

طراحی بهینه‌ی چندهدفه‌ی ربات کابلی ۶-درجه آزادی با استفاده از معیارهای سینماتیکی

سیداحمد خلیل پور سیدی^۱، حمیدرضا تقی‌راد^۱، مهدی طالع ماسوله^۲، مهدی علیاری شوره‌دلی^۱
^۱ گروه رباتیک ارس، قطب کنترل صنعتی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

khalilpour@ee.kntu.ac.ir, taghirad@kntu.ac.ir, aliyari@eetd.kntu.ac.ir

^۲ آزمایشگاه تعامل انسان و ربات، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران m.t.masouleh@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۲/۳/۱۵، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۲/۵/۱۶)

چکیده: در این مقاله با استفاده از معیارهای متنوع سینماتیکی و بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی، به طراحی بهینه چند هدفه ربات‌های کابلی با ۶ درجه آزادی پرداخته شده است. در همین راستا، تعیین فضای کاری ربات‌های کابلی به عنوان یکی از مهمترین چالش‌های طراحی ربات‌های کابلی فضایی در این مقاله مورد بحث و بررسی قرار گرفته و از میان تعریف‌های متعدد، فضای کاری کنترل پذیر به عنوان یکی از جامع‌ترین تعاریف فضای کاری ربات‌های کابلی انتخاب شده است. در این فضای کاری به ازای همه نیروها و گشتاورهای وارده بر مجری نهایی، کابل‌ها در حالت کششی باقی می‌مانند. به منظور سنجش مهارت ربات، از معیار عدد وضعیت عمومی به عنوان شاخصی مؤثر در بررسی میزان دوری از تکینگی استفاده شده است. همچنین بدترین حساسیت سینماتیکی به عنوان دقت قابل ارائه به کاربر در این مقاله معرفی شد. با بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه‌ای مانند الگوریتم ژنتیک، جبهه بهینه‌ی پرتو به گونه‌ای برای پارامترهای طراحی ربات کابلی بدست می‌آید که تمامی توابع هدف طراحی ربات، به طور همزمان بهینه شوند.

کلمات کلیدی: ربات کابلی، طراحی بهینه چند هدفه، حساسیت سینماتیکی، عدد وضعیت، فضای کاری کنترل پذیر.

Multi-Objective Optimization of 6-Degree-of-Freedom Cable-Driven Parallel Robot Using Kinematic Indices

Seyed Ahmad Khalilpour, Hamidreza Taghirad, Mahdi Tale Masouleh,
Mahdi Aliyari Shoorehdeli

Abstract: This paper investigates the multi objective optimization of 6-degree of freedom cable-driven parallel robots by using the evolutionary optimization algorithm. In this regard, the determination of cable-driven parallel robots workspace is reviewed as the most important challenge in the design of space cable-driven parallel robots and among various definitions, controllable workspace is selected as a general definition of the cable-driven parallel robots workspace, in which the robot cables remain in tension for any applied forces and wrenches to the end-effector. In order to evaluate the dexterity of the under study robot, the condition number index is used as an effective criterion to measure the distance from singularity. Moreover, the worst kinematic sensitivity is introduced as a presentable accuracy index. Furthermore, by taking the advantages of multi-objective optimization methods such as the non-sorting genetic algorithm, the optimal pareto front for the design parameters of the robot is obtained such that simultaneously, all of the robot design's objectives are satisfied.

Keywords: Planar cable robot, Multi-objective optimization, Kinematic sensitivity, Condition number, Controllable workspace.

۱- مقدمه

ممتازی نظیر سرعت و شتاب بالا، وسعت فضای کاری، هزینه کم ساخت، قابلیت حمل بار زیاد نسبت به وزن کم ربات و ...، کاربردهای فراوانی در حل مسائل گوناگون پیدا کرده اند و هر روز ایده‌های جدیدی از به کار گیری آنها در صنایع گوناگون منتشر می‌شود. طیف وسیع این کاربردها که از پاک کردن نمای شیشه‌ای برج‌های بزرگ [۲] تا عمل جراحی [۳] و یا باز

ربات‌های موازی کابلی که با نام سکوه‌های استوارت با پایه تاندونی^۱ نیز معروف هستند [۱]، از مجری نهایی^۲ تشکیل شده‌اند که توسط تعدادی کابل به چارچوب ثابت متصل می‌باشند. این ربات‌ها به علت دارا بودن ویژگی‌های

^۲ End-effector

^۱ Tendon-based Stewart Platforms

بخشی از طراحی یک ربات ایده آل به شمار می‌آید [۱۵]. تعیین نقاط تکین و کاهش آنها یکی از چالش‌های مهم طراحی ربات‌ها می‌باشد. در طراحی ربات‌های موازی، معمولاً از شاخص‌های سینماتیکی برای کاهش تکینگی‌ها و افزایش کارایی این مکانیزم‌ها استفاده می‌شود. معروف‌ترین این شاخص‌ها، معیار توانایی یوشیکاوا [۱۶] و معیار مهارت [۱۷] می‌باشند که کاربرد آنها دارای بعضی محدودیت‌ها به ویژه در ربات‌های موازی کابلی است. برای حل این مشکلات، اخیراً دو معیار مختلف که حساسیت سینماتیکی انتقالی و دورانی نام^۲ دارند، پیشنهاد شده است. این دو شاخص کران بالای خطای دورانی و انتقالی مکانیزم می‌باشند که از خطای با نرم واحد در فضای مفصلی منشاء گرفته اند [۱۸].

در زمینه بهینه‌سازی و طراحی ربات‌های کابلی می‌توان به مراجع [۱۶، ۱۰، ۱۹-۲۳] اشاره کرد. در این مراجع از شاخص‌هایی نظیر مساحت فضای کاری استاتیکی، عدد وضعیت عمومی^۳، فضای کاری کنترل‌پذیر و جلوگیری از برخورد کابلها استفاده شده است تا ربات کابلی متناسب با نیاز طراحی گردد. در حالت کلی، این مراجع برای داشتن تخمینی از وضعیت فضای کاری، از شبکه بندی^۴ فضای کاری استفاده کرده و در هر نقطه از شبکه ایجاد شده، معیار محلی مورد نظر را بررسی می‌کند.

طراحی و بهینه‌سازی چندهدفه رباتها از جمله موضوعات مورد علاقه محققان به شمار می‌آید که در این حوزه می‌توان به مراجع [۲۰، ۲۱] اشاره کرد. در این مراجع، با استفاده از روشها و الگوریتم‌های تکاملی به بهینه‌سازی چندهدفه رباتهای موازی پرداخته شده است. اما مرجع [۲۲] با تکیه بر تحلیل بازه ای و با رویکرد در نظر گرفتن چندین شاخص، اقدام به بهینه‌سازی چندهدفه رباتها کرده است و به عنوان نمونه مکانیزمی موازی با ۶-درجه آزادی را طراحی و بهینه‌سازی نموده است.

با وجود ارائه پاسخی با صحت تضمین شده، حجم محاسبات بالا و سختی حل مسأله در فضای تحلیل بازه ای، از کارآمدی این رویکرد می‌کاهد. به طور خاص، بهینه‌سازی چند هدفه ربات‌های کابلی در [۲۳، ۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۱۰] طراحی چند هدفه بر اساس روشی مبتنی بر بازرسی دیداری^۵ صورت گرفته است و در نهایت، یک طرح بهینه به عنوان خروجی ارائه شده است. مبنای این روش به کارگیری همزمان معیارهای جلوگیری از برخورد کابل، حجم فضای کاری و مهارت ربات در قالب یک مسأله بهینه‌سازی چند هدفه است. این مرجع به جای محاسبه جبهه پرتو^۶، از یک تابع هزینه کلی استفاده کرده است. اما مشکلاتی نظیر وزن دهی و ارزش گذاری معیارهای مختلف نسبت به هم، از کارایی این روش می‌کاهد. لذا

توانبخشی معلولان [۴] را شامل می‌شود، علاقه پژوهشگران را به کار در زمینه ربات‌های کابلی بر می‌انگیزد. زمینه‌های مختلفی چون ابزار واسط لامسه‌ای [۵]، رباتهای نجات بخش [۶]، بازتوان بخش [۷]، آموزش‌های ورزشی [۸] و نقل و انتقال اجسام سنگین [۹] تنها بخشی از کاربردهای ربات‌های کابلی را به خود اختصاص داده‌اند.

با توجه به اینکه کابل‌ها در ربات‌های موازی کابلی فقط قادر به اعمال نیروی کششی هستند، روش کار با این گونه رباتها نسبت به ربات‌های موازی معمول متفاوت می‌کند. در واقع طراحی این ربات‌ها به گونه‌ای باید صورت گیرد که سیستم کنترل آن در هر لحظه، سیگنالی برای محرک‌ها ارائه دهد که نتیجه آن، اعمال نیروی کششی در کلیه کابل‌ها باشد. در واقع طراحی پیکربندی مکانیکی و سپس سیستم کنترل ربات باید به گونه‌ای باشد که ربات برای رسیدن به موقعیت و جهت مورد نیاز خود، فقط از نیروهای کششی در محرک‌ها استفاده کند. به همین سبب افزونگی در ربات‌های کابلی موازی یک امر اجتناب ناپذیر به شمار می‌آید. به عبارت دیگر، برای آن که ربات کابلی در یک موقعیت غیر تکین دارای n درجه آزادی باشد، حداقل به $n + 1$ کابل نیاز است. از جمله دیگر چالش‌ها می‌توان به برخورد کابلها با هم و کابل‌ها با بدنه و اشیاء پیرامون ربات اشاره کرد که مشکلاتی را بر سر طراحی این ربات‌ها قرار داده است [۱۰]. مهارت کافی ربات و قدرت مانور در جهات مختلف، از جمله دیگر مواردی است که در طراحی همه مکانیزم‌ها مد نظر قرار می‌گیرد. برآورده کردن تمام موارد فوق نیازمند به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه برای طراحی ربات است. چرا که بهینه‌سازی به منظور دستیابی به تنها یک هدف ممکن است به عدم دستیابی به اهداف دیگر منجر شود.

در ادبیات رباتهای موازی کابلی افزونه، فضای کاری از دیدگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و در مقالات علمی، انواع گوناگون فضای کاری برای این ربات‌ها تعریف شده است. به طور خلاصه فضای کاری ربات‌های کابلی به چهار دسته کلی تقسیم بندی می‌شوند: (۱) فضای کاری چرخش امکان پذیر [۱۱] (۲) فضای کاری دینامیکی [۱۲] (۳) فضای کاری استاتیکی [۱۳] و (۴) فضای کاری کنترل‌پذیر^۱ [۱۴]. در این مقاله فضای کاری کنترل‌پذیر ربات‌های کابلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. فضای کاری کنترل‌پذیر شامل همه موقعیت‌هایی از مجری نهایی است که در آنها به ازای همه نیروها و گشتاورهای وارده بر مجری نهایی، کابل‌های ربات در حالت کششی قرار گیرند [۱۴]. بنابراین وسعت این فضای کاری می‌تواند به عنوان یکی از معیارهای طراحی بهینه چند هدفه مورد بررسی قرار گیرد.

از جمله قیودی که در هنگام طراحی هر ربات باید در نظر گرفت، دقت و مهارت آن ربات در انجام وظایف محوله است. تعیین فضای کاری که دقت ربات، حداقل‌های تعیین شده را رعایت می‌کند و سعی در افزایش این فضا،

^۴ Mesh^۵ Visual Inspection^۶ Pareto Front^۱ Controllable WorkSpace (CWS)^۲ Point-displacement and Rotational Kinematic Sensitivity^۳ Global Condition Number

در [۱۰] برای برطرف کردن این مشکل، وزن دهی هر تابع هدف را با توجه به نمودارهای دیداری^۱ مربوطه پیشنهاد می‌کند. همچنین در مرجع [۲۳]، با استفاده از معیارهای کنترل‌پذیری، عدد وضعیت عمومی و حساسیت سینماتیکی، به طراحی بهینه چندهدفه ربات کابلی صفحه‌ای پرداخته شده است و از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمندی نظیر NSGA II^۲ و AWPSO^۳ استفاده شده تا جبهه پرتو بهینه پارامترهای طراحی ربات کابلی صفحه‌ای بدست آید. در این مقاله اشاره شده است که مقایسه عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه به کار رفته نشان می‌دهد که الگوریتم NSGA II نسبت به الگوریتم AWPSO کارایی بهتری داشته و جبهه پرتوی با پراکندگی مناسبتری را فراهم آورده است.

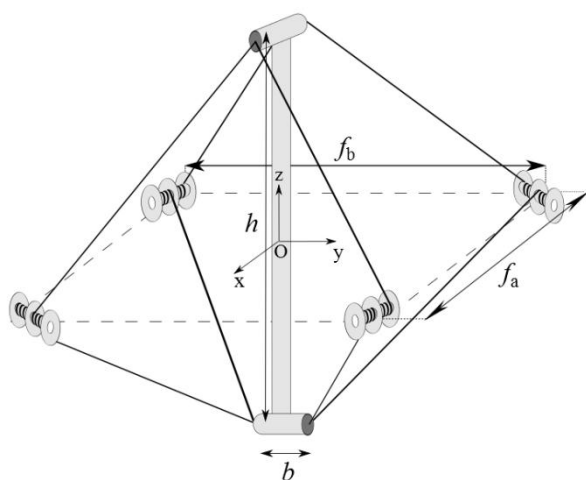
هدف این مقاله، بررسی معیارهای سینماتیکی مناسب برای طراحی ربات‌های کابلی فضایی و سپس، بهینه‌سازی چند هدفه بر اساس شاخص‌های مطرح شده می‌باشد. بر این اساس، معیارها به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که بتوانند وسعت فضای کاری و دقت و مهارت ربات را تنظیم نمایند. علاوه بر این، قابلیت ساخت و کارایی مکانیزم به عنوان معیارهای مهم دیگر در طراحی ربات، مورد توجه قرار می‌گیرند. استفاده از الگوریتم‌های هوشمند ارائه شده در این مقاله، این فرصت را فراهم می‌آوردند تا دسته جوابی به عنوان بهترین پاسخ (جبهه پرتو) به کاربر نهایی یا سازنده ارائه گردد تا در نهایت با توجه به اهمیت معیارهای طراحی در شرایط گوناگون و نیاز کاربر، یکی از این نقاط بهینه در جبهه پرتو به منظور ساخت انتخاب گردد.

در [۱۰] برای برطرف کردن این مشکل، وزن دهی هر تابع هدف را با توجه به نمودارهای دیداری^۱ مربوطه پیشنهاد می‌کند. همچنین در مرجع [۲۳]، با استفاده از معیارهای کنترل‌پذیری، عدد وضعیت عمومی و حساسیت سینماتیکی، به طراحی بهینه چندهدفه ربات کابلی صفحه‌ای پرداخته شده است و از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمندی نظیر NSGA II^۲ و AWPSO^۳ استفاده شده تا جبهه پرتو بهینه پارامترهای طراحی ربات کابلی صفحه‌ای بدست آید. در این مقاله اشاره شده است که مقایسه عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه به کار رفته نشان می‌دهد که الگوریتم NSGA II نسبت به الگوریتم AWPSO کارایی بهتری داشته و جبهه پرتوی با پراکندگی مناسبتری را فراهم آورده است.

هدف این مقاله، بررسی معیارهای سینماتیکی مناسب برای طراحی ربات‌های کابلی فضایی و سپس، بهینه‌سازی چند هدفه بر اساس شاخص‌های مطرح شده می‌باشد. بر این اساس، معیارها به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که بتوانند وسعت فضای کاری و دقت و مهارت ربات را تنظیم نمایند. علاوه بر این، قابلیت ساخت و کارایی مکانیزم به عنوان معیارهای مهم دیگر در طراحی ربات، مورد توجه قرار می‌گیرند. استفاده از الگوریتم‌های هوشمند ارائه شده در این مقاله، این فرصت را فراهم می‌آوردند تا دسته جوابی به عنوان بهترین پاسخ (جبهه پرتو) به کاربر نهایی یا سازنده ارائه گردد تا در نهایت با توجه به اهمیت معیارهای طراحی در شرایط گوناگون و نیاز کاربر، یکی از این نقاط بهینه در جبهه پرتو به منظور ساخت انتخاب گردد.

در جمع‌بندی توضیحات فوق باید به این موضوع توجه کرد که هدف اصلی این مقاله نه بیان معیارهای جدید سینماتیکی در حوزه رباتیک است و نه ارائه روش‌های جدید بهینه‌سازی بلکه نوآوری اصلی این مقاله، بررسی معیارهای متنوع سینماتیکی در کنار هم و استفاده از آنها در الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه هوشمند می‌باشد که در نهایت، منجر به ارائه جبهه پرتوی بهینه شده است. مقالات متنوعی از معیارهای سینماتیکی استفاده شده در این مقاله به منظور طراحی ربات کابلی بهره برده‌اند، اما هیچ کدام به بررسی این معیارها در کنار هم و در نهایت بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند نپرداخته‌اند. در ادامه این مقاله، ابتدا ربات کابلی فضایی مورد نظر معرفی می‌گردد. در بخش سوم معیارهای متداول سینماتیکی طراحی ربات کابلی که وسعت فضای کاری و دقت و مهارت ربات را ارزیابی می‌کنند، بیان می‌گردند. در بخش چهارم معیارهای بیان شده در قسمت قبل با توجه به پارامترهای طراحی، تحلیل می‌شوند. در نهایت با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی، بهینه‌سازی همزمانی برای اهداف در تضاد با هم انجام شده و جبهه پرتو بهینه محاسبه می‌گردد.

۲- معرفی ربات کابلی فضایی



شکل ۱: شماتیک ربات کابلی فضایی با طرح عصایی.

در این بخش، ربات کابلی با طرح عصایی به عنوان گونه‌ای متداول از ربات‌های فضایی معرفی می‌گردد. شکل خاص مجری نهایی این طرح که به صورت عصا می‌باشد، این طرح را به این نام مشهور ساخته است. طرح ربات کابلی عصایی که در شکل ۱ نمایش داده شده است.

^۴ Rod Design

^۵ Galaxy Design

^۱ Visual Inspection Graphs

^۲ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

^۳ Adaptive Weighted Particle Swarm Optimization

این طرح در واقع توسعه یافته طرح ربات کابلی صفحه‌ای "V و ارونه V" محسوب می‌شود [۲۷] و انتظار می‌رود ویژگی‌هایی شبیه به این طرح داشته باشد.

مجری نهایی طویل و قرارگیری عملگرها در گروه‌های دو تایی از جمله ویژگی‌های مشترک این طرح‌ها محسوب می‌شوند. کنار هم قرار گرفتن عملگرها و شکل خاص مجری نهایی، احتمال برخورد کابل‌ها را در این طرح از بین برده است. اما ابعاد بزرگ مجری نهایی این طرح به علت جرم و وزن زیاد، از چابکی و سرعت عمل ربات می‌کاهد و از طرف دیگر، کاربر را مجبور می‌سازد تا فضایی بسیار بزرگ‌تر از فضای کاری کنترل‌پذیر ربات را خالی از هر گونه شیئی قرار دهد تا از برخورد مجری نهایی ربات به اجسام پیرامون جلوگیری کند.

۳- معیارهای طراحی

در این بخش، معیارهای طراحی ربات‌های کابلی معرفی می‌شوند. این معیارها که بیشتر، حجم فضای کاری و دقت و مهارت ربات را مورد بررسی قرار می‌دهند عبارتند از فضای کاری کنترل‌پذیر، معیارهای حساسیت سینماتیکی انتقالی و دورانی و عدد وضعیت عمومی ربات. شاخص‌های مطرح شده در این بخش، به منظور بهینه‌سازی طرح‌های ربات کابلی، در بخش آتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۱- وسعت فضای کاری

همانطور که در مقدمه ذکر شد، یکی از مهم‌ترین شرایط استفاده از ربات‌های کابلی، برقراری شرط کششی بودن کابل‌ها است. به عبارت دیگر، بدست آوردن فضایی که هنگام قرارگیری مجری نهایی در آن، امکان ایجاد تنش کششی در کابل‌ها وجود دارد، نقش کلیدی در تحلیل کارایی ربات‌های کابلی ایفا می‌کند. نحوه بدست آوردن این فضای کاری مبحثی است که در این بخش به آن پرداخته می‌شود. برای آنکه فضای کاری ربات طوری تعیین شود که همیشه همه کابل‌ها دارای تنش مثبت باشند، باید شرط ذیل برقرار باشد:

$$\{x | Af = w, f \geq 0\} \quad (1)$$

در رابطه (۱) نشان دهنده متغیرهای فضای کاری دکارتی می‌باشد. در واقع x معرف تمامی موقعیت‌هایی از مجری نهایی ربات است که در آن وضعیت، کابل‌ها تنش کششی داشته باشند. مجموعه موقعیت‌های مجری نهایی، فضای کاری ربات را تشکیل می‌دهند که از دیدگاه‌های مختلف، قابل بررسی هستند.

همچنین در رابطه (۱)، f بردار نیروهای اعمال شده به کابل‌ها از طرف کابل جمع‌کن‌ها و w بردار نیروهای اعمال شده به مجری نهایی می‌باشند که

همگی تابعی از متغیر فضای کاری x می‌باشند. در رابطه فوق ماتریس A ماتریس ساختار^۱ نامیده می‌شود که برابر با ترانزاده ماتریس ژاکوبی ربات، ماتریس نگاهت سرعت فضای کاری به فضای مفصلی، می‌باشد [۲۳]. یکی از عمومی‌ترین تعاریف فضای کاری ربات‌های کابلی، فضای کاری کنترل‌پذیر می‌باشد که با نام‌های فضای کاری بستار چرخش^۲ و فضای کاری بستار نیرو^۳ نیز شناخته شده است. در این فضای کاری، مجری نهایی ربات می‌تواند در هر جهتی و در هر اندازه‌ای، نیرو وارد کند، در حالی که کابل‌ها همچنان کشیده باقی می‌مانند. بنابراین در تحلیل این فضای کاری، هیچ محدودیتی برای تنش کابل‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. نکته حائز اهمیت در این بررسی این نوع فضای کاری، الزام وجود افزونگی در تعداد کابل‌ها است، به طوری که تعداد کابل‌ها از درجات آزادی ربات بیشتر باشد. از آنجایی که این نوع نگرش تنها به هندسه ربات وابسته می‌باشد، می‌تواند معیار خوبی را جهت طراحی بهینه ربات ارائه دهد. لذا این مقاله به طور خاص بر روی این نوع فضای کاری متمرکز شده است و در ادامه جزئیات و نحوه‌ی آن محاسبه ارائه می‌گردد.

۳-۱-۱- فضای کاری کنترل‌پذیر

فضای کاری کنترل‌پذیر مجموعه‌ای از موقعیت‌های ربات است که به ازای هر چرخش w در مجری نهایی، حداقل یک بردار نیروی کششی $f \geq 0$ وجود داشته باشد به طوری که $Af = w$ گردد.

یکی از مهم‌ترین قضایای مطرح در تحلیل این نوع فضای کاری، بررسی فضای پوچی^۴ ماتریس ساختار است. بر مبنای خصوصیت فضای پوچی، موقعیت ربات در فضای کاری کنترل‌پذیر قرار می‌گیرد، اگر و تنها اگر ماتریس ساختار ربات مرتبه کامل بوده و فضای پوچی آن شامل برداری با عناصر مثبت (یا هم علامت و مخالف صفر) باشد. زیرا هنگامی که نیروهای اعمالی به مجری نهایی مشخص شد، می‌توان با استفاده از معادله $Af = w$ نیروهای کابلی را مثبت بدست آورد.

با توجه به غیر مربع بودن ماتریس ساختار A باید از شبه معکوس A به منظور بدست آوردن نیروهای کابلی استفاده کرد. شبه معکوس ماتریس A به طریق زیر بدست می‌آید:

$$A^{\dagger} = (A^T A)^{-1} A^T \quad (2)$$

در این صورت کمترین مقدار نیروهای کابلی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f_{min} = A^{\dagger} w \quad (3)$$

اما رابطه بالا نمی‌تواند همواره مثبت بودن کابل‌ها را ارضا نماید، از این رو برای حل این مسأله از روش تعمیم یافته حداقل مربعات استفاده می‌گردد:

$$f = f_{min} + cf^* \quad (4)$$

در رابطه فوق، f در فضای پوچی ماتریس A قرار دارد. در این صورت:

$$Af^* = 0 \quad (5)$$

^۱ Force Closure Workspace (FCW)

^۲ Null Space

^۱ Structure Matrix

^۲ Wrench Closure Workspace (WCW)

بنیادی، کمترین نیروی کششی کابل متناظر با آن بردار، در موقعیت مورد نظر از ربات، صفر می‌گردد. بنابراین، نیروی بنیادی بدترین نیرویی است که می‌تواند به مجری نهایی ربات وارد شود، زیرا در این حالت یک درجه افزونگی ربات از بین می‌رود. این مرجع در ادامه شرط قرار گیری ربات در فضای کاری کنترل پذیر را، شبه معین مثبت بودن و کامل بودن مرتبه ماتریس A در رابطه زیر بیان می‌کند.

$$A_{n \times (n+r)} T_{(n+r) \times (n+r)}^* = W_{F_{n \times (n+r)}} \quad (۷)$$

که در آن T^* ماتریسی است که از کنار هم قرار گرفتن بردارهای نیروهای کابلی به ازای مجموعه نیرو بنیادی W_F حاصل می‌شود. در رابطه فوق r بیانگر درجه افزونگی و n نشان دهنده درجه آزادی ربات است. در [۲۶] این روش برای دو نمونه ربات کابلی با یک درجه آزادی و دو درجه آزادی به طور کامل بیان شده است که در اینجا از همان روش استفاده شده است. در ادامه روش تحلیلی ارائه می‌گردد که بر مبنای جبر خطی، فضای کنترل پذیر را ابتدا در ربات‌های با یک درجه افزونگی و سپس در حالت کلی، جست و

جو می‌کند. در این حالت، معادله (۷) به معادله زیر تبدیل می‌شود:

$$A_{n \times (n+1)} T_{(n+1) \times (n+1)}^* = W_{F_{n \times (n+1)}} \quad (۸)$$

که برای هر نیروی بنیادی، معادله فوق به صورت زیر ساده می‌شود:

$$A_{n \times (n+1)} T_{i(n+1) \times 1}^* = W_{F_{i \times 1}} \quad (۹)$$

با توجه به قضیه مطرح شده در [۲۶]، i امین نیروی کابل نرمالیزه شده به ازای i امین نیروی بنیادی، صفر خواهد شد.

$$[A_1 \dots A_{i-1} \ A_{i+1} \dots A_{n+1}] [\tau_{i1} \dots \tau_{i(i-1)} \ 0 \ \tau_{i1} \dots \tau_{i(i-1)}] \quad (۱۰)$$

در رابطه فوق τ_{ij} بیانگر عناصر ماتریس T می‌باشد. به علت صفر شدن τ_{ii} در رابطه فوق، می‌توان A_i را نیز حذف کرد و آن را به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$A_{n \times n} [\tau_{i1} \dots \tau_{i(i-1)} \ \tau_{i(i+1)} \dots \tau_{i(i-1)}]^T = W_{F_i} \quad (۱۱)$$

معادله فوق یک دستگاه n معادله n مجهول است که به روش‌های مختلف، از جمله روش کرامر قابل حل است.

$$\tau_{i1} = \frac{\Delta_{ij}}{\Delta_i} = \frac{\det[A_1 \dots A_{i-1} \ w_i \ A_{i+1} \dots A_{n+1}]}{\det[A_1 \dots A_{i-1} \ A_{i+1} \dots A_{n+1}]} > 0 \quad (۱۲)$$

مرجع [۲۶] برای تعیین فضای کنترل پذیر مکانیزمی با n درجه آزادی و ۲ درجه افزونگی با استفاده از این روش، آن را به $2 + n$ زیرربات با یک درجه افزونگی تقسیم کرده است، به طوری که در i امین زیرربات، کابل i ام وجود ندارد. حال اگر $W_{F_{i+1}}$ از مجموعه نیروهای بنیادی به مجری نهایی اعمال شود، خواهیم داشت:

$$[A_1 \dots A_{i-1} \ A_{i+2} \dots A_{n+2}] [\tau_{i1} \dots \tau_{i(i-1)} \ 0 \ \tau_{i(i+2)} \dots \tau_{i(i+2)}]^T = W_{F_{i+1}} \quad (۱۳)$$

دستگاه معادله فوق یک دستگاه n معادله n مجهول است و مشابه قسمت قبل، مرزهای فضای کاری کنترل پذیر برای هر زیرربات قابل تعیین است.

با توجه به رابطه بالا، هر گاه f اکیداً مثبت باشد، می‌توان با انتخاب یک ضریب به اندازه کافی مثبت c ، عناصر منفی f_{min} را جبران نمود و به پاسخ $0 \leq f$ دست یافت. در ربات‌های کابلی صفحه‌ای با ۴ کابل و ۳ درجه آزادی، به راحتی می‌توان با پیدا کردن بردار فضای پوچی و تعیین علامت عناصر آن، کنترل پذیری ربات را در موقعیت داده شده، مشخص کرد [۲۶]، اما در ربات‌های با درجات آزادی افزونه بیشتر، با وجود چند بردار پوچی، کار به مراتب دشوارتر می‌شود. به عنوان مثال ربات کابلی با ۵ کابل و ۳ درجه آزادی را فرض کنید. این ربات کابلی دارای ۲ درجه افزونگی می‌باشد و در موقعیت‌های غیر تکین، ماتریس ساختار ربات، دارای ۲ بردار پوچی مستقل است. حال برای آنکه نیروهای وارد بر هر ۵ کابل، کششی باشند و ربات در فضای کنترل پذیر قرار گیرد، باید پاسخ بدست آمده از ترکیب خطی دو بردار فضای پوچی، برداری کاملاً مثبت باشد، تا به ازای مقادیر مناسب c در معادله (۴)، تمامی عناصر بردار f را بزرگتر از صفر گرداند. یکی از ساده‌ترین روش‌های حل این مسأله، استفاده از دستور `fmincon` نرم افزار متلب^۱ می‌باشد. اما به علت آنکه این دستور صرفاً یک الگوریتم بهینه سازی با بهره گیری از روشهای تکرار است، بسیار وقت گیر می‌باشد. این موضوع در مسأله بهینه سازی و طراحی ربات بسیار با اهمیت است، زیرا در الگوریتم‌های بهینه سازی هوشمند، نیاز است که مکرراً کنترل پذیری ربات‌های گوناگون در موقعیت‌های مختلف فضای کاری بررسی گردد. لذا در مسأله طراحی ربات کابلی، استفاده از روش‌هایی بر پایه تعابیر فیزیکی مسأله کنترل پذیری که حل کوتاه‌تری دارند، پیشنهاد می‌شود. در [۲۶] روش دیگری برای تعیین کنترل پذیری ربات تحت عنوان نیروی بنیادی^۲ بیان گردیده است که مبتنی بر تعبیر فیزیکی مسأله کنترل پذیری بوده و در مسأله بهینه سازی چند هدفه ربات‌های کابلی به خصوص در ربات‌های کابلی فضایی با ۸ کابل، بسیار کار آمد می‌باشد. لذا در ادامه به صورت مختصر، مروری بر چگونگی انجام این روش ارائه می‌شود. آنچه به عنوان ایده در [۲۶] مطرح می‌شود، معرفی مجموعه نیروی بنیادی و استفاده از آن به جای فضای پوچی، در تحلیل فضای کاری کنترل پذیر ربات است. در واقع، مجموعه نیروهای بنیادی تفسیر فیزیکی از کمترین حل شدنی مثبت معادله (۴) ارائه می‌دهد، به طوری که هر گاه این مجموعه نیرو به مجری نهایی اعمال شود، آن موقعیت در فضای کنترل پذیر قرار می‌گیرد. بنابر تعریف بیان شده در [۲۶] مجموعه نیروی بنیادی به مجموعه‌ای شامل m بردار اطلاق می‌شود که هر بردار آن متناسب با یک بردار ستونی از ترانزاده ماتریس ژاکوبی، K^T می‌باشد.

$$W_F = \{w_i \mid w_i = \begin{bmatrix} \hat{S}_i \\ E_i \times \hat{S}_i \end{bmatrix}\} = K^T = -A, \quad (۶)$$

$$i = 1, \dots, m$$

که در معادله فوق m بیانگر تعداد کابل‌ها می‌باشد. با توجه به معادله فوق، مجموعه نیروهای بنیادی به حالت و موقعیت ربات وابسته هستند. مرجع [۲۶] اثبات می‌کند که در صورت اعمال هر یک از بردارهای مجموعه نیروی

^۲ Fundamental Wrench

^۱ Matlab

به کوچکترین مقدار ویژه ماتریس ژاکوبی نیز می‌باشد. از نقطه نظر فیزیکی هر چه این مقدار به سمت یک میل کند، مطلوب‌تر است. زیرا در این حالت، مهارت ربات در همه جهات یکسان می‌باشد و بیضوی مهارت به دایره تبدیل می‌شود. اما هر چه این مقدار به سمت بینهایت میل کند، ربات تنها در یک راستا مهارت خواهد داشت و مهارت انجام حرکت در سایر درجات آزادی خود را از دست می‌دهد و به عبارت دیگر ربات به سمت تکینگی نزدیک‌تر می‌شود [۲۹]. از سوی دیگر هر چه قدر بیضی بزرگتر باشد، خطای منتقل شده به مجری نهایی، بیشتر می‌شود. اما معیار عدد وضعیت هیچ بیانی از میزان بزرگی خطای انتقالی ندارد، زیرا که ممکن است شکل نگاهشده شده در فضای کاری، دایره‌ای با شعاع بزرگ باشد که این موضوع نشان دهنده خطای زیاد ربات است، در حالی که عدد وضعیت، مهارت ربات را ایده آل معرفی می‌کند. از طرف دیگر ممکن است شکل نگاهشده داده شده، بیضی بسیار کوچکی باشد که یک قطرش بسیار بزرگ‌تر از قطر دیگر باشد که این موقعیت عدد وضعیت بسیار بزرگی به وجود می‌آورد، در حالی که خطای انتقالی بسیار کم می‌باشد. راه حل‌های زیادی برای حل مشکل مفهومی عدد وضعیت مطرح شده است. این گونه روش‌ها، زیر بنای معیارهای جدیدی از مهارت ربات را تشکیل می‌دهند که با نام حساسیت سینماتیکی معروف شده‌اند [۳۰]. به کارگیری این گونه از شاخص‌های سینماتیکی که بیانی از دقت ربات را ارائه می‌دهند، در کنار معیار عدد وضعیت که از مهارت ربات در درجات آزادی مختلف سخن می‌گوید، می‌تواند به خوبی بیضوی مهارت ربات را توصیف کند.

عدد وضعیت یک معیار محلی است و در هر موقعیت ربات تعریف می‌شود، یعنی با توجه به مختصات دکارتی ربات و میزان چرخش آن حول محورهای اوایل تعیین می‌گردد. برای ارزیابی عملکرد کلی ربات، یک معیار عمومی مهارت مطرح می‌شود که بیان گر مهارت کلی ربات است و به شرح زیر است [۱۹]:

$$GCI = \frac{\int_w \left(\frac{1}{CN(w)} \right) dw}{\int_w dw} \quad (18)$$

رابطه بالا یک میانگینی از عدد وضعیت‌های همه فضای کاری ربات را ارائه می‌دهد و به عنوان عدد وضعیت عمومی ربات^۱ شناخته می‌شود.

۳-۲-۲- حساسیت سینماتیکی

برای برطرف کردن مشکلات شاخص‌های سینماتیکی، دو شاخص متمایز با نام حساسیت سینماتیکی دورانی و حساسیت سینماتیکی انتقالی تعریف گردیده است. این دو شاخص، کران بالای خطای دورانی و انتقالی را با در نظر گرفتن خطای با نرم واحد در فضای مفصلی بدست می‌دهند [۳۱].

$$\sigma_{r,c,f} = \max_{\|\rho\|_c=1} \|\phi\|_f, \sigma_{p,c,f} = \max_{\|\rho\|_c=1} \|P\|_f \quad (19)$$

از آنجایی که این دو شاخص خطای درجات آزادی انتقالی و دورانی را به طور جدا گانه در نظر می‌گیرند، دیگر مشکلات مربوط به یکسان نبودن

هدف از بیان فضای کنترل پذیر در این مقاله تنها ارائه معیاری جهت طراحی بهینه ربات کابلی است. بنابراین محاسبه حجم و مساحت فضای کنترل پذیر ربات به عنوان معیارهای طراحی دارای اهمیت هستند. به همین جهت، برای بررسی کنترل پذیری ربات‌های فضایی، پس از شبکه بندی فضای کاری و تشکیل زیرربات‌ها و زیرربات‌های ترکیبی، تعلق هر نقطه از شبکه به فضای کنترل پذیر مجموعه زیرربات‌ها بررسی می‌شود و در صورتی که حداقل یکی از زیرربات‌ها یا زیرربات‌های ترکیبی در موقعیت داده شده کنترل پذیر باشند، ربات اصلی در آن موقعیت کنترل پذیر خواهد بود.

۳-۲-۲ معیارهای مهارت و دقت ربات

به طور معمول در طراحی‌ها رباتها برای کاهش موقعیت‌هایی که ربات در حالت تکینگی قرار می‌گیرد، از شاخص‌های سینماتیکی استفاده می‌شود. به این معنی که طراح سعی می‌کند با بهینه‌سازی این شاخص‌ها در فضای کاری مکانیزم، مقادیر هندسی و پارامترهای ربات را به گونه‌ای طراحی کند تا حجم و تعداد نواحی تکین در فضای کاری ربات در کمترین حالت ممکن باشد.

۳-۲-۱- عدد وضعیت

با استفاده از ژاکوبی مکانیزم می‌توان بین خطای مفصلی و خطای فضای کاری مکانیزم، رابطه‌ای خطی بدست آورد. به بیان دیگر، خطای مفاصل فعال ربات، توسط بازوانش از طریق نگاهشده غیرخطی ژاکوبی به مجری نهایی منتقل می‌شود. بنابراین رباتی بهتر خواهد بود که خطای کمتری را از مفاصل به مجری نهایی منتقل کند. در این حالت، خطای مفاصل محدود و به صورت ذیل فرض می‌شود:

$$\|\Delta\rho\|_2 \quad (14)$$

در رابطه فوق، بردار ρ بیان کننده متغیرهای مفصلی است. همچنین، محدوده خطای مفاصل طوری انتخاب می‌شود که نشان دهنده کوچکترین واحد حرکت قابل قبول مفاصل باشد. از آنجایی که ارتباط متغیرهای مفصلی و فضای کاری از طریق ماتریس ژاکوبی، K صورت می‌گیرد:

$$\Delta\rho = K\Delta x \quad (15)$$

خواهیم داشت:

$$\|\Delta\rho\|_\infty = \Delta\rho\Delta\rho = \Delta x^T K^T K \Delta x \quad (16)$$

این رابطه، نحوه نگاهشده شبه کره خطا در مفاصل به بیضوی خطا در فضای کاری را در حالت کلی بیان می‌کند. شکل و حجم این بیضوی در واقع مشخصه‌ای از مهارت مکانیزم است.

معیار عدد وضعیت به عنوان یکی از رایج‌ترین شاخص‌های سنجش مهارت ربات با توجه به بیضوی مهارت، به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۸]:

$$CN = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (17)$$

که برابر است با نسبت قطر بزرگ بیضوی نگاهشده به قطر کوچک آن. این عدد که دارای مقداری بین یک تا بینهایت می‌باشد، معرف نسبت بزرگ‌ترین

^۱ Global Condition Number Index (GCI)

۴-۱- تحلیل ربات‌های کابلی فضایی

در صورتی که برای بررسی هر یک از معیارهای طراحی، همانند ربات صفحه‌ای [۲۳] از شبکه بندی و گسسته سازی فضای کاری استفاده کنیم، حجم محاسبات بسیار زیاد می‌شود. کاهش حجم محاسبات مستلزم افزایش گام‌های شبکه بندی و کاهش دقت طراحی است که عملاً ما را از رسیدن به طرح بهینه دور می‌کند. لذا باید تدبیری اندیشیده شود تا علاوه بر کاهش منطقی حجم محاسبات، دقت لازم حفظ شود. رویکردی که در این مقاله استفاده شده، عبارت است از بررسی فضای کاری کاربردی. این فضای کاری کاربردی، همان فضای ۳ بعدی خواهد بود که به عنوان فضای کاری ربات به خریدار و یا کاربر معرفی می‌گردد. این فضای ۳ بعدی باید یکی از اشکال منظم و شناخته شده هندسی باشد تا هم معرفی فضای کاری ربات را ساده‌تر سازد و هم کار با ربات را برای کاربر آسان گرداند. این امر سهولت طراحی مسیر و کنترل ربات را نیز به دنبال خواهد داشت. شکل هندسی پیشنهاد شده در این مقاله، متقارن‌ترین شکل هندسی، یعنی گره می‌باشد. مزیت گره بر سایر اشکال هندسی متداول، تقارن آن در تمام جهات مختصاتی است که فضای کاری همگنی را بدست می‌دهد. بررسی این گونه فضای کاری ربات، علاوه بر کاهش شدید حجم محاسبات و از بین بردن محاسبات غیر ضروری، امکان معرفی معیاری کاربردی و قابل استفاده در طرح‌های صنعتی را نیز فراهم می‌سازد. ابعاد بزرگ‌ترین گره محاطی درون فضای کاری کنترل‌پذیر ربات می‌تواند به عنوان معیاری برای مقایسه طرح‌های مختلف ربات کابلی به کار گرفته شود. توجه شود که در این مقاله به جای استفاده از انتگرال و محاسبه حجم فضای کاری کنترل‌پذیر (همانند آنچه در روش ارائه شده در مرجع [۲۳] استفاده شد) از شعاع فضای کاری کاربردی به عنوان معیار بهینه‌سازی استفاده می‌شود. همچنین بدترین حساسیت سینماتیکی انتقالی و دورانی درون این گره می‌تواند دقت ربات را درون فضای کاری کاربردی‌اش، مشخص سازد. اما محاسبه معیارهای فوق نیز در ابتدای امر، کار ساده‌ای نخواهد بود و برای رسیدن به نتیجه در کوتاه‌ترین زمان ممکن، به لم‌های خاصی نیاز است. در مقابل روش‌های گسسته‌سازی و شبکه‌بندی، راه‌حل‌های پایه تصادفی، علاوه بر داشتن دقت مناسب، از سرعت محاسباتی خوبی نیز برخوردار هستند. برای محاسبه بزرگ‌ترین گره محاطی در فضای کنترل‌پذیر، شبه کد جدول ۱ پیشنهاد می‌گردد. اساس این الگوریتم، جست و جوی تصادفی نقاط کنترل‌پذیر و تعیین شعاع گره فضای کاری کاربردی با توجه به موقعیت‌های کنترل‌ناپذیر است.

در شبه کد جدول ۱ پارامترهای α و β و γ زوایای اویلر حول محورهای مختصات دکارتی می‌باشند که هر کدام دارای کران بالا و پایین تعریف شده‌ای هستند. همچنین پارامترهای θ ، φ و ρ دستگاه مختصات کروی را تشکیل می‌دهند. به وسیله پارامترهای ذکر شده، موقعیت مکانی و جهت‌گیری معرّی نهایی تعیین می‌گردد. همچنین پارامتر R در هر تکرار به اندازه مقدار

واحد‌ها پیش نمی‌آید [۳۲]. در روابط بالا C و f به ترتیب نرم قید و نرم تابع هدف مسئله حساسیت سینماتیکی را نمایش می‌دهند. مزیت شاخص حساسیت سینماتیکی بر سایر معیارهای سنجش دقت ربات، تفکیک درجات آزادی دورانی و انتقالی از هم و ارائه مفهوم فیزیکی دقت ربات است. اما این شاخص تفسیری از میزان نزدیکی به تکنیکی ارائه نمی‌دهد. چنان که ممکن است در موقعیتی خاص، حساسیت سینماتیکی ربات بسیار مطلوب باشد، اما ربات به مرز تکنیکی نزدیک باشد. بنابراین استفاده از معیارهایی نظر عدد وضعیت که مهارت ربات را مورد بررسی قرار می‌دهند، در کنار استفاده از شاخص حساسیت سینماتیکی توصیه می‌شود.

با توجه به اینکه هم بر روی فضای مفصلی و هم در فضای کاری قید نرم وجود دارد، بنابراین چهار نوع حساسیت سینماتیکی خواهیم داشت. مرجع [۲۹] حساسیت سینماتیکی با نرم تابع هدف دو و نرم قید بینهایت را به عنوان معقول‌ترین حساسیت سینماتیکی مطرح می‌کند، چرا که به علت نرم بینهایت قیود حرکت مفاصل به یکدیگر وابسته نیست و از طرف دیگر به علت نرم دو تابع هدف با تغییر مرجع مختصات حساسیت متفاوت به وجود نمی‌آید.

حساسیت سینماتیکی نیز همانند معیار عدد وضعیت یک معیار محلی است و با توجه به موقعیت مجری نهایی ربات تغییر می‌کند. لذا برای آنکه یک معیار از وضعیت کلی ربات^۱ داشته باشیم می‌توان همانند فرآیندی که در مورد عدد وضعیت به کار گرفته شد، از میانگین حساسیت سینماتیکی ربات در موقعیت‌های مختلف ربات استفاده کرد. اما این معیار عمومی نمی‌تواند به خوبی معرف دقت کلی ربات باشد. به عنوان مثال، در صورتی که حساسیت سینماتیکی ربات در یک موقعیت بسیار خوب و در موقعیت دیگر بسیار نامطلوب باشد، میانگین گیری، متوسط دقت ربات را نشان می‌دهد. این موضوع مثل آن است که دقت ربات در همه موقعیت‌ها، یکسان و برابر با مقدار متوسط باشد. اما این مقدار متوسط نمی‌تواند تضمینی از دقت ربات را ارائه دهد و به عبارت دیگر نمی‌تواند کرانی برای دقت ربات مشخص کند. روشی که در اینجا به عنوان حساسیت سینماتیکی پیشینه مطرح می‌شود، محاسبه حساسیت سینماتیکی پیشینه (انتقالی یا دورانی) در فضای کاری کنترل‌پذیر ربات یا هر فضای کاری مدنظر می‌باشد. محاسبه این پارامتر زمانی اهمیت پیدا می‌کند که سازنده می‌خواهد مقداری را به عنوان حداکثر خطای ربات به کاربر بیان کند. محاسبه این معیار طراحی که یک مسأله بهینه‌سازی است، به طرق مختلف از جمله روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، امکان‌پذیر می‌باشد.

۴- طراحی بهینه ربات کابلی فضایی

در این بخش، ابتدا رویه بهینه سازی ربات کابلی فضایی به صورت کلی معرفی شده و سپس این روند، برای طرح خاص عصایی معرفی شده در [۲۴] پیاده سازی می‌شود. ربات مذکور دارای ۳ درجه انتقالی و ۳ درجه دورانی است که مجموعاً ۶ درجه آزادی را برای ربات فراهم می‌آورند.

^۱ Global Performance Index

```

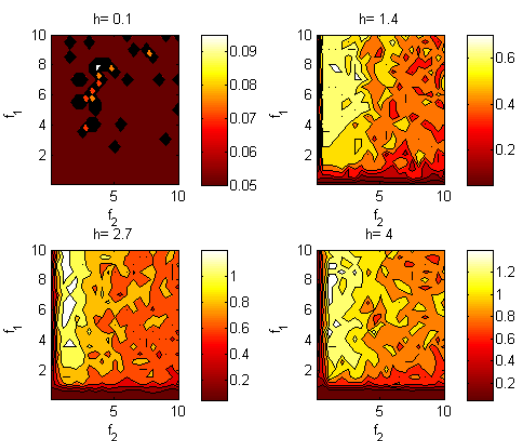
Function:W=Compute Worst Kinematic Sensitivity(.)
Inputs:  $\alpha_{min,max}, \beta_{min,max}, \gamma_{min,max}, R_{min}$ 
R=Compute Radius of Sphere ( Inputs )
if  $R > \epsilon$ 
     $\theta_{min} = 0, \theta_{max} = 2\pi$ 
     $\varphi_{min} = 0, \varphi_{max} = \pi$ 
     $R_{max} = c$ 
     $x_{min} = [R_{min}, \theta_{min}, \theta_{max}, \alpha_{min}, \beta_{min}, \gamma_{min}]$ 
     $x_{max} = [R_{max}, \theta_{max}, \theta_{min}, \alpha_{max}, \beta_{max}, \gamma_{max}]$ 
    W=Fast Optimization Algorithm (Kinematic ... Sensitivity(.),  $x_{min}, x_{max}$ )
end
    
```

۴-۲ تحلیل ربات کابلی عصایی

طرح عصایی از جمله طرح‌هایی است که با چرخش‌های محدود، پدیده برخورد کابل با کابل در آن دیده نمی‌شود. مرجع [۲۴] از این رو تنها عامل محدود کننده ابعاد فضای کاری این ربات را شاخص کنترل پذیری دانسته است. در این قسمت، برای بهینه‌سازی این طرح از معیارهای کنترل پذیری، حساسیت سینماتیکی دورانی و انتقالی و عدد وضعیت عمومی ربات استفاده شده است. پارامترهای طراحی نیز طول میله عصا، نسبت طول میله عصا به دسته عصا و نسبت ابعاد مستطیل چهارچوب ثابت ربات در نظر گرفته شده است که در شکل ۱ به ترتیب با h, α, β نمایش داده شده‌اند. همچنین در این تحلیل، پارامتر f_a ثابت و برابر با 10^m در نظر گرفته شده است. قیود حاکم بر پارامترهای f_1 و f_2 نیز بدین شرح است: $0.1 \leq f_1, f_2 \leq 10$. در ادامه به بررسی تغییرات معیارهای طراحی معرفی شده نسبت به پارامترهای طراحی در طرح عصایی می‌پردازیم.

شکل ۲ نحوه تغییرات شعاع بزرگ‌ترین کره محاطی در فضای کنترل پذیر ربات عصایی را نسبت به ۳ پارامتر طراحی h, f_1 و f_2 نشان می‌دهد. همان طور در شکل ۲ مشخص است، شعاع کره محاطی شدیداً به طول میله عصا وابسته است. همچنین از نظر این معیار طراحی، ربات بهینه زمانی حاصل می‌شود که پارامترهای f_1 و f_2 در محدوده زیر قرار داشته باشند و پارامتر h حداکثر مقدار خود را داشته باشد:

$$1 \leq f_1 \leq 10, \quad 1 \leq f_2 \leq 3 \quad (20)$$



شکل ۲: تغییرات شعاع فضای کاری کاربردی (AWS) نسبت به پارامترهای طراحی.

گام در نظر گرفته شده برای شعاع کره، ϵ افزایش می‌یابد. به علت آنکه سطح رویه کره با افزایش شعاع کره، افزایش می‌یابد، تعداد نقاط بررسی شده در هر تکرار، N ، افزایش می‌یابد. محاسبه معیار بدترین حساسیت سینماتیکی ربات نیز نیازمند تدبیر خاصی است. چرا که حجم زیاد محاسبات گسسته سازی فضای کاری در ۶ بعد، محاسبه دقت ربات را با مشکل مواجه می‌کند. به خصوص که حجم محاسبه حساسیت سینماتیکی در یک موقعیت خاص از ربات فضایی نیز چندین برابر ربات صفحه‌ای است. این امر، مسأله بهینه سازی ربات فضایی را به مراتب با مشکلات بیشتری مواجه می‌کند. در این مقاله، برای محاسبه بدترین حساسیت سینماتیکی از الگوریتم‌های بهینه سازی پر به جای فرآیند گسسته سازی فضای کاری استفاده شده است. سرعتی مانند استراتژی تکاملی این الگوریتم‌های علاوه بر حجم محاسباتی کم، دارای دقت مناسبی نیز هستند. شبه کد جدول ۲ الگوریتم به کار رفته برای محاسبه بدترین حساسیت سینماتیکی درون کره فضای کاری را نشان می‌دهد. در این شبه کد، پس از محاسبه شعاع بزرگ‌ترین کره محاطی در فضای کاری کنترل پذیر ربات، کران بالا و پایین در نظر گرفته شده برای زوایای اوپلر α, β و γ به همراه کران بدست آمده برای شعاع کره محاطی و کران پارامترهای مختصات فضای کاری θ و φ به عنوان شرایط مرزی پاسخ‌ها به الگوریتم بهینه سازی خورنده می‌شود تا بیشینه تابع حساسیت سینماتیکی بدست آید.

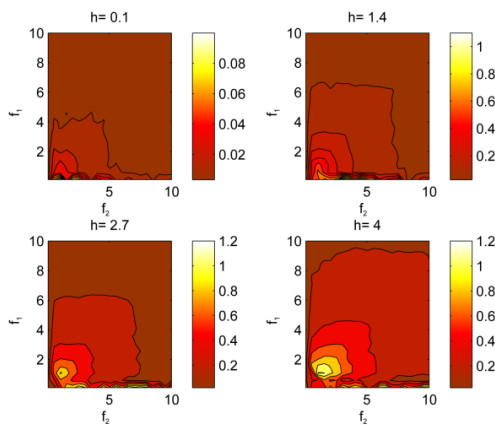
جدول ۱: شبه کد پیشنهادی برای محاسبه شعاع بزرگ‌ترین کره محاطی در کنترل پذیر ربات کابلی ۶ درجه آزادی.

```

Function:R= Compute Radius of Sphere(.)
Inputs:  $\alpha_{min,max}, \beta_{min,max}, \gamma_{min,max}, R_{min}$ 
 $d_\alpha = \alpha_{max} - \alpha_{min}, \quad d_\gamma = \gamma_{max} - \gamma_{min}$ 
 $c = 1, R = R_{min}$ 
while  $c$ 
    for  $i=1:N$ 
         $\theta = rand \times 2\pi$ 
         $\varphi = rand \times 2\pi$ 
         $\alpha = rand \times d_\alpha + \alpha_{min}$ 
         $\beta = rand \times d_\beta + \beta_{min}$ 
         $\gamma = rand \times d_\gamma + \gamma_{min}$ 
         $P = [\rho \times \cos \theta \times \sin \varphi, \rho \times \sin \theta \times \dots \sin \varphi, \rho \times \cos \varphi]$ 
         $R = [\alpha, \beta, \gamma]$ 
        If  $[P, R] \notin$  Controllable Workspace
             $c = 0$ 
            Break
        end
    end
     $R = R + \epsilon$ 
     $N = N \times (1 + \epsilon)^2$ 
end
 $R = R - \epsilon$ 
    
```

جدول ۲: شبه کد پیشنهادی برای محاسبه حساسیت سینماتیکی بیشینه در فضای کاری کاربردی.

چندان زیاد، حدود $f_2 = 1$ ، دارد. شکل ۳ نشان می‌دهد که معیار حساسیت سینماتیکی انتقالی به پارامتر f_1 وابستگی کمتری دارد. نحوه تغییرات معیار حساسیت سینماتیکی دورانی نسبت به پارامترهای طراحی به کلی متفاوت است. شکل ۴ به خوبی نشان می‌دهد که عکس معیار بدترین حساسیت سینماتیکی دورانی بر خلاف معیار فضای کاری کاربردی و معیار بدترین حساسیت سینماتیکی انتقالی، پس از پارامتر h بیشتر به پارامتر f_1 وابسته است. در این حالت، بهترین دقت دورانی را رباتی با پارامترهای طراحی $f_1 = 0.1$ ، $f_2 = 9.38$ و $h = 4$ دارد که تابع برازندگی آن برابر با $1/64$ می‌باشد. در این حالت، دقت دورانی ربات برابر با $\max \sigma_p = \frac{1}{1.64} = 0.61$ کاهش شدید پارامتر f_1 در هنگامی که پارامتر h مقدار ثابت و برابر با $h = 4$ دارد، از افزایش پارامتر b خیر می‌دهد. به عبارت دیگر، ربات بهینه از نظر حساسیت سینماتیکی دورانی هنگامی حاصل می‌شود که طول عصا و دسته عصا، حداکثر مقدار خود را داشته باشند. زیرا طول عصا چرخش حول محور x^- و y^- را فراهم می‌کند، در صورتی که دسته عصا چرخش حول محور z^- را در دستگاه مختصات دکارتی حاصل می‌کند.



شکل ۴: تغییرات معکوس بدترین حساسیت سینماتیکی دورانی $(1 + \max \sigma_p)^{-1}$ نسبت به پارامترهای طراحی.

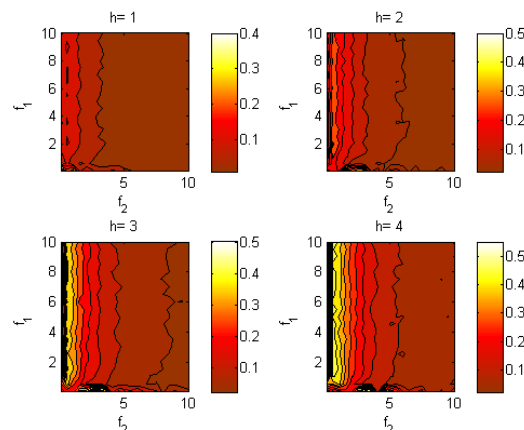
در نهایت، در این بخش تغییرات عدد وضعیت عمومی ربات عصبایی با توجه به پارامترهای طراحی معرفی شده در شکل ۱، مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۵ نشان می‌دهد که عدد وضعیت عمومی ربات طرح عصبایی، برخلاف ربات کابلی صفحه‌ای، با کاهش اندازه مجری نهایی بهبود نمی‌یابد [۳۳]. اما این بدین معنی نیست که افزایش بی‌رویه اندازه مجری نهایی، منجر به افزایش مقدار عدد وضعیت عمومی می‌شود. به عنوان مثال بهترین عدد وضعیت عمومی که با پارامتر $h = 2.7$ بدست می‌آید، از بهترین عدد وضعیت عمومی که رباتی با پارامتر $h = 4$ می‌تواند داشته باشد بیشتر است. همچنین، با توجه به شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت رباتی که در آن، پارامترهای طراحی f_1 و f_2 ، قیود زیر را برآورده سازد، از نظر عدد وضعیت عمومی مطلوب‌تر است:

$$0.1 \leq f_1 \leq 4, \quad 0.5 \leq f_2 \leq 3 \quad (21)$$

بهینه‌سازی تک‌ساز PSO نشان می‌دهد که بهترین ربات از نظر عدد وضعیت عمومی ربات، دارای پارامترهای طراحی $f_1 = 1.68$ ، $h = 2.7$ و $f_2 = 0.87$ است که با نمودارهای شکل ۵ مطابقت دارد.

این موضوع نشان می‌دهد که از نظر معیار کنترل پذیری، اهمیت پارامتر f_2 از پارامتر f_1 بیشتر می‌باشد، چرا که محدوده بهینه پارامتر f_2 شامل بازه کوچکتری است. شکل ۲ دارای وضوح ۱:۲۰ می‌باشد، بدین معنی که در هر یک از محورهای f_1 و f_2 تعداد ۲۰ نقطه مورد بررسی واقع شده است. بر اساس معیار معرفی شده و پارامترهای f_1 ، f_2 و h ، بهینه‌سازی تک‌هدفه PSO انجام شده است تا بهترین ربات از نظر حجم فضای کاربردی مشخص شود. همان‌طور که می‌توان حدس زد، نقطه بهینه دارای بیشترین h ممکن یعنی $h = 4$ است. همچنین پارامتر f_2 در این ربات مقدار کمی دارد و برابر با $f_2 = 1.14$ می‌باشد. این الگوریتم طی ۶۰۰ تکرار، مقدار پارامتر f_1 را نیز برابر با $f_1 = 10$ بدست آورده است. مقدار این همگرایی برابر با $1/8$ بدست آمده است، به عبارت دیگر، شعاع بزرگ‌ترین کره محاطی در فضای کاری کنترل پذیر برابر با 1.8^m بدست آمده است. این اندازه شعاع، فضای کاری کاربردی با حجم 24.43^m^3 به بدست می‌دهد.

حساسیت سینماتیکی انتقالی و دورانی نیز مشابه فوق قابل محاسبه می‌باشند. اما به علت آنکه بهینه‌سازی نسبت به معیار بدترین حساسیت سینماتیکی یک کمینه‌سازی است، از عکس این معیار استفاده شده تا مشابه معیار کنترل پذیری، ربات بهینه مشخص گردد. توجه به این موضوع ضروری به نظر می‌رسد که در اینجا ما از دو الگوریتم بهینه‌سازی تو در تو استفاده می‌کنیم. در الگوریتم بهینه‌سازی دورانی مقدار بدترین حساسیت سینماتیکی هر طرح مشخص می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی بیرونی وظیفه دارد رباتی را پیدا کند که دارای بهترین دقت است و بدترین حساسیت سینماتیکی آن از طرح‌های دیگر کوچک‌تر است. از شکل ۳ چنین بر می‌آید که رفتار تابع حساسیت سینماتیکی انتقالی بسیار مشابه معیار کنترل پذیر است، با این تفاوت که حساسیت به مقدار پارامتر h در معیار حساسیت سینماتیکی کمتر می‌باشد.



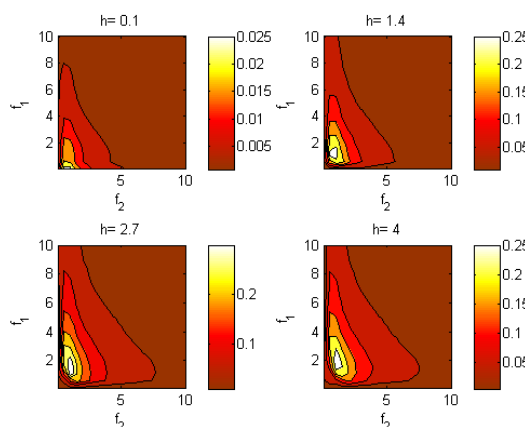
شکل ۵: تغییرات معکوس بدترین حساسیت سینماتیکی انتقالی $(1 + \max \sigma_p)^{-1}$ نسبت به پارامترهای طراحی.

الگوریتم PSO در بهینه‌سازی معکوس حساسیت سینماتیکی انتقالی به برازندگی ۰/۵۵ همگرا شده است. این مقدار برازندگی، مؤید این است که ربات بهینه دارای دقت $\max \sigma_p = \frac{1}{0.55} = 1.81$ در حرکات انتقالی است. پاسخ‌های بدست آمده برای پارامترهای طراحی بهینه نیز با شکل ۳ انطباق دارد. در این حالت، پارامتر h دارای بیشترین مقدار خود، یعنی $h = 4$ ، $f_1 = 7.32$ و پارامتر f_2 مقداری نه

۵- بهینه سازی چند هدفه ربات کابلی فضایی

در بسیاری از مسائل کاربردی بهینه سازی، نظیر طراحی بهینه مکانیزم‌ها، چندین قید باید به طور همزمان در نظر گرفته شوند. بنابر این مسأله از کیمنه سازی یک معیار خاص پیچیده تر خواهد بود، چرا که ممکن است نقاط بهینه اهداف در تقابل و تضاد با یکدیگر قرار داشته باشند. به کارگیری الگوریتم‌های بهینه سازی تک هدفه در مسائل چند هدفه عموماً با جمع وزن‌دار اهداف امکان پذیر است. با این رویکرد، مسأله بهینه سازی چند هدفه به تک هدفه تبدیل شده و در نهایت یک جواب بهینه معرفی می‌گردد. نحوه انتخاب وزن‌ها از مشکلات به کارگیری این روش است. الگوریتم‌های بهینه سازی چند هدفه با در نظر گرفتن همزمان معیارها، تلاش می‌کنند دسته جواب‌های بهینه غالبی را پیدا کنند که هیچ جواب دیگری از نظر همه اهداف از پاسخ‌های یافت شده بهتر نباشند. پیدا کردن این دسته جواب که به جبهه پرتو معروف است، از مهمترین اهداف الگوریتم‌های بهینه سازی چند هدفه محسوب می‌شود. از این رو الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک، بدلیل داشتن ساختار جمعیتی برای بهینه سازی چند هدفه گزینه مناسبی محسوب می‌شوند.

با توجه به ویژگی‌های مثبت ارائه شده در ارتباط با طرح عصایی، در این بخش سعی می‌گردد، جبهه پرتو پارامترهای این طرح با توجه به معیارهای مطرح شده و با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چند هدفه NSGA II محاسبه گردد. جزئیات این روش بهینه سازی چند هدفه به تفصیل در [۳۳] بیان شده است. در این مقاله، شرایط و پارامترهای این الگوریتم به شرح زیر انتخاب گردیده‌اند. جمعیت جواب اولیه برابر با ۱۵۰ در نظر گرفته شده و مقادیر پارامترهای جهش و برش به ترتیب برابر با ۰/۲ و ۰/۸ است.



شکل ۵: تغییرات عدد وضعیت عمومی (GCI) ربات نسبت به پارامترهای طراحی.

یک از مهمترین گامهای طرح یک مسئله بهینه سازی چند هدفه، انتخاب صحیح توابع هدف می‌باشد که در این بخش به آن پرداخته می‌شود. با توجه به شکلهای ۲، ۳، ۴ و ۵ می‌توان گفت که هیچ دو هدفی در میان چهار شاخص طراحی وجود ندارد که روند تغییرات یکسانی نسبت به پارامترهای طراحی داشته باشند، همچنین نقاط بهینه در هیچ یک از موارد فوق یکسان نمی‌باشند. بنابراین حضور هر چهار هدف طراحی در این بهینه سازی چندهدفه ضروری

به نظر می‌رسد. به عنوان مثال، اهداف کنترل پذیری و حساسیت سینماتیکی دورانی در تضاد با هم قرار دارند و قطعاً نقطه بهینه یکسانی ندارند. همچنین، تابع هدف عدد وضعیت عمومی لزوماً با افزایش طول مجری نهایی بهبود نمی‌یابد. در حالی که این موضوع برای سایر اهداف طراحی صدق نمی‌کند. نقاط بهینه توابع هدف حساسیت سینماتیکی انتقالی و حجم فضای کاربردی نیز یکسان نمی‌باشند. بنابر این حضور چهار تابع هدف ضروری به نظر می‌رسد. از بین ۴ هدف بهینه‌سازی، بدترین حساسیت سینماتیکی انتقالی و دورانی، معیارهای کیمنه سازی می‌باشند و معیارهای شعاع فضای کاربردی و عدد وضعیت عمومی، شاخص‌هایی هستند که باید تا جای ممکن بیشینه گردند. برای ساده‌تر شدن مسأله می‌توان همگی معیارها را به یک نوع مسأله بهینه‌سازی تبدیل کرد، به عنوان مثال، به جای استفاده از بدترین حساسیت سینماتیکی که یک تابع هدف کیمنه سازی است، از تابع $(1 + \max \sigma)^{-1}$ استفاده کرد تا به یک مسأله بیشینه سازی تبدیل شود و هماهنگی با سایر معیارها گردد. مسأله مهم دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد، یکسان نبودن بُرد اهداف و دامنه تغییرات آنها است. به عنوان مثال برد تابع هدف درصد فضای کنترل‌پذیری در بازه $[0, 1]$ قرار می‌گیرد، در حالی که بدترین حساسیت سینماتیکی می‌تواند هر عددی در بازه $[0, \infty]$ را شامل باشد. این موضوع باعث می‌شود، تلاش الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه برای کاهش اهداف یکسان نباشد، بنابراین لازم است که برد اهداف یکه شود تا اهمیت تمامی توابع در نظر الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه، یکسان گردد. در راستای نایل شدن به این هدف، استفاده از تابع $(1 + \max \sigma)^{-1}$ می‌تواند برد نامحدود حساسیت سینماتیکی را در بازه محدود $[0, 1]$ قرار دهد.

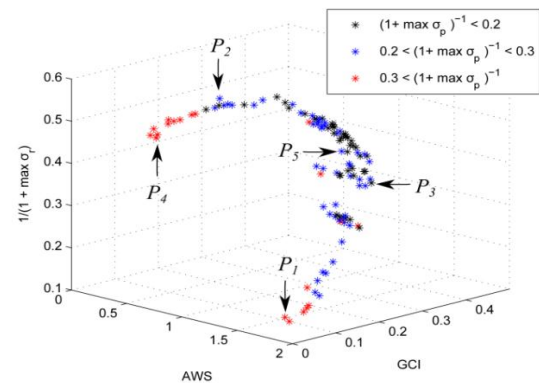
جبهه پرتو بدست آمده در شکل ۶ نمایش داده شده است. باید توجه داشت که در شکل ۶، شعاع فضای کاربردی ASW، عدد وضعیت عمومی GCI، بدترین حساسیت سینماتیکی انتقالی $\max \sigma_p$ و بدترین حساسیت سینماتیکی دورانی $\max \sigma_r$ به عنوان چهار هدف طراحی در نظر گرفته و با هم مقایسه شده‌اند. از آنجایی که نمایش بیش از ۳ بعد در دستگاه مختصات مقدور نیست، در شکل ۶ از تغییر رنگ به عنوان بعد چهارم استفاده شده است. باید توجه داشت، نویسندگان به منظور بررسی همگرایی جبهه پرتو، رفتار جبهه پرتو بدست آمده را در طول نسل‌ها بررسی کرده‌اند و با توجه به شباهت جبهه‌های پرتو بدست آمده در طول نسل‌های مختلف، همگرایی پاسخ‌ها را نتیجه گرفته‌اند.

مشخصات تعدادی از نقاط جبهه پرتو بدست آمده توسط الگوریتم NSGA II، در جدول ۳ آورده شده است. این نقاط که در شکل ۶ نیز علامت گذاری شده‌اند، در ادامه به تفصیل بررسی می‌شوند. از میان پاسخ‌های بدست آمده از جبهه پرتو تنها پاسخی مورد قبول هستند که در محدوده‌ی مطلوب زیر باشند:

معیارها، حداقل‌های همه شاخص‌ها را برآورده می‌سازند. به عبارت دیگر هیچ یک از نامساویهای معادله (۲۲) نقض نمی‌گردد. بنابراین پارامترهای طراحی این نقطه می‌توانند به عنوان پارامترهای طراحی ربات کابلی فضایی انتخاب شوند. در نهایت، مشخصات مطلوب بدست آمده در نقطه P_5 ، محققان گروه ارس دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی را که نمونه صفحه‌ای ربات کابلی را در قالب پروژه نصیر ساخته‌اند، قانع کرد که در راستای ارتقای این پروژه، نمونه عملی ربات کابلی طرح عصبایی را با مشخصات بدست آمده در نقطه P_5 پیاده سازی نمایند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، به طراحی ربات‌های کابلی فضایی با شش درجه آزادی پرداخته شد. در راستای حفظ کشش کابل‌ها و جلوگیری از شل شدن آنها در فضای کاری مکانیزم از تعریف فضای کاری کنترل پذیر استفاده شد و به منظور دوری از محاسبات غیر ضرور، استفاده از فضای کاری کاربردی پیشنهاد گردید. همچنین برای سنجش مهارت ربات و میزان دوری از تکینگی، از معیار عدد وضعیت عمومی به عنوان شاخصی مؤثر در بررسی کارایی ربات کابلی استفاده شد. شاخصی که معیاری از یکسانی مهارت ربات در موقعیت‌ها و جهت‌گیری‌های مختلف فضای کاری، ارائه می‌دهد. در نهایت، حساسیت سینماتیکی به عنوان معیاری که معرف دقت ربات است، به تفصیل بررسی گردید و بدترین حساسیت سینماتیکی ربات در فضای کاری کاربردی به عنوان شاخصی قابل ارائه به کاربر و خریدار ربات معرفی شد. برای برآورده کردن تمام شاخص‌های ذکر شده، سعی شد با به کارگیری روش‌های بهینه سازی چند هدفه هوشمند، طرح‌های بهینه محاسبه شوند. به علت تقابل و تضاد اهداف، بهینه سازی تنها یک هدف در این مسئله به عدم دستیابی به اهداف دیگر منجر می‌شود. به همین منظور از الگوریتم‌های بهینه سازی هوشمند NSGA II استفاده شد تا جبهه پرتو بهینه مشخص گردد. تحلیل جواب‌های بدست آمده به عنوان یکی از مهمترین بخش‌های فرآیند بهینه سازی چند هدفه انجام شد و نهایتاً جواب‌های قابل قبول با توجه به اهمیت معیارهای طراحی انتخاب شده‌اند.



شکل ۶: جبهه پرتو بدست آمده از الگوریتم NSGA II.

$$(1 + \max \sigma_p)^{-1} > 0.25, AWS > 1 \quad (22)$$

$$(1 + \max \sigma_r)^{-1} > 0.4, GCI > 0.25$$

قیود فوق دلخواه بوده و می‌تواند با توجه به شرایط مسئله تغییر کند. همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است، رباتی با پارامترهای طراحی نقطه P_1 از نظر وسعت فضای کاری کاربردی وضعیت بسیار مطلوبی دارد. این مشخصه عالی فضای کاری به بهای از دست دادن سایر معیارها حاصل شده است. به طوری که مابقی معیارها مقدار نامطلوبی پیدا می‌کنند. بنابراین توضیحات فوق، نقطه P_1 با وجود داشتن وسعت فضای کاری مناسب نمی‌تواند به عنوان پارامتر طراحی مناسب انتخاب شود. نقطه P_2 در جدول ۳ از نظر حساسیت سینماتیکی دورانی وضعیت بسیار مطلوبی دارد. اما این نقطه نیز نمی‌تواند تمامی شرایط معادله (۲۲) را ارضا نماید. زیرا که شرایط معادله (۲۲) در ارتباط با معیار وسعت فضای کاری کاربردی و حساسیت سینماتیکی انتقالی نقض می‌گردند. کنترل‌پذیری و حساسیت سینماتیکی نامطلوب نقطه P_3 ، این نقطه را با وجود عدد وضعیت عالی، انتخاب نامطلوبی جهت طراحی ربات کابلی معرفی می‌کند. نقطه P_4 نیز با وجود شرایط بسیار عالی از نظر معیار حساسیت سینماتیکی انتقالی، از نظر حجم فضای کاری کاربردی وضعیت مناسبی ندارد. بنابراین در یک انتخاب چند جانبه نمی‌تواند به عنوان گزینه مناسب مطرح باشد. اما نقطه P_5 از جبهه پرتو محاسبه شده در شکل ۶ ممکن است از دیدگاه یک معیار خاص شرایط بسیار عالی نداشته باشند، اما با در نظر گرفتن همزمان

جدول ۳: مشخصات نقاط تعیین شده در جبهه پرتو بدست آمده از الگوریتم NSGA II.

GCI	شاخص‌های بهینه سازی			پارامترهای طراحی			نقطه
	$\frac{1}{1 + \max \sigma_r}$	$\frac{1}{1 + \max \sigma_p}$	AWS	h (m)	f_2	f_1	
۰/۱۳۸۶	۰/۱۵۸۹	۰/۲۱۸۲	۱/۷	۳/۷۲	۱/۴۵	۵/۸۹	P_1
۰/۲۹۳۱	۰/۵۱۷۷	۰/۲۳۱۷	۰/۸۵	۳/۲	۱/۰۷	۱/۱۱	P_2
۰/۴۳۴۹	۰/۳۰۶۷	۰/۲۳۳۲	۰/۹	۲/۰۶	۰/۸۷	۱/۶۹	P_3
۰/۱۶۹۰	۰/۴۲۵۹	۰/۳۷۹	۰/۰۵	۲/۹	۱/۰۲	۰/۶۴	P_4
۰/۳۵۷۷	۰/۴۰۸۵	۰/۲۵۹۸	۱/۲۵	۳/۲	۱/۰۸	۱/۵۵	P_5

مراجع

- [1] R. Verhoeven. Phd proposal thesis: "Analysis of the Workspace of Tendon-based Stewart Platforms" 2004.
- [2] KHJ Voss, V. Wijk, and JL Herder. "Investigation of a Cable-driven Parallel Mechanism for Interaction with a Variety of Surfaces, Applied to the Cleaning of Free Form Buildings," *Latest Advances in Robot Kinematics*, pages 261–268, 2012.
- [3] S.A. Hamid and N. Simaan. "Design and Synthesis of Wire-actuated Universal-joint Wrists for Surgical Applications," In *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on*, pages 1807–1813. IEEE, 2009.
- [4] G. Rosati, P. Gallina, and S. Masiero. "Design, Implementation and Clinical Tests of a Wire-based Robot for Neurorehabilitation," *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, 15(4):560–569, 2007.
- [5] L. Dominjon, J. Perret, and A. Lecuyer, "Novel Devices and Interaction Techniques for Humanscale Haptics," *The Visual Computer*, vol. 23, no. 4, pp. 257–266, 2007.
- [6] S. Tadokoro, R. Verhoeven, M. Hiller, and T. Takamori, "A Portable Parallel Manipulator for Search and Rescue at Large-scale Urban Earthquakes and an Identification Algorithm for the Installation in Unstructured Environments," in *Proceedings. of IEEE/RSJ IROS'99.*, Vol. 2. 1999, pp. 1222–1227.
- [7] G. Rosati, P. Gallina, and S. Masiero, "Design, Implementation and Clinical Tests of a Wirebased Robot for Neurorehabilitation," *IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 560–569, 2007.
- [8] T. Morizono, K. Kurahashi, and S. Kawamura, "Realization of a Virtual Sports Training System with Parallel Wire Mechanism," in *Robotics and Automation, 1997. Proceedings. 1997 IEEE International Conference on*, vol. 4. IEEE, 1997, pp. 3025–3030.
- [9] T. Higuchi, A. Ming, and J. Jiang-Yu, "Application of Multi-dimensional Wire Cranes in Construction," in *Proceedings of the 5th International Symposium on Robotics in Construction, 1988*, pp. 661–668.
- [10] M. Aref, H. Taghirad, and S. Barissi, "Optimal Design of Dexterous Cable Driven Parallel Manipulators," *International Journal of Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 29–47, 2009.
- [11] P. Bosscher, A. Riechel, and I. Ebert-Uphoff, "Wrench-feasible Workspace Generation for Cable-driven Robots," *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 5, pp. 890–902, 2006.
- [12] G. Barrette and C. Gosselin, "Determination of the Dynamic Workspace of Cable-driven Planar Parallel Mechanisms," *Journal of Mechanical Design*, vol. 127, p. 242, 2005.
- [13] H. Osumi, Y. Utsugi, and M. Koshikawa, "Development of a Manipulator Suspended by Parallel Wire Structure," in *Intelligent Robots and Systems, 2000.(IROS 2000). Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 1. IEEE, 2000, pp. 498–503.
- [14] R. Verhoeven and M. Hiller, "Estimating the Controllable Workspace of Tendon-based Stewart Platforms," *Advances in Robot Kinematics*, pp. 277–284, 2000.
- [15] C. Gosselin, J. Angeles, "Singularity Analysis of Closed-loop Kinematic Chains," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 3, pp. 281–290, 1990.
- [16] T. Yoshikawa, "Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy," in *The First International Symposium on Robotics Research: . Mit Press Cambridge, MA, 1984*, pp. 735–747.
- [17] J. Salisbury and J. Craig, "Articulated Hands," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 1, no. 1, pp. 4–17, 1982.
- [18] P. Cardou, S. Bouchard, and C. Gosselin, "Kinematic-sensitivity Indices for Dimensionally Nonhomogeneous Jacobian Matrices," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 1, pp. 166–173, 2010.
- [19] A. Fattah and S. Agrawal, "On the Design of Cable-suspended Planar Parallel Robots," *Journal of Mechanical Design*, vol. 127, p. 1021, 2005.
- [20] Sabbavarapu Ramana Babu, Vegesina Ramachandra Raju and Koonam Ramji "Design for Optimal Performance of 3-RPS Parallel Manipulator using Evolutionary Algorithms," *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 37, no. 2, pp. 135, 2013.
- [21] F. A. Lara-Molina, J. M. Rosário and D. Dumur, "Multi-Objective Design of Parallel Manipulator Using Global Indices" *Open Mechanical Engineering Journal*, 2010.
- [22] F. Hao, J.-P. Merlet, "Multi-criteria optimal design of parallel manipulators based on interval analysis" *Mechanism and machine theory*, vol. 40, no. 2, pp. 157–171, 2005.
- [23] S. A. Khalilpour, H. D. Taghirad, M. Aliyari Shoorehdeli and M. Tale Masouleh "Appling Evolutionary Algorithms in Multi objective Optimization of Planar Cable-driven Parallel Robots", Submitted to *Modares Mechanical Engineering*, September 2013 (in Persian).
- [24] S. Tadokoro, S. Nishioka, T. Kimura, M. Hattori, T. Takamori, and K. Maeda. "On fundamental design of cable configurations of cable-driven parallel manipulators with redundancy," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C*, 66(647):2247–2254, 2000.
- [25] R. Verhoeven. "Analysis of the Workspace of Tendon-Based Stewart Platforms" PhD thesis, University atsbibliothek Duisburg, 2004.
- [26] A. Zarif Loloie and H. D. Taghirad. "Controllable Workspace of Cable Driven Redundant Parallel Manipulators by Fundamental Wrench Analysis", vol. 36, no.3 p. 297-313, 2012.
- [27] S. Khalilpour, A. Zarif Loloie, M. Tale Masouleh, and H. Taghirad, "Kinematic Performance Indices Analyzed on Four Planar Cable Robots via Interval Analysis," in *Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2013 First RSJ/ISM International Conference on. IEEE*, 2013, pp. 313–318.

- [28] J. Merlet, "Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots," *Journal of Mechanical Design*, vol. 128, p. 199, 2006.
- [29] M. Saadatzi, M. Tale Masouleh, H. Taghirad, C. Gosselin, and M. Teshnehlab, "Multi-objective Scale Independent Optimization of 3-RPR Parallel Mechanisms," *Proceedings of the IFToMM*, 2011.
- [30] S. Bouchard and C. M. Gosselin, "Kinematic Sensitivity of a Very Large Cable-driven Parallel Mechanism," in *Proceedings of ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, 2006.
- [31] M. Saadatzi, M. Masouleh, H. Taghirad, C. Gosselin, and P. Cardou, "Geometric Analysis of the Kinematic Sensitivity of Planar Parallel Mechanisms," *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 35, no. 4, p. 477, 2011.
- [32] W. A. Khan and J. Angeles, "The Kinetostatic Optimization of Robotic Manipulators: the Inverse and the Direct Problems," *Journal of mechanical design*, vol. 128, p. 168, 2006.
- [33] D. Kalyanmoy, *Multi Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley and Sons, 2001.