

## طراحی مسیر بهینه حرکت سرومکانیزم هیدرولیکی سه درجه آزادی به کمک الگوریتم ژنتیک

فرشید آقاداتوودی<sup>\*۱</sup> شهرام لنجان نژادیان<sup>۲</sup>

\* نویسنده مسئول: [davoodi@iaukhsh.ac.ir](mailto:davoodi@iaukhsh.ac.ir)

### چکیده

هدف اصلی در این مقاله استفاده از روش بهینه‌سازی عددی الگوریتم ژنتیک در طراحی مسیر سرومکانیزم هیدرولیکی است. در این مقاله ابتدا پارامترهای هندسی یک مکانیزم سه درجه آزادی صفحه‌ای با سه جک هیدرولیکی تعریف و شناسایی شده‌اند. سپس معادلات حرکت آن مورد بررسی قرار گرفته‌اند و سیستم جکهای محرک هیدرولیکی که توسط شیرهای کنترلی کار می‌کند به مدل افزوده شده است. در ادامه با توجه به منطق الگوریتم ژنتیک، بر اساس معیار کمینه کردن مصرف انرژی هیدرولیکی، مسیرهای مختلف حرکتی برای حرکت بین دو نقطه نمونه تحلیل شده و مسیر بهینه به دست آمده است.

**واژه‌های کلیدی:** مکانیزم هیدرولیکی، طراحی مسیر، بهینه‌سازی مسیر، الگوریتم ژنتیک.

۱- مربی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

۲- استادیار، دانشگاه اصفهان

## ۱- مقدمه

استفاده از مکانیزمهای هیدرولیکی با درجه آزادی بالا یا افزونگی درجات آزادی برای جابه‌جایی قطعات در صنعت امری متداول است. مکانیزمهای عادی مانند جرثقیلهای ساده دارای تجهیزات هیدرولیکی ساده هستند و در آنها برای کنترل حرکت از شیرهای عادی<sup>۱</sup> استفاده می‌شود ولی در سیستمهای پیشرفته جدید مانند سیستمهای رباتیک از شیرهای کنترل هیدرولیکی مانند شیرهای تناسبی<sup>۲</sup> برای کنترل حرکت و نیرو استفاده می‌شود. به دلیل افزایش فضای کاری در این مکانیزمها از تعداد محرکهای زیاد استفاده می‌شود که در نقاط مختلف مکانیزم نصب شده‌اند. بنابراین برای حرکت بین دو نقطه مسیرهای متعدد حرکت قابل شناسایی است. یافتن مسیر بهینه حرکت مکانیزم به عنوان مسئله طراحی مسیر شناخته شده است. بهینه‌سازی این مسیر می‌تواند بر اساس معیارهای بهینه‌سازی مانند بهینه‌سازی انرژی مصرف شده یا حرکت در حداقل زمان صورت گیرد. واضح است که به دلیل پیچیدگیهای حاکم بر معادلات دینامیکی حرکت و اعمال شرایط سیستم هیدرولیکی استفاده از روابط تحلیلی ریاضی برای بهینه‌سازی حرکت به سادگی امکان پذیر نیست و از طرفی حل مسئله بهینه‌سازی از طریق تحلیلی هزینه‌های محاسباتی زیاد به همراه دارد.

یکی از روشهای بهینه‌سازی عددی که در دهه اخیر کاربرد فراوان یافته است. روش الگوریتم ژنتیک است که به دلیل سرعت استخراج جوابهای بهینه و توانایی حل مسائل مقید مورد توجه پژوهشگران قرار دارد [۱] و [۲]. الگوریتم ژنتیک از جمله تکنیکهای جستجوست که به وسیله اصل وراثت داروین عمل می‌کند [۱]. این روش با الهام از الگوی ژنتیکی طبیعت و نظریه تکامل انواع فرمولبندی شده است، ابتدا توسط هالند در سال ۱۹۷۵ در دانشگاه میشیگان امریکا معرفی شد و سپس توسط شاگردان او توسعه یافت و به دلیل موفقیت آن در شاخه‌های مختلف علوم و مهندسی امروزه کاربرد فراوان یافته است [۲].

امروزه الگوریتم ژنتیک به‌طور موفقیت آمیزی برای یافتن راه‌حلهای بهینه بسیاری از مسائل مهندسی مانند مکانیزمهای جسم صلب بکار گرفته شده است. با اینکه همگرایی الگوریتم ژنتیک تضمین شده نیست، اما در عمل بسیار کارآمد و قوی می‌باشد. به عنوان نمونه در رباتیک، اسماعیلی و عطاله برای طرح‌ریزی حرکت و تخمین پارامترهای سینماتیکی یک ربات سه درجه آزادی از روش الگوریتم ژنتیک استفاده کردند [۳]. در تحلیل آنها برای بهینه‌سازی ابعاد ربات علاوه بر روش الگوریتم ژنتیک از روش تحلیلی گرادیان و حداقل مربعات نیز کمک گرفته شده است. کلافیور و ایندردی از روش الگوریتم ژنتیک در کالیبراسیون دینامیکی و طراحی مسیر حرکت برای ربات اسکارا استفاده کردند [۴]. در تحلیل آنها برای یافتن مسیری که تحریک بهینه مفاصل صورت گرفته باشد از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده و نتایج تئوری به‌دست آمده با نتایج عملی در ربات دو درجه آزادی اسکارا مقایسه شده است. هو و یانگ روشی بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای طراحی مسیر بهینه یک ربات متحرک ارائه کردند [۵]. در روش آنها از جستجوهای ترکیبی همراه با روش الگوریتم ژنتیک برای یافتن مسیر بهینه کمک گرفته شده است. سوگی هارا و یوه از روش الگوریتم ژنتیک در طراحی مسیر یک ربات متحرک زیر آب در فضای سه بعدی استفاده کرده‌اند. طراحی مسیر بهینه آنها برای جلوگیری از برخورد ربات به موانع در حین عبور از مسیر حرکتی انجام شده است [۶]. مزیت روش آنها در مقابل سایر روشهای بهینه‌سازی، سازگاری آن با محیط بر اساس تغییر شرایط موانع است. همچنین سوگی هارا این روش را در طراحی مسیر یک ربات متحرک زمینی نیز به کار گرفته است [۷]. الشاملی و عبدالله از روش الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله طراحی مسیر دینامیکی رباتهای متحرک استفاده کرده‌اند [۸].

استفاده از الگوریتم ژنتیک در حل مسائل کنترل هیدرولیک در چند سال اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. به عنوان مثال پارک و لی از این روش در طراحی کنترلر فازی برای سیستم هیدرولیکی دارای شیر کنترل سرو استفاده کرده‌اند [۹]. همچنین از این روش برای

۱ - Conventional

۲ - Proportional

است. سپس با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک مسیره‌ای مختلف حرکتی برای حرکت مکانیزم استخراج شده و سعی شده است که مسیری یافت شود که مصرف انرژی هیدرولیکی آن حداقل باشد.

## ۲- معرفی مکانیزم

مکانیزم در نظر گرفته شده در این مقاله یک مکانیزم صفحه‌ای سه درجه آزادی با سه جک محرک است. با توجه به شکل مکانیزم در شکل (۱) جکها به صورت واسطه بین لینکها عمل می‌نمایند. حرکت هر یک جکها توسط شیر هیدرولیکی مجزا کنترل می‌شود. چون این مکانیزم دارای سه درجه آزادی در صفحه است یک مکانیزم با افزونگی درجه آزادی محسوب می‌شود. بنابراین برای حرکت بین دو نقطه در صفحه بینهایت مسیر حرکتی وجود دارد.

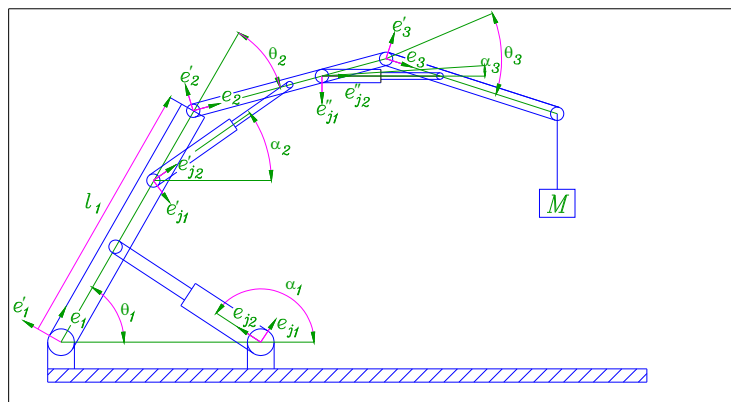
درجات آزادی اصلی سیستم یا متغیرهای تعمیم یافته با بردار  $q = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$  بیان می‌شود. مختصات زاویه‌ای نسبت به لینک قبلی تعریف شده‌اند. با توجه به محدودیتهای عملی حرکت مکانیزم و برای جلوگیری از وقوع حالت‌های منفرد در هنگام حرکت شبیه‌سازی حرکت قیود اعمال می‌شود:

$$q_i^{\min} \leq q_i(t) \leq q_i^{\max} \quad (1)$$

طراحی کنترلر برای یک سیستم الکتروپنوماتیک استفاده شده است [۱۰]. هاشی‌یاما و همکارش در طراحی کنترلر یک سیستم تعلیق فعال هیدرولیکی از روش الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. در مقاله آنها از این روش برای استخراج قوانین کنترلی با هدف پایداری و فرمان‌پذیری بهینه خودرو استفاده شده است [۱۱].

در این مقاله هدف استفاده از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مسیر حرکت یک مکانیزم سه درجه آزادی با محرکهای هیدرولیکی است. با توجه به مرور مطالعات انجام گرفته در مسئله طراحی مسیر رباتها، این مطالعات عمدتاً به رباتهای داری محرک با موتور برقی اختصاص دارد و رباتهای داری سیستم محرک هیدرولیکی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به گسترش کاربرد این رباتها در صنایع مختلف مانند رباتهای رنگپاش مسئله طراحی مسیر بهینه برای این رباتها اهمیت می‌یابد.

در این مقاله ابتدا مکانیزم معرفی شده و پارامترهای سینماتیک و فضای کار و فضای مفاصل مکانیزم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سپس به کمک روش لاگرانژ معادلات حرکت حاکم بر مکانیزم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در ادامه معادلات سیستم محرک هیدرولیکی به معادلات حرکت اضافه شده‌اند. با تعریف یک مسیر حرکتی و تعیین پارامترهای فضای مفاصل در هر لحظه حرکت، انرژی هیدرولیکی در هر لحظه از حرکت محاسبه شده



شکل (۱) شمای مکانیزم سه درجه آزادی

$$\begin{aligned}\bar{F}_1 &= f_1 \hat{e}_{j1} = f_1 (\cos \alpha_1 \hat{i} + \sin \alpha_1 \hat{j}) \\ \bar{F}_2 &= f_2 \hat{e}_{j2} = f_2 (\cos \alpha_2 \hat{i} + \sin \alpha_2 \hat{j})\end{aligned}\quad (3)$$

$\bar{F}_3 = f_3 \hat{e}_{j3} = f_3 (\cos \alpha_3 \hat{i} + \sin \alpha_3 \hat{j})$   
 که در روابط (۳) زاویه هر یک از جکها با امتداد دستگاه اینرسی و  $f_i$  اندازه نیروی هر جک است. پارامترهای طول هر جک یا  $l_{ji}$  و  $\alpha_i$  بر اساس روابط هندسی قیود که برای محل اتصال جکها نوشته می شوند، محاسبه می شوند:

$$\begin{aligned}a_{j1} \hat{e}_1 - l_{j2} \hat{e}_{j2} + k_{j1} \hat{i} &= 0 \\ a_{j2} \hat{e}_2 - l_{j2} \hat{e}_{j2} + k_{j2} \hat{e}_1 &= 0 \\ a_{j3} \hat{e}_3 - l_{j3} \hat{e}_{j3} + k_{j3} \hat{e}_2 &= 0\end{aligned}\quad (4)$$

روابط (۴) که به صورت برداری نوشته شده است در حقیقت شش معادله اسکالر است. به کمک این معادلات مقادیر طول هر یک از جکها و زوایای آنها با دستگاه اینرسی بر اساس مقادیر متغیرهای فضای مفاصل و ثابتهای هندسی مکانیزم استخراج می شوند.

### ۳- معادلات حرکت مکانیزم

در این مقاله برای بررسی حرکت مکانیزم پس از تعیین نقاط شروع و پایان حرکت، مسیر حرکت مشخص می شود و موقعیت های مختلفی برای عبور بار متصل به نقطه انتهایی مکانیزم بین این دو نقطه شروع و پایان مسیر، بر اساس پارامترهای فضای مفاصل، معرفی می شود. در ادامه با توجه به بردار فضای مفاصل در هر موقعیت و به کمک معادلات حرکت که به روش لاگرانژ استخراج شده اند، نیروی هر یک از جکها بر حسب موقعیت مکانیزم، سرعتها و شتابها محاسبه می شوند. برای استخراج معادلات حرکت از معادلات لاگرانژ به فرم زیر استفاده شده است:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \bar{r}_i = \sum_{k=1}^3 \bar{F}_k \cdot \frac{\partial \bar{r}_j}{\partial \dot{q}_i} \quad i=1,2,3 \quad (5)$$

$$L = T - V$$

مقادیر انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم به صورت زیر محاسبه شده است:

$$T = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} (m_i \bar{r}_i^T \bar{r}_i + I \dot{\theta}_i^2) + \frac{1}{2} (m_L \bar{r}_L^T \bar{r}_L) \quad (6)$$

فضای مفاصل با بردار  $q = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$  و فضای کار با بردار  $E = [x_E \ y_E]^T$  نشان داده می شود. بار اعمالی به مکانیزم به صورت یک بار متمرکز در انتهای لینک سوم مدل شده است و برای هر یک از لینکها جرم در نظر گرفته شده است. طول لینکها برابر  $(l_1, l_2, l_3)$  در نظر گرفته شده است. دستگاه مختصات اینرسی  $(\hat{i}, \hat{j}, \hat{k})$  در محل پایه مکانیزم در مفصل قرار داده شده است. دستگاههای مختصات متحرک متصل به هر لینک در محل مفاصلهای ابتدای هر لینک قرار گرفته اند. بردارهای یکه  $(\hat{i}, \hat{j}, \hat{k})$  برای دستگاه مختصات اینرسی و بردارهای یکه  $(\hat{e}_1, \hat{e}_2, \hat{e}_3)$  برای دستگاه متصل به لینک ۱، بردارهای یکه  $(\hat{e}_2, \hat{e}_3, \hat{e}_4)$  برای دستگاه متصل به لینک ۲ و بردارهای یکه  $(\hat{e}_3, \hat{e}_4, \hat{e}_5)$  برای دستگاه متصل به لینک ۳ در نظر گرفته شده است.

فاصله مختصات مرکز جرم لینکها نسبت به ابتدای لینک برابر  $(a_1, a_2, a_3)$  در نظر گرفته می شود. با توجه به شکل (۱) مقادیر  $(k_{j1}, k_{j2}, k_{j3})$  فاصله محل نصب سیلندر هر جک را از مبدا دستگاه مربوطه را نشان می دهند. همچنین  $(a_{j1}, a_{j2}, a_{j3})$  محل نصب دسته پیستون هر جک را از مبدا دستگاه مربوطه را نشان می دهند.

مختصات مرکز جرم لینکها و بار متمرکز به کمک بردارهای یکه مربوطه بیان می شوند:

$$\begin{aligned}\bar{r}_{load} &= \bar{r}_L = l_1 \hat{e}_1 + l_2 \hat{e}_2 + l_3 \hat{e}_3 \\ \bar{r}_1 &= a_1 \hat{e}_1 \\ \bar{r}_2 &= l_1 \hat{e}_1 + a_2 \hat{e}_2 \\ \bar{r}_3 &= l_1 \hat{e}_1 + l_2 \hat{e}_2 + a_3 \hat{e}_3\end{aligned}\quad (2)$$

روابط مربوط به ارتباط بردارهای یکه دستگاههای فرعی و دستگاه اینرسی به راحتی با ماتریس دوران بر حسب زاویه  $\alpha_i$  قابل بیان هستند که  $\alpha_i$  زاویه هر یک از جکها با امتداد دستگاه اینرسی  $(\hat{i}, \hat{j})$  است.

بردار نیروی جکهای مکانیزم با توجه به پارامترهای هندسی به صورت روابط (۳) بیان می شود:

روابط سرعت خطی جک و جریان الکتریکی به صورت زیر استخراج می‌شوند [۱۳]:

$$Q_1 = A_1 \dot{x} = ki' \sqrt{\Delta P_1} \quad (11)$$

$$Q_2 = A_2 \dot{x} = ki' \sqrt{\Delta P_2}$$

در روابط فوق مقادیر  $\Delta P_1, \Delta P_2$  در حالت رفت و برگشت پیستون جک عبارت‌اند از:

در هنگام باز شدن جک:

$$\begin{cases} \Delta P_1 = P_s - P_1 \\ \Delta P_2 = P_2 - P_t \end{cases}, \quad (\dot{x} > 0) \quad (12)$$

در بسته شدن جک:

$$\begin{cases} \Delta P_1 = P_1 - P_t \\ \Delta P_2 = P_s - P_2 \end{cases}, \quad (\dot{x} < 0) \quad (13)$$

در روابط فوق  $P_s, P_t$  به ترتیب نشان دهنده فشار تخلیه به تانک و فشار خط تغذیه می‌باشند. با توجه به ناچیز بودن جرم پیستون (در مقابل جرم کل مکانیزم و بار) و ناچیز بودن فشار تانک (در مقابل فشار کاری سیستم هیدرولیک) این دو کمیت در محاسبات صفر فرض می‌شود. به کمک روابط (۱۰) تا (۱۴) می‌توان فشار هیدرولیکی و دبی لازم را در هر لحظه باز شدن یا بسته شدن بر اساس نیرو و سرعت هر جک محاسبه نمود. اگر  $\dot{l}_{ji}$  اندازه سرعت جک  $i$  ام باشد خواهیم داشت:

در هنگام باز شدن جک:

$$\begin{cases} P_{vi} = \frac{f_i}{A_1}, \quad P_{vi} \cong 0 \\ Q_{vi} = A_1 \dot{l}_{ji} \end{cases} \quad (14)$$

در هنگام بسته شدن جک:

$$\begin{cases} P_{vi} = \frac{f_i}{A_2}, \quad P_{vi} \cong 0 \\ Q_{vi} = A_2 \dot{l}_{ji} \end{cases} \quad (15)$$

در هنگام حرکت مکانیزم سرعت باز شدن یا بسته شدن جک با توجه به شرایط قبلی و فعلی به صورت عددی محاسبه و در روابط بالا اعمال می‌گردد تا فشار و دبی لحظه‌ای سیستم هیدرولیک در هر یک از جکها محاسبه شوند. مقدار انرژی مصرفی سیستم هیدرولیک هنگام حرکت بین دو نقطه توسط رابطه زیر به صورت عددی محاسبه می‌شود.

$$V = m_L g y_E + \sum_{i=1}^3 (m_i g h_i) \quad (7)$$

در رابطه فوق  $m_i$  جرم هریک از لینکها،  $m_L$  جرم بار متصل به مکانیزم و  $h_i$  ارتفاع مرکز جرم هر یک از لینکها در حین حرکت است. از جرم جکها در مقابل جرم سایر اجزای مکانیزم صرف‌نظر شده است. سمت راست معادله لاگرانژ که ناشی از نیروهای ناپایستار جکهاست به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{r}_i = \sum_{k=1}^3 \bar{F}_k \cdot \frac{\partial \bar{r}_j}{\partial q_i} = \bar{F}_1 \frac{\partial \bar{r}_1}{\partial q_1} + \bar{F}_2 \frac{\partial \bar{r}_2}{\partial q_2} + \bar{F}_3 \frac{\partial \bar{r}_3}{\partial q_3} \quad (8)$$

که در این رابطه  $\bar{r}_j$  بردار محل اتصال هر یک از جکها به لینکها و  $\bar{F}_k$  بردار نیروی هر یک از جکهاست.

#### ۴- سیستم هیدرولیکی مکانیزم

سیستم هیدرولیکی مکانیزم از سه جک دوکاره<sup>۱</sup> تشکیل شده که توسط شیرهای تناسبی کنترل می‌شوند. استفاده از شیر تناسبی در این مکانیزم به دلیل ایجاد پیوستگی در حرکت عملگرها و به تبع آن ایجاد پیوستگی در حرکت بار متصل به مکانیزم است. همچنین استفاده از این نوع شیر امکان کنترل پیوسته حرکت جکها و مکانیزم را فراهم می‌کند. مدار هیدرولیکی ساده شده یک جک مکانیزم در شکل ۲ نشان داده شده است. در این نوع شیرها دبی سیال خروجی از شیر ( $Q$ ) تابعی از جریان الکتریکی اعمالی به شیر ( $i$ ) است [۱۲].

$$Q = ki' \sqrt{\Delta P}, \quad i' = \frac{i}{i_{\max}} \quad (9)$$

در رابطه فوق  $\Delta P$  افت فشار ناشی از شیر و  $k$  ضریب مشخصه رفتار خطی و  $i_{\max}$  حداکثر جریان الکتریکی مجاز ورودی به شیر است. معادله حرکت جک به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$P_1 A_1 - P_2 A_2 - f = m \ddot{x} \quad (10)$$

در معادله فوق  $P_1, P_2$  فشارهای دو طرف پیستون،  $f$  اندازه نیروی جک،  $A_1$  مساحت مقطع کامل سیلندر و  $A_2$  مساحت مقطع موثر سیلندر و  $m$  نماینده جرم پیستون است.

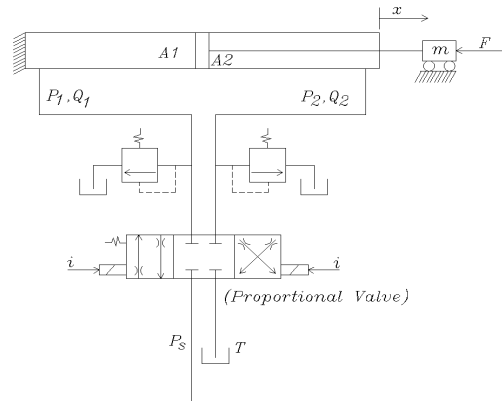
فضای مفاصل  $q_A = [\theta_1(t_0) \ \theta_2(t_0) \ \theta_3(t_0)]^T$  و پارامترهای فضای مفاصل برای رسیدن از A به B در بازه مشخصی تغییر خواهد کرد. در این حالت  $t = t_0$  زمان شروع حرکت و  $t = t_f$  پایان حرکت محسوب می‌شود. در این حالت پس از تقسیم زمان حرکت به بازه‌های مساوی، برای هر یک از زمانهای حرکت بردار فضای مفاصل  $q_i = [\theta_1(t) \ \theta_2(t) \ \theta_3(t)]^T$  اختصاص می‌یابد. مکانیزم پس از عبور از نقاط میانی که هر کدام دارای پارامترهای فضای مفاصل جدید هستند به نقطه انتهایی حرکت می‌رسد.

برای محاسبه انرژی در طول مسیر حرکت، مسئله دینامیک معکوس در هر موقعیت مربوط به بردار  $q_i = [\theta_1(t) \ \theta_2(t) \ \theta_3(t)]^T$  حل شده و انرژی با توجه به سرعت و شتاب مرحله قبل حرکت و موقعیت فعلی محاسبه می‌شود. بدین ترتیب انرژی در طول مسیر محاسبه خواهد شد. برای استفاده از الگوریتم ژنتیک برای مسئله طراحی مسیر ابتدا باید کروموزوم مربوط به افراد جمعیت تعریف شود. برای تعریف کروموزوم در این مسئله از کمیت‌های پیوسته استفاده شده است. اگر زمان حرکت بین دو نقطه یعنی فاصله  $t = t_0$  تا  $t = t_f$  به  $N+1$  قسمت مساوی تقسیم گردد برای تعیین مشخصات نقاط میانی حرکت در فضای مفاصل به  $N$  بردار پارامترهای مفاصل نیاز است. ژن‌ها که متغیرهای مسئله هستند به صورت مقدار زاویه درجات آزادی مکانیزم (پارامترهای فضای مفاصل) در هر لحظه در نظر گرفته می‌شوند. ترکیبی از این ژن‌ها برای ایجاد یک کروموزوم برای یک فرد به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود که مقادیر آن به صورت تصادفی بر اساس ماتریس زیر مانند شکل (۳) تولید خواهد شد:

$$q_i = \begin{bmatrix} \theta_1(t_1) & \theta_2(t_1) & \theta_3(t_1) \\ \theta_1(t_2) & \theta_2(t_2) & \theta_3(t_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ \theta_1(t_n) & \theta_2(t_n) & \theta_3(t_n) \end{bmatrix} \quad (17)$$

به کروموزوم فوق تعداد شش ژن که معرف موقعیت‌های اولیه و نهایی برای سه درجه آزادی هستند نیز اضافه می‌شود.

$$E_{Hydraulic} = \sum_{i=1}^3 \int_0^t P_i Q_i dt \quad (16)$$



شکل (۲) مدار هیدرولیکی ساده شده یک جک مکانیزم

### ۵- استفاده از الگوریتم ژنتیک در طراحی مسیر

مسئله طراحی مسیر در ربات‌های با افزونگی درجات آزادی مطرح است. به این معنی که برای حرکت سر ربات بین دو نقطه مشخص مسیرهای مختلفی قابل تعریف است. به بیان دیگر برای حرکت بین دو نقطه A و B در فضای کار می‌توان تاریخچه زمانی مختلفی را برای پارامترهای فضای مفاصل  $q_i(t) = [\theta_1(t) \ \theta_2(t) \ \theta_3(t)]^T$  به دست آورد. از بین بردارهای  $q_i(t)$  مختلف می‌توان بردارهایی را یافت که شرایط کاری مسئله را بهینه نمایند. این شرایط می‌تواند بهینه کردن زمان حرکت، مصرف انرژی یا به حداقل رساندن مقدار نیرو یا گشتاور محرکها باشد. در این بین قیودی نیز برای بهینه‌سازی مطرح است. مثلاً می‌توان دامنه حرکتی درجات آزادی یا متغیرهای فضای مفاصل را محدود نمود.

برای استفاده از الگوریتم ژنتیک برای مسئله طراحی مسیر مکانیزم هیدرولیکی ابتدا لازم است که دو نقطه آغاز و پایان حرکت مشخص گردد. فرض کنید مختصات نقاط آغاز و پایان حرکت با  $A = [x_{M1} \ y_{M1}]^T$  و  $B = [x_{M2} \ y_{M2}]^T$  مشخص شود. این نقاط مختصات ابتدا و انتهای مسیر حرکت بار متصل به انتهای لینک سوم مکانیزم می‌باشند.

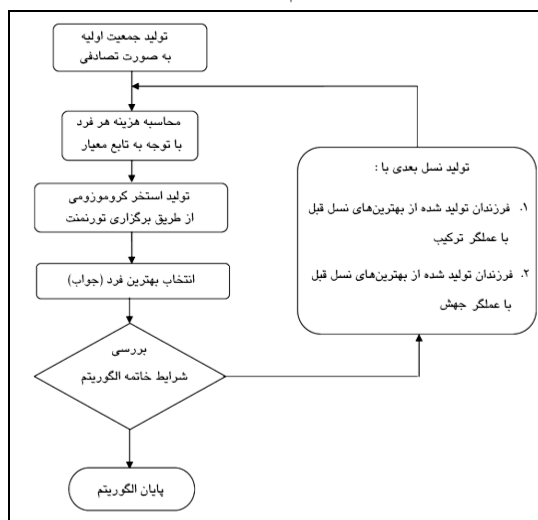
برای رسیدن به نقطه B از نقطه A بی نهایت مسیر حرکتی وجود دارد که با توجه به اینکه مکانیزم دارای افزونگی درجات آزادی است دستیابی به کلیه این نقاط ممکن است. به عبارت دیگر اگر معادل نقاط A و B در

کلیه کروموزومهای تولید شده به صورت برداری از اعداد حقیقی تعریف می‌شوند. در کروموزوم شکل فوق نیز هر یک از ژن‌ها توسط یک عدد حقیقی مقداردهی می‌شوند. روش کدگذاری با اعداد حقیقی این امکان را فراهم می‌کند تا متغیرها به صورت پیوسته مورد ارزیابی قرار گیرند در صورتی که با نمایش باینری متغیرها در فضای گسسته در الگوریتم ظاهر می‌شدند.

برای انتخاب جوابهای بهتر در هر جمعیت، تابعی معیار مورد نظر برای هر یک از جوابها محاسبه می‌شود. در این مسئله هدف کمینه کردن انرژی مصرفی است. لذا برای هر مسیر حرکت (کروموزوم) ابتدا نیروهای لازم برای هر جک طبق روش دینامیک معکوس به دست آمده و سپس با بهره‌گیری از اطلاعات هر جک شامل سطح مقطع مؤثر و سرعت، مقادیر فشار، دبی و انرژی هر جک محاسبه شده است. جوابها بر اساس میزان انرژی متناظرشان رتبه‌بندی شده و از بین آنها جوابهای برتر هر دسته در گروه برگزیده جای گرفته‌اند.

جرائم تعریف شده در الگوریتم ژنتیک با هدف اعمال توابع قید سیستم در نظر گرفته شد. این جرائم شامل موارد افزایش فشار به بیش از ۱۰۰ bar و پرهشهای بزرگ در نوسانات مربوط به دامنه تغییرات متغیرهای فضای مفاصل است.

برای حل مسئله الگوریتم ژنتیک برنامه‌ای به برنامه دینامیک معکوس مکانیزم در نرم‌افزار فرتن اضافه گردید. شکل (۴) مسیر کلی پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد.



شکل (۴) فلوچارت برنامه حرکت مکانیزم برای استخراج مسیر بهینه‌سازی شده.

که این ژن‌ها در کلیه کروموزومها ثابت‌اند. تعداد  $3 \times N$  ژن، معرف  $N$  موقعیت میانی برای هر کدام از درجات آزادی هستند. در واقع هر کروموزوم یک مسیر حرکت را بین موقعیت‌های اولیه و نهایی برای مکانیزم مشخص می‌کند.

$\theta_1(t_1)$	$\theta_1(t_2)$	$\theta_1(t_3)$	.....	$\theta_1(t_n)$
$\theta_2(t_1)$	$\theta_2(t_2)$	$\theta_2(t_3)$	.....	$\theta_2(t_n)$
$\theta_3(t_1)$	$\theta_3(t_2)$	$\theta_3(t_3)$	.....	$\theta_3(t_n)$

شکل (۳) نمایش یک کروموزوم

به این ترتیب هر کروموزوم، معرف یک مسیر حرکت در فضای مفصلی است که با دانستن آن می‌توان معادلات دینامیک حرکت را برای دستیابی به گشتاورهای تولید کننده این حرکت حل کرد. برای حفظ پیوستگی حرکت و جلوگیری از شتاب‌های ناگهانی، مسیر معرفی شده توسط هر کروموزوم در ابتدا با استفاده از برازش منحنی هموار شده [۱۴] و سپس گشتاورها و نیروهای متناظر با آن از طریق حل مسئله دینامیک معکوس به دست آمد.

در اینجا برای جلوگیری از ورود بردارهای فضای مفاصلی که نسبت به پاسخ اصلی مسئله خارج از دامنه حرکتی هستند شرطی اعمال می‌گردد بدین نحو که کلیه کروموزومهایی قابل قبول هستند که مقادیر پارامترهای فضای مفاصل آنها در دامنه مجاز بین نقطه آغاز و پایان حرکت باشد. یعنی شرط پذیرش و ورود کروموزومها در جمعیت آن است که شرایط زیر برقرار باشد:

$$\begin{aligned} \theta_1(t_0) < \theta_1(t_i) < \theta_1(t_f) \\ \theta_2(t_0) < \theta_2(t_i) < \theta_2(t_f) \\ \theta_3(t_0) < \theta_3(t_i) < \theta_3(t_f) \end{aligned} \quad (18)$$

در غیر این صورت کروموزوم تصادفی دیگری تولید خواهد شد و شرایط آن بررسی می‌گردد. همچنین کروموزوم دیگری که مانند کروموزوم اول با شرایط تصادفی طبق ماتریس زیر تولید می‌گردد به صورت زیر است:

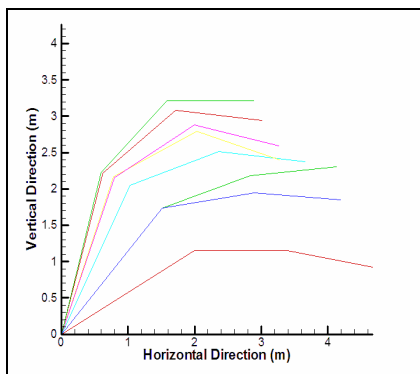
$$q_i = \begin{bmatrix} \theta'_1(t_1) & \theta'_2(t_1) & \theta'_3(t_1) \\ \theta'_1(t_2) & \theta'_2(t_2) & \theta'_3(t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \theta'_1(t_n) & \theta'_2(t_n) & \theta'_3(t_n) \end{bmatrix} \quad (19)$$

## ۶- نتایج عددی

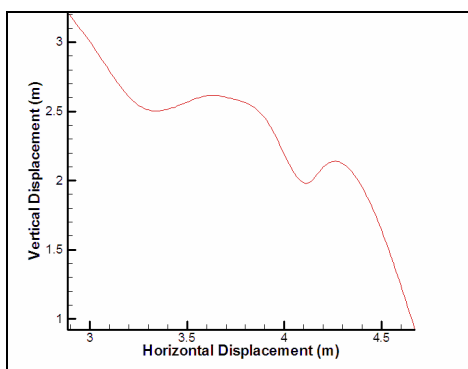
پیاده‌سازی کلیه مراحل فوق در زبان برنامه‌نویسی فترن انجام گرفت و کلیه قوانین مربوط به الگوریتم ژنتیک در برنامه گنجانده شد. استفاده از این زبان برنامه‌نویسی برای افزایش سرعت محاسبات و تولید نسل‌های بیشتر در مدت زمان کمتر است.

نتایج عددی حاصل از برنامه برای حرکت از  $(x,y) = (4/6, 0/75)$  به نقطه  $(x,y) = (2/75, 3)$  در شکل‌های (۵) تا (۸) ارائه شده است. مسیر بهینه پس از تولید ۴۰۰۰ نسل به دست آمده است. در این حل مسیر حرکت در طی زمان ۱۰ ثانیه برای حرکت از نقطه  $(x,y) = (4/6, 0/75)$  به نقطه  $(x,y) = (2/75, 3)$  به صورت شماتیک در طی مسیر در شکل (۵) نشان داده شده است. مکان هندسی حرکت بار انتهایی در شکل (۶) نشان داده شده است. برای حل، مسیر حرکت به ۲۰ نقطه تقسیم شده است که تعدادی از پیکره‌های مکانیزم در شکل (۵) نمایش داده شده است. تعداد جمعیت هر نسل برای حل مسئله ۵۰ در نظر گرفته شده است. این بدان معنی است که در هر نسل ۵۰ مسیر حرکت مختلف مورد بررسی و ارزشیابی قرار می‌گیرند. با توجه به حجم زیاد محاسبات (مربوط به معادلات حرکت و انرژی هیدرولیکی) برای ارزشیابی هر مسیر، با توجه به امکانات موجود کامپیوتری، عدد ۴۰۰۰ نسل برای دستیابی به همگرایی و جواب معقول پس از انجام سعی و خطاهای متعدد در نظر گرفته شده است. نتایج ارائه شده در این مقاله برای یک مکانیزم فرضی با مشخصات بالابر سبک صنعتی می‌باشد که ثابت‌های مهم مربوط به آن در این شبیه‌سازی در جدول (۱) آمده است.

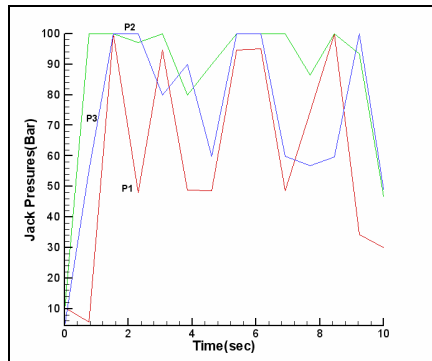
با توجه به حل انجام شده نمودار شکل (۷) تاریخچه فشار جکها را در حین حرکت در مسیر بهینه را نشان می‌دهد. در پاره‌ای از لحظات می‌توان اشباع شدن سیستم را در فشار ماکزیمم مشاهده کرد. نمودار شکل (۸) حاکی از همگرایی جواب مسئله و کاهش مقدار تابع هدف (ضریب امتیاز انرژی مصرف شده) در طی تولید نسل است. لازم به ذکر است با توجه به اعمال ضرایب جریمه در میزان انرژی اعلام شده در برنامه، این شکل ضریبی از انرژی مصرفی هیدرولیکی در طی مسیر را نشان می‌دهد.



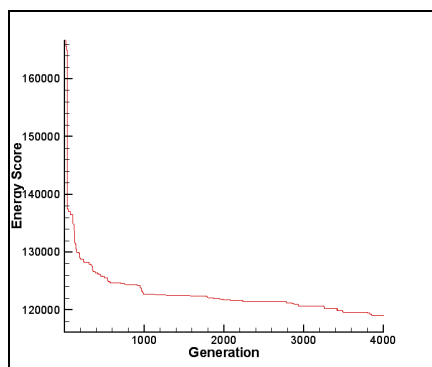
شکل (۵) چند نمونه پیکره مکانیزم در مسیر بهینه.



شکل (۶) مسیر حرکت بار انتهایی مکانیزم در مسیر بهینه.



شکل (۷) تاریخچه زمانی فشار جکها در طی حرکت بر مسیر.



شکل (۸) کاهش و همگرایی تابع ضریب انرژی در طی تولید نسل.



## مراجع

جدول (۱) ثابتهای مهم سیستم

$m_L = 170(kg)$	جرم بار
$l_1 = 1/4(m)$ $l_2 = 2/3(m)$ $l_3 = 1/46(m)$	طول لینکها
$l_{j1} = 0/5(m)$ $l_{j2} = 1(m)$ $l_{j3} = 0/8(m)$	محل اتصال جکها
$m_1 = 10(kg)$ $m_2 = 20(kg)$ $m_3 = 50(kg)$	جرم لینکها

- [۱] McCall J., Genetic algorithms for modeling and optimization, *Journal of computational and applied mathematics*, Vol. ۱۸۴, ۲۰۰۵, pp. ۲۰۵-۲۲۲.
- [۲] Holland J.H., *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan Press, ۱۹۷۵.
- [۳] Smaili A., Atallah N., A three-dof robomech: architecture, optimum synthesis and introduction to compliant robomechs, *Mechanism and machine theory*, Vol. ۴۰, ۲۰۰۵, pp. ۱۱۹۵-۱۲۰۶.
- [۴] Clafiore G., Indri M., Bona B., Robot dynamic calibration: optimal excitation trajectories and experimental parameter estimation, *Journal of robotic systems*, Vol. ۱۸(۲), ۲۰۰۱, pp. ۵۵-۶۸.
- [۵] Hu, Y., Yang S.X., *A knowledge based genetic algorithm for path planning of a mobile robot*, Proc. IEEE: International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, LA, ۲۰۰۴, pp. ۴۳۵۰-۴۳۵۵.
- [۶] Sugihara K., J. Yuh, *GA-Based Motion Planning for Underwater Robotic Vehicle*, Int. Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, ۱۹۹۷, pp. ۴۰۶-۴۱۶.
- [۷] Sugihara K., Smith J., *Genetic algorithms for adaptive motion planning of an autonomous mobile robot*, Proc. ۱۹۹۷ IEEE Int'l Symp. on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA '۹۷), Monterey, ۱۹۹۷, pp. ۱۳۸-۱۴۳.
- [۸] Elshamli A., Abdullah H.A., Areibi S., *Genetic algorithm for dynamic path planning*, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol. ۲, ۲۰۰۴, pp. ۶۷۷-۶۸۰.
- [۹] Park Y.J., Lee S.Y., *A genetic algorithm-based fuzzy control of an electro-hydraulic finposition servo system*, Fuzzy Systems Conference Proceedings, ۱۹۹۹.
- [۱۰] Kaitwanidvilai S., Parnichkun M., Genetic-Algorithm-Based Fixed-Structure Robust H $\infty$  Loop-Shaping Control of a Pneumatic

## ۷- جمع بندی و نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده مشخص است که به کارگیری الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله طراحی مسیر سیستمهای ربائیک روش کارآمد و با هزینه کم محاسباتی است که به دلیل سرعت دسترسی به جواب می تواند در بهینه سازی مسیر حرکت در مسائل عملی حتی به صورت به هنگام<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گیرد. به طوری که در این مقاله به کمک روابط حاکم بر سیستمهای هیدرولیکی مسیر بهینه حرکت بر اساس حداقل انرژی مصرفی تعیین گردید. با توجه به اینکه بهینه سازی مسیر حرکت مکانیزمهای با محرک هیدرولیکی کمتر مورد توجه واقع شده است نتایج حاصل از این مقاله، کارآمدی روش الگوریتم ژنتیک را در حل این نوع مسائل نشان می دهد. به ویژه آنکه عملاً استفاده از روشهای تحلیلی برای حل مسئله طراحی مسیر در این نوع مکانیزمها بسیار مشکل است.

در لازم به ذکر است که تنظیم محدودیتهای عملی مانند تصمیم گیری در مورد فشارهای ماکزیمم سیستم هیدرولیکی و تنظیم محدودیتهای الگوریتم ژنتیک مانند نحوه وضع جرایم تا حدی در پاسخهای به دست آمده مؤثر است. در حل این مسئله تنظیم محدودیتهای مکانیزم و نحوه وضع جرایم مربوط به حل با سعی و خطای فراوان صورت گرفته است که در تعیین محدودیتهای تنظیم فشار شرایط عملی سیستمهای سبک نیز در نظرگرفته شده است. بدیهی است وضع جرایم بیش از حد در حل الگوریتم ژنتیک روند حل مسئله بهینه سازی را با کندی مواجه می کند که در بهینه سازی این مسئله سعی شده که از حداقل جرایم در محاسبات بهینه سازی استفاده شود.

Servosystem, Asian Institute of Technology, Thailand, ۲۰۰۴.

[۱۱] Hashiyama T., Behrendt S., Furuhashi T., Uchikawa Y., *Fuzzy controllers for semiactive suspension system generated through genetic algorithms*, Intelligent Systems for the ۲۱st Century IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol. ۵, ۱۹۹۵, pp. ۴۳۶۱-۶.

[۱۲] Scholz D., Proportional hydraulics, Festo Didactic KG, ۱۹۹۵.

[۱۳] آقاداودی ف.، صدیق م.ج.، بررسی رفتار غیر خطی سرومکانیزم هیدرولیکی، مجموعه مقالات دهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیر طوسی تهران، ۱۳۸۱.

[۱۴] Hsiang S.M., Chang C.C., McGorry R.W., Development of a set of equations describing joint trajectories during para-sagittal lifting, *Journal of biomechanics*, Vol. ۳۲(۸), ۱۹۹۹, pp. ۸۷۱-۶.