شوند [۳]:

$$\tau_i = f_{b_i}^s - m_{i_2} (l_i - c_{i_2}) (\omega_i \cdot \omega_i) + m_{i_2} \ddot{l}_i + m_{i_2} (g \cdot \hat{s}_i) \quad (59)$$

۴. سامانه حرکت‌ساز مدل پیش‌بین

وظیفه «سامانه حرکت‌ساز» در شبیه‌سازهای پرواز، دریافت شتاب‌های خطی و سرعت‌های زاویه‌ای هواپیما به عنوان ورودی و تولید خروجی‌های مناسب عملگرهای سامانه حرکتی شبیه‌ساز است. سامانه‌های حرکت‌ساز اخیر از ترکیب حس حرکتی انسان همراه با سینماتیک معکوس سامانه حرکتی بر پا شده و مدل حاصل با استفاده از حل کننده‌های موثر مانند کنترل بهینه و کنترل پیش‌بین حل می‌شوند [۱]. خروجی سامانه حرکت‌ساز ضمن باز تولید حس حرکتی، شامل تاریخچه حرکت‌های مناسب عملگرها در فضای محدود عملیاتی سکوی متحرک است. با مشخص شدن حرکت پیش فرض عملگرهای سامانه حرکتی، ضرورت حل مسئله دینامیک معکوس سامانه حرکتی به منظور تخمین مناسبی از نیرو - گشتاورهای مورد نیاز آتی در عملگرها با هدف طراحی روشن می‌شود. در شکل (۵) تصویر مفهومی از روند محاسباتی سامانه‌های حرکت‌ساز ارائه شده است. در شکل، d متغیرهای حالت شتاب انتقالی و سرعت زاویه‌ای خروجی وسیله نقلیه واقعی، r خروجی فیلتر شده d در گذر از مدل حس حرکتی انسان و l بردار طول آتی عملگرهای خطی، خروجی از حل کننده حرکت‌ساز مدل پیش‌بین است که به کنترل کننده سامانه حرکتی ارسال می‌شود. سامانه حرکت‌ساز، از مدل افزوده حس حرکتی انسان به همراه مدل سینماتیک معکوس سامانه حرکتی مطابق رابطه (۷) برپا می‌شود. حس حرکتی انسان به عنوان بخش لازم سامانه حرکت‌ساز، مدل ریاضی حسگرهای حرکتی انسان واقع در گوش میانی است. به علت محدودیت فضای کاری سامانه حرکتی، برای شبیه‌سازی حرکت‌های بزرگ خارج از فضای دسترسی سامانه، دو رویکرد حرکت «هم‌آهنگ زاویه‌ای»^۵ و استفاده از فیلترهای بالا گذر برای فیلتر نمودن فرکانس‌های پایین و در نتیجه حذف حرکت‌های بزرگ و دائم به منظور حفظ سامانه حرکتی در محدوده فضای کاری ابداع شده است. در شبیه سازی

که τ_a ، τ_L ، τ_s و k مقادیر عددی معلوم مدل سنگ‌های گوش هستند.

نیروی مخصوص f_x در مرکز سکوی متحرک با توجه به مشارکت حرکت هم‌آهنگ زاویه‌ای شیب در ایجاد حس حرکت نیروی مخصوص انتقالی و با استفاده از رابطه (۶۱)، مطابق ذیل بیان می‌شود:

$$f_x(s) = a_x(s) + g \frac{1}{s} \hat{\theta}(s) \quad (63)$$

در بیان مدل حس حرکتی، سرعت زاویه‌ای حس شده $\hat{\theta}$ یا $\hat{\omega} (= [\hat{\omega}_x, \hat{\omega}_y, \hat{\omega}_z]^T)$ در ارتباط با سرعت زاویه‌ای وسیله حرکتی، $\hat{\theta}$ یا $\omega (= [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T)$ که توسط «کانال‌های نیمه مدور»^{۱۳}، مطابق رفتار دینامیکی مطابق ذیل حس می‌شود [۱]:

$$\hat{\omega} = \frac{T_L T_a s^2}{(T_L s + 1)(T_s s + 1)(T_a s + 1)} \omega \quad (64)$$

که در آن T_a ، T_L و T_s ثابت‌های زمانی مدل هستند.

با توجه به توصیف عمومی جهت‌گیری سامانه حرکتی بر حسب زوایای اوپلر، بازنویسی بردار سرعت زاویه‌ای ω در رابطه (۶۴) بر حسب نرخ زوایای اوپلر ضروری است. برای این منظور با فرض جابجایی‌های زاویه‌ای کوچک و استفاده از معکوس رابطه (۷)، رابطه بین مولفه‌های بردار سرعت زاویه مختصات متحرک با بردار نرخ زوایای اوپلر بصورت رابطه یک به یک زیر نتیجه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (65)$$

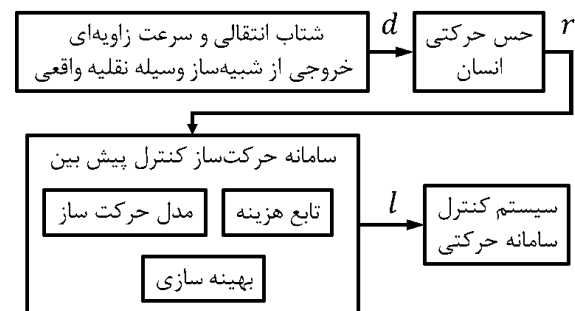
برای مانور شیب - طولی مورد نظر این پژوهش، از مولفه شیب بردار سرعت زاویه‌ای (مولفه ω_y) از (۶۵) در (۶۴) جایگذاری می‌شود.

مدل سامانه حرکت ساز از تجمیع مدل فضای حالت حس حرکتی شامل روابط (۶۲) و (۶۴) به همراه رابطه (۷) ایجاد شده و مدل حاصل توسط حل کننده کنترل پیش بین برای ایجاد حس حرکتی مناسب و تعیین طول عملگرهای متناظر حل می‌شود.

۵. شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی‌های دینامیک معکوس سامانه حرکتی بر اساس نتایج مدل حرکت‌ساز مبتنی بر مدل افزوده سینماتیک معکوس سامانه حرکتی مندرج در مرجع [۱۳] ارائه شده است. سامانه محاسباتی دینامیک معکوس بطور مشخص از اطلاعات سینماتیک جابجایی، سرعت و شتاب طولی و زاویه‌ای

«نیروی مخصوص»^۶ از «حرکت هم‌آهنگ زاویه‌ای» برای ایجاد حس حرکت انتقالی استفاده می‌شود. بر این اساس بازسازی بخشی از حس حرکت انتقالی توسط شتاب ثقل صورت می‌گیرد که این ویژگی مهم، «سامانه حرکت ساز»^۷ نامیده می‌شود [۱].



شکل ۵. تصویر مفهومی روند محاسباتی سامانه حرکت ساز

در برپایی مدل حس حرکت انتقالی، نیروی مخصوص مطابق تعریف عبارتست از:

$$f = a - g \quad (60)$$

که با فرض حرکت‌های زاویه‌ای کوچک، بردار نیروی مخصوص مطابق ذیل خواهد بود [۱]:

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x + g\theta \\ a_y - g\phi \\ a_z - g \end{bmatrix} \quad (61)$$

مطابق رابطه فوق امکان تامین بخشی از حس حرکت انتقالی در جهت‌های x و y توسط حرکت‌های زاویه‌ای متناظر، مشهود است. از طرفی با فرض حرکت‌های زاویه‌ای کوچک، روابط حس حرکتی بصورت روابط «جفت نشده»^۸ حاصل می‌شوند. مطابق رابطه (۲۹) امکان برپایی سه مدل حس حرکتی خطی مستقل برای مانورهای «سرج - پیچ»^۹، «سووی-رول»^{۱۰} و «هیو-یا»^{۱۱} فراهم می‌شود. با توجه به رویکرد کاربرد دینامیک معکوس سامانه حرکتی در سامانه‌های شبیه ساز در این پژوهش، بطور خاص بر مانور تک کاناله «سرج - پیچ (شیب - طولی)» تمرکز شده است. مطابق این رویکرد امکان انطباق مناسب نتایج سامانه حرکت ساز با دینامیک معکوس بازوی ماهر استوارت حاصل می‌شود. در برپایی مدل حس حرکتی در مانور «شیب - طولی»، دینامیک حسگرهای نیروی مخصوص \hat{f}_x با تحریک نیروی مخصوص f_x ، توسط «سنگ‌های گوش»^{۱۲} مطابق رابطه ذیل بیان می‌شود [۱]:

$$\hat{f}_x = \frac{k(\tau_a s + 1)}{(\tau_L s + 1)(\tau_s s + 1)} f_x \quad (62)$$

سکوی متحرک به همراه طول آنی عملگرهای خروجی سامانه حرکت‌ساز بهره می‌برد.

یکنواخت فرض شده و مرکز جرم در میانه آنها در نظر گرفته شده است.

۵-۱. داده‌های عددی

مقادیر عددی حس حرکتی انسان که از مرجع [۱] اقتباس شده‌اند در جداول (۱) و (۲) ارائه شده‌اند.

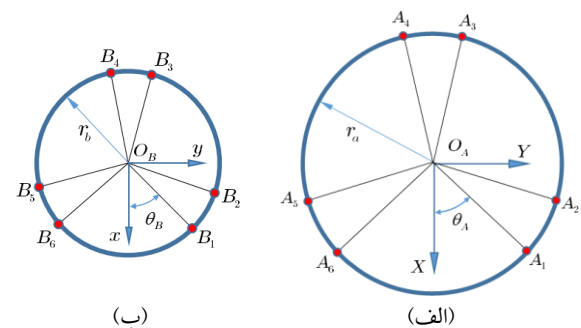
جدول ۱. پارامترهای مدل حس نیروی مخصوص (طولی) [۱]

τ_L	τ_S	τ_a	k
۰/۴	۱۳/۲	۰/۶۶	۵/۳۳

جدول ۲. پارامترهای مدل حس حرکت دورانی (شیب) [۱]

T_L	T_S	T_a
۳۰	۰/۱	۵/۳۳

همچنین برای شبیه‌سازی به مقادیر عددی سکوی استوارت - گوف نیاز است که در مطالعه حاضر از مشخصات هندسی و آرایش عملگرهای سکوی استوارت مقاله عمران و قسام استفاده شده است [۱۴]. تصویر آرایش هندسی اتصال عملگرها به سکوی ثابت و متحرک با مختصات مفصلی A_i و B_i ($i = 1, \dots, 6$) همراه با چارچوب‌های ثابت و متحرک در شکل (۶) ترسیم شده است. مطابق شکل r_a و r_b به ترتیب شعاع‌های سکوی ثابت و متحرک و θ_A و θ_B نیز به ترتیب زوایای بین مفاصل هستند.



شکل ۶. سکوی ثابت و متحرک همراه با چارچوب‌های ثابت و متحرک، (الف) سکوی ثابت، (ب) سکوی متحرک

مقادیر عددی سیلندر و پیستون عملگر در جدول (۳) و هندسه سکوی استوارت و مقادیر عددی سکوی متحرک در جدول (۴) ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است که توزیع جرم اجزای عملگر

جدول ۳. مقادیر عددی اجزای عملگر [۱۲ و ۱۴]

مقدار	پارامتر
$I_{c_l} = \begin{bmatrix} 0.063 & 0 & 0 \\ 0 & 2.854 & 0 \\ 0 & 0 & 2.854 \end{bmatrix}$	ممان اینرسی جزء سیلندر ($kg - m^2$)
$I_{c_u} = \begin{bmatrix} 0.0094 & 0 & 0 \\ 0 & 1.59 & 0 \\ 0 & 0 & 1.59 \end{bmatrix}$	ممان اینرسی جزء پیستون ($kg - m^2$)
0.95	طول سیلندر و پیستون (m)
37.17	جرم سیلندر و پیستون (kg)

جدول ۴. مقادیر عددی سکوی متحرک [۱۲ و ۱۴]

مقدار	پارامتر
$I_p = \begin{bmatrix} 7.788 & 0 & 0 \\ 0 & 7.788 & 0 \\ 0 & 0 & 15.577 \end{bmatrix}$	ممان اینرسی سکوی متحرک ($kg - m^2$)
194.71	جرم سکوی متحرک (kg)
0.635	ارتفاع سکوی متحرک در حالت خنثی از سکوی ثابت (m)
[2,118,122, -122, -118, -2]	θ_B (deg)
[50,70,170, -170, -70, -50]	θ_A (deg)
1.0	r_a (m)
0.4	r_b (m)

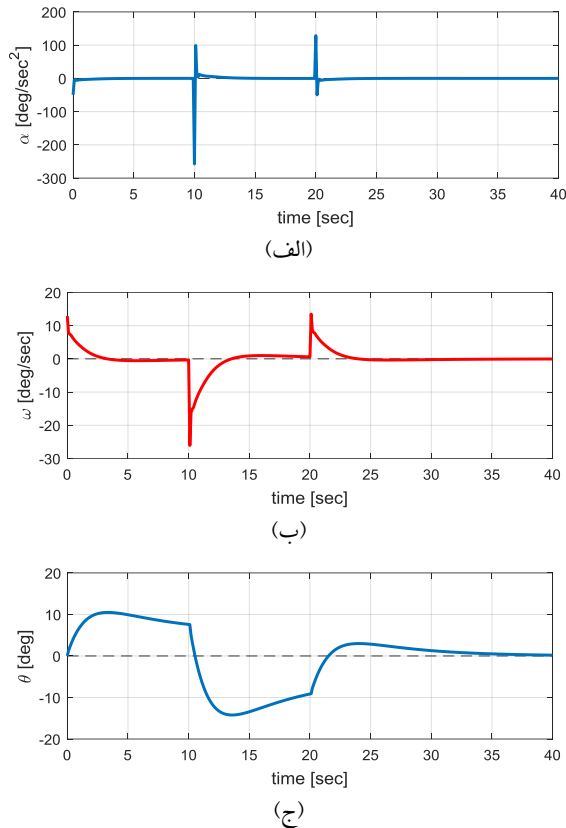
۵-۲. بحث نتایج

به منظور نمایش اثربخشی محاسبات دینامیک معکوس سکوی استوارت به عنوان سامانه حرکتی سکوی شبیه ساز، بخش اصلی نتایج شبیه‌سازی برای آزمون مانور نمونه شیب - طولی با دو ورودی موج مربعی و موج سینوسی با دامنه‌های $4 m/s$ و دوره تناوب $20 sec$ در کانال نیروی مخصوص و سرعت زاویه‌ای صفر با هدف نمایش قابلیت حرکت «هم‌آهنگ زاویه‌ای»^{۱۴} در کانال سرعت زاویه‌ای به عنوان مانورهای نسبتاً مشکل، ارائه شده‌اند.

۵-۲-۱. آزمون اول: موج مربعی در کانال نیروی مخصوص

نتایج این آزمون در مجموعه منحنی‌های (۷) الی (۱۰) ارائه شده‌اند.

در شکل (۷) نتایج حاصل از حس حرکتی خلبان شبیه‌ساز در مقایسه با خلبان وسیله نقلیه برای مانور شیب - طولی ترسیم شده‌اند. مطابق شکل (۷الف) استفاده سامانه حرکت ساز از رویکرد «حرکت هم‌آهنگ زاویه‌ای» کاملاً مشهود است. در شکل (۷ب)

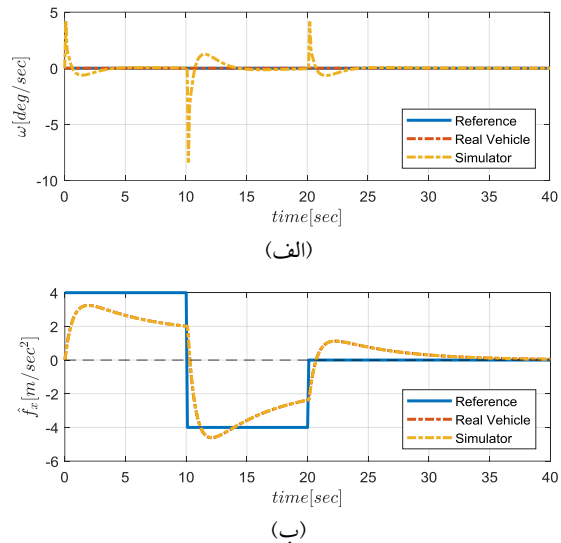


شکل ۸ سینماتیک حرکت زاویه‌ای سکوی متحرک، (الف) شتاب زاویه‌ای، (ب) سرعت زاویه‌ای، (ج) جابجایی زاویه‌ای

در شکل (۹الف، ب و ج) نیز شتاب، سرعت و جابجایی طولی سکوی متحرک ترسیم شده‌اند.

مطابق نتایج حاصل، رویکرد مناسب در طراحی سامانه حرکتی موجب حرکت‌های انتقالی نسبتاً کوچک سکوی متحرک می‌شود که از منظر اهداف طراحی شبیه‌سازهای پرواز به علت تلاش در حفظ سامانه در فضای کاری آن، از مزیت‌های رویکرد مورد توجه این مقاله محسوب می‌شود. مجدداً متذکر می‌گردم که مقدار شتاب انتقالی محاسبه شده در منحنی (۹الف) بطور مستقیم در محاسبات دینامیک معکوس سامانه حرکتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از دینامیک معکوس سامانه حرکتی در محاسبه نیروها در عملگرهای خطی در موقعیت‌های پیستون (τ)، مفصل اتصال عملگر با سکوی متحرک (f^b) و نیروی عملگر در بارگذاری متناظر استاتیکی (τ_s) در شکل‌های (۱۰الف، ب و ج) ترسیم شده‌اند. لازم به ذکر است که اختلاف نیروی (τ) با (f^b) مطابق رابطه (۵۹) ناشی از دینامیک جزء پیستون است که در منحنی‌های حاصل، تفاوت اندکی را نشان می‌دهد. توضیح اینکه این اختلاف به علت مشخصات جرمی و هندسی سامانه حرکتی، قابل انتظار

تبعیت حس حرکتی خلبان شبیه‌ساز از خلبان وسیله واقعی در ردیابی ورودی مرجع موج مربعی کاملاً مشاهده می‌شود.

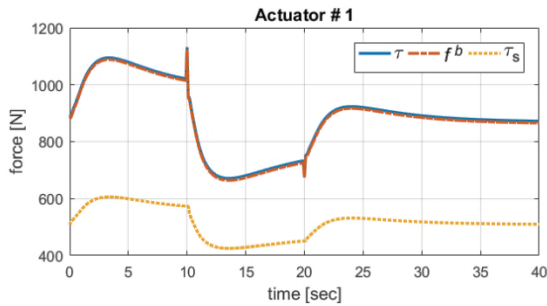


شکل ۷. حس حرکت خلبان وسیله واقعی و شبیه‌ساز در مانور نمونه، (الف) سرعت زاویه‌ای، (ب) نیروی مخصوص

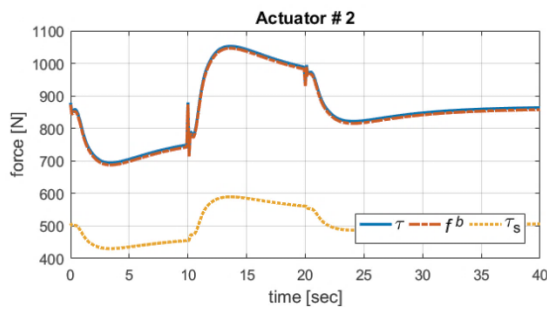
نتایج حاصل از شبیه‌سازی متغیرهای سینماتیک توصیف کننده پیکربندی سکوی متحرک در مانور شیب - طولی یعنی (x, θ) همراه با نرخ تغییرات زمانی اول و دوم یعنی سرعت‌های زاویه‌ای و خطی (u, ω) همراه با شتاب‌های زاویه‌ای و خطی (a_x, α) در شکل‌های (۸الف، ب و ج) و (۹الف، ب و ج) ترسیم شده‌اند.

یادآور می‌گردد که مقادیر شتابها در محاسبات دینامیک معکوس بصورت مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرند که با توجه به ویژگی شبیه‌سازهای پرواز، این مقادیر در هر فاصله زمانی در دسترس بوده و در محاسبات قابل استفاده‌اند.

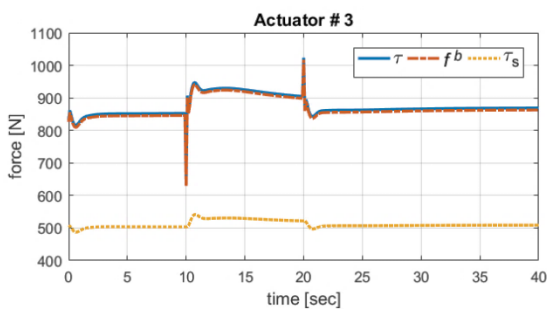
در شکل (۸الف، ب و ج) به ترتیب شتاب، سرعت و جابجایی زاویه‌ای سکوی متحرک در مانور مورد نظر ترسیم شده‌اند. مطابق شکل (۸الف) سکوی متحرک شتاب زاویه‌ای قابل ملاحظه‌ای در زمان‌های تغییرات ورودی تجربه می‌کند که تاثیر قابل توجهی در نیروهای دینامیک متناظر داشته و متعاقباً مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین سکوی متحرک مطابق شکل (۸ب) سرعت‌های زاویه‌ای مناسبی به منظور بهره‌گیری از حرکت هماهنگ زاویه‌ای جهت ایجاد حس حرکتی مورد نظر را دارد که منجر به جابجایی‌های زاویه‌ای متناظر شکل (۸ج) می‌گردد.



(الف)



(ب)

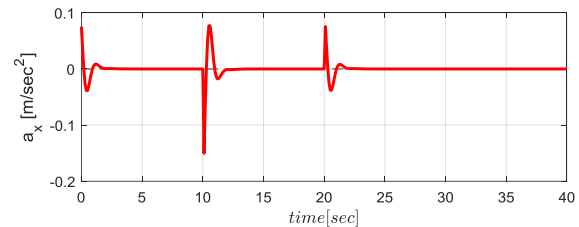


(ج)

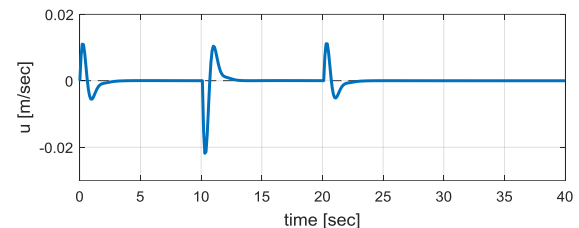
شکل ۱۰. نیروی عملگرها به تفکیک نیروی پیستون، نیروی وارد به سکوی متحرک و نیروی عملگر استاتیکی برای عملگرهای الف) شماره یک، ب) شماره دو و ج) شماره سه

یادآور می‌گردد که به علت تقارن در رفتار عملگرها در مانور نمونه مورد نظر مقاله، از ترسیم نیروهای عملگرهای شماره ۴، ۵ و ۶ به علت تشابه با عملگرهای ۱، ۲ و ۳ خودداری شده است. لازم به ذکر است که با استفاده از سامانه شبیه‌سازی امکان دست‌یابی به اطلاعات کامل سینماتیک و دینامیک سامانه حرکتی مطابق روابط ریاضی بیان شده در مقاله فراهم است. همچنین توسط سامانه یکپارچه حرکت‌ساز مبتنی بر سینماتیک معکوس سامانه حرکتی و توسعه بخش دینامیک معکوس سامانه حرکت-ساز، امکان مطالعه انواع مانورها با قابلیت تحلیل همزمان بارگذاری استاتیکی و دینامیک فراهم شده است که سامانه را به عنوان ابزار مناسبی برای مطالعات تحقیقاتی مطرح می‌نماید.

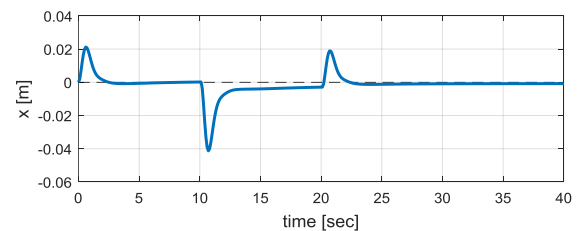
است. نتایج حاصل از محاسبات دینامیک معکوس برای عملگر شماره یک در شکل (۱۰الف) ترسیم شده‌اند. با مقایسه حرکت‌های زاویه‌ای سکوی متحرک (شکل ۸ج) و هندسه سکو مطابق شکل (۶) با مختصات ساکن و متحرک انتخابی، تطابق صحیحی بین نیروهای حاصل با حرکت سکو مشاهده می‌شود.



(الف)



(ب)

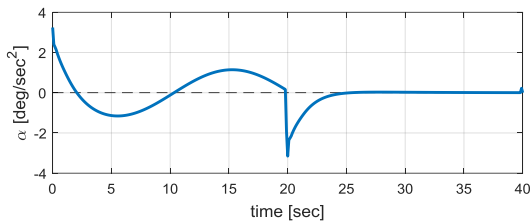


(ج)

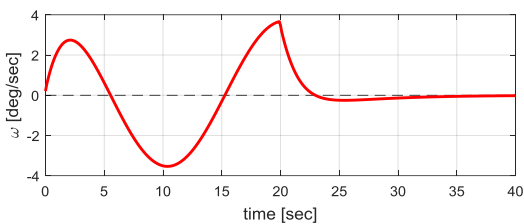
شکل ۹. سینماتیک حرکت زاویه‌ای سکوی متحرک، الف) شتاب، ب) سرعت و ج) جابجایی طولی

بطور مشابه نیروهای سه‌گانه بارگذاری دینامیک در پیستون، مفصل و بارگذاری استاتیکی برای عملگر شماره دو در منحنی (۱۰ب) ترسیم شده‌اند. مجدداً پیش‌بینی افزایش نیروهای عملگر در مطابقت با حرکت مورد نظر سکو وجود دارد، اگر چه این تغییرات در مقایسه با عملگر شماره مقداری کمتر است. مطابق شکل (۱۰ج)، تغییرات نیرو در عملگر شماره سه به نسبت دو عملگر دیگر کوچکتر است اگر چه حد بالای نسبتاً یکسانی برای هر سه عملگر مشاهده می‌شود.

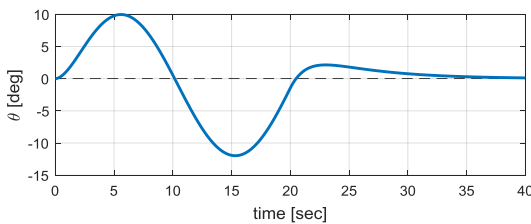
در شکل (الف، ب و ج) به ترتیب شتاب، سرعت و جابجایی زاویه‌ای سکوی متحرک در مانور مورد نظر ارائه شده‌اند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۲. سینماتیک حرکت زاویه‌ای سکوی متحرک، الف) شتاب زاویه‌ای، ب) سرعت زاویه‌ای، ج) جابجایی زاویه‌ای

مطابق شکل (الف، ب و ج)، سکوی متحرک شتاب زاویه‌ای سکوی در مقایسه با ورودی سینوسی، تغییرات نسبتاً همواری را تجربه می‌کند. شکل (ب) نشان دهنده تاریخچه زمانی سرعت زاویه‌ای ای سکوی متحرک در بهره‌گیری از حرکت هماهنگ زاویه‌ای است. در شکل (ج) نیز جابجایی زاویه‌ای متناظر ترسیم شده است.

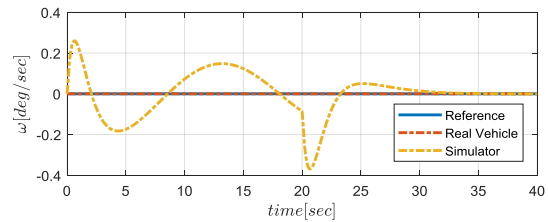
در شکل (الف، ب و ج) شتاب، سرعت و جابجایی طولی سکوی متحرک ترسیم شده‌اند. مجدداً حرکت‌های انتقالی نسبتاً کوچک سکوی متحرک که نشان از رویکرد موثر طراحی سامانه حرکتی در حفظ سامانه در فضای کاری آن است، مشاهده می‌شود.

بطور مشابه نیروی عملگرهای خطی در موقعیت‌های پیستون (τ)، مفصل اتصال عملگر با سکوی متحرک (f^b) و نیروی عملگر در بارگذاری متناظر استاتیکی (τ_s) در شکل‌های (الف، ب و ج) ترسیم شده‌اند.

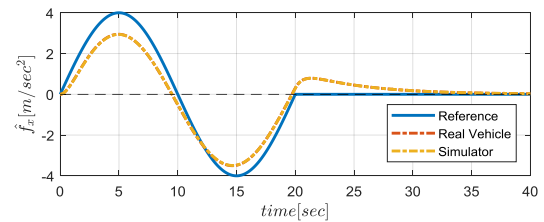
همانگونه که اشاره شد، اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین نیرو در پیستون عملگر با نیروی مفصل اتصال با سکو وجود ندارد. مطابق شکل اگر چه تطابق نیروی بارگذاری استاتیک سکو با محاسبات دینامیک مشهود است، ولی اثرات دینامیکی، تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین بارگذاری دینامیک با بارگذاری استاتیک را نشان می‌دهد که لازم است در انتخاب عملگرها و در مرحله طراحی سازه شبیه‌ساز، مورد توجه قرار گیرد.

۵-۲-۲. آزمون دوم: موج سینوسی در کانال نیروی مخصوص

نتایج این آزمون در مجموعه منحنی‌های (۱۱) الی (۱۴) منعکس شده‌اند.



(الف)

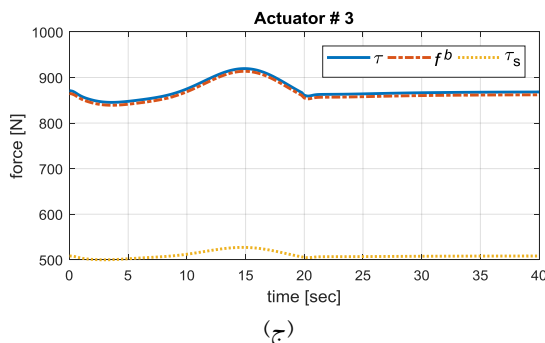
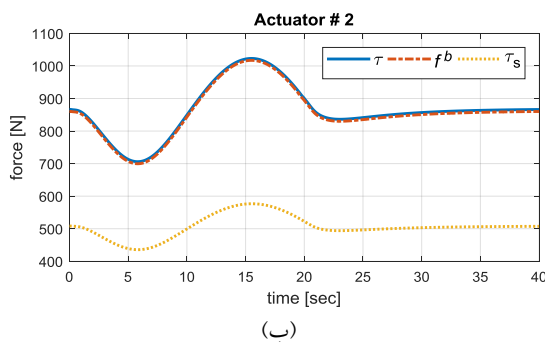
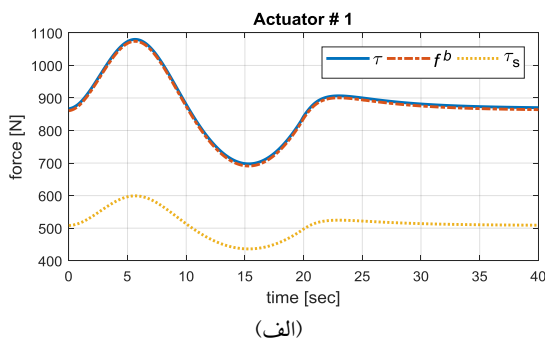


(ب)

شکل ۱۱. حس حرکت خلبان وسیله واقعی و شبیه‌ساز در مانور نمونه، الف) سرعت زاویه‌ای، ب) نیروی مخصوص

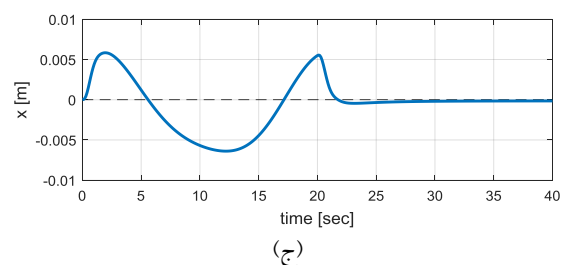
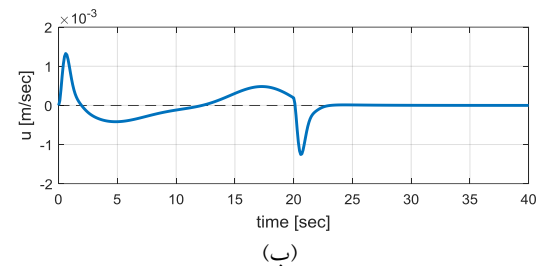
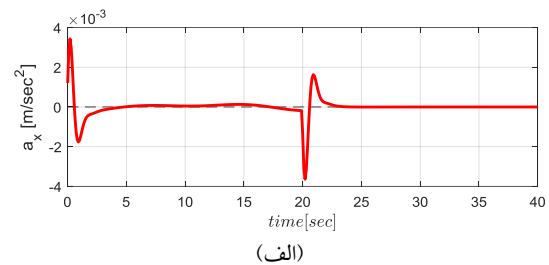
در شکل (۱۱) حس حرکتی خلبان شبیه‌ساز در مقایسه با خلبان وسیله نقلیه ترسیم شده‌اند. مطابق شکل (الف) قابلیت بهره‌گیری سامانه حرکت ساز از رویکرد «حرکت هماهنگ زاویه‌ای» به روشنی مشاهده می‌شود. در شکل (ب) تطابق حس حرکتی خلبان شبیه‌ساز با خلبان وسیله واقعی در ردیابی ورودی مرجع موج سینوسی مشاهده می‌شود. تاریخچه زمانی متغیرهای سینماتیک توصیف کننده پیکربندی سکوی متحرک (x, θ) به همراه نرخ تغییرات زمانی اول و دوم آنها (u, ω) و (a_x, α) در شکل‌های (الف، ب و ج) و (الف، ب و ج) ترسیم شده‌اند.

پیش‌بین با قابلیت کنترل بهینه بر پایه سینماتیک معکوس سامانه حرکتی در دو مانور نمونه موج مربعی و موج سینوسی در کانال نیروی مخصوص همراه با سرعت زاویه‌ای صفر در کانال سرعت زاویه‌ای استفاده گردید. مطابق سامانه محاسباتی یکپارچه طراحی شده امکان مطالعه نیروهای استاتیکی و دینامیکی متناظر در عملگرها به منظور برپایی حس حرکتی کاملاً یکسان بین خلبان شبیه‌ساز با خلبان وسیله نقلیه واقعی فراهم شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی، نشان دهنده اختلاف قابل توجه و کاملاً نامتناسب نیروهای عملگرها در بارگذاری استاتیک و دینامیک متناظر در مانورهای نمونه را داشته و ضرورت توجه به نیروهای دینامیکی در طراحی مکانیزم و انتخاب عملگرها را محرز می‌نماید.



شکل ۱۴. نیروی عملگرها به تفکیک نیروی پیستون، نیروی وارد به سکوی متحرک و نیروی عملگر استاتیکی برای عملگرهای الف) شماره یک، ب) شماره دو و ج) شماره سه

ب و ج) ترسیم شده‌اند. بطور مشابه، اختلاف اندک نیروی (τ) با (fb) مطابق رابطه (۵۹) در منحنی‌های حاصل مشاهده می‌شود.



شکل ۱۳. سینماتیک حرکت زاویه‌ای سکوی متحرک، الف) شتاب، ب) سرعت و ج) جابجایی طولی

مطابق نتایج شبیه‌سازی، تطابق صحیح نیروهای عملگرها با حرکت‌های زاویه‌ای سکوی متحرک بیانگر دقت شبیه‌سازی است. در این آزمون نیز اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین نیرو در پیستون عملگر با نیروی مفصل اتصال با سکو وجود ندارد. همچنین مطابق شکل تطابق نیروی بارگذاری استاتیک سکو با محاسبات دینامیک مشهود بوده و تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین بارگذاری دینامیک با بارگذاری استاتیک مشاهده می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله سامانه محاسباتی دینامیک معکوس سکوی ۶ درجه آزادی استوارت - گوف به عنوان متداولترین سامانه حرکتی شبیه‌ساز پرواز با احتساب دینامیک اجزای بازوهای ماهر و سکوی متحرک بر اساس رویکرد نیوتن - اولر ارائه گردید. در شبیه‌سازی سامانه محاسباتی، از نتایج خروجی سامانه حرکت‌ساز تطبیقی مدل

- [1] A. Nikranjbar, Real-time Model Predictive Control Motion Cueing using Motion System Inverse Kinematics, *Journal of Aerospace Mechanics*, Vol.14, No.4, pp.33-50, 2018. (in Persian)
- [2] B. Dasgupta, T. Mruthyunjaya, A Newton-Euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator, *Mechanism and Machine Theory*, Vol.33, No.8, pp.1135-1152, 1998.
- [3] H. D. Taghirad, Parallel robots: mechanics and control, NW: CRC press, 2013.
- [4] K. Harib, K. Srinivasan, Kinematic and dynamic analysis of Stewart platform-based machine tool structures, *Robotica*, Vol.21, No.5, pp.541-554, 2003.
- [5] W. Khalil, S. Guegan, Inverse and direct dynamic modeling of Gough-Stewart robots, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.20, No.4, pp.754-761, 2004.
- [6] W. L. Tsai, Solving the inverse dynamics of a Stewart-Gough manipulator by the principle of virtual work, *Transactions-American Society of Mechanical Engineers, Journal of Mechanical Design*, Vol.122, No.1, pp.3-9, 2000.
- [7] H. Kalani, A. Rezaei, A. Akbarzadeh, Improved general solution for the dynamic modeling of Gough-Stewart platform based on principle of virtual work, *Nonlinear Dynamics*, Vol.83, No.4, pp.2393-2418, 2016.
- [8] A. Ghobakhloo, M. Eghtesad, M. Azadi. Position control of a Stewart-Gough platform using inverse dynamics method with full dynamics, in Advanced Motion Control, 9th IEEE International Workshop on. Istanbul, Turkey, 2006.
- [9] N Mostashiri, A. Akbarzadeh, J. Dhuipa, A. Verl, W. Xu, A Comprehensive Inverse Dynamics Problem of a Stewart Platform by Means of Lagrangian Formulation, Proceedings of the ASME 2017 Dynamic Systems and Control Conference, Virginia, USA, October 11-13, 2017.
- [10] M. A. Lopes, Dynamic modeling of a Stewart platform using the generalized momentum approach, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol.14, No.8, pp. 3389-3401, 2009.
- [11] A. Mahmoodi, M. Menhaj, M. Sabzehparvar, An efficient method for solution of inverse dynamics of Stewart platform, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol.81, No.5, pp.398-406, 2009.
- [12] S. Pedrammehr, M. Mahboubkhah, Inverse Kinematic and Dynamic Analysis of Stewart Mechanism, *Journal of Mechanical Eng.*, Vol.39, No.2, pp.67-72, 2009.
- [13] A. Nikranjbar, Real Time Fuzzy Model Predictive Motion Cueing Design. *Aerospace Knowledge and Technology Journal*, Vol.7, No.1, pp.125-139, 2018. (in Persian)
- [14] A. Omran, A. Kassem, Optimal task space control design of a Stewart manipulator for aircraft stall recovery, *Aerospace Science and Technology*, Vol.15, No.5, pp. 353-365, 2011.

پی نوشت

-
1. Stewart – Gough Platform
 2. Twist
 3. $a \cdot (b \times c) = b \cdot (c \times a) = c \cdot (a \times b)$
 4. $a \times (b \times c) = b(a \cdot c) - c(a \cdot b)$
 5. Tilt coordination
 6. Specific force
 7. Motion Cueing
 8. Decoupled
 9. Surge-Pitch
 10. Sway-Roll
 11. Heave-Yaw
 12. Otolith
 13. Semi-Circular Canals
 14. Tilt coordination