



## ارزیابی عملکرد ربات 3UPS-PRU در فضای کاری و افزایش درجه آزادی آن با تغییر در ساختار

رضا هادی‌نژاد<sup>۱</sup>، عرفان میرشکاری<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

\*نویسنده مسئول: erfan.mirshकारी@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹

### چکیده

ربات‌های موازی از یک صفحه متحرک تشکیل شده‌اند که به وسیله تعدادی لینک به صورت موازی به صفحه ثابتی وصل می‌شوند. سینماتیک زنجیره بسته ربات‌های موازی، موجب صلبیت و استحکام ساختاری بیشتر و در نتیجه دقت بالای آن‌ها در مقایسه با ربات‌های زنجیره باز (سری) می‌گردد. در کار حاضر، ابتدا ساختار ربات 3UPS-PRU مورد بررسی قرار گرفته و سپس سینماتیک معکوس آن استخراج شده است. پس از تعیین روابط سینماتیکی، مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین محاسبه شده و عدد وضعیت ربات در نقاط مختلف فضای کاری تعیین گردیده است. در ادامه، توزیع عدد وضعیت در فضای کاری تحلیل شده است. بررسی‌ها نشان داده است که تغییر ارتفاع منجر به تغییر در مقدار عدد وضعیت سراسری شده و بر عملکرد کلی مکانیزم تاثیر می‌گذارد. در نهایت با اضافه نمودن مفصل یونیورسال به محل اتصال لینک مرکزی و پایه ثابت این ربات یک ساختار جدید به نام 3UPS-UPRU ارائه می‌شود که درجه آزادی ربات را افزایش می‌دهد. همچنین به منظور کنترل درجات آزادی افزوده شده، یک مفصل یونیورسال گیربکس‌دار با دنده سیاره‌ای طراحی و معرفی شده است.

**کلمات کلیدی:** ربات موازی 3UPS-PRU، ماتریس ژاکوبین، عدد وضعیت سینماتیکی، مهارت ربات، افزایش درجه آزادی.

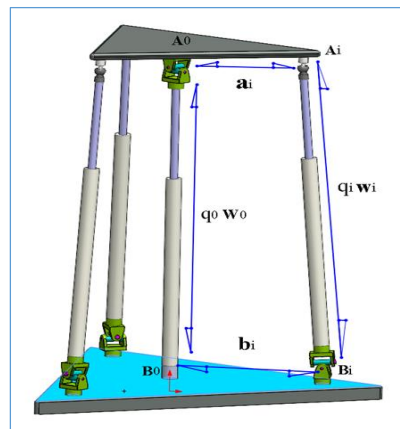
### مقدمه

ربات‌های موازی به دلیل سرعت عملکرد و دقت بالا در مکان‌یابی، به صورت روز افزون در کاربردهای مختلف صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ربات‌های موازی در مقایسه با ربات‌های سری، مزایایی مانند صلبیت و دقت بالاتر، توانایی تحمل نیرو و گشتاور بیشتر، و سرعت عملکرد بالاتر دارند [۱]. این مکانیزم‌ها شامل یک صفحه متحرک هستند که از طریق چندین بازو به صورت موازی به یک صفحه ثابت متصل می‌شود. در اینجا اصطلاح "موازی" صرفاً به معنای هندسی نیست، بلکه نشان‌دهنده ساختاری است که در آن چندین لینک با هم، بدون الزام به موازی بودن، یک پلتفرم نهایی را نگه می‌دارند و حرکت آن را ممکن می‌سازند اولین نمونه‌های مکانیزم‌های موازی توسط گو و استوارت [۲] طراحی و معرفی شدند. ارزیابی عملکرد ربات‌های موازی نقش مهمی در طراحی سینماتیکی و دینامیکی آن‌ها دارد و دستیابی به یک طراحی بهینه را برای طراح امکان‌پذیر می‌سازد [۳]. معیارهای سنجش عملکرد سینماتیکی این ربات‌ها شامل شاخص مهارت [۴]، عدد وضعیت [۵]، فضای دسترسی [۶] و تحلیل نقاط تکین [۷] است. تعریف این شاخص‌ها بر اساس ماتریس ژاکوبین صورت می‌گیرد. ماتریس ژاکوبین در ربات‌های موازی رابطه بین بردار سرعت صفحه متحرک و بردار سرعت مفاصل را مشخص می‌کند. بر اساس این شاخص‌ها، ساختار ربات‌های موازی بهینه می‌گردند. کلایایا و همکاران [۸] به بهینه‌سازی ربات موازی بر اساس فضای کاری و شاخص عدد وضعیت کلی پرداختند. میرشکاری و همکاران [۹] تاثیر پارامترهای ساختاری ربات موازی شش درجه آزادی هگزا را بر شاخص‌های عملکرد سینماتیکی و دینامیکی بررسی کردند و با استفاده از الگوریتم چندهدفه بهینه‌سازی زنبور عسل، ساختار این ربات را بهینه‌سازی کرده‌اند. در کار حاضر، ابتدا روابط سینماتیکی و ماتریس ژاکوبین مکانیزم 3UPS-PRU که توسط شو و همکاران [۱۰] ارائه شده است استخراج قرار می‌گردد. سپس شاخص‌های عملکردی مناسب بر مبنای عدد وضعیت استخراج می‌شوند و توزیع این شاخص در فضای کاری تعریف شده ربات به دست می‌آید. در نهایت با طراحی یک مفصل یونیورسال گیربکس‌دار با دنده سیاره‌ای فعال، ساختار جدیدی ارائه می‌شود که دارای قابلیت افزایش درجه آزادی ربات می‌باشد.



### ساختار ربات 3UPS-PRU

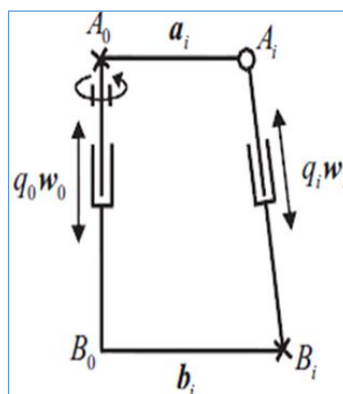
ساختار این ربات موازی در شکل (۱) نشان داده شده است. این ربات، چهار درجه دارد و از یک پلتفرم متحرک تشکیل شده است که از طریق سه لینک با زنجیره سینماتیکی<sup>۱</sup> UPS یکسان و یک لینک زنجیره سینماتیکی<sup>۲</sup> PRU به سکوی پایه متصل است. لینک مرکزی PRU روی سکوی پایه ثابت می‌شود. در اینجا  $U, P, S, R$  به ترتیب یک مفصل یونیورسال، خطی، کروی و لولایی را نشان می‌دهند. در این ربات مفصل خطی داری عملگر می‌باشد که توسط یک سرو موتور هدایت می‌شود. با توجه به محدودیت‌های مناسب لینک مرکزی و سه لینک خارجی، پلتفرم متحرک دارای یک درجه حرکت انتقالی و سه درجه حرکت چرخشی است. این ربات موازی را می‌توان برای توسعه یک شبیه‌ساز حرکت یا برای سایر کاربردهای مورد نیاز برای یک حرکت انتقالی و سه حرکت چرخشی استفاده نمود [۱۱].



شکل ۱: مکانیزم موازی 3UPS-PRU

### استخراج روابط سینماتیک

در این ربات موقعیت فضایی پلتفرم متحرک توسط چهار عدد عملگر از نوع مفصل کشویی تعیین می‌گردد. روابط هندسی آن با استفاده از دو دستگاه مختصات معین می‌شود. یکی از دستگاه‌های مختصات متصل به پایه ثابت در نقطه  $B_0$  بوده که موقعیت هر مفصل روی صفحه پایه ثابت با بردار  $b_i$  و دیگری متصل به پلتفرم متحرک در نقطه  $A_0$  بوده که موقعیت مفاصل متصل به پلتفرم متحرک با بردار  $a_i$  مشخص می‌گردد. مشخصات هندسی مفاصل رابط بین دو صفحه که از نوع کشویی می‌باشد با پارامتر  $q_i$  معین می‌گردد.



شکل ۲: پارامترهای ساختاری مکانیزم 3UPS-PRU

<sup>1</sup> Universal Prismatic Spherical

<sup>2</sup> Prismatic Revolute Universal



معادلات مکان، براساس روش سینماتیک معکوس برای این پلتفرم مطابق شکل (۲) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\mathbf{q}_i = \mathbf{q}_0 + {}^B \mathbf{a}_i - {}^B \mathbf{b}_i \quad (1)$$

$$\mathbf{q}_i = \mathbf{q}_0 + {}^{B_0} \mathbf{R}_{A_0} {}^A \mathbf{a}_i - {}^B \mathbf{b}_i$$

همانطور که مشاهده می‌شود  ${}^B \mathbf{a}_i$  در معادله باید نسبت به دستگاه مختصات ثابت باشد ولی مختصاتی که به عنوان ورودی وارد می‌شود نسبت به دستگاه مختصات متحرک می‌باشد. برای این منظور باید همه مختصات را با استفاده از ماتریس‌های دوران نسبت به دستگاه ثابت بدست آید. جهت‌گیری پلتفرم متحرک با این ماتریس دوران مشخص می‌گردد. محاسبه ماتریس دوران معادل  ${}^{B_0} \mathbf{R}_{A_0}$  به سادگی صورت می‌گیرد، زیرا دوران‌ها همگی حول محورهای مختصات مرجع انجام می‌شوند.

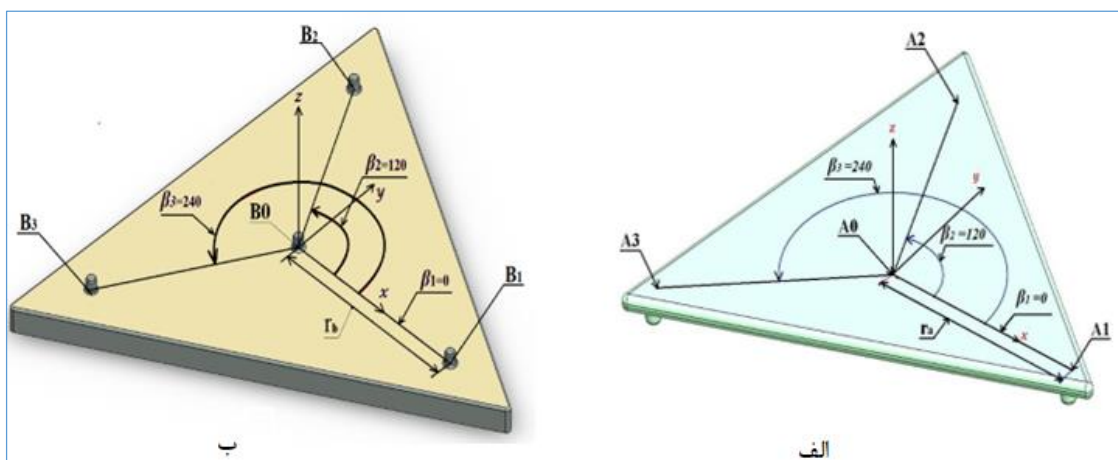
$${}^{B_0} \mathbf{R}_{A_0} = \mathbf{R}_z(\phi_z) \mathbf{R}_y(\phi_y) \mathbf{R}_x(\phi_x)$$

$${}^{B_0} \mathbf{R}_{A_0} = \begin{bmatrix} c\phi_z c\phi_y & c\phi_z s\phi_y s\phi_x - s\phi_z c\phi_x & c\phi_z s\phi_y c\phi_x + s\phi_z s\phi_x \\ s\phi_z c\phi_y & s\phi_z s\phi_y s\phi_x + c\phi_z c\phi_x & s\phi_z s\phi_y c\phi_x - c\phi_z s\phi_x \\ -s\phi_y & c\phi_y s\phi_x & c\phi_y c\phi_x \end{bmatrix} \quad (2)$$

در جایی که  $\phi_x$ ،  $\phi_y$  و  $\phi_z$  مقادیر زوایای دوران صفحه متحرک نسبت به مختصات متصل به صفحه ثابت هستند و حروف C و S مختصراً نشان دهنده سینوس و کسینوس زوایا می‌باشند، توجه به ترتیب دوران‌های انجام شده و در نتیجه ترتیب ضرب ماتریس‌های دوران مهم است، زیرا ماتریس‌ها در حالت کلی خاصیت جابه‌جایی ندارند.

پس از محاسبه ماتریس دوران  ${}^{B_0} \mathbf{R}_{A_0}$  بردار موقعیت نقاط مربوط به محل اتصال مفصل کشویی  $B_i$ ، نسبت به دستگاه مختصات متصل به  $B_0$  مطابق شکل (۳) به صورت زیر بدست می‌آید:

$${}^B \mathbf{b}_i = \begin{bmatrix} r_b \cos \beta_i \\ r_b \sin \beta_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$



شکل (۳) الف: بردار موقعیت  $r_a$  و محل اتصال مفصل کشویی به صفحه متحرک ب: بردار موقعیت  $r_b$  و محل اتصال مفصل کشویی به صفحه ثابت



همچنین بردار موقعیت نقاط مربوط به محل اتصال مفصل کشویی  $A_i$ ، نسبت به دستگاه مختصات متصل به  $B_0$  و  $A_0$  مطابق شکل (۳) به صورت زیر بدست می‌آید:

$${}^A \mathbf{a}_i = \begin{bmatrix} r_a \cos \beta_i \\ r_a \sin \beta_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۴)$$

در نهایت با محاسبه ماتریس دوران  ${}^{B_0} \mathbf{R}_{A_0}$ ، بردارهای موقعیت  ${}^A \mathbf{a}_i$  و  ${}^B \mathbf{b}_i$  و جایگذاری در رابطه (۱) مقادیر  $\mathbf{q}_i$  بدست می‌آید:

$$\mathbf{q}_0 = \begin{bmatrix} q_{0x} \\ q_{0y} \\ q_{0z} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q}_1 = \begin{bmatrix} q_{1x} \\ q_{1y} \\ q_{1z} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q}_2 = \begin{bmatrix} q_{2x} \\ q_{2y} \\ q_{2z} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q}_3 = \begin{bmatrix} q_{3x} \\ q_{3y} \\ q_{3z} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

### تحلیل سرعت و محاسبه ماتریس ژاکوبین

معادله موقعیت مرتبط با لینک  $\mathbf{i}$  ام را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$q_0 \mathbf{w}_0 + \mathbf{a}_i = \mathbf{b}_i + q_i \mathbf{w}_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (۶)$$

با گرفتن مشتق گیری از رابطه (۶)، معادله (۷) به شرح زیر به دست می‌آید:

$$\dot{q}_0 \mathbf{w}_0 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{a}_i = \dot{q}_i \mathbf{w}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times q_i \mathbf{w}_i \quad (۷)$$

که در این معادله  $\boldsymbol{\omega}_i$  بردار سرعت زاویه‌ای لینک  $\mathbf{i}$  ام و  $\boldsymbol{\omega}$  بردار سرعت زاویه‌ای صفحه متحرک می‌باشد. با بسط دادن دو طرف معادله (۷) در  $\mathbf{w}_i$  بدست می‌آید:

$$\dot{q}_i = \dot{q}_0 \mathbf{w}_i^T \mathbf{w}_0 + (\mathbf{a}_i \times \mathbf{w}_i)^T \boldsymbol{\omega} \quad (۸)$$

رابطه (۸) را می‌توان به صورت ماتریسی بیان نمود:

$$\dot{q} = J \dot{x} \quad (۹)$$

در رابطه (۹) داریم:

$$\dot{q} = [\dot{q}_0 \quad \dot{q}_1 \quad \dot{q}_2 \quad \dot{q}_3]^T, \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} v \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix}, \quad v = \dot{q}_0 \quad (۱۰)$$

که در آن  $v$  سرعت خطی صفحه متحرک،  $\dot{x}$  بردار سرعت صفحه متحرک و  $J$  ماتریس ژاکوبین است که بردار سرعت صفحه متحرک را به بردار سرعت مفاصل ارتباط می‌دهد. یک رابطه خطی بین بردار سرعت صفحه متحرک و بردار سرعت مفاصل وجود دارد. در نتیجه شکل ماتریسی معادله (۱۰) برابر است با:



$$\begin{aligned} \dot{q}_0 &= \begin{bmatrix} w_0^T w_0 & (0 \times w_0)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \Rightarrow \dot{q}_0 = w_0^T w_0 + (0 \times w_0)^T \omega \\ \dot{q}_1 &= \begin{bmatrix} w_1^T w_0 & (a_1 \times w_1)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \Rightarrow \dot{q}_1 = w_1^T w_0 + (a_1 \times w_1)^T \omega \\ \dot{q}_2 &= \begin{bmatrix} w_2^T w_0 & (a_2 \times w_2)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \Rightarrow \dot{q}_2 = w_2^T w_0 + (a_2 \times w_2)^T \omega \\ \dot{q}_3 &= \begin{bmatrix} w_3^T w_0 & (a_3 \times w_3)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \Rightarrow \dot{q}_3 = w_3^T w_0 + (a_3 \times w_3)^T \omega \end{aligned} \quad (11)$$

در نهایت:

$$\dot{q} = J\dot{x} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_0^T w_0 & (0 \times w_0)^T \\ w_1^T w_0 & (a_1 \times w_1)^T \\ w_2^T w_0 & (a_2 \times w_2)^T \\ w_3^T w_0 & (a_3 \times w_3)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (12)$$

از معادله (۱۲) ماتریس ژاکوبین برابر است با:

$$J = \begin{bmatrix} w_0^T w_0 & (0 \times w_0)^T \\ w_1^T w_0 & (a_1 \times w_1)^T \\ w_2^T w_0 & (a_2 \times w_2)^T \\ w_3^T w_0 & (a_3 \times w_3)^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}_{1 \times 3} \\ w_1^T w_0 & (a_1 \times w_1)^T \\ w_2^T w_0 & (a_2 \times w_2)^T \\ w_3^T w_0 & (a_3 \times w_3)^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_0 \\ J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

جهت محاسبه ماتریس ژاکوبین، مقادیر  $w_i$  و  $w_0$  که همان مقادیر بردار واحد در امتداد لینک مرکزی و  $\dot{a}$  می‌باشد را با استفاده از رابطه (۱۴) می‌توان بدست آورد:

$$w_i = \frac{q_i}{|q_i|} \quad , \quad w_0 = \frac{q_0}{|q_0|} \quad (14)$$

که مقادیر  $|q_0|$  و  $|q_i|$  به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} |q_0| &= \sqrt{q_{0x}^2 + q_{0y}^2 + q_{0z}^2} \\ |q_i| &= \sqrt{q_{ix}^2 + q_{iy}^2 + q_{iz}^2} \end{aligned} \quad (15)$$

### شاخص‌های عملکردی

مهارت سینماتیکی، توانایی مجری نهایی در انجام خیلی دقیق و آسان جابجایی‌های اختیاری بسیار کوچک حول یک نقطه در فضای کاری است. در حقیقت می‌توان با استفاده از ژاکوبین و شاخص‌های سینماتیکی و استاتیکی، میان خطای موجود در مفاصل و خطای مجری نهایی در فضای کاری رابطه‌ی خطی برقرار نمود. علاوه بر این با توجه به این که این شاخص‌ها بر مبنای محاسبه ژاکوبین می‌باشند می‌توان از آن‌ها به عنوان شاخصی جهت فاصله از نقاط تکین استفاده نمود. از شاخص‌های اندازه‌گیری مهارت، شاخص‌های عدد وضعیت و توانایی تردستی معرفی گردیده‌اند. یکی از مهم‌ترین شاخص‌های مورد استفاده در بیان



مهارت، شاخص عدد وضعیت است که به بررسی اثر خطا در فضای مفصلی بر خطا در فضای کاری می‌پردازد. برحسب مقادیر تکین عدد وضعیت را می‌توان به شرح رابطه (۱۶) نوشت:

$$\text{cond} = \frac{\sigma_{\max}(\mathbf{J})}{\sigma_{\min}(\mathbf{J})} \quad (16)$$

$$K_J = \frac{1}{\text{cond}}$$

در اینجا  $\sigma_{\max}(\mathbf{J})$  و  $\sigma_{\min}(\mathbf{J})$  به ترتیب بیشینه و کمینه مقادیر تکین ماتریس ژاکوبین هستند. یکی از معیارهای طراحی آن است که مکانیزم موازی در یک موقعیت یا در تمام فضای کاری، ایزوتروپ باشد. ایجاد حرکت یکنواخت و سرعت مفصل محدود تا حد زیادی به عدد وضعیت بستگی دارد. شاخص ارایه شده وابسته به موقعیت مکانیزم می‌باشد، به همین دلیل می‌توان به جای مشخص نمودن شاخص در وضعیتی مشخص، از شاخص وضعیت سراسری که میانگینی از شاخص عدد وضعیت در سراسر فضای کاری مورد نظر است مطابق رابطه (۱۷) استفاده نمود.

$$\eta_J = \frac{\int \frac{1}{K_J} dw}{\int dw} \quad (17)$$

### بررسی عملکرد سینماتیکی ربات

به منظور بررسی عملکرد سینماتیکی ربات موازی این تحقیق، رباتی مطابق با ابعاد جدول (۱) در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱: ابعاد ربات 3UPS-PRU

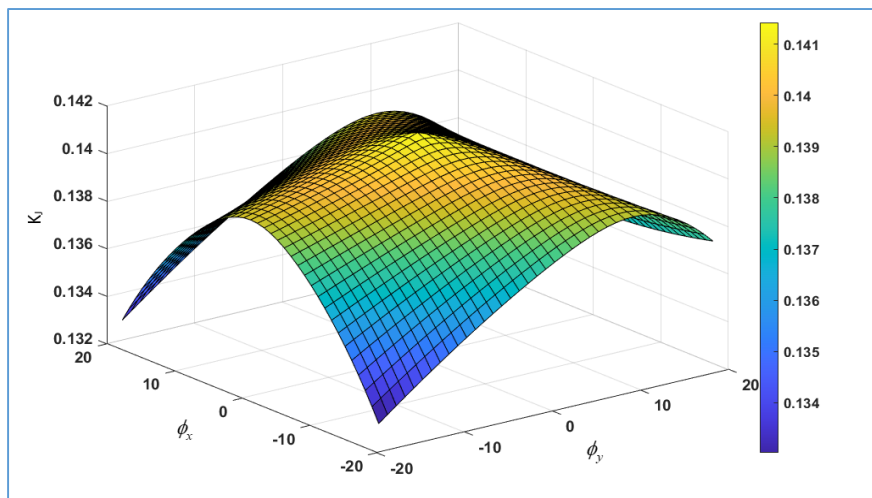
| ردیف | پارامترهای ساختاری        | علامت مشخصه | اندازه |
|------|---------------------------|-------------|--------|
| ۱    | شعاع سکوی ثابت            | $r_b (cm)$  | ۳۰     |
| ۲    | شعاع سکوی متحرک           | $r_a (cm)$  | ۲۰     |
| ۳    | طول اولیه لینک فعال میانی | $q_0 (cm)$  | ۲۰     |

برای بررسی شاخص عدد وضعیت در محدوده فضای کاری ربات، در ابتدا فرض می‌شود که حرکت ربات بین این محدوده‌ها

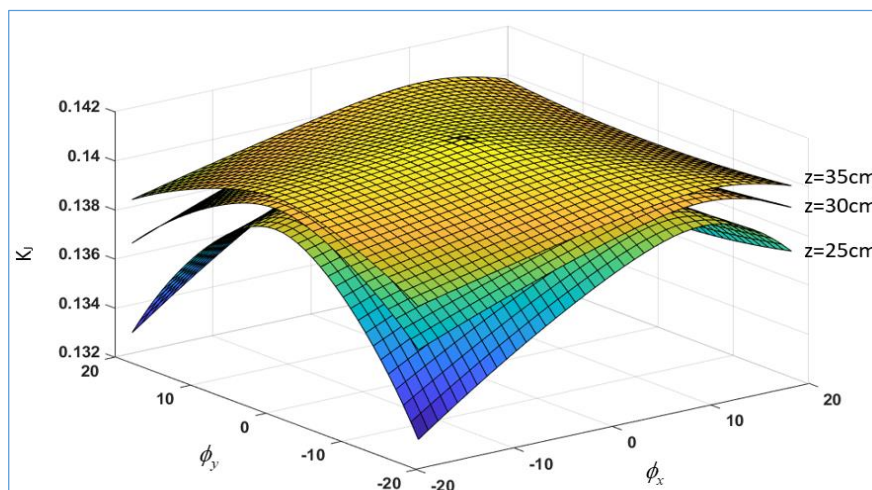
$$\text{باشد: } \phi_z = 0, -20 \leq \phi_x, \phi_y \leq 20$$

در شکل (۴)، توزیع اندازه شاخص وضعیت ربات در زوایای متفاوت و در ارتفاع ۲۵ سانتی‌متری نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود ربات در  $\phi_x = \phi_y = 0$  دارای بهترین وضعیت از لحاظ شاخص عدد وضعیت است و این مقدار ۰/۱۴۱۴=K<sub>I</sub> است. این مقدار نشان می‌دهد در حالت، ربات بالاترین ظرفیت اعمال حرکت جهت‌های مختلف را دارد. همچنین ملاحظه می‌شود که کمترین مقدار عدد وضعیت در  $\phi_x = \phi_y = -20$  بوده و این مقدار برابر با K<sub>I</sub>= ۰/۱۳۳۰ است. این مقدار نشان می‌دهد که ربات در این موقعیت توانایی اعمال حرکت کمتری دارد.

جهت بررسی میزان تغییرات عدد وضعیت نسبت به ارتفاع، سکوی متحرک این ربات موازی در شکل (۵)، توزیع اندازه شاخص وضعیت ربات، در سه وضعیت ۲۵ و ۳۰ و ۳۵ سانتی‌متری نشان داده شده است. مقادیر به دست آمده از این نمودار در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. با بررسی این مقادیر ملاحظه می‌شود، در حالتی که صفحات دورانی ندارند مقادیر عدد وضعیت یکسان است. ولی با دوران صفحه متحرک صفحاتی که در موضعیت بالاتری قرار دارند عملکرد سینماتیکی بهتری دارند.



شکل ۴: نمودار تغییرات عدد وضعیت در فضای کاری ربات

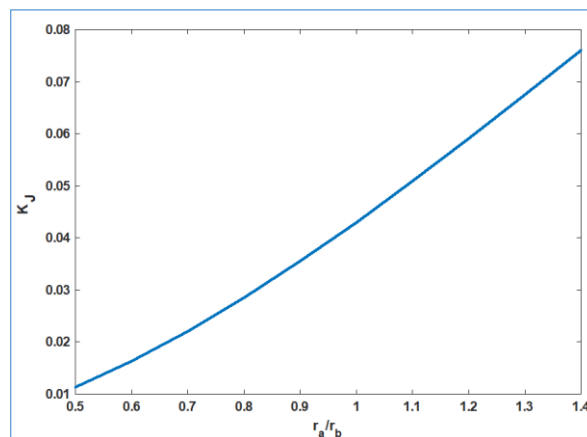


شکل ۵: نمودار تغییرات عدد وضعیت بر حسب ارتفاع در فضای کاری ربات

جدول ۲: مقدار وضعیت محلی و سراسری ربات، برای سه ارتفاع متفاوت صفحه متحرک

| $\eta_j$ | $\max(K_j)$ | $\min(K_j)$ | ارتفاع صفحه متحرک (سانتی متر) |
|----------|-------------|-------------|-------------------------------|
| ۰/۱۳۸۸   | ۰/۱۴۱۴      | ۰/۱۳۳۰      | ۲۵                            |
| ۰/۱۳۹۹   | ۰/۱۴۱۴      | ۰/۱۳۶۷      | ۳۰                            |
| ۰/۱۴۰۴   | ۰/۱۴۱۴      | ۰/۱۳۸۵      | ۳۵                            |

تأثیر تغییر نسبت اندازه شعاع صفحه متحرک به صفحه ثابت در شکل نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در یک ارتفاع مشخص و در دامنه حرکت عملگرهای کشویی، با نزدیک شدن این نسبت به عدد ۱ (برابر شدن شعاع سکوی ثابت و متحرک)، مقدار عدد وضعیت افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، مقدار عدد وضعیت در نسبت ۰/۴ و  $z = 21cm$  برابر با ۰/۴ است، در حالی که در نسبت ۰/۶ مقدار آن  $K_j = 0/016$  می‌باشد. این تغییرات نشان‌دهنده افزایش ۵۲ درصدی عدد وضعیت است. با این حال، باید توجه داشت که کاهش این نسبت و بهبود عدد وضعیت، موجب کاهش شعاع سکوی متحرک شده و در نتیجه باعث کوچک‌تر شدن آن و احتمال تداخل مفاصل و لینک‌ها می‌شود.



شکل ۶: نمودار تغییرات عدد وضعیت بر حسب نسبت شعاع متحرک به صفحه ثابت

### ساختار پیشنهادی جهت افزایش درجه آزادی ربات 3UPS-PRU

از آنجا که این ربات دارای چهار آزادی شامل سه حرکت دورانی و یک حرکت انتقالی است با اعمال تغییراتی در ساختار آن، دو درجه آزادی به ربات افزوده می‌شود. با افزودن مفصل یونیورسال گیربکس دار فعال به پلتفرم اصلی ربات، یک لینک به ساختار ربات افزوده شود و عملاً تعداد رابطها از ۱۰ عدد به ۱۱ عدد تغییر کند. در نتیجه پارامترهای فرمول گروبلر برای این ربات جدید (3UPS-UPRU) برابر است با:

$$\lambda = 6, \quad n = 11, \quad j = 13, \quad f_p = 0$$

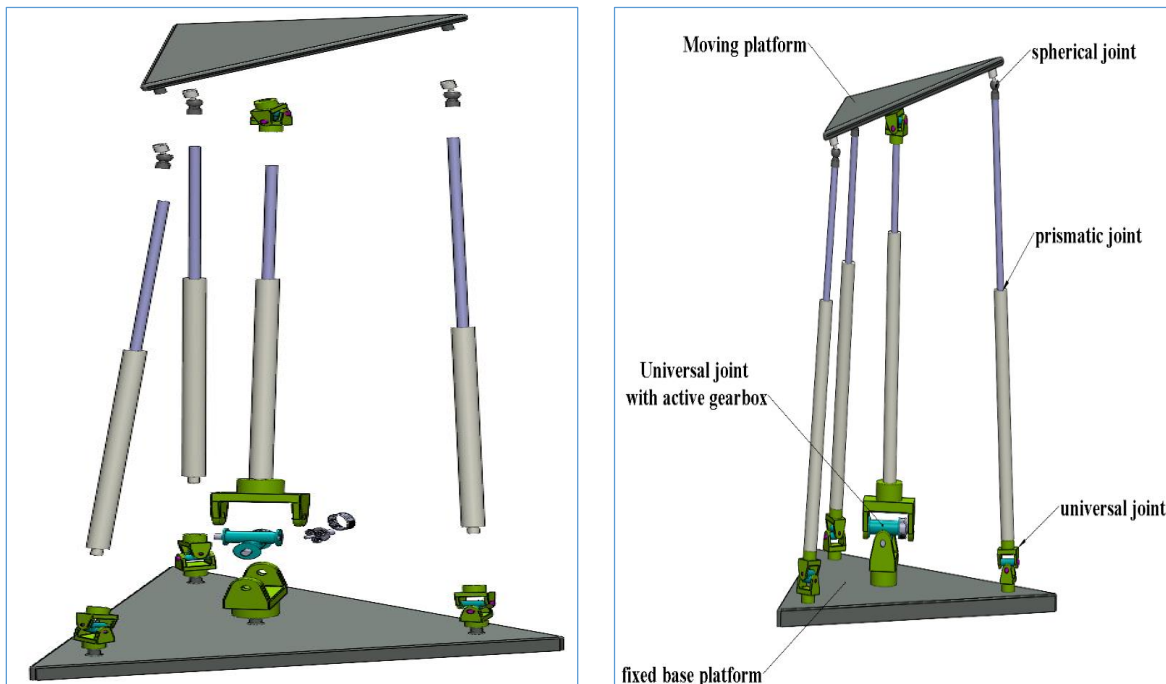
$$f_i = 5U + 4P + 3S + 1R = 5 \times 2 + 4 \times 1 + 3 \times 3 + 1 \times 1 = 24 \quad (19)$$

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i - f_p \Rightarrow F = 6(11 - 13 - 1) + (24 - 0) = 6$$

در این رابطه،  $F$  = درجات آزادی مکانیسم،  $\lambda$  = درجات آزادی فضا،  $n$  = تعداد لینک‌های موجود در مکانیسم از جمله پایه ثابت و متحرک،  $j$  = تعداد مفاصل مکانیسم،  $f_i$  = درجات آزادی مفصل  $i$  ام،  $f_p$  = تعداد کل درجات آزادی غیر فعال (لینک هرزگرد) می‌باشند.

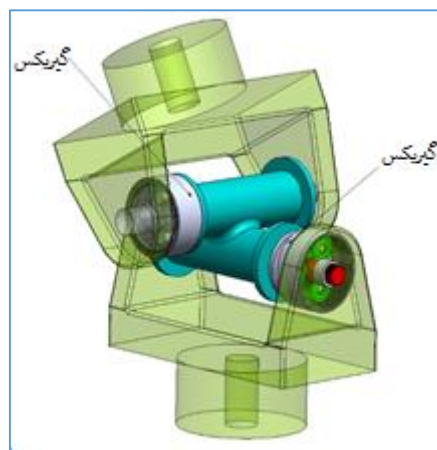
ربات موازی 3UPS-UPRU در شکل (۷) نشان داده شده است. با اضافه نمودن مفصل یونیورسال به محل اتصال لینک مرکزی و پایه ثابت در ساختار 3UPS-PRU و ایجاد ساختار جدید، تعداد عملگر و محرک‌های ربات کمتر از درجه آزادی ربات می‌شود. در نتیجه ساختار جدید تبدیل به یک ربات با درجه آزادی ناقص شده که نقاط تکین بیشتری در فضای کاری ربات می‌باشد. لذا جهت رفع این نقیصه باید تعداد محرک‌ها با درجه آزادی ربات برابر شود که با استفاده از یک مفصل یونیورسال گیربکس دار فعال تبدیل به ساختار جدید شده که پلتفرم متحرک از طریق سه لینک UPS یکسان و یک لینک UPRU به سکوی پایه متصل است. در اینجا U، P، S و R به ترتیب یک مفصل یونیورسال، کشویی، کروی و چرخشی را نشان می‌دهند و  $\underline{P}$  نشان دهنده یک مفصل کشویی فعال است که توسط یک سرو موتور هدایت می‌شود.  $\underline{U}$  نشان دهنده یک مفصل یونیورسال گیربکس دار فعال است که توسط دو سرو موتور هدایت می‌شود. به دلیل محدودیت فضا و تولید گشتاور مناسب توسط دو سرو موتور، لازم است از مجموعه دنده‌های سیاره‌ای در ساختار مفصل یونیورسال گیربکس دار استفاده شود. با توجه به محدودیت‌های مناسب لینک مرکزی و سه لینک خارجی، پلتفرم متحرک می‌تواند دارای دو یا سه درجه حرکت انتقالی و سه درجه حرکت چرخشی باشد.





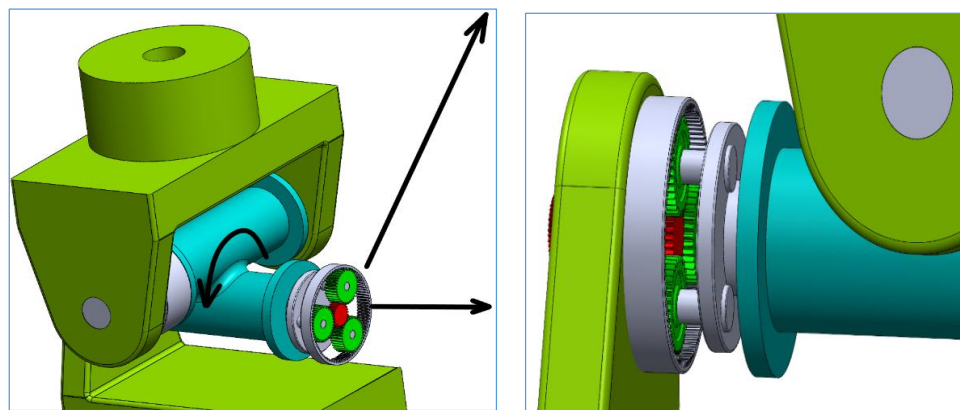
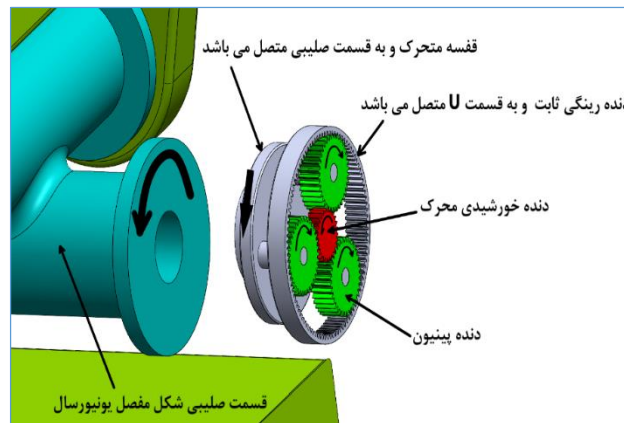
شکل ۷: پلتفرم ربات موازی 3UPS-UPRU

با افزودن مفصل یونیورسال به پلتفرم اصلی ربات مواز، به دلیل محدودیت فضا و تولید گشتاور مناسب توسط دو سرو موتور، لازم است از مجموعه دنده‌های سیاره‌ای در ساختار مفصل بکار برده شود.



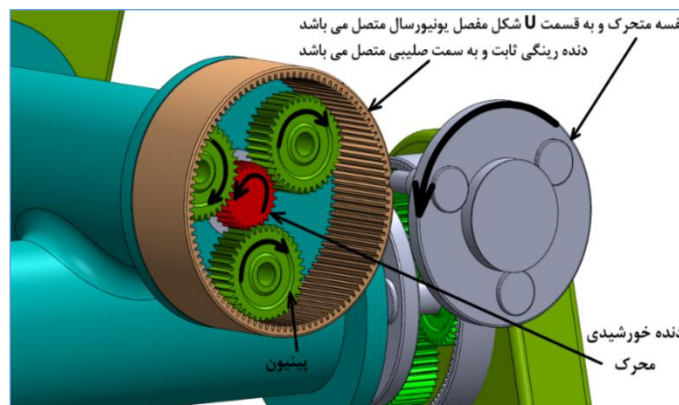
شکل ۸: مفصل یونیورسال فعال گیربکس‌دار

مفصل یونیورسال از دو قسمت U شکل و صلیبی تشکیل شده است که مطابق شکل (۸) با نصب دو عدد چرخدنده سیاره‌ای و سرو موتور در ساختار مفصل، تبدیل به یک مفصل یونیورسال گیربکس‌دار فعال شده که می‌توان در ساختار و درجه آزادی ربات تغییر ایجاد نمود. مطابق شکل (۹) دنده خورشیدی ورودی می‌باشد که دنده‌های پینیون را دور محورشان به گردش در می‌آورد و چون دنده رینگ بر روی قسمت U شکل مفصل یونیورسال ثابت شده است بر اثر نیروی عکس‌العملی آن سبب می‌شود که محور دنده‌های پینیون اطراف دنده رینگ حرکت نماید و در نتیجه قفسه را که به قسمت صلیبی مفصل یونیورسال متصل شده است در جهت گردش دنده خورشیدی با دور کمتر و گشتاور بیشتر به‌دوران درآورد. حال جهت اعمال نیروی لازم جهت محرک نمودن قسمت دوم U شکل مفصل یونیورسال لازم است سرو موتور را داخل قسمت صلیبی مفصل یونیورسال قرارداده تا نیروی لازم جهت چرخش دنده خورشیدی را اعمال نماید.



شکل ۹: مفصل یونیورسال گیربکس دار فعال حالت کاهش دور و افزایش گشتاور

در نتیجه مطابق شکل (۱۰) با چرخش دنده خورشیدی، دنده‌های پینیون را دور محورشان به گردش درمی‌آورد و چون دنده رینگ بر روی قسمت صلیبی شکل مفصل یونیورسال ثابت شده است بر اثر نیروی عکس‌العملی آن سبب می‌شود که محور دنده‌های پینیون اطراف دنده رینگ حرکت نماید و در نتیجه قفسه را که به قسمت U شکل مفصل یونیورسال متصل می‌باشد در جهت گردش دنده خورشیدی با دور کمتر و گشتاور بیشتر به دوران درآورد.



شکل ۱۰: مفصل یونیورسال گیربکس دار فعال حالت کاهش دور و افزایش گشتاور

### نتیجه گیری

در کار حاضر ساختار مکانیزم ربات موازی 3UPS-PRU و عملکرد سینماتیکی آن مورد بررسی قرار گرفته است. نوع درجات آزادی این ربات که شامل سه درجه آزادی دورانی و یک درجه آزادی انتقالی است باعث می‌شود که این ربات در کاربری‌های



مختلف شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین مشاهده شد در صورتی که نسبت شعاع صفحه متحرک به صفحه ثابت نزدیک به یک باشد ربات دارای بهترین وضعیت از لحاظ مهارت سینماتیکی خواهد بود. همچنین ملاحظه شد که در وضعیتی که صفحه متحرک، حرکت دورانی ندارد از لحاظ شاخص سینماتیکی عدد وضعیت در بهترین حالت خود است. با بالا رفتن ربات شاخص عدد وضعیت سراسری بهبود می‌یابد. در ادامه با اضافه نمودن یک مفصل یونیورسال گیربکس‌دار (دنده سیاره‌ای) به محل اتصال لینک مرکزی و پایه ثابت، یک ساختار جدید به نام 3UPS-U PRU ایجاد شده که می‌تواند میزان درجه آزادی ربات را تا شش درجه آزادی افزایش دهد و در نتیجه فضای کاری بیشتری داشته باشد. با استفاده از نتایج به دست آمده می‌توان رباتی را طراحی نمود که دارای مهارت سینماتیک مناسب و دقت عملکرد مطلوبی باشد.

## مراجع

- [1] Varshovi-Jaghargh, P., Naderi, D., Tale-Masouleh, M., (2012). Forward kinematic problem of two 4-RRUR with different geometric structures and one 4-RUU parallel robots. *Modares Mechanical Engineering*, 12(4), pp 105-119.
- [2] Yang, C., Ye, W., Li, Q., (2022). Review of the performance optimization of parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, 170, pp 104725.
- [3] Kong, L., Chen, G., Wang, H., Huang, G., Zhang, D., (2021). Kinematic calibration of a 3-PRRU parallel manipulator based on the complete, minimal and continuous error model. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 71, pp 102158.
- [4] Yang, Y., O'Brien, J. F., (2010). A sequential method for the singularity-free workspace design of a three legged parallel robot. *Mechanism and Machine Theory*, 45(11), pp 1694-1706.
- [5] Jiang, W., Wu, D., Dong, W., Ding, J., Ye, Z., Zeng, P., Gao, Y., (2024). Design and validation of a nonparasitic 2R1T parallel hand-held prostate biopsy robot with remote center of motion. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 16(5).
- [6] Rao, A. B. K., Rao, P. M., Saha, S. K., (2005). Dimensional design of hexaslides for optimal workspace and dexterity. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(3), pp 444-449.
- [7] Birlescu, I., Tohanean, N., Vaida, C., Gherman, B., Neguran, D., Horsia, A., Tucan, P., Condurache, D., Pisla, D., (2024). Modeling and analysis of a parallel robotic system for lower limb rehabilitation with predefined operational workspace. *Mechanism and Machine Theory*, 198, pp 105674.
- [8] Kelaiaia, R., Company, O., Zaatri, A., (2012). Multiobjective optimization of a linear Delta parallel robot. *Mechanism and Machine Theory*, 50, pp 159-178.
- [9] Mirshekari, E., Ghanbarzadeh, A., Heidari Shirazi, K., (2016). Multi-objective optimization of Hexa parallel manipulator based on kinematic and dynamic indices. *Modares Mechanical Engineering*, 16(8), pp 365-374.
- [10] Zhao, Y., Cheng, G., (2017). Dimensional synthesis of a 3UPS-PRU parallel robot. *Robotica*, 35(12), pp 2319-2329.
- [11] Du, X., Li, Y., Wang, P., Ma, Z., Li, D., Wu, C., (2021). Design and optimization of solar tracker with U-PRU-PUS parallel mechanism. *Mechanism and Machine Theory*, 155, pp 104107.