

## کنترل مسیر و حذف نوسانات بار در جرثقیل دروازه‌ای، با استفاده از برنامه‌ریزی فازی بهره

آریا الستی<sup>۱</sup>، حسن سالاریه<sup>۲</sup>

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک،

قطب علمی رباتیک، طراحی و اتوماسیون

aalasti@sharif.edu

### چکیده

در این مقاله کنترل مدار بسته جرثقیل دروازه‌ای با استفاده از روش برنامه‌ریزی فازی بهره، جهت کنترل مسیر و حذف نوسانات بار مورد بررسی قرار گرفته است. مدل مورد استفاده یک مدل سه درجه آزادی است، که در آن حرکت افقی تrolley در یک راستا و تغییر طول طناب متصل به بار و نیز زاویه نوسان طناب لحاظ شده است. ابتدا با استفاده از روش برنامه‌ریزی بهره کنترلی متشکل از یک سیستم سوئیچ‌زنی و چندین کنترلر خطی که با استفاده از روش جانشینی قطبها طراحی شده‌اند طراحی می‌شود. سپس به کمک یک سیستم فازی TSK عملکرد کنترلرهای خطی به تمام مسیر حرکت بار تعمیم داده می‌شود، طوری که دیگر نیاز به سیستم سوئیچ‌زنی نباشد. در نهایت، به کمک شبیه‌سازی، عملکرد هر دو نوع کنترلر جدول بندی بهره، بدون سیستم نظاره‌گر TSK و همراه با سیستم نظاره‌گر TSK مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: جرثقیل دروازه‌ای (Gantry) – برنامه‌ریزی فازی بهره – قواعد فازی TSK.

### مقدمه

مسئله حذف نوسانات بار و کنترل مسیر در جرثقیل‌های دروازه‌ای از مسائلی است که هم در خصوص کنترل مدار باز و هم در خصوص کنترل مدار بسته آن کارهای متنوعی صورت گرفته است. در این مسئله هدف این است، که جرثقیل در عین اینکه بار را در مسیر معین و از پیش تعیین شده‌ای جابجا می‌کند، به گونه‌ای این عمل را انجام دهد که در انتهای حرکت بار هیچ نوسانی انجام ندهد. علت اصلی این هدف، کم کردن زمان بار برداری و بارگذاری در محل‌هایی است، که این جرثقیل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش‌های کنترل مدارباز جرثقیل، به طورکل هدف مینیمم کردن انتگرال مربعات زاویه نوسان بار در هنگام جابجایی و در نقطه انتهایی حرکت است [1-3]. همچنین در برخی روش‌ها، به کمک ابزارهای تحلیلی در هندسه دیفرانسیل، با توجه به موانع موجود در مسیر حرکت بار، مسیری برای حرکت بار و سایر متغیرهای ورودی طراحی می‌شود که قیود مکانیکی عملگرهای جرثقیل به ماکزیمم مجاز خود برسند [4]؛ به این ترتیب یک کنترلر مدار باز به شکل یک مسیر برای

۱- استادیار، عضو هیئت علمی

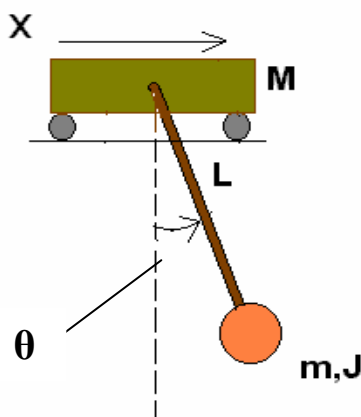
۲- دانشجوی مقطع تحصیلات تکمیلی

متغیرهای ورودی بدست می‌آید. در روش‌های مدارباز، استفاده از مدل مرجع، به طوری که به عنوان مثال رفتار بار در هر لحظه مشابه رفتار یک پاندول ساده باشد، مرسوم است [5]. در خصوص کنترل مدار بسته نیز استفاده از روش‌های کنترل بهینه [6] و همچنین روش‌های کلاسیک کنترل غیرخطی مبتنی بر ساخت توابع لیاپانوف [7]، تاکنون استفاده شده‌اند. همچنین روش‌های فازی و مدل کردن تجربه رانندگان این قبیل جرثقیل‌ها نیز برای کنترل مسیر و حذف نوسانات بار به کار گرفته شده‌اند [8]. در سیستم‌های مدار بسته، با هدف کنترل مسیر، سیستم دینامیکی متغیر با زمان خواهد شد، لذا یکی از بهترین روش‌های کنترل در این شرایط، روش برنامه‌ریزی بهره است [9]. مرجع [10]، روشی را به کمک برنامه‌ریزی بهره در حالتی که طول طناب متصل به بار ثابت است، ارائه داده است. عیب اصلی این روش تغییر غیر پیوسته کنترلر است، که سبب می‌شود رفتار دینامیکی سیستم، دارای مشتقات زمانی نامطلوب گشته و اغلب ارتعاشات فرکانس بالایی را ایجاد می‌نماید. جهت رفع این نقیصه، استفاده از روش‌هایی برای پیوسته سازی ضرایب مفید است. از جمله روش‌هایی که برای این منظور به کار می‌روند، برنامه‌ریزی فازی بهره است [11] و [12].

آنچه در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته، یک مدل سه درجه آزادی از جرثقیل دروازه‌ای است، سپس با استفاده از روش برنامه‌ریزی فازی بهره، کنترلی جهت کنترل مسیر و حذف نوسانات بار طراحی شده است، مزیت این روش، اولاً در استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی بهره است، که سبب می‌شود عمل کنترل مسیر، با استفاده از چندین کنترلر خطی با سرعت محاسبات بالا و امکان اعمال ساده به سیستم ممکن باشد. دومین مزیت آن، استفاده از یک سیستم فازی جهت هموار سازی ضرایب کنترلر و رهایی از مشکلات ناشی از سوئیچ کردن در حین اعمال کنترلر می‌باشد، که بازده عملکرد کنترلر را افزایش می‌دهد.

### مدل دینامیکی جرثقیل دروازه‌ای

مدل در نظر گرفته شده یک مدل سه درجه آزادی است که ترولی در آن تنها قابلیت حرکت در راستای  $x$  را دارد. کابل‌های حامل بار در هر لحظه برابر با  $L$  در نظر گرفته می‌شود، که می‌تواند تغییر کند. کابل حامل بدون جرم فرض می‌شود، این فرض با در نظر گرفتن بزرگی جرم متصل به آن معقول است. بار دارای جرم  $m$  و اینرسی دورانی  $J$ ، و ترولی دارای جرم  $M$  می‌باشد. مولفه‌های سینماتیکی قابل اندازه‌گیری در هر لحظه موقعیت ترولی  $x$ ؛ طول طناب  $L$  و زاویه راستای طناب  $\theta$  است. در مورد نحوه اندازه‌گیری این متغیرها، در بخش‌های بعدی توضیح داده می‌شود.



شکل ۱- شکل شماتیک جرثقیل به همراه مشخصات مورد نیاز

برای بدست آوردن روابط دینامیکی حاکم بر سیستم؛ مطابق شکل (۱) می‌توان سرعت بار را به صورت زیر بدست آورد:

$$v_p = \dot{x}\hat{i} + L\dot{\theta}\hat{e}_\theta + \dot{L}\hat{e}_r = (\dot{x} + L\dot{\theta}\cos\theta + \dot{L}\sin\theta)\hat{i} + (L\dot{\theta}\sin\theta - \dot{L}\cos\theta)\hat{j} \quad (1)$$

با گرفتن پایین ترین نقطه دستیابی بار به عنوان مبدا پتانسیل گرانشی می توان انرژی جنبشی  $KE$  و پتانسیل  $PE$  را به صورت زیر حساب کرد:

$$KE = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m \left[ (\dot{x} + L \dot{\theta} \cos \theta + \dot{L} \sin \theta)^2 + (L \dot{\theta} \sin \theta - \dot{L} \cos \theta)^2 \right] + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (2)$$

$$KE = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m \left[ \dot{x}^2 + L^2 \dot{\theta}^2 + \dot{L}^2 + 2 \dot{x} L \dot{\theta} \cos \theta + 2 \dot{x} \dot{L} \sin \theta \right] + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2$$

$$PE = mg(L_0 - L \cos \theta) \quad (3)$$

رابطه لایپلاسن بعد از انجام محاسبات و ساده سازی به صورت زیر بدست می آید:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = KE - PE = & \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m \left[ \dot{x}^2 + L^2 \dot{\theta}^2 + \dot{L}^2 + 2 \dot{x} L \dot{\theta} \cos \theta + 2 \dot{x} \dot{L} \sin \theta \right] \\ & + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 - (L_0 - L \cos \theta) mg \end{aligned} \quad (4)$$

حال جهت بدست آوردن معادلات دینامیکی به صورت زیر عمل می شود:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} = M \dot{x} + m(\dot{x} + L \dot{\theta} \cos \theta + \dot{L} \sin \theta), \quad \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} = m(L^2 \dot{\theta} + \dot{x} L \cos \theta) + J \dot{\theta}, \quad \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} = m(-\dot{x} L \dot{\theta} \sin \theta + \dot{x} \dot{L} \cos \theta) - mgL \sin \theta \quad (6)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{L}} = m(\dot{L} + \dot{x} \sin \theta), \quad \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial L} = m(L \dot{\theta}^2 + \dot{x} \dot{\theta} \cos \theta) + mg \cos \theta \quad (7)$$

با جایگذاری روابط (5) و (6) و (7) در معادلات لاگرانژ، خواهیم داشت:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} = F \Rightarrow \quad (8)$$

$$(M + m) \ddot{x} - mL \dot{\theta}^2 \sin \theta + mL \ddot{\theta} \cos \theta + m \ddot{L} \sin \theta + 2m \dot{L} \dot{\theta} \cos \theta = F$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} = 0 \Rightarrow \quad (9)$$

$$J \ddot{\theta} + mL^2 \ddot{\theta} + m \ddot{x} L \cos \theta + 2m \dot{L} \dot{\theta} + mgL \sin \theta = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{L}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial L} = -T \Rightarrow \quad (10)$$

$$m \ddot{L} + m \ddot{x} \sin \theta - mL \dot{\theta}^2 - mg \cos \theta = -T$$

در معادلات فوق  $F$  نیروی رانش ترولی و  $T$  نیروی کشش در طناب هستند. با انتخاب متغیرهای حالت به صورت

$$q = [x \quad \theta \quad L]^T$$

می توان معادلات حرکت را به صورت ماتریسی زیر نوشت:

$$\tilde{M} \ddot{q} + V \dot{q} + G = u \quad (11)$$

که در آن:

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} M + m & mL \cos \theta & m \sin \theta \\ mL \cos \theta & J + mL^2 & 0 \\ m \sin \theta & 0 & m \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$V = \begin{bmatrix} 0 & -mL\dot{\theta} \sin \theta & 2m\dot{\theta} \cos \theta \\ 0 & mL\ddot{L} & mL\dot{\theta} \\ 0 & -mL\dot{\theta} & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$G = [0 \quad mgL \sin \theta \quad -mg \cos \theta]^T \quad (14)$$

$$u = [F \quad 0 \quad -T]^T \quad (15)$$

رابطه (۱۱) را می‌توان به صورت زیر باز نویسی نمود :

$$\ddot{q} = \tilde{M}^{-1} [u - G - V\dot{q}] \quad (16)$$

### طراحی کنترلر جهت کنترل مسیر با روش برنامه ریزی فازی بهره

برای کنترل مسیر در یک سیستم دینامیکی به شکل عمومی (۱۷)، ابتدا باید معادلات دینامیکی خطا را بدست آورد. فرض می‌شود مسیر مطلوبی که باید به آن رسید  $(x_d, u_d)$  باشد؛ که در آن مسیر  $x_d$  و  $u_d$  کنترلی است که منجر به پایداری آن مسیر می‌شود.

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (17)$$

$$\dot{x}_d = f(x_d, u_d) \quad (18)$$

بنابراین معادله خطا به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\dot{e}_x = f(e_x + x_d, e_u + u_d) - f(x_d, u_d) \quad (19)$$

در رابطه فوق  $e_x = x(t) - x_d(t)$  و  $e_u = u(t) - u_d(t)$  می‌باشد. جهت طراحی کنترلر، سیستم حول نقطه دلخواهی از مسیر حرکت مطلوب خطی سازی می‌شود.

$$\dot{e}_x = A(x_d, u_d)e_x + B(x_d, u_d)e_u + h.o.t \quad (20)$$

که در آن،

$$A(x_d, u_d) = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \right|_{x_d, u_d}, B(x_d, u_d) = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \right|_{x_d, u_d} \quad (21)$$

و مقصود از  $h.o.t$  جملات مرتبه بالاتر است، که در خطی سازی حذف می‌شوند. از آنجایی که هدف کنترل مسیر (Tracking Control) می‌باشد، متغیر جدید  $\sigma$  به‌عنوان انتگرال خطا چنان تعریف می‌شود که  $\dot{\sigma} = e_x$ . با استفاده از روشهای طراحی کنترلر برای سیستم‌های خطی مانند جای نشانی قطب‌ها با استفاده از فرم کانونی کنترل تعمیم یافته (Generalized Canonical Control Form) می‌توان حول نقاط مختلف کاری کنترلر خطی مناسبی را طراحی کرد.

$$e_u = K(x_d, u_d)e_x + K_I(x_d, u_d)\sigma \quad (22)$$

با اعمال این کنترلر به (۱۹) بدست می‌آید:

$$\dot{x} = \dot{x}_d + A(x_d, u_d)(x - x_d) + B(x_d, u_d)(u - u_d) + h.o.t \quad (23)$$

که در آن:

$$u = u_d + K(x_d, u_d)e_x + K_I(x_d, u_d)\sigma \quad (24)$$

همان‌طور که مشخص است، به خاطر وجود جملات مرتبه بالای  $h.o.t$  کنترلرهای طراحی شده تنها در ناحیه کوچکی در اطراف هر یک از نقاط کاری واقع روی مسیر، اعتبار دارند. اشکال عمده ای که در این حالت پیش می‌آید عدم کنترل روی دامنه کشش کنترلر است، که در بسیاری از موارد این دامنه بسیار کوچک و غیر عملی خواهد بود. در طراحی کنترلر با روش خطی سازی، روش متداول برای رفع این نقیصه استفاده از برنامه ریزی بهره است. به کمک این روش اعتبار روش خطی سازی به چند نقطه کاری تعمیم داده می‌شود. این روش هنگامی قابل استفاده است، که بتوان به نوعی رفتار دینامیکی سیستم را

نسبت به تغییر نقطه کاری اش معلوم کرد. در چنین موقعیتی می توان سیستم را حول چند نقطه کاری اش خطی سازی کرد، سپس در هر مورد کنترلر مناسبی با استفاده از روش های خطی طراحی و در زمانهای مقتضی آن را به سیستم اعمال کرد، به عبارت دیگر تعدادی کنترلر خطی همراه با یک سیستم سوئیچ کردن (که معمولاً بنابر یک الگوریتم زمان بندی عمل می کند)، سیستم کنترلی را تشکیل می دهند. در سیستم مورد بحث نقاط کاری همان نقاط واقع بر مسیر حرکت هستند، و الگوریتم زمانی سوئیچ کردن هم توسط  $\underline{x}_d(t)$ ، تعیین می شود. به این صورت که، فرض می شود،

$$\{(\underline{x}_{di}, \underline{u}_{di}), 1 \leq i \leq n\} \quad (25)$$

مجموعه ای از  $n$  نقطه کاری باشند، که خطی سازی در آنها انجام شده است، در این صورت کنترلر نهایی به صورت زیر تعیین می شود:

$$\underline{u} = \underline{u}_d + K \underline{e}_x + K_I \underline{\sigma} \quad (26)$$

$$K = K(\underline{x}_{di}, \underline{u}_{di}), \quad K_I = K_I(\underline{x}_{di}, \underline{u}_{di}), \quad \text{if } x_d^{-1}(x_{di}) \leq t < x_d^{-1}(x_{d(i+1)})$$

کنترلر طراحی شده به این طریق نسبت به زمان ناپیوستگی دارد، زیرا ضرایب کنترلر در لحظه سوئیچ کردن ناگهان تغییر می کنند. این سبب می شود که رفتار دینامیکی سیستم در لحظات سوئیچ زنی هموار نباشد، و اغلب مشتقهای سرعت و شتاب بالایی بوجود بیاید. راه های رفع این نقیصه یکی استفاده از المانهای اشباع و یا استفاده از فیلترها است، و دیگری استفاده از روشی برای پیوسته سازی تابع ضرایب کنترلر است. در اینجا با استفاده از روش برنامه ریزی فازی بهره، مسئله کنترل مسیر به همراه حذف نوسانات بار در جرثقیل دروازه ای مورد تحلیل قرار می گیرد.

همانطور که معلوم است رفتار سیستم (۲۰) در نزدیک هر نقطه کاری خطی است، بنابراین با تعریف کردن چند مجموعه فازی در اطراف  $n$  نقطه کاری معرفی شده در رابطه (۲۵) می توان یک مدل فازی TSK برای سیستم (۲۳) به این صورت تعرف کرد:

$$\text{IF } \underline{x}_d = LX^i \quad \text{AND} \quad \underline{u}_d = LU^i \quad (27)$$

$$\text{THEN } \dot{\underline{x}} = \dot{\underline{x}}_d + A_i(\underline{x} - \underline{x}_d) + B_i(\underline{u} - \underline{u}_d), \quad 1 \leq i \leq n$$

که در آن  $A_i = A(\underline{x}_{di}, \underline{u}_{di})$  و  $B_i = B(\underline{x}_{di}, \underline{u}_{di})$  می باشد، و  $LX^i$  و  $LU^i$  عبارت های فازی یا مجموعه های فازی (مانند کوچک، بزرگ و ..) در حول نقاط  $(\underline{x}_{di}, \underline{u}_{di})$  هستند. قسمت THEN در قاعده فازی (۲۷) بیانگر دینامیک سیستم مورد بررسی در مرکز مجموعه فازی  $i$  ام می باشد که توسط  $LX^i$  و  $LU^i$  تعریف می شوند. توابع تعلق قسمت IF یا توابع تعلق که بیانگر این است که برای هر  $(\underline{x}_d, \underline{u}_d)$  هر یک از این  $n$  قانون چقدر اعتبار دارند با  $w_i(\underline{x}_d, \underline{u}_d)$  نشان داده می شود، که می تواند به طور دلخواه توسط کاربر انتخاب شود، طوری که شرط نرمال و کامل بودن را ارضاء کند و در نتیجه:

$$\sum_{i=1}^n w_i(\underline{x}_d, \underline{u}_d) = 1, \quad w_i(\underline{x}_d, \underline{u}_d) \geq 0 \quad (28)$$

در این صورت برای هر لحظه با توجه به موقعیت  $(\underline{x}_d, \underline{u}_d)$  سیستم دینامیکی (۲۳) به صورت زیر تقریب زده می شود.

$$\dot{\underline{x}} = \dot{\underline{x}}_d + \sum_{i=1}^n w_i(\underline{x}_d, \underline{u}_d) [A_i(\underline{x} - \underline{x}_d) + B_i(\underline{u} - \underline{u}_d)] \quad (29)$$

بنابراین کفایت کنترلی با قواعد فازی TSK زیر طراحی شود:

$$\text{IF } \underline{x}_d = LX^j \quad \text{AND} \quad \underline{u}_d = LU^j \quad (30)$$

$$\text{THEN } \underline{u} = \underline{u}_d + K_j(\underline{x} - \underline{x}_d) + K_{Ij} \underline{\sigma}, \quad 1 \leq j \leq n$$

در رابطه فوق  $K_j = K(\underline{x}_{dj}, \underline{u}_{dj})$  و  $K_{Ij} = K_{Ij}(\underline{x}_{dj}, \underline{u}_{dj})$ ، ضرایب کنترلی برای کنترل مربوط به مرکز نواحی فازی هستند. لذا کنترلر نهایی اعمالی به سیستم به صورت زیر خواهد بود:

$$\underline{u} = \underline{u}_d + \sum_{j=1}^n w_j(\underline{x}_d, \underline{u}_d) [K_j(\underline{x} - \underline{x}_d) + K_{Ij} \underline{\sigma}] \quad (31)$$

با اعمال این کنترلر به سیستم (۲۹) و استفاده از خاصیت (۲۸) می توان نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}} &= \dot{\underline{x}}_d + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i(\underline{x}_d, \underline{u}_d) w_j(\underline{x}_d, \underline{u}_d) \\ &\times [(A_i + B_i K_j)(\underline{x} - \underline{x}_d) + B_i K_{Ij} \underline{\sigma}] \end{aligned} \quad (32)$$

رفتار کنترلر در این وضعیت پیوسته است، لذا انتظار می رود، در صورت پایداری رفتار سیستم هم هموارتر باشد. در خصوص بررسی رفتار پایداری سیستم می توان به مرجع [12] مراجعه کرد.

### کنترل مدار بسته جرثقیل دروازه ای با استفاده از برنامه ریزی فازی بهره

با تعریف متغیرهای حالت به صورت؛  $q = (q_1 = x, q_2 = \dot{x}, q_3 = L, q_4 = \dot{L}, q_5 = \theta, q_6 = \dot{\theta})$  می توان  $\dot{q}_2$  و  $\dot{q}_4$  و  $\dot{q}_6$  را از رابطه (۱۶) بدست آورد؛ در این صورت معادله دینامیکی سیستم به صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{\underline{q}} = f(\underline{q}, \underline{u}) \quad (33)$$

که در آن  $\underline{u}$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$\underline{u} = [u_1 = F \quad 0 \quad u_2 = -T]^T \quad (34)$$

می توان روابط (۱۲) تا (۱۵) را برحسب این متغیرهای حالت بدست آورد. بنابراین معادله دینامیکی حاکم بر سیستم به این صورت نوشته می شود:

$$\ddot{\underline{q}} = M^{-1} [\underline{u} - G - V\dot{\underline{q}}] \quad (35)$$

مسیر مورد نظری که بایستی توسط سیستم دینامیکی دنبال شود به صورت زیر تعریف می شود:

$$\underline{q}_d = [q_{1d} = x_d, q_{2d} = \dot{x}_d = 0, q_{3d} = \theta_d = 0, q_{4d} = \dot{\theta}_d = 0, q_{5d} = L_d, q_{6d} = \dot{L}_d = 0] \quad (36)$$

همانطور ملاحظه می شود، تمام مشتقات دوم و نیز زاویه نوسان صفر انتخاب می شود. به این ترتیب اگر هدف این است که مسیر مشخصی توسط بار آویخته شده به انتهای طناب طی شود، کافی است ابتدا آن را برحسب زمان نوشت. به عنوان مثال فرض می شود  $(x_{Ld}(t), y_{Ld}(t))$  مسیر مورد نظر باشد. سپس، می توان با توجه به اینکه موقعیت بار  $(x_L, y_L)$  توسط متغیرهای حالت به صورت زیر بدست می آید،  $q_d$  را در رابطه (۳۹) تعیین کرد. راستای مثبت محور  $y$  در صفحه حرکت بار به سمت پایین در نظر گرفته می شود، و مبدا  $y$  هم روی خط افقی حرکت تrolley فرض می شود:

$$\begin{aligned} x_L &= x + L \sin \theta \\ y_L &= L \cos \theta \end{aligned} \quad (37)$$

بنابراین:

$$\underline{q}_d = [x_d = x_{Ld}(t), 0, 0, 0, L_d = y_{Ld}(t), 0] \quad (38)$$

با انتخاب  $n$  نقطه کاری روی منحنی  $(x_{Ld}(t), y_{Ld}(t))$  و خطی سازی رابطه (۳۵) روی هر یک و استفاده از روش GCCF، می توان  $n$  کنترلر خطی همراه با انتگرال گیر جهت صفر کردن خطای ماندگار طراحی کرد. جهت ساخت سیستم فازی و به شکل مدل های بیان شده در روابط (۲۷) و (۳۰) ابتدا  $n$  نقطه را در مسیر مطلوب  $(x_{Ld}(t), y_{Ld}(t))$  به گونه ای انتخاب می شوند که در فواصل زمانی مساوی از هم قرار بگیرند. این زمان ها با  $t_i$  نشان داده می شوند. در نتیجه  $q_{di}$  ها بدست می آیند. برای تعیین مجموعه فازی حول هر  $q_{di}$  از هر تابع تعلق دلخواهی می توان استفاده کرد. راحت تر آن است که از ابتدا توابع تعلق را برای  $t_i$  ها بکاربرد و سپس از نگاشت های زیر استفاده شود برای تبدیل توابع فازی ساز حول  $t_i$  ها به توابع فازی ساز حول  $q_{di} = [x_{di}, 0, 0, 0, L_{di}, 0]$  ها:

$$\mu_{x_{di}}(x_d) = \mu_{t_i}(x_{Ld}^{-1}(x_d)) \quad (39)$$

$$\mu_{L_{di}}(L_d) = \mu_{t_i}(y_{Ld}^{-1}(L_d)) \quad (40)$$

همچنین توابع وزنی یا تعلق  $w_i$  نیز به صورت شکل (۲) می‌توانند به کار روند تا هر دو شرط (۲۸) ارضاء شود.

### شبیه‌سازی

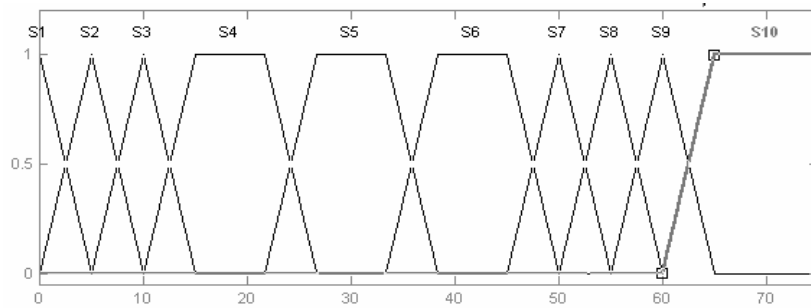
مقادیر به کار رفته برای پارامترهای روابط (۱۲) تا (۱۴) در شبیه‌سازی کامپیوتری، مربوط به یک نمونه آزمایشگاهی از جرثقیل دروازه‌ای هستند و عبارتند از:

$$m = 10Kg, \quad M = 2Kg, \quad J \approx 1Kg.m^2, \quad \max L = 2m, \quad g = 9.81m/s^2 \quad (41)$$

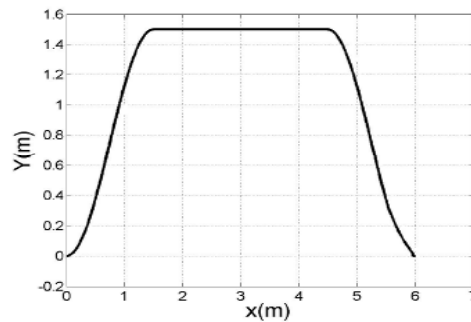
بعلاوه مسیری که انتخاب می‌شود تا بار آن را طی کند به صورت شکل (۳) خواهد بود.

$$x_{Ld} = 0.1t, \quad 0 \leq t \leq 60$$

$$y_{Ld} = \begin{cases} 1.25 + 0.75 \cos(\pi/15), & 0 \leq t \leq 15 \\ 0.5, & 15 \leq t \leq 45 \\ 1.25 - 0.75 \cos(\pi(t-45)/15), & 45 \leq t \leq 60 \end{cases} \quad (42)$$



شکل ۲- توابع فازی ساز مورد استفاده برای ساخت توابع تعلق یا وزن  $w_i$



شکل ۳- منحنی مطلوب موقعیت بار

زمان‌های انتخابی جهت تعیین  $q_{di}$  ها مراکز مجموعه‌های فازی در شکل (۲) هستند. در هر نقطه بعد از خطی‌سازی، جهت تعیین ضرایب کنترلر، مقادیر ویژه انتخابی برای سیستم همراه با پس‌خوراند، عبارتست از  $\mu_k = -2$  و  $\mu_{1,2,8,9} = -1 \pm j$  برای  $3 \leq k \leq 7, k = 10$ . توجه می‌شود، کل معادلات دینامیکی از سه معادله رسته ۲ و

یک معادله خطا تشکیل شده است. نتایج، بعد از شبیه‌سازی در شکل‌های آتی آمده است. در شکل (۴) نتایج حاصل از اعمال کنترلر برنامه ریزی بهره بدون استفاده از فازی‌ساز آمده است. در شکل (۵) نتایج حاصل از اعمال کنترلر همراه با برنامه ریزی فازی بهره آمده است. همچنان که مشاهده می‌شود، در این حالت پاسخ سیستم مدار بسته هموارتر است، و بعلاوه در خصوص حرکت ترولی مشاهده می‌شود که جز بازه زمانی کوچکی در ابتدای حرکت، شتاب در سایر زمان‌ها صفر است.

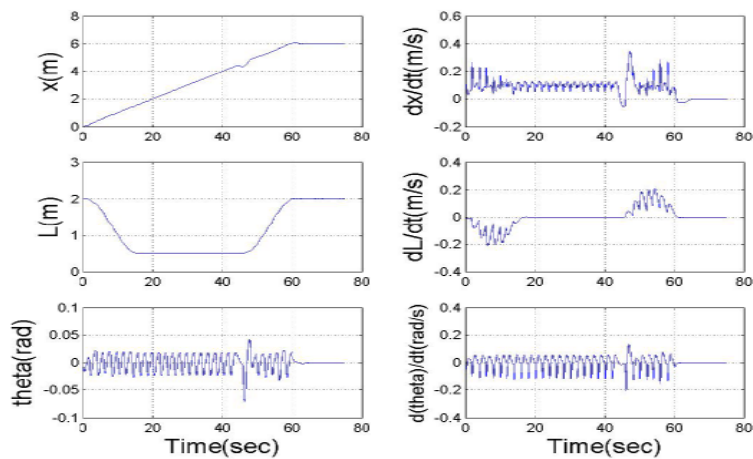
جدول ۱- ضرایب کنترلر برای نقاط مرکز مجموعه‌های فازی رسم شده در شکل ۲

شماره نقطه	ضرایب کنترلر	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	$q_7$
1	F ضرایب	32.5195	29.6433	0	0	12.8338	13.5609	-14.4531
2	F ضرایب	25.3945	23.8643	0	0	20.0147	-2.8604	-11.2864
3	F ضرایب	23.4815	22.6656	0	0	14.1550	-14.6088	-10.4362
4	F ضرایب	24.9541	24.1627	0	0	5.9879	-17.0861	-11.0907
5	F ضرایب	24.9541	24.1627	0	0	5.9879	-17.0861	-11.0907
6	F ضرایب	24.9541	24.1627	0	0	5.9879	-17.0861	-11.0907
7	F ضرایب	23.4815	22.6656	0	0	14.1550	-14.6088	-10.4362
8	F ضرایب	25.3945	23.8643	0	0	20.0147	-2.8604	-11.2864
9	F ضرایب	32.5195	29.6433	0	0	12.8338	13.5609	-14.4531
10	F ضرایب	33.7615	30.6258	0	0	12.1310	16.7830	-15.0051
تمام نقاط	-T ضرایب	0	0	20.0000	20.0000	0	0	0

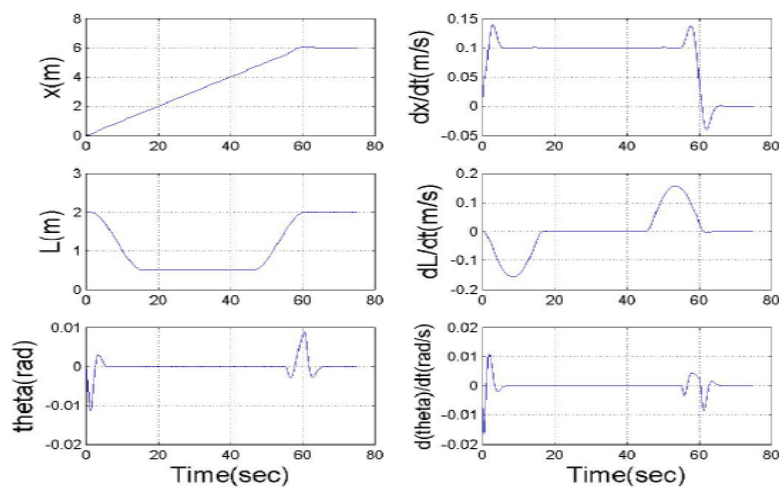
## بحث و نتیجه‌گیری

همانطور که شکل‌های (۶) و (۸) نشان می‌دهد به کمک روش به‌کار گرفته هر دو هدف حذف نوسانات بار و دنبال کردن مسیر ارضاء می‌شود. خطای دائمی که بین دو منحنی شکل (۸)، یعنی منحنی حرکت مطلوب و منحنی بدست آمده وجود دارد، با سربعتر کردن کنترلر (بزرگ کردن اندازه قطب‌ها یا مقادیر ویژه کنترلرهای خطی) قابل برطرف کردن است. مقادیر نیروهای کنترلی که در رابطه (۳۷) تعریف شده‌اند در شکل‌های زیر آمده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود، حداکثر نیروی وارده به ترولی 0.1 نیوتن، و در مورد کشش طناب (بدون احتساب وزن بار) هم 100 نیوتن (وزن بار) است. نیروی کشش طناب هیچگاه منفی نشده است. (آنچه در شکل آمده T- است). سیگنالهای کنترلی در مقایسه با جرم بار و ترولی معقول هستند. نکته دیگر حرکت هموار و تقریباً سرعت ثابت ترولی است. این سبب می‌شود که سرنشین احتمالی ترولی بدون دریافت شتاب بالا درون ترولی سرکند. جهت اعمال چنین کنترلی بایستی قابلیت اندازه‌گیری طول طناب و موقعیت ترولی و زاویه طناب وجود داشته باشد. اندازه‌گیری طول طناب که متناسب با مقدار دوران موتور بالابر است، با داشتن سرعت موتور اندازه‌گیری می‌شود، موقعیت ترولی و زاویه طناب هم با استفاده از شتاب‌سنج‌ها و سنسورهای موجود قابل اندازه‌گیری است.

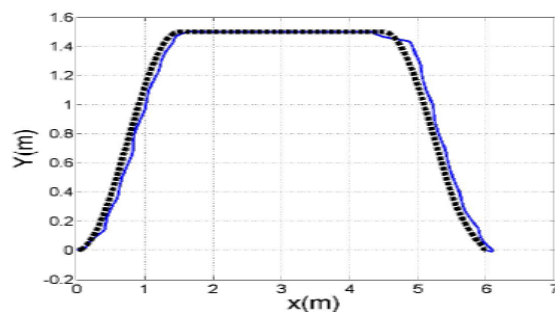




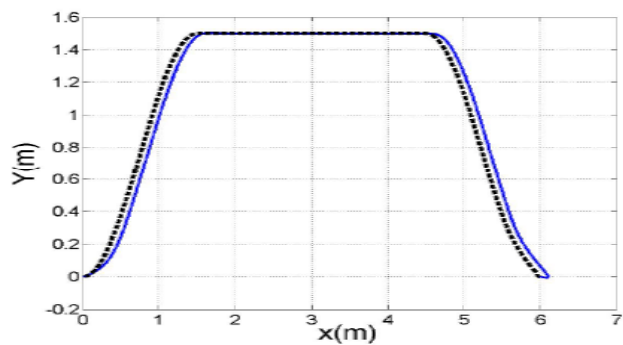
شکل ۴- نتایج شبیه سازی بعد از اعمال کنترلر برنامه ریزی بهره فازی. منحنی های سمت چپ، به ترتیب موقعیت افقی ترولی، طول طناب و زاویه طناب با افق هستند. و منحنی های سمت راست، سرعت های نظیر آنها می باشند.



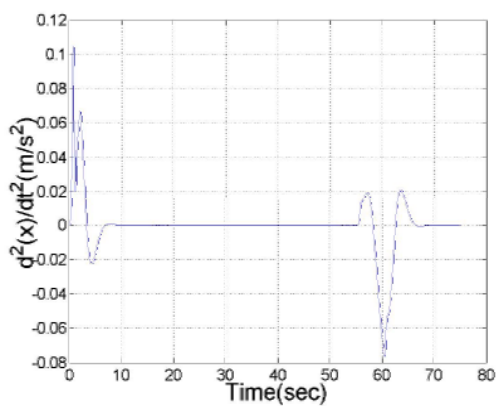
شکل ۵- نتایج شبیه سازی بعد از اعمال کنترلر برنامه ریزی بهره فازی. منحنی های سمت چپ، به ترتیب موقعیت افقی ترولی، طول طناب و زاویه طناب با افق هستند و منحنی های سمت راست، سرعت های نظیر آنها می باشند.



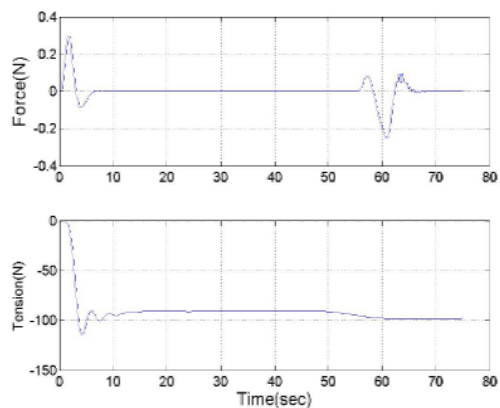
شکل ۶- مقایسه مسیر مطلوب حرکت بار (منحنی خط چین) و مسیر بدست آمده هنگامی که از کنترلر برنامه ریزی بهره غیر فازی استفاده می شود (منحنی توپر).



شکل ۷- مقایسه مسیر مطلوب حرکت بار (منحنی خط چین) و مسیر بدست آمده هنگامی که از کنترلر برنامه ریزی فازی بهره استفاده می شود (منحنی توپر).



شکل ۸- منحنی شتاب ترولی بر حسب زمان (حداکثر شتاب  $0.12m/s^2$ )



شکل ۹- نیروی کنترلی وارد به ترولی (منحنی بالا) و نیروی کنترلی کشش طناب (منحنی پایین)

## مراجع

- [1] A. Z. Al-Garni, K. A. F. Moustafa, and S. S. A. K. Javeed Nizami, (1995), "Optimal Control of Overhead Cranes", Control Engineering Practice, Vol.3, No 9, Pages 1277-84.
- [2] C.J. Backhouse, R. A. Pirce, and P. R. Moor, (1994), "Crane Automation. Industrial Robot", Journal of Robotic Systems, Vol. 21, No. 4, Pages 22-25.
- [3] E. A. Croft, B. Benhabib, and R. G. Fenton, (1995), "Near-time Optimal Robot Motion Planning for On-line Applications", Journal of Robotic Systems, Vol. 12, No. 8, Pages 553-567.
- [4] Come Raczy, Gerard Jacob, (1997), "Fast and Smooth Controls for a Trolley Crane", Centre de deLille Recherches et d'Etudes en Gestion de Mons - Belgium, Laboratoire d'Informatique Fondamentale Universite des Sciences et Techniques de Lille, France.
- [5] N. Miyata, T. Ukita, M. Nishioka, T. Monzen, T. Toyohara, (2001), "Development of Feedforward Anti-Sway Control for Highly Efficient and Safety Crane Operation", Mitsubishi Heavy Industries. Ltd. Technical Review, Vol. 38, No. 2, Pages 73-74.
- [6] J.W. Auernig and H. Troger, (1987), "Time Optimal Control of Overhead Cranes with Hoisting of the Load," Automatica, Vol. 23, No. 4, Pages 437-447.
- [7] J. S. Shamma, "Analysis and Design of Gain Scheduled Control Systems", Ph.D. dissertation, Lab. Inform. Decision Systs, Massachusetts Inst. Technology, Cambridge, May 1988.
- [8] H. M. Omar, "Control of Gantry and Tower Cranes", Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Inst. and State Univ., January 2003.
- [9] H. K. Khalil, (1996), Nonlinear Systems, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458, 2<sup>nd</sup> Ed.,
- [10] G. Corrigan, A. Giua, (1998), "An Implicit Gain-Scheduling Controller for Cranes", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 6, No. 1, Pages 15-20.
- [11] R. Palm, and C. Stutz, (2003), "Open Loop Dynamic Trajectory Generator for a Fuzzy Gain Scheduler", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 16, Pages 213-25.
- [12] R. Palm, and D. Driankov, (2001), "Design of a Fuzzy Gain Scheduler Using Sliding Mode Principles", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 121, Pages 13-23.