



## ۱- مقدمه

در مقالاتی که تاکنون اشاره شد، تمرکز پژوهشگران در مسئله طراحی مسیر بیشتر بر روی حرکت بدون ناپیوستگی در سرعت و شتاب بوده است، اما زاچاریا و همکارانش [۱۲] در سال ۲۰۰۵، با برقراری آنالوژی بین مسئله فروشنده دوره گرد<sup>۶</sup> و مسئله طراحی مسیر، روشی بر پایه الگوریتم ژنتیک ارائه دادند. آن‌ها در این روش ترتیب بهینه گذر از نقاط مشخصی از فضای کاری را به دست آوردند. زیدپاس و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۱۰ روشی برای پیدا کردن جواب مسئله برنامه‌ریزی وظایف<sup>۷</sup> در حضور موانع و در کمترین زمان پیشنهاد دادند. مسئله آن‌ها از دو بخش عمده تشکیل شده که از نظر محاسباتی هر دو بخش جزء مسائل ان پی-سخت<sup>۸</sup> می‌باشند. این تحقیق برای یک محیط دوبعدی در حضور موانع با شکل‌ها و سایزهای مختلف انجام گرفته است و هدف آن گذر نقطه انتهایی ربات از یک سری نقاط مشخص، بدون برخورد با موانع است. نوآوری این تحقیق در ترکیب مسائل بهینه‌سازی، برخورد موانع و برنامه‌ریزی وظایف می‌باشد. نکتاریوس و همکاران [۱۴] روشی آفلاین برای یافتن موقعیت بهینه پایه ربات جهت ردیابی یک مسیر سه‌بعدی با ماکزیمم عملکرد سرعتی ارائه دادند.

به‌طور کلی اضافه‌شدن معادلات دینامیکی در مسئله طراحی مسیر باعث پیچیده‌تر شدن معادلات و زمان‌بر شدن حل آن‌ها می‌شود. بنابراین اکثر مقالاتی که با رویکرد دینامیکی به بررسی طراحی مسیر ربات‌ها می‌پردازند، از روش‌های هوشمند برای مدلسازی و یا پیش‌بینی مسیر استفاده می‌کنند. خوخی و بارون [۱۵] با استفاده از دو شبکه عصبی-فازی مسیر بهینه زمانی را برای یک بازوی سه‌درجه آزادی در صفحه به‌دست آوردند. آن‌ها از یک شبکه عصبی برای حل سینماتیک معکوس ربات و از شبکه دیگری برای مدلسازی دینامیک ربات استفاده کردند. در این مقاله برای موقعیت، سرعت، شتاب، جرک و گشتاور محدوده تغییرات در نظر گرفته شده است. در مقاله بعدی خوخی و بارون [۱۶] توابع هدف چندگانه برای طراحی مسیر ربات افزونه ارائه شده است. برای این کار از یک شبکه عصبی-فازی آفلاین برای تولید مسیرهای چندهدفه در فضای کاری ربات استفاده شده است. مسیر مورد نظر می‌تواند دارای کمترین زمان و یا کمترین انرژی باشد.

بازوهای مارگون، بازوهای با درجات آزادی افزونه هستند که تعداد درجات آزادی آن‌ها از حداقل مورد نیاز برای دسترسی به تمام نقاط فضا بیشتر است. با توجه به شکل ظاهری بازوهای مارگون، از اصطلاحاتی همچون خرطوم فیل<sup>۱</sup> و بازوی هشت‌پا<sup>۲</sup>، توسط محققان استفاده شده است. بازوهای با درجات آزادی افزونه<sup>۳</sup> توانایی کار در محیط‌های کاملاً مقید، پیچیده و خطرناک نظیر کار در راکتورهای هسته‌ای، اعمال جراحی، کاوش‌ها و ایستگاه‌های فضایی را دارند [۱]. با توجه به درجات آزادی بالای بازوهای افزونه و وجود پاسخ‌های زیاد برای سینماتیک معکوس این بازوها [۲]، مسئله طراحی مسیر این گونه بازوها توجه بسیاری از متخصصان را به خود جلب کرده است. طراحی مسیر بازوها می‌تواند با رویکرد سینماتیکی و یا دینامیکی انجام پذیرد. با هر کدام از این رویکردها می‌توان توابع هزینه متفاوتی را جهت یافتن مسیر بهینه به کار برد. به عنوان مثال، تابع هزینه می‌تواند کمینه‌کردن مصرف انرژی [۳-۵]، کمینه‌کردن زمان حرکت، جلوگیری از برخورد با موانع [۶، ۷]، حرکت یکنواخت بدون ناپیوستگی در سرعت و شتاب، دوری از نقاط تکین [۸] و یا حرکت با مینیمم جرک<sup>۴</sup> باشد [۹].

در مقاله‌ای که توسط آتا و همکارانش [۱۰] ارائه شد، مسئله ردیابی مسیر بازوهای با درجه آزادی اضافی با استفاده از روش جستجوی الگوی تعمیم یافته مورد بررسی قرار گرفت. هدف از حل این مسئله رسیدن به کمترین خطا بین نقاط مسیر مطلوب و نقاط مسیر واقعی بود. در تعریف تابع هدف، کمینه‌کردن حرکت مفاصل نیز در نظر گرفته شده است. آن‌ها برای نشان دادن کارایی الگوریتم و مقایسه آن با الگوریتم ژنتیک، یک بازوی سه‌درجه آزادی در صفحه را معیار قضاوت قرار دادند. سای و هانگ [۱۱] روشی برای کنترل بهینه ربات‌های چند درجه آزادی با استفاده از شبکه عصبی دوگانه براساس نامساوی‌های تغییراتی خطی<sup>۵</sup> ارائه دادند. ایده اصلی این تحقیق بر پایه ضعف روش ماتریس شبه معکوس در حل مسئله سینماتیک معکوس می‌باشد.

۱. ق کلامم کع غغ ق و
۲. لاگ مع قهنگ کعک غغع م کع ر
۳. لاگ مع قهنگ کعک م کع عکعغ د
۴. ق لاغ ج
۵. تژج

خ ذر ۶.  
عقع گ لاگ غکدق معع غغلق اع ر ۷.  
لاع غغخ ح ۸.

## ۲- مفاهیم اولیه

## ۱-۲- تعریف مسئله

در این مقاله هدف طراحی مسیر نوع خاصی از بازوهای با درجات آزادی افزونه می‌باشد. در بازوهای کابلی مرسوم از سه کابل برای کنترل موقعیت هر لینک استفاده می‌شود. اما در این بازو تنها از سه کابل برای کنترل موقعیت کل بازو استفاده می‌شود و در کنار آن از سیستم قفل در روی هر لینک بهره می‌برد. این بازو دارای لینک‌های با ساختار لولایی-کشویی-کروی سه‌گانه<sup>۲</sup> است که مطابق شکل ۱ به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند. کابل‌های اصلی از سوراخ‌های لبه صفحات عبور کرده و به صفحه بالایی محکم می‌شوند. انتهای دیگر کابل‌ها توسط موتور و قرقره متصل به آن کشیده می‌شوند. هر لینک دارای سه جک هیدرولیکی کوچک مطابق شکل ۲ می‌باشد. در پیچه‌های جک‌های هیدرولیکی توسط لوله‌های انعطاف‌پذیر به یکدیگر وصل شده‌اند. در مسیر لوله‌ها از یک عدد شیر سلونوئیدی استفاده شده است که در صورت بازبودن شیر، جک‌ها آزادانه حرکت می‌کنند و زمانی که شیر سلونوئیدی بسته باشد کل لینک قفل خواهد شد. شکل ۲ مدار هیدرولیکی به کار رفته در سیستم قفل هر لینک را نشان می‌دهد. با مشاهده این مدار می‌توان رابطه قیدی بین طول جک‌ها را به صورت زیر نوشت:

$$l_1 + l_2 + l_3 = L \quad (1)$$

در این رابطه،  $l_1, l_2, l_3$  به ترتیب طول پایه‌های اول، دوم و سوم‌اند. این رابطه قیدی بیان می‌کند که در هر لحظه با داشتن طول دو جک می‌توان طول جک سوم را به دست آورد و وضعیت کامل یک لینک را مشخص کرد. علاوه بر این طول یک پایه نمی‌تواند از یک مقدار مشخصی کمتر و از مقدار معین دیگری بیشتر باشد. این قیدها را به صورت زیر بیان می‌کنیم:

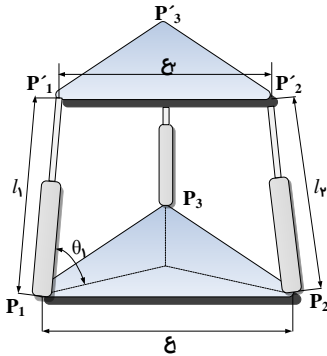
$$\begin{aligned} l_{\text{حدک}} \leq l_1 \leq l_{\text{حدب}} \\ l_{\text{حدک}} \leq l_2 \leq l_{\text{حدب}} \\ l_{\text{حدک}} \leq l_3 \leq l_{\text{حدب}} \end{aligned} \quad (2)$$

در این رابطه،  $l_{\text{حدب}}$  و  $l_{\text{حدک}}$  به ترتیب حداقل و حداکثر طول پایه‌ها می‌باشند. تمامی قیده‌های بیان‌شده در روابط (۱) و (۲) در طراحی مسیر بازو لحاظ خواهند شد.

هنرور در سال ۲۰۰۹ ایده جدید استفاده از سیستم قفل در مفاصل را مطرح کرد [۱۷]. به کمک این نوآوری می‌توان، تنها با استفاده از سه کابل و سه عملگر، کل بازو را کنترل کرد. استفاده از مکانیزم قفل باعث کاهش تعداد عملگرها و سبک‌تر شدن بازو و در نتیجه کاهش هزینه‌ها می‌شود. یک بازوی ۸ درجه آزادی با این شیوه در آزمایشگاه کنترل دانشگاه صنعتی شریف ساخته شده است. با اینکه ایده مطرح شده ساختار بازو را ساده‌تر کرده است، اما باعث پیچیدگی طراحی مسیر و کنترل آن شده است. در این مقاله، هدف بررسی طراحی مسیر برای یک مدل سینماتیکی از بازوی مارگون کابلی با مفاصل قفل‌شونده معرفی شده در مرجع [۱۷] می‌باشد. در طراحی مسیر این بازو، متغیرهای پیوسته یعنی طول کابل‌ها و متغیرهای گسسته یعنی وضعیت قفل‌ها وارد می‌شوند. وجود متغیرهای گسسته و پیوسته در کنار هم طراحی مسیر این بازو را به یک مسئله خاص و جدید تبدیل می‌کند به طوری که تاکنون هیچ تحقیقی در خصوص طراحی مسیر این نوع بازوها صورت نگرفته است. در این مقاله، سعی شده است تا با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی نحوه تغییر طول کابل‌ها و نحوه باز و بسته‌شدن قفل‌های مفاصل به گونه‌ای بهینه شوند که بازو با کمترین تعداد سوئیچینگ و یا در کمترین زمان به نقطه هدف برسد. جنبه دیگر نوآوری این پژوهش در استفاده از الگوریتم پرواز پرندگان می‌باشد، چرا که در تحقیقاتی که تاکنون صورت گرفته غالباً از الگوریتم‌های ژنتیک در طراحی مسیر استفاده شده است.

ادامه این مقاله به شش بخش تقسیم می‌شود. در بخش دوم مفاهیم اولیه راجع به بازوی مارگون با مفاصل قفل‌شونده و سینماتیک مستقیم بازو ارائه خواهد شد و از یک شبکه عصبی برای مدلسازی سینماتیک استفاده می‌شود. در بخش سوم توضیح مختصری راجع به روش بهینه‌سازی پرواز پرندگان ارائه خواهد شد و در بخش چهارم طراحی مسیر با معیار کمترین سوئیچ ارائه می‌شود. طراحی مسیر با هدف بهینه‌سازی زمان و نتایج آن در بخش پنجم توضیح داده می‌شود. در این بخش نتایج بهینه‌سازی روش پرواز پرندگان با نتایج حاصل از روش شبیه‌سازی انجماد طبیعی (آنیلینگ<sup>۱</sup>) مقایسه خواهد شد. در نهایت نتیجه‌گیری پایانی در بخش ششم آورده می‌شود.

محور دوران مفاصل پایینی، عمود بر خط چین‌ها می‌باشد. پارامترهای هندسی بازو در جدول ۱ آمده است.

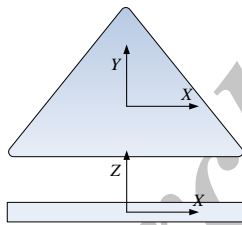


شکل ۳ شماتیک لینک دو درجه آزادی با ساختار موازی

جدول ۱ پارامترهای هندسی بازو بر حسب میلی‌متر

وَعَق	قَعَق	ع	ع
۱۵۰	۱۰۰	۷۰	۱۰۰

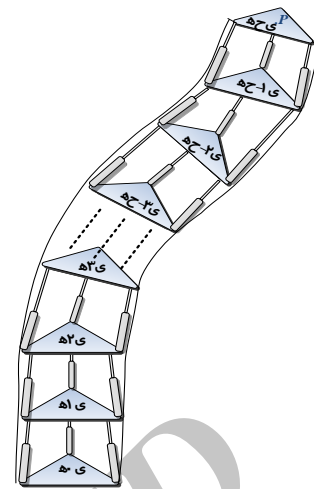
با در نظر گرفتن دستگاه مختصات مطابق شکل ۴ بر روی صفحه پایینی، مختصات نقاط روی صفحات ثابت و متحرک را می‌توان به صورت روابط (۳) و (۴) نوشت.



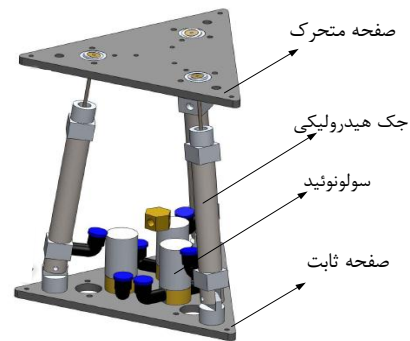
شکل ۴ سیستم مختصات متصل به صفحه پایینی

$$P_1 = \begin{bmatrix} x_1 = \frac{-a_1}{2} \\ y_1 = \frac{-\sqrt{3}}{6} a_1 \\ z_1 = 0 \end{bmatrix}, \quad P_2 = \begin{bmatrix} x_1 = \frac{a_1}{2} \\ y_1 = \frac{-\sqrt{3}}{6} a_1 \\ z_2 = 0 \end{bmatrix},$$

$$P_r = \begin{bmatrix} x_r = 0 \\ y_r = \frac{\sqrt{3}}{3} a_1 \\ z_r = 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$



شکل ۱ شماتیک بازوی N لینکی کابلی



شکل ۲ شماتیک یک لینک به همراه سولونوئیدها و اتصالات

با متصل کردن لینک‌ها به یکدیگر و تشکیل بازو، در هر لحظه، تمامی لینک‌ها به جز یکی از آن‌ها قفل شده و سپس با تغییر طول کابل تغییرات لازم در اندازه پایه آن لینک به وجود آمده و بدین ترتیب می‌توان با هر ترتیب دلخواهی مفاصل‌ها را آزاد و یا قفل کرد و با کشش سه کابل هر شکل دلخواهی را به بازو داد.

### ۲-۲- معادلات سینماتیک مستقیم

برای حل معادلات سینماتیکی کل بازو، ابتدا معادلات مربوط به یک لینک بازو را نوشته و سپس، با استفاده از ماتریس‌های نگاشت، معادلات را برای تمام نقاط بازو می‌نویسیم.

با توجه به شکل ۳ زاویه جک‌ها با صفحه پایینی  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  طول جک‌ها  $l_1, l_2, l_3$ ، طول ضلع مثلث متساوی‌الاضلاع پایینی  $a_1$  و طول ضلع مثلث متساوی‌الاضلاع بالایی  $a_2$  می‌باشد.

اگر  ${}^N P$  موقعیت مجری نهایی بازو در دستگاه مختصات شماره  $N$  باشد، داریم:

$${}^N P = {}^1 T_2 {}^2 T_3 \dots {}^{N-1} T_N {}^N P \quad (7)$$

در معادله (7) ماتریس  ${}^A T_B$  ماتریسی است که موقعیت و جهت دستگاه مختصات  $A$  نسبت به دستگاه مختصات  $B$  را بیان می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$${}^A T_B = \begin{bmatrix} {}^A R_B & {}^A P_{Borg} \\ \text{فریم} & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در آن  ${}^A R_B$  ماتریس دوران دستگاه  $B$  نسبت به دستگاه  $A$  و  ${}^A P_{Borg}$  مختصات مبدا دستگاه  $B$  نسبت به دستگاه  $A$  می‌باشد. ستون‌های ماتریس  ${}^A R_B$  به عبارتی مختصات بردارهای یکه دستگاه  $B$  در دستگاه  $A$  هستند. بنابراین داریم:

$${}^A R_B = [R_1 \quad R_2 \quad R_3]$$

$$R_1 = \frac{(P'_2 - P'_1)}{|P'_2 - P'_1|}, \quad R_2 = \frac{(P'_3 - P'_1)}{|P'_3 - P'_1|}, \quad R_3 = R_1 \times R_2$$

$${}^A P_{Borg} = \left[ \frac{P'_1 + P'_2 + P'_3}{3} \right] \quad (9)$$

به این ترتیب می‌توان با داشتن طول تمام پایه‌ها، مختصات تمام نقاط بازو را نسبت به دستگاه مختصات اصلی متصل به کف بازو به‌دست آورد یا به عبارتی سینماتیک مستقیم بازو را حل کرد. در بخش بعدی نحوه مدل‌سازی سینماتیک مستقیم یک لینک با استفاده از شبکه عصبی توضیح خواهد شد.

### ۲-۳- مدل‌سازی سینماتیک با شبکه عصبی

بسیاری از سیستم‌های پیچیده را می‌توان با استفاده از شبکه‌های عصبی و با دادن داده‌های ورودی و خروجی سیستم مدل‌سازی کرد. در شبکه‌های عصبی، بدون نیاز به معادلات داخلی سیستم می‌توان سیستم را با دقت بالایی مدل کرد. استفاده از شبکه‌های عصبی علاوه بر ساده‌کردن مدل‌سازی، باعث افزایش سرعت محاسبات شده و امکان انجام محاسبات به صورت آنلاین را فراهم می‌کنند.

با توجه به اینکه برای حل سینماتیک معکوس بازوی افزونه کابلی به روش بهینه‌سازی روابط سینماتیک مستقیم بارها و بارها فراخوانی شده و از طرفی روابط نهایی سینماتیک مستقیم

$$P'_1 = \begin{bmatrix} x'_1 = \frac{-a_1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} l_1 \cos \theta_1 \\ y'_1 = \frac{-\sqrt{3}}{6} a_1 + \frac{1}{2} l_1 \sin \theta_1 \\ z'_1 = l_1 \end{bmatrix}$$

$$P'_2 = \begin{bmatrix} x'_2 = \frac{a_1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} l_2 \cos \theta_2 \\ y'_2 = \frac{-\sqrt{3}}{6} a_1 + \frac{1}{2} l_2 \sin \theta_2 \\ z'_2 = l_2 \end{bmatrix}$$

$$P'_3 = \begin{bmatrix} x'_3 = 0 \\ y'_3 = \frac{\sqrt{3}}{3} a_2 - l_3 \cos \theta_3 \\ z'_3 = l_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

با توجه به اینکه فاصله نقاط صفحه بالایی از هم  $a_2$  است، داریم:

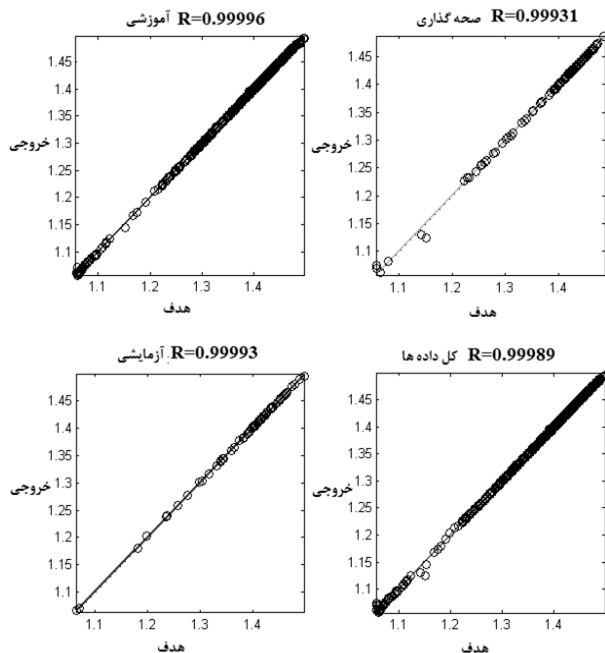
$$\begin{aligned} (x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2 + (z'_1 - z'_2)^2 &= a_1^2 \\ (x'_1 - x'_3)^2 + (y'_1 - y'_3)^2 + (z'_1 - z'_3)^2 &= a_2^2 \\ (x'_2 - x'_3)^2 + (y'_2 - y'_3)^2 + (z'_2 - z'_3)^2 &= a_2^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$a_1^2 - \sqrt{3} a_1 l_1 \cos \theta_1 - \sqrt{3} a_1 l_2 \cos \theta_2 + l_1 l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + l_1^2 - 2 l_1 l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + l_2^2 = a_1^2$$

$$a_1^2 - \sqrt{3} a_1 l_1 \cos \theta_1 - \sqrt{3} a_1 l_3 \cos \theta_3 + l_1 l_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 + l_1^2 - 2 l_1 l_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 + l_3^2 = a_1^2$$

$$a_2^2 - \sqrt{3} a_2 l_2 \cos \theta_2 - \sqrt{3} a_2 l_3 \cos \theta_3 + l_2 l_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + l_2^2 - 2 l_2 l_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + l_3^2 = a_2^2 \quad (6)$$

حال چنانچه طول‌های  $l_1, l_2, l_3$  معلوم باشند، می‌توان معادلات (6) را حل کرد و مقادیر  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  را به‌دست آورد. برای حل معادلات (6) باید از روش‌های حل عددی معادلات غیرخطی استفاده کرد. با داشتن طول جک‌ها و زوایا و با استفاده از ماتریس‌های انتقال می‌توان مختصات هر نقطه از بازو را نسبت به دستگاه مختصات اصلی به‌دست آورد.



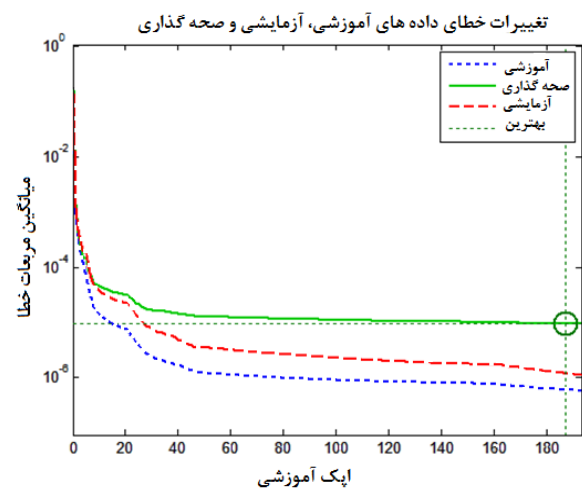
شکل ۶ نمودار همبستگی داده‌های آموزشی، آزمایشی، صحنه‌گذاری و کل داده‌ها

برای اثبات عملکرد صحیح مدل در یک بازوی ۶ لینکی، ۲۰۰ جفت داده تصادفی به شبکه عصبی داده شده است. در هر یک از این جفت داده‌ها، طول پایه‌های تمام لینک‌های بازو وجود دارد. به عبارت دیگر مقادیر  $l_1, l_2, l_3$  هر ۶ لینک در یک جفت داده قرار داده شده است. با اعمال ورودی‌ها به شبکه عصبی، زوایای  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  برای هر لینک به دست آمده و سپس با استفاده از رابطه (۷) مختصات مجری نهایی بازو محاسبه شده است. جدول ۲ میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۴</sup> را برای این ۲۰۰ جفت داده آزمایشی نشان می‌دهد. واحد میانگین مربعات خطا میلی‌متر مربع و واحد ریشه میانگین مربعات خطا میلی‌متر می‌باشد. با توجه به پارامترهای هندسی بازو که در جدول ۱ ذکر شده است، طول عمودی یک بازوی ۶ لینکی حدود ۷۴۰ میلی‌متر خواهد شد و ریشه میانگین مربعات خطای آن زیر ۲/۵ میلی‌متر بوده و در این تحقیق قابل قبول در نظر گرفته شده است. هر چند با افزایش تعداد داده‌های آموزشی به همراه تعداد نرون‌های شبکه و تعداد لایه‌های آن می‌توان خطا را کاهش داد. بدیهی است که با پیچیده‌تر کردن شبکه و افزایش داده‌های آموزش می‌توان

بازو به سه معادله جبری غیرخطی منجر می‌شود، سرعت محاسبات بسیار کند می‌شود. به همین دلیل، سینماتیک مستقیم (رابطه (۶)) را به یک شبکه عصبی آموزش می‌دهیم تا سرعت اجرای بهینه‌سازی افزایش یابد.

## ۲-۴- آموزش شبکه عصبی

برای مدلسازی سینماتیک مستقیم، از یک شبکه عصبی دولایه‌ای استفاده شده است. با توجه به پیچیدگی مسئله، تعداد نرون‌های لایه مخفی برابر ۲۰ انتخاب شده است. برای آموزش شبکه از ۴۰۰ جفت داده ورودی-خروجی استفاده شده است. سه ورودی شبکه عبارت‌اند از  $l_1, l_2, l_3$  و سه خروجی شبکه  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  می‌باشند. بعد از ۱۸۷ دوره آموزشی<sup>۱</sup> خطای داده‌های صحنه‌گذاری شروع به افزایش کرده<sup>۲</sup> و آموزش به پایان رسیده است. میانگین مربعات خطای<sup>۳</sup> داده‌های صحنه‌گذاری در بهترین حالت به  $10^{-6} \times 9/5045$  رسیده است. شکل ۵ تغییرات خطای داده‌های آموزشی، آزمایشی و صحنه‌گذاری را در تکرارهای مختلف نشان می‌دهد. نمودار همبستگی این داده‌ها در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. با توجه به این نمودار، همبستگی داده‌های آموزشی و غیر آموزشی به ترتیب برابر ۹۹/۹۶ درصد و ۹۹/۹۳ درصد می‌باشد. با به کار بردن این مدلسازی سرعت انجام محاسبات حدود ۱۲ برابر می‌شود.



شکل ۵ تغییرات خطای داده‌های آموزشی، آزمایشی و صحنه‌گذاری در تکرارهای مختلف آموزش شبکه عصبی

۱. عدد گپ
۲. کاهش خطای
۳. بزرگ شدن

ذره  $i$  ام برای تغییر موقعیت در یک جهت بخصوص را با  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) نشان می‌دهیم و آن را سرعت ذره می‌نامیم (در اینجا سرعت ذره مفهوم تغییرات موقعیت  $\Delta x$  را دارد). بهترین موقعیت تجربه‌شده توسط ذره  $i$  ام تا تکرار  $t$  را با  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$  نشان می‌دهیم و بهترین موقعیت تمامی ذرات تا تکرار  $t$  را  $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$  می‌نامیم. موقعیت ذره  $i$  ام در هر تکرار را می‌توان توسط رابطه زیر به‌روز کرد:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (10)$$

$$V_i(t+1) = wV_i(t) + b_1 r_1 (P_i - X_i(t)) + b_2 r_2 (P_g - X_i(t)) \quad (11)$$

که در آن  $i=1, 2, \dots, m$  و  $w$  ضریب اینرسی است و مقدار ثابتی در بازه  $ص$  می‌گیرد،  $b_1$  و  $b_2$  به ترتیب موسوم به ضریب یادگیری ادراکی و اجتماعی هستند و  $r_1$  و  $r_2$  اعداد اتفاقی تولیدشده در بازه  $ص$  می‌باشند. معیار پایان‌پذیری الگوریتم می‌تواند حداکثر تعداد تکرارها و یا رسیدن به مقدار مشخصی از ارزندگی برای  $P_g$  باشد [۲۰].

#### ۴- مسئله کمترین سوئیچ

##### ۴-۱- مقدمه

یکی از جذاب‌ترین توابع هدف در طراحی مسیر بازوی افزونه قفل‌شونده، طراحی مسیر با کمترین تعداد سوئیچ می‌باشد. کاهش تعداد سوئیچ‌ها باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود، زیرا در هر مرتبه باز و بسته‌شدن قفل یک لینک، سولونوئیدهای آن لینک مقداری انرژی الکتریکی مصرف می‌کنند. علاوه بر این، دقت حرکت نیز کاهش می‌یابد زیرا هر بار که قفل لینکی باز شود و قفل لینک دیگری بسته شود، راستای حرکت بازو عوض شده و به علت وجود لقی در مفاصل بازو دقت حرکت کاهش می‌یابد و مزیت سوم به‌کار بردن کمترین سوئیچینگ، کاهش ارتعاشات است. البته ارتعاشات دستگاه در تعداد زیاد سوئیچ اتفاق می‌افتد و در تعداد محدودتر چندان محتمل نمی‌باشد. در این بخش فرض بر این است که تعداد سوئیچ‌ها و مقدار مصرف انرژی با یکدیگر متناسب می‌باشند (که فرض منطقی می‌باشد). به همین علت یافتن کمترین تعداد سوئیچ و حل مسئله طراحی مسیر مربوط به آن متناظر حل مسئله مینیمم انرژی خواهد بود.

دقت شبکه را در تخمین سینماتیک مستقیم افزایش داد. البته در اینجا چون هدف معرفی الگوریتم و نحوه عملکرد آن است، جهت اجتناب از طولانی‌شدن زمان شبیه‌سازی‌ها، از بزرگ‌تر کردن شبکه خودداری شده است.

جدول ۲ میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطا برای ۲۰۰ جفت داده آزمایشی

مختصات	میانگین مربعات خطا	ریشه میانگین مربعات خطا
سد	۱/۰۶۶۱	۱/۰۳۲۵
ش	۳/۰۰۷۲	۱/۷۳۴۱
شد	۵/۹۱۸۱	۲/۴۳۲۷

### ۳- بهینه‌سازی پرواز پرندگان

#### ۳-۱- مقدمه

روش پرواز پرندگان<sup>۱</sup> یک الگوریتم بهینه‌سازی بر پایه جمعیت است [۱۸]. این روش در ابتدا توسط ابره‌ه‌ارت و کندی ابداع شد. بهینه‌سازی یک مسئله در این روش با تعدادی از پاسخ‌های اتفاقی آغاز شده و سپس، با تکرارهای پیاپی، پاسخ‌های بهینه در فضای جستجو کشف می‌شوند. در برخی سیستم‌ها، الگوریتم پرواز پرندگان بسیار هوشمندتر و سریع‌تر از الگوریتم‌های ژنتیک عمل می‌کند و پیاده‌سازی آن نیز ساده‌تر می‌باشد. توصیف جامع‌تر در مورد این الگوریتم را می‌توان در مراجع [۱۹] و [۱۸] یافت. در ادامه توصیف مختصری از الگوریتم پرواز پرندگان پیوسته داده خواهد شد.

#### ۳-۲- الگوریتم پرواز پرندگان پیوسته

فرض کنید یک فضای جستجوی  $D$  بعدی و یک دسته  $N$  تایی از ذرات در این فضا داشته باشیم (این ذرات همان پرندگان متعلق به گروه‌اند می‌باشند). بردار  $D$  بعدی به نام  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) نشان‌دهنده موقعیت ذره  $i$  ام است. هر درایه از بردار  $X_i$  یک متغیر بهینه‌سازی است و هر ذره می‌تواند یک پاسخ احتمالی برای مسئله بهینه‌سازی باشد. ارزندگی یا میزان بهینه‌بودن هر ذره را می‌توان با قراردادن موقعیت آن ذره در تابع هزینه به‌دست آورد. تمایل

#### ۱. حد‌خ

یک لینک به ارزندگی آن انتخاب بیفزاید. در کنار این تابع تشویقی، باید توابع جریمه دیگری نیز قرار داد تا قیود بهینه‌سازی همواره ارضا شوند.

از آنجایی که متغیرهای بهینه‌سازی همان طول پایه‌ها (جک‌ها) می‌باشند، در الگوریتم پرواز پرندگان ذرات را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$X_i = [l_1^1, l_2^1, \dots, l_N^1, l_1^2, l_2^2, \dots, l_N^2, \dots, l_1^N, l_2^N, \dots, l_N^N] \quad (12)$$

که در آن  $l_i^j$  طول پایه اول لینک  $i$  ام و  $l_j^i$  طول پایه دوم آن لینک می‌باشد. طول لینک سوم با استفاده از رابطه قیدی (۱) به دست می‌آید. همان‌طوری که اشاره شد، طول پایه‌ها دارای محدوده بیشینه و کمینه مطابق رابطه (۲) می‌باشند که در طراحی مسیر لحاظ شده‌اند.

برای ارضای این قیود در الگوریتم بهینه‌سازی پرواز پرندگان، سرعت ذره‌ای که از این قیدها تجاوز کرده را برابر صفر قرار می‌دهیم، با این کار تمایل ذره را به تغییر در این جهت از بین می‌بریم. به عبارت دیگر ترم سرعت را در تکرار بعدی حذف می‌کنیم تا تجاوز از آن قید انجام نشود. برای رسیدن به پاسخ مطلوب، علاوه بر صفرکردن سرعت‌ها در شرایط خروج از قیدهای تعریف شده، تکنیک دومی که به کار برده شده است گرد کردن طول پایه‌هاست. به این معنا که هر گاه طول پایه‌ها از  $l_{\text{min}}$  بیشتر شود، مقدار طول پایه را برابر  $l_{\text{min}}$  قرار می‌دهیم و هر گاه طولش از مقدار مینیمم کمتر شود، آن را برابر  $l_{\text{max}}$  می‌گذاریم.

توابع تشویقی به ازای ثابت ماندن طول پایه‌ها نسبت به حالت اولیه به صورت زیر در تابع هدف اعمال می‌شوند:

$$f_{\text{penalty}} = \sqrt{(X_B - X_{\text{final}})^2 + (Y_B - Y_{\text{final}})^2 + (Z_B - Z_{\text{final}})^2} - K \times C \quad (13)$$

که در آن  $(X_B, Y_B, Z_B)$  موقعیت نقطه مقصد است و  $(X_{\text{final}}, Y_{\text{final}}, Z_{\text{final}})$  موقعیت مجری نهایی در انتهای حرکت خود است. عدد  $K$  تعداد لینک‌هایی است که طول هر دو پایه آن‌ها نسبت به حالت اولیه (حالت عمودی بازو) ثابت مانده است. به عبارت دیگر، در طول حرکت از نقطه شروع به سمت نقطه انتهایی، هیچ نیازی به بازکردن قفل آن‌ها نیست. عدد  $C$  همان عدد تشویقی است که به این میزان از تابع هدف کاسته می‌شود. آنچه قابل توجه است اینکه در این تابع تشویقی، با دو

مسئله یافتن کمترین سوئیچ یک مسئله بهینه‌سازی است. خواسته مسئله این است که مجری نهایی بازو از یک نقطه مشخص شروع به حرکت کند و به نقطه مقصد از پیش تعیین شده برسد و در طی حرکت از حداقل تعداد سوئیچ استفاده کند. شایان ذکر است که در اینجا شکل مسیر حرکت دارای اهمیت نمی‌باشد و صرفاً شروع از یک نقطه و رسیدن به نقطه انتهایی مد نظر است.

برای حل این مسئله می‌توان روش زیر را به کار برد. ابتدا سینماتیک معکوس بازو را در نقطه شروع حرکت به دست آورده تا طول پایه‌های تمامی لینک‌ها مشخص شود، سپس سینماتیک معکوس بازو در نقطه مقصد را به گونه‌ای حل کرده که تنها طول پایه‌های (جک) چند لینک (حداقل لینک ممکن) متفاوت از وضعیت ابتدایی خود باشند. در این صورت حرکت از نقطه شروع به نقطه مقصد تنها با تغییر طول پایه‌های چند لینک به وقوع خواهد پیوست.

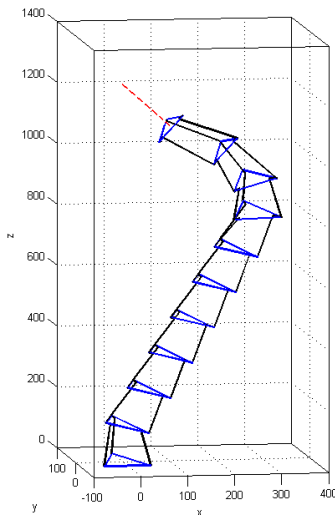
#### ۴-۲- طراحی مسیر کمترین سوئیچینگ

با توجه به توضیحات داده شده و با استفاده از روش بهینه‌سازی پرواز پرندگان به توضیح کامل روش به کار رفته، قیودات مسئله بهینه‌سازی و تکنیک‌های به کار رفته در بهینه‌سازی می‌پردازیم. همان‌طور که اشاره شد، طراحی مسیر با این تابع هزینه منوط به حل سینماتیک معکوس در نقطه ابتدایی و نقطه مقصد می‌باشد. برای سادگی می‌توان فرض کرد که بازو در شروع حرکت در وضعیت کاملاً عمودی قرار داشته باشد. یعنی طول تمامی پایه‌ها برابر میانگین مقدار حداکثر و حداقل خود باشند، به عبارتی  $l_{\text{nom}} = \frac{l_{\text{max}} + l_{\text{min}}}{2}$ . چنانچه این فرض را انجام ندهیم، باید در نقطه شروع حرکت، موقعیت مجری نهایی را دریافت کنیم و با حل سینماتیک معکوس، طول پایه‌ها را به دست آوریم که این مسئله محدودیتی را در روش ارائه شده در این بخش ایجاد نمی‌کند؛ زیرا حل سینماتیک معکوس به روش پرواز پرندگان به راحتی صورت می‌گیرد.

جهت یافتن حداقل سوئیچ‌ها با استفاده از روش بهینه‌سازی، باید سینماتیک معکوس را در نقطه‌ای انتهایی به گونه‌ای حل کرد که حتی‌الامکان اکثریت لینک‌ها بدون تغییر نسبت به وضعیت ابتدایی خود باقی بمانند. برای این کار باید تابع تشویقی‌ای تعریف شود که به ازای ثابت ماندن طول پایه‌های

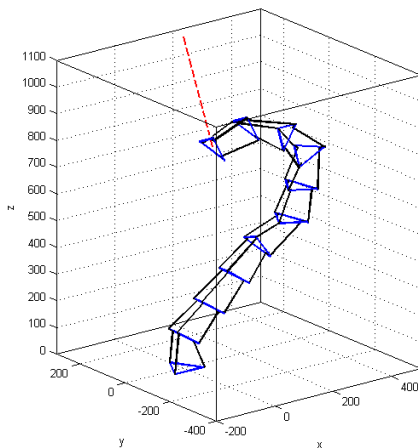


در شکل ۷ طراحی مسیر با کمترین سوئیچ برای نقطه هدف به مختصات (۱۱۰۰، ۰، ۱۰۰) نشان داده شده است. با اجرای الگوریتم بهینه‌سازی با ملاحظات ذکر شده در بخش‌های قبلی، این حرکت تنها با بازکردن قفل ۳ لینک انجام شده و باقی لینک‌ها در وضعیت ابتدایی خود مانده‌اند.



شکل ۷ وضعیت نهایی بازو در نقطه هدف (۱۱۰۰، ۰، ۱۰۰) با بازکردن قفل ۳ لینک

خط‌چین نشان داده شده در شکل خطی است که نقطه شروع حرکت را به نقطه هدف متصل می‌کند. شکل ۸ طراحی مسیر برای نقطه هدف (۸۰۰، ۰، ۱۰۰) را نشان می‌دهد. در این حرکت، تنها قفل ۶ لینک باز شده است.



شکل ۸ وضعیت نهایی بازو در نقطه هدف (۸۰۰، ۰، ۱۰۰) با بازکردن قفل ۶ لینک

برابر شدن تعداد لینک‌های ثابت، مقدار تشویق نیز دو برابر می‌شود، یعنی به صورت خطی عمل می‌کند در حالی که می‌توان توابع تشویقی را به شکل‌های دیگر نظیر گوسی، سیگموئیدی و یا نمایی نیز متصور شد.

از آنجایی الگوریتم پرواز پرندگان یک الگوریتم بهینه‌سازی بر مبنای اعداد اتفاقی می‌باشد، احتمال اینکه طول هر دو پایه

یک لینک دقیقاً برابر مقدار اولیه خود یعنی  $l_{nom} = \frac{l_{فصل} + l_{فصل}}{2}$

بماند بسیار کم خواهد بود. بنابراین، بعد از به‌روزرشدن ذرات در الگوریتم بهینه‌سازی، مقادیری که اختلاف اندکی با  $l_{nom}$  دارند را گرد می‌کنیم. این عملیات ریاضی را می‌توان به شکل زیر نشان داد:

$$\begin{aligned} \text{if } |l_1^i - l_{nom}| \leq \varepsilon, \text{ then } l_1^i &= l_{nom} \\ \text{if } |l_2^i - l_{nom}| \leq \varepsilon, \text{ then } l_2^i &= l_{nom} \end{aligned} \quad (13)$$

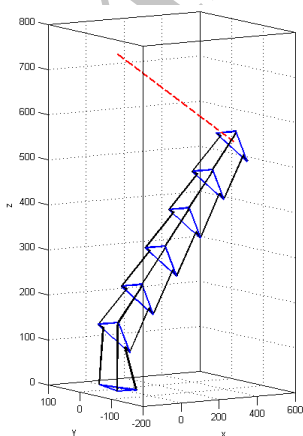
که در آن  $\varepsilon$  عدد مثبت دلخواه کوچکی است.

#### ۴-۳- شبیه‌سازی و نتایج

برای اجرای الگوریتم پرواز پرندگان، جمعیتی شامل ۳۰ ذره را انتخاب کرده و معیار پایان‌پذیری الگوریتم را رسیدن به حداکثر ۴۰ تکرار قرار می‌دهیم. ضرائب  $b_1$  و  $b_2$  در رابطه به‌روز رسانی (۱۱) برابر ۲ قرار داده شده و یک تابع کاهنده خطی برای ضریب سرعت  $w$  انتخاب شده است. مقادیر حداکثر و حداقل  $w$  به ترتیب با سعی و خطا برابر ۰/۹۵ و ۰/۵ قرار داده شده‌اند.

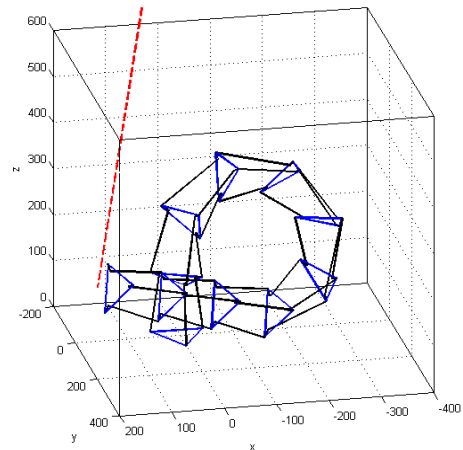
با توجه به اندازه پارمترهای هندسی بازو در جدول ۱، حداکثر سرعت ذرات برابر ۶ میلی‌متر انتخاب شده است. با این انتخاب، امکان تغییر بیش از ۶ میلی‌متر برای طول پایه‌ها در یک تکرار وجود نخواهد داشت. کاهش بیش از حد این پارامتر، کاهش سرعت بهینه‌سازی و افزایش بیش از حد آن واگراشدن الگوریتم را در پی خواهد داشت. مقدار  $\varepsilon$  در رابطه (۱۳) را برابر ۶ میلی‌متر و اندازه  $C$  را برابر ۵ انتخاب می‌کنیم. شایان ذکر است که در یافتن سینماتیک معکوس بازو دو خواسته مد نظر قرار گرفته شد؛ یکی رسیدن به نقطه  $B$  و دیگری افزایش تعداد لینک‌های بدون تغییر طول. حال اگر میزان تشویق ( $C$ ) افزایش داده شود، احتمال رسیدن به نقطه هدف ( $B$ ) کاهش می‌یابد پس باید با انتخاب صحیح میزان تشویق، همواره تعادلی بین این دو خواسته برقرار شود.

مطلق ارائه نمی‌دهند. از این رو در هر مسئله باید راه‌حلی ابتکاری برای صحت‌گذاری نتایج به‌دست آمده از این الگوریتم‌ها پیدا کرد. در طراحی مسیر کمترین سوئیچینگ برای صحت‌گذاری بر نتایج، طول پایه‌های تعداد معینی از لینک‌ها را به صورت اتفاقی تغییر می‌دهیم تا بازو در وضعیت مشخصی قرار گیرد. سپس موقعیت مجری نهایی بازو را ذخیره کرده و آن را به‌عنوان نقطه هدف به الگوریتم طراحی مسیر با مینیمم سوئیچ براساس پرواز پرندگان می‌دهیم تا مشخص شود که آیا این روش توانایی پیدا کردن لینک‌های آزاد شده و تغییر طول پایه‌های مربوط به آن را دارد یا خیر. اگرچه این آزمایش به طور قطع نمی‌تواند چیزی را ثابت کند، اما عملکرد کلی الگوریتم را نشان خواهد داد. این آزمایش برای چند نمونه متفاوت اجرا و نتایج بررسی شدند. در این آزمایش‌ها ترجیحاً قفل یک یا دو لینک باز شده است، زیرا باز کردن تعداد بیشتر احتمال وجود پاسخ‌های صحیح دیگر را افزایش می‌دهد. در اینجا یک نمونه از تست‌ها توضیح داده می‌شود. لینک ۱ را باز کرده و طول پایه‌های اول و دوم آن را به ترتیب برابر ۱۴۵ و ۱۰۰ میلی‌متر تغییر می‌دهیم. مجری نهایی به مختصات (۴۵۹، ۱۰۵/۹، -۴۳۱/۱) میلی‌متر می‌رسد. بعد از اجرای الگوریتم بهینه‌سازی با این نقطه هدف، بعد از ۴۰ تکرار، الگوریتم پاسخی را می‌یابد که طول پایه‌های لینک ۱ به ترتیب ۱۴۵/۰۳ و ۱۰۰ میلی‌متر است. با این طول پایه‌ها به فاصله ۰/۵۳ میلی‌متری نقطه هدف می‌رسیم که در محدوده دقت شبکه عصبی آموزش داده شده است. دیده می‌شود که الگوریتم توانسته با باز کردن یک لینک به نقطه مورد نظر برسد. شکل ۱۱ تصویر بازوی ۶ لینکی را در وضعیت نهایی نشان می‌دهد.

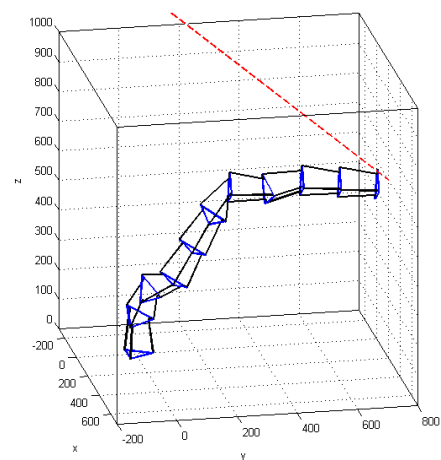


شکل ۱۱ وضعیت نهایی بازو زمانی که پایه‌های لینک ۱ برابر ۱۴۵ و ۱۰۰ میلی‌متر قرار داده شوند (آزمایش اول)

در شکل ۹ و ۱۰ طراحی مسیر کمترین سوئیچ برای رسیدن به نقاط (۲۰۰، ۲۰۰، ۲۰۰) و (۲۰۰، ۸۰۰، ۶۰۰) نشان داده شده‌اند. جابجایی بازو از نقطه شروع به سمت نقطه هدف با ۳ لینک بدون حرکت (قفل شده) انجام شده است.



شکل ۹ وضعیت نهایی بازو در نقطه هدف (۲۰۰، ۲۰۰، ۲۰۰) با باز کردن قفل ۴ لینک



شکل ۱۰ وضعیت نهایی بازو در نقطه هدف (۲۰۰، ۸۰۰، ۶۰۰) با باز کردن قفل ۶ لینک

#### ۴-۴- صحت‌گذاری بر نتایج

روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر حیات طبیعی<sup>۱</sup> عموماً اثبات ریاضی برای رسیدن به پاسخ بهینه مطلق ندارند. در روش‌هایی نظیر پرواز پرندگان، الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی مورچگان برخلاف روش آنیلینگ هیچ تضمینی مبنی بر رسیدن به پاسخ

#### مخبریه

فرض می‌کنیم تغییر شتاب در وسط بازه اتفاق افتاده باشد، یعنی نقطه تغییر شتاب برابر  $t_s = \frac{t_f}{2}$  باشد و سرعت حرکت در ابتدا و انتهای بازه برابر صفر باشد. بدین ترتیب برای بخش اول حرکت یک تابع درجه دوم به صورت زیر داریم:

$$q(t) = a_s + a_s t + a_s t^2$$

$$q(0) = q_s, \dot{q}(0) = 0, \dot{q}(t_s) = \alpha t_s$$

$$\rightarrow q(t) = q_s + \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (14)$$

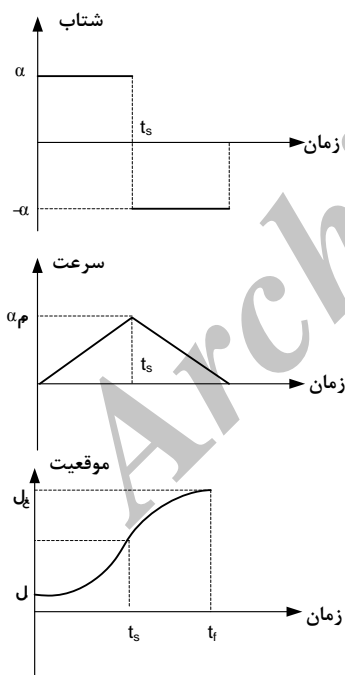
که در آن  $q$  مشخصه مفصل،  $t_f$  انتهای بازه زمانی و  $t_s$  وسط بازه زمانی است. معادله حرکت بخش دوم به صورت زیر خواهد شد:

$$q(t) = a_f + a_f t + a_f t^2$$

$$q(t_f) = q_f, \dot{q}(t_f) = 0, \dot{q}(t_s) = \alpha t_s$$

$$\rightarrow q(t) = q_f - \frac{1}{2} \alpha t_f^2 + \alpha t_f t - \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (15)$$

نمودار تغییرات شتاب، سرعت و موقعیت هر مفصل در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲ نمودار تغییرات شتاب، سرعت و موقعیت هر مفصل برای حرکت بهینه زمانی

حال اگر در معادله اول  $q(t_s) = \frac{q_s + q_f}{2}$  را قرار دهیم، داریم:

$$t_f = \sqrt{\frac{2(q_f - q_s)}{\alpha}} \quad (16)$$

در تست دوم، قفل لینک‌های ۱ و ۲ باز شده و طول پایه‌های آن مطابق ردیف دوم جدول ۳ تنظیم شده است و در تست سوم تنها قفل لینک سوم باز شده است. در ستون آخر جدول دقت رسیدن به نقطه هدف با استفاده از الگوریتم ارائه‌شده نشان داده شده است.

جدول ۳ اطلاعات مربوط به تغییر طول پایه‌ها در آزمایش‌های سه‌گانه

آزمایش‌ها	$l_1$	$l_2$	قفل اول	$l_3$	قفل دوم	دقت
مقادیر آزمایشی	۱۴۵	۱۰۰	۱	ندارد	ندارد	۰/۵۳
نتایج	۱۴۵/۱	۱۰۰				
مقادیر آزمایشی	۱۲۴/۶	۱۲۶/۹	۱	۱۳۳	۱۴۸/۱	۴/۱۸
نتایج	۱۱۸/۸	۱۳۳/۴		۱۳۳	۱۵۰	
مقادیر آزمایشی	۱۱۴/۸	۱۱۳/۶	۳	ندارد	ندارد	۰/۰۶
نتایج	۱۱۴/۸	۱۱۳/۶				

## ۵- مسئله کمترین زمان

### ۵-۱- مقدمه

به طور کلی یافتن مسیر بهینه زمانی از آن جهت دارای اهمیت است که در بسیاری از ربات‌های صنعتی جهت افزایش بهره‌وری باید وظایف مختلفی در کمترین زمان توسط ربات صورت پذیرد. به طور خاص در بازوی مارگون کابلی قفل‌شونده، طراحی مسیر کمترین زمان یکی از زمینه‌های جالب در طراحی مسیر می‌باشد. طراحی مسیر بهینه زمانی می‌تواند با لحاظ کردن دینامیک مسئله و یا بدون آن صورت پذیرد. در این مقاله طراحی مسیر سینماتیکی بازو مد نظر می‌باشد.

برای داشتن حرکت کمینه زمانی می‌توان از تئوری بنگ-بنگ<sup>۱</sup> استفاده کرد [۲۱]. بر اساس این تئوری، کمترین زمان حرکت وقتی حاصل می‌شود که عملگرها همواره در حد اشباع شتاب خود عمل کنند. بدون پرداختن به اثبات این موضوع به طراحی مسیر بر این اساس می‌پردازیم.

بر اساس این تئوری حرکت هر مفصل در بازه زمانی  $t_f$  من و به دو بخش تقسیم می‌شود که حرکت مفصل در بخش اول با شتاب  $+a$  و در بخش دوم با شتاب  $-a$  حرکت داده می‌شود.

### ۱۰- جمع‌وجمع

اگر بخواهیم طول پایه ۱ کاهش و طول پایه ۲ افزایش یابد (ردیف دوم جدول ۴)، ابتدا سولونوئید ۱ و ۳ را باز کرده و با کشیدن کابل ۱ و آزاد کردن کابل ۳ طول مورد نظر را در پایه ۱ ایجاد می‌کنیم. سپس سولونوئید ۲ و ۳ را باز می‌کنیم و با کشش کابل ۳ و آزاد کردن کابل ۲ به نقطه مورد نظر می‌رسیم. جدول ۴ نحوه باز و بسته کردن سولونوئیدها و کشش کابل‌ها را نشان می‌دهد. علامت  $\checkmark$  نشان‌دهنده بازبودن یک سوئیچ و علامت  $\times$  بسته بودن آن سوئیچ را نشان می‌دهد.

#### ۵-۲- طراحی مسیر بهینه زمانی

همان‌طور که قبلاً نیز توضیح داده شده است، یافتن مسیر بهینه زمانی منوط به حل سینماتیک معکوس بازو در نقطه انتهایی مسیر می‌باشد. با به کار بردن روش بهینه‌سازی پرواز پرندگان و لحاظ کردن رابطه (۱۷)، مسیر بهینه زمانی را پیدا می‌کنیم. تابع هزینه مسئله از دو بخش تشکیل یافته است. به عبارت دیگر طراحی مسیر بهینه زمانی منجر به یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه شده است. این تابع هدف در رابطه زیر آمده است:

$$f_{\text{عز}} = \sqrt{(X_B - X_{\text{مقصد}})^2 + (Y_B - Y_{\text{مقصد}})^2 + (Z_B - Z_{\text{مقصد}})^2} \quad (18)$$

$$f_{\text{عزم}} = c \times f_{\text{عز}} + (1 - c) \times f_{\text{عزم}}$$

بخش اول تابع هدف، فاصله مجری نهایی بازو را از نقطه انتهایی مطلوب مشخص می‌کند. شایان ذکر است که نقطه شروع حرکت بازو به طور پیش‌فرض و به صورت کاملاً عمودی فرض شده است. بخش دوم تابع هدف مربوط به زمان حرکت می‌شود. تابع  $f_{\text{time}}$  در رابطه (۱۷) آمده است و توضیحات مربوط به آن در قسمت قبل داده شده است.

ذرات را می‌توان مشابه با بخش قبل و مطابق رابطه (۱۲) تعریف کرد. قیدهای مسئله نیز شامل محدوده تغییرات طول پایه‌ها و رابطه قیدی بین طول پایه‌ها می‌باشد که به ترتیب مطابق رابطه (۲) و رابطه (۱) تعریف می‌شوند. مجدداً تأکید می‌شود که در طراحی مسیر بهینه زمانی نیز تعداد  $N$  سوئیچ غیر تکراری را برای یک بازو  $N$  لینکی در نظر می‌گیریم.

#### ۵-۳- نتایج طراحی مسیر بهینه زمانی

بهینه‌سازی این مسئله با استفاده از روش پرواز پرندگان و با استفاده از ۴۰ ذره انجام شده است. نتایج بهینه‌سازی برای یک

براساس این معادله این طور می‌توان استدلال کرد که برای کم کردن زمان حرکت باید اندازه  $q_f - q$  را حداقل کرد، زیرا  $\alpha$  در طراحی سینماتیکی مقداری ثابت است که بسته به مشخصات موتور باید تعیین شود. در بازوی مارگون کابلی، مشخصه هر مفصل ( $q$ ) و طول پایه‌ها ( $l_1$  و  $l_2$ ) می‌باشد. بنابراین اگر یک بازو  $N$  لینکی ( $2N$  درجه آزادی) را در نظر بگیریم و بخواهیم حرکت بازو از نقطه شروع به نقطه هدف، تنها با باز و بسته کردن  $N$  لینک بدون تکرار و در کمترین زمان انجام شود، آنگاه باید مجموع قدر مطلق تغییرات طول پایه‌ها حداقل شود؛ به عبارت دیگر تابع تبدیل زیر باید مینیمم شود.

$$f_{\text{time}} = \sum_{i=1}^N (|\Delta l_1^i| + |\Delta l_2^i|)$$

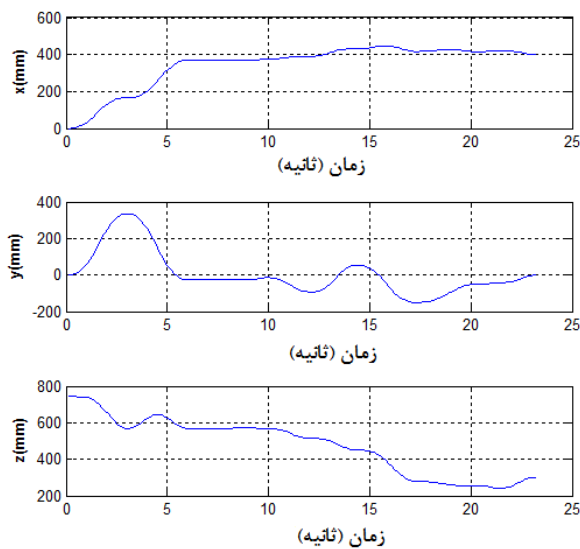
$$\Delta l_1^i = l_{1\text{final}}^i - l_{1\text{start}}^i, \quad \Delta l_2^i = l_{2\text{final}}^i - l_{2\text{start}}^i \quad (17)$$

که در آن  $\Delta l_1^i$  تغییر طول پایه اول لینک  $i$  ام و  $\Delta l_2^i$  تغییر طول پایه دوم آن لینک است. علت اینکه تغییر طول دو پایه را با هم جمع می‌کنیم آن است که به دلیل ویژگی‌های ساختاری بازو مورد نظر ممکن است تغییر طول پایه‌ها به طور همزمان انجام نشود. این موضوع به جهت تغییر طول پایه‌ها نیز بستگی دارد که در اینجا راجع به آن بحث می‌شود. همان‌طور که در بخش‌های گذشته نیز توضیح داده شده است، در هر لینک این بازو یک مکانیزم قفل هیدرولیکی وجود دارد. اگر برای ایجاد یک حرکت مشخص نیاز به کوتاه کردن طول پایه‌ها باشد، آنگاه با باز کردن هر سه سولونوئید و کشیدن کابل‌ها می‌توان به مطلوب دست یافت. ولی چنانچه لازم باشد طول پایه ۱ یا ۲ و یا هر دوی آن‌ها افزایش یابند، باید مطابق دستور زیر عمل کرد.

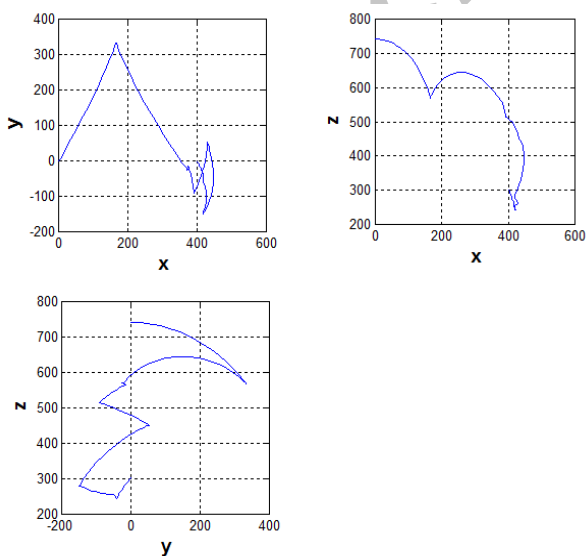
جدول ۴ نحوه باز و بسته کردن سولونوئیدها و کشش کابل‌ها برای حالت‌های مختلف

حرکت مطلوب پایه‌ها	سولونوئید ۱	سولونوئید ۲	سولونوئید ۳	کابل‌ها
پایه ۱	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$	کشش ۱
پایه ۲	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$	کشش ۲
پایه ۱	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$	کشش ۱
پایه ۲	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$	کشش ۳
پایه ۱	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$	کشش ۳
پایه ۲	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$	کشش ۲
پایه ۱	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$	کشش ۳
پایه ۲	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$	کشش ۳

ابتدا و انتهای بازه حرکتی هر لینک صفر می‌باشد. همچنین زمانی که یک لینک انتخاب می‌شود، ابتدا کابل‌های ۱ و ۳ تغییر داده می‌شود و سپس کابل‌های ۲ و ۳ کشیده می‌شوند و به همین علت حرکت بازو دارای ۱۲ بخش است که در ابتدا و انتهای هر کدام، سرعت صفر می‌شود. شکل ۱۷ به وضوح نحوه تغییر طول کابل‌ها را بر حسب زمان نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان مشاهده کرد که در برخی از بازه‌های زمانی طول یک کابل ثابت مانده است و این به دلیل قفل‌بودن سولونوئید مربوط به آن کابل در لینک مورد نظر است.

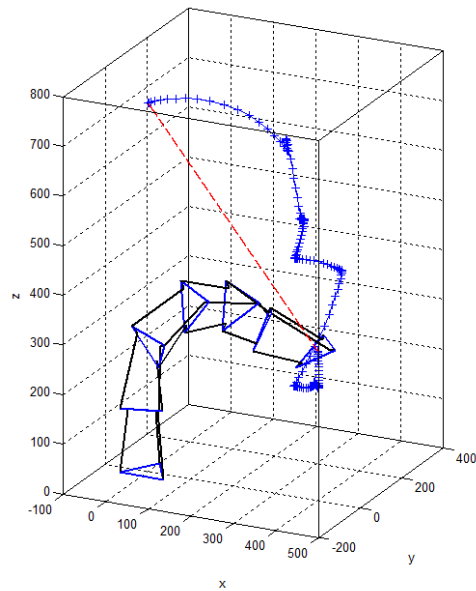


شکل ۱۴ تغییرات مختصه‌های  $x$  و  $y$  و  $z$  مجری نهایی بر حسب زمان



شکل ۱۵ مسیر حرکت مجری نهایی در صفحات  $xy$ ،  $xz$  و  $yz$

بازوی ۱۲ درجه آزادی بعد از ۳۰ تکرار گزارش شده‌اند. ضریب  $w$  و سایر پارامترها، مطابق آنچه در طراحی مسیر کمترین سوئیچینگ گفته شد، تنظیم شده‌اند. ضریب  $c$  در فرمول (۱۸) برای این نقطه هدف برابر  $0.8$  انتخاب شده است. شکل ۱۳ شماتیک بازو در حین حرکت از نقطه شروع به سمت نقطه هدف را نشان می‌دهد. منحنی ستاره‌ای مسیر حرکت بازو را برای ترتیب خاصی از باز و بسته‌کردن قفل‌ها نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که بعد از تعیین سینماتیک معکوس بازو در نقطه انتهایی، طول پایه‌های تمامی لینک‌ها به دست می‌آید. اگر این طول پایه‌ها طی ۶ سوئیچ به بازو اعمال شود، مستقل از ترتیب سوئیچ‌ها به نقطه هدف مورد نظر می‌رسیم.



شکل ۱۳ شماتیک بازو در وضعیت نهایی و مسیر حرکت بازو از نقطه شروع به سمت نقطه هدف  $(400, 0, 300)$

شکل ۱۴ نمودار تغییرات مختصه‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  مجری نهایی را بر حسب زمان نشان می‌دهند. شکل ۱۵ مسیر حرکت مجری نهایی در صفحات  $xy$ ،  $xz$  و  $yz$  را نشان می‌دهد. البته این منحنی با تغییر ترتیب سوئیچ‌ها تغییر خواهد کرد. شکل ۱۶ نمودار تغییرات سرعت مجری نهایی در راستاهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  بر حسب زمان را نشان می‌دهد. همان‌طوری که در این شکل مشاهده می‌شود، بعد از پایان هر بازه حرکتی، سرعت مجری نهایی صفر شده است. علت این امر آن است که پروفیل سرعت پایه‌ها مطابق شکل ۱۲ به صورت مثلثی می‌باشد و سرعت در

نمایش برتری یک روش نسبت به روش دیگر ارائه نشده‌اند، بلکه هدف این بوده که با نشان دادن نزدیکی پاسخ‌های به‌دست آمده از دو روش متفاوت، بر درستی آن‌ها صحت گذاشته شود.

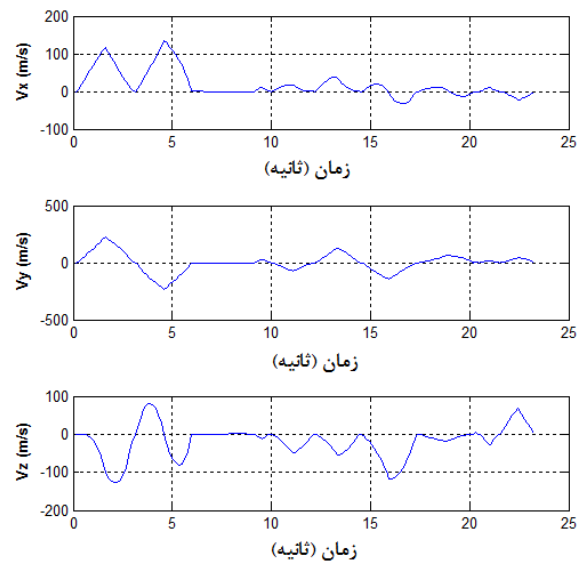
با توجه به اینکه تابع هزینه در رابطه (۱۸) متشکل از دو تابع هزینه می‌باشد، با انتخاب یک ضریب وزنی معین، در تکرارهای مختلف، مقادیر متفاوتی برای  $f_{time}$  و  $f_{end}$  به‌دست می‌آید. اساساً این دو تابع در تعارض با یکدیگرند و کاهش یکی منجر به افزایش دیگری می‌شود. با توجه به این توضیحات چنانچه در پاسخ‌های به‌دست آمده، مقدار  $f_{end}$  کمتر از ۵ میلی‌متر باشد (در مرتبه دقت شبکه عصبی آموزش داده شده، خطای کمتر از ۰/۵ درصد) آن پاسخ مورد قبول قرار گرفته شده است. با توضیحات ارائه شده می‌توان نتیجه دیگری را نیز به‌دست آورد. از آنجایی که محدوده‌ای از پاسخ‌ها مورد قبول قرار گرفته است، طبیعتاً نمی‌توان به هیچ کدام از پاسخ‌هایی که در محدوده قرار گرفته‌اند بهینه مطلق اطلاق کرد.

برای اجرای الگوریتم شبیه‌ساز انجماد از تابع انجماد بولتزمن استفاده شده است و دمای شروع برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شده است و معیار پایان الگوریتم رسیدن به یکی از دو عامل زیر می‌باشد.

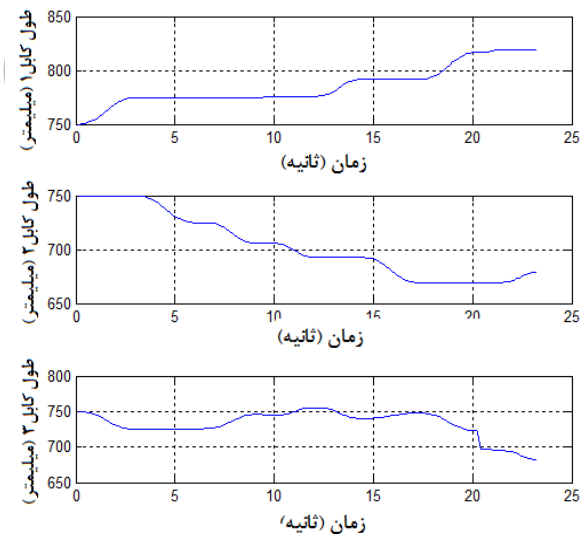
۱. رسیدن به حداکثر تکرار ۵۰۰۰
۲. باقی‌ماندن تغییرات تابع هدف در محدوده  $10^{-6}$  در طی ۵۰۰ تکرار

بعد از پایان الگوریتم شبیه‌ساز انجماد از روش بهینه‌سازی جستجوی مستقیم الگویابی<sup>۱</sup> استفاده شده است. با انجام این کار نتایج به‌دست آمده بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بهبود پیدا می‌کنند. استفاده از این روش ترکیبی در برخی مقالات [۱۰] دیده شده است. شکل ۱۸ نمودار تغییرات ارزندگی بهترین ذره را در حین بهینه‌سازی برای نقطه هدف (۳۰۰، ۰، ۴۰۰) نشان می‌دهد. در این اجرا، معیار دوم بعد از ۱۸۳۳ تکرار ارضا شده و الگوریتم متوقف شده است.

سه نقطه هدف مختلف برای آزمایش این الگوریتم در نظر گرفته شده است. جدول ۵ نتایج بهینه‌سازی برای این سه نقطه هدف را نشان می‌دهد. این نتایج بعد از ۵ تا ۱۰ بار اجرای الگوریتم‌ها و انتخاب بهترین پاسخ به‌دست آمده‌اند. همان‌طوری که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مقادیر  $f_{end}$  همگی کوچک‌تر



شکل ۱۶ تغییرات سرعت مجری نهایی در راستاهای ۰، ۹۰ و ۱۸۰ درحسب زمان



شکل ۱۷ تغییر طول کابل‌ها بر حسب زمان

#### ۴-۵- صحه‌گذاری بر نتایج

ممکن است این سوال مطرح شود که چه تضمینی وجود دارد که پاسخ‌های به‌دست آمده از نظر زمانی بهینه باشند. در پاسخ به این سوال می‌توان گفت که روش‌های بهینه‌سازی تکاملی تضمینی برای رسیدن به پاسخ بهینه ارائه نمی‌کنند. در این بخش برای اینکه نشان دهیم پاسخ‌های به‌دست آمده نزدیک به بهینه زمانی می‌باشند، نتایج چند نقطه هدف را با نتایج روش شبیه‌سازی انجماد طبیعی مقایسه می‌کنیم. این مقایسه برای

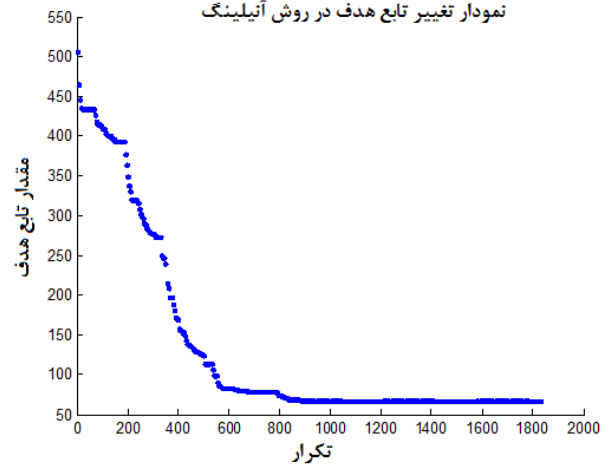
است. در بخش دوم به طراحی مسیر با هدف کمترین تعداد سوئیچ در حضور قیود سینماتیکی پرداخته شده است و با روش بهینه‌سازی پرواز پرندگان حداقل تعداد سوئیچینگ برای رسیدن به نقطه هدف یافت شده است. در بخش دوم طراحی مسیر کمینه زمانی انجام شده است. نتایج بهینه‌سازی با روش پرواز پرندگان در این بخش با نتایج حاصل از روش شبیه‌سازی انجماد طبیعی مقایسه شده است. بدین ترتیب صحت پاسخ‌های به‌دست آمده تأیید شده است.

## ۷- مراجع

۱. "طراحی مسیر با هدف کمینه‌کردن زمان و کمینه‌کردن سوئیچینگ"، *ASCE Journal of Aerospace Engineering*, ۲۰۱۱، ۲۰۱۱، ۶۵-۷۳.
۲. "طراحی مسیر با هدف کمینه‌کردن زمان و کمینه‌کردن سوئیچینگ"، *ASCE Journal of Aerospace Engineering*, ۲۰۱۱، ۲۰۱۱، ۶۵-۷۳.
۳. "طراحی مسیر با هدف کمینه‌کردن زمان و کمینه‌کردن سوئیچینگ"، *ASCE Journal of Aerospace Engineering*, ۲۰۱۱، ۲۰۱۱، ۶۵-۷۳.
۴. "طراحی مسیر با هدف کمینه‌کردن زمان و کمینه‌کردن سوئیچینگ"، *ASCE Journal of Aerospace Engineering*, ۲۰۱۱، ۲۰۱۱، ۶۵-۷۳.
۵. "طراحی مسیر با هدف کمینه‌کردن زمان و کمینه‌کردن سوئیچینگ"، *ASCE Journal of Aerospace Engineering*, ۲۰۱۱، ۲۰۱۱، ۶۵-۷۳.
۶. "طراحی مسیر با هدف کمینه‌کردن زمان و کمینه‌کردن سوئیچینگ"، *ASCE Journal of Aerospace Engineering*, ۲۰۱۱، ۲۰۱۱، ۶۵-۷۳.
۷. "طراحی مسیر با هدف کمینه‌کردن زمان و کمینه‌کردن سوئیچینگ"، *ASCE Journal of Aerospace Engineering*, ۲۰۱۱، ۲۰۱۱، ۶۵-۷۳.
۸. "طراحی مسیر با هدف کمینه‌کردن زمان و کمینه‌کردن سوئیچینگ"، *ASCE Journal of Aerospace Engineering*, ۲۰۱۱، ۲۰۱۱، ۶۵-۷۳.
۹. "طراحی مسیر با هدف کمینه‌کردن زمان و کمینه‌کردن سوئیچینگ"، *ASCE Journal of Aerospace Engineering*, ۲۰۱۱، ۲۰۱۱، ۶۵-۷۳.

از ۵ میلی‌متر و قابل قبول هستند، اما مقادیر  $f_{time}$  که نشان‌دهنده مجموع قدر مطلق تغییر طول پایه‌هاست اختلاف کمی در دو الگوریتم دارند. این اختلاف اندک نشان‌دهنده آن است که نتایج الگوریتم پرواز پرندگان نزدیک به پاسخ بهینه می‌باشند. از طرف دیگر، با مقایسه نتایج حاصل از دو الگوریتم و تعداد تکرارها می‌توان به توانایی و سرعت روش پرواز پرندگان پی برد.

نمودار تغییر تابع هدف در روش آبتیلینگ



شکل ۱۸ تغییرات ارزندگی بهترین ذره در حین بهینه‌سازی با روش شبیه‌ساز انجماد طبیعی برای نقطه هدف (۴۰۰، ۰، ۳۰۰)

جدول ۵ نتایج بهینه‌سازی برای سه نقطه هدف به روش پرواز پرندگان و شبیه‌سازی انجماد

توابع هدف/نقطه هدف		شبیه‌سازی انجماد			پرواز پرندگان		
$f_{end}$	$f_{time}$	$\frac{f_{end}}{f_{time}}$	$f_{end}$	$f_{time}$	$\frac{f_{end}}{f_{time}}$	$f_{end}$	$f_{time}$
۴/۳۴	۹۵/۶۰	۳۰	۰/۷۴	۱۰۱/۳۹	۳۵۶۴	(۰، ۴۰۰، ۰)	
۱/۴۵	۱۰۲/۷۵	۳۰	۱/۳۷	۱۱۱/۷۵	۱۴۲۰	(۱۰۰، ۰، ۵۲۰)	
۲/۱۲	۱۶۱/۳۱	۴۰	۲/۰۷	۱۵۷/۱۴	۱۸۳۳	(۴۰۰، ۰، ۳۰۰)	

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتم بهینه‌سازی پرواز پرندگان جهت طراحی مسیر یک بازوی افزونه به‌کار گرفته شده است. بازوی مارگون مورد مطالعه دارای سیستم قفل بوده و تاکنون تحقیقی در مورد طراحی مسیر این نوع از بازوها صورت نگرفته است. در بخش اول مقاله معادلات سینماتیکی بازو استخراج شده و سینماتیک مستقیم به یک شبکه عصبی آموزش داده شده

