

# مدل سازی سینماتیکی ربات پیوسته تاندونی برای کاربردهای فضایی

محمد جباری<sup>۱</sup>، منیژه ذاکری<sup>۲</sup>

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، m.zakeri@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۵

## چکیده

کاربرد ربات‌های پیوسته<sup>۱</sup> دارای ساختار مکانیکی انعطاف‌پذیر در صنایع هوافضا روز به روز گسترده تر می‌شود و اخیراً در بازرسی مخازن سوخت هواپیماها و کاوش‌گرهای فضایی مورد استفاده قرار گرفته اند. در این مقاله رفتار سینماتیکی و فضای کاری ربات پیوسته‌ی تک‌بخشی مکانیزم تاندونی<sup>۲</sup> مطالعه شده است. جهت تحلیل سینماتیکی از روش انحناء ثابت<sup>۳</sup> که یکی از روش‌های موثر و دقیق برای تحلیل ربات‌های پیوسته به خصوص در حالت بی‌وزنی می‌باشد، استفاده شده است. همچنین میزان کشش و خمش لینک‌های فرعی ربات پیوسته در حالت تک‌بعدی و سه‌بعدی بصورت تابعی از زمان بررسی شده است. طبق نتایج شبیه‌سازی‌ها، میزان تغییر طول لینک‌ها با طول اولیه‌ی ۴۰ میلی‌متر به ترتیب افزایش ۳۹/۱ درصدی و کاهش به میزان ۱۷/۸ و ۲۱/۲ درصد داشته است. بر این اساس و طبق روش انحناء ثابت تخمین میزان کشش و خمش در طی بازه‌ی زمانی مشخص برای انواع مواد مختلف امکان‌پذیر می‌گردد. بعلاوه، خطای دسترسی به نقطه‌ی هدف برای مقدار بهینه زوایای خمش و چرخش که معادل  $۶۷/۳۵^\circ$  و  $۴۰/۸۹^\circ$  بدست آمده اند، تقریباً صفر شده است که نشان دهنده‌ی دقت بسیار بالای مدل‌سازی ربات پیوسته بر مبنای روش انحناء ثابت است. همچنین، حرکت انتهای ربات سطح فضای کاری کروی را با دقت ۱ میلی‌متر پوشش می‌دهد که میزان کنترل‌پذیری بسیار بالایی را برای کاربردهای فضایی فراهم می‌آورد. بر اساس نتایج بدست آمده، دقت حرکت ربات پیوسته در محیط‌هایی با ساختار پیچیده و فضاهای محدود افزایش می‌یابد و مدل ارائه شده می‌تواند به عنوان مدل پایه برای ربات‌های پیوسته چندبخشی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

## واژگان کلیدی

مدل‌سازی، ربات پیوسته، انعطاف‌پذیر، فضای کاری، سینماتیک

## ۱. مقدمه

امروزه ربات‌های پیوسته کاربردهای بسیار گسترده‌ای در صنایع پیشرفته که مستلزم دقت بالایی هستند، یافته‌اند. ربات‌های نرم<sup>۴</sup> مزایای بیشتری نسبت به ربات‌های صلب با درجه‌ی افزونگی بالا دارند. این مسئله می‌تواند در حمل اجسام نرم و شکننده، بدون آن‌که آسیبی به آن‌ها برسد مفید باشد. این ربات‌ها به علت داشتن انعطاف‌پذیری بالا می‌توانند در مجراهای کوچک وارد شوند. ویژگی یادشده این امکان را به آن‌ها می‌دهد که به عنوان ربات‌های با دقت بالا در صنایع فضایی، دفاعی، پزشکی، تعمیر و نگهداری، و امور امدادگری مورد استفاده قرار گیرند [۱]. کاربرد ربات‌های نرم در صنعت هوافضا، برای ماموریت‌هایی است که ربات‌های صلب<sup>۵</sup> قادر به انجام آن‌ها نیستند. مخزن سوخت هواپیما قسمت مهمی از هواپیما است و زنگ زدگی و یا خوردگی، ممکن است نشت یا ترک در مخزن سوخت هواپیما ایجاد کند. این نشت‌ها و ترک‌ها از فاکتورهای مهمی هستند که می‌توانند منجر به سقوط هواپیما شوند. از این رو بازرسی و نگهداری مخزن سوخت هواپیما از اهمیت حیاتی برخوردار است. معاینه مخزن سوخت معمولاً به صورت دستی انجام می‌شود تا محل نشت یا خوردگی مشخص شود. تعمیرکاران صنعت هواپیمایی برای انجام این کار باید وارد مخزن سوخت شوند که از معایب این روش نبودن فضای حرکتی کافی برای پرسنل است و همچنین محیط مخزن حاوی روغن و گاز با غلظت بالا است که می‌تواند برای سلامتی پرسنل مضر باشد. در نتیجه در سال‌های اخیر از ربات پیوسته که می‌تواند با کارایی خوبی این عمل را انجام دهد، استفاده می‌شود [۱].

در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در زمینه افزایش فضای کاری ربات‌های پیوسته و به تبع آن کاربردهای فضایی این نوع ربات‌ها انجام شده است. هیروس در سال ۱۹۹۳ یک مدل صفحه‌ای برای ربات‌های به شکل مار ارائه کرد است. کوبایاشی در سال‌های ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹، موچاما و سوزکی در سال ۲۰۰۳ سینماتیک و دینامیک ربات پیوسته با درجه‌ی افزونگی بالا را با استفاده از منحنی ستون فقرات پیوسته تقریب زدند. آن‌ها به منظور انجام شبیه‌سازی عددی ستون فقرات را با استفاده از قطعات صلب، که درجات آزادی بیشتری را فراهم می‌کرد، تقریب زدند [۲]. حنان و واکر در سال ۲۰۰۰، و گراوان و همکارانش در سال ۲۰۰۳ فرض کردند که هر بخش از بازوی خرطومی شکل ربات به صورت قوسی از دایره با شعاع انحنای ثابت است [۳].

جونز و واکر در سال ۲۰۰۶ با حذف فرضیه‌ی غیر قابل کشش بودن ربات پیوسته، یک ربات پیوسته با طول متغیر طراحی کردند. یکوتیلی و همکارانش در سال ۲۰۰۷ یک مدل دینامیکی گسسته چندبخشی حالت دوبعدی را برای ربات پیوسته‌ای به شکل بازوی اختاپوس ارائه دادند [۴]. به‌طور مشابه ناکابو و همکارانش در سال ۲۰۰۷ از روش انحنای ثابت برای مطالعه‌ی ربات شناگر مار شکل استفاده کردند [۵]. از اولین تحقیقات در زمینه‌ی مدل‌سازی دینامیکی ربات‌های انعطاف‌پذیر پیوسته که مبنای مطالعات بعدی قرار گرفت، مدل ارائه شده توسط چیریکچیان بود [۶]. این مدل با بهره‌گیری از چارچوب F-S<sup>۶</sup> و با استفاده از قوانین پایداری جرم، تکانه‌ی خطی و تکانه‌ی زاویه‌ای بدست آمده است. موچاما [۷و۸] مدلی را با استفاده از روش‌های ارائه شده در مقالات پیشین، برای ربات‌های انعطاف‌پذیر ارائه کرد. این مدل در حالت دوبعدی، در قالب معادلات دینامیکی لاگرانژ و به شکل انتگرالی بیان شده است. در سال ۲۰۱۱ راکر و وبستر مدل دینامیکی و استاتیکی یک ربات پیوسته را با روش بارگذاری خارجی و محرک تاندومی مدل کردند [۹]. این مدل به لحاظ دقت و کارایی از اهمیت بالایی در مدل‌سازی ربات‌های پیوسته در صنعت هوافضا برخوردار است، زیرا در اکثر ربات‌های پیوسته از دو اثر بارگذاری خارجی و اثر نیروی جاذبه صرف نظر می‌شود. همچنین این مقاله به بررسی اثر بارگذاری خارجی در این ربات‌ها پرداخته است. نیوژنگ در سال ۲۰۱۳ یک طراحی جدید برای ربات پیوسته‌ی جستجوگر مخزن هواپیما طراحی کرد که دارای ۶ درجه آزادی بود. این نوع ربات از موتورهای دی‌سی برای انتقال قدرت و حرکت استفاده می‌کرد [۱۰].

در تحقیقات ذکر شده، دو مدل کلی برای مدل‌سازی ارائه شد. یکی از این مدل‌ها، تئوری میله‌ی کاسرات است [۱۱]. این تئوری، مدل دقیقی از ربات پیوسته را با استفاده از معادلات دیفرانسیل فراهم می‌آورد اما دو ضعف اساسی دارد، زیرا مدل دینامیکی ناپایداری دارد و حالت فرم‌بسته را ارائه نمی‌دهد، و نیز وزن تمامی قطعات را در مرکز جسم در نظر می‌گیرد که با توجه به شتاب بسیار زیاد پیش‌رانه‌های فضایی این مورد می‌تواند برای صنعت هوا و فضا مشکل جدی ایجاد کند [۱۲]. روش دیگر بر اساس فرض انحنای دائمی مفاصل است که می‌تواند بسیاری از این مشکلات را کاهش داده و مدل سینماتیک مستقیم و معکوس را

کاربردهای فضایی گزینه‌ی ایده‌آلی به حساب می‌آید. مزیت دیگر شعاع انحنای ثابت هر کدام از قسمت‌های ربات است که موجب می‌شود ربات بتواند در مسیرهای سه‌بعدی پیچیده حرکت کند. در شکل (۱) بخش‌های ساختاری ربات پیوسته مشاهده می‌شود که از دیسک‌های ابتدایی و انتهایی، دیسک‌های جداکننده، ستون فقرات اصلی و ستون فقرات ثانویه تشکیل شده است.



شکل ۱. ساختار یک ربات پیوسته

برای مدل‌سازی به روش انحنای ثابت، فرضیات زیر استفاده شده است:

شعاع انحنای ستون فقرات مرکزی در طول پیکره‌ی ربات، ثابت فرض شود. به عبارتی دیگر، تنها نیروی خارجی وارده بر ربات همان نیروی کابل‌ها می‌باشد.

فاصله‌ی بین دیسک‌های جداکننده به گونه‌ای است که انحنای سیم‌های جانبی روی این دیسک به اندازه‌ی سیم مرکزی خواهد بود.

ستون فقرات اصلی و ثانویه همواره بر دیسک‌ها عمود هستند. همچنین از اصطکاک بین ستون فقرات و دیسک‌ها صرف‌نظر می‌شود.

دیگرام آزاد ربات پیوسته با یک لینک مرکزی و سه لینک جانبی در شکل (۲) ارائه شده است.

متغیرهای موجود در دیگرام آزاد شکل (۲) و مدل‌سازی در جدول (۱) توصیف شده‌اند.

مدل‌سازی سینماتیکی ربات‌های انعطاف‌پذیر را می‌توان به دو نگاهت مستقل تجزیه کرد [۱۷ و ۱۶].

با راه‌حل فرم‌بسته ارائه می‌دهد. گراوان و واکر، مدل‌سازی سینماتیکی متغیرهای پیوسته مسطح را برای ربات یک‌بخشی یک درجه آزادی به روش انحنای ثابت آغاز کردند و سپس آن را به ربات دو بخشی تعمیم دادند [۱۳]. جسی‌لی و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک ربات پیوسته برای کاربردهای فضایی با استفاده از روش کاسرات طراحی و مدل‌سازی کردند. در این طراحی بارگذاری خارجی نیز با موفقیت روی ربات پیوسته اعمال گردید [۱۴]. در نهایت در سال ۲۰۱۸ نئو گوچن و همکاران یک ربات پیوسته را با نوعی مفصل خاص استفاده شده است که بارگذاری را برای ربات‌های پیوسته آسان می‌سازد [۱۵].

با توجه به تحقیقات انجام شده، استفاده از روش انحنای ثابت در مدل‌سازی و حل معادلات در حالت فرم بسته می‌تواند دقت مدل‌سازی سینماتیکی ربات پیوسته را بسیار افزایش دهد و مشکلات مدل‌سازی خصوصاً در حالت بی‌وزنی اجسام را کاهش دهد. لذا در این مقاله رفتار سینماتیکی ربات پیوسته بر اساس روش انحنای ثابت استفاده می‌شود. به عنوان نوآوری، تحلیل سه بعدی ستون فقرات ثانویه‌ی ربات در یک بازه‌ی زمانی مطالعه خواهد شد که به پژوهشگران این اجازه را می‌دهد که میزان کشش و خمش ستون فقرات ثانویه را در هر لحظه کنترل کنند. همچنین فضای کاری ربات پیوسته تک‌بخشی با هدف صفر کردن خطای دسترسی به نقطه هدف شبیه‌سازی خواهد شد. بعلاوه، دسترسی ربات پیوسته برای دو نقطه‌ی مشخص نزدیک به هم در فضای کاری جهت امکان سنجی دسترسی به تمامی نقاط در محدوده‌ی فضای کاری ربات ارائه خواهد شد.

در ادامه این مقاله در ابتدا تئوری و فرضیات مدل‌سازی ربات بررسی می‌گردد، و مدل سینماتیکی مستقیم و معادلات فضای کاری ارائه می‌شود. سپس نتایج شبیه‌سازی سینماتیکی و فضای کاری ربات پیوسته ارائه و در مقایسه با پژوهش‌های پیشین اعتبارسنجی می‌شود.

## ۲. مدل‌سازی سینماتیکی

در این پژوهش، مدل‌سازی سینماتیکی مستقیم ربات پیوسته بر اساس روش انحنای ثابت مطالعه شده است که دارای مزایای متعددی است. اولین مزیت، ساده‌سازی معادلات سینماتیکی و دقت بالای مدل در تحلیل ربات‌های چند قسمتی است که در

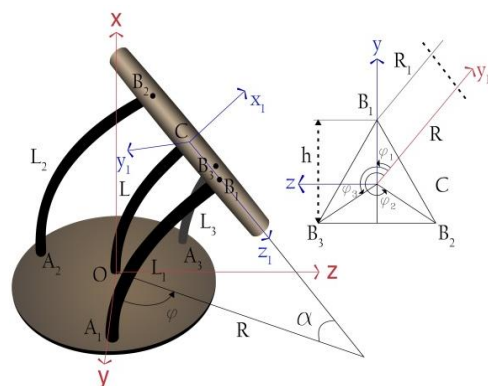
جدول ۱. متغیرهای سینماتیکی ربات پیوسته

متغیر	تعریف متغیرها
$i$	شاخص ستون‌های فقرات جانبی $i=1,2,3$
$R_i$	شعاع انحنا $i^{th}$ امین ستون فقرات جانبی در صفحهی خمش (صفحهی $X_1Z_1$ )
$R$	شعاع انحنا در ستون فقرات اصلی در صفحهی خمش (صفحهی $X_1Z_1$ )
$\alpha$	زاویهی خمش در ستون فقرات اصلی در صفحهی خمش (صفحهی $X_1Z_1$ )
$\varphi \in [0, 2\pi]$	ماکزیمم زاویه‌ای که ربات می‌تواند در صفحهی $XY$ بچرخد
$\varphi_i$	زاویهی چرخش صفحهی بالایی ربات نسبت به $i^{th}$ امین ستون فقرات جانبی
$\varphi_{prox}, \alpha_{prox}$	زاویهی چرخش و خمش نوک انتهایی بخش اول ربات
$L_0$	طول اولیهی ستون فقرات مرکزی
$l$	تصویر ستون فقرات مرکزی
$l_i$	تصویر $i^{th}$ امین ستون فقرات جانبی در صفحهی خمش
$A_i$	مکان $i^{th}$ امین ستون فقرات جانبی که در صفحهی پایینی ثابت شده است
$B_i$	مکان $i^{th}$ امین ستون فقرات جانبی که در صفحهی بالینی ثابت شده است
$O$	مرکز مثلث به وجود آمده از نقاط $A_i$ در صفحهی $\{x,y,z\}$
$C$	مرکز مثلث به وجود آمده از نقاط $B_i$ در صفحهی $\{x_1,y_1,z_1\}$
$\beta$	زاویهی تقسیم ستون فقرات جانبی روی دیسک‌های نگه دارنده در ربات مورد نظر با توجه به وجود سه ستون فقرات جانبی $\beta = 2\pi/3$
$k$	انحنای ربات
$d$	فاصله‌ی بین ستون فقرات اصلی و ستون فقرات ثانویه بر روی هر دیسک
$h$	ارتفاع مثلث‌ها در دو صفحهی بالایی و پایینی

اگر ربات شکل (۳) به اندازه‌ی زاویه‌ی  $\varphi$  بچرخد و به اندازه‌ی زاویه‌ی  $\alpha$  خم شود، ماتریس تبدیل برابر ماتریس (۱) خواهد شد که ستون آخر ماتریس بیانگر مختصات نقطه‌ی انتهایی ربات است.

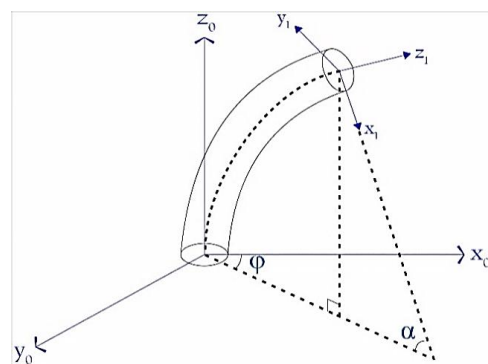
$$p_\varphi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R \cos \varphi (1 - \cos \alpha) \\ 0 & 1 & 0 & R \sin \varphi (1 - \cos \alpha) \\ 0 & 0 & 1 & R \sin \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

نگاشت اول تغییرات ایجاد شده از فضای مفصلی<sup>۷</sup> (متغیرهای متناظر با محرک‌ها) به فضای پیکربندی<sup>۸</sup>  $v = [k \ \varphi \ I]^T$  است که توصیف کننده‌ی کمان‌ها با انحنای ثابت می‌باشد. نگاشت دوم از فضای پیکربندی به فضای کاری است که بیانگر موقعیت و جهت‌گیری محور مرکزی ربات می‌باشد. متغیرهای فضای مفصلی بسته به نوع ربات می‌توانند طول تاندون و یا فشار داخل لوله‌های هیدرولیکی-پنوماتیکی باشند. نگاشت متغیرهای مفصلی به پیکربندی ممکن است تابعی از نوع ربات، ساختار مکانیکی و عملگرهای آن باشد.



شکل ۲. دیاگرام آزاد ربات پیوسته

در حالی که نگاشت دوم مستقل از نوع ربات و ساختار مکانیکی آن بوده و برای تمامی سیستم‌هایی که به روش انحنای ثابت مدل می‌شوند، برقرار است.



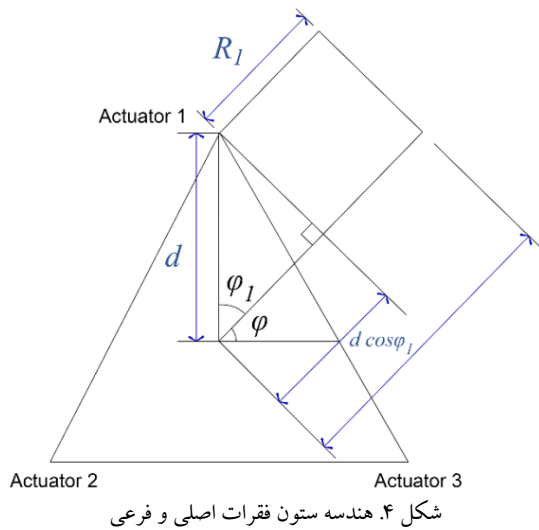
شکل ۳. ساختار یک ربات پیوسته در حالت خمش و چرخش

این فضا مختصات نقطه‌ی انتهایی را براساس مبدا مختصات، به وسیله‌ی ماتریس تبدیل همگن بیان می‌کند [۱۸]. ساختار ربات پیوسته در حالت خمش و چرخش در شکل (۳) نشان داده شده است.

$$\alpha = \frac{l_i}{R_i} = \frac{l}{R} = kl \quad (7)$$

که در آن  $l$  طول قوس و  $R$  شعاع قوس و  $k$  انحنا منحنی است.

ساختار هندسی ستون فقرات اصلی و فرعی در شکل (۴) مشاهده می‌گردد.



با توجه به شکل (۴) رابطه‌ی بین شعاع خم و شعاع هر یک از میله‌های ستون فقرات مطابق معادله‌ی (۸) می‌باشد.

$$R_i = R - \frac{2h}{3} \cos \varphi_i \quad (8)$$

با توجه به رابطه‌ی (۷) و (۸)، رابطه‌ی بین طول میله‌ی اصلی با طول هر کدام از میله‌های محرک به صورت معادله‌ی (۹) بدست می‌آید.

$$l_i = l - a \frac{2h}{3} \cos \varphi_i \quad (9)$$

با توجه به شکل (۴) رابطه‌ی بین  $\varphi_i$  و  $\varphi$  به صورت رابطه‌ی (۱۰) بدست می‌آید.

$$\varphi_i = 90 + 120(i-1) - \varphi \quad (10)$$

براساس هندسه ربات طراحی شده، هر یک از چرخش‌ها به صورت رابطه‌ی (۱۱) می‌باشند.

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= -\varphi \\ \varphi_2 &= -\frac{2\pi}{3} - \varphi \\ \varphi_3 &= \frac{2\pi}{3} - \varphi \end{aligned} \quad (11)$$

متغیرهای  $R$  و  $L$  در روابط (۸) و (۹) و با فرض  $\sum_{i=1}^3 \cos \varphi_i = 0$  از رابطه‌ی (۱۲) بدست می‌آید.

برای بدست آوردن ماتریس تبدیل همگن، پس از آنکه کمان را حول محور  $x$  در صفحه‌ی  $y-z$  در جهت زاویه‌ی  $\{\varphi\}$  دوران دادیم ماتریس دوران برابر ماتریس (۲) خواهد شد.

$$R_\varphi = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

در گام دوم پس از چرخش دستگاه مرجع حول محور  $y$  به اندازه‌ی  $\alpha$  ماتریس دوران آن بدست می‌آید.

$$R_\alpha = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

در نهایت با چرخش حول محور  $z$  جدید به اندازه‌ی  $-\varphi$ ، ماتریسی که رابطه‌ی فضای مفصلی با فضای کاری را مشخص می‌کند طبق معادله‌ی (۴) بدست می‌آید.

$$R_\varphi = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

با ضرب ماتریس‌های تبدیل، ماتریس تبدیل نهایی به صورت ماتریس معادله (۶) بدست می‌آید.

$$T = \begin{bmatrix} R_z(\varphi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_y(\alpha) & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_z(-\varphi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} R_{ot} & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 \varphi (ckl-1) + 1 & -s \varphi c \varphi (ckl-1) \\ s \varphi c \varphi (ckl-1) & c^2 \varphi (1-ckl) + ckl \\ -c \varphi skl & -s \varphi skl \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

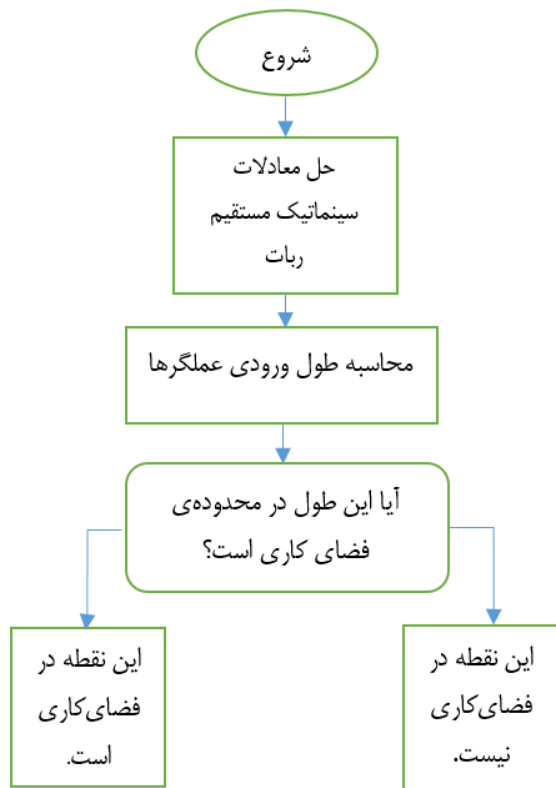
$$\left. \begin{array}{l} c \varphi skl \\ \dots s \varphi skl \\ ckl \\ 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \frac{c \varphi (1-ckl)}{k} \\ \frac{s \varphi (1-ckl)}{k} \\ \frac{skl}{k} \\ 1 \end{array}$$

در ماتریس (۶)، علائم  $c$  و  $s$  به ترتیب مخفف توابع  $\cos$  و  $\sin$  هستند.

موقعیت نقطه‌ی انتهایی ربات در ماتریس تبدیل، از ستون آخر ماتریس (۶) بدست می‌آید و با توجه به محدودیت حرکتی ربات، زوایای چرخش و خمش در محدوده‌ی  $\varphi \in [0 \ 2\pi]$  و  $\alpha = (0 \ \pi)$  تعریف می‌شوند.

نگاشت عمومی بین فضای مفصلی و فضای پیکربندی رابطه بین مختصات مفصل‌ها یا همان طول مفصل‌ها را  $q = (l_1, l_2, l_3)$  با پارامترهای  $l(q), k(q), \varphi(q)$  برقرار می‌سازد. با استفاده از روش انحنا ثابت، رابطه‌ی شعاع به صورت رابطه‌ی (۷) تعریف می‌شود.

این ربات با اعمال فشار بر محرک‌های تاندومی تحریک می‌شود تا در فضای سه‌بعدی عملیات انجام دهد. تنها بارگذاری بر روی ربات، همان نیروی وارد بر عملگرها است. یعنی ربات در محیطی بدون جاذبه شبیه به محیط خارج جو، شبیه‌سازی شده است.



شکل ۵. الگوریتم شبیه‌سازی فضای کاری ربات پیوسته

الگوریتم شبیه‌سازی فضای کاری ربات در شکل (۵) ارائه شده است.

در شکل (۶) پیکربندی خمش ربات تک‌بخشی با طول ۴۰ میلی‌متر در زوایای خمشی و چرخشی  $\alpha = 67/35^\circ$  و  $\varphi = -40/89^\circ$  مشاهده می‌گردد. در این حالت خطا در رسیدن به نقطه‌ی هدف صفر به دست آمده است که نشان دهنده‌ی دقت بسیار بالای ربات تک‌بخشی در محاسبات و انجام ماموریت است. لذا عملکرد این ربات در مکان‌هایی که دسترسی انسان با دشواری مواجه است، مانند کاربردهای فضایی بسیار دقیق و مناسب است.

در شکل (۷) رفتار ربات تک‌بخشی به همراه میله‌های جانبی که شعاع این میله‌ها ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است، با زوایای

$$R = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3} \quad (12)$$

$$l(q) = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{3}$$

با جایگزینی  $i=1,2$  و  $i=2,3$  در رابطه‌ی (۹) و ترکیب آن‌ها با رابطه‌ی (۱۰)، رابطه‌ی بین  $q$  و  $\varphi$  به صورت معادله‌ی (۱۳) خواهد بود.

$$\varphi(q) = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{3}(l_2 + l_3 - 2l_1)}{3(l_2 - l_3)} \right) \quad (13)$$

به همین ترتیب با استفاده از رابطه‌ی (۷) مقدار  $R_i$  محاسبه و با جایگذاری در رابطه‌ی (۸)، انحنای ربات بدست می‌آید.

$$k = \frac{l - l_i}{l d \cos \varphi_i} \quad (14)$$

از رابطه‌ی  $\varphi_1 = 90 - \varphi$  و (۱۲)، انحنای ربات را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۱۵) نوشت.

$$k = \frac{l_2 + l_3 - 2l_1}{(l_1 + l_2 + l_3) d \sin \varphi} \quad (15)$$

می‌توان رابطه‌ی بین  $Q$  و  $k$  را از رابطه‌ی (۱۳) و (۱۵) استخراج کرد.

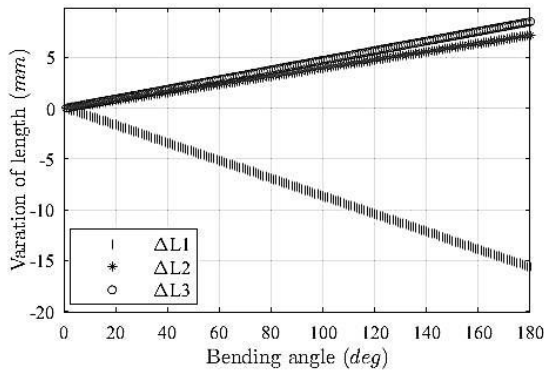
$$k(q) = \frac{2 \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 - l_1 l_2 - l_1 l_3 - l_2 l_3}}{d(l_1 + l_2 + l_3)} \quad (16)$$

فضای کاری ربات، غالباً فضایی را توصیف می‌کند که نقطه‌ی انتهایی ربات می‌تواند به آن برسد و عمدتاً مربوط به پارامترهای ساختاری ربات است. از طریق سینماتیک مستقیم یا به عبارتی ماتریس تبدیل همگن می‌توان به فضای کاری ربات چندبخشی رسید. برای بدست آوردن مختصات نقطه‌ی انتهایی در یک ربات چندبخشی، باید ماتریس تبدیل همگن هر کدام از بخش‌ها را با توجه به رابطه‌ی (۶) در یکدیگر ضرب نمود تا ماتریس تبدیل همگن نهایی برای نقطه‌ی انتهایی ربات چندبخشی بدست آید.

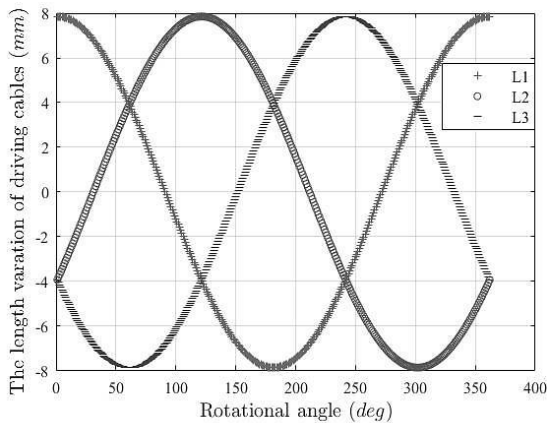
$$\begin{matrix} {}^b_n T = {}^b_0 T_1^0 T_2^1 T_{n-1}^{n-2} T_n^{n-1} \\ {}^b_1 T = {}^b_0 T_1^0 T \end{matrix} \quad (17)$$

### ۳. شبیه‌سازی فضای کاری ربات پیوسته

در این قسمت رفتار سینماتیکی ربات پیوسته تک‌بخشی به طول ۴۰ میلی‌متر شبیه‌سازی می‌شود. در شبیه‌سازی فضای کاری ربات، معادلات سینماتیک مستقیم با فرض زوایای خمش و چرخش  $\alpha = 67/35^\circ$  و همچنین  $\varphi = -40/89^\circ$  در محیط متلب شبیه‌سازی شده و نتایج بدست آمده در شکل‌های (۶) تا (۱۴) ارائه شده‌اند.

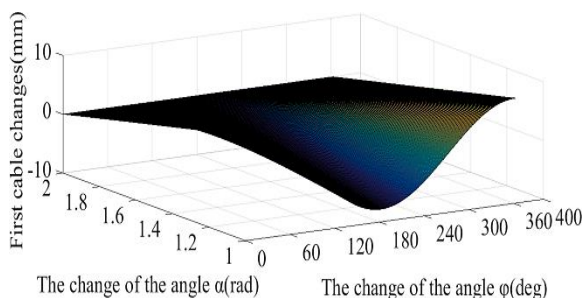


شکل ۸. تغییرات طول کابل های محرک نسبت به زاویه ی خمش ربات



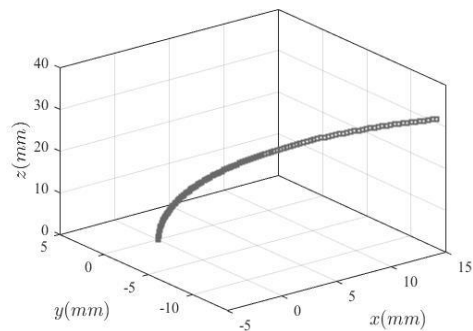
شکل ۹. تغییرات طول کابل های محرک نسبت به زاویه ی چرخش

در شکل های (۱۰) تا (۱۲) نمودارهای تغییرات طول ربات و زاویه ی چرخش و خمش با تغییرات زاویه ی چرخش و خمش در محدوده  $\alpha = [0 \quad \frac{\pi}{2}]$  و  $\varphi = [0 \quad 2\pi]$  ارائه شده است. طبق نمودارهای شکل های (۱۰) تا (۱۲)، کاهش طول تاندون ها (نیروی فشاری) و افزایش طول آن ها (نیروی کشش) برای زوایای چرخش و پیچش مشخص قابل مشاهده و استخراج می-باشند.



شکل ۱۰. تغییرات طول محرک تاندونی اول نسبت به زاویه ی چرخش و خمش

چرخش و خمش  $\alpha = 67/35^\circ$  و  $\varphi = -40/89^\circ$  در محیط متلب شبیه سازی شده است.

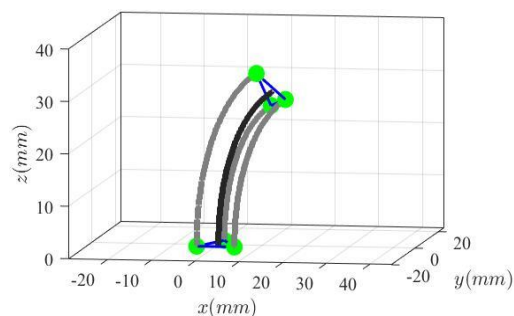


شکل ۶. پیکربندی خمش ربات تک بخشی با طول ۴۰ میلی متر و زوایای

خمش و چرخش  $\alpha = 67/35^\circ$  و  $\varphi = -40/89^\circ$

در شکل (۸) تغییرات طول محرک های تاندونی ربات و زاویه ی خمش، برای طول ربات ۴۰ میلی متر و شعاع میله های تاندونی برابر ۵ میلی متر، بدست آمده است. همچنین زاویه ی چرخش مقدار ثابت  $\varphi = -40/89^\circ$  و تغییرات زاویه ی خمش بین  $\alpha = [0 \quad \pi]$  است. در این حالت محرک های تاندونی  $l_2$  و  $l_3$  به صورت فشاری و محرک تاندونی  $l_1$  به صورت کششی تغییر طول پیدا کرده اند. تغییرات طول کابل ها تحت شرایط فوق برای هر کدام از محرک های تاندونی به ترتیب برابر  $l_1 = 15/64 \text{ mm}$ ،  $l_2 = 7/15 \text{ mm}$  و  $l_3 = 8/49 \text{ mm}$  بدست آمده است.

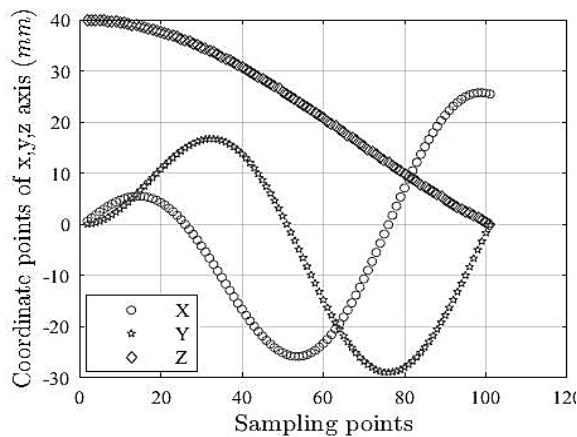
شکل (۹) تغییرات طول محرک های تاندونی را نسبت به زاویه ی چرخش نشان می دهد که این نمودارها، با زاویه ی خمش ثابت  $\alpha = 90^\circ$  و تغییر زاویه ی چرخش بین  $\varphi = [0 \quad 2\pi]$  بدست آمده اند.



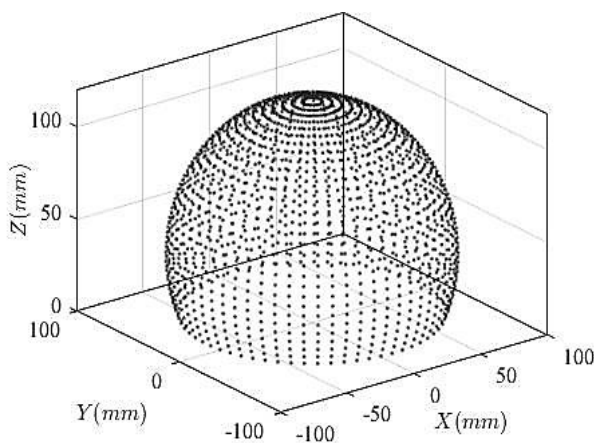
شکل ۷. پیکربندی خمش ربات تک بخشی با طول ۴۰ میلی متر و زوایای

خمش و چرخش  $\alpha = 67/35^\circ$  و  $\varphi = -40/89^\circ$  به همراه ستون فقرات جانبی

در شکل (۱۴) فضای کاری ربات تک‌بخشی در حالت سه‌بعدی نشان داده شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود فضای دسترسی این نوع ربات در مقایسه با ربات صلب بسیار زیاد است. میزان دقت و فاصله‌ی دو نقطه روی فضای کاری کروی ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است که نشان دهنده‌ی دقت بسیار بالای ربات در محیط‌هایی با فضای کم است.



شکل ۱۳. تغییرات موقعیت نهایی ربات

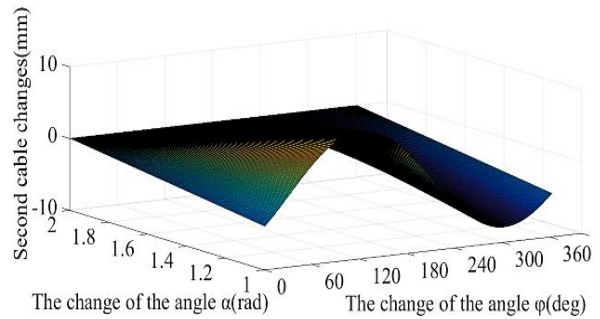


شکل ۱۴. فضای کاری ربات تک‌بخشی در حالت سه‌بعدی

#### ۴. نتیجه‌گیری

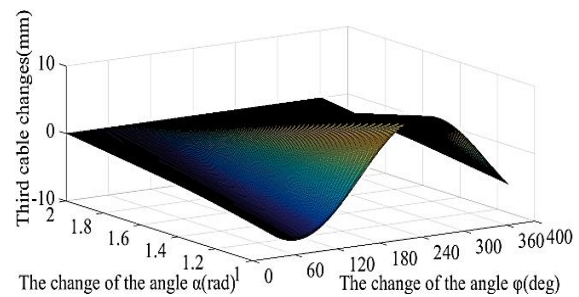
در این مقاله طراحی و مدلسازی سینماتیکی ربات تک‌بخشی با مکانیزم تاندونی به روش انحناء ثابت مطالعه و تحلیل شد. مزیت این شیوه، سادگی، دقت و عدم تاثیر گرانش روی محاسبات و عملکرد ربات پیوسته است. برای کاربرد های فضایی که حالت بی‌وزنی را تجربه می‌کنند، روش انحناء ثابت گزینه‌ی مناسبی خواهد بود، زیرا حذف اثر گرانش تاثیر مثبتی روی دقت و عملکرد ربات پیوسته خواهد داشت. در این تحقیق پس از ارائه مدل

تغییر طول کششی و فشاری لینک‌ها بر حسب میلی‌متر به ترتیب برابر ۱۵۶۴ افزایش و ۷،۱۵ و ۸،۴۹ کاهش را نسبت به طول اولیه‌ی ربات نشان می‌دهد که برابر به ترتیب ۳۹،۱ درصد، ۱۷،۸ درصد و ۲۱،۲ درصد برای هر کدام از لینک‌ها با طول اولیه ۴۰ میلی‌متر است.



شکل ۱۱. تغییرات طول محرک تاندونی دوم نسبت به زاویه‌ی چرخش و

خمش



شکل ۱۲. تغییرات طول محرک تاندونی سوم نسبت به زاویه‌ی چرخش و

خمش

همانطور که مشاهده می‌شود میزان تغییرات ستون فقرات فرعی در هر لحظه بدست آمده است که این ویژگی پیش بینی تغییرات طول عملگرهای ربات را در محیط‌های فضایی که جاذبه صفر است، امکان پذیر می‌سازد. شکل (۱۳) نگاشت بین متغیرهای فضای پیکربندی و فضای کاری را بر پایه‌ی سینماتیک مستقیم ربات نشان می‌دهد. تغییرات زاویه‌ی خمش بین  $[0 \pi]$  و تغییرات زاویه‌ی چرخش بین  $[0 2\pi]$  است. طول گام برای  $\alpha$  برابر  $1/8$  و برای  $\phi$  برابر  $3/6$  بوده و تعداد نقاط نمونه‌ی انتخابی ۱۰۰ عدد است. همانطور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، تغییرات طول دو عملگر به لحاظ کشش یا فشار شبیه به هم بوده و عملگر سوم، عملکردی مخالف دو عملگر دیگر دارد. همچنین وضعیت و موقعیت نهایی ربات در حالات مختلف تحریک عملگرها، طبق نمودارهای شکل (۱۳) قابل استخراج است.



در تحقیقات آینده می‌توان با تعمیم سینماتیک ربات تک‌بخشی به سه‌بخشی، ربات را برای کاوش در فضا و انجام ماموریت‌های پیچیده مناسب‌سازی کرد. همچنین می‌توان با اضافه کردن تاندون‌های بیشتر، و جایگزینی ستون فقرات جانبی با مواد متفاوت و جدیدی مانند آلیاژهای حافظه‌دار که کشش و خمش قابل کنترل و بسیار دقیق دارند، می‌تواند کنترل پذیری موقعیت و نیروی انتهای ربات را افزایش دهد.

سینماتیکی ربات پیوسته و شبیه‌سازی آن، تغییرات طول محرک‌ها و فضای‌کاری برای ربات محاسبه و نتایج آن ارائه شده است. تغییرات طول کششی و فشاری ربات در بازه‌ی زمانی مشخص تحلیل درستی از ستون فقرات ثانویه در لحظات و حالات مختلف ربات را امکانپذیر می‌سازد. همچنین، طبق نتایج فضای‌کاری در ربات‌های پیوسته، باتوجه به پوشش حداکثری که در حدود ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است، نقاط غیرقابل دسترس برای ربات به نقاط قابل دسترس مبدل می‌شوند.

## ۶. مآخذ

- [1] S. Kolachalama, S. Lakshmanan, Continuum Robots for Manipulation Applications: A Survey, *Journal of Robotics*, 2020 (5), pp.1-19, 2020.
- [2] H. Mochiyama, T. Suzuki, Kinematics and dynamics of a cable-like hyper-flexible manipulator”, *Proceedings of The IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, 2003.
- [3] M.W. Hannan, I.D. Walker, “Kinematics and the implementation of an elephant's trunk manipulator and other continuum style robots”, *Journal of field robotics*, 20 (2), pp. 45-63, 2003.
- [4] Y. Yekutieli, R. Sagiv-Zohar, R. Aharonov, Y. Engel, B. Hochner, T. Flash, “Dynamic model of the octopus arm. I. Biomechanics of the octopus reaching movement”, *Journal of neurophysiology*, 94 (2), pp.1443-1458, 2005.
- [5] Y. Nakabo, T. Mukai, K. Asaka, Biomimetic soft robots using IPMC. In: Kim K.J., Tadokoro S. (eds) *Electroactive Polymers for Robotic Applications.*, Springer: London, 2007.
- [6] G.S. Chirikjian, “Theory and applications of hyper-redundant robotic manipulators”, *Doctoral dissertation*, California Institute of Technology, 1992.
- [7] H. Mochiyama, T. Suzuki, “Dynamical modelling of a hyper-flexible manipulator”, In *SICE. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*, Osaka, Japan, pp. 1505-1510, 2002.
- [8] H. Mochiyama, T. Suzuki “Kinematics and dynamics of a cable-like hyper-flexible manipulator”, In *Robotics and Automation, Proceedings, ICRA'03. IEEE International Conference*, Taipei, Taiwan, pp. 3672-3677, 2003.
- [9] D.C. Rucker, R.J. Webster III, “Statics and dynamics of continuum robots with general tendon routing and external loading”, *IEEE Transactions on Robotics*, 27 (6), pp. 1033-1044, 2011.
- [10] G. C. Niu, Z. C. Zheng, Q. J. Gao, W. J. Wang, & L. Wang, “A novel design of aircraft fuel tank inspection robot”, *Telkomnika-Indones J Elect Eng* 11, pp.3684-3692, 2013.
- [11] E. Tatlicioglu, I.D. Walker, D.M. Dawson. “Dynamic modelling for planar extensible continuum robot manipulators”, In *Robotics and Automation, IEEE International Conference*, Rome, Italy, pp. 1357-1362, 2007.
- [12] Y. Ganji, F. Janabi-Sharifi, A.N. Cheem “Robot-assisted catheter manipulation for intracardiac navigation”, *International journal of computer assisted radiology and surgery*, 4 (4), pp. 307-315, 2009.
- [13] I. Gravagne, I.D. Walker, “Kinematics for Constrained Continuum Robots, Using Wavelet Decomposition”, *American Society of Civil Engineers*, pp. 292–298, ch.37, 2000.
- [14] J.L. Santiago, I.D. Walker, I.S. Godage. “Continuum robots for space applications based on layer-jamming scales with stiffening capability”, In *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA, pp. 1-13, 2015.
- [15] G. C. Niu, W. J. Wang, and K. Xu, “Model analysis for a continuum aircraft fuel tank inspection robot based on the Rzeppa universal joint”, *Advances in Mechanical Engineering*, 10(5), 2018.
- [16] B.A. Jones, I.D. Walker. “Kinematics for multisection continuum robots,” *Journal of IEEE Transactions on Robotics*, 22(1), pp. 43-55, 2006.
- [17] R.J. Webster III, B.A. Jones, “Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots”, *A review. The International Journal of Robotics Research*, 29(13), pp. 1661-1683, 2010.
- [18] Y. Tian, M. Luan, X. GAO, W. Wang, L. Li, " Kinematic Analysis of Continuum Robot Consisted of Driven Flexible Rods", *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, Article ID 6984194, 7 pages, 1-7, 2016.

- 
- 1 . Continuum Robots
  - 2 . Tendon-driven Continuum Robot
  - 3 . Constant-Curvature
  - 4 . Soft Robots
  - 5 . Rigid Robots
  - 6 . Frenet-Serret Frame
  - 7 . Joint Space
  - 8 . Configuration Space