



## کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال بر مبنای رهیافت مد لغزشی ترمینال انتگرالی غیرتکین پسگام تطبیقی

مجید مختاری، مصطفی تقی‌زاده\*، محمود مزارع

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۸  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۰۵  
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۷  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳

### کلمات کلیدی:

ربات اسکلت خارجی  
کنترل‌کننده تطبیقی مقاوم  
کنترل تحمل‌پذیر عیب  
نقطه گشتاور صفر

**خلاصه:** در این مقاله، کنترل فعال تحمل‌پذیر عیب زمان محدود بر مبنای روش کنترل تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی به منظور کنترل یک ربات اسکلت خارجی پایین تنه در حضور عیب عملگر ارائه شده است. برای شناسایی و ایزوله کردن عیب عملگر، از روییت‌گر مد لغزشی فرایپچی مرتبه سوم استفاده شده است. برای حذف پدیده چترینگ در کنترل مد لغزشی معمولی، الگوریتم مد لغزشی فرایپچی بکار گرفته شده است که منجر به همگرایی زمان محدود و دقت بالا در ردیابی مسیرهای مرجع می‌شود. ترم پسگام این کنترل‌کننده نیز پایداری عمومی بر اساس معیار لیانوف را تضمین خواهد کرد. همچنین از حرکت لینک کمر برای ایجاد پایداری بر اساس معیار نقطه گشتاور صفر استفاده شده است. برای دستیابی به پایداری حداکثری ربات بر اساس معیار نقطه گشتاور صفر، کمترین خطا در تعقیب مسیرهای مطلوب مفاصل ربات و افزایش قابلیت سیستم در تحمل عیب عملگر، پارامترهای کنترل‌کننده پیشنهادی، پارامترهای مسیر مطلوب بالاتنه و پارامترهای رویتر به کمک الگوریتم جستجوی هارمونی بهینه شده است. عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی با عملکرد کنترل‌کننده مد لغزشی معمولی با و بدون حلقه تشخیص عیب مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی برتری کنترل‌کننده پیشنهادی را در حضور عیب عملگر نسبت به کنترل‌کننده‌های دیگر نشان می‌دهد.

### ۱- مقدمه

خارجی می‌باشد [۴]. در ادامه روند توسعه ربات‌های خانواده بلیکس، ربات آگروهیکر برای حمل بارهای سنگین در مدت زمان طولانی و برای حرکت در سطوح با شیب کم با استراتژی کنترلی فعال طراحی شده است. ربات آگروکلایمبر برای کوهپیمایی با استراتژی کنترلی مشابه با آگروهیکر و هالک با استراتژی کنترلی مشابه بلیکس نیز از ربات‌های طراحی شده در دانشگاه برکلی می‌باشند [۵]. همچنین در اکثر ربات‌های اسکلت خارجی در زمینه پزشکی و برای کمک به افراد معلول برای راه رفتن، استراتژی کنترلی بر مبنای کنترل‌کننده موقعیت براساس مسیرهای ازپیش تعیین شده می‌باشد [۶]. به منظور مقابله با عیوب وارد شده به سیستم، مقابله با اثرات دینامیک‌های مدل‌نشده، نامعینی‌های سیستم و اغتشاشات وارده از انسان و محیط به ربات و همچنین کاهش هزینه متابولیکی کاربر، انتخاب استراتژی کنترلی مناسب برای ربات‌های اسکلت خارجی حائز اهمیت است. برای مقابله با عیوب سیستم، استراتژی کنترلی تحمل‌پذیر عیب توسعه داده شده است [۷-۹]. کنترل تحمل‌پذیر عیب بر دو نوع است: کنترل تحمل‌پذیر عیب غیرفعال و کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال. طراحی کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال بر اساس

ربات‌های اسکلت خارجی با دو کاربری اصلی توانبخشی و توان افزایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از عمده مسائل مطرح در ربات‌های اسکلت خارجی نحوه تعامل انسان و ربات با یکدیگر و هماهنگی حرکات ربات با حرکت انسان می‌باشد. در این راستا همواره تلاش‌هایی برای افزایش میزان تطابق حرکات ربات با بدن انسان و همچنین توسعه و استفاده از استراتژی‌های کنترلی مناسب به منظور مقابله با اغتشاشات، دینامیک‌های مدل‌نشده و نامعینی‌های سیستم صورت گرفته است [۱].

ربات‌های اسکلت خارجی ابتدا در آمریکا [۲]، ژاپن و اروپا [۳] مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. پس از آن با پیشرفت علوم مکترونیک و رباتیک، تحقیقات در زمینه ربات‌های اسکلت خارجی به سرعت توسعه یافت. در یک نمونه نظامی ربات بلیکس به منظور تقویت نیرو و استقامت کاربر در هنگام حرکت، طراحی و ساخته شده است. الگوریتم کنترل این ربات، کنترل مبتنی بر مدل و براساس استراتژی کمکی افزایش حساسیت به نیروها و گشتاورهای

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mo\_taghizadeh@sbu.ac.ir



تخمین برخط عیب انجام می‌شود. در حالی که برای کنترل تحمل‌پذیر عیب غیرفعال از یک کنترل‌کننده مقاوم بدون نیاز به سیستم تشخیص عیب استفاده خواهد شد [۱۰].

روش‌های مختلفی برای تشخیص و تخمین عیب در سیستم‌های غیرخطی و رباتیک مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۱]. در برخی از کاربردها از شبکه عصبی یادگیرنده برای تشخیص مقاوم عیب پیشنهاد شده است. اما نتایج نشان داده است که این رویکردها نمی‌توانند همگرایی زمان محدود را تضمین کنند [۱۲]. همچنین برخی از روش‌های هوشمند مانند روش فازی برای تخمین و تشخیص عیب استفاده شده است [۱۳]. برخی از روش‌های مبتنی بر مد لغزشی در تشخیص و تخمین عیب مورد استفاده قرار گرفته است که نتایج، عملکرد مناسب این روش‌ها را نشان داده‌اند [۱۴].

به منظور افزایش قابلیت‌های ربات در تعقیب مسیرهای مرجع در حضور اغتشاشات، عدم قطعیت‌ها و عیب سیستم، کنترل‌کننده‌های مختلفی مانند کنترل‌کننده‌های خطی [۱۵]، کنترل‌کننده‌های هوشمند و یادگیرنده [۱۶]، کنترل‌کننده بهینه [۱۷] و کنترل‌کننده‌های مقاوم [۱۸]، ارائه شده‌اند. کنترل‌کننده مد لغزشی به عنوان یک کنترل‌کننده مقاوم در برابر اغتشاشات و نامعینی‌های مدل در سال‌های اخیر توسعه یافته است [۱۹]. از عمده مشکلات این کنترل‌کننده سرعت همگرایی پایین، عملکرد ضعیف در مقابله با اغتشاشات با سرعت تغییرات بالا، نیاز به آگاهی از محدوده عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات سیستم و پدیده چترینگ می‌باشد. به منظور مقابله با عیب‌های موجود در سیستم کنترل‌کننده باید سه خصوصیت مهم زمان همگرایی محدود، سرعت بالای پاسخ گذرا و حذف پدیده چترینگ را داشته باشد [۲۰]. مزیت‌ها و قابلیت‌های کنترل‌کننده مد لغزشی باعث شده است که همواره تلاش‌هایی برای بهبود عملکرد این کنترل‌کننده صورت پذیرد. به منظور ایجاد قابلیت همگرایی زمان محدود در کنترل‌کننده مد لغزشی، کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینالی طراحی شده است [۲۱]. همچنین به منظور افزایش هرچه بیشتر سرعت همگرایی، کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینالی سریع ارائه شده است [۲۲]. تکینگی از عمده مشکلات کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینالی و کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینالی سریع است [۲۳]. به منظور مقابله با پدیده تکینگی در کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینالی، کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینالی سریع غیرتکین طراحی و ارائه شده است [۲۴]. همچنین برای افزایش سرعت پاسخ گذرای کنترل‌کننده مد لغزشی، با الگوگیری از کنترل‌کننده تناسبی-انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر، کنترل‌کننده‌های مد لغزشی تناسبی-انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر [۲۵] و کنترل‌کننده‌های مد لغزشی ترمینالی

تناسبی-انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر، ارائه شده است [۲۶].

یکی از بزرگترین مشکلات در کنترل‌کننده مد لغزشی وجود پدیده چترینگ می‌باشد که کاهش آن می‌تواند باعث بالارفتن سرعت همگرایی سیستم و صرفه‌جویی در مصرف انرژی شود. به منظور کاهش پدیده چترینگ، یک لایه مرزی در اطراف سطح لغزش تعریف می‌شود. در این حالت نه تنها پدیده چترینگ به طور کامل حذف نمی‌شود بلکه میزان مقاوم‌بودن سیستم در مقابله با عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات سیستم کاهش می‌یابد [۲۷]. برای مقابله موثر با پدیده چترینگ و بالارفتن دقت و سرعت همگرایی سیستم به مقادیر مرجع، کنترل‌کننده‌های مد لغزشی فرایپجشی و مد لغزشی فرایپجشی مرتبه بالا توسعه یافته‌اند [۲۸ و ۲۹]. با استفاده از این روش‌ها پدیده چترینگ ذاتا و بدون تعریف لایه مرزی و با حفظ توانایی کنترل‌کننده در مقابله با عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات سیستم، کاهش می‌یابد.

الگوریتم پسگام یک روش سیستماتیک طراحی کنترل‌کننده بر مبنای تئوری پایداری لیاپانوف برای سیستم‌های غیرخطی می‌باشد [۳۰]. ایده این روش تضمین پایداری عمومی سیستم از طریق گسترش تابع لیاپانوف از یک سیستم ساده به یک سیستم پیچیده با متغیرهای اضافه و به طور همزمان طراحی کنترل‌کننده پس‌خورده با یک الگوریتم پله‌ای می‌باشد [۳۱]. این الگوریتم توانایی مقابله با اغتشاشات ناسازگار را داشته و ترکیب آن با کنترل‌کننده مد لغزشی سبب افزایش مقاومت سیستم خواهد شد [۳۲].

در این مقاله کنترل فعال تحمل‌پذیر عیب سیستم بر مبنای کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینالی سریع انتگرالی<sup>۱</sup> و روینگر فرایپجشی مرتبه سوم صورت می‌پذیرد. از خصوصیات مهم کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینالی سریع انتگرالی، سرعت همگرایی بالا، پاسخ حالت گذرای سریع، پایداری براساس قانون لیاپانوف و حذف پدیده چترینگ با تعریف سطح لغزش غیرتکین ترمینالی سریع انتگرالی و دستیابی به قانون کنترل پیوسته مانند کنترل‌کننده‌های مرتبه بالای مد لغزشی فرایپجشی اشاره کرد. همچنین به منظور مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های با دامنه نامعلوم و نامحدود سیستم، در کنترل‌کننده پیشنهادی از یک قانون تطبیق مناسب استفاده شده است.

در این مقاله از مشاهده‌گر مرتبه بالای فرایپجشی مد لغزشی برای تشخیص و تخمین عیب سیستم استفاده شده است. این روینگر دارای دو مزیت اساسی ذاتی است. ۱- تخمین دقیق سرعت بدون استفاده از فیلتر ۲- استفاده از خواص کنترل‌کننده مد لغزشی مرتبه بالا در شناسایی

1 Adaptive Backstepping Nonsingular Fast Integral Type Terminal Sliding Mode Controller (ABNSFITSMC)

ساختار این مقاله بدین ترتیب است: در قسمت ۲ ربات اسکلت خارجی مورد نظر معرفی شده و معادلات دینامیکی آن با استفاده از روش لاگرانژ استخراج شده است. در قسمت ۳ روش کنترل ارائه شده و پایداری آن بررسی شده است. در قسمت ۴ معیار پایداری نقطه گشتاور صفر ارائه شده و مسیر مطلوب مفصل بالاتنه به منظور برقراری پایداری تعیین شده است. در قسمت ۵ شبیه‌سازی‌ها انجام شده و کنترل‌کننده‌های طراحی شده بر روی مدل استخراجی اعمال شده است. در آخر نتایج حاصل از پژوهش در بخش ۶ بیان شده است.

## ۲- معرفی و مدل‌سازی مکانیزم پیشنهادی

همانگی مناسب بین حرکات ربات و کاربر نیازمند تبعیت کامل سینماتیک ربات از سینماتیک کاربر و همچنین تطابق هر چه بیشتر درجات آزادی ربات با بدن انسان می‌باشد. در طراحی ربات‌های اسکلت خارجی، قرارگیری مفاصل ربات بر روی مفاصل کاربر بسیاری از مشکلات طراحی را حل می‌کند. این رویکرد در طراحی را می‌توان در سری ربات‌های هال مشاهده کرد [۴۰]. در این مقاله، به منظور دستیابی به حرکات هماهنگ ربات و کاربر از یک مدل ۷ درجه آزادی که دارای مفاصلی منطبق بر ران، زانو و قوزک انسان می‌باشد، استفاده شده است. در شکل ۱ شماتیک ربات اسکلت خارجی مورد مطالعه نشان داده شده است.

در شکل ۱،  $\theta_i$ ،  $L_i$  و  $cm_i$  برای  $i=1$  تا ۷ به ترتیب زوایای لینک‌های ربات، طول لینک‌های ربات و مرکز جرم لینک‌های ربات می‌باشند.  $a$  و  $b$  نیز ابعاد کف پای ربات می‌باشند. با محاسبه انرژی پتانسیل و جنبشی ربات و استفاده از روش لاگرانژ در نهایت معادلات دینامیکی ربات به صورت رابطه کلی (۳) بیان می‌شود [۴۱].

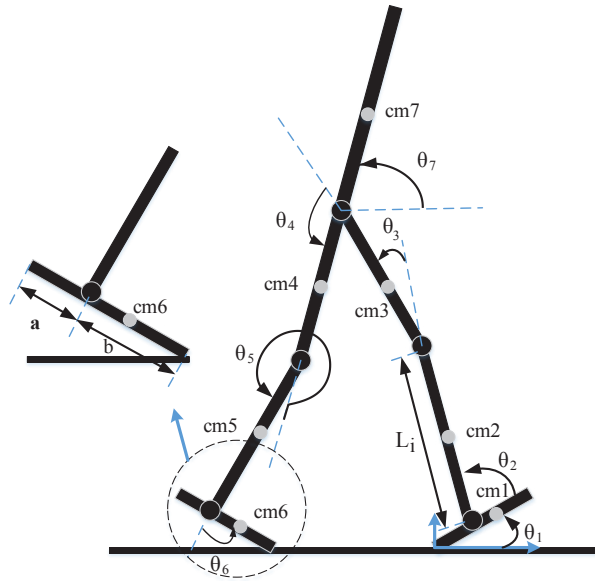
$$\begin{aligned} \tau = & M(\theta)\theta'' + C(\theta, \theta') + \\ & G(\theta) + F(\theta') + \tau_d + \\ & \beta(t - T_f)\varphi(\theta, \theta', \tau) + \Delta(\theta, \theta', t) \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن  $\tau$  گشتاور مربوط به عملگرها،  $M(\theta)$  ماتریس ممان اینرسی،  $C(\theta, \theta')$  ماتریس اثرات گریز از مرکز و ژيروسکوپی،  $G(\theta)$  بردار نیروهای گرانشی،  $F(\theta')$  نیروهای اصطکاکی،  $\varphi(\theta, \theta', \tau)$  بردار عیب عملگرها،  $\beta(t - T_f)$  نشان‌دهنده پروفیل زمانی عیب،  $\Delta(\theta, \theta', t)$  نامعینی کلی سیستم و  $\tau_d$  گشتاور اغتشاش می‌باشند.

روودی‌های ناشناخته [۳۳]. استفاده از فیلتر باعث ایجاد تأخیر زمانی و خطا شده که در نهایت عملکرد سیستم تشخیص خطا را تضعیف می‌کند.

حفظ تعادل ربات در برابر اغتشاشات و عیوب موجود در سیستم از مهم‌ترین مشخصه‌های عملکردی ربات‌های اسکلت خارجی در هنگام راه‌رفتن می‌باشد. روش‌های مختلفی برای بررسی پایداری ربات‌های راه‌رونده توسعه داده شده است که از مهمترین آن‌ها می‌توان به روش‌های معیار پایداری مرکز ثقل [۳۴]، معیار پایداری نشان‌گر چرخش پا [۳۵]، معیار پایداری انرژی مینا [۳۶] و معیار پایداری ارتفاع گشتاور [۳۷] اشاره کرد. معیار پایداری نقطه گشتاور صفر برای بررسی پایداری در ربات‌هایی که مفاصل آن فعال هستند و در هر لحظه ربات حداقل روی یک پا می‌ایستد، مورد استفاده قرار گرفته است [۳۸].

در این مقاله، در ابتدا مدل ربات در نرم‌افزار آدامز ایجاد شده و معادلات دینامیکی ربات با روش لاگرانژ استخراج شده است. سپس کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب فعال با ترکیب کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی و حلقه تخمین و تشخیص عیب بر مبنای رویکرد فرایپچشی مرتبه سوم طراحی شده است. پایداری راه‌رفتن ربات با معیار نقطه گشتاور صفر در هر لحظه بررسی شده و به منظور دستیابی به حداکثر حاشیه پایداری از حرکات مفصل بالاتنه ربات استفاده شده است. اطمینان از عملکرد مطلوب سیستم در دستیابی به حداکثر پایداری و کمترین خطا در تعقیب مسیرهای مطلوب مفاصل، با بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده، پارامترهای مسیر بالاتنه و پارامترهای رویکرد به کمک الگوریتم جستجوی هارمونی حاصل شده است [۳۹]. به منظور بررسی عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی با کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی بدون حلقه تشخیص عیب، کنترل‌کننده مد لغزشی معمولی با حلقه تشخیص عیب و کنترل‌کننده مد لغزشی معمولی بدون حلقه تشخیص عیب مقایسه شده است. نوآوری این مقاله عبارتست از: ۱- طراحی کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی برای ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه هفت درجه آزادی ۲- طراحی کنترل‌کننده فعال تحمل‌پذیر عیب با ترکیب کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی و رویکرد فرایپچشی مرتبه سوم ۳- بررسی اثرات عیب عملگر بر حرکات لینک کمر و پایداری راه‌رفتن ربات براساس معیار نقطه گشتاور صفر ۴- بهینه‌سازی همزمان پارامترهای کنترل‌کننده، پارامترهای مسیر مطلوب بالاتنه و پارامترهای رویکرد با الگوریتم جستجوی هارمونی.



شکل ۱. شماتیک ربات اسکلت خارجی پایین تنه هفت درجه آزادی

Fig. 1. Schematic of a 7-DOF lower limb exoskeleton

سینماتیک معکوس ربات حاصل شده است.

$\beta(t - T_f)$  به صورت رابطه (۲) تعریف شده است.

### ۳- طراحی کنترل کننده

روش کنترل مد لغزشی از متداولترین روشهای کنترلی است که در دسته کنترل کنندههای مقاوم قرار می‌گیرد [۱۹]. به منظور طراحی کنترل کننده مد لغزشی، برای هر متغیر حالت خطا به صورت در نظر گرفته شده و یک سطح متغیر با زمان برای آن تعریف می‌شود. به منظور دستیابی به مزایای سرعت همگرایی بالا و پاسخ گذرای سریع، سطح لغزش غیرتکین ترمینال سریع انتگرالی مد لغزشی به صورت رابطه (۴) تعریف شده است [۲۰].

$$\beta_i(t - T_f) = \begin{cases} 0 & t \leq T_f \\ 1 - e^{-\gamma(t - T_f)} & t > T_f \end{cases} \quad (2)$$

که در آن  $T_f$  زمان رخداد عیب و  $\gamma$  یک ثابت مثبت است. در  $\gamma$  کوچک، عیب به آرامی اتفاق می‌افتد و با افزایش مقدار  $\gamma$  به سمت  $\infty$ ،  $\beta_i$  به صورت یک تابع پله به سیستم اعمال می‌شود. رابطه (۱) را می‌توان به صورت رابطه (۳) بازنویسی کرد.

$$S_1 = \int (e + k_1 e^\lambda + k_2 e^{p/q}) dt \quad (4)$$

که در آن  $k_1$ ،  $k_2$  و  $\lambda$  ثوابتی مثبت می‌باشند.  $p$  و  $q$  اعداد مثبت و فردی هستند که برای دستیابی به یک کنترل کننده غیرتکین می‌بایست  $1 < \frac{p}{q} < 2$  و  $\lambda > \frac{p}{q}$  باشد [۲۰]. هدف از طراحی کنترل کننده مد لغزشی، قراردادن مشتق سطح متغیر با زمان در نزدیکی صفر است. با مشتق گیری نسبت به زمان، مشتق اول و دوم سطح لغزش از رابطه (۵) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} \theta'' &= M^{-1}(\theta)(\tau - C(\theta, \theta') - G(\theta)) + \tilde{\Delta} + \beta(t - T_f)\varphi(\theta, \theta', \tau) \\ \tilde{\Delta} &= M^{-1}(\theta)(-F(\theta') - \tau_d - \Delta(\theta, \theta', t)) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \|\tilde{\Delta}\| &< \bar{\Delta} \\ \|\varphi(\theta, \theta', \tau)\| &< \bar{\varphi} \end{aligned}$$

در رابطه (۳)  $\tilde{\Delta}$  معرف عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات سیستم و  $\bar{\Delta}$  و  $\bar{\varphi}$  ثابت مثبت مشخص می‌باشند. در این مقاله مسیرهای مرجع مفاصل ربات با الگوبرداری از حرکت مفصل و ران پای انسان به صورت تجربی و استفاده از

با تعریف ورودی کنترلی مجازی  $\alpha_2 = -\xi_2 v_2 - v_1 - \xi_1 S_2$  رابطه (۹) به صورت رابطه (۱۰) بازنویسی شده است.

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + v_2 \dot{v}_2 = -\xi_1 |v_1|^2 + v_1 v_2 + v_2 (v_3 - \xi_2 v_2 - v_1) \\ \dot{V}_2 &= -\xi_1 |v_1|^2 - \xi_2 |v_2|^2 + v_2 v_3 \end{aligned} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)  $\xi_2$  یک ثابت مثبت است. در صورتی که  $v_3$  به سمت صفر میل کند  $\dot{V}_2$  منفی شده و حالت‌های  $v_1$  و  $v_2$  به صورت مجانبی پایدار هستند. در مرحله سوم از طراحی کنترل‌کننده پسگام تابع لیاپانوف  $V_3 = V_2 + \frac{1}{2} v_3^2$  تعریف شده است که با مشتق‌گیری از آن رابطه (۱۱) حاصل شده است.

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= \dot{V}_2 + v_3 \dot{v}_3 = -\xi_1 |v_1|^2 - \xi_2 |v_2|^2 + v_2 v_3 \\ &+ v_3 \frac{d}{dt} (\dot{e} + k_1 \lambda |e|^{\lambda-1} \dot{e} + k_2 \frac{p}{q} |e|^{\frac{p}{q}-1} (\theta^n - \ddot{q}_d) - \dot{\alpha}_2) \end{aligned} \quad (11)$$

یک قانون کنترلی برای کنترل‌کننده پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی به صورت رابطه (۱۲) پیشنهاد شده است.

$$\begin{aligned} U &= \frac{M(\theta)}{\Xi} (U_n - U_s) \\ U_n &= \Xi \ddot{q}_d + \Xi M^{-1}(\theta) [C(\theta, \theta') \theta' + G(\theta)] + \\ &\alpha_2 - \psi - \int (\xi_3 v_3 - v_2) dt \\ \dot{U}_s &= (A + \xi) \text{sign}(v_3) \\ \psi &= \dot{e} + k_1 \lambda |e|^{\lambda-1} \dot{e} \\ \Xi &= k_2 \frac{p}{q} |e|^{\frac{p}{q}-1} \end{aligned} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)  $\xi$  و  $\xi_3$  ثوابت مثبت هستند.  $A$  نیز یک ثابت مثبت است که شرط  $\xi < A$  را برآورده می‌سازد.  $\Upsilon$  از رابطه (۱۳) حاصل شده است [۲۰].

$$\begin{aligned} \Upsilon &= \frac{d}{dt} (\Xi \hat{\Delta}) \\ \hat{\Delta} &= \tilde{\Delta} + \beta(t - T_f) \varphi(\theta, \theta', \tau) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\dot{S}_1 = \dot{e} + k_1 e^\lambda + k_2 \dot{e}^{\frac{p}{q}} \quad (5)$$

$$\dot{S}_1 = \dot{e} + k_1 \lambda |e|^{\lambda-1} \dot{e} + k_2 \frac{p}{q} |e|^{\frac{p}{q}-1} \ddot{e}$$

با توجه به روابط (۴) و (۵) معادلات فضای حالت مرتبه سوم به صورت رابطه (۶) حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 &= S_2 \\ \dot{S}_2 &= S_3 \\ \dot{S}_3 &= \frac{d}{dt} (\dot{e} + k_1 \lambda |e|^{\lambda-1} \dot{e} + k_2 \frac{p}{q} |e|^{\frac{p}{q}-1} (\theta^n - \ddot{q}_d)) \end{aligned} \quad (6)$$

در رابطه (۶)  $\ddot{q}_d$  شتاب متغیرهای زاویه‌ای مفاصل ربات می‌باشد. به منظور دستیابی به قانون کنترلی براساس الگوریتم کنترل‌کننده پسگام، متغیرهای جدید حالت سیستم به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} v_1 &= S_1 \\ v_2 &= S_2 - \alpha_1 \\ v_3 &= S_3 - \alpha_2 \end{aligned} \quad (7)$$

در ادامه روند طراحی کنترل‌کننده پسگام، در مرحله اول با تعریف تابع لیاپانوف مثبت معین  $V_1 = \frac{1}{2} v_1^2$  مشتق‌گیری از تابع لیاپانوف و با تعریف قانون کنترل مجازی  $\alpha_1 = -\xi_1 v_1$  رابطه (۸) حاصل شده است.

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= v_1 \dot{v}_1 = v_1 (v_2 + \alpha_2) = v_1 (v_2 - \xi_1 v_1) \\ &= -\xi_1 |v_1|^2 + v_1 v_2 \end{aligned} \quad (8)$$

در رابطه (۸) اگر  $v_2 = 0$  باشد، آنگاه  $\dot{V}_1 = -\xi_1 |v_1|^2$  و  $v_1$  به صورت مجانبی پایدار است.  $\xi_1$  یک ثابت مثبت است. در مرحله دوم از طراحی کنترل‌کننده پسگام تابع لیاپانوف  $V_2 = V_1 + \frac{1}{2} v_2^2$  تعریف شده است که با مشتق‌گیری از آن رابطه (۹) حاصل شده است.

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + v_2 \dot{v}_2 = -\xi_1 |v_1|^2 + \\ &v_1 v_2 + v_2 (v_3 + \alpha_2 + \xi_1 S_2) \end{aligned} \quad (9)$$

با جایگزاری رابطه (۱۲) در رابطه (۱۱)، رابطه (۱۴) حاصل شده است.

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= -\xi_1 |v_1|^2 - \xi_2 |v_2|^2 - \xi_3 |v_3|^2 + v_3 \frac{d}{dt} (U_s + \Xi \hat{\Delta}) \\ &\quad \mathcal{L} - \xi_1 |v_1|^2 - \xi_2 |v_2|^2 - \xi_3 |v_3|^2 - (A + \xi) |v_3| + i |v_3| \end{aligned} \quad (14)$$

با توجه به رابطه (۱۴)  $\dot{V}_3$  منفی نیمه‌معین شده و حالت‌های  $U_1$ ،  $U_2$  و  $U_3$  به صورت مجانبی پایدار بوده و در زمان محدود به صفر همگرا می‌شوند. روابط (۱۲) و (۱۴) با این فرض برقرار است که مقدار  $A$  به‌عنوان کران بالای تابع  $Y$  مشخص باشد. این فرض در کاربردهای عملی بسیار پیچیده است چرا که آگاهی از محدوده عدم قطعیت‌ها، اغتشاشات و عیوب سیستم عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد. برای حل این مشکل از یک قانون تطبیق استفاده شده‌است. بنابراین قانون کنترلی کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی به صورت رابطه (۱۵) پیشنهاد شده است.

$$\begin{aligned} U &= \frac{M(\theta)}{\Xi} (U_n - U_{as}) \\ \dot{U}_{as} &= (\hat{A} + \xi) \text{sign}(v_3) \\ \hat{A} &= \frac{1}{\delta} |v_3| \end{aligned} \quad (15)$$

برای اثبات پایداری کنترل‌کننده پیشنهادی، تابع لیاپانوف به‌صورت رابطه (۱۶) در نظر گرفته شده است.

$$V_4 = V_3 + \frac{1}{2} \delta (A - \hat{A})^2 \quad (16)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۱۶)، رابطه (۱۷) حاصل شده‌است.

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 &= -\xi_1 |v_1|^2 - \xi_2 |v_2|^2 + v_2 v_3 \\ &\quad + v_3 \frac{d}{dt} (\dot{e} + k_1 \lambda |e|^{\lambda-1} \dot{e} + k_2 \frac{p}{q} |e|^{\frac{p}{q}-1} (\theta^n - \dot{q}_d) - \dot{\alpha}_2) + \delta (A - \hat{A}) \dot{\hat{A}} \end{aligned} \quad (17)$$

با استفاده از روابط (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) رابطه (۱۸) بدست آمده‌است.

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 &= -\xi_1 |v_1|^2 - \xi_2 |v_2|^2 - \xi_3 |v_3|^2 + v_3 \frac{d}{dt} (U_{as} + \Xi \hat{\Delta}) + \delta (A - \hat{A}) \dot{\hat{A}} \\ &= -\xi_1 |v_1|^2 - \xi_2 |v_2|^2 - \xi_3 |v_3|^2 + v_3 (-\hat{A} + \xi) \text{sign}(v_3) + \\ &\quad \frac{d}{dt} (\Xi \hat{\Delta}) + \delta (A - \hat{A}) \dot{\hat{A}} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} &\mathcal{L} - \xi_1 |v_1|^2 - \xi_2 |v_2|^2 - \xi_3 |v_3|^2 - (A + \xi) |v_3| + i |v_3| \\ &\mathcal{L} - \xi_1 |v_1|^2 - \xi_2 |v_2|^2 - \xi_3 |v_3|^2 \end{aligned}$$

با توجه به رابطه (۱۸)، تابع  $V_4$  مثبت نیمه‌معین است. بنابراین روش کنترلی پیشنهادی به صورت مجانبی پایدار خواهد بود.

### ۳-۱- رویکرد تخمین و تشخیص عیب و حالت فرایپجشی مرتبه سوم

در این مقاله برای تخمین حالت‌های سیستم و همچنین تخمین و تشخیص عیب موجود در سیستم از رویکرد فرایپجشی مرتبه سوم استفاده شده است. بر اساس رابطه (۳) معادلات حالت سیستم به صورت رابطه (۱۹) نوشته شده‌است.

$$\begin{aligned} x_1 &= \theta \\ x_2 &= \theta' \\ \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f(x_1, x_2, \tau) + \tilde{\Delta} + \beta(t - T_f) \varphi(\theta, \theta', \tau) \\ f(x_1, x_2, \tau) &= M^{-1}(\theta) (\tau - C(\theta, \theta') - G(\theta)) \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (19)$$

معادلات یک رویکرد فرایپجشی مرتبه سوم به صورت رابطه (۲۰) ارائه شده‌است [۱۴].

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 + \alpha_2 \|x_1 - \hat{x}_1\|^{2/3} \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= f(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \tau) + \alpha_1 \| \dot{\hat{x}}_1 - \hat{x}_2 \|^{1/2} \text{sign}(\dot{\hat{x}}_1 - \hat{x}_2) + \bar{z}_{eq} \\ \dot{\bar{z}}_{eq} &= \alpha_0 \text{sign}(\hat{x}_1 - \hat{x}_2) \end{aligned} \quad (20)$$

در رابطه (۲۰)  $\alpha_i$  ثابت‌های مد لغزشی هستند که باید در طراحی تعیین شوند. با تفاضل رابطه (۲۰) و (۱۹) خطای رویکرد مطابق با رابطه (۲۱) بدست می‌آید.



#### ۴- معیار پایداری نقطه گشتاور صفر<sup>۱</sup>

نقطه گشتاور صفر، نقطه‌ای روی سطح تماس کف پای ربات و زمین است که در آنجا برآیند تمام نیروهای وارد بر ربات را می‌توان با یک نیروی واحد جایگزین کرد [۴۲]. در صورت قرارگرفتن نقطه گشتاور صفر در درون محدوده تعادل ربات، شرط پایداری محقق شده است. محدوده تعادل در فاز تک تکیه‌گاهی شامل یک کف پای ربات و در فاز دو تکیه‌گاهی چندضلعی بسته حاصل از دو پاست، روابط مربوط به نقطه گشتاور صفر به صورت رابطه (۲۴) می‌باشد.

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g)x_i - \sum_{i=1}^n m_i x_i'' z_i - \sum_{i=1}^n I_{iy} \theta_{iy}''}{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g)} \quad (24)$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g)y_i - \sum_{i=1}^n m_i y_i'' z_i - \sum_{i=1}^n I_{ix} \theta_{ix}''}{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g)}$$

در رابطه (۲۴)،  $\theta_{ix}''$  و  $\theta_{iy}''$  به ترتیب شتاب زاویه‌ای لینک‌ها در راستای افقی و عمودی می‌باشد. از آنجا که در تعیین مسیرهای مطلوب مفصل پایین‌تنه ربات، پایداری ربات در نظر گرفته نشده است بنابراین از حرکت بالاتنه برای دستیابی به حداکثر پایداری ربات در حین راه رفتن استفاده شده است. در این مقاله موقعیت، سرعت و شتاب زاویه‌ای بالاتنه ربات با تعریف مسیر مطلوب مفصل کمر به کمک یک منحنی مرتبه پنج که از چند نقطه معلوم در یک بازه حرکتی می‌گذرد، تعیین شده است و سپس پارامترهای مسیر با کمینه‌سازی یک تابع هدف مناسب بهینه می‌شوند. رابطه (۲۵) چند نقطه معلوم از یک بازه حرکتی را برای مفصل کمر بیان می‌کند.

$$\theta_7 = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \alpha & t = 0 \\ \gamma & t = 0.5Ts \\ \frac{\pi}{2} - \alpha & t = Ts \\ \sigma & t = Ts + Td \end{cases} \quad (25)$$

که در آن  $\alpha$ ،  $\gamma$  و  $\sigma$  پارامترهای ثابت می‌باشد.  $Ts$  زمان حرکت در

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \tilde{x}_2 + \alpha_2 \|x_1 - \hat{x}_1\|^{2/3} \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= d(x_1, \hat{x}_2, \tilde{x}_2) + \\ &\tilde{\Delta} + \beta(t - T_f) \varphi(\theta, \theta', \tau) - \\ &\alpha_1 \|\dot{\hat{x}}_1 - \hat{x}_2\|^{1/2} \text{sign}(\dot{\hat{x}}_1 - \hat{x}_2) - \tilde{z}_{eq} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{z}}_{eq} &= \alpha_0 \text{sign}(\dot{\hat{x}}_1 - \hat{x}_2) \\ \tilde{x}_i &= x_i - \hat{x}_i \\ d(x_1, \hat{x}_2, \tilde{x}_2) &= f(x_1, x_2, \tau) - f(x_1, \hat{x}_2, \tau) \\ F(x_1, \hat{x}_2, x_2, \tau) &= d(x_1, \hat{x}_2, \tilde{x}_2) + \tilde{\Delta} + \varphi(\theta, \theta', \tau) \\ F(x_1, \hat{x}_2, x_2, \tau) &< f^* \end{aligned}$$

که در آن  $f^*$  عدد ثابت می‌باشد. با فرض‌های رابطه (۳) و براساس تحلیل‌های انجام‌شده در مراجع [۴۲] با انتخاب ضرایب رویتگر به صورت  $\alpha_3 = 1.9(f^*)^{1/3}$  و  $\alpha_1 = 1.5(f^*)^{1/2}$  و  $\alpha_0 = 1.1(f^*)$  معادلات رویتگر حاصل شده و همگرایی در تخمین حالت‌های سیستم ایجاد خواهد شد. بنابراین خواهیم داشت:

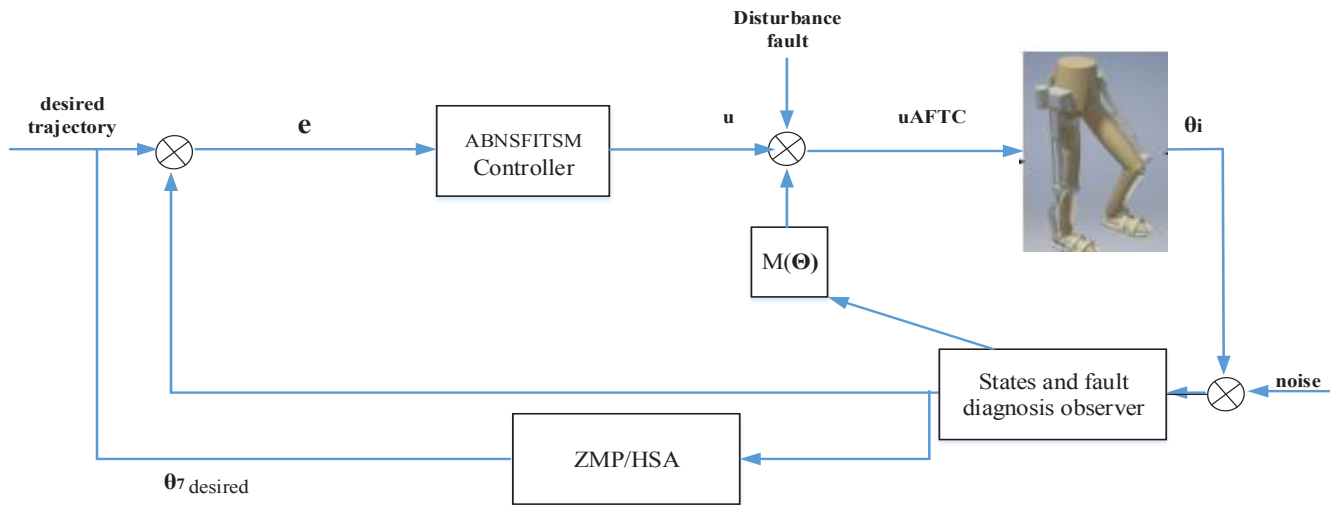
$$\begin{aligned} &\tilde{\Delta} + \beta(t - T_f) \varphi(\theta, \theta', \tau) - \\ &\alpha_1 \|\dot{\hat{x}}_1 - \hat{x}_2\|^{1/2} \text{sign}(\dot{\hat{x}}_1 - \hat{x}_2) - \tilde{z}_{eq} = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

با همگرایی رویتگر به مقادیر حقیقی حالت‌های سیستم، ترم  $\alpha_1 \|\dot{\hat{x}}_1 - \hat{x}_2\|^{1/2} \text{sign}(\dot{\hat{x}}_1 - \hat{x}_2)$  معادل صفر شده و بنابراین خواهیم داشت:

$$\tilde{\Delta} + \beta(t - T_f) \varphi(\theta, \theta', \tau) = \tilde{z}_{eq} \quad (23)$$

رابطه (۲۰) و (۲۳) به ترتیب روابط مفیدی برای تخمین حالت‌ها و عیب سیستم به منظور استفاده در روش کنترل فعال تحمل‌پذیر عیب سیستم است.

1 Zero moment point (ZMP)



شکل ۲. بلوک دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی

Fig. 2. Block diagram of the proposed control scheme

فاز تک تکیه‌گاهی و  $Td$  زمان حرکت در فاز دو تکیه‌گاهی می‌باشد. برای داشتن مسیری هموار، متناوب و پیوسته در مفصل کمر از شرایط رابطه (۲۶) استفاده شده است.

در شکل ۲،  $e$  خطای بین مسیرهای مطلوب مفاصل و مسیرهای تولیدشده توسط ربات،  $u$  ورودی کنترلی حاصل از کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی و  $uAFTC$  ورودی کنترلی حاصل از کنترل‌کننده پیشنهادی می‌باشد. در نهایت کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب فعال با ترکیب کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی و حلقه تخمین و تشخیص عیب بر مبنای رویکرد فرایپیشی مرتبه سوم و با الگوگیری از مرجع [۱۴] به صورت رابطه (۲۸) تعریف شده است.

تابع هدف به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که در هر لحظه بالاترین حاشیه پایداری را برای ربات و حداقل اختلاف در مسیر حرکت مفاصل ربات نسبت به مسیرهای مرجع ایجاد شود.

$$\begin{aligned} \theta_7'(0) &= \theta_7'(Ts + Td) \\ \theta_7''(0) &= \theta_7''(Ts + Td) \end{aligned} \quad (26)$$

در رابطه (۲۷)،  $ZMP$ ، نقطه ممان صفر در هر لحظه از حرکت ربات می‌باشد.  $ZMP_{desired}$  نقطه ممان صفر مطلوب در فاز تک و دو تکیه‌گاهی است که بر اساس بیشینه مقدار پایداری ربات در هر فاز تعریف شده است. برای  $e_i$  از ۱ تا ۷ خطای تعقیب مسیرهای مطلوب مفاصل ربات است. برای داشتن حرکت مناسب، محدوده مجاز زاویه مطلوب مفصل بالاتنه

$$U = \frac{M(\theta)}{\Xi} (U_n - U_{as} + \Xi \hat{Z}_{eq}) \quad (28)$$

$$CF = \int |ZMP - ZMP_{desired}|^2 + \sum_{i=1}^7 \int |e_i|^2 \quad (27)$$

۵- شبیه‌سازی  
در این مقاله پس از استخراج مسیرهای مرجع مفاصل، ربات با استفاده از کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی به همراه حلقه تشخیص عیب، کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد

در این مقاله پس از استخراج مسیرهای مرجع مفاصل، ربات با استفاده از کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی به همراه حلقه تشخیص عیب، کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد



نشان می‌دهد که کنترل‌کننده پیشنهادی دارای عملکرد پایداری در تعقیب مسیرهای مرجع ربات می‌باشد. در ادامه سیگنال کنترلی برای کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی به همراه حلقه تشخیص عیب و کنترل‌کننده مد لغزشی معمولی با حلقه تشخیص عیب ارائه شده‌است.

با توجه به شکل‌های ۵ مشخص می‌شود که برای دو کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی به همراه حلقه تشخیص عیب و کنترل‌کننده مد لغزشی معمولی با حلقه تشخیص عیب، سیگنال‌های کنترلی در محدوده مناسب و کمتر از اشباع عملگرها قرار گرفته‌اند. بنابراین امکان انتخاب عملگر مناسب و اعمال سیگنال‌های کنترلی به عملگرها وجود دارد. مقدار میانگین دامنه سیگنال کنترلی برای کنترل‌کننده پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی به همراه حلقه تشخیص عیب برابر با  $29/471$  نیوتن متر و کنترل‌کننده بهینه مد لغزشی معمولی با حلقه تشخیص عیب برابر با  $38/298$  نیوتن متر می‌باشد. سیگنال‌های کنترلی حاصل از روش پیشنهادی نه تنها دامنه کمتری نسبت به سیگنال‌های کنترلی روش مد لغزشی به همراه حلقه تشخیص عیب دارد، بلکه دارای شکل هموارتری نیز می‌باشند و برخلاف کنترل‌کننده مد لغزشی معمولی پدیده چترینگ در آن دیده نمی‌شود. به منظور بررسی پایداری حرکت ربات، نمودار موقعیت نقطه گشتاور صفر و نمودار موقعیت زاویه‌ای مفصل کمر برای کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده، ارائه شده‌است.

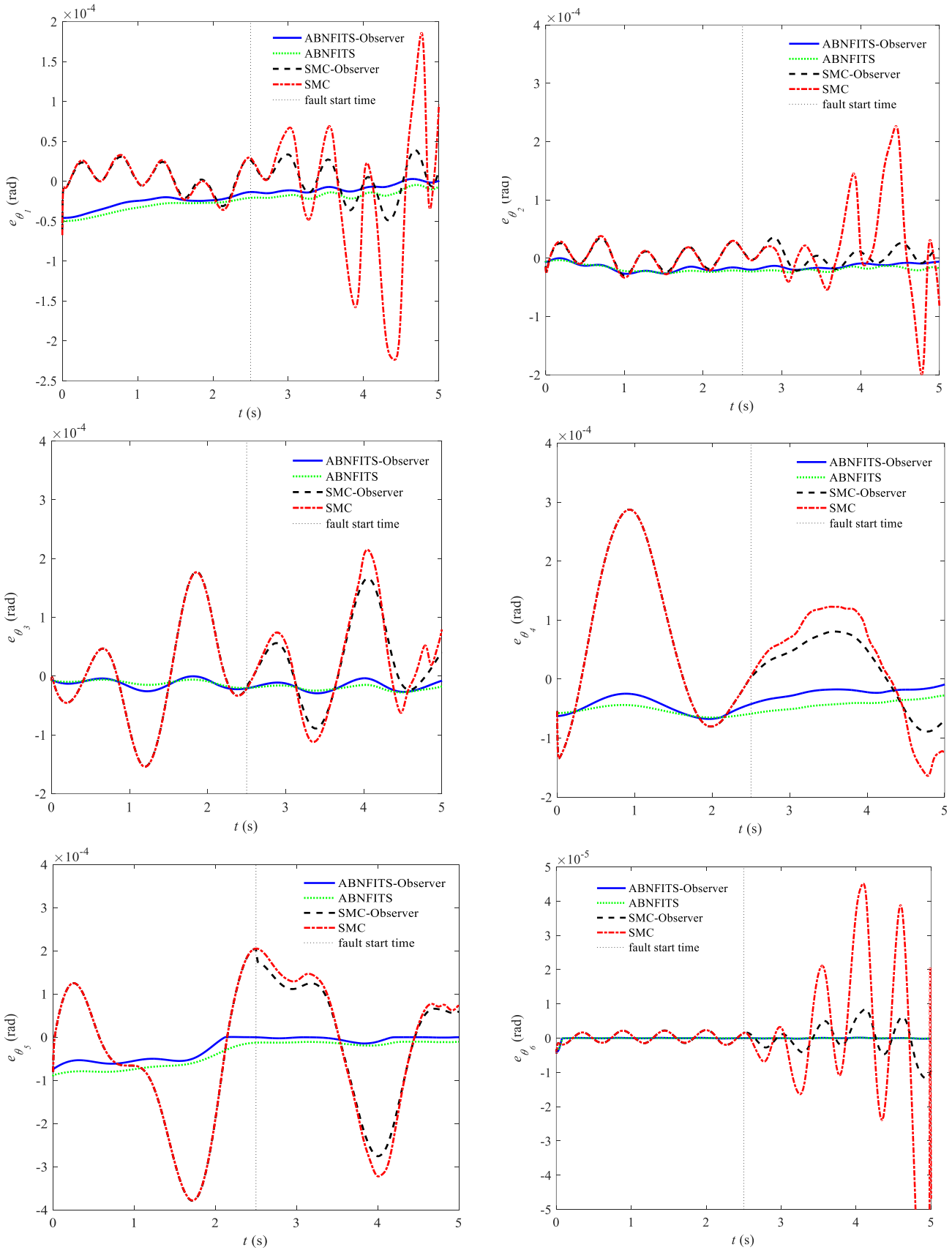
همانطور که در شکل ۶ و ۷ قابل مشاهده است، کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده به کمک حرکت لینک بالاتنه ربات می‌توانند حرکت پایداری برای ربات ایجاد کنند. مسیر نقطه گشتاور صفر تولیدشده توسط کنترل‌کننده پیشنهادی اختلاف کمتری با مسیر نقطه گشتاور صفر مطلوب دارد بنابراین حاشیه پایداری بالاتری را ایجاد خواهد کرد. در مجموع دو کنترل‌کننده مبتنی بر روش تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی پایداری حرکت بهتر با وجود دامنه حرکت لینک کمر کمتر نسبت به کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روش مد لغزشی معمولی دارند. وجود حلقه تشخیص عیب در هر دو کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی و مد لغزشی معمولی باعث بهبود پایداری ربات شده است. در شکل ۸ عملکرد ربات‌گر پیشنهادی در تشخیص عیب با ارائه میزان مانده حاصل از تخمین موقعیت زاویه‌ای مفاصل ربات بررسی شده است. در این نمودارها آستانه‌های بالا و پایین مانده‌ها در حالت بدون عیب تعیین شده‌است.

همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، مانده‌ها برای تمامی مفاصل

لغزشی ترمینال سریع انتگرالی بدون حلقه تشخیص عیب، کنترل‌کننده مد لغزشی معمولی با حلقه تشخیص عیب و کنترل‌کننده مد لغزشی معمولی بدون حلقه تشخیص کنترل شده‌است. همچنین با طراحی مسیر حرکت مفصل بالاتنه، پایداری ربات بر اساس معیار نقطه گشتاور صفر در هر لحظه تامین شده است. در هر لحظه از حرکت ربات، موقعیت و سرعت هر یک از مفاصل و همچنین میزان عیب عملگرها توسط رویترگر فرآیند پیشی مرتبه سوم تخمین زده شده است. همچنین بهینه‌سازی همزمان پارامترهای کنترل‌کننده، پارامترهای مسیر مطلوب بالاتنه و پارامترهای رویترگر به منظور دستیابی به حداکثر پایداری، کمترین خطای ردیابی مفاصل ربات توسط الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی انجام شده‌است. به منظور نشان دادن مقاوم بودن کنترل‌کننده‌ها در برابر اغتشاشات، نویزها و عدم قطعیت‌های سیستم، اغتشاشاتی با دامنه‌ای معادل ۲۰ درصد متوسط سیگنال کنترلی برای هر یک از مفاصل، نویز سفید موجود در سیمولینک متلب و همچنین عدم قطعیت‌هایی به صورت ۲۰ درصد مقدار نامی هر یک از پارامترها در نظر گرفته شده‌است. عیب در زمان  $2/5$  ثانیه و به صورت توابعی از موقعیت و سرعت زاویه‌ای مفاصل به ربات اعمال شده است. عملکرد کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده با نمودارهای صفحه فاز، نمودارهای خطای ردیابی مفاصل، نمودار تشخیص عیب، نمودار انرژی مصرفی، نمودار نقطه گشتاور صفر و نمودار مسیر مفصل کمر بررسی شده است. مدل دینامیکی ربات با مدل ایجادشده در نرم‌افزار آدامز به منظور اعتبارسنجی مقایسه شده است. مشخصات فیزیکی ربات و همچنین اعتبارسنجی معادلات دینامیک ربات با مدل ایجادشده در نرم‌افزار آدامز در مرجع [۴۳] ارائه شده‌است. در ادامه نمودارهای تعقیب مفاصل ربات برای چهار کنترل‌کننده در شکل ۴ آمده است.

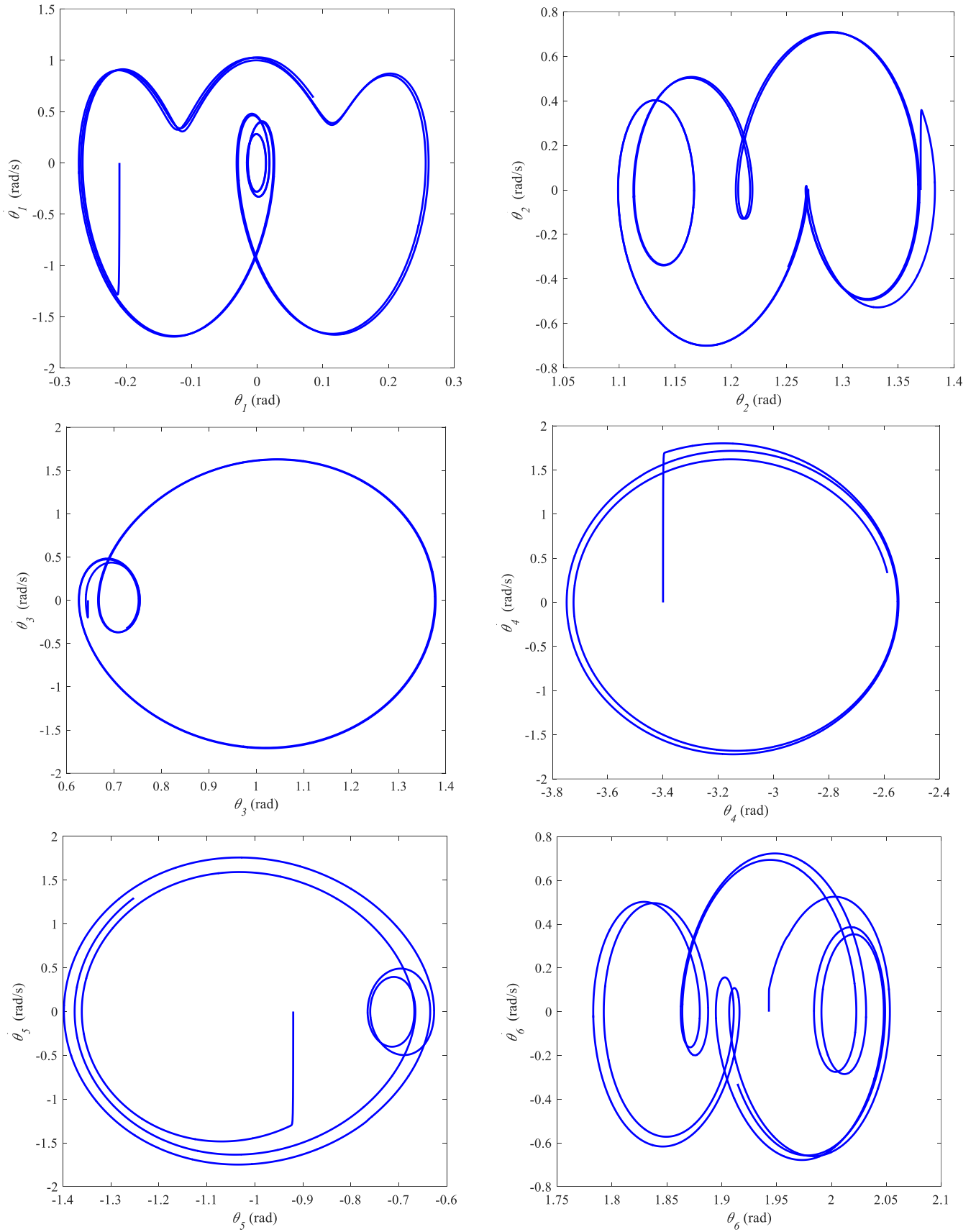
شکل ۳ نشان می‌دهد که سیگنال خطای تعقیب هر دو کنترل‌کننده مبتنی بر روش تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی دارای سرعت همگرایی بالاتر، خطای ردیابی کمتر و نوسانات کمتری نسبت به کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روش مد لغزشی معمولی می‌باشند. همچنین وجود حلقه تشخیص عیب در هر دو کنترل‌کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی و مد لغزشی معمولی باعث بهبود عملکرد هر دو کنترل‌کننده در مقابله با عیب‌ها و اغتشاشات سیستم شده است. به منظور بررسی پایداری روش کنترلی نمودار فاز مفاصل ربات در شکل ۴ ارائه شده‌است.

تشکیل نمودارهای صفحه فاز به صورت چرخه حدی در شکل ۴



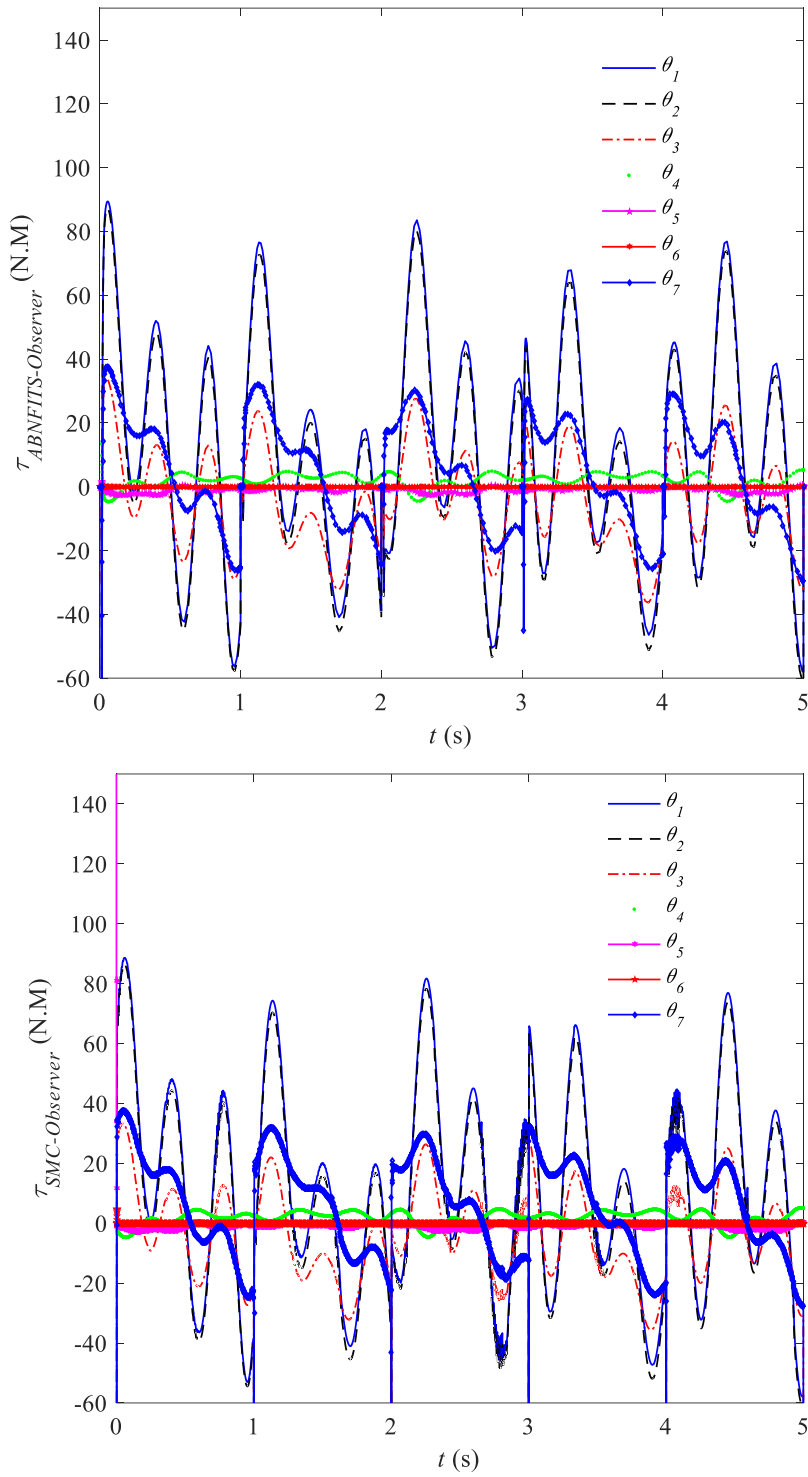
شکل ۳. خطای تعقیب مسیرهای مطلوب

Fig. 3. Tracking error of the desired trajectories



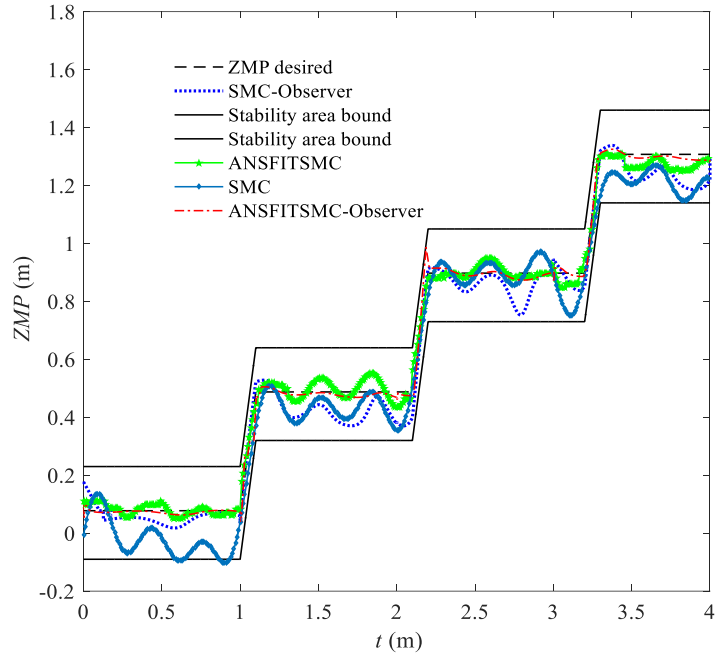
شکل ۴. نمودارهای صفحه فاز کنترل کننده پیشنهادی

Fig. 4. phase plane diagrams of the proposed controller



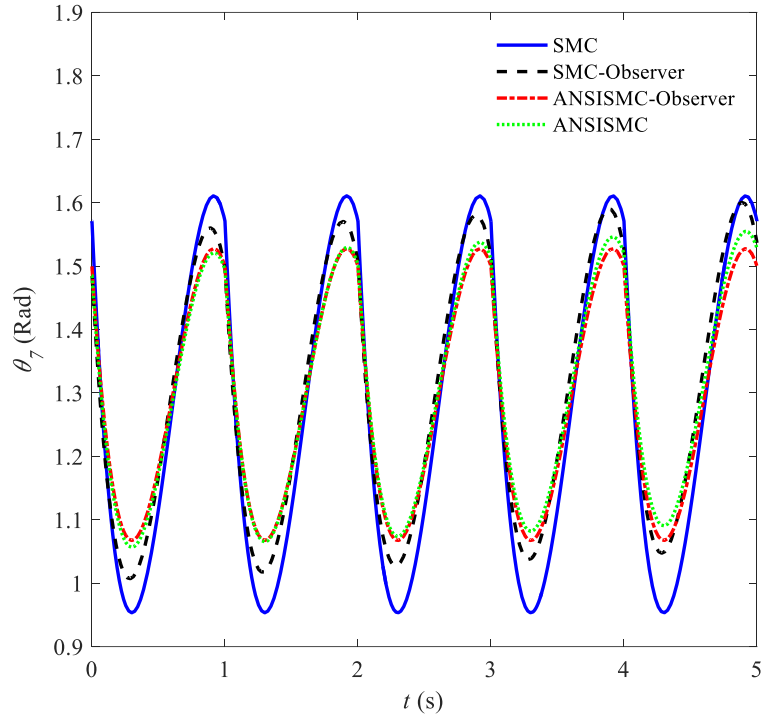
شکل ۵. سیگنال کنترلی

Fig. 5. control signal



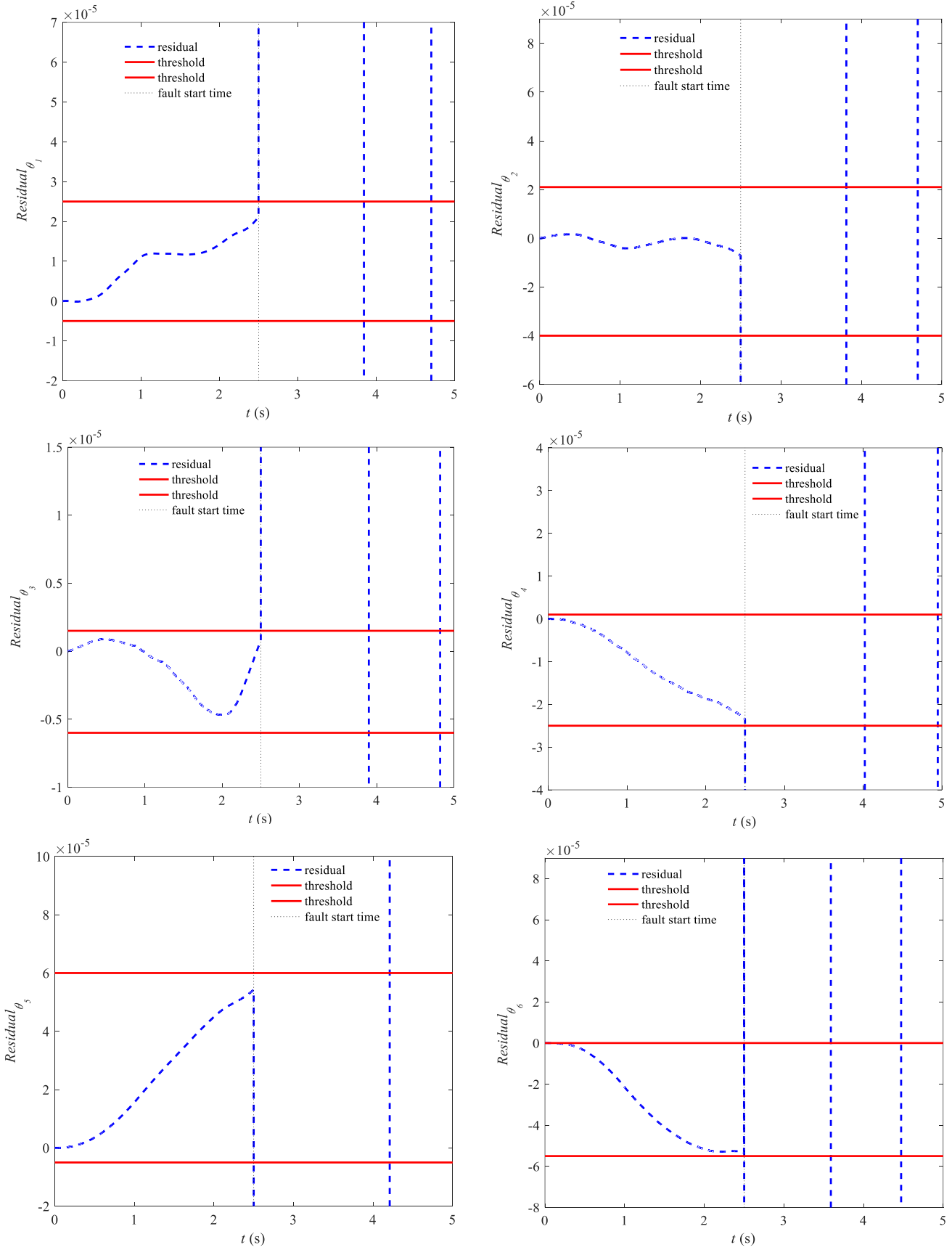
شکل ۶. موقعیت نقطه گشتاور صفر ربات

Fig. 6. Zero moment point position



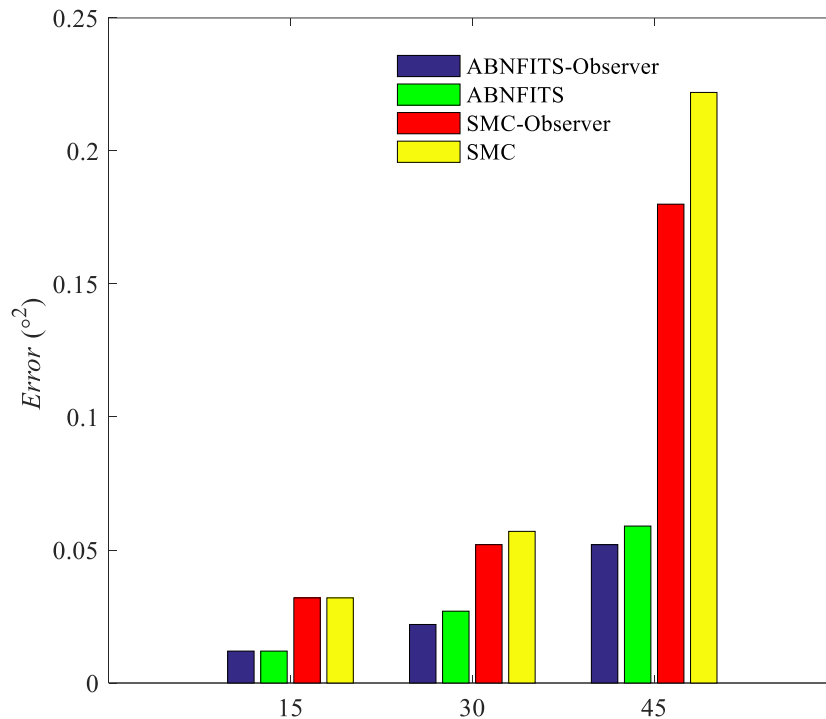
شکل ۷. مسیر مفصل بالاتنه

Fig. 7. Upper limb joint trajectory



شکل ۸. مانده‌ها در حضور عیب عملگر

Fig. 8. Residuals in the presence of actuator fault



شکل ۹. مجموع مجذور خطای تعقیب برای اغتشاشات مختلف

Fig. 9. RMS of tracking error for different disturbances

برای عدم قطعیت‌های کمتر از ۲۰ درصد خطای کنترل‌کننده‌های طراحی شده دارای عملکرد ثابتی هستند. عدم قطعیت‌های بیشتر از ۲۰ درصد عملکرد کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روش پیشنهادی نسبت به کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روش مد لغزشی معمولی بهتر و مقاومتر می‌باشد. همچنین، استفاده از حلقه تشخیص عیب در کنترل‌کننده‌ها باعث افزایش قابلیت سیستم در مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها شده است.

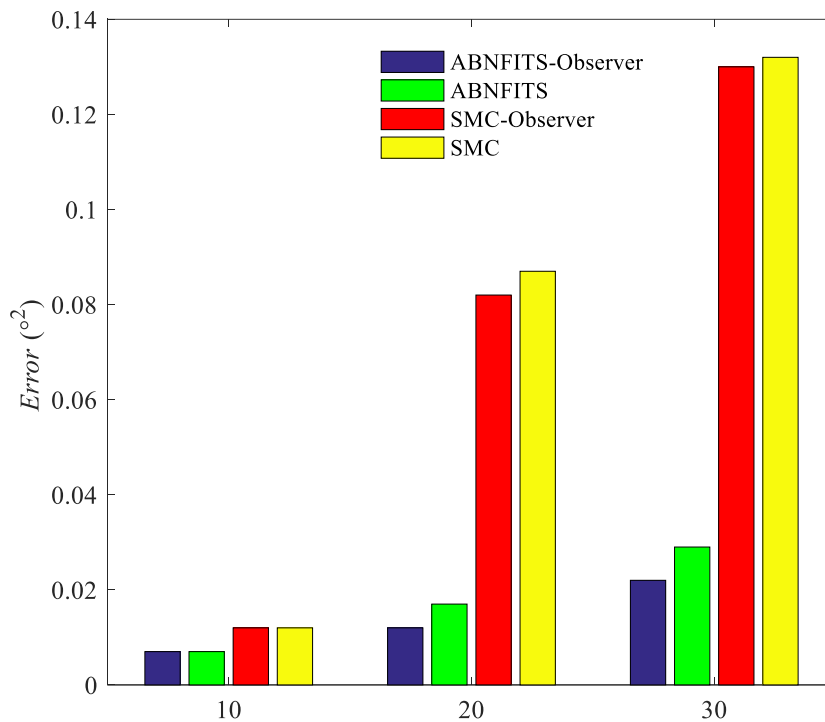
#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال و کنترل تحمل‌پذیر عیب غیرفعال بر اساس روش تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی ارائه شد. روش تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی به عنوان یک کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب فعال روشی موثر در مقابله با عیوب سیستم و دارای خواصی مانند مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌های با دامنه نامعلوم سیستم، سرعت همگرایی بالا، پایداری بر

عدد کوچکی می‌باشد. تا قبل از زمان ۲/۵ ثانیه که عیبی در سیستم اتفاق نیافتاده است، سیگنال مانده در محدوده آستانه‌های تعیین شده قرار می‌گیرد. بعد از زمان ۲/۵ ثانیه با وقوع عیب، سیگنال مانده از آستانه تعیین شده عبور کرده است. این موضوع نشان‌دهنده تشخیص عیب در زمان‌های بیشتر از ۲/۵ ثانیه در سیستم است. به منظور بررسی میزان مقاوم بودن سیستم در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت‌های وارده به سیستم، در شکل ۹ میزان مجموع مجذور خطای تعقیب مفاصل ربات در حضور اغتشاشات و در شکل ۱۰ میزان مجموع مجذور خطای تعقیب مفاصل ربات در حضور عدم قطعیت‌های مختلف ارائه شده است.

شکل ۹ نشان می‌دهد که تا اغتشاشات حدود ۳۰ درصد، خطای کنترل‌کننده‌های طراحی شده دارای عملکرد ثابتی هستند. برای اغتشاشات بالای ۳۰ درصد عملکرد کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روش تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی نسبت به کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روش مد لغزشی معمولی تضعیف نمی‌شود. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که





شکل ۱۰. مجموع مجذور خطای تعقیب برای عدم قطعیت‌های مختلف

Fig. 10. RMS of tracking error for different uncertainties

### منابع

- [1] R. Bogue, Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments, *Industrial Robot: An International Journal*, 36(5) (2009) 421-427.
- [2] D. Aaron, H. Hugh, lower extremity exoskeletons and active orthoses: challenges and state-of-the-art, *IEEE Transactions on Robotics*. 24 (2008) 144-158.
- [3] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla, D. Stokic, *Biped Locomotion*, Springer-Verlag, Berlin, (1990) 1-349.
- [4] H. Kazerooni, Hybrid Control of the berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX), *The International Journal of Robotics*, 25(2) (2006) , 561-573.
- [5] H. Herr, challenges and state-of-the-art Lower Outhouses extremity exoskeletons and active, *Journal of Nero*

اساس قاعده لیاپانوف، سرعت بالای پاسخ گذرای و همچنین حذف پدیده چتریگ می‌باشد. به منظور افزایش قابلیت مقابله با عیوب سیستم، یک سیستم تشخیص عیب بر مبنای رویکر مرتبه سوم فرایپچشی به عنوان حلقه تشخیص و تخمین عیب به کنترل کننده تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی اضافه شده است. عملکرد روش پیشنهادی با کنترل کننده‌های تطبیقی پسگام غیرتکین مد لغزشی ترمینال سریع انتگرالی بدون حلقه تشخیص و تخمین عیب، کنترل کننده مد لغزشی معمولی با حلقه تشخیص و تخمین عیب و کنترل کننده مد لغزشی معمولی بدون حلقه تشخیص کنترل شده‌اند. نتایج بدست آمده برتری روش کنترلی پیشنهادی در میزان خطای تعقیب مفاصل، مدت زمان همگرایی خطا به سمت صفر، میزان انرژی مصرفی، میزان پایداری بر اساس معیار نقطه گشتاور صفر و همچنین میزان مقاوم بودن در برابر اغتشاشات، عدم قطعیت‌ها و عیب سیستم را نشان داد.

- in Engineering, (2016)
- [15] W. Yu, J. Rosen, Neural PID Control of Robot Manipulators with Application to an Upper Limb Exoskeleton, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 43(2) (2013) 673-684.
- [16] M. Wang, A. Yang, Dynamic Learning from Adaptive Neural Control of Robot Manipulators with Prescribed Performance, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 48(99) (2017) 1-12.
- [17] F. Lin, R. D. Brandt, An optimal control approach to robust control of robot manipulators, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(1) (1998) 69-77.
- [18] M. Jin, S. H. Kang, P. H. Chang, J. Lee, Robust Control of Robot Manipulators Using Inclusive and Enhanced Time Delay Control, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(5)(2017) 2141-2152.
- [19] C. Edwards, E. F. Colet, L. Fridman, *Advances in variable structure and sliding mode control*, Springer, Berlin, (2006) 50-280.
- [20] M. Van, M. Mavrouniotis, S.S. Ge, An Adaptive Backstepping Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode Control for Robust Fault Tolerant Control of Robot Manipulators, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 49(7) (2019) 1448-1458.
- [21] G. Chen, Y. Song; Y. Guan, Terminal Sliding Mode-Based Consensus Tracking Control for Networked Uncertain Mechanical Systems on Digraphs, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 29(3) (2016) 749-756.
- [22] T. Madani, B. Daachi, K. Djouani, Modular-Controller-Design Based Fast Terminal Sliding Mode for Articulated Exoskeleton Systems, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 25(3) (2017) 1133-1140.
- [23] S. Xu, C. Chen, Z. Wu, Study of nonsingular fast terminal sliding mode fault-tolerant control, *The IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(6) (2015) 3906-3913.
- [24] M. Van, S. S. Ge and H. Ren, Finite Time Fault Engineering and Rehabilitation, 21 (2009) 1-9.
- [6] T. Yan, M. Cempini, C. M. Oddo, N. Vitiello, Review of assistive strategies in powered lower-limb orthosis and exoskeletons, *Robotics and Autonomous Systems*, 64(1) (2015) 120-136.
- [7] G. Chen, Y. Song, F. Lewis, Distributed Fault-Tolerant Control of Networked Uncertain Euler-Lagrange Systems Under Actuator Faults, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 47(7) (2017), 1706- 1718.
- [8] K. Ben-Gharbia, A. Maciejewski, R. Roberts, A Kinematic Analysis and Evaluation of Planar Robots Designed from Optimally Fault-Tolerant Jacobians, *IEEE Transactions on Robotics*, 30(2) (2014) 516-524.
- [9] R. C. Hoover, R. G. Roberts, A. A. Maciejewski, P. S. Naik, K. M. Ben-Gharbia, Designing a Failure-Tolerant Workspace for Kinematically Redundant Robots, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 12(4) (2015) 1421-1432.
- [10] R. Wang and J. Wang, Passive Actuator Fault-Tolerant Control for a Class of Over Actuated Nonlinear Systems and Applications to Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(3) (2013) 972-985.
- [11] J. J. Gertler, Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants, *IEEE Control Systems Magazine*, 8(6) (1988) 3-11.
- [12] Q. Song, W. J. Hu, L. Yin, Y. C. Soh, Robust adaptive dead zone technology for fault-tolerant control of robot manipulators using neural networks, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 33(2) (2002) 113-137.
- [13] M. D. Anand, T. Selvaraj, S. Kumanan, FAULT DETECTION AND FAULT TOLERANCE METHODS FOR INDUSTRIAL ROBOT MANIPULATORS BASED ON HYBRID INTELLIGENT APPROACH, *Advances in Production Engineering & Management*, 7(4) (2012) 225-236.
- [14] V. Mien, F. Pasquale, C. Darek, Fault diagnosis and fault tolerant control of uncertain robot manipulators using high-order sliding mode. *Mathematical Problems*

- 572.
- [33] L. M. Capisani, A. Ferrara, A. Ferreira, L. M. Fridman, Manipulator fault diagnosis via higher order sliding mode observers, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59 (10) (2012) 3979–3986.
- [34] P. Pa, J. Jou, Design of a bipedal toy robot with an automatic center of gravity shifting mechanism, *Advanced Material Research*, 120(2010) 670-674.
- [35] D. Messuri, C. Klein, Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough-terrain locomotion. *Robotics and Automation*, IEEE, 1(3) (1985) 141-132.
- [36] S. A. A. Moosavian, K. Alipour, Y. Bahramzadeh. Dynamics modeling and tip-over stability of suspended wheeled mobile robots with multiple arms. In *intelligent robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference*, USA, 2007.
- [37] A. Takhmar, MHS measure for postural stability monitoring and control of biped robots. In *Advanced intelligent Mechatronics, 2008. AIM 2008. IEEE/ASME International Conference on*, China, 2008.
- [38] C. Monje, S. Martinez, P. Pierro, C. Balaguer, Whole-Body Balance Control of a Humanoid Robot in Real Time Based on ZMP Stability Regions Approach, *Cybernetics and Systems*. 49(8) (2018) 521-537.
- [39] J. Kim, Harmony search algorithm: A algorithm, *Procedia Engineering*. 154(2016) 1401-1405.
- [40] H. Kawamoto, Y. Sankai, Power assist method based on phase sequence and muscle force condition for HAL, *Advanced Robotics*. 19(2005) 717-734.
- [41] J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Hall, London, (2017) 85-310
- [42] M. Van, H. Kang, Y. Suh, K. Shin, Output feedback tracking control of uncertain robot manipulators via higher order sliding-mode observer and fuzzy compensator, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(8) (2013) 2487– 2496.
- Tolerant Control for Robot Manipulators Using Time Delay Estimation and Continuous Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode Control, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 47(7) (2017) 1681-1693.
- [25] A. Pati, S. Singh, R. Negi, sliding mode controller design using PID sliding surface for half car suspension system, *students conference on engineering and systems (SCES)*, India, 2014.
- [26] M. Rahmani, H. Komijani, A. Ghanbari, M. M. Ettefagh, Optimal novel super-twisting PID sliding mode control of a MEMS gyroscope based on multi-objective bat algorithm, *Micro system Technologies*, 24 (6) (2018) 2835-2846.
- [27] G. P. Incremona, M. Rubagotti, A. Ferrara, Sliding Mode Control of Constrained Nonlinear Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 62(6) (2017) 2965-2972.
- [28] F. Zargham, A. H. Mazinan, Super-twisting sliding mode control approach with its application to wind turbine systems, *Springer*, 11(1) (2018) 1-19.
- [29] A. Goel, A. Swarup, MIMO Uncertain Nonlinear System Control via Adaptive High-Order Super Twisting Sliding Mode and its Application to Robotic Manipulator, *Journal of Control Automation and Electrical System*, 28(2017) 36–49.
- [30] J. A. Farrell, M. Polycarpou, M. Sharma, W. Dong, Command Filtered Backstepping, *Automatic Control*, *IEEE Transaction on* 54(6)(2009) 1391-1395.
- [31] M. Liu, S. Xu, C. Han, Backstepping Adaptive Attitude Tracking Control of Flexible Spacecraft, *IEEE, Electrical and Control Engineering (ICECE)*, (2011) 2034- 2037.
- [32] N. M. Dehkordi, N. Sadati, M. Hamzeh, A Robust Backstepping High-Order Sliding Mode Control Strategy for Grid-Connected DG Units with Harmonic/ Interharmonic Current Compensation Capability, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(2) (2017) 561-

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Mokhtari, M. Taghizadeh, M. Mazare, Active fault tolerant control based on adaptive back-stepping nonsingular fast integral terminal sliding mode approach , Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 6)(2021) 3763-3782.*

**DOI:** [10.22060/mej.2021.18277.6789](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18277.6789)



