



طراحی کنترل کننده مد لغزشی ترمینال فازی تطبیقی مرتبه کسری برای ربات ارتز مفصل زانو

هادی دلاوری^{*}، رؤیا جوکار

گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت:
بازنگری:
پذیرش:
ارائه آنلاین:

کلمات کلیدی:

ربات ارتز مفصل زانو
حسابان مرتبه کسری
کنترل فازی تطبیقی
کنترل مد لغزشی ترمینال
مشاهده گر اغتشاش غیرخطی.

چکیده: ربات‌های توانبخشی و کمک کننده به دلیل افزایش تعداد سالمندان و افزایش بیماری‌هایی مانند سکنه‌های مغزی و آسیب‌های نخاعی و همچنین هزینه‌های بالای توانبخشی توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. در این مقاله یک کنترل کننده مد لغزشی ترمینال فازی تطبیقی مرتبه کسری برای ربات ارتز مفصل زانو پیشنهاد می‌شود. یک مدل یکپارچه ساق پا و ارتز که براساس معادلات لاگرانژ است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای غلبه بر نامعینی‌ها و اغتشاشات خارجی یک کنترل کننده مد لغزشی ترمینال مرتبه کسری طراحی می‌شود، اما استفاده از آن منجر به ایجاد پدیده نامطلوب چترینگ در سیگنال کنترل خواهد شد. برای حذف پدیده چترینگ در سیگنال کنترل یک کنترل کننده فازی تطبیقی مرتبه کسری طراحی می‌گردد. برای افزایش دقت و سرعت ردیابی و کاهش نامعینی در مدلسازی گشتاور عضلانی، یک مشاهده گر اغتشاش غیرخطی با کنترل کننده مد لغزشی ترمینال مرتبه کسری ترکیب می‌شود. پایداری سیستم حلقه بسته با استفاده از تعمیم جدید تئوری لیاپانوف برای سیستم‌های مرتبه کسری اثبات می‌شود. از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات برای تعیین ضرایب کنترل کننده مد لغزشی ترمینال فازی تطبیقی مرتبه کسری و ضرایب توابع عضویت فازی استفاده می‌شود. در نهایت عملکرد کنترل کننده پیشنهادی با کنترل کننده مد لغزشی مرسوم و پی‌آی‌دی مقایسه می‌شود.

۱- مقدمه

به حسگرها و عملگرهایی مجهز باشند، امکان پذیر می‌شود. سنسورها وظیفه جمع‌آوری اطلاعات درباره مفاصل، مکان اعضاء، نیروی گرانشی زمین و فعالیت‌های ماهیچه‌ای را برعهده دارند. عملگرها، منتقل کننده نیروی لازم برای حرکت اسکلت‌های خارجی و حرکت اعضاء هستند، که میزان این نیرو برای انجام کار مورد نظر توسط قانون کنترل مناسب تعیین می‌شود. این کار می‌تواند توسط یک بردار مطلوب تعیین شده توسط تراپیست بعد از عمل جراحی با هدف توانبخشی یا کمک به شخص بیمار به منظور بهبود عملکرد در انجام کارهای روزمره آن مشخص شوند. این عمل با تکیه بر داده‌های سنسورها، تشخیص مغز یا فعالیت عضله و غیره تخمین زده می‌شود [۴ و ۵]. اختلالات مغز و اعصاب پس از سکنه مغزی می‌تواند مانع فعالیت ماهیچه‌های اطراف زانو و مچ پا شده، و در نتیجه به ناتوانی فرد برای بلند کردن پا منجر شود. حرکت مچ پا با توجه به استخوان پیچیده آن بسیار پیچیده است [۶]. در تحقیقات انجام شده در آزمایشگاه سیگنال‌های تصویری و سیستم‌های هوشمند، یک اسکلت خارجی که ارتباط هوشمندانه‌ای با عضو برقرار می‌کند و به گشتاور عضلانی اعمالی از جانب عضو حساس است، طراحی شده است. ارتز EICOSI دارای یک درجه آزادی در مفصل زانو است. این ارتز به آسانی قابل پوشیدن و درآوردن بوده و کاربرد بسیاری برای افراد مبتلا به اختلالات مفصل زانو دارد و به بیماران برای تقویت ماهیچه‌هایشان در حالت نشسته کمک می‌کند [۷ و ۸]. کنترل سیستم‌های رباتیک توانبخشی با نامعینی و اغتشاشات خارجی

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در زمینه فناوری رباتیک و کاربردهای متنوع آن، علاقه به فعالیت در زمینه ارتز و اسکلت خارجی نیز به سرعت افزایش یافته است. ربات‌های پوشیدنی، دستگاه‌هایی میکاترونیک هستند که به منظور توانبخشی و یا افزایش توانایی انجام کار توسط اندام فوقانی و یا تحتانی انسان، طراحی می‌شوند. ساختار آن‌ها کاملاً متناسب با اندام انسان بوده، به گونه‌ای که کل مجموعه بتواند به طور همزمان حرکت کند. به دلیل اهمیت مسئله راه رفتن برای انسان، پژوهش بر روی ربات‌های اندام تحتانی پرکاربردتر است. اسکلت خارجی اندام تحتانی، در سطح ران، زانو و یا مچ پا عمل می‌کند [۱ و ۲].

انجام حرکات توانبخشی با کمک دست برای تراپیست‌ها کاری طاقت فرساست. تعداد و بازه حرکات درمانی با توجه به خستگی تراپیست‌ها کاهش می‌یابد، همچنین اندازه گیری میزان بهبود بیمار تنها از طریق مشاهدات چشمی نه کاملاً دقیق، صورت می‌گیرد. برای برطرف کردن این معایب می‌توان از دستگاه‌های توانبخشی رباتیک استفاده نمود [۳]. برای عملکرد مناسب، این ربات‌ها باید بتوانند یک مسیر دقیق و متناوب را تولید کنند که منجر به کاهش تلاش‌های درمانگر و افزایش جلسات توانبخشی می‌شود. در این راستا هدف، طراحی ربات‌هایی است که متناسب با عضو آسیب دیده و در جهت حرکت آن رفتاری مناسب را ارائه کنند. این امر هنگامی که مفاصل

EICOSI را پیشنهاد کرده‌اند.

با ترکیب کنترل مد لغزشی، منطق فازی و کنترل تطبیقی، کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی^۲ برای کنترل سیستم‌های غیرخطی بدست می‌آید. از جمله مزایای استفاده از کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی می‌توان به کاهش پدیده چترینگ [۲۱] و مکانیسم یادگیری برای تغییر قوانین فازی آنلاین [۲۲] در سیگنال کنترل با هدف توانبخشی در ربات‌ها اشاره کرد.

روش‌های بهینه‌سازی سنتی به علت تاکید بر محاسبات دقیق و تحلیلی، ممکن است در رسیدن به بهینه‌سازی با شکست مواجه شوند. لذا در دو دهه گذشته یک روند رو به رشد در استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی الهام گرفته از طبیعت وجود داشته است. یکی از این الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۳ می‌باشد. منبع الهام این الگوریتم، رفتار اجتماعی برخی حیوانات، همانند حرکت دسته جمعی پرندگان و ماهی‌هاست. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با یک فرآیند حل توصیف می‌شود به طوری که در آن هر ذره در فضای جستجوی چند بعدی در حرکت است و سرعت و موقعیت ذره به طور دائم با توجه به بهترین عملکرد قبلی خود ذره و بهترین ذره به روز رسانی می‌شود [۲۳ و ۲۴].

مقاله حاضر به ارائه یک روش کنترل، برای ربات ارتز مفصل زانو EICOSI می‌پردازد. در این مقاله یک مدل یکپارچه‌سازی ارتز و ساق پا استفاده شده است. در طراحی کنترل کننده، گشتاور عضلانی اعمالی شخص به ارتز نیز در نظر گرفته می‌شود. برای بدست آوردن عملکرد مناسب کنترلی، یک مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی^۴ برای تخمین گشتاور عضلانی شخص طراحی شده است. نامعینی در تخمین گشتاور عضلانی به عنوان یک اغتشاش خارجی در نظر گرفته می‌شود. یک مزیت استفاده از مشاهده‌گر اغتشاش کاهش اثر اغتشاش ناشناخته خارجی، بدون استفاده از سنسور اضافی است که این کار می‌تواند باعث کاهش خطای ردیابی سیستم نیز شود و همچنین باعث کاهش اثر عدم قطعیت در مدل‌سازی گشتاور عضلانی در کنترل سیستم نیز می‌شود. برای افزایش دقت ردیابی، کنترل کننده مد لغزشی ترمینال^۵ در ترکیب با مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی استفاده گردیده است. برای کاهش پدیده چترینگ در سیگنال کنترل، افزایش درجه آزادی و مقاومت بیشتر کنترل کننده از ترکیب این کنترل کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی^۶ استفاده می‌شود.

برای تعیین ضرایب کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی و ضرایب تابع عضویت از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده می‌شود. در نهایت به منظور بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی، نتایج این کنترل کننده با کنترل کننده مد لغزشی مرسوم و کنترل کننده پی‌آی‌دی^۷ مقایسه شده

همواره یکی از چالش‌های مهندسیین بوده است. روش‌های مختلفی برای کنترل چنین سیستم‌هایی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به کنترل مد لغزشی اشاره کرد. از مزیت‌های این کنترل کننده می‌توان، سادگی در طراحی، سادگی در پیاده‌سازی عملی و عملکرد مناسب بر روی سیستم‌های غیرخطی با نامعینی را نام برد [۹]. کنترل کننده مد لغزشی ترمینال یکی از کنترل کننده‌های پرکاربرد است که علاوه بر داشتن مزیت‌های کنترل کننده مد لغزشی مرسوم، به منظور افزایش نرخ همگرایی و دستیابی به کنترل ردیابی در زمان محدود استفاده می‌شود [۱۰].

در سال‌های اخیر، ترکیب کنترل مرتبه کسری و کنترل مد لغزشی برای کنترل سیستم‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. کنترل کننده‌های مد لغزشی مرتبه کسری با وجود اغتشاشات خارجی و نامعینی در سیستم می‌توانند عملکرد مقاوم‌تری در مقایسه با کنترل کننده مد لغزشی مرتبه صحیح از خود نشان دهند [۱۱] همچنین با ترکیب کنترل کننده مد لغزشی ترمینال با حسابان مرتبه کسری، مقاومت و درجه آزادی کنترل کننده افزایش می‌یابد [۱۲].

در مرجع [۱۳] کنترل کننده مد لغزشی به دلیل مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت پارامتری، دینامیک‌های مدل نشده و اغتشاشات خارجی با شبکه عصبی ترکیب شده و برای کنترل ارتز EICOSI استفاده شده است. اما یکی از معایب کنترل کننده مد لغزشی، وجود پدیده چترینگ در سیگنال کنترل است. در ربات‌های توانبخشی در طول آزمایش راحتی شخص بیمار با چترینگ سیگنال کنترل در ارتباط است به نحوی که فرکانس و دامنه کمتر چترینگ، راحتی بیشتر شخص بیمار را به همراه دارد [۱۴].

در سال‌های اخیر، از منطق فازی برای افزایش بهره‌وری کنترل کننده مد لغزشی در کنترل کردن سیستم‌های غیر خطی با نامعینی استفاده می‌شود. این روش به عنوان کنترل مد لغزشی فازی^۱ شناخته شده است که یک روش قدرتمند برای غلبه بر نامعینی‌های ساختاری و غیر ساختاری و اغتشاش خارجی [۱۵] و کنترل سیستم‌های بدون مدل ریاضی [۱۶] است. کنترل تطبیقی روش دیگری است که برای کنترل سیستم‌های غیرخطی با نامعینی ارائه شده است. در کنترل تطبیقی برای غلبه بر نامعینی‌ها، تعدادی قانون تطبیقی ارائه می‌شود که به صورت آنلاین تنظیم ضرایب ورودی کنترل یا پارامترهای کنترل کننده را بر عهده دارد. یوسفی و همکاران [۱۷] به منظور دستیابی به رفتاری منعطف از سوی ربات در مقابل نیروی احتمالی پای فرد از این کنترل کننده استفاده شده کرده‌اند و ریفائی و همکاران [۱۸] برای ردیابی، یک مسیر مطلوب تعریف شده توسط پزشک توانبخشی برای کنترل ارتز EICOSI کنترل کننده تطبیقی بکار برده‌اند. برای ردیابی و عملکرد مناسب در برابر اغتشاش در توانبخشی فعال و همچنین عدم نیاز به دینامیک سیستم از ترکیب کنترل تطبیقی با شبکه عصبی برای کنترل ارتز EICOSI در مرجع [۱۹] استفاده شده است. ریفائی و همکاران [۲۰] برای جلوگیری از اشباع عملگر و ایمنی شخص، استراتژی کنترل محدود بر روی ارتز

2 Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control (AFSMC)

3 Particle Swarm Optimization (PSO)

4 Nonlinear Disturbance Observer (NDO)

5 Terminal Sliding Mode Control (TSMC)

6 Fractional order Adaptive Fuzzy Terminal Sliding Mode Control (FOAFTSMC)

7 Proportional Integral Derivative Controller (PID)

1 Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)

$$\dot{X} = F_1(X) + G_1(X)u + G_2(X)d$$

$$F_1(X) = \begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \frac{1}{J}(-\tau_g \cos x_1 - A \operatorname{sign} x_2 - B x_2 - K(x_1 - \theta_r)) \end{bmatrix}$$

$$G_1(X) = G_2(X) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix}$$

$$d = \tau_h$$

$$u = \tau$$

در رابطه (۲)، گشتاور اعمالی شخص به آرتر τ_h برابر با اغتشاش خارجی در نظر گرفته می‌شود، همچنین A ، پارامتر اصطکاک سخت ساق پا و آرتر (Nm) و B ، پارامتر اصطکاک چسبناک ساق پا و آرتر $(Nm \cdot s \cdot rad^{-1})$ و J مجموع اینرسی ساق پا و آرتر $(kg \cdot m^2)$ و K ، سختی مفصل زانو (Nm) است. (rad^{-1})

مشاهده‌گر اغتشاش در کنترل سیستم‌های رباتیک برای مدت زمان طولانی است که استفاده می‌شود. به طور کلی، هدف اصلی استفاده از مشاهده‌گر اغتشاش، کاهش اغتشاش شناخته شده یا ناشناخته گشتاور بدون استفاده از سنسور اضافی است [۲۷]. مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی برای جبران اثرات اغتشاش از فیدبک مناسب استفاده می‌کند [۲۸].

با دانستن مشخصات مختلفی از مفاصل، گشتاور عضلانی انسان در استراتژی کنترل در نظر گرفته می‌شود. برای بدست آوردن عملکرد مناسب کنترل، یک مشاهده‌گر اغتشاش غیر خطی برای تخمین گشتاور عضلانی شخص ارائه می‌شود. این کار باعث کاهش اثر نامعینی در مدلسازی گشتاور عضلانی می‌گردد و به طور موثر پهنای باند کنترل و دقت ردیابی را افزایش می‌دهد [۲۹]. همچنین استفاده از مشاهده‌گر اغتشاش، موجب کاهش اثر اغتشاش شناخته شده یا ناشناخته گشتاور بدون استفاده از سنسور اضافی است. مشاهده‌گر اغتشاش می‌تواند به طور موثر پهنای باند کنترل و دقت ردیابی را افزایش داده و نامعینی در مدل‌سازی گشتاور عضلانی را کاهش دهد [۳۰]، از این رو در قسمت بعد، مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی برای سیستم آرتر مفصل زانو طراحی می‌شود.

۲-۱- طراحی مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی

در دینامیک سیستم آرتر-ساق پا رابطه (۱)، τ_h به عنوان گشتاور اعمالی شخص به آرتر در نظر گرفته شده است که در رابطه (۲) برای بیان فضای حالت این سیستم گشتاور اعمالی شخص به عنوان اغتشاش خارجی $(d = \tau_h)$ در نظر گرفته می‌شود و هدف این مشاهده‌گر تخمین نیروی اعمالی شخص به آرتر است که به عنوان یک اغتشاش خارجی در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن تخمین گشتاور اعمالی شخص τ_h ، به صورت $\hat{d} = \hat{\tau}_h$ و $\hat{d} = z + p(x)$ مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی به صورت روابط (۳) و (۴) طراحی می‌شود:

$$\hat{d} = z + p(x) \quad (3)$$

است. برخی از ویژگی‌های این مقاله ارائه یک سطح لغزش مناسب بر اساس کنترل مدل‌غزشی ترمینال مرتبه کسری، طراحی قوانین تطبیق برای کنترل‌کننده مدل‌غزشی ترمینال فازی مرتبه کسری، استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تعیین ضرایب کنترل‌کننده مدل‌غزشی ترمینال فازی تطبیقی و ضرایب توابع عضویت، استفاده از هفت قانون در پایگاه قوانین سیستم فازی به منظور کاهش بار محاسباتی و عدم ایجاد تاخیر در کنترل آنلاین می‌باشد.

ساختار این مقاله به این شرح است؛ در بخش ۲، یک مدل ریاضی از سیستم ارائه می‌شود. در بخش ۳، کنترل‌کننده پیشنهادی طراحی می‌شود. در بخش ۴ شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن و در بخش ۵، نتیجه‌گیری نهایی ارائه می‌گردد.

۲- مدل سازی

سیستم آرتر اندام تحتانی متشکل از ساق پای انسان و آرتر است که از دو بخش فوقانی و تحتانی تشکیل می‌شود. آرتر EICOSI شکل ۱ نیز شامل دو بخش است: بخش بالایی که ران و بخش پایینی که ساق پا را در بر می‌گیرد. ربات EICOSI دارای یک درجه آزادی در مفصل زانو است که توسط عضلات ماهیچه‌ای انسان و عملگر می‌توانمی‌تواند حرکت کند. براساس فرمول لاگرانژ، دینامیک سیستم آرتر-ساق پا به صورت رابطه (۱) به دست می‌آید [۲۶]:

$$J\ddot{\theta} = -\tau_g \cos \theta - A \operatorname{sign} \dot{\theta} - B \dot{\theta} - K(\theta - \theta_r) + \tau + \tau_h \quad (1)$$

با در نظر گرفتن بردار حالت به صورت $X = [x_1 \ x_2]^T = [\theta \ \dot{\theta}]^T$ فضای حالت دینامیک سیستم، رابطه (۱) به صورت رابطه (۲) نوشته می‌شود:

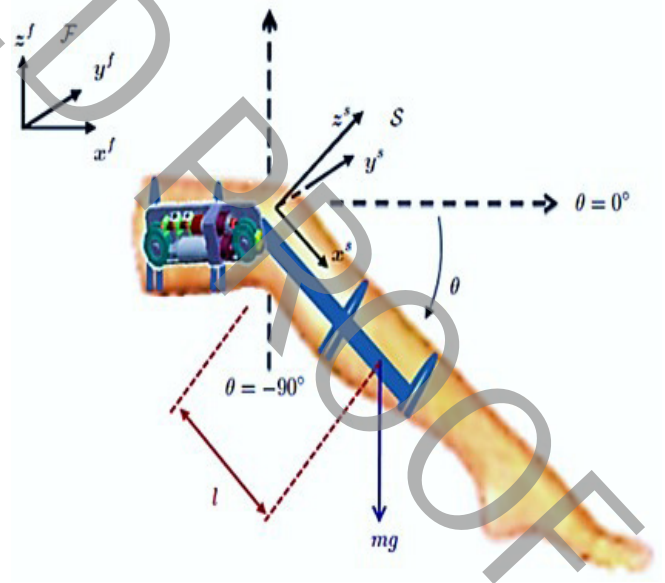


Fig. 1.

شکل ۱: پای انسان همراه با آرتر؛ مختصات ساق پا و مختصات ثابت [۲۵].

$$D_{0,t}^{-\alpha} x(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^{\alpha-1} x(\tau) d\tau \quad (9)$$

۳-۲- کنترل کننده مد لغزشی ترمینال مرتبه کسری

در این بخش برای بهبود عملکرد و افزایش مقاوم بودن سیستم ارتز مفصل زانو در برابر اغتشاشات و نامعینی‌ها، کنترل کننده مد لغزشی ترمینال مرتبه کسری طراحی می‌گردد. در طراحی این کنترل کننده نامعینی پارامتری نیز در نظر گرفته شده است.

برای طراحی کنترل کننده مرکب از کنترل کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی^۴، سطح لغزش مرتبه کسری به صورت رابطه (۱۰) در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} s(t) = c_1 e_1(t) + {}_0^c D_t^{1-\alpha} e_2(t) - \dot{w}(t) \\ w(t) = c_1 v_1(t) + \dot{v}(t) \end{cases} \quad (10)$$

که در آن $\alpha \in (0,1)$ بیانگر مرتبه اپراتور کسری است، c_1 عدد ثابت مثبت و v یک تابع مشتق پذیر و پیوسته است. $v \in C^2[0, \infty]$ ، که $v \in C^2[0, \infty]$ بیان کننده مجموعه‌ای از تمام توابع مشتق پذیر مرتبه دوم پیوسته تعریف شده در $C^2[0, \infty]$ است. $v, \dot{v} \in L^\infty$ و به ازای $t > T$ رابطه $\dot{v} = v = 0$ برقرار است که $T > 0$ است و v بصورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود [۳۲]:

$$v(t) = \begin{cases} a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 & 0 \leq t \leq T \\ 0 & t \geq T \end{cases} \quad (11)$$

سیگنال کنترل به گونه‌ای طراحی می‌شود که خروجی بتواند مسیر مطلوب را ردیابی کند و خطای آن نیز به صفر میل کند. بنابراین سیگنال کنترل مناسب به صورت رابطه (۱۲) در نظر گرفته می‌شود.

$$u(t) = \hat{g}^{-1}(X) \left\{ -\hat{f}(X) + \dot{x}_{2d}(t) + u_f(t) \right\} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، $u_f(t)$ بیان کننده سیگنال خروجی کنترل کننده مرکب از کنترل کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی می‌باشد. در این رابطه $\dot{x}_{2d}(t)$ بیانگر مشتق مسیر مطلوب و $\hat{f}(X)$ و $\hat{g}^{-1}(X)$ به ترتیب بیان کننده بخش‌های معلوم $f(X)$ و $g(X)$ در رابطه (۱۳) می‌باشند.

$$\begin{aligned} f(X) &= F_1(2,1) \\ g(X) &= G_1(2,1) = G_2(2,1) \end{aligned} \quad (13)$$

با قرار دادن رابطه (۱۲) در رابطه (۲) و جمع و تفریق کردن $\dot{x}_{2d}(t)$ و $u_f(t)$ در آن، رابطه (۱۴) بدست می‌آید.

$$\dot{z} = L(-F_1(x) - G_1(x)u - G_2(x)(z + p(x))) \quad (4)$$

با در نظر گرفتن $p(x) = k_1 x_1 + k_2 x_2$ در حالی که k_1 و k_2 مقادیر ثابت مثبت می‌باشند، L به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$L = \frac{\partial p(x)}{\partial x} = [k_1 \quad k_2] \quad (5)$$

با توجه به رابطه (۳) مشتق تخمین اغتشاش به صورت رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$\dot{\tilde{d}} = LG_2(d - \tilde{d}) \quad (6)$$

اطلاعات اولیه‌ای از مشتق اغتشاش در دسترس نیست، اما هنگامی که اغتشاش به صورت نسبتاً آرام تغییر می‌کند، منطقی است که $\dot{\tilde{d}} = 0$ فرض شود. از رابطه (۶) با تعریف $\tilde{d} = d - \tilde{d}$ رابطه (۷) بدست می‌آید:

$$\dot{\tilde{d}} = -LG_2 \tilde{d} = -\frac{k_2}{J} \tilde{d} \quad (7)$$

با توجه به رابطه (۷) زمانی که k_2 ثابت مثبت است، تخمین اغتشاش به سمت صفر میل می‌کند.

۳- کنترل کننده پیشنهادی

در این بخش، ابتدا طراحی کنترل کننده مد لغزشی ترمینال مرتبه کسری شرح داده می‌شود، سپس ترکیب این کنترل کننده با کنترل فازی تطبیقی ارائه می‌شود و پس از آن الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بیان می‌گردد.

۳-۱- حسابان مرتبه کسری

در دهه اخیر، حسابان مرتبه کسری نقش مهمی در زمینه‌های مختلف علمی به خصوص در مهندسی کنترل ایفا کرده است. مشتق و انتگرال مرتبه کسری دارای تعاریف مختلفی است که پرکاربردترین و مهمترین آن‌ها تعاریف کاپوتو^۱، گرانوالد لتنیکوف^۲ و ریمان لیوویل^۳ می‌باشد. در این مقاله برای طراحی کنترل کننده مد لغزشی ترمینال مرتبه کسری از مشتق و انتگرال مرتبه کسری با تعریف کاپوتو استفاده خواهد شد. در این بخش تعاریف حسابان مرتبه کسری کاپوتو ارائه می‌شود [۳۱].

تعریف ۱: مشتق مرتبه کسری کاپوتو به صورت رابطه (۸) ارائه شده است که در آن m عددی مثبت است.

$${}^c_0 D_t^{\alpha} x(t) = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^{m-\alpha-1} x^{(m)}(\tau) d\tau \quad (8)$$

$$m-1 < \alpha < m \in \mathbb{Z}$$

تعریف ۲: انتگرال مرتبه کسری به صورت رابطه (۹) بیان می‌گردد.

- 1 Caputo
- 2 Grunwald-Letnikov
- 3 Riemann-Liouville

با توجه به رابطه (۲۲) داریم:

$$\begin{aligned} \operatorname{sgn}\left(\tilde{d}(t) \times \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^{-\alpha} (\tilde{d}(\tau)) d\tau\right) = \\ \operatorname{sgn}(\tilde{d}(t)) \times \operatorname{sgn}\left(\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^{-\alpha} (\tilde{d}(\tau)) d\tau\right) \geq 0 \end{aligned} \quad (23)$$

با توجه به رابطه (۲۳) و با قرار دادن رابطه (۷) در رابطه (۲۱) رابطه زیر برقرار می‌شود:

$$\begin{aligned} \tilde{d}(t) \times {}_0^c D_t^\alpha \tilde{d}(t) = \tilde{d}(t) \times \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^{-\alpha} (-LG_2 \tilde{d}(\tau)) d\tau = \\ -\left(LG_2 \times \tilde{d}(t) \times \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^{-\alpha} (\tilde{d}(\tau)) d\tau\right) \leq 0 \end{aligned} \quad (24)$$

با توجه به رابطه (۲۴) و (۲۰) داریم:

$$\begin{aligned} {}_0^c D_t^\alpha V(s(t)) \leq (g(X) \tilde{d}(t) - \rho \operatorname{sgn}(s(t))) s(t) + \\ \tilde{d}(t) {}_0^c D_t^\alpha \tilde{d}(t) \leq 0 \end{aligned} \quad (25)$$

لذا با انتخاب مناسب مقدار پارامتر ثابت مثبت ρ ، جمله اول نیز در رابطه فوق منفی می‌شود و از این رو در رابطه (۲۵) شرط ${}_0^c D_t^\alpha V(s(t)) < 0$ اتفاق می‌افتد و در نتیجه سیستم پایدار بوده و سطح لغزش به صفر میل می‌کند. با توجه به معادلات (۱۵) و (۲۵) رابطه (۲۶) بدست می‌آید.

$$u_f(t) = u_{eq}(t) + \rho \operatorname{sign}(s(t)) \quad (26)$$

وجود پدیده چترینگ در سیگنال کنترل منجر به عدم راحتی شخص بیمار در حین فرایند توانبخشی می‌شود. سیگنال کنترل بدست آمده، رابطه (۲۲) شامل ضریب ثابت ρ و تابع علامت است که این عبارت منجر به بوجود آمدن پدیده چترینگ در سیگنال کنترل می‌شود. از منطبق فازی برای افزایش بهره‌وری کنترل‌کننده مد لغزشی در کنترل کردن سیستم‌های غیر خطی با نامعینی نیز استفاده می‌شود. این روش یک روش قدرتمند برای غلبه بر نامعینی‌های ساختاری و غیر ساختاری و اغتشاش خارجی است. در این مقاله یک تقریبگر فازی به گونه‌ای طراحی شده که حد بالای نامعینی‌ها را تقریب می‌زند که این امر باعث حذف پدیده چترینگ در سیگنال کنترل می‌شود [۳۴]. در کنترل تطبیقی برای غلبه بر نامعینی‌ها تعدادی قوانین تطبیقی ارائه می‌شوند که به صورت آنالین ضرایب ورودی کنترل یا پارامترهای سیستم را تنظیم می‌کنند [۳۵]. در ترکیب این کنترل‌کننده با حسابان مرتبه کسری علاوه بر غلبه بر نامعینی‌ها، سیستم در برابر اغتشاش خارجی نیز مقاوم بوده و پدیده چترینگ را کاهش می‌دهد [۳۶].

۳-۳- کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی مرتبه کسری

برای استفاده از تجربیات پزشکان توانبخشی در امر درمان از الگوریتم تطبیقی و فازی استفاده می‌شود [۳۷]. یک سیستم فازی از چند بخش اساسی تشکیل می‌شود: فازی‌ساز و غیر فازی‌ساز که نقش رابط بین سیستم‌های فازی و سیستم‌های قطعی را دارند و مجموعه قوانین که شامل

$$\begin{aligned} \dot{e}_2(t) = \dot{x}_2 - \dot{x}_{2d} = \eta - u_f(t) + g(X)d \\ \eta = f(X) - g(X)\hat{g}^{-1}(X)\hat{f}(X) \\ + g(X)\hat{g}^{-1}(X) - 1) \dot{x}_{2d}(t) \\ + (g(X)\hat{g}^{-1}(X) - 1)u_f(t) \end{aligned} \quad (14)$$

با توجه به رابطه (۱۴)، η شامل تمام نامعینی‌های موجود است. طراحی کنترل مد لغزشی سیگنال کنترل $u_f(t)$ رابطه (۱۵) از دو بخش کنترل سویچینگ $u_s(t)$ و کنترل معادل $u_{eq}(t)$ تشکیل می‌شود.

$$u_f(t) = u_s(t) + u_{eq}(t) \quad (15)$$

با مشتق‌گیری مرتبه کسری ${}_0^c D_t^\alpha$ از رابطه (۱۰) و برابر صفر قرار دادن آن کنترل معادل به صورت رابطه (۱۶) بدست می‌آید.

$$u_{eq}(t) = c_1 {}_0^c D_t^\alpha e_1(t) - {}_0^c D_t^\alpha w(t) + g(X)\hat{d} \quad (16)$$

قضیه ۱: برای سیستم (۱)، اگر در قانون کنترل (رابطه (۱۵))، کنترل سویچینگ به صورت $u_s(t) = \rho \operatorname{sign}(s(t))$ در نظر گرفته شود، سیستم پایدار بوده و سطح لغزش به صفر میل می‌کند.

اثبات: با مشتق‌گیری مرتبه کسری ${}_0^c D_t^\alpha$ از تابع کاندید لیاپانوف رابطه (۱۷)، رابطه (۱۸) بدست می‌آید:

$$V(s(t)) = \frac{1}{2} s^2(t) + \frac{1}{2} \tilde{d}^2(t) \quad (17)$$

$${}_0^c D_t^\alpha V(s(t)) = \frac{1}{2} {}_0^c D_t^\alpha s^2(t) + \frac{1}{2} {}_0^c D_t^\alpha \tilde{d}^2(t) \quad (18)$$

با توجه به قضیه‌های ارائه شده در مرجع [۳۳]، داریم:

$${}_0^c D_t^\alpha V(s(t)) = \frac{1}{2} {}_0^c D_t^\alpha s^2(t) + \frac{1}{2} {}_0^c D_t^\alpha \tilde{d}^2(t) \quad (19)$$

با قرار دادن روابط (۱۰)، (۱۴) و (۱۵) در رابطه (۱۹) این نامعادله به صورت رابطه (۲۰) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} {}_0^c D_t^\alpha V(s(t)) \leq -u_s(t)s(t) + g(X)\tilde{d}(t)s(t) + \tilde{d}(t) {}_0^c D_t^\alpha \tilde{d}(t) = \\ (g(X)\tilde{d}(t) - \rho \operatorname{sgn}(s(t)))s(t) + \tilde{d}(t) {}_0^c D_t^\alpha \tilde{d}(t) \end{aligned} \quad (20)$$

برای تعیین علامت رابطه فوق با توجه به رابطه (۸) و $0 < \alpha < 1$ داریم:

$$\tilde{d}(t) {}_0^c D_t^\alpha \tilde{d}(t) = \tilde{d}(t) \times \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^{-\alpha} (\dot{\tilde{d}}(\tau)) d\tau \quad (21)$$

با توجه به اینکه $\Gamma(1-\alpha) > 0$ و از آنجایی که $0 \leq \tau \leq t$ است داریم $(t-\tau) \geq 0$ و در نتیجه رابطه زیر برقرار می‌شود:

$$\operatorname{sgn}\left(\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^{-\alpha} (\dot{\tilde{d}}(\tau)) d\tau\right) = \operatorname{sgn}(\dot{\tilde{d}}(t)) \quad (22)$$

که در آن، A بیان کننده مجموعه‌های فازی و x_i بیان کننده $s(t)$ و ρ می‌باشد. همچنین α بیانگر عرض توابع عضویت و α بیانگر مرکز توابع عضویت هستند. نوع توابع عضویت برای $s(t)$ و ρ مشابه‌اند، اما مقادیر مرکز و عرض توابع عضویت برای $s(t)$ و ρ متفاوت‌اند.

پارامترهای مربوط به توابع عضویت ρ به دلیل تطبیقی بودن کنترل کننده بصورت آنلاین بدست می‌آیند. بر اساس توابع عضویت رابطه‌های (۲۹) و (۳۰) قوانین فازی می‌توانند در جدول ۱ خلاصه شوند. بهره فازی تطبیقی که بیانگر خروجی سیستم فازی است به صورت رابطه (۳۲) در نظر گرفته می‌شود.

$$\rho = \theta^T \Psi(s(t)) \quad (32)$$

که در رابطه (۳۲)، $\theta = [\theta^1, \dots, \theta^m, \dots, \theta^M]^T$ بیانگر مراکز توابع عضویت است که به صورت آنلاین بدست می‌آیند و به شکل یک رابطه مرتبه کسری صورت رابطه (۳۳) تعریف می‌شوند.

$${}_0^c D_t^\alpha \theta = \gamma \Psi(s(t)) s(t) \quad (33)$$

که $\Psi(s(t))$ به عنوان بردار تابع اساسی شناخته می‌شود و می‌تواند به عنوان وزن بردار پارامتر مطابق رابطه (۳۴) مطرح شود.

$$\Psi(s(t)) = [\Psi(s(t))^1, \dots, \Psi(s(t))^m, \dots, \Psi(s(t))^M]^T$$

$$\Psi(s(t))^m = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^m}(s(t))}{\sum_{m=1}^n \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^m}(s(t))} \quad (34)$$

قضیه ۲: برای سیستم (۱)، اگر در قانون کنترل رابطه (۲۷) ρ به صورت

جدول ۱: قوانین فازی.

Table 1.

شماره قانون	قانون فازی
R^1	اگر $s(t)$ NB باشد آن گاه ρ NB است.
R^2	اگر $s(t)$ NM باشد آن گاه ρ NM است.
R^3	اگر $s(t)$ NS باشد آن گاه ρ NS است.
R^4	اگر $s(t)$ ZE باشد آن گاه ρ ZE است.
R^5	اگر $s(t)$ PS باشد آن گاه ρ PS است.
R^6	اگر $s(t)$ PM باشد آن گاه ρ PM است.
R^7	اگر $s(t)$ PB باشد آن گاه ρ PB است.

مجموعه‌ای از قوانین اگر-آنگاه است که از تجربیات انسانی بوجود می‌آید. هر کدام از این قوانین ارتباط بین فضای ورودی و فضای خروجی را مشخص می‌کند. بر اساس ارتباط تعریف شده توسط قوانین، ورودی مجموعه‌های فازی به خروجی مجموعه فازی توسط موتور استنتاج فازی نگاشت می‌شود. غیرفازی‌ساز، خروجی مجموعه فازی را به یک خروجی مقدار قطعی تبدیل می‌کند [۳۷ و ۳۸]. در این مقاله از فازی‌ساز منفرد، غیرفازی‌ساز میانگین مرکز، استلزام ممدانی و موتور استنتاج حاصلضرب استفاده شده است. در طراحی این کنترل کننده در رابطه (۲۶) به جای عبارت $\rho \text{sign}(s(t))$ از بهره فازی ρ استفاده می‌شود و قانون کنترل به صورت (۲۷) نوشته می‌شود.

$$u_f(t) = u_q(t) + \delta + \rho \quad (27)$$

در رابطه (۲۷)، δ یک مقدار ثابت مثبت است که با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات بدست می‌آید. در سیستم فازی در نظر گرفته شده در این مقاله، $s(t)$ به عنوان ورودی و بهره ρ به عنوان خروجی در نظر گرفته شده‌اند. قوانین در پایگاه قواعد به صورت (۲۸) نوشته می‌شوند.

$$\text{If } s(t) \text{ is } A_m^i \text{ then } \rho \text{ is } B_m^i \quad (28)$$

شکل ۲ توابع عضویت سطح لغزش فازی را نشان می‌دهد که ورودی سیستم فازی هستند. مجموعه توابع عضویت برای سطح لغزش و خروجی فازی ρ در روابط (۲۹) و (۳۰) نشان داده شده‌اند:

$$M(s(t)) = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\} \quad (29)$$

$$M(\rho) = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\} \quad (30)$$

همه توابع عضویت استفاده شده از نوع گوسی با رابطه (۳۱) هستند.

$$\mu_A(x_i) = \exp\left[-\frac{(x_i - \alpha)^2}{\sigma}\right] \quad (31)$$

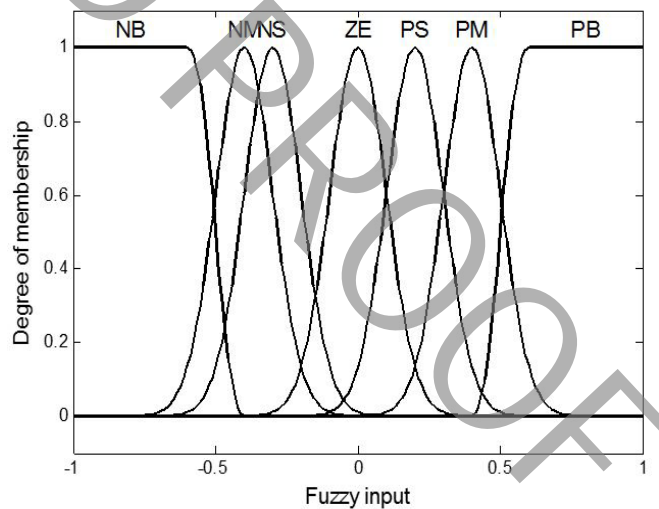


Fig. 3.

شکل ۲: توابع عضویت سطح لغزش (ورودی الگوریتم فازی).

با در نظر گرفتن رابطه (۳۵) و (۴۰)، رابطه (۴۱) نتیجه می‌شود.

$${}^c_0D_t^\alpha V(s(t)) \leq -\delta s(t) + g(X) \tilde{d}(t) s(t) + \tilde{d}(t) {}^c_0D_t^\alpha \tilde{d}(t) + h s(t) \quad (41)$$

با توجه به روابط (۲۴) و (۲۵) و با انتخاب مناسب ضریب δ ، مشتق مرتبه کسری تابع لیاپانوف منفی خواهد شد یعنی رابطه ${}^c_0D_t^\alpha V(s(t)) \leq 0$ برقرار می‌شود. بنابراین سیستم حلقه بسته با کنترل کننده مرکب از کنترل کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی و مشاهده گر اغتشاش غیر خطی با وجود نامعینی‌های ساختاری و غیرساختاری پایدار است. برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده می‌شود. این الگوریتم یک روش بهینه‌سازی اکتشافی است که بر اساس یک شباهت با اثر متقابل اجتماعی بویزه ازدحام پرندگان است [۴۱].

۳-۴- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

این الگوریتم به دلیل عدم پیچیدگی در معادلات، باعث سرعت بخشیدن به توانایی سیستم می‌شود. سرعت محاسبات یک ویژگی مهم در برنامه‌های کاربردی صنعتی است. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، ضرایب کنترل کننده پیشنهادی و ضرایب توابع عضویت فازی به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که خطای ردیابی موقعیت در ربات به صفر همگرا شود. از جمله مزایای این الگوریتم می‌توان به تضمین همگرایی به مقدار مطلوب بهینه اشاره کرد [۴۲].

در بهینه‌سازی ازدحام ذرات رفتار ذرات بر اساس موقعیتشان در فضای جستجو توسط $x_{(ij)}$ به صورت رابطه (۳۸) و مؤلفه سرعت در فضای جستجوی n بعدی توسط $v_{(ij)}$ به صورت (۳۹) تعریف می‌شود. که در آن i نشان دهنده شاخص ذرات و j بعد در فضای جستجو است. ذرات در فضای مجازی حرکت می‌کنند تا در فضای جستجو بهترین نتیجه را بدست آورند. این موقعیت در فضای جستجو، بهترین موقعیت بدست آمده در کل ازدحام است [۴۳].

$$x_{(ij)} = x_{(ij)}(t-1) + v_{(ij)}(t) \quad (42)$$

$$\begin{aligned} v_{(ij)}(t) &= w v_{(ij)}(t-1) + C_{(ij)} + S_{(ij)} \\ C_{(ij)} &= c_1 r_{(1,j)} (p_{(ij)}(t-1) - x_{(ij)}(t-1)) \\ S_{(ij)} &= c_2 r_{(2,j)} (g_{(ij)}(t-1) - x_{(ij)}(t-1)) \end{aligned} \quad (43)$$

در رابطه (۳۹)، c_1 و c_2 ضرایب شتاب شناخته شده هستند. با استفاده از توابع $p_{(ij)}$ و $g_{(ij)}$ به روزرسانی سرعت و موقعیت به صورت محلی و کلی در زمان t انجام می‌شود [۴۴].

۴- شبیه‌سازی

کنترل کننده پیشنهاد شده بر روی سیستم ارتز مفصل زانو ICOSI

رابطه (۳۲) در نظر گرفته شود، سیستم حلقه بسته پایدار مجانبی است.

اثبات: با تعریف θ^* ، رابطه $\rho = \theta^{*T} \Psi(s(t))$ یک جبران کننده بهینه برای η است. بر اساس تئوری وانگ [۳۹] $h > 0$ وجود دارد که نامعادله (۳۵) برقرار شود.

$$\eta - \rho = \eta - \theta^{*T} \Psi(s(t)) \leq h \quad (35)$$

در رابطه (۳۵)، h خطای تقریبی است و می‌تواند تا حد ممکن کوچک باشد.

با تعریف $\tilde{\theta} = \theta - \theta^*$ و جایگذاری در رابطه (۳۲)، رابطه (۳۶) بدست می‌آید.

$$\rho = \tilde{\theta}^T \Psi(s(t)) + \theta^{*T} \Psi(s(t)) \quad (36)$$

برای اثبات پایداری سیستم، یک تابع کاندید لیاپانوف با رابطه (۳۷) معرفی می‌شود.

$$V(s(t)) = \frac{1}{2} s^2(t) + \frac{1}{2} \tilde{d}^2(t) + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\theta}^2 \quad (37)$$

با مشتق‌گیری مرتبه کسری ${}^c_0D_t^\alpha$ از رابطه (۳۷) و با توجه به روابط (۱۵) و (۱۹)، رابطه (۳۸) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} {}^c_0D_t^\alpha V(s(t)) &= \frac{1}{2} {}^c_0D_t^\alpha s^2(t) + \frac{1}{2} {}^c_0D_t^\alpha \tilde{d}^2(t) + \\ &\frac{1}{2} {}^c_0D_t^\alpha \tilde{\theta}^2 \leq s(t) {}^c_0D_t^\alpha s(t) + \tilde{d}(t) {}^c_0D_t^\alpha \tilde{d}(t) + \\ &\tilde{\theta} {}^c_0D_t^\alpha \tilde{\theta} \leq -\delta s(t) + g(X) \tilde{d}(t) s(t) + \tilde{d}(t) {}^c_0D_t^\alpha \tilde{d}(t) \\ &+ (\eta - \rho) s(t) + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta} {}^c_0D_t^\alpha \tilde{\theta} \leq -\delta s(t) + \\ &g(X) \tilde{d}(t) s(t) + \tilde{d}(t) {}^c_0D_t^\alpha \tilde{d}(t) + \\ &(\eta - \theta^{*T} \Psi(s(t))) s(t) - \tilde{\theta}^T \Psi(s(t)) s(t) + \\ &\frac{1}{\gamma} \tilde{\theta} {}^c_0D_t^\alpha \tilde{\theta} \leq -\delta s(t) + g(X) \tilde{d}(t) s(t) + \\ &\tilde{d}(t) {}^c_0D_t^\alpha \tilde{d}(t) + (\eta - \theta^{*T} \Psi(s(t))) s(t) - \\ &\tilde{\theta}^T (\Psi(s(t)) s(t) + \frac{1}{\gamma} {}^c_0D_t^\alpha \tilde{\theta}) \end{aligned} \quad (38)$$

بر اساس رابطه (۳۸)، قانون تطبیقی مرتبه کسری به صورت رابطه (۳۹) بدست می‌آید.

$${}^c_0D_t^\alpha \theta = \gamma \Psi(s(t)) s(t) \quad (39)$$

با جایگذاری قانون تطبیقی بدست آمده، رابطه (۳۸) به رابطه (۴۰) تغییر می‌کند.

$${}^c_0D_t^\alpha V(s(t)) \leq -\delta s(t) + g(X) \tilde{d}(t) s(t) + \tilde{d}(t) {}^c_0D_t^\alpha \tilde{d}(t) + (\eta - \theta^{*T} \Psi(s(t))) s(t) \quad (40)$$

عملکرد و همچنین نشان دادن برتری کنترل کننده پیشنهادی، کنترل کننده کنترل مد لغزشی، کنترل کننده کنترل مد لغزشی- مشاهده گر اغتشاش غیرخطی و کنترل کننده پی‌آی‌دی نیز بر روی این سیستم شبیه‌سازی شده است. مقادیر پارامترهای کنترل کننده کنترل مد لغزشی در جدول ۴ آورده شده است.

برای تعیین ضرایب بهینه کنترل کننده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است [۴۵]. در مقاله حاضر ضرایب کنترل کننده مد لغزشی ترمینال فازی تطبیقی مرتبه کسری c_1 و δ ، و همچنین ضرایب توابع عضویت γ با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات محاسبه شده‌اند. مقادیر بدست آمده برای این پارامترها در جدول ۵ آورده شده‌اند.

جدول ۳: پارامترهای کنترل کننده مرکب از کنترل کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی- کنترل کننده مشاهده گر اغتشاش غیرخطی.

Table 3.

مقدار	پارامتر
-۰/۰۱۹	a_0
-۰/۷۶۰	a_1
۲/۳۳۴	a_2
-۰/۵۷۲	a_3
-۰/۵	T
۴/۵	k_1
۲/۶	k_2
-۰/۱۸۹	α

جدول ۴: پارامترهای کنترل کننده کنترل مد لغزشی.

Table 4.

مقدار	پارامتر
۵	c_1
۱۵	σ

جدول ۵: پارامترهای بدست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات.

Table 5.

مقدار	پارامتر
۱۴۹۱	c_1
۱۶۴۴/۳	δ
۱۱۵۱/۶	γ

شبیه‌سازی شده است. برای طراحی کنترل کننده پیشنهادی، گشتاور اعمالی شخص به ارتز به عنوان اغتشاش خارجی در نظر گرفته شده است. شکل ۳ تخمین گشتاور اعمالی شخص به ارتز که توسط مشاهده گر اغتشاش غیرخطی تخمین زده شده را نشان می‌دهد.

مقادیر پارامترهای مدل سیستم در جدول ۲ آورده شده است. در شبیه‌سازی، بخش‌های شناخته شده $f(X)$ و $g(X)$ به صورت روابط (۴۴) و (۴۵) در نظر گرفته می‌شوند.

$$\hat{f}(X) = \frac{1}{J} (-\hat{\tau}_g \cos x_1 - \hat{A} \operatorname{sign} x_2 - \hat{B} x_2 - \hat{K}(x_1 - \theta_r)) \quad (44)$$

$$\hat{g}(X) = \frac{1}{J} \quad (45)$$

که در روابط (۴۴) و (۴۵) مقادیر پارامترهای $\hat{\tau}_g$ ، \hat{A} ، \hat{B} ، \hat{K} و J برابر با ۹۰٪ مقدار واقعی آن‌ها می‌باشد.

برای شبیه‌سازی کنترل کننده مرکب از کنترل کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی- کنترل کننده مشاهده گر اغتشاش غیرخطی مقادیر پارامترها به صورت جدول ۳ در نظر گرفته شده‌اند. برای مقایسه

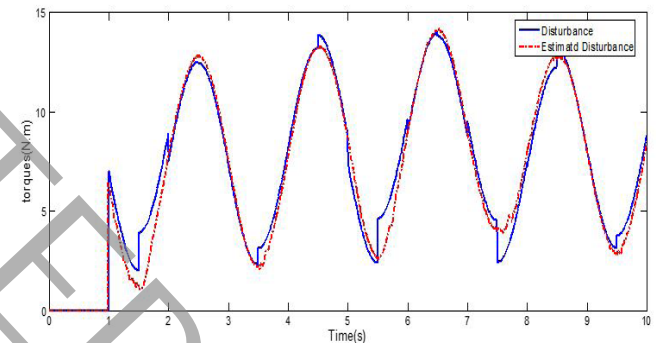


Fig. 3.

شکل ۳: مقایسه اغتشاش خارجی (گشتاور عضلانی) اعمالی به سیستم و تخمین اغتشاش خارجی.

جدول ۲: پارامترهای سیستم.

Table 2.

مقدار	پارامتر
-۰/۲۶۳۹	J
۸/۵۷۲۴	τ_g
۴/۴۲۸۹	A
-۰/۵۹۵۰	B
-۰/۳۳۸۲	k
-۱/۹	θ_r

۴-۱- ردیابی ورودی سینوسی

در این بخش ورودی سینوسی به صورت (۴۲) به عنوان زاویه مطلوب مفصل زانوی اعمالی به سیستم حلقه بسته در نظر گرفته می‌شود. کنترل‌کننده کنترل مد لغزشی، کنترل‌کننده کنترل مد لغزشی- مشاهده گر اغتشاش غیرخطی و کنترل‌کننده مرکب از کنترل‌کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی-کنترل‌کننده مشاهده گر اغتشاش غیرخطی برای کنترل سیستم EICOSI و ردیابی مسیر مطلوب به سیستم اعمال می‌شوند.

$$\theta_d(t) = 0.5 \sin(\pi t + \frac{39.5\pi}{9}) - 0.7 \quad (46)$$

زاویه مطلوب مفصل زانو و زاویه مفصل زانوی حاصل از کنترل‌کننده پی‌ای‌دی، کنترل مد لغزش، کنترل مد لغزشی- مشاهده گر اغتشاش غیرخطی و کنترل‌کننده مرکب از کنترل‌کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی-کنترل‌کننده مشاهده گر اغتشاش غیرخطی اعمال شده به سیستم EICOSI در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده کنترل مد لغزشی- مشاهده گر اغتشاش غیرخطی در مقایسه با کنترل مد لغزش مسیر مطلوب را با دقت بیشتری ردیابی کرده و در زمان کمتری نسبت به کنترل‌کننده کنترل مد لغزش به حالت ماندگار رسیده است. کنترل‌کننده پیشنهاد شده در زمان کمتری نسبت به کنترل‌کننده پی‌ای‌دی، کنترل مد لغزش و کنترل مد لغزشی- مشاهده گر اغتشاش غیرخطی به حالت ماندگار رسیده است که مقادیر آن‌ها در جدول ۶ آورده شده‌است. همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود کنترل‌کننده‌های پیش‌گفته، در هنگام تغییر جهت زاویه حرکت مفصل زانو، ردیابی زاویه مطلوب را با خطای بیشتری دنبال کرده‌اند در حالی که در کنترل‌کننده مرتبه کسری پیشنهاد شده، خطای ردیابی بسیار کم می‌باشد که نشان‌دهنده دقت ردیابی مسیر مطلوب در کنترل‌کننده پیشنهاد شده است. میانگین خطای ردیابی مربوط به چهار روش کنترلی در جدول

۶ نشان داده شده که کاهش میانگین خطای ردیابی را برای کنترل‌کننده پیشنهادی نشان می‌دهد.

وجود پدیده چترینگ در سیگنال کنترل در حین توانبخشی عدم راحتی شخص بیمار و عدم توانبخشی مطلوب عضو آسیب دیده را به همراه دارد. در شکل ۶ سطح لغزش مربوط به کنترل‌کننده کنترل مد لغزشی، کنترل مد لغزشی- مشاهده گر اغتشاش غیرخطی و کنترل‌کننده مرکب از کنترل‌کننده

جدول ۶: مقایسه بین کنترل‌کننده‌های پی‌ای‌دی، کنترل مد لغزشی، کنترل مد لغزشی- مشاهده گر اغتشاش غیرخطی و کنترل‌کننده مرکب از کنترل‌کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی-کنترل‌کننده مشاهده گر اغتشاش غیرخطی.

Table 6.

روش کنترلی	پی‌ای‌دی	کنترل مد لغزشی	کنترل مد لغزشی- مشاهده گر اغتشاش غیرخطی	کنترل‌کننده مرکب از کنترل‌کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی-کنترل‌کننده مشاهده گر اغتشاش غیرخطی
زمان رسیدن به حالت ماندگار (s)	۰/۶	۰/۵۵	۰/۴	۰/۰۶۵
خطای مطلق (بدون اغتشاش) (rad)	۰/۲۳۰۲		۰/۰۰۳۵۴	۰/۰۰۰۴۰۸
خطای مطلق (با اغتشاش) (rad)	۰/۰۰۶۴۸	۰/۰۲۱۷۴		۰/۰۰۰۴۰۹

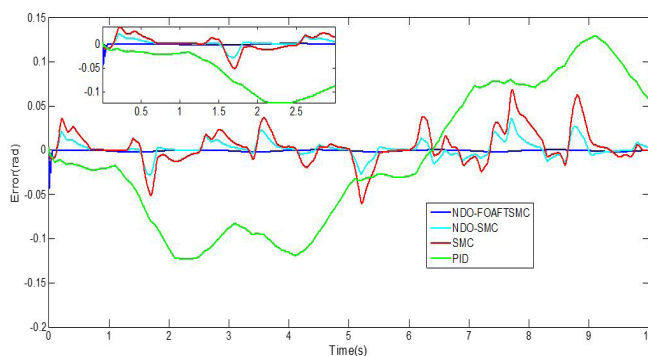


Fig. 5.

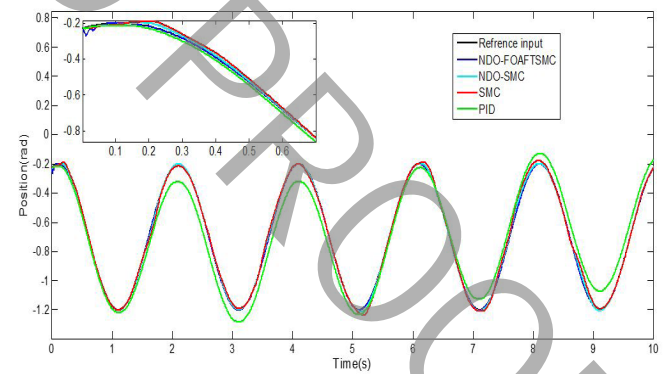


Fig. 4.

شکل ۵: سیگنال خطای کنترل‌کننده‌های پی‌ای‌دی، کنترل مد لغزش، کنترل مد لغزشی- مشاهده گر اغتشاش غیرخطی و کنترل‌کننده مرکب از کنترل‌کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی-کنترل‌کننده مشاهده گر اغتشاش غیرخطی.

شکل ۴: مقایسه دقت ردیابی کنترل‌کننده‌های پی‌ای‌دی، کنترل مد لغزش، کنترل مد لغزشی- مشاهده گر اغتشاش غیرخطی و کنترل‌کننده مرکب از کنترل‌کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی-کنترل‌کننده مشاهده گر اغتشاش غیرخطی.

مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی با کنترل‌کننده کنترل مد لغزشی ردیابی ورودی مرجع در حضور اغتشاش را با خطای کمتری دنبال می‌کند. در حالی که عملکرد کنترل‌کننده مرکب از کنترل‌کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی-کنترل‌کننده مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی چندان تحت تاثیر اغتشاش قرار نگرفته و ردیابی را به خوبی انجام می‌دهد. در واقع این کنترل‌کننده به زمان کمتری برای حذف اغتشاش احتیاج دارد. شکل ۸ نشان می‌دهد که خطای ردیابی کنترل‌کننده پی‌ای‌دی، کنترل مد لغزشی و کنترل مد لغزشی-مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی پس از اعمال اغتشاش به سیستم افزایش یافته است و این به معنی کاهش دقت ردیابی پس از اعمال اغتشاش است. این در حالی است که عملکرد سیستم با وجود اغتشاش با کنترل‌کننده مرکب از حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی-کنترل‌کننده مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی تحت تاثیر قرار نگرفته و خطای ردیابی مشابه حالت بدون اغتشاش به صفر میل می‌کند، که این موضوع نشان‌دهنده مقاوم بودن این کنترل‌کننده در برابر اغتشاش خارجی است. خطای ردیابی با اغتشاش برای چهار روش کنترلی در جدول ۶ نشان داده شده است که نسبت به حالت بدون اغتشاش، تغییر

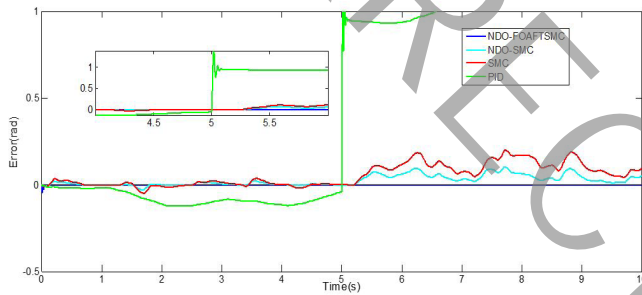


Fig. 8.

شکل ۸: سیگنال خطای کنترل‌کننده‌های پی‌ای‌دی، کنترل مد لغزشی، کنترل مد لغزشی-مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی و کنترل‌کننده مرکب از کنترل‌کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی-کنترل‌کننده مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی با اغتشاش.

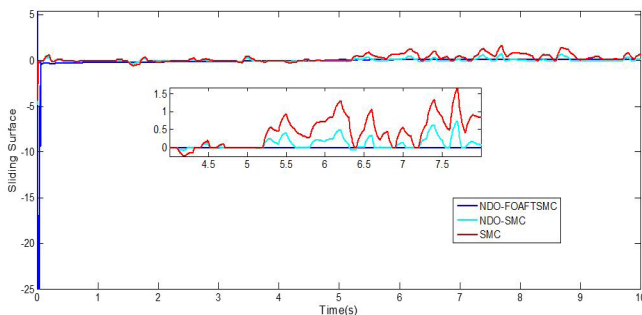


Fig. 9.

شکل ۹: سیگنال خطای کنترل‌کننده‌های پی‌ای‌دی، کنترل مد لغزشی، کنترل مد لغزشی-مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی و کنترل‌کننده مرکب از کنترل‌کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی-کنترل‌کننده مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی با اغتشاش.

با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی-کنترل‌کننده مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی رسم شده‌اند. با مقایسه این سه روش مشاهده می‌شود که چترینگ سطح لغزش در کنترل‌کننده پیشنهادی به شدت کاهش یافته است.

۴-۲- بررسی اثر اغتشاش پله‌ای

برای بررسی عملکرد سیستم در برابر اغتشاش خارجی، در لحظه ۵ ثانیه به سیستم یک اغتشاش پله اعمال شده است. ورودی سینوسی به صورت رابطه (۴۶) به عنوان زاویه مطلوب مفصل زانو به سیستم حلقه بسته اعمال می‌شود.

در شکل ۷ زاویه مطلوب مفصل زانو و زاویه مفصل زانوی حاصل از کنترل‌کننده‌های پی‌ای‌دی، کنترل مد لغزشی، کنترل مد لغزشی-مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی و کنترل‌کننده مرکب از حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی-کنترل‌کننده مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی اعمال شده به سیستم نشان داده شده‌اند. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که پس از اعمال اغتشاش پله‌ای در لحظه ۵ ثانیه برخلاف کنترل‌کننده پی‌ای‌دی، سه کنترل‌کننده دیگر ردیابی را انجام می‌دهند. کنترل‌کننده کنترل مد لغزشی-

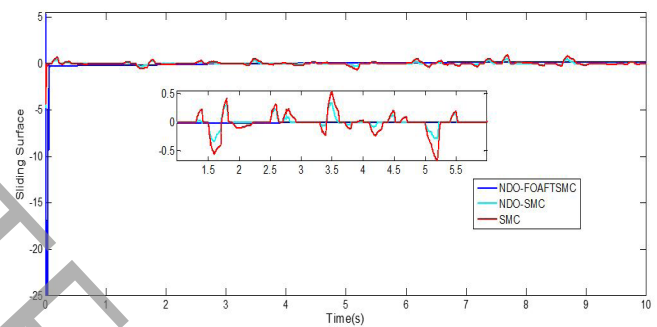


Fig. 6.

شکل ۶: سطح لغزش کنترل‌کننده‌های کنترل مد لغزشی، کنترل مد لغزشی-مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی و کنترل‌کننده مرکب از کنترل‌کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی-کنترل‌کننده مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی.

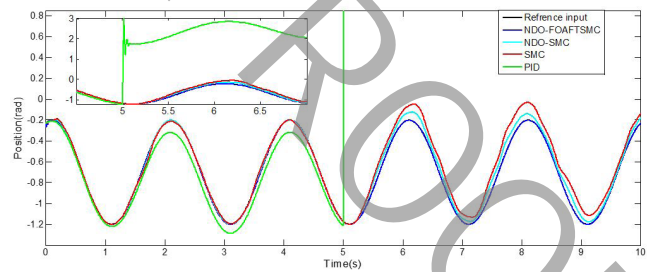


Fig. 7.

شکل ۷: مقایسه دقت ردیابی کنترل‌کننده‌های پی‌ای‌دی، کنترل مد لغزشی، کنترل مد لغزشی-مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی و کنترل‌کننده مرکب از حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی-کنترل‌کننده مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی با اغتشاش.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

مجموعه فازی	A_i^m
ضرایب سطح لغزش	a_i
مجموعه فازی	B_i^m
ضریب سطح لغزش	c_i
اغتشاش خارجی	d
مقادیر رندوم مختلف	$r_{1,i}, r_{2,i}$
تابع علامت	Sign (θ)
تلاش کنترلی	u
تلاش کنترلی معادل	u_{eq}
کنترل سویچینگ	u_s
اینرسی وزن	w

علائم انگلیسی

موقعیت زانو (rad)	θ
موقعیت زانو در حالت مطلوب (rad)	θ_d
موقعیت زانو در حالت نشسته (rad)	θ_r
گشتاور ورودی فعال کننده (N m)	τ
ترم گرانشی (N m)	τ_r

منابع

- [1] Yan, T., Cempini, M., Oddo, C. M., Vitelo, N. 2015. "Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons". *Robotics and Autonomous Systems*, 64, pp. 120-136.
- [2] Sadeghian, H., Shokrani, S., Ghorbani, L., 2017. "Imitating Sound Ankle Behavior with a Powered Below-Knee Prosthesis and Validation of its Mechanical Performance". *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (DOI): 10.22060/mej.2017.12099.5258 (in persian).
- [3] DÍAZ, I., GIL, J. J. & SÁNCHEZ, E., 2011. "Lower-limb robotic rehabilitation: literature review and challenges". *Journal of Robotics*, 2011.
- [4] Lalami, M. E., Rifai, H., Mohammed, S., Hassani, W., Amirat, Y., 2013. "Output feedback control of an actuated lower limb orthosis with bounded input," *Industrial Robot: An International Journal*, 40, pp. 541-549.
- [5] Sui, P., Yao, L., Z. Lin, Yan H., 2009. "Analysis and synthesis of ankle motion and rehabilitation robots," in *Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2009 IEEE International Conference on. pp. 2533-2538.
- [6] Hassani, W., Mohammed, S., Rifai, H., 2014. "Powered orthosis for lower limb movements assistance and

ناچیزی در کنترل کننده پیشنهاد شده را نشان می دهد.

با اعمال اغتشاش تلاش کنترلی در جهت حذف اغتشاش افزایش می یابد. در شکل ۹ سطح لغزش مربوط به کنترل کننده کنترل مد لغزشی، کنترل مد لغزشی - مشاهده گر اغتشاش غیرخطی و کنترل کننده مرکب از کنترل کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی - تطبیقی - کنترل کننده مشاهده گر اغتشاش غیرخطی با اعمال اغتشاش پله ای رسم شده اند. در کنترل کننده کنترل مد لغزشی بعد از اعمال اغتشاش در لحظه ۵ ثانیه دامنه چترینگ سطح لغزش افزایش یافته است که این افزایش در کنترل کننده کنترل مد لغزشی - مشاهده گر اغتشاش غیرخطی بسیار کمتر است. در کنترل کننده مرتبه کسری پیشنهاد شده بجز تغییر ناچیز در لحظه اعمال اغتشاش، در عملکرد سطح لغزش بعد از اعمال اغتشاش تغییر محسوسی بوجود نمی آید که نشان دهنده برتری کنترل کننده مرتبه کسری پیشنهاد شده در مواجهه با اغتشاش خارجی است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله برای کنترل ربات ارتز مفصل زانو EICOSI، یک کنترل کننده مد لغزشی ترمینال فازی تطبیقی مرتبه کسری با مشاهده گر اغتشاش غیرخطی برای حرکت در مسیر مطلوب تعیین شده ارائه گردید. در طراحی کنترل کننده مرتبه کسری پیشنهادی از ترکیب تکنیک منطق فازی، مفاهیم کنترل تطبیقی و الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات برای غلبه بر نامعینی های پارامتری و اغتشاشات خارجی استفاده شد. بر اساس نتایج شبیه سازی عملکرد خوب کنترل کننده مرتبه کسری در مواجهه با اغتشاش خارجی مشخص شد. در روش پیشنهاد شده فقط هفت قانون در پایگاه قوانین سیستم فازی استفاده شده است. بنابراین بار محاسباتی کاهش یافته و تاخیری در کنترل آنلاین برای سیستم بوجود نمی آید. عدم وجود چترینگ در سیگنال کنترل راحتی شخص در حین توانبخشی را به همراه دارد. استفاده از کنترل مد لغزشی ترمینال مرتبه کسری در ترکیب با کنترل فازی تطبیقی علاوه بر کاهش پدیده چترینگ افزایش دقت ردیابی را به همراه داشته است. گشتاور عضلانی انسان به عنوان یک اغتشاش خارجی در نظر گرفته شد و به همین دلیل از یک مشاهده گر اغتشاش غیرخطی در ترکیب با کنترل کننده مرکب از کنترل کننده با حسابان مرتبه کسری و کنترل فازی تطبیقی برای تخمین گشتاور عضلانی انسان و افزایش عملکرد سیستم ارتز - ساق پا استفاده گردید. برای تعیین ضرایب کنترل مد لغزشی ترمینال فازی تطبیقی مرتبه کسری و ضرایب توابع عضویت از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات استفاده شد. پایداری مجانبی سیستم با در نظر گرفتن نامعینی ها با استفاده از تعمیم جدید تئوری لیاپانوف برای سیستم های مرتبه کسری اثبات گردید. نتایج شبیه سازی برتری کنترل کننده پیشنهادی مرتبه کسری در کاهش پدیده چترینگ و افزایش دقت ردیابی مسیر مطلوب را در مقایسه با کنترل کننده های کنترل مد لغزشی، کنترل مد لغزشی - مشاهده گر اغتشاش غیرخطی و پی آیدی نشان می دهد.

- (in Persian).
- [18] Rifai, H., Mohammed, S., Daachi, B., Amirat, Y., 2012. "Adaptive control of a human-driven knee joint orthosis," in Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on , pp. 2486-2491.
- [19] Daachia, Madanib, M.E., Daachib, B., 2015. "A radial basis function neural network adaptive controller to drive a powered lower limb knee joint orthosis". Applied Soft Computing, 34, pp. 324–336.
- [20] Rifai, H., Mohammed, S., Daachi, B., Amirat, Y., 2016. "Toward Lower Limbs Functional Rehabilitation Through a Knee-Joint Exoskeleton". IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, pp. 1063-6536.
- [21] Benbrahim M., Essounbouli N., Hamzaoui A., Betta A., 2013. "Adaptive type-2 fuzzy sliding mode controller for SISO nonlinear systems subject to actuator faults". International Journal of Automation and Computing, 10, pp. 335-342.
- [22] Chang, M.-K., 2010. "An adaptive self-organizing fuzzy sliding mode controller for a 2-DOF rehabilitation robot actuated by pneumatic muscle actuators". Control Engineering Practice, 18, pp. 13-22.
- [23] Trelea, I. C., 2003. "The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection," Information processing letters , 85, pp. 317-325.
- [24] Nejat, A., Kaviani, H. R., 2016. "Aerodynamic optimization of a megawatt class horizontal axis wind turbine blade with particle swarm optimization algorithm". Modares Mechanical Engineering, 99, pp. 9-99 (in Persian).
- [25] Mohammed, S., Huo, W., Rifai, H., Hassani, W., Amirat, Y., 2015. "Robust Control of an Actuated Orthosis for Lower Limb Movement Restoration," in Intelligent Assistive Robots, ed: Springer , pp. 385-400.
- [26] Mefoued, S., 2014. "A robust adaptive neural control scheme to drive an actuated orthosis for assistance of knee movements" .Neurocomputing, 140, pp. 27-40.
- [27] Chen, W-H., Ballance, D., Gawthrop, P., Gribble, J., 1999. " A Nonlinear Disturbance Observer for Two Link Robotic Manipulators". Proceedings of the 38th Conference on Decision & Control, pp. 3410-3415.
- [28] Chen, W-H., 2004. " Disturbance Observer Based Control for Nonlinear Systems". IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, 9(4), pp.706-710.
- [29] Xing, K., Huang, J., Wang, Y., Wu, J., Xu, Q., He, J., 2010. "Tracking control of pneumatic artificial muscle actuators based on sliding mode and non-linear disturbance observer". IET control theory & applications, 4, pp. 2058-2070.
- rehabilitation," Control Engineering Practice , 26, pp. 245-253.
- [7] Daachi, M., Madani, T., Daachi, B., and Djouani, K., 2015. "A radial basis function neural network adaptive controller to drive a powered lower limb knee joint orthosis," Applied Soft Computing ,34, pp. 324-336.
- [8] Mohammed, S., Huo, W., Huang, J., Rifai, H., and Amirat, Y., 2016. "Nonlinear disturbance observer based sliding mode control of a human-driven knee joint orthosis". Robotics and Autonomous Systems, 75, pp. 41-49.
- [9] Barghandan, S., Badamchizadeh, M. A., Jahed-Motlagh, M. R., 2017. " Single-rod electro-hydraulic servo system control with sliding mode controller improved by parallel fuzzy compensators". Modares Mechanical Engineering, 17(2), pp. 377-384, (in Persian).
- [10] Shahmohamadi, A., Abolmasomi, A. H., Soleimani, M., 2016. "Design and Implementation of Fast Terminal Sliding Mode Control for Vehicle Lane Keeping by Using Virtual Prototyping Simulations". Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, (DOI): 10.22060/mej.2016.667 (in persian)
- [11] Delavari H., 2012. " A novel fractional adaptive active sliding mode controller for synchronization of non-identical chaotic systems with disturbance and uncertainty ". International Journal of Dynamics and Control, 5, pp. 102–114.
- [12] Nasimullah, M., Khan, K., Wang, S., 2015. "Fractional order adaptive fuzzy sliding mode controller for a position servo system subjected to aerodynamics loading and nonlinearities," Aerosp Sci Technol, 43, pp. 381-387
- [13] Mefoued, S., 2015. "A second order sliding mode control and a neural network to drive a knee joint actuated orthosis," Neurocomputing, 155, pp. 71-79.
- [14] Shafiei, S. E., Soltanpour, M. R., 2011. "Neural network sliding-mode-PID controller design for electrically driven robot manipulators," International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 7, pp. 511-524.
- [15] Guo, Y., Woo, P.-Y., 2003. " An adaptive fuzzy sliding mode controller for robotic manipulators", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, 33, pp. 149-159.
- [16] Shakki, S., Zakerzadeh, M. R., 2016. " Modeling and control of a shape memory alloy actuator using fuzzy sliding mode controller". Modares Mechanical Engineering, 16(7), pp. 353-360 (in Persian).
- [17] Yousefi, F., Alipour, Kh., Tarvardizadeh, B., Hadi, A., 2016. " Control of knee rehabilitation robot based on combination of backstepping and admittance algorithms". Modares Mechanical Engineering, 16(12), pp. 135-143

- Conference on, pp. 1131-1136.
- [38] Temeltas, H., 1998. "A fuzzy adaptation technique for sliding mode controllers," in *Industrial Electronics. Proceedings. ISIE'98. IEEE International Symposium on*, pp. 110-115.
- [39] Yang Y., Yang C., Lee K.-M., Yu H., 2009. "Model-based fuzzy adaptation for control of a lower extremity rehabilitation exoskeleton". in *Advanced Intelligent Mechatronics. AIM 2009. IEEE/ASME International Conference on*, pp. 350-355
- [40] Wang, L., 1997. "A course in Fuzzy Systems and Control. New Jersey: Prentice-Hall International". ed: Inc.
- [41] Mahmoodabadi, M.J., Taherkhorsandi, M., Bagheri A., 2014. " Optimal Robust Sliding Mode Tracking Control of a Biped Robot Based on Ingenious Multi-objective PSO". *Neurocomputing*, 124, pp. 194-209.
- [42] Allouani, A., Boukhetala, D., Boudjema, F., 2012. " Particle swarm optimization based fuzzy sliding mode controller for the Twin Rotor MIMO system". *Nonlinear Dynamic*, 74, pp. 467-478.
- [43] Atyabi, A., Phon-Amnuaisuk, S., Ho, C. K., 2010. "Applying area extension PSO in robotic swarm," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 58, pp. 253-285.
- [44] Shi, Y., Eberhart, R., 1998. "A modified particle swarm optimizer". in *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on*, pp. 69-73.
- [45] Faieghi, M. R., Delavari, H., Baleanu, D., 2012. "A novel adaptive controller for two-degree of freedom polar robot with unknown perturbations ", 17, pp. 1021-1030.
- [30] Huo, W., Mohammed, S., Amirat, Y., 2015. " Observer-Based Active Impedance Control of a Knee-Joint Assistive Orthosis". *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, pp. 313-318.
- [31] Li, C., Deng, W, 2007. "Remarks on fractional derivatives," *Applied Mathematics and Computation*, 187, pp. 777-784.
- [32] Park, K. B., Tsuji, T., 1999. "Terminal sliding mode control of second order nonlinear uncertain systems". *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 9, pp. 769-780.
- [33] Aguila-Camacho, N., Duarte-Mermoud, M. A., Gallegos, J. A., 2014 "Lyapunov functions for fractional order systems". *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 19, pp. 2951-2957.
- [34] Mohadeszadeh M., Delavari H., A. 2017. " Synchronization of uncertain fractional-order hyperchaotic systems via a novel adaptive interval type-2 fuzzy active sliding mode controller". *International Journal of Dynamics and Control*, 5, pp. 135-144.
- [35] Mottahedi, A., Akbarzadeh Kalat, A., 2016. "Adaptive robust sliding mode control of quadrotor in the presence of wind/ disturbance". *Modares Mechanical Engineering*, 16(12), pp. 95-102 (in Persian)
- [36] Pourm Mahmood Aghababa M., 2014. "Control of Fractional-Order Systems Using Chatter-Free Sliding Mode Approach". *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics* 9(3)pp.1-22 doi: 10.1115/1.4025771.
- [37] Chiang, C.-C., Hu, C.-C., 1999. "Adaptive fuzzy controller for nonlinear uncertain systems." in *Intelligent Processing and Manufacturing of Materials, 1999. IPMM'99. Proceedings of the Second International*