



کنترل غیرخطی بهینه برای سیستم زیرفعال دو بعدی بر مبنای الگوریتم جستجوی هارمونی

علی هادی^۱، محمود مزارع^۱، محمد رسول نجفی^{۲*}

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲- مریم، مهندسی مکانیک، دانشگاه قم، قم

* قم، صندوق پستی ۱۷۴۳۵۲۴۱۵۵
mr.najafi@qom.ac.ir

چکیده

جزئیات دو بعدی، یک سیستم زیرفعال است و از این رو مسئله کنترل چنین سیستم هایی تا حدودی پیچیده می باشد. در این مقاله به طراحی کنترل کننده های خطی سازی پسخور جزئی و مود لغزشی برای یک سیستم جرثقیل کاتنیس دو بعدی با طول کابل متغیر پرداخته شده است. از آن جایی که مدل دینامیکی سیستم بیان دقیقی از رفتار واقعی سیستم نیست و سیستم دارای عدم قطعیت می باشد، لذا کنترل کننده ای طراحی شده که تا حدودی اثرات عدم قطعیت مدل و اغتشاشات خارجی را کاهش داده و در مقابل این عوامل مقاوم باشد. از آن جا که سیستم مورد مطالعه، یک سیستم زیرفعال است، به منظور طراحی کنترل کننده، ابتدا دینامیک سیستم به دو بخش فعال و غیرفعال تقسیک و سپس، پایداری کنترل کننده های طراحی شده مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، یکتابع هدف به صورت ترکیب میان تنگرال خط و نزخ تعییر سیگنال کنترلی در نظر گرفته شده است. تابع هدف معروفی شده، به کمک الگوریتم های جستجوی هارمونی و ازدحام ذرات، مینیمم شده و مقاییر بهینه برای پارامترهای کنترلی استخراج شده است. تا امکان مقایسه عملکرد کنترلرها در شرایط بهینه آنها فراهم شود. نتایج شبیه سازی، حاکی از عملکرد مناسب کنترل کننده های خطی سازی پسخور جزئی و مود لغزشی بهینه شده به کمک الگوریتم جستجوی هارمونی در حضور عدم قطعیت پارامتری، اختشاش خارجی متغیر با زمان، و نویز سنسورها می باشد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۰ مهر ۱۳۹۶

پذیرش: ۳۰ آذر ۱۳۹۶

ارائه در سایت: ۱۵ دی ۱۳۹۶

کلید واژگان:

جرثقیل کاتنیس دو بعدی

سیستم زیرفعال

خطی سازی پسخور جزئی

مود لغزشی

جستجوی هارمونی

Optimal Nonlinear Control for a 2D Under-Actuated Crane System Based on Harmony Search Algorithm

Ali Hadi^۱, Mahmood Mazare^۱, Mohammad Rasool Najafi^{۲*}

۱- School of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

۲- Department of Mechanical Engineering, Qom University, Qom, Iran

* P.O.B. ۱۷۴۳۵۲۴۱۵۵, Qom, Iran, mr.najafi@qom.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 12 October 2017

Accepted 21 December 2017

Available Online 05 January 2018

Keywords:

2D container crane

Under-actuated system

Partial feedback linearization

Sliding mode

Harmony Search

ABSTRACT

Container crane is an under-actuated system, which is why it is much more difficult to control such systems. In this paper, partial feedback linearization and sliding mode controllers are employed to control a 2D container crane with varying cable length. Since, the dynamic model of the system cannot present the real one and the system contains some uncertainties, a controller is designed to reduce the effect of model uncertainties and external disturbances. Since the considered system is under-actuated, in order to design controller, first, dynamics of the system is divided into two parts, actuated and under-actuated. Then, stability of the controllers is discussed. An objective function is considered as the combination of integral of absolute error and rate of variation of control signal. The introduced objective function is minimized employing Harmony Search and particle swarm optimization algorithms and optimum values for parameters of the designed controllers are determined to make it possible to compare performance of the mentioned controllers in their optimum conditions. Simulation results show suitable performance of the designed controllers by harmony search algorithm for the 2D crane in the presence of mass uncertainty, actuator disturbances and sensor noises.

است، به طوری که محموله بدون این که نوسان کند به موقعیت مطلوب خود

برسد. عموماً یک کاربر ماهر عهده دار این وظیفه است. ولی با این حال

عملکرد این جرثقیل ها از نظر سرعت، دقت و ایمنی به شدت به تحریه و

قابلیت های کاربر بستگی دارد. حرکت یک جرثقیل به منظور جابجایی بار

۱- مقدمه جرثقیل های کاتنیس به طور گسترده در بسیاری از زمینه های صنعتی از جمله

بنادر و کارخانه ها برای جابجایی محموله های سنگین استفاده می شوند. وظیفه

یک جرثقیل انتقال بار از یک نقطه به نقطه دیگر در کمترین زمان ممکن

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Hadi, M. Mazare, M. R. Najafi, Optimal Nonlinear Control for a 2D Under-Actuated Crane System Based on Harmony Search Algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 01, pp. 141-152, 2018 (in Persian)

برای نشان دادن کارایی روش ارائه شده، نتایج تجربی نیز ارائه شده است. روش خطی سازی پسخور یکی دیگر از روش‌هایی است که در کنترل جرثقیل‌ها مورد استفاده است. در [10] این روش توسط عمر و نایفه با جدول‌بندی بهره^۱ ترکیب شده و نتایج شبیه‌سازی عددی ارائه شده است. نتایج بهدست آمده نشان داده که کنترل کننده طراحی شده در کاهش نوسانات بار و انتقال آن در یک زمان در مقایسه با کنترل کننده بهینه مؤثرتر بوده است. لی و همکارانش [11] یک کنترل کننده غیرخطی برای جرثقیل هوایی براساس ترکیب دو قانون کنترلی پیشنهاد داده‌اند. مکانیزم حذف نوسان بار با استفاده از خطی‌سازی پسخور جزئی ساخته شده است. کنترل ریدیابی بار و واگن بر پایه روش مود لغزشی طراحی شده است. سپس یک ساختار ضدنوسان با طرح ریدیابی واگن و بالابر بار بهمنظور کنترل غیرمستقیم زاویه نوسان بار ترکیب شده است. نتایج شبیه‌سازی و تجربی ارائه شده است و میزان مقاومت کنترل کننده طراحی شده در حضور عدم قطعیت‌های پارامتری مورد بررسی قرار گرفته است. پارک و همکارانش در [12] یک کنترل کننده خطی‌سازی پسخور برای جرثقیل کاتنیسر با طول کابل متغیر ارائه داده‌اند. عملکرد سیستم حلقه بسته در حضور اختشاشات روى بار و تغییرات طول کابل رضایت بخش بوده است. همچنین نتایج تجربی و شبیه‌سازی با هم مقایسه و مورد بررسی قرار گرفته است. ولی، در شبیه‌سازی انجام شده اثر عدم قطعیت‌های پارامتری مانند تغییرات جرم سیستم در نظر گرفته نشده و همچنین اغتشاش به صورت تابع ضربه ایجاد شده است.

در این مقاله، دو روش کنترلی غیرخطی شامل خطی‌سازی پسخور جزئی و مود لغزشی بهمنظور کنترل یک جرثقیل دوبعدی با طول کابل متغیر طراحی شده و اثبات ریاضی برای پایداری آن‌ها ارائه گردیده است. کنترل کننده‌های طراحی شده منجر به همگرایی موقعیت واگن و طول کابل به مقادیر مطلوب (جاگایی بار به نقطه معین) شده و در عین حال زاویه نوسان بار را حذف کرده است. پس از طراحی کنترل کننده‌ها، با انتخاب تابع هدف مناسب و به کارگیری الگوریتم‌های جستجوی هارمونی و ازدحام ذرات^۲، پارامترهای بهینه برای کنترل کننده‌ها تعیین شده است. در ادامه، میزان مقاوم بودن کنترل کننده‌های مذکور با پارامترهای بهینه در حضور عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش خارجی متغیر با زمان و نویز سنسورها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. نوآوری مقاله عبارت است از: ۱) طراحی کنترل کننده‌های خطی‌سازی پسخور جزئی و مود لغزشی برای سیستم زیرفعال جرثقیل دوبعدی با طول کابل متغیر (۲) بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی با استفاده از الگوریتم‌های جستجوی هارمونی و ازدحام ذرات. (۳) مقایسه نتایج و عملکرد سیستم با الگوریتم‌های مطرح شده.

باخش‌های مختلف مقاله بدین صورت است که در باخش ۲، دینامیک سیستم جرثقیل کاتنیسر دوبعدی که شامل سه معادله دیفرانسیل مرتبه دوم غیرخطی است، با استفاده از روش لاغرانژ استخراج می‌گردد. در باخش ۳، قوانین کنترلی با استفاده از روش‌های خطی‌سازی پسخور جزئی و مود لغزشی طراحی می‌گردد که البته بهدلیل زیرفعال بودن سیستم، قبل از طراحی کنترل‌ها دینامیک سیستم به دو باخش فعال و غیرفعال تقسیک می‌گردد. همچنین، اثبات ریاضی برای پایداری کنترل‌های طراحی شده ارائه می‌گردد. در باخش ۴ با معرفی تابع هدف مناسب و استفاده از روش بهینه‌سازی جستجوی هارمونی و ازدحام ذرات، پارامترهای بهینه برای کنترل‌های طراحی شده تعیین می‌گردد. در باخش ۵ با ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی، عملکرد

باعث می‌شود محموله بر روی کابل نوسان نماید بهطوری که هر چه سرعت حمل بار بیشتر شود، زاویه نوسان نیز بیشتر می‌شود. از طرفی برای افزایش راندمان کاری این جرثقیل‌ها، بار باید با حداکثر سرعت و دقت ممکن به مکان موردنظر انتقال داده شود. همچنین برای اطمینان از اینمی باید نوسان بار تا جایی که امکان دارد کوچک نگهداشته شود. با این حال، این شرایط تا حدودی متناقض هستند. از این‌رو، سیستم‌های کنترل جرثقیل به گونه‌ای توسعه یافته‌اند که جرثقیل بتواند با حداکثر سرعت ممکن به موقعیت مطلوب برسد؛ در حالی که زاویه نوسان بار حذف گردد.

مسئله کنترل سیستم‌های جرثقیل در طول دهه گذشته علاقه زیادی را در بین پژوهشگران و محققان بهدلیل دشواری آن ایجاد کرده است. این دشواری به این دلیل است که این سیستم‌ها جزو سیستم‌های زیرفعال^۳ هستند. یعنی تعداد عملگرهای آن‌ها کمتر از تعداد درجه آزادی‌شان است. در جرثقیل کاتنیسر دوبعدی با طول کابل متغیر که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است، دو ورودی کنترلی (نیروی محرک واگن^۴ و نیروی محرک کابل) و سه متغیر برای کنترل (موقعیت افقی واگن، طول کابل و زاویه نوسان بار) وجود دارد. این ویژگی زیرفعال منجر به یک اثر جفت شدگی بین حرکت نوسانی بار و حرکت واگن می‌شود. علاوه بر آن، دینامیک نوسان بار کنترل نشده باعث مشکلات اینمی در سیستم‌های جرثقیل می‌شود. از این رو، مسئله کنترل و پایدار سازی سیستم جرثقیل چالش بزرگیز است.

تحقیقات زیادی در طول چند دهه گذشته در حوزه کنترل جرثقیل‌های دو بعدی توسط پژوهشگران انجام شده است و روش‌های کنترلی جدیدی با اهداف مختلف ارائه شده است. کنترل کننده فارزی یک از روش‌هایی است که در [2,1] مورد استفاده قرار گرفته است. بی و همکارانش [3] این روش کنترلی را برای حذف نوسان و کنترل موقعیت یک جرثقیل کاتنیسر پیشنهاد داده‌اند. کنترل کننده پیشنهاد شده به‌طول کابل‌های مختلف مقاوم است و توانایی کار در شرایط اولیه متفاوتی را دارد. کنترل کننده‌های دیگری در [5,4] برای کنترل موقعیت واگن و همچنین حذف نوسان بار ارائه شده است و تأثیر کنترل کننده بر روی عملکرد سیستم با مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی اعتبارسنجی شده است. روش کنترلی مقاوم نیز برای کنترل این سیستم‌ها ارائه شده است. هیلهورست و همکارانش [6] کنترل کننده مرتبه ثابت^۵ H_2/H_{∞} برای جرثقیل هوایی پیشنهاد داده‌اند. قابلیت روش ارائه شده در این مقاله توسط اعتبارسنجی‌های انجام شده بر روی یک سیستم جرثقیل در مقیاس آزمایشگاهی با طول کابل متغیر نشان داده شده است. یکی از روش‌هایی که در کنترل جرثقیل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است، کنترل مود لغزشی است. در [7] کنترل کننده مود لغزشی مرتبه دوم برای انتقال بار سریع، دقیق و نیز حذف نوسان با وجود عدم قطعیت در مدل و عملگرهای دینامیکی مدل نشده ارائه شده است. نتایج تجربی ارائه شده نشان‌دهنده عملکرد خوب سیستم است. لی و همکارانش [8] یک کنترل کننده ضدنوسان مود لغزشی برای جرثقیل هوایی پیشنهاد داده‌اند. روش کنترلی ارائه شده پایداری مجانی را در حالی که سیگنال‌ها محدود باقی می‌مانند، تضمین می‌کند. تأثیر روش کنترل ارائه شده توسط آزمایشات انجام شده تثبیت شده است. نگو و همکارش [9] یک کنترل کننده مود لغزشی تطبیقی برای جرثقیل طراحی کرده‌اند. در این کنترل کننده، بهره کنترلی متغیر است و توسط یک قانون تطبیقی به دست می‌آید. در این مقاله

¹ Under-actuated² Trolley³ Fixed-order⁴ Gain scheduling⁵ Particle Swarm Optimization (PSO)

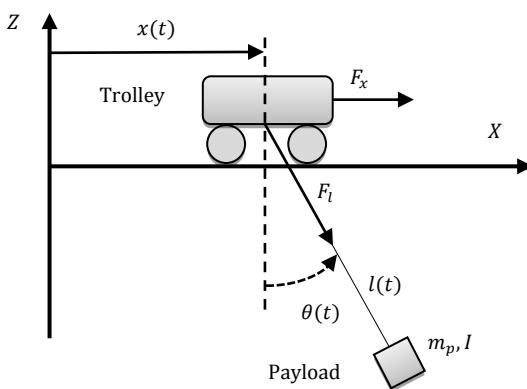


Fig. 1 Sway of the load caused by trolley movement

شکل 1 نوسان بار ناشی از حرکت واگن

آوردن این قوانین کنترلی از روش‌های خطی‌سازی پسخور جزئی و مود لغزشی استفاده شده است. لازم به ذکر است که اطلاعات زاویه نوسان بار، سرعت زاویه‌ای نوسان، جایجایی و سرعت واگن، طول کابل بالابر و نرخ زمانی تغییر آن توسط حسگرها دریافت می‌شوند.

همان‌طور که قبل اشاره شد، جرثقیل کانتینر یک سیستم زیرفعال است و بنابراین، قبل از طراحی کنترل‌ها لازم است دینامیک آن به دو بخش فعال و غیرفعال تفکیک شود.

1-3- تفکیک مدل دینامیکی

جرثقیل کانتینر یک سیستم زیرفعال است که در آن سه سیگنال خروجی توسط دو عملگر ایجاد می‌شوند. مدل دینامیکی جرثقیل کانتینر باید به دو دینامیک مشخص تفکیک شود، به نام‌های سیستم فعال و غیرفعال. به این منظور، $q_1 = [x \quad l]^T$ برای حالت‌های فعال و $q_2 = \theta$ برای حالت غیرفعال تعریف می‌شوند. بنابراین معادله (8) را می‌توان به دو معادله زیر تقسیم نمود:

$$M_{11}(q)\ddot{q}_1 + M_{12}(q)\ddot{q}_2 + C_{11}(q, \dot{q})\dot{q}_1 + C_{12}(q, \dot{q})\dot{q}_2 + G_1(q) = U \quad (10)$$

$$M_{21}(q)\ddot{q}_1 + M_{22}(q)\ddot{q}_2 + C_{21}(q, \dot{q})\dot{q}_1 + C_{22}(q, \dot{q})\dot{q}_2 + G_2(q) = 0 \quad (11)$$

که در آن

$$M_{11}(q) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \quad M_{12}(q) = \begin{bmatrix} m_{13} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C_{11}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & V_{m12} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_{21}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & V_{m32} \end{bmatrix},$$

$$C_{12}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} V_{m13} \\ V_{m23} \end{bmatrix}, \quad G_1(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ -m_p g \cos \theta \end{bmatrix},$$

$$M_{21}(q) = [m_{31} \quad 0], \quad M_{22}(q) = m_{33}, \quad C_{22}(q, \dot{q}) = V_{m33}, \quad G_2(q) = m_p g l \sin \theta, \quad U = \begin{bmatrix} F_x \\ F_l \end{bmatrix} \quad (12)$$

معادله فعال (10) قید مستقیم بین حالت‌های فعال q_1 و عملگرهای U را نشان می‌دهد. در حالی که، معادله غیرفعال (11) رابطه‌ای بین حالت غیرفعال q_2 و ورودی‌های U را نشان نمی‌دهد. به طور فیزیکی، سیگنال‌های ورودی U به طور مستقیم حالت‌های فعال q_1 را کنترل می‌کنند و به طور غیرمستقیم حالت غیرفعال q_2 را تحریک می‌کنند.

2-3- طراحی کنترل کننده خطی سازی پسخور جزئی

در این بخش، یک کنترل کننده با روش خطی‌سازی پسخور جزئی برای سیستم جرثقیل کانتینر دو بعدی طراحی می‌گردد. قانون کنترلی ارائه شده سه هدف دارد: تنظیم موقعیت واگن، تنظیم طول کابل و حذف نوسان بار. به عبارت دیگر، هدف از کنترل این است که بردار حالت فعال q_1 و اسکالر

کنترلرها در حضور عدم قطعیت جرمی، نویز حسگرها و اغتشاش عملگرها مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. در پایان، نتیجه‌گیری در بخش 6 و مراجع در بخش 7 ارائه می‌گردد.

2- استخراج معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم جرثقیل

برای حذف نوسان و کنترل موقعیت و طول کابل بالابر یک بار معلق، باید بررسی گردد که چه قسمی از دینامیک جرثقیل باید در فرآیند طراحی قانون کنترلی وجود داشته باشد و چه قسمی می‌تواند در نظر گرفته نشود. "شکل 1" نمایی از حرکت نوسانی بار را که از حرکت واگن ناشی می‌شود، نشان می‌دهد که در آن محور X جهت حرکت واگن، محور Z جهت عمودی، F_l زاویه نوسان بار، $x(t)$ طول کابل بالابر، F_x و $\theta(t)$ به کابل در جهت l می‌باشند. در مدل‌سازی دینامیکی جرثقیل هواپی مبتدی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است: 1- بار و واگن توسط یک کابل صلب بدون جرم به یکدیگر متصل شده‌اند، که حرکت آونگی بار در نظر گرفته شده است. 2- تمامی المان‌های اصطکاکی در حرکت واگن و بالابر را می‌توان ناچیز در نظر گرفت. فرضیات بالا یک مدل سه درجه آزادی از جرثقیل را با سه مختصه تعیین یافته $q(t) \in R^3$ به صورت زیر ارائه می‌نماید:

$$q(t) = [x(t) \quad l(t) \quad \theta(t)]^T \quad (1)$$

مختصات بار به صورت (x_p, z_p) در نظر گرفته شده است. بنابراین x_p و z_p به صورت زیر خواهد شد:

$$x_p = x + l \sin \theta, \quad z_p = -l \cos \theta \quad (2)$$

با استفاده از رابطه (2)، انرژی جنبشی T و انرژی پتانسیل V به صورت

زیر به دست می‌آیند:

$$T = \frac{1}{2}(m_t + m_p)\dot{x}^2 + \frac{1}{2}(m_p + m_l)\dot{l}^2 + \frac{1}{2}m_p(l\dot{\theta})^2 + m_p\dot{x}(l \cos \theta \dot{\theta} + \sin \theta \dot{l}) + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 \quad (3)$$

$$V = -m_p g l \cos \theta \quad (4)$$

که در آن m_p جرم بار، m_t و m_l به ترتیب جرم معادل سیستم‌های

واگن و بالابر، I ممان اینرسی جرمی بار و g شتاب گرانشی هستند. سرانجام،

معادلات حرکت با استفاده از معادله لاگرانژ به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$(m_t + m_p)\ddot{x} + m_p \sin \theta \ddot{l} + m_p l \cos \theta \ddot{\theta} + 2m_p \cos \theta \dot{l} \dot{\theta} - m_p l \sin \theta \dot{\theta}^2 = F_x \quad (5)$$

$$m_p \sin \theta \ddot{x} + (m_p + m_l)\ddot{l} - m_p l \dot{\theta}^2 - m_p g \cos \theta = F_l \quad (6)$$

$$m_p l \cos \theta \ddot{x} + (m_p l^2 + I)\ddot{\theta} + 2m_p l \dot{l} \dot{\theta} + m_p g l \sin \theta = 0 \quad (7)$$

معادلات دینامیکی فوق را می‌توان به فرم ماتریسی زیر نوشت:

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = U \quad (8)$$

که در آن

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & 0 \\ m_{31} & 0 & m_{33} \end{bmatrix}, \quad V_m = \begin{bmatrix} 0 & V_{m12} & V_{m13} \\ 0 & 0 & V_{m23} \\ 0 & V_{m32} & V_{m33} \end{bmatrix},$$

$$G = [0 \quad -m_p g \cos \theta \quad m_p g l \sin \theta]^T,$$

$$U = [F_x \quad F_l \quad 0]^T,$$

$$m_{11} = m_p + m_t, \quad m_{12} = m_p \sin \theta, \quad m_{13} = m_p l \cos \theta,$$

$$m_{21} = m_p \sin \theta, \quad m_{22} = m_p + m_l,$$

$$m_{31} = m_p l \cos \theta, \quad m_{33} = m_p l^2 + I,$$

$$V_{m12} = m_p \dot{\theta} \cos \theta, \quad V_{m13} = -m_p l \sin \theta \dot{\theta} + m_p \cos \theta \dot{l},$$

$$V_{m23} = -m_p l \dot{\theta}, \quad V_{m32} = m_p l \dot{\theta}, \quad V_{m33} = m_p l \dot{l} \quad (9)$$

3- طراحی کنترل کننده‌ها

در این بخش، دو قانون کنترلی غیرخطی برای از بین بردن زاویه نوسان بار و کنترل موقعیت واگن و طول کابل بالابر طراحی شده است. برای به دست

$$\ddot{q}_2 = V_u = -K_{ud}\dot{q}_2 - K_{up}q_2 \quad (23)$$

که در آن $V_u \in R$ ورودی معادل حالت غیرفعال است. K_{up} و K_{ud} ثوابت مثبت هستند. ورودی کنترلی U به دست آمده از (17) و (23) پایداری حالت غیرفعال q_2 را تضمین می کند به علت این که دینامیک خطای ریدیابی زیر:

$$\ddot{q}_2 + K_{ud}\dot{q}_2 + K_{up}q_2 = 0 \quad (24)$$

برای هر $0 < K_{ud} < K_{up}$ پایدار است. به عبارت دیگر، اگر K_{ud} به درستی انتخاب شوند، ورودی معادل V_u زاویه نوسان بار θ را به سمت صفر سوق می دهد.

برای پایدارسازی حالت های غیرفعال و فعال، ورودی های معادل کلی با ترکیب خطی V_a و V_u به صورت زیر پیشنهاد شده است:

$$V = V_a + \alpha_u V_u \\ = -K_{ad}\dot{q}_1 - K_{ap}(q_1 - q_{1d}) - \alpha_u(K_{ud}\dot{q}_2 + K_{up}q_2) \quad (25)$$

که در آن $\alpha_u = \begin{bmatrix} \alpha \\ 0 \end{bmatrix}$ به عنوان بردار وزنی و $V \in R^2$ است. بنابراین، با در نظر گرفتن q_1 به عنوان خروجی اول، قانون کنترلی کلی با جایگزینی V_a با V در (19) حاصل می شود. با جایگذاری (25) در (19) قانون کنترلی به صورت زیر خواهد شد:

$$U = (\bar{C}_1(q, \dot{q}) - \bar{M}(q)K_{ad})\dot{q}_1 \\ + (\bar{C}_2(q, \dot{q}) - \bar{M}(q)\alpha_u K_{ud})\dot{q}_2 \\ - \bar{M}(q)K_{ap}(q_1 - q_{1d}) - \bar{M}(q)\alpha_u K_{up}q_2 + \bar{G}(q) \quad (26)$$

همان طوری که در بخش شبیه سازی مشاهده خواهد شد، کنترل کننده غیرخطی (26) به طور مجانبی همه مسیرهای حالت سیستم را پایدار می کند.

3-3- بررسی پایداری سیستم با کنترل خطی سازی پسخور جزئی
قانون کنترلی U از دینامیک فعل (16) به دست آمده است. پایداری قسمت باقی مانده (قسمت غیرفعال) سیستم حلقه بسته که دینامیک داخلی نام دارد در این بخش بررسی می شود. اگر دینامیک داخلی پایدار باشد، آن گاه مسئله کنترل ریدیابی حل شده است. با جایگذاری قانون کنترلی (26) در زیر سیستم غیرفعال (17) منجر به دینامیک داخلی به صورت زیر می شود:

$$\ddot{q}_2 = -M_{22}^{-1}(q)(-M_{21}(q)(K_{ad}\dot{q}_1 + \alpha_u K_{ud}\dot{q}_2) \\ + K_{ap}(q_1 - q_{1d}) + \alpha_u K_{up}q_2) + C_{21}(q, \dot{q})\dot{q}_1 \\ + C_{22}(q, \dot{q})\dot{q}_2 + G_2(q)) \quad (27)$$

اگر دینامیک صفر پایدار نمایی باشد، پایداری محلی دینامیک داخلی تضمین می شود. با قرار دادن $q_1 = q_{1d}$ در دینامیک داخلی (27) دینامیک صفر سیستم به صورت زیر حاصل می شود:

$$\ddot{q}_2 + M_{22}^{-1}(q)((C_{22}(q, \dot{q}) - M_{21}(q)\alpha_u K_{ud})\dot{q}_2 \\ - M_{21}(q)\alpha_u K_{up}q_2 + G_2(q)) = 0 \quad (28)$$

پایداری دینامیک صفر با استفاده از تئوری خطی سازی لیاپانوف بررسی شده است. در ابتدا، دینامیک صفر را با تعريف دو متغیر حالت زیر نشان می دهیم:

$$z_1 = \theta, \quad z_2 = \dot{\theta} \quad (29)$$

با $z = [z_1 \quad z_2]^T$ به عنوان بردار حالت. دینامیک صفر غیرخطی حول نقطه تعادل (29) $(q_2 = 0)$ است اگر سیستم خطی سازی شده اکیداً پایدار باشد. خطی سازی دینامیک صفر حول نقطه $z = 0$ منجر به یک سیستم خطی سازی شده در فرم زیر می شود:

$$\dot{z} = Az \quad (30)$$

که در آن

غیرفعال q_2 به ترتیب به مقادیر ثابت مطلوب q_{1d} و q_{2d} برسند. در این بخش، دینامیک سیستم که شامل روابط (10) و (11) است، به یک فرم خطی معادل بر پایه روش خطی سازی پسخور تبدیل شده است.

حالت غیرفعال q_2 را می توان از طریق رابطه (11) به صورت زیر نوشت:

$$\ddot{q}_2 = -M_{22}^{-1}(q)(M_{21}(q)\dot{q}_1 + C_{21}(q, \dot{q})\dot{q}_1 \\ + C_{22}(q, \dot{q})\dot{q}_2 + G_2(q)) \quad (13)$$

با جایگذاری رابطه (13) در رابطه (10) و ساده سازی به معادله (14) می رسیم:

$$\bar{M}(q)\dot{q}_1 + \bar{C}_1(q, \dot{q})\dot{q}_1 + \bar{C}_2(q, \dot{q})\dot{q}_2 + \bar{G}(q) = U \quad (14)$$

که در آن

$$\bar{M}(q) = M_{11}(q) - M_{12}(q)M_{22}^{-1}(q)M_{21}(q), \quad \bar{C}_1(q, \dot{q}) =$$

$$C_{11}(q, \dot{q}) - M_{12}(q)M_{22}^{-1}(q)C_{21}(q, \dot{q}), \quad \bar{C}_2(q, \dot{q}) = C_{12}(q, \dot{q}) - M_{12}(q)M_{22}^{-1}(q)C_{22}(q, \dot{q}),$$

$$\bar{G}(q) = G_1(q) - M_{12}(q)M_{22}^{-1}(q)G_2(q) \quad (15)$$

معادله (14) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\ddot{q}_1 = \bar{M}^{-1}(q)(U - \bar{C}_1(q, \dot{q})\dot{q}_1 - \bar{C}_2(q, \dot{q})\dot{q}_2 - \bar{G}(q)) \quad (16)$$

با قرار دادن معادله (16) در معادله (13) داریم:

$$\ddot{q}_2 = -M_{22}^{-1}(q)(M_{21}(q)\bar{M}^{-1}(q)(U - \bar{C}_1(q, \dot{q})\dot{q}_1 \\ - \bar{C}_2(q, \dot{q})\dot{q}_2 - \bar{G}(q)) + C_{21}(q, \dot{q})\dot{q}_1 \\ + C_{22}(q, \dot{q})\dot{q}_2 + G_2(q)) \quad (17)$$

بنابراین، رفتار فیزیکی سیستم جرثقیل کانتینر را می توان توسط دینامیک های فعل (16) و غیرفعال (17) مشخص کرد که در آن ها روابط ریاضی بین q_1 , q_2 و U را می توان به روشنی مشاهده کرد.

با در نظر حالت های فعل q_1 به عنوان خروجی های سیستم، دینامیک فعل را می توان توسط رابطه زیر "خطی سازی" کرد:

$$\ddot{q}_1 = V_a \quad (18)$$

که در آن $V_a \in R^2$ به عنوان ورودی کنترلی معادل است. سپس، سیگنال کنترلی U به صورت زیر خواهد شد:

$$U = \bar{M}(q)V_a + \bar{C}_1(q, \dot{q})\dot{q}_1 + \bar{C}_2(q, \dot{q})\dot{q}_2 + \bar{G}(q) \quad (19)$$

کنترل کننده U طوری طراحی می شود که حالت های فعل

$$q_1 = [x_d \quad l_d]^T \quad (20)$$

این منظور ورودی کنترلی معادل زیر انتخاب می شود:

$$V_a = \ddot{q}_{1d} - K_{ad}(q_1 - q_{1d}) - K_{ap}(q_1 - q_{1d}) \quad (20)$$

با در نظر گرفتن $q_{1d} = \text{const}$ رابطه (20) به صورت زیر ارائه می شود:

$$V_a = -K_{ad}\dot{q}_1 - K_{ap}(q_1 - q_{1d}) \quad (21)$$

که در آن (27) $K_{ap} = \text{diag}(K_{ap1}, K_{ap2})$ و $K_{ad} = \text{diag}(K_{ad1}, K_{ad2})$ ماتریس های قطری مثبت هستند.

با در نظر گرفتن معادله (20) و (21) معادله دیفرانسیل خطای ریدیابی توسط رابطه زیر حاصل می شود:

$$\ddot{q}_1 + K_{ad}\dot{q}_1 + K_{ap}\dot{q}_1 = 0 \quad (22)$$

که در آن $q_1 - q_{1d} = \tilde{q}_1$ بردار خطای ریدیابی حالت های فعل است. واضح است که دینامیک خطای ریدیابی (22) پایدار مجانبی است اگر

$K_{ap} > 0$ و $K_{ad} > 0$ (با شرایط اولیه $\dot{q}_1(0) = 0$ و $\dot{q}_2(0) = 0$) باشد.

به عبارت دیگر، خطاهای ریدیابی حالت های فعل \tilde{q}_1 به صفر می رسند (یا q_1 به همگرا می شود) وقتی t به سمت بینهایت می رود. بدطور دقیق تر،

ورودی کنترلی معادل V_a حالت های فعل q_1 را وادر می کند که به صورت مجانبی به مرجع q_{1d} دست یابند.

قانون کنترلی (19) متناظر با ورودی معادل V_a فقط برای پایدارسازی

مجانبی حالت های فعل q_1 قابل استفاده است. برای پایدارسازی حالت غیرفعال q_2 , روش خطی سازی پسخور را می توان به زیر دینامیک (17) به صورت زیر اعمال نمود:

$$+ (\lambda_2 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) C_{22}(q, \dot{q})) \dot{q}_2 \\ - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) G_2(q) \quad (40)$$

هدف کنترلی با انتخاب ورودی کنترلی U طوری که تک تک اجزای سطح لغزش شرط کافی زیر را ارضاء نمایند، قابل دستیابی است [13]:

$$\frac{d}{dt} s_i^2 \leq -\eta_i |s_i| \quad \forall i \in \{1, 2\} \quad (41)$$

که در آن η_i یک ثابت مثبت است.

معادله (41) را مجدداً بازنویسی می کنیم:

$$\bar{M}(q)\ddot{q}_1 + \bar{C}_1(q, \dot{q})\dot{q}_1 + \bar{C}_2(q, \dot{q})\dot{q}_2 + \bar{G}(q) = U \quad (42)$$

با اعمال کردن شرط رابطه (41) بر s_i تضمین می شود که s در مدت زمان محدودی به سمت صفر همگرا شود.

بنابراین، ورودی کنترلی U به صورت زیر انتخاب می شود:

$$U = \bar{C}_1(q, \dot{q})\dot{q}_1 + \bar{C}_2(q, \dot{q})\dot{q}_2 + \bar{G}(q) \\ - \bar{M}(q) \left(I_3 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) M_{21}(q) \right)^{-1} \\ [(\lambda_1 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) C_{21}(q, \dot{q})) \dot{q}_1 \\ + (\lambda_2 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) C_{22}(q, \dot{q})) \dot{q}_2 \\ - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) G_2(q)] - K \text{sgn}(s) \quad (43)$$

که در آن ماتریس $K = \text{diag}\{K_1, K_2\}$ پارامتر طراحی و یک ماتریس

مثبت معین است که تعیین می کند s با چه سرعتی به صفر همگرا می شود.

تابع (\cdot) در معادله (43) برداری را با اجزای $\text{sgn}(s_i)$ نشان می دهد که

تابع $\text{sgn}(\cdot)$ علامت است:

$$\text{sgn}(s_i) = \begin{cases} +1 & \text{اگر } s_i > 0 \\ 0 & \text{اگر } s_i = 0 \\ -1 & \text{اگر } s_i < 0 \end{cases} \quad (44)$$

3-5- بررسی پایداری در سطح لغزشی

در مورد یک سیستم تمام فعال¹ (با پسخور حالت کامل)، ثابت شده است که روش کنترل لغزشی تضمین می کند که پاسخ سیستم به طور مجانبی به سطح لغزش برسد. چنین ادعایی نمی تواند برای سیستم های زیر فعال درست باشد. اگر α_2 در معادله (43) به گونه ای انتخاب شود که معکوس ماتریس $(I_3 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) M_{21}(q))$ وجود داشته باشد تضمین می کند که همه مسیرهای سیستم به سطح لغزش می رسانند. با این حال، هیچ تضمینی وجود ندارد که بر روی سطح لغزش، مسیرهای سیستم به مقادیر مطلوب خود برسند.

در سیستم های زیر فعال، اگر ثابت شود که ترکیب دو معادله سطح لغزش خطی در (37) و شتاب غیرفعال بدست آمده از (11) پایدار هستند، پایداری در سطح لغزشی برقرار است.

گزاره زیر شرایط کافی برای پایداری مجانبی سیستم جرثقیل کانتینر با استفاده از کنترل کننده مود لغزشی داده شده با معادله (43) را ارائه می دهد.

گزاره. کنترل کننده مود لغزشی:

$$u = \bar{C}_1(q, \dot{q})\dot{q}_1 + \bar{C}_2(q, \dot{q})\dot{q}_2 + \bar{G}(q) \\ - \bar{M}(q) \left(I_3 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) M_{21}(q) \right)^{-1} \\ [(\lambda_1 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) C_{21}(q, \dot{q})) \dot{q}_1 \\ + (\lambda_2 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) C_{22}(q, \dot{q})) \dot{q}_2 \\ - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) G_2(q)] - K \text{sgn}(s) \quad (45)$$

سیستم جرثقیل کانتینر توصیف شده توسط مدل داده شده در معادله

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{\partial f}{\partial z_1} & \frac{\partial f}{\partial z_2} \end{bmatrix}_{z=0} \quad (31)$$

ماتریس ژاکوبین است که معادله مشخصه آن به فرم زیر است:

$$|A - sI_2| = s^2 - \left(\frac{\partial f}{\partial z_2} \Big|_{z=0} \right) s - \frac{\partial f}{\partial z_1} \Big|_{z=0} \quad (32)$$

سیستم خطی سازی شده (30) حول نقطه تعادل $z = 0$ پایدار است، اگر یک ماتریس هوروپیتر باشد. براساس معیار هوروپیتر و نتایج محاسبات، شرط

قیدی پارامتر های کنترلی به صورت زیر محاسبه شده است:

$$\alpha k_{ud} < 0, \quad \alpha k_{up} < g \quad (33)$$

بنابراین، اگر رابطه بالا میان پارامتر های کنترلی برقرار باشد، دینامیک

صفر حول نقطه تعادل $z = 0$ پایدار است، که منجر به پایداری محلی

دینامیک داخلی می شود.

3-4- طراحی کنترل کننده مود لغزشی

در این بخش، یک کنترل کننده مود لغزشی برای سیستم طراحی شده است.

قانون کنترلی ارائه شده سه هدف دارد: تنظیم موقعیت و اگن، تنظیم طول کابل و حذف نوسان بار.

خطاهای ردیابی به صورت زیر تعریف می گردند:

$$e_1 = q_1 - q_{1d} = \begin{bmatrix} x - x_d \\ l - l_d \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$e_2 = q_2 - q_{2d} = \theta - \theta_d \quad (35)$$

بردار e_1 خطای متناظر با حالت های فعال و اسکالر e_2 خطای متناظر با

حالت غیرفعال است.

و λ_{12} اسکالر های مثبت هستند. همچنین ماتریس های λ_1 و α_2 و λ_2 به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\lambda_1 = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & 0 \\ 0 & \lambda_{12} \end{bmatrix}, \quad \alpha_2 = \begin{bmatrix} \alpha_{21} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \lambda_2 = \begin{bmatrix} \lambda_{21} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

λ_{21} و α_{21} پارامتر های طراحی هستند.

سطح لغزش به صورت زیر انتخاب شود:

$$s = \dot{e}_1 + \lambda_1 e_1 + \alpha_2 \dot{e}_2 + \lambda_2 e_2 \quad (37)$$

باید توجه کرد که سطح s در معادله (37) شامل دو جزء است،

$$s = [s_1 \quad s_2]^T \quad (38)$$

معادله زیر به دست می آید:

$$\dot{s} = \ddot{e}_1 + \lambda_1 \dot{e}_1 + \alpha_2 \ddot{e}_2 + \lambda_2 \dot{e}_2 \\ = \ddot{q}_1 + \lambda_1 \dot{q}_1 + \alpha_2 \ddot{q}_2 + \lambda_2 \dot{q}_2 \quad (38)$$

با جایگذاری معادله (13) در معادله (38) معادله زیر حاصل می شود:

$$\dot{s} = \ddot{q}_1 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) [M_{21}(q) \dot{q}_1 \\ + C_{21}(q, \dot{q}) \dot{q}_1 + C_{22}(q, \dot{q}) \dot{q}_2 + G_2(q)] \\ + \lambda_1 \dot{q}_1 + \lambda_2 \dot{q}_2 \\ = \ddot{q}_1 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) M_{21}(q) \dot{q}_1 \\ - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) C_{21}(q, \dot{q}) \dot{q}_1 \\ - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) C_{22}(q, \dot{q}) \dot{q}_2 \\ - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) G_2(q) + \lambda_1 \dot{q}_1 + \lambda_2 \dot{q}_2 \\ = (I_3 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) M_{21}(q)) \dot{q}_1 \\ + (\lambda_1 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) C_{21}(q, \dot{q})) \dot{q}_1 \\ + (\lambda_2 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) C_{22}(q, \dot{q})) \dot{q}_2 \\ - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) G_2(q) \quad (39)$$

با جایگذاری معادله (16) در معادله (39) به معادله زیر می توان دست

یافت

$$\dot{s} = (I_3 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) M_{21}(q)) \bar{M}^{-1}(q) \\ (U - \bar{C}_1(q, \dot{q}) \dot{q}_1 - \bar{C}_2(q, \dot{q}) \dot{q}_2 - \bar{G}(q)) \\ + (\lambda_1 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) C_{21}(q, \dot{q})) \dot{q}_1$$

¹ Fully actuated system

² Full state feedback

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} x_2 \\ h(x) \\ -\lambda_1 x_3 - \alpha_2 x_2 - \lambda_2 x_1 \end{bmatrix} = f(x) \quad (55)$$

سیستم داده شده توسط معادله (55) یک سیستم خودگردان است. ما می خواهیم نشان دهیم که با انتخاب مناسب λ_1 و λ_2 و α_2 به صورت مجانبی به صفر همگرا می شود.

اگر معادله (55) حول نقطه تعادل $0 = x$ خطی سازی شود، به سیستم خطی زیر می رسیم:

$$\dot{x} = Ax \quad (56)$$

که در آن

$$A = \frac{\partial f(x)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0_{1 \times 2} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ -\lambda_2 & -\alpha_2 & -\lambda_1 \end{bmatrix} \quad (57)$$

بعد از انجام محاسبات، A_{21} و A_{22} و A_{23} به صورت زیر حاصل می شوند:

$$A_{21} = \frac{-(m_p(g + \lambda_{11}\lambda_{21}))}{(m_p + I - \alpha_2 m_p)}, \quad A_{22} = \frac{(m_p(\lambda_{21} - \alpha_2 \lambda_{11}))}{(m_p + I - \alpha_2 m_p)},$$

$$A_{23} = \begin{bmatrix} -(\lambda_{11}^2 m_p) & 0 \\ I - m_p(\alpha_{21} - 1) & 0 \end{bmatrix} \quad (58)$$

برای تضمین پایداری سیستم خطی سازی شده در معادله (56) ماتریس حالت خطی سازی شده A باید هوروپیتر باشد (مقادیر ویژه آن در سمت چپ صفحه مختلف قرار داشته باشند).

معادله مشخصه سیستم خطی سازی شده در معادله (56) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\det(sI_4 - A) = (\lambda_{12} + s)P(s) \quad (59)$$

که در آن

$$P(s) = s^3 + \left(\frac{(\lambda_{21} - \lambda_{11})m_p - \lambda_{11}I}{(\alpha_{21} - 1)m_p - I} \right) s^2 + \left(\frac{-g m_p}{(\alpha_{21} - 1)m_p - I} \right) s + \left(\frac{-g \lambda_{11} m_p}{(\alpha_{21} - 1)m_p - I} \right) \quad (60)$$

شرط کافی برای پایداری سطح لغزش می تواند با انتخاب پارامترهای $\{\alpha_{21}, \lambda_{21}, \lambda_{11}\}$ به گونه ای که چند جمله ای $P(s)$ هوروپیتر باشد، تأمین شود.

با استفاده از معیار راوث-هوروپیتر، شرایط زیر باید بین پارامترها برقرار باشد تا چند جمله ای $P(s)$ هوروپیتر باشد:

$$(\alpha_{21} - 1)m_p - I < 0, \quad (\lambda_{21} - \lambda_{11})m_p - \lambda_{11}I < 0 \quad (61)$$

اینها همان شرایطی است که در معادله (46) آورده شده بود. از آنجایی که سیستم داده شده در معادله (56) پایدار مجانبی است، پس x به صورت مجانبی به صفر همگرا می شود. بنابراین، از معادله (52) وقتی زمان به بی نهایت میل می کند q_1 به q_{1d} و q_2 به q_{2d} و \dot{q}_2 به صفر همگرا می شود. همچنین معادله (47) ایجاب می کند که \dot{q}_1 به q_1 وقتی زمان به بی نهایت میل می کند، به صفر همگرا می شود. بنابراین، کنترل کننده در معادله (43) تضمین می کند که حالت های سیستم به سطح لغزش $s = 0$ بررسد و شرایط کافی در معادله (46) تضمین می کند که \dot{q}_1 به q_1 و \dot{q}_2 به q_{2d} و \ddot{q}_2 به صفر همگرا می شود. بنابراین اثبات گزاره.

بنابراین، می توان نتیجه گرفت که وقتی کنترل کننده مود لغزشی در معادله (43) به مدل جرثقیل کانتینر داده شده در معادلات (5)، (6) و (7) اعمال شود، اگر شرایط کافی در معادله (46) ارضاء شود همگرایی مجانبی حالت های سیستم به مقادیر مطلوب خود را تضمین می کند.

به منظور کاهش پدیده چترینگ¹ در سیگنال کنترلی، تابع $\text{sat}(s/\varepsilon)$ به

(8) را پایدار می کند اگر ضرایب داده شده در معادله (36) شرایط کافی زیر را ارضا نمایند:

$$(\alpha_{21} - 1)m_p - I < 0, \quad (\lambda_{21} - \lambda_{11})m_p - \lambda_{11}I < 0 \quad (46)$$

اینات. از آنجایی که کنترل کننده در معادله (45) تضمین می کند که همه حالت های سیستم به سطح لغزش $s = 0$ در زمان محدود می رساند، حالتی را در نظر بگیرید که مسیر های حالت سیستم به سطح لغزش $s = 0$ رسیده اند. سپس، با استفاده از معادله (37) با $\dot{q}_{1d} = 0$ ایجاب می کند که

$$\dot{q}_1 + \lambda_1(q_1 - q_{1d}) + \alpha_2 \dot{q}_2 + \lambda_2 q_2 = 0 \quad (47)$$

پس می توان نوشت

$$\dot{q}_1 = -\lambda_1(q_1 - q_{1d}) - \alpha_2 \dot{q}_2 - \lambda_2 q_2 \quad (48)$$

با استفاده از معادلات (13)، (14) و (45) وقتی $s = 0$ است، معادله شتاب غیرفعال را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_2 &= -M_{22}^{-1}(q)[M_{21}(q)\dot{q}_1 + C_{21}(q, \dot{q})\dot{q}_1 \\ &\quad + C_{22}(q, \dot{q})\dot{q}_2 + G_2(q)] \\ &= -M_{22}^{-1}(q)[M_{21}(q)\bar{M}^{-1}(q) \\ &\quad (u - C_1(q, \dot{q})\dot{q}_1 - G(q)) + C_{21}(q, \dot{q})\dot{q}_1 \\ &\quad + C_{22}(q, \dot{q})\dot{q}_2 + G_2(q)] \\ &= -M_{22}^{-1}(q)\{-M_{21}(q)\bar{M}^{-1}(q)\bar{M}(q) \\ &\quad (I_3 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q)M_{21}(q))^{-1} \\ &\quad [\lambda_1 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q)C_{21}(q, \dot{q})]\dot{q}_1 \\ &\quad + (\lambda_2 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q)C_{22}(q, \dot{q}))\dot{q}_2 \\ &\quad - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q)G_2(q)] + C_{21}(q, \dot{q})\dot{q}_1 \\ &\quad + C_{22}(q, \dot{q})\dot{q}_2 + G_2(q)\} \end{aligned} \quad (49)$$

معادله (49) را می توان به فرم فشرده زیر نوشت:

$$\ddot{q}_2 = P_1(q, \dot{q})\dot{q}_1 + P_2(q, \dot{q})\dot{q}_2 + P_3(q) \quad (50)$$

که در آن

$$\begin{aligned} P_1(q, \dot{q}) &= [M_{22}^{-1}(q)M_{21}(q) \\ &\quad (I_3 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q)M_{21}(q))^{-1} \\ &\quad (\lambda_1 - M_{22}^{-1}(q)C_{21}(q, \dot{q}))] \\ P_2(q, \dot{q}) &= [M_{22}^{-1}(q)M_{21}(q) \\ &\quad (I_3 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q)M_{21}(q))^{-1} \\ &\quad (\lambda_2 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q)C_{22}(q, \dot{q})) \\ &\quad - M_{22}^{-1}(q)C_{22}(q, \dot{q})] \\ P_3(q) &= -[M_{22}^{-1}(q)M_{21}(q) \\ &\quad (I_3 - \alpha_2 M_{22}^{-1}(q)M_{21}(q))^{-1} \alpha_2 M_{22}^{-1}(q) \\ &\quad + M_{22}^{-1}(q)]G_2(q) \end{aligned} \quad (51)$$

فرض کنید

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_2 \\ \dot{q}_2 \\ (q_1 - q_{1d}) \end{bmatrix} \quad (52)$$

دقت شود که $x \in R^4$ است. همچنین دقت شود که $P_1(q, \dot{q})$ و $P_2(q, \dot{q})$ را می توان به صورت توابعی از x نوشت. زیرا \dot{q}_1 تابعی از x است.

بنابراین معادله (48) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{x}_3 = -\lambda_1 x_3 - \alpha_2 x_2 - \lambda_2 x_1 \quad (53)$$

و معادله (50) به صورت زیر ارائه می شود:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= P_1(x)(\lambda_1 x_3 - \alpha_2 x_2 - \lambda_2 x_1) + P_2(x)x_2 + P_3(x) \\ &= -P_1(x)\lambda_2 x_1 - P_1(x)\alpha_2 x_2 - P_1(x)\lambda_1 x_3 \\ &\quad + P_2(x)x_2 + P_3(x) \\ &= -P_1(x)\lambda_2 x_1 + (P_2(x) - P_1(x)\alpha_2)x_2 \\ &\quad - P_1(x)\lambda_1 x_3 + P_3(x) = h(x) \end{aligned} \quad (54)$$

با استفاده از معادلات (52)، (53) و (54) می توان نوشت:

¹ Chattering

هارمونی (*HMCR*), نرخ تنظیم صدادهی (*PAR*), تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری (*N*), تعداد بداهه‌نوازی (*NI*) (معیار توقف الگوریتم) و فاصله پنهانی باند (*BW*) یک محل حافظه است که تمام بردارهای جواب (دسته متغیرهای تصمیم‌گیری) در آن ذخیره می‌شوند.

4-2-2-2- تعیین اولیه حافظه هارمونی با بردارهای حل تصادفی
در این مرحله ماتریس *HM* با تعداد بسیار زیادی بردار جواب تولید شده به صورت تصادفی و با توجه به *HMS* مطابق رابطه (65) پر می‌گردد.

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS-1} & x_2^{HMS-1} & \dots & x_{N-1}^{HMS-1} & x_N^{HMS-1} \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_{N-1}^{HMS} & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \quad (65)$$

4-3- بداهه نوازی یا تولید یک بردار هارمونی جدید
یک بردار هارمونی جدید $\{x'_1, x'_2, \dots, x'_N\}$ بر مبنای سه قانون تولید می‌گردد که به آن بداهه‌نوازی می‌گویند و عبارتند از: 1- ملاحظات حافظه، 2- تنظیم صدادهی، 3- انتخاب تصادفی. در ملاحظات حافظه، مقادیر بردار هارمونی جدید به طور تصادفی از بردارهای موجود در *HM* با احتمال *HMCR* انتخاب می‌شوند. به عبارت دیگر مقدار اولین متغیر تصمیم‌گیری مطابق رابطه (66) انتخاب می‌گردد. مقادیر دیگر متغیرها نیز به روش مشابه میان x_1^1 و x_1^{HMS} انتخاب می‌گردند. *HMCR* که مقداری بین 0 تا 1 متغیر است، نرخ انتخاب یک مقدار از مقادیر محاسبه شده قبلی است، که در *HM* ذخیره شده است و $(1-HMCR)$ نرخ گزینش تصادفی یک مقدار از محدوده ممکن مقادیر است.

$$\text{احتمال}(x'_i) = \begin{cases} x'_i \in \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}\}; ([HMCR]) \\ x'_i \in X_i; ([1 - HMCR]) \end{cases} \quad (66)$$

هر جزء به دست آمده توسط ملاحظات حافظه برای تعیین این که تنظیم صدادهی مناسب‌تر است یا خیر امتحان می‌شود. این عمل با استفاده از پارامتر *PAR* انجام می‌گیرد که با استفاده از رابطه (67) تعریف می‌شود.

$$\text{احتمال}(x'_i) = \begin{cases} x'_i + \text{rand} \cdot BW; & (\text{PAR}) \\ x'_i; & ([1 - PAR]) \end{cases} \quad (67)$$

مقدار $[1 - PAR]$ نرخ انجام هیچ عمل را مشخص می‌کند. اگر تصمیم برای تنظیم صدادهی مثبت باشد X_i^{new} با توجه به رابطه (68) جایگزین می‌شود.

$$X_i^{\text{new}} = X_i^{\text{old}} \pm BW \cdot \varepsilon \quad (68)$$

که X_i^{new} صدادهی جدید بعد از تنظیم صدادهی، X_i^{old} صدادهی موجود انتخاب شده از *HM* و ε یک عدد تصادفی در محدوده (-1,1) می‌باشد. در مرحله بداهه‌نوازی یا تولید یک بردار هارمونی جدید، ملاحظات حافظه، تنظیم صدادهی و انتخاب تصادفی بر روی هر متغیر بردار هارمونی جدید اعمال می‌گردد.

4-2-2-3- به روز نمودن حافظه هارمونی
در صورتی که بردار هارمونی جدید از بدترین بردار هارمونی در *HM* (X_{worst}) برمبنای تابع هدف انتخابی بهتر باشد، بردار هارمونی جدید داخل قرار گرفته و بدترین هارمونی موجود از مجموعه *HM* کنار گذاشته می‌شود.

جای تابع علامت (*sgn*) در معادله (43) استفاده شده است که (\cdot) تابع اشباع^۱ است و ε یک عدد اسکالر است که به ضخامت لایه مرزی بستگی دارد و به صورت زیر تعریف می‌شود [13]:

$$\text{sat}\left(\frac{s_i}{\varepsilon}\right) = \begin{cases} \text{sgn}\left(\frac{s_i}{\varepsilon}\right) & \text{اگر } |s_i| > \varepsilon \\ \frac{s_i}{\varepsilon} & \text{اگر } s_i \leq \varepsilon \end{cases} \quad (62)$$

4- تعیین پارامترهای بهینه کنترل کننده‌ها

به منظور مقایسه عملکرد کنترلرهای طراحی شده لازم است پارامترهای بهینه هر کدام از کنترلرهای تعیین شده و سپس، رفتار کنترلرهای در حالت بهینه خود مورد مقایسه قرار گیرند. لذا در این بخش، پارامترهای بهینه کنترلرهای تعیین می‌گردد که به این منظور، از دو روش بهینه‌سازی انتخاب شده است. این روش‌های بهینه‌سازی عبارتند از: الگوریتم جستجوی هارمونی و ازدحام ذرات.

4-1- الگوریتم ازدحام ذرات

روش مذکور، یکی از روش‌های بهینه‌سازی تصادفی مبتنی بر جمعیت است که توسط کندی و ابرهارت [14] در سال 1995 و با الهام از رفتار اجتماعی تجمع پرنده‌گان یا دسته ماهی‌ها توسعه یافته. سرعت جستجوی یک موقعیت بهتر جدید برای هر ذره در این الگوریتم توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$v = wv + c_1 \text{rand}(2, N)(P_{l,\text{best}} - P_{\text{current}}) + c_2 \text{rand}(2, N)(P_{g,\text{best}} - P_{\text{current}}) \quad (63)$$

که در آن *N* تعداد واحدها، *w* مومنتوم یا اینرسی الگوریتم ازدحام ذرات، *P_{l,best}* بهترین موقعیت محلی، *P_{g,best}* بهترین موقعیت عمومی و *P_{current}* موقعیت کنونی است. همچنین (2, *N*) برای تولید یک ماتریس *N* × 2 با مقادیر تصادفی استفاده می‌شود و *c₁* و *c₂* ضرایب مقادیر تصادفی هستند. پارامترهای مورد استفاده در این الگوریتم به صورت *N* = 50، *c₂* = 1.1 و *c₁* = 0.2، *w* = 0.8 انتخاب شده‌اند.

4-2- الگوریتم جستجوی هارمونی

در این قسمت به ارائه مراحل مختلف الگوریتم جستجوی هارمونی^۲، پرداخته می‌شود [15].

- تعیین اولیه مسئله و پارامترهای الگوریتم (1) تعیین اولیه مسئله و پارامترهای الگوریتم (2) تعیین اولیه حافظه هارمونی با بردارهای حل تصادفی (3) بداهه‌نوازی یا تولید یک بردار هارمونی جدید (4) به روز نمودن حافظه هارمونی (5) بررسی معیار توقف الگوریتم و تکرار مراحل 3 و 4. شکل 2 فلوچارت اجرای الگوریتم را نشان می‌دهد. در ادامه به توضیح مراحل الگوریتم پرداخته می‌شود.

4-2-4- تعیین اولیه مسئله و پارامترهای الگوریتم

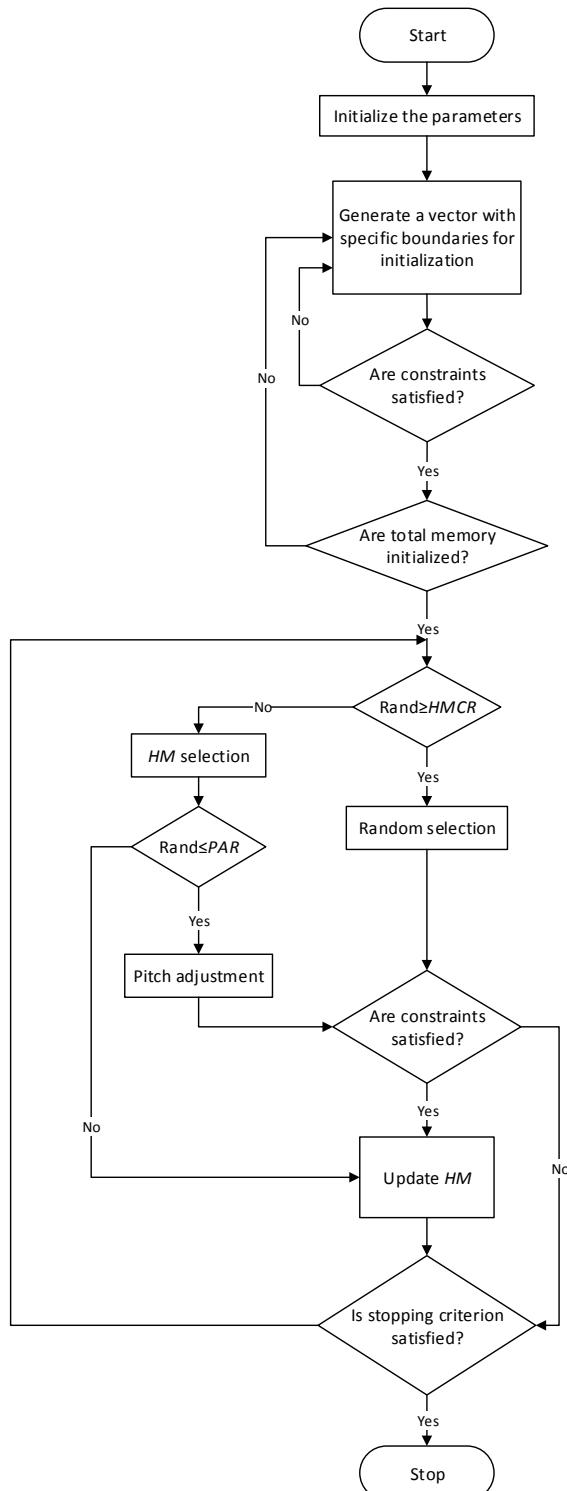
در مرحله اول، مسئله بهینه‌سازی به صورت رابطه زیر مشخص می‌گردد:

$$\text{Min: } \{f(x) | x \in X\} \\ g(x) \geq 0, h(x) = 0 \quad (64)$$

که $f(x)$ تابع هدف، $h(x)$ تابع قیود مساوی و $g(x)$ تابع قیود غیرتساوی، x بردار متغیرهای تصمیم‌گیری x_i و X_i مجموعه محدوده ممکن مقادیر هر متغیر تصمیم‌گیری، که $X_{iU} \leq X_i \leq X_{iL}$ و X_{iU} و X_{iL} به ترتیب حدود پایینی و بالایی برای هر متغیر تصمیم‌گیری می‌باشند. پارامترهای الگوریتم نیز در این مرحله مشخص می‌شوند که شامل اندازه حافظه هارمونی (*HMS*) (تعداد بردارهای جواب در حافظه هارمونی)، نرخ ملاحظه حافظه

¹ Saturation function

² Harmony search Algorithm (HSA)



شکل 2 فلوچارت الگوریتم جستجوی هارمونی [15]

شکل 2 فلوچارت الگوریتم جستجوی هارمونی [15]

الگوریتم جستجوی هارمونی بهتر از الگوریتم ازدحام ذرات می‌باشد. فلذا نتایج شبیه‌سازی بر مبنای پارامترهای به دست آمده با الگوریتم جستجوی هارمونی ارائه گردیده است.

5-1-5- بررسی عملکرد نامی کنترل کننده‌ها

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی سیستم و قانون کنترلی به دست آمده از روش‌های خطی‌سازی پسخور جزئی در معادله (26) و مود لغزشی در معادله

روند این فرآیند توسط رابطه (69) بیان می‌شود.

$$X_{\text{worst}} = X_{\text{new}} \quad \text{اگر } f(X_{\text{new}}) < f(X_{\text{worst}}) \quad (69)$$

5-2-4- بررسی معیار و ناحیه توقف الگوریتم

اگر ناحیه توقف الگوریتم (حداکثر تعداد بدهاه نوازی) برآورده شود، محاسبات پایان یافته و در غیر این صورت مراحل 3 و 4 تکرار می‌گرددند. "شکل 2" نمایش دهنده فلوچارت اجرای الگوریتم جستجوی هارمونی می‌باشد. در این مقاله، مجموع انتگرال زمان در قدر مطلقتابع خطای^۱ $\alpha l + \theta \theta_d + \dot{\theta}$ با ضریب وزنی $1/3$ به عنوان تابع هدف برای بهینه‌سازی به صورت زیر انتخاب شده است:

$$\begin{aligned} \text{تابع هدف} = & \int_0^{\infty} t |x - x_d| dt \\ & + \int_0^{\infty} t |l - l_d| dt + \int_0^{\infty} t |\theta - \theta_d| dt + \dot{\theta} \end{aligned} \quad (70)$$

با استفاده از تابع هدف مذکور و به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی جستجوی هارمونی و ازدحام ذرات با ثابت نگهداشتن ضریب α در کنترل کننده خطی‌سازی پسخور جزئی و ضرایب ϵ و α_{21} ، پارامترهای بهینه برای هر کدام از قطعی K در کنترل کننده مود لغزشی، پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم جستجوی هارمونی در جداول 1 ارائه گردیده است. همچنین ضرایب بهینه شده کنترل کننده‌ها در جداول 2 و 3 آورده شده است.

5- نتایج حاصل از شبیه‌سازی

مقایسه مقدار خطای ITAE برای الگوریتم‌ها در جداول 2 و 3 نشان داد که

جدول 1 پارامترهای الگوریتم جستجوی هارمونی

Table 1 HSA parameters

پارامتر	مقدار
HMS	20
$HMCR$	0.6
PAR	0.2
BW	0.1
NI	100

جدول 2 ضرایب بهینه کنترل کننده خطی‌سازی پسخور

Table 2 optimal parameters of feedback linearization controller

PSO	HSA	تابع هدف
diag(4.5226, 2.0100)	diag(5.0103, 2.1204)	K_{ad}
diag(9.2462, 5.5276)	diag(9.1235, 5.7227)	K_{ap}
0	0	K_{ud}
9.0452	9.0820	K_{up}
-0.1	-0.1	α
9.1422×10^{-2}	8.8730×10^{-2}	تابع هدف

جدول 3 ضرایب بهینه کنترل کننده مود لغزشی

Table 3 optimal parameters of sliding mode controller

PSO	HSA	تابع هدف
diag(138.8778, 200)	diag(141.2318, 200)	K
0.1	0.1	α_{21}
0.0502	0.0820	λ_{21}
4.1708	4.2037	λ_{11}
4.8744	4.7520	λ_{12}
0.08	0.08	ϵ
1.1030×10^{-2}	1.0818×10^{-2}	تابع هدف

¹ Integral Time Absolute Error (ITAE)

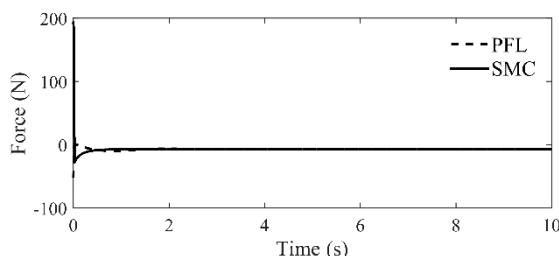


Fig. 7 پاسخ زمانی نیروی محرک کابل

کابل و نیروهای محرک واگن و کابل را با به کارگیری کنترل کننده‌های خطی‌سازی پسخور جزئی و مود لغزشی نشان می‌دهند. همان‌طور که در "شکل‌های 7-3" مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل کننده‌های طراحی شده با روش‌های خطی‌سازی پسخور جزئی و مود لغزشی به خوبی توانسته‌اند حالت‌های فعل و غیرفعال را به مقادیر مطلوب و در مدت زمان محدودی برسانند. البته پاسخ زمانی سیستم با کنترل کننده مود لغزشی دارای نوسان کمتر و هموارتری نسبت به کنترل کننده خطی‌سازی پسخور است. به عبارت دیگر، با اعمال کنترل مود لغزشی، بار با نوسانات کمتر کابل به نقطه موردنظر جابجا شده است. همچنین، میزان نیروی عملگرها و در نتیجه مصرف انرژی آن‌ها مقادیر معقول و قابل قبولی دارند.

5-2- بررسی عملکرد کنترل کننده‌ها در حضور عدم قطعیت جرمی
جرثقیل دوبعدی باید قادر به جابجایی بار با مقادیر جرمی مختلفی باشد. اگر چه در طراحی کنترلهای، مقدار نامی برای جرم بار مطابق جدول 1 در نظر گرفته شده است، ولی کنترلهای طراحی شده باید قادر به جابجایی بار با مقادیر جرمی متفاوت از مقدار نامی هم باشند. لذا در این بخش، رفتار سیستم جرثقیل دوبعدی در حضور عدم قطعیت جرمی و با اعمال روش‌های کنترلی طراحی شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای کنترل کننده مود لغزشی میزان 10 درصد افزایش در همه جرم‌های سیستم ($\Delta M = +10\%$) و برای کنترل کننده خطی‌سازی پسخور جزئی مقدار 5 درصد افزایش در همه جرم‌های سیستم ($\Delta M = +5\%$) در نظر گرفته می‌شود. "شکل‌های 8 تا 12" پاسخ‌های زمانی جابجایی واگن، زاویه نوسان بار، طول کابل و نیروهای محرک واگن و کابل با اعمال روش‌های کنترلی طراحی شده و در حضور عدم قطعیت جرمی مذکور را نشان می‌دهند. همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند، میزان مقاومت کنترل کننده مود لغزشی نسبت به عدم قطعیت جرمی بیشتر از کنترل کننده خطی‌سازی پسخوراند جزئی است. زیرا با توجه به "شکل 10" با وجود اعمال عدم

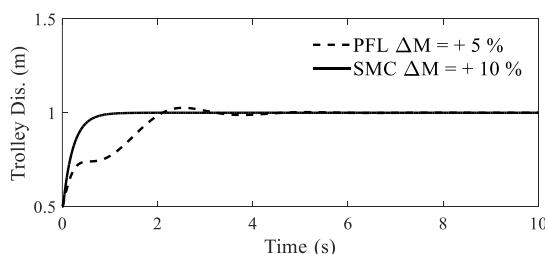


Fig. 8 پاسخ زمانی جابجایی واگن در حضور عدم قطعیت جرمی

(43) در حالت نامی (بدون اعمال عدم قطعیت، نویز و اغتشاش) ارائه می‌گردد.

پارامترهای مورد استفاده در همه شبیه‌سازی‌های ارائه شده تا انتهای مقاله برای جرثقیل دوبعدی بر مبنای الگوریتم جستجوی هارمونی که دارای مقدار تابع هدف کمتری بود ارائه شده‌اند. همچنین، شرایط اولیه مطابق آن چه در زیربخش قبل ذکر شد، برای سیستم جرثقیل دوبعدی در نظر گرفته می‌شود. در ضمن، هدف کنترل کننده‌ها این است که حالت‌های فعل $q_{1a} = [x \quad l]^T$ و غیرفعال $q_2 = \theta$ را به مقادیر مطلوب $q_{1a} = [1 \quad 1]^T$ و $q_2 = 0$ در مدت زمان محدود و با نوسانات کمتر برسانند، یعنی بار با حداقل نوسانات کابل به نقطه معینی منتقل گردد.

"شکل‌های 3-7" پاسخ‌های زمانی جابجایی واگن، زاویه نوسان بار، طول

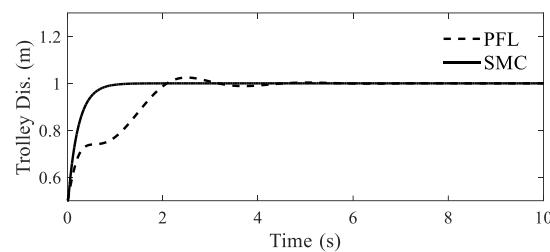


Fig. 3 پاسخ زمانی جابجایی واگن

شکل 3 پاسخ زمانی جابجایی واگن

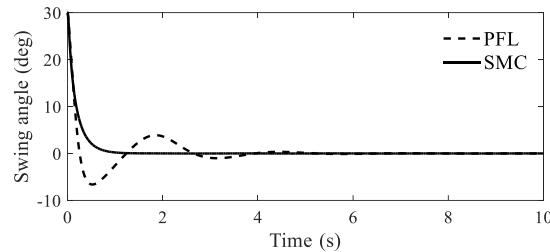


Fig. 4 پاسخ زمانی زاویه نوسان بار

شکل 4 پاسخ زمانی زاویه نوسان بار

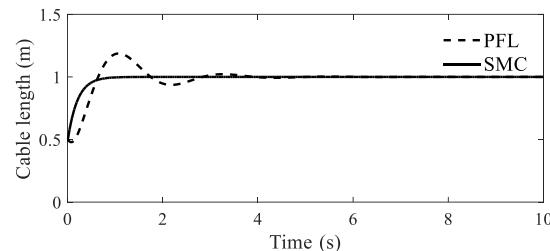


Fig. 5 Time response of cable length

شکل 5 پاسخ زمانی طول کابل

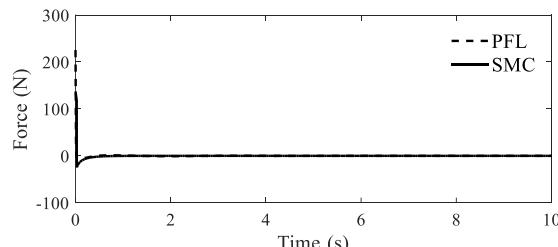


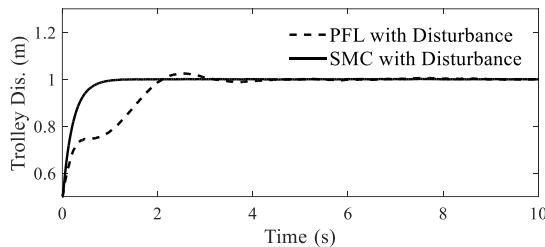
Fig. 6 Time response of trolley moving force

شکل 6 پاسخ زمانی نیروی محرک واگن

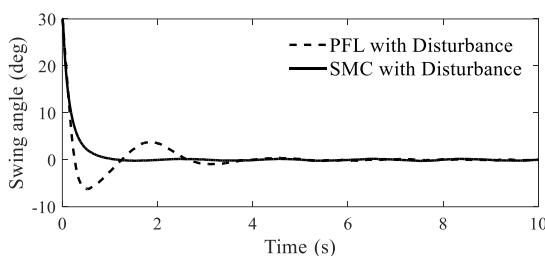
سیستم با کنترل کننده مود لغزشی توانسته است به خوبی در برابر آن مقاومت کند و حالت‌های سیستم را با نوسانات کمتر و خطای ناچیز به مقادیر مطلوب خود برساند. با توجه به "اشکال 11 و 12" ملاحظه می‌شود که اگر چه نیروهای محرک واگن و کابل با اعمال کنترل کننده مود لغزشی بیشتر هستند، ولی همچنان دارای مقادیر محدود و قابل دستیابی در کاربرد هستند.

5-3- بررسی رفتار کنترل کننده‌ها در حضور اغتشاش عملگرها و نویز حسگرها

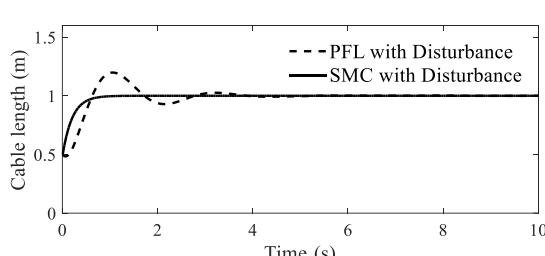
در این قسمت، رفتار سیستم با اعمال کنترل کننده‌های طراحی شده و در حضور اغتشاش بر روی عملگرهای محرک واگن و کابل و همچنین نویز حسگرها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اغتشاش و نویز به صورت اعمال توابع تصادفی به ترتیب در مقادیر نیروی محرک واگن و کابل و مقادیر دریافتی حسگرها در نظر گرفته شده‌اند. این توابع تصادفی به کمک جعبه ابزار نویز سفید¹ نرم‌افزار متلب تولید شده‌اند. در "شکل‌های 13-19" پاسخ زمانی زمانی سیستم با کنترل‌رهای طراحی شده و در حضور اغتشاش عملگرها نشان داده می‌شوند. همچنین، پاسخ زمانی سیستم با کنترل مود لغزشی طراحی شده در حضور نویز حسگرها در "شکل‌های 20-22" نمایش داده می‌شوند.



شکل 13 پاسخ زمانی جابجایی واگن در حضور اغتشاش عملگرها

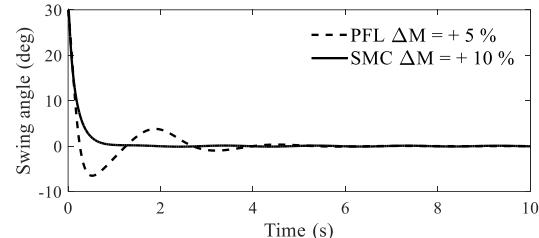


شکل 14 پاسخ زمانی زاویه نوسان بار در حضور اغتشاش عملگرها

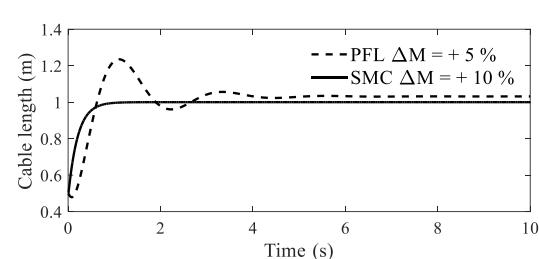


شکل 15 پاسخ زمانی طول کابل در حضور اغتشاش عملگرها

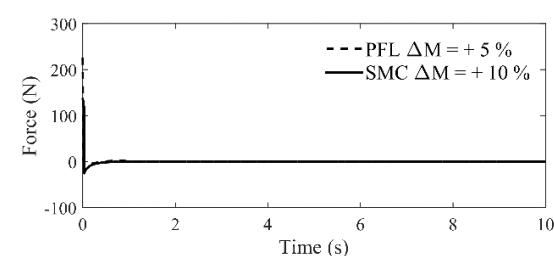
¹ White noise



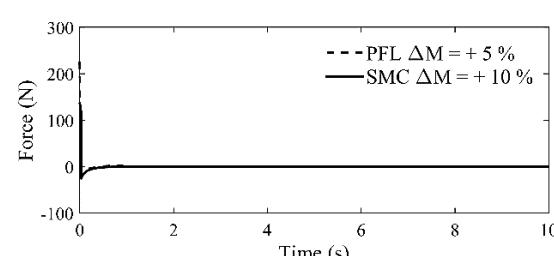
شکل 9 پاسخ زمانی زاویه نوسان بار در حضور عدم قطعیت جرمی



شکل 10 پاسخ زمانی طول کابل در حضور عدم قطعیت جرمی

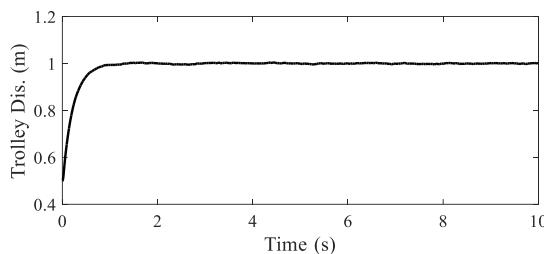


شکل 11 پاسخ زمانی نیروی محرک واگن در حضور عدم قطعیت جرمی

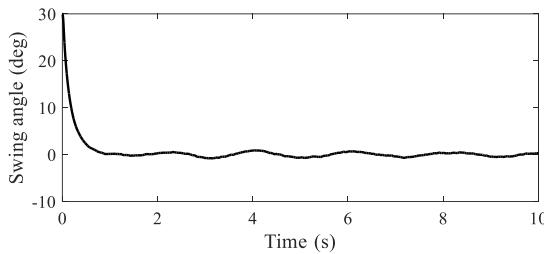


شکل 12 پاسخ زمانی نیروی محرک کابل در حضور عدم قطعیت جرمی

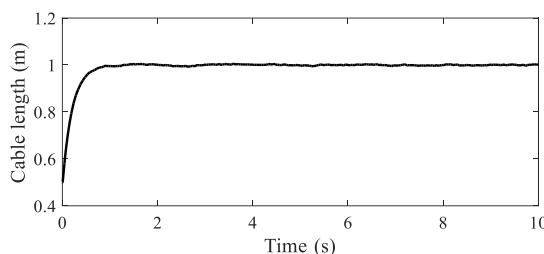
قطعیت بیشتر به سیستم با کنترل کننده مود لغزشی، این کنترلر با خطای ناچیزی طول کابل را به مقدار مطلوب 1 متر رسانده است، در حالی که کنترل کننده خطی‌سازی پسخواراند در حضور عدم قطعیت جرمی کمتر نتوانسته طول کابل را به مقدار مطلوب برساند، بلکه دارای خطای ماندگاری است. از طرفی، با توجه به "اشکال 8 و 9" کنترل کننده مود لغزشی با نوسانات کمتری در واگن و کابل، بار را جابجا نموده است و به عبارت دیگر با کنترل کننده مود لغزشی بار با نوسانات کمتر کابل جابجا شده است که به لحاظ کاربردی دارای اهمیت است. بنابراین، با این که میزان عدم قطعیت جرمی برای سیستم با کنترل کننده مود لغزشی بیشتر از مقدار متناظر با کنترل کننده خطی‌سازی پسخواراند جزئی در نظر گرفته شده است، ولی



شکل 20 پاسخ زمانی جابجایی واگن در حضور نویز حسگرها با کنترل مود لغزشی



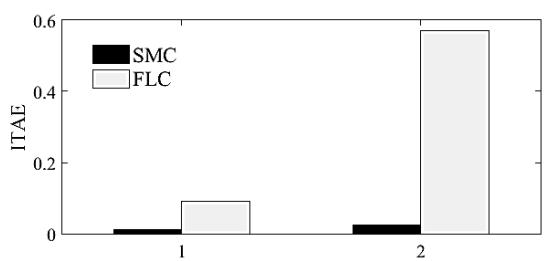
شکل 21 پاسخ زمانی زاویه نوسان بار در حضور نویز حسگرها با کنترل مود لغزشی



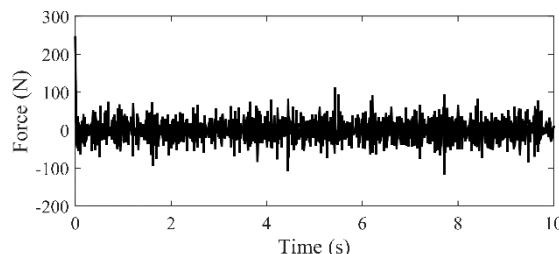
شکل 22 پاسخ زمانی طول کابل در حضور نویز حسگرها با کنترل مود لغزشی

عملگرها با اعمال کنترل کننده‌های خطی‌سازی پسخوراند و مود لغزشی تفاوت قابل توجهی نداشته و دارای مقادیر محدود و قابل دستیابی در کاربرد هستند.

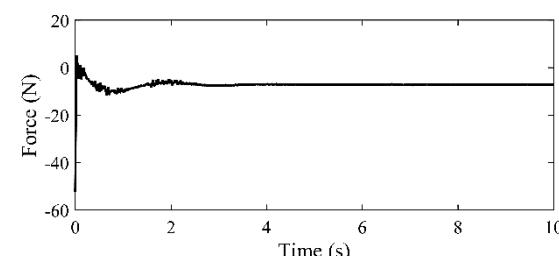
از طرفی، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل کننده خطی‌سازی پسخور جزئی در حضور نویز حسگرها ناپایدار شده و باعث واگرایی پاسخ سیستم می‌گردد. ولی، کنترل کننده مود لغزشی در حضور نویز حسگرها پایدار بوده و عملکرد مناسبی در همگرایی حالت‌های مطلوب دارد. در ادامه به منظور مقایسه دیگری بین کنترلهای طراحی شده در دو حالت عملکرد نامی و در حضور عدم قطعیت، معیار خطای ITAE بر مبنای الگوریتم



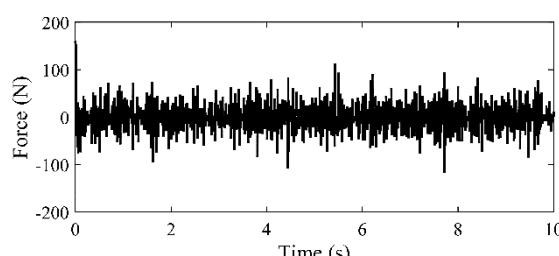
شکل 23 معیار خطای ITAE



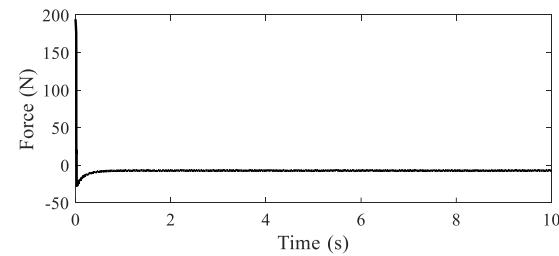
شکل 16 پاسخ زمانی نیروی محرک واگن در حضور اغتشاش عملگرها با کنترل خطی‌سازی پسخور جزئی



شکل 17 پاسخ زمانی نیروی محرک کابل در حضور اغتشاش عملگرها با کنترل خطی‌سازی پسخور جزئی



شکل 18 پاسخ زمانی نیروی محرک واگن در حضور اغتشاش عملگرها با کنترل مود لغزشی



شکل 19 پاسخ زمانی نیروی محرک کابل در حضور اغتشاش عملگرها با کنترل مود لغزشی

با توجه به نتایج ارائه شده در "شکل‌های 13-19"، ملاحظه می‌شود که کنترل کننده‌های طراحی شده به خوبی در برای حضور اغتشاش در عملگرها مقاومت نموده و توانسته‌اند پایداری سیستم را تضمین کنند. ولی، کنترل کننده مود لغزشی در حضور اغتشاش عملگرها با نوسانات کمتری باعث جابجایی بار شده است. در ضمن، با توجه به "شکل‌های 16-19" نیروی

لغزشی کمی بیشتر شد، ولی همچنان این نیروها محدود و قابل دستیابی در کاربرد هستند. از این‌رو در کاربردهای صنعتی که حضور عدم قطعیت در جرم بار (نسبت به مقدار نامی آن)، نویز حسگرها و اغتشاش عملگر اجتناب‌ناپذیر بوده و در ضمن، جابجایی بار با نوسانات کمتر کابل پر اهمیت است، استفاده از کنترل مود لغزشی برای سیستم جرثقیل دو بعدی پیشنهاد می‌گردد.

7- مراجع

- [1] A. Benhidjeb, G. Gissinger, Fuzzy control of an overhead crane performance comparison with classic control, *Control Engineering Practice*, Vol. 3, No. 12, pp. 1687-1696, 1995.
- [2] C. Y. Chang, The switching algorithm for the control of overhead crane, *Neural Computing & Applications*, Vol. 15, No. 3-4, pp. 350-358, 2006.
- [3] J. Yi, N. Yubazaki, K. Hirota, Anti-swing and positioning control of overhead traveling crane, *Information Sciences*, Vol. 155, No. 1, pp. 19-42, 2003.
- [4] Y. Hakamada, M. Nomura, Anti-sway and position control of crane system, *Advanced Motion Control, AMC'96-MIE Proceedings, 1996 4th International Workshop on*, pp. 657-662, 1996.
- [5] Y. S. Kim, H. S. Seo, S. K. Sul, A new anti-sway control scheme for trolley crane system, *Industry Applications Conference, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2001 IEEE*, pp. 548-552, 2001.
- [6] G. Hilhorst, G. Pipeleers, W. Michiels, R. C. Oliveira, P. L. Peres, J. Swevers, Fixed-Order linear parameter-varying feedback control of a lab-scale overhead crane, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, pp. 1899-1907, 2016.
- [7] G. Bartolini, A. Pisano, E. Usai, Second-order sliding-mode control of container cranes, *Automatica*, Vol. 38, No. 10, pp. 1783-1790, 2002.
- [8] H. H. Lee, Y. Liang, D. Segura, A sliding-mode antiswing trajectory control for overhead cranes with high-speed load hoisting, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 128, No. 4, pp. 842-845, 2006.
- [9] Q. Ngo, K.-S. Hong, Adaptive sliding mode control of container cranes, *IET Control Theory & Applications*, Vol. 6, No. 5, pp. 662-668, 2012.
- [10] H. M. Omar, A. H. Nayfeh, Gantry cranes gain scheduling feedback control with friction compensation, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 281, No. 1, pp. 1-20, 2005.
- [11] T. A. Le, S. G. Lee, S. C. Moon, Partial feedback linearization and sliding mode techniques for 2D crane control, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 36, No. 1, pp. 78-87, 2014.
- [12] H. Park, D. Chwa, K. Hong, A feedback linearization control of container cranes: Varying rope length, *International Journal of Control Automation and Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 379, 2007.
- [13] J. J. E. Slotine, W. Li, *Applied Nonlinear Control*, prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, New Jersey, pp. 280, 1991.
- [14] J. Kennedy, R. C. Eberhart, Particle swarm optimizer, *Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks*, pp. 1942-1948, 1995.
- [15] M. Mazare, M. R. Najafi, Adaptive control of a 3-PUU parallel robot on optimized trajectories generated by harmony search algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 187-198, 2016. (in Persian فارسی)

جستجوی هارمونی در "شکل 23" نشان داده است که حالت 1 مربوط به حالت نامی و حالت 2 مربوط به عدم قطعیت است. همان‌طور که در "شکل 23" مشاهده می‌شود، کنترل کننده مود لغزشی عملکرد مناسب‌تری در حضور عدم قطعیت‌های اعمالی دارد. که این مهم ناشی از خاصیت مقاوم بودن این کنترل کننده می‌باشد. همچنین همان‌طور که در بالا اشاره شد با اعمال نویز سنسورها و عملگرها کنترل کننده خطی سازی پسخور جزئی وارد محدوده ناپایدار خود شده از این‌رو معیار خطای مربوطه در "شکل 23" نشان داده نشده است.

6- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش‌های خطی سازی پسخور جزئی و مود لغزشی به طراحی کنترل کننده برای سیستم جرثقیل کانتینر دو بعدی پرداخته شد. با توجه به زیرفعال بودن سیستم، قبل از طراحی قوانین کنترلی دینامیک سیستم به دو بخش فعل و غیرفعال تفکیک و اثبات ریاضی برای پایداری کنترلرهای طراحی شده ارائه گردید. با انتخاب تابع هدف مناسب و به کمک روش‌های الگوریتم جستجوی هارمونی و ازدحام ذرات، مقادیر بهینه برای پارامترهای کنترل کننده‌های مذکور تعیین شد. مقایسه مقدار خطای ITAE برای الگوریتم‌ها نشان داد که الگوریتم جستجوی هارمونی بهتر از الگوریتم ازدحام ذرات می‌باشد. فلذا نتایج شبیه‌سازی بر مبنای پارامترهای به دست آمده با این روش ارائه گردید. سپس، با ارائه نتایج شبیه‌سازی، عملکرد کنترلرهای طراحی شده با پارامترهای بهینه در حضور عدم قطعیت جرمی، نویز حسگرها و اغتشاش عملگرها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان دادند که اگر چه هر دو کنترل کننده طراحی شده به خوبی توانسته اند موقعیت واگن و طول کابل را به مقدار مطلوب خود رسانیده و در عین حال باعث همگرایی مجانبی زاویه نوسان بار شوند، ولی کنترل کننده مود لغزشی در حضور عدم قطعیت جرمی، اغتشاش عملگرها و نویز حسگرها مقاوم تر از کنترل کننده خطی سازی پسخور جزئی بوده و بار را با زاویه نوسانات کمتری جابجا می‌نماید. همچنین کنترل کننده خطی سازی پسخور جزئی در حضور نویز حسگرها ناپایدار شده و باعث واگرایی پاسخ سیستم گردید. در ضمن، اگرچه نیروی عملگرها در حالت به کارگیری کنترل مود