

# طراحی کنترل کننده تحمل پذیر خطای مد لغزشی ترمینال غیرتکین برای سیستم‌های غیرخطی بر مبنای فیلتر کالمن توسعه یافته تطبیقی

یاشار شب‌بوئی حق<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد، امیر ریخته‌گر غیائی<sup>۲</sup>، استادیار، سهراب خان‌محمدی<sup>۳</sup>، استاد

۱، ۲ و ۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران  
Email: y.shabbouei92@ms.tabrizu.ac.ir<sup>۱</sup>, agiasi@tabrizu.ac.ir<sup>۲</sup>, khan@tabrizu.ac.ir<sup>۳</sup>

**چکیده:** در این مقاله برای غلبه بر خطاهای سنسور، کنترل کننده تحمل پذیر خطای مد لغزشی ترمینال غیرتکین معرفی شده است. در مقایسه با کنترل مد لغزشی مرسوم، این روش نه تنها مزایای کنترل مد لغزشی را دارا است، بلکه سبب می‌شود تا عملکرد سیستم بهبود یافته و حالت‌های سیستم در زمان محدودی به نقطه کار همگرا شوند. همچنین، این روش قادر است مشکل تکینگی در کنترل کننده مد لغزشی ترمینال را نیز رفع کند. کنترل کننده ارائه شده از یک سیستم تشخیص و شناسایی خطای مبتنی بر بانکی از فیلترهای کالمن توسعه یافته تطبیقی بهره می‌برد. فیلتر کالمن توسعه یافته در شرایطی که مشخصات آماری نویز معلوم نباشد، کارآمدی خود را از دست داده و حتی ممکن است سبب واگرایی تخمین گردد. از این رو در این مقاله نوعی فیلتر کالمن توسعه یافته تطبیقی معرفی شده است که قادر است در شرایطی که مشخصات آماری نویز معلوم نیست، عملکرد مطلوب خود را حفظ کند. در ادامه، با شبیه سازی خطاهای سنسور در یک ربات دو درجه آزادی، توانایی روش تحمل پذیر خطای ارائه شده در حفظ و تضمین پایداری سیستم در حضور خطاهای سنسور نسبت به کنترل مد لغزشی مرسوم را نشان داده و ارجحیت فیلتر کالمن توسعه یافته تطبیقی بر فیلتر کالمن توسعه یافته از لحاظ دقت تخمین و تشخیص و شناسایی خطای سنسور نشان داده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** کنترل کننده تحمل پذیر خطای مد لغزشی ترمینال غیرتکین، تشخیص و شناسایی خطا، بانک فیلتر کالمن توسعه یافته تطبیقی.

## Design of Fault Tolerant Nonsingular Terminal Sliding Mode Control for Nonlinear Systems based on an Adaptive Extended Kalman Filter

Y. Shabbouei Hagh, Master Student<sup>1</sup>, A. Rikhtegar Ghiasi, Assistant Professor<sup>2</sup>, S Khanmohammadi, Professor<sup>3</sup>

1, 2 & 3- Faculty of Electrical and Computer Engineering- University of Tabriz- Tabriz, Iran.  
Email: y.shabbouei92@ms.tabrizu.ac.ir<sup>1</sup>, agiasi@tabrizu.ac.ir<sup>2</sup>, khan@tabrizu.ac.ir<sup>3</sup>

**Abstract:** In this paper to deal with the sensor faults, Non-singular Terminal Sliding Mode Fault Tolerant Control (NTSM-FTC) is proposed. In comparison to existing sliding mode control (SMC), the proposed controller can retain the advantages of the SMC and it can also improve the system performance and make the systems states converge to equilibrium point in a finite time. Moreover, it can solve the singularity problem in terminal SMC method. This controller utilizes a Fault Detection and Diagnosis (FDD) system based on bank of Adaptive Extended Kalman Filter (AEKF). Conventional Extended Kalman Filter (EKF) suffers from performance depreciation and may even diverge in case the statistics of the noises were unknown. Hence, in this paper AEKF has been proposed to maintain the desired performance, while the statistics of the noises are unknown. Next, by simulating sensor faults on a two degree of freedom robot manipulator, the capability of the proposed FTC in terms of stability ensuring in comparison to conventional SMC has been shown and the superiority of the proposed AEKF in terms of estimation and FDD accuracy has been illustrated.

**Keywords:** Nonsingular terminal sliding mode fault tolerant control, fault detection and diagnosis, bank of adaptive extended Kalman filter

تاریخ ارسال مقاله: ۹۴/۰۵/۲۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۴/۱۰/۱۲ و ۹۴/۸/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۲/۱۱

نام نویسنده مسئول: امیر ریخته‌گر غیائی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

## ۱- مقدمه

در سال های اخیر سیستم های کنترل کننده تحمل پذیر خطا<sup>۱</sup> در بین محققین توجه فزاینده ای را به خود جلب کرده است تا به کمک آن عملکرد مطلوب سیستم را در حضور انواع خطاهای سنسور و محرک تضمین کند. علت اصلی این توجهات نیز در تقاضای طبیعی صنعت برای افزایش میزان قابلیت اطمینان و امنیت سیستم ها است. اگر خطاها به موقع تشخیص داده نشوند و یا اقدامات اصلاحی متناسبی برای کم کردن اثرات آن ها صورت نگیرد، این امر می تواند در امنیت و نحوه کارکرد صحیح سیستم اثرات مخربی داشته باشد. در سیستم های تحمل پذیر خطای فعال از یک سیستم تشخیص و شناسایی خطای بر خط با یک مکانیزم پیکربندی مجدد سیگنال کنترلی بهره گرفته می شود [۱-۳].

تشخیص و شناسایی خطا<sup>۲</sup> نیز حوزه دیگری است که در سال های اخیر اهمیت فراوانی پیدا کرده است [۴-۶]. در بین رویکردهای مختلف موجود، روش های مدل مرجع کاربرد فراوانی در سیستم های صنعتی دارند. هدف اصلی در این روش ها، به دست آوردن اطلاعات تشخیصی از طریق مقایسه متغیرهای اندازه گیری شده با متغیرهای تخمین زده شده است. به عبارتی دیگر با بررسی اختلاف بین سیگنال های اندازه گیری شده با سیگنال های تخمین زده شده، می توان به وقوع یا عدم وقوع خطا پی برد. به سیگنال حاصل از این اختلاف در اصطلاح سیگنال مانده گفته می شود. اگر تغییرات سیگنال مانده در نزدیکی های صفر باشد نشان از آن است که خطایی رخ نداده و اگر این سیگنال از یک سطح آستانه ای بالاتر باشد، نشان از بروز خطا در سیستم است. انواع فیلترهای کالمن موجود، یک روش مدل مرجع ایده آل برای تشخیص و شناسایی خطا در حضور نویز، و به اصطلاح روشی مناسب برای تولید سیگنال های مانده هستند [۷]. از مهم ترین و رایج ترین تخمین گر حالت مبتنی بر فیلتر کالمن برای سیستم های غیر خطی می توان به فیلتر کالمن توسعه یافته اشاره کرد. فیلترهای دیگری نیز برای سیستم های غیر خطی معرفی شده اند با این حال EKF به دلیل سادگی محاسبات و داشتن پارامترهای تنظیم کم تر همچنان جزء فیلترهای غیر خطی پر کاربرد محسوب می شود.

تمامی فیلترهای کالمن موجود به شدت به میزان دقیق بودن ماتریس های کواریانس نویز فرایند (Q) و اندازه گیری (R) وابسته هستند. زیرا این ماتریس ها، در تعیین وزن هایی که الگوریتم های مبتنی بر فیلتر کالمن مابین اطلاعات فرایند و آخرین اندازه گیری ها استفاده می کند، نقش مهمی دارند [۸]. از این رو هرگونه عدم مطابقت بین ماتریس های کواریانس فرض شده با ماتریس های استفاده شده در الگوریتم ها، باعث کاهش عملکرد مطلوب فیلتر شده و در برخی موارد حتی ممکن است سبب واگرایی تخمین ها گردد [۹]. از طرفی این عدم تطابق ممکن است باعث شود خطاهای رخ داده در سنسور یا محرک در زمان دقیق تشخیص داده نشده و شناسایی نشوند و یا ممکن است باعث بروز آلام های غیر صحیح از وجود خطا شوند. از این رو در این مقاله

از روش های تطبیقی برای تخمین ماتریس های Q و R بهره می گیریم تا بر نقص موجود در فیلترهای کالمن مرسوم فائق آییم. در این مقاله برای تشخیص و شناسایی خطا در سنسورها از بانکی از فیلترهای کالمن توسعه یافته تطبیقی<sup>۴</sup> استفاده می کنیم. به این صورت که برای هر یک از سنسورهای موجود، از یک فیلتر AEKF بهره می گیریم. با این روش اولاً خطاهای رخ داده در سنسورها را از هم تفکیک می کنیم در این صورت خطاهای رخ داده در سنسور نام تأثیری بر عملکرد دیگر سنسورها نخواهد داشت و در اصطلاح خطاهای رخ داده از هم ایزوله خواهند شد. ثانیاً با این روش به سادگی می توان متوجه شد که در کدام یک از سنسورها خطا رخ داده است. عملکرد کلی سیستم کنترل کننده تحمل پذیر خطا عموماً بر نحوه کارکرد سیستم تشخیص و شناسایی خطا وابسته است. تأثیر تشخیص دیر هنگام خطا بر عملکرد کلی سیستم در [۱۰-۱۲] مورد بررسی قرار گرفته است.

در بین کنترل کننده های موجود، کنترل کننده مد لغزشی<sup>۵</sup>، روش کنترل غیر خطی است که دینامیک های سیستم را به کمک یک سیگنال کنترلی گسسته تغییر داده و سیستم را مجبور می کند بر روی یک سطح سوئیچ از پیش تعیین شده، لغزش کند. این روش به دلیل سادگی، مقاومت بالا نسبت به اغشاشات بیرونی و همچنین حساسیت کم نسبت به تغییرات پارامتری، کاربرد بیش تری نسبت به دیگر کنترل کننده های غیر خطی دارا است [۱۳]. در کل سیستم تحت کنترل مد لغزشی دارای پایداری مجانبی است و برای بهبود همگرایی مجانبی به همگرایی حالت زمان محدود، کلاس دیگری از کنترل کننده مد لغزشی، به نام کنترل کننده مد لغزشی ترمینال<sup>۶</sup> معرفی شده است [۱۴] و [۱۵]. در مقایسه با کنترل کننده مد لغزشی، این روش ویژگی های حائز اهمیتی دارد که می توان به همگرایی سریع و در زمان محدود، و دقت بالای ردیابی آن اشاره کرد [۱۶]. از این روش در مقالات بسیاری استفاده شده است به عنوان مثال در کنترل ربات [۱۵]، کنترل موتور [۱۶]، سیستم های غیر خطی اتفاقی [۱۷]. با این حال، مد لغزشی ترمینال دارای مشکل تکینگی است، به این معنا که در برخی نقاط از فضای حالت، سیگنال کنترلی مد لغزشی ترمینال باید بی نهایت بزرگ باشد تا عملکرد مطلوب خود را حفظ کند. روش های مختلفی برای غلبه بر این مشکل ارائه شده است [۱۴] و [۱۸]. در این مقاله از یک کنترل کننده مد لغزشی ترمینال غیر تکین<sup>۷</sup> عمومی و کلی استفاده شده است. در این روش می توان تضمین کرد که نقطه تکینی وجود ندارد و سیستم در زمان محدودی به نقطه کار می رسد [۱۹]. هدف اصلی FTC طراحی قانون کنترلی مناسبی است که سیستم حلقه بسته بتواند خطاهای رخ داده در بخش های مختلف سیستم را تحمل و پایداری سیستم کلی با عملکرد مطلوب را حفظ کند.

در مواجهه با خطاهای سنسور، رویکرد رایجی که برای طراحی کنترل کننده های FTC وجود دارد این است که سیستمی طراحی کرد که خطاهای رخ داده در سنسور را به نحوی به اطلاع کنترل کننده برساند تا کنترل کننده متوجه بروز تغییرات ایجاد شده در اندازه گیری های

کواریانس با مقادیر استفاده شده توسط الگوریتم های مبتنی بر فیلتر کالمن، سبب می شود که فیلتر عملکرد مطلوب خود را از دست داده و در برخی مواقع حتی ممکن است سبب واگرایی تخمین ها گردد. این کاهش کارایی یا واگرایی سبب می شود که سیستم تشخیص و شناسایی خطا نیز با مشکل مواجه شده و نتواند زمان، اندازه و محل رخ دادن خطا را به درستی تشخیص دهد. برای جلوگیری از بروز این چنین مشکلاتی در این مقاله از روش فیلتر کالمن توسعه یافته تطبیقی استفاده کرده ایم که ماتریس های کواریانس نوین فرآیند و اندازه گیری را نیز تخمین می زند.

## ۲-۱- فیلتر کالمن توسعه یافته تطبیقی و تشخیص و شناسایی خطای

### سنسور

فیلتر کالمن تطبیقی که در این بخش ارائه شده است بر روی ماتریس های کواریانس نوین فرآیند (Q) و کواریانس نوین اندازه گیری (R) اصلاحاتی انجام می دهد که در ادامه به آن می پردازیم.

در بین تخمین زنده های نوین، روش تخمین Sage-Husa که در مقاله [۲۱] ارائه شده است، از نظر فهم و قابلیت اجرا جزء معدود روش هایی است که بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بر اساس این روش، تخمین های  $\hat{Q}$  و  $\hat{R}$  به صورت زیر به دست می آید. برای اطلاعات بیشتر می توان به مقاله [۲۱] مراجعه کرد.

$$\hat{Q}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \left\{ \left[ \hat{x}_{j|k} - f_{j-1}(\hat{x}_{j-1|k}) \right] \left[ \hat{x}_{j|k} - f_{j-1}(\hat{x}_{j-1|k}) \right]^T \right\}$$

$$\hat{R}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \left\{ \left[ \hat{y}_j - g_j(\hat{x}_{j|k}) \right] \left[ \hat{y}_j - g_j(\hat{x}_{j|k}) \right]^T \right\} \quad (1)$$

در روابط فوق  $f_{j-1}(\hat{x}_{j-1|k})$  و  $g_j(\hat{x}_{j|k})$  به ترتیب بیانگر میانگین پسین عبارت های  $\hat{x}_{j-1|j-1}$  و  $\hat{x}_{j|j-1}$  هستند.

برای سیستم غیر خطی بیان شده در رابطه (۲)، الگوریتم کامل فیلتر AEKF را می توان در جدول ۱ خلاصه کرد.

$$x_k = f_{k-1}(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k-1}$$

$$y_k = g_k(x_k) + v_k \quad (2)$$

در روابط فوق  $w_k \sim N(0, Q_k)$ ،  $y_k \in R^m$ ،  $x_k \in R^n$  و  $v_k \sim N(0, R_k)$  به ترتیب بیانگر حالت ها، خروجی ها، نوین فرآیند و نوین اندازه گیری است. علامت  $k$  بیانگر گام زمانی و  $f$  و  $g$  توابع غیر خطی دینامیک و مدل اندازه گیری است.

در جدول ۱ پارامتر  $\alpha < 1$  به عنوان پارامتر فراموشی معرفی شده است، این پارامتر باید به صورت دقیق برای فیلتر تنظیم شود. این اصلاح در الگوریتم سبب می شود فیلتر به اندازه گیری های جدیدتر اهمیت بیش تری قائل شود. توجه به این نکته الزامی است که ممکن است ماتریس های  $\hat{Q}$  و  $\hat{R}$  به دلیل استفاده از روابط تفریقی به صورت ماتریس های منفی ظاهر شوند، از این رو در این حالت می توان از روابط زیر استفاده کرد:

$$\hat{R}_k < 0 \Rightarrow \hat{R}_k = \hat{R}_{k-1} + \Gamma_k P_{yy,k}$$

$$\hat{Q}_k < 0 \Rightarrow \hat{Q}_k = \hat{Q}_{k-1} + \Gamma_k P_{xy,k} P_{xy,k}^T \quad (3)$$

سنسور شود، این روش ها عموماً روش هایی پیچیده بوده که آنالیز سیستم حلقه بسته آن ها با نواقصی روبه رو است. در این روش ها از لفظ "از نو ایجاد کردن" خطاهای سنسور برای به اطلاع رساندن خطاها به کنترل کننده استفاده می کنند. در این مقاله این رویکرد دنبال خواهد شد که با استفاده از فیلترهای کالمن، خطاهای رخ داده در سنسورها از نو ایجاد شده و سپس از این سیگنال برای اصلاح اندازه گیری های خراب شده استفاده شود، قبل از آنکه توسط کنترل کننده مورد استفاده قرار گیرد. این ساختار به ما اجازه می دهد که با یک تغییر جزئی در حلقه فیدبک، یک سیستم مقاوم در برابر خطاهای سنسور داشته باشیم، بدون آنکه نیاز به ایجاد تغییرات کلی در سیستم کنترل کننده داشته باشیم. در روش های کنترل تحمل پذیر خطای فعال، نیاز است که سیستم کنترل کننده را تغییر داده و آن را دوباره پیکربندی کرد، این کار ممکن است پایداری حلقه بسته سیستم را نقض کند و یا در حالت کلی تر بحث پایداری آن پیچیده تر شود. در حالی که در این روش آنالیز سیستم حلقه بسته نیاز به داشتن جزئیات کاملی از کنترل کننده نیست. به عنوان مثال در مقاله [۲۰] کنترل کننده به صورت یک جعبه سیاه فرض شده است و با این حال پایداری کلی سیستم حلقه بسته به صورت کامل اثبات شده است. در کل هدف این مقاله ارائه روشی برای تشخیص و شناسایی خطا در سنسورها و همچنین ارائه کنترل کننده تحمل پذیر خطا، جهت مقابله با خطاهای سنسور است. بخش تشخیص و شناسایی خطا، مبتنی بر بانکی از فیلترهای توسعه یافته تطبیقی بوده و کنترل کننده NTSMC ارائه شده مسئول مقابله با خطاهای سنسور است.

ساختار کلی این مقاله به این صورت است که در بخش ۲ به بررسی و ارائه الگوریتم AEKF برای تشخیص و شناسایی خطای سنسور پرداخته شده و مفهوم استفاده و ارجحیت روش بانکی از فیلترهای کالمن بررسی شده است. در بخش ۳ کنترل کننده تحمل پذیر خطای مد لغزشی ترمینال غیرتکین معرفی شده و پایداری آن مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ۴ الگوریتم ها و روش های کنترلی ارائه شده در بخش های قبل، بر روی یک ربات دو درجه آزادی تست و ارزیابی شده و توانایی این رویکردها در مقابل خطاهای سنسور ارائه شده است. نتیجه گیری در بخش ۵ بیان شده است.

## ۲- تشخیص و شناسایی خطا

همان طور که در بخش مقدمه اشاره کردیم برای تشخیص و شناسایی خطا از روش مدل مرجع فیلتر کالمن استفاده شده است. از آنجایی که اکثر سیستم هایی که با آن ها سروکار داریم غیر خطی هستند از این رو از نوع غیر خطی فیلتر کالمن به اسم فیلتر کالمن توسعه یافته استفاده کرده ایم. یکی از شرایط مهمی که در نحوه عملکرد فیلترهای کالمن نقش بسیار تعیین کننده ای دارد، معلوم بودن مشخصات آماری نوین و به بیان دیگر ماتریس های کواریانس نوین های فرآیند و اندازه گیری و همچنین میانگین نوین هایی است که بر سیستم اثر می کنند. از آنجایی که در اکثر کارهای عملی این اطلاعات گاهاً به صورت دقیق معلوم نبوده و یا در دسترس نیست، از این رو عدم تطابق مقادیر فرض شده توزیع های

**جدول ۱: الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته تطبیقی**

۱. مقادیر دهی اولیه:

$$P_0^+ = E \left[ (x_0 - E[x_0])(x_0 - E[x_0])^T \right]$$

$$\hat{x}_0^+ = E[x_0] \quad \hat{Q}_0 = Q_0 \quad \hat{R}_0 = R_0 \quad (4)$$

۲. محاسبه ماتریس های ژاکوبین:

$$F_{k-1} = \frac{\partial f_{k-1}}{\partial x} | \hat{x}_{k-1}^+ \quad H_k = \frac{\partial g_k}{\partial x} | \hat{x}_k^- \quad (5)$$

۳. مرحله به روز رسانی زمانی:

$$P_k^- = F_{k-1} P_{k-1}^+ F_{k-1}^T + \hat{Q}_{k-1}$$

$$\hat{x}_k^- = f_{k-1}(\hat{x}_{k-1}^+, u_{k-1}) \quad (6)$$

۴. مرحله به روز رسانی اندازه گیری ها:

$$P_{xy,k} = P_k^- H_k^T$$

$$P_{yy,k} = H_k P_k^- H_k^T + \hat{R}_k$$

$$K_k = P_{xy,k} P_{yy,k}^{-1}$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - h_k(\hat{x}_k^-))$$

$$P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (7)$$

۵. ایجاد اصلاحات مربوطه:

$$P_k^+ = \alpha^2 P_{k-1}^+ \quad \alpha < 1$$

$$\xi_k = (y_k - h_k(\hat{x}_k^-))$$

$$\Gamma_k = \frac{1-\rho}{1-\rho^k} \quad 0 < \rho < 1$$

$$\hat{R}_k = (1-\Gamma_k) \hat{R}_{k-1} + \Gamma_k \left[ \xi_k \xi_k^T - P_{yy,k} \right]$$

$$\hat{Q}_k = (1-\Gamma_k) \hat{Q}_{k-1} + \Gamma_k \left[ K_k \xi_k \xi_k^T K_k^T - P_{xy,k} P_{xy,k}^T \right] \quad (8)$$

در این مقاله برای تشخیص و شناسایی خطا در سنسورها از بانکی از فیلترهای کالمن موازی استفاده کرده ایم که هر یک از این فیلترها مسئول تولید سیگنال مانده مربوط به یک سنسور است [۲۲]. به عنوان مثال اگر برای یک ربات دو درجه آزادی چهار سنسور برای اندازه گیری مکان و سرعت زاویه ای مفاصل در نظر بگیریم، چهار فیلتر کالمن موازی نیز برای تولید سیگنال های مانده مربوط به هر یک از سنسورها استفاده خواهیم کرد. با این کار در حالتی که خطایی در سنسورها رخ نداده باشد هر یک از سیگنال های مانده بایستی در نزدیکی صفر و در محدوده سطح آستانه تعریف شده، باقی بمانند. حال اگر خطایی در سنسور اول رخ دهد، با توجه به سطح آستانه ای که برای هر سنسور به صورت سعی و خطا به دست آمده است، تنها سیگنال مانده حاصل از فیلتر اول آلام نشان خواهد داد و دیگر سیگنال ها در مقدار صفر باقی خواهند ماند. در این حالت به سادگی می توان تعیین کرد که در چه زمانی، با چه اندازه ای در کدام یک از سنسورها خطا رخ داده است. این اطلاعات حاصل شده از FDD در ادا مه برای طراحی کنترل کننده تحمل پذیر خطا لازم و ضروری است. باید به این نکته توجه کرد که اگر برای تمام سنسورها از یک فیلتر یکسان استفاده شود، در صورت بروز خطا ممکن است علاوه بر تغییر سیگنال مانده مربوط به آن سنسور، سیگنال های مانده دیگر سنسورها نیز تغییر پیدا کنند. این امر سبب می شود سیستم FDD خطاهای رخ داده در دیگر سنسورها را تشخیص ندهد و یا ممکن است به اشتباه خطاهایی را اعلام کند که اصلاً رخ نداده است.

با توجه به بحث های صورت گرفته در بخش های قبل، در این مقاله از بانکی از فیلترهای توسعه یافته تطبیقی برای تشخیص و شناسایی خطای رخ داده در سنسورها استفاده خواهیم کرد. به کمک این روش سیگنال مانده ی تولید شده به ازای هر فیلتر برای هر یک از سنسورها مستقل از دیگر سیگنال های مانده بوده و خطای رخ داده در یک سنسور را می توان به سادگی از خطاهای رخ داده در سنسورهای دیگر تفکیک کرد.

**۳- کنترل کننده مد لغزشی ترمینال غیر تکین**

همان طور که قبلاً اشاره شد، کنترل مد لغزشی به دلیل مزایای خود، شامل پاسخ سریع، سادگی محاسبات و مقاوم بودن در برابر اغتشاشات و نامعینی های سیستم، به صورت گسترده ای در سیستم های غیر خطی مورد استفاده قرار گرفته است. اما کنترل مد لغزشی دارای همگرایی مجانبی است و برای بهبود عملکرد کنترل کننده مد لغزشی و بهبود همگرایی آن به همگرایی زمان محدود، نوع جدیدی از این کنترل کننده، به نام کنترل مد لغزشی ترمینال ارائه شده که همگرایی سریع و در زمان محدود آن از ویژگی های بارز این روش است. اصول کلی این روش را می توان در [۱۴] پیدا کرد با این حال به طور خلاصه به بررسی این روش کنترلی می پردازیم.

یک سیستم دینامیکی غیر خطی نامعین از مرتبه دوم را به صورت زیر در نظر بگیریم:

اصولاً به دلایل مختلفی ممکن است در سنسورها خطا رخ دهد. خطاهای سنسور می تواند در اثر خرابی منبع برق، اتصالات شل و زنگ زده، یا به دلیل محدودیت هایی در خواندن و گردآوری داده ها رخ دهد. نمایش خطا به صورت جمع شونده عمومیت بیش تری نسبت به مدل ضرب شونده دارد. این نوع از مدل سازی به دلیل آنکه خطاها را به صورت یک سیگنال نشان می دهد نه به صورت تغییراتی در ماتریس های فضای حالت، از این رو برای طراحی سیستم های FDD از این نوع مدل برای بیان کردن خطاها استفاده می کنند. یک فضای حالت با خطاهای جمع شونده را می توان به صورت زیر نشان داد:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k$$

$$y_k = Cx_k + Du_k + Ef_k \quad (9)$$

$$E = \text{diag} \{ | E_1, E_2, \dots, E_m | \}$$

که  $f_k \in R^{n_f}$  سیگنال توصیف کننده خطا است. در روابط فوق که  $E_j \geq 0$  بدین معناست که اگر  $E_j = 0$  باشد، سنسور مورد نظر به درستی کار می کند، اگر مقدار آن از صفر بیشتر باشد یعنی در سنسور مورد نظر خطا رخ داده است.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= x_2 + \beta^{-1} \frac{p}{q} x_2^{p/q-1} [f(x) + b(x)u + \delta(x)] \\ &= x_2 + \beta^{-1} \frac{p}{q} x_2^{p/q-1} \left( \delta(x) - \beta \frac{q}{p} x_2^{2-p/q} - (I_\delta + \eta) \text{sgn}(s) \right) \\ &= \beta^{-1} \frac{p}{q} x_2^{p/q-1} (\delta(x) - (I_\delta + \eta) \text{sgn}(s)) \\ \Rightarrow s\dot{s} &= \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} x_2^{p/q-1} s (\delta(x) - (I_\delta + \eta) \text{sgn}(s)) \\ &\leq -\beta^{-1} \frac{p}{q} \eta x_2^{p/q-1} |s| \end{aligned} \quad (15)$$

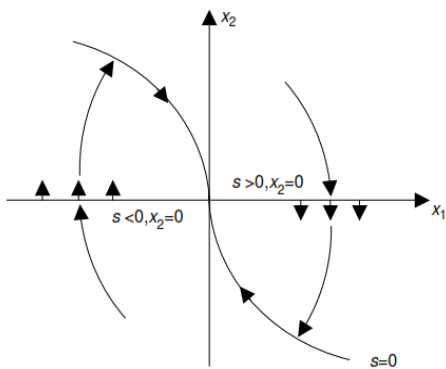
از آنجایی که پارامترهای  $p$  و  $q$  اعداد مثبت فردی هستند و  $1 < p/q < 2$  در نتیجه اگر فرض کنیم  $\rho(x_2) = \beta^{-1} \frac{p}{q} \eta x_2^{p/q-1}$  آنگاه برای  $x_2 \neq 0$  داریم:

$$\begin{aligned} s\dot{s} &\leq -\rho(x_2) |s| \\ \rho(x_2) &> 0 \end{aligned} \quad (16)$$

بنابراین، برای  $x_2 \neq 0$  شرایط پایداری لیاپانوف صادق است. برای حالتی هم که  $x_2 = 0$  است، با فرض کردن یک همسایگی کوچک می توان اثبات کرد که مد لغزش  $s = 0$  از هر نقطه ای از صفحه فاز در زمان محدودی قابل دسترس است. در حالتی که  $x_2 = 0$  با جایگذاری سیگنال کنترلی (۱۴) در سیستم (۱۰) داریم:

$$\dot{x}_2 = \delta(x) - (I_\delta + \eta) \text{sgn}(s) \quad (17)$$

در این رابطه می توان مشاهده کرد که برای  $s > 0$  و  $s < 0$ ، به ترتیب  $\dot{x}_2 \leq -\eta$  و  $\dot{x}_2 \geq \eta$  است، به تعبیری نشان می دهد که  $x_2 = 0$  ناحیه جذب کننده نیست. برای درک بهتر این مطلب نمودار صفحه فاز سیستم در شکل ۱ رسم شده است. در نتیجه همگرایی در زمان محدود حالت های سیستم به صفر اثبات شد.



شکل ۱: صفحه فاز سیستم [۱۹]

در رابطه (۱۴) جمله گسسته  $\text{sgn}(s)$  ممکن است باعث ایجاد پدیده ای به نام نوسانات تکراری شدید در مد لغزش شود. از این رو پارامتر  $k$  باید به طریقی انتخاب شود که از وقوع این پدیده جلوگیری شود. یکی از روش های کلاسیکی که برای این کار پیشنهاد شده است، ایجاد ناحیه ای حاشیه ای در همسایگی سطح لغزش است. لذا در این مقاله از جمله  $\tanh(s/\phi)$  به جای جمله  $\text{sgn}(s)$  استفاده شده است که  $\phi$  عرض باند حاشیه ای را مشخص می کند.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f(x) + b(x)u + \delta(x) \end{aligned} \quad (10)$$

که  $x = [x_1, x_2]^T$  بردار حالت سیستم،  $f(x)$  و  $b(x)$  بیانگر توابع غیرخطی از  $x$  و  $\delta(x)$  نمایانگر نامعینی و اغتشاشات موجود در سیستم است که  $\|\delta(x)\| \leq l_\delta$ .

حال سطح لغزش مورد استفاده در مد لغزشی ترمینال را به صورت زیر تعریف می کنیم. در این رابطه  $\beta > 0$  پارامتر ثابت قابل تنظیم و  $p$  و  $q$  اعداد مثبت فرد هستند که  $p > q$ .

$$s = x_2 + \beta x_1^{q/p} \quad (11)$$

برای سیستم بیان شده در رابطه (۱۰)، و با فرض اینکه شرط کافی برای وجود TSM به صورت  $s\dot{s} < -\eta |s|$  است، سیگنال کنترلی  $u$  را می توان به صورت زیر به دست آورد:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{x}_2 + \beta \frac{q}{p} x_1^{q/p-1} \dot{x}_1 \\ &= f(x) + b(x)u + \delta(x) + \beta \frac{q}{p} x_1^{q/p-1} x_2 \\ \xrightarrow{\dot{s}=0} u &= -b^{-1}(x) \left( f(x) + \beta \frac{q}{p} x_1^{q/p-1} x_2 + k \text{sgn}(s) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

در رابطه فوق،  $k$  مقدار ثابتی است که بر مبنای میزان حداکثر اغتشاشات و تغییرات پارامتری نتیجه می شود. همان طور که می توان مشاهده کرد، در رابطه (۱۲) جمله  $x_1^{q/p-1} x_2$  می تواند عامل ایجاد تکینگی شود زمانی که  $x_1 = 0$  و  $x_2 \neq 0$  باشد. در مقاله [۱۹] به طور کامل بحث تکینگی در این روش مورد مطالعه قرار گرفته است.

برای غلبه بر این مشکل روش های زیادی ارائه شده است. در این مقاله از مدل مد لغزشی ترمینال غیرتکین پیشنهادی زیر استفاده خواهیم کرد [۱۹]:

$$s = x_1 + \beta^{-1} x_2^{p/q} \quad (13)$$

در رابطه فوق تمامی پارامترهای شبیه پارامترهای رابطه (۱۱) است با این تفاوت که  $1 < p/q < 2$ . برای به دست آوردن سیگنال کنترلی، مشتق سطح لغزش معرفی شده در رابطه (۱۳) را محاسبه کرده و با صفر قرار دادن آن می توان سیگنال کنترلی را به صورت زیر تعیین کرد:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{x}_1 + \beta^{-1} \frac{p}{q} x_2^{p/q-1} \dot{x}_2 \\ &= x_2 + \beta^{-1} \frac{p}{q} x_2^{p/q-1} [f(x) + b(x)u + \delta(x)] \\ \xrightarrow{\dot{s}=0} u &= -b^{-1}(x) \left\{ f(x) + \beta \frac{q}{p} x_2^{2-p/q} + (I_\delta + \eta) \text{sgn}(s) \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

برای بررسی پایداری سیستم تابع لیاپانوف  $V = 1/2s^2$  را در نظر گرفته و قضیه ۱ را به صورت زیر بیان می کنیم:

**قضیه ۱:** برای سیستم بیان شده در رابطه (۱۰) با سطح لغزش بیان شده در (۱۳)، اگر سیگنال کنترلی به صورت (۱۴) بیان شود، آنگاه حالت های سیستم در زمان محدود به صفر همگرا خواهند شد.

**اثبات:** برای مد لغزشی ترمینال غیرتکین رابطه (۱۳)، مشتق مرتبه اول آن حول دینامیک سیستم (۱۰) به صورت زیر به دست می آید:

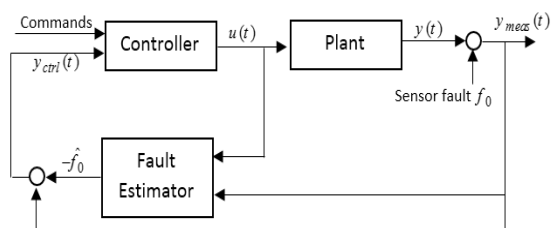
### ۳-۱- مد لغزشی ترمینال غیرتکین تحمل پذیر خطا

روش های طراحی این نوع از کنترل کننده ها به دو نوع فعال و غیرفعال تقسیم می شوند. در روش های غیرفعال کنترل کننده را به طریقی طراحی می کنند تا در مقابل برخی از خطاهای از پیش تعیین شده مقاوم باشد، حال اگر خطایی خارج از خطاهای تعریف شده رخ دهد در آن صورت به احتمال زیاد عملکرد صحیح سیستم با مشکل مواجه خواهد شد. در مقابل، کنترل کننده های فعال در برابر طیف وسیعی از خطاهای سنسور و محرک مقاوم هستند. این نوع از کنترل کننده ها نیاز به سیستم FDD برخطی دارند که خطاهای رخ داده را در کمترین زمان ممکن شناسایی کنند، بر اساس اطلاعاتی که از این بخش حاصل می شود، کنترل کننده از نو پیکربندی می شود تا اثر آن خطا را به حداقل برساند. در این مقاله بر مبنای روش کنترل کننده فعال، از یک بخش FDD برای شناسایی خطا بهره برده ایم اما در ادامه به جای آنکه کنترل کننده را از نو پیکربندی کنیم، از یک تغییر کوچک در حلقه فیدبک استفاده کرده ایم. در این روش به کمک فیلترهای کالمن استفاده شده در بخش FDD، خطاهای رخ داده در سنسورهای مختلف را شناسایی می کنیم، سپس به کمک این اطلاعات سیگنال اندازه گیری را قبل از اینکه وارد کنترل کننده شود، اصلاح می کنیم. شکل ۲ خلاصه روشی که مورد استفاده قرار داده ایم را نشان می دهد.

در این روش فرض می کنیم که حالت های اندازه گیری شده دارای خطا هستند. به این ترتیب که:

$$y(t) = x(t) + Nf_0(t) \quad (18)$$

که  $N$  ماتریسی معلوم با ابعاد مشخص است. به تعبیری اگر فرض کنیم  $y \in R^{n_y}$  بوده و خطاهای رخ داده در سنسور به صورت  $f_0 \in R^{n_q}$  باشد در آن صورت  $N \in R^{n_y \times n_q}$  خواهد بود. در واقع ماتریس  $N$  برای حالتی که در سنسورها خطا وجود ندارد صفر بوده و در مواقعی که در سنسورها خطایی رخ داده باشد برابر ماتریس واحد با ابعاد معلوم است.



شکل ۲: طرح AFTC خطای سنسور [۲۰]

هدف این است که سیستم شناسایی خطا را به نحوی طراحی کرد که خطاهای رخ داده در سنسور،  $f_0$ ، را تخمین بزند. بعد از این مرحله، ایده اصلی این است که سیگنال کنترلی به صورت زیر اصلاح شود:

$$u = u_0(y - N\hat{f}_0) \quad (19)$$

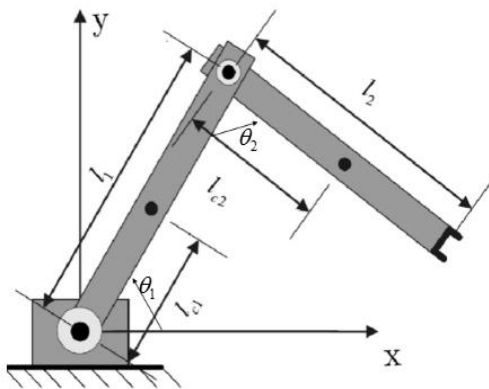
در رابطه فوق  $f_0$  خطای سنسور نامعلومی است که اندازه گیری های  $y(t)$  را مخدوش می کند. به کمک این روش یک سیستم تحمل پذیر خطای سنسور خواهیم داشت.

### ۴- شبیه سازی

مدل دینامیکی یک ربات بازویی را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\tau = D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) \quad (20)$$

برای یک ربات دو درجه آزادی که در شکل ۳ نشان داده شده است،  $D \in R^{2 \times 2}$  بیانگر ماتریس اینرسی،  $C \in R^{2 \times 1}$  بردار کوریولیس و  $G \in R^{2 \times 1}$  بردار نیروهای گرانشی و  $\tau \in R^{2 \times 1}$  بردار گشتاور کنترلی است. مقادیر این ماتریس ها در ضمیمه بیان شده است.



شکل ۳: شماتیک ربات دو درجه آزادی

در این قسمت قبل از آنکه به شبیه سازی سیستم های تشخیص و شناسایی خطا و طراحی کنترل کننده بپردازیم، ابتدا تفاوت دو تخمین گر فیلتر کالمن توسعه یافته و فیلتر کالمن توسعه یافته تطبیقی را بررسی می کنیم. برای مقایسه نحوه عملکرد دو فیلتر فوق، در شرایطی که مشخصات آماری نویز به طور دقیق مشخص نیست، ربات دو درجه آزادی فوق را در نظر می گیریم. برای این شبیه سازی مقدار اولیه حالت ها را به صورت  $\theta_0 = -0.5 * [1 \ 1 \ 1]^T$  و مقدار اولیه تخمین حالت ها را صفر در نظر می گیریم. قدرت نویز واقعی که بر سیستم اثر می کند را به صورت نویز سفید گوسی با ماتریس های کواریانس  $Q = 10^{-5}$  و  $R = 10^{-5}$  در نظر می گیریم. با این وجود، قدرت نویزهایی که در فیلتر کالمن مورد نیاز است را به صورت  $Q = 10^{-1}$  و  $R = 10^{-1}$  فرض می کنیم. تمامی مقادیر مشترک بین دو فیلتر را یکسان فرض کرده ایم. به تعبیری پارامترهایی نظیر مقادیر اولیه حالت ها و تخمین ها و همچنین ماتریس های کواریانس خطا یکسان و برابر هستند. در این الگوریتم ها ماتریس های خطای کواریانس اولیه برابر  $P_0 = 1 * I_{4 \times 4}$  است. از سوی دیگر دو پارامتر قابل تنظیم در الگوریتم AEKF برابر مقادیر  $\alpha = 1/0.01$  و  $\rho = 0.95$  هستند. در شکل ۴ و ۵ مقادیر تخمین زده شده مکان های دو لینک به همراه خطای تخمین هر یک از الگوریتم های استفاده شده را مشاهده می کنیم. همان طور که قابل مشاهده است فیلتر EKF نتوانسته است به مقادیر واقعی حالت ها همگرا شود. اما، فیلتر AEKF با کمترین میزان خطا توانسته است حالت های سیستم را تخمین بزند.

در ادامه با در نظر گرفتن خطاهای سنسور که در جدول ۳ بیان شده است، نحوه عملکرد بخش های FDD و FTC را بررسی می کنیم.

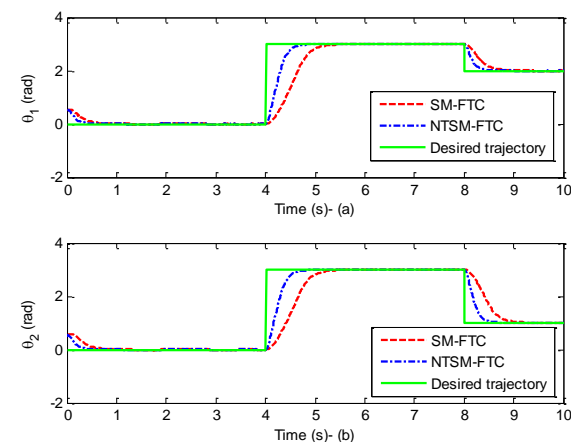
**جدول ۳: بررسی سناریوهای مختلف خطا در سنسور**

سناریو	سنسور ۱	سنسور ۲	سنسور ۳	سنسور ۴
	زمان (s)	۷	۲	۳
اندازه	۱۰ (rad)	۵ (rad)	۲۰ (rad/s)	۵ (rad/s)

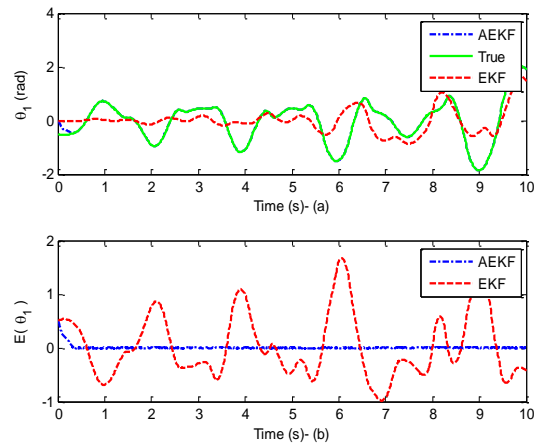
در جدول ۳ منظور از سنسورهای یک تا چهار؛ سنسور مکان لینک اول، مکان لینک دوم، سرعت زاویه ای لینک اول و سرعت زاویه ای لینک دوم است. به تعبیر دیگر، زمانی که در سنسور اول خطا رخ می دهد، خروجی سنسور اول به اندازه ۱۰ (rad) با خروجی واقعی اختلاف خواهد داشت. در شکل ۶ می توان عملکرد سیستم های شناسایی خطا و کنترل کننده خطا را مشاهده کرد. همان طور که مشاهده می کنیم هر دو کنترلر SMC و NTSMC توانسته اند مسیر دلخواه ارائه شده برای مکان های لینک اول و دوم را با دقت بالایی ردیابی کنند، اما سرعت همگرایی کنترلر NTSMC به مراتب بهتر از کنترل کننده مد لغزشی مرسوم است.

در شکل ۶ قابل مشاهده است که کنترل کننده NTSMC توانسته در حضور خطاهای تعریف شده در سناریوی مد نظر، عمل ردیابی را با سرعت بیشتری نسبت به دیگر کنترل کننده انجام دهد. برای این شبیه سازی پارامترهای کنترل کننده NTSMC به صورت  $\beta = 10$ ،  $k = \eta + l_0 = 20$ ،  $p = 9$  و  $q = 7$  است.

همان طور که مشاهده کردیم کنترل کننده طراحی شده توانست با عملکرد مناسب بخش شناسایی خطا و سیستم FTC طراحی شده، در مقابل خطاهای رخ داده در سنسورها رفتاری مقاوم داشته و خطاهای رخ داده را تحمل کند. مقدار خطاهایی که برای سنسورهای مختلف توسط بخش FDD شناسایی شده است در جدول ۴ بیان شده است. در این جدول می توان مشاهده کرد که فیلترهای توسعه یافته تطبیقی تعریف شده قادرند در کمترین زمان ممکن و با کمترین اختلاف، زمان و اندازه ی خطاهای رخ داده را شناسایی کنند.

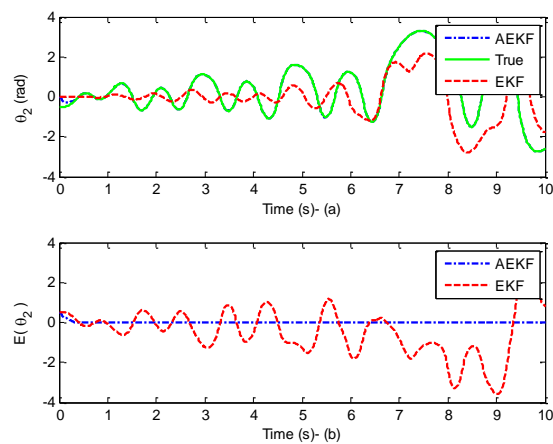


**شکل ۶: ردیابی مسیر دلخواه در حضور خطای سنسور**



**شکل ۴: تخمین حالت های ربات دو درجه آزادی؛ (a) مکان لینک اول، (b) خطای تخمین مکان لینک اول**

خطای تخمینی که در شکل ۴ و ۵ قابل مشاهده است باعث می گردد سیستم تشخیص و شناسایی خطا توسط فیلتر کالمن توسعه یافته به درستی کار نکرده و قادر به تشخیص به موقع و صحیح خطاهای رخ داده در سنسور نباشد. در دو شکل ۴ و ۵ تنها دو حالت مکان لینک های اول و دوم نشان داده شده است، تخمین سرعت زاویه ای این لینک ها هم دارای همین شرایط بوده و فیلتر کالمن توسعه یافته تطبیقی عملکرد به مراتب بهتری دارد.



**شکل ۵: تخمین حالت های ربات دو درجه آزادی؛ (a) مکان لینک دوم، (b) خطای تخمین مکان لینک دوم**

در جدول ۲ می توان خطای مربع میانگین ریشه آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود این خطا برای تمام حالت های سیستم توسط AEKF کم تر از روش EKF است.

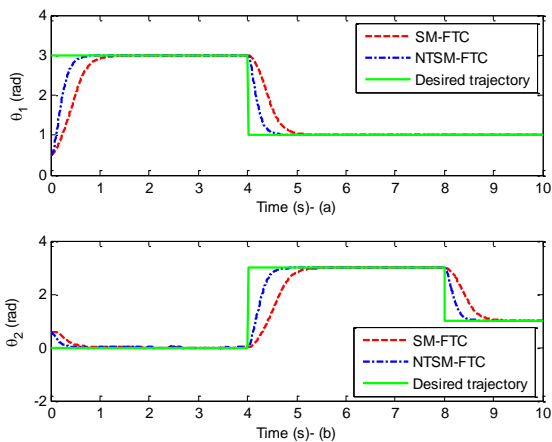
**جدول ۲: خطای RMSE ربات دو درجه آزادی**

RMSE				روش فیلترینگ
$\theta_2$	$\theta_1$	$\dot{\theta}_2$	$\dot{\theta}_1$	
۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۳۳	AEKF
۳/۷۶۶۵	۵/۲۷۴۲	۳/۱۰۹۴	۱/۵۵۲۳	EKF

جدول ۶: خطاهای سنسور شناسایی شده

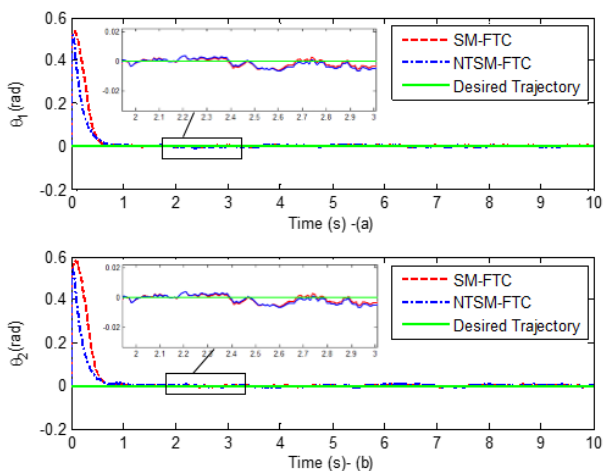
سنسور ۴	سنسور ۳	سنسور ۲	سنسور ۱	سناریو
۶/۰۱	-	-	۶/۰۱	زمان (s)
۳۴/۹۹۶ (rad/s)	-	-	۱۹/۹۹۸ (rad)	اندازه

همان طور که انتظار می رفت سیستم FDD ارائه شده قادر است خطاهای رخ داده در زمان های یکسان را نیز تشخیص دهد. از اطلاعات جدول ۶ می توان نتیجه گرفت که فیلترهای طراحی شده قادر هستند با کمترین تأخیر و کمترین خطا، خطاهای رخ داده در سنسورها را تشخیص داده و آن را ایزوله کنند. اگر بخواهیم خروجی سیستم کنترل شده در حضور این خطاها را مشاهده کنیم می توانیم به شکل ۸ مراجعه کنیم.



شکل ۸: ردیابی مسیر دلخواه در حضور خطاهای همزمان سنسور

در شکل ۸ مشاهده می کنیم که کنترل کننده تحمل پذیر خطا در هر دو حالت SMC و NTSMC توانسته است مسیر دلخواه را به خوبی ردیابی کند. با این حال، NTSMC توانسته است در زمان کوتاه تری این مسیر را ردیابی کند. برای درک بهتر روش کنترلی ارائه شده و مقایسه این روش با SMC مرسوم، فرض می کنیم مسیر ردیابی شده توسط ربات به صورت شکل ۹ تغییر داده شده باشد.

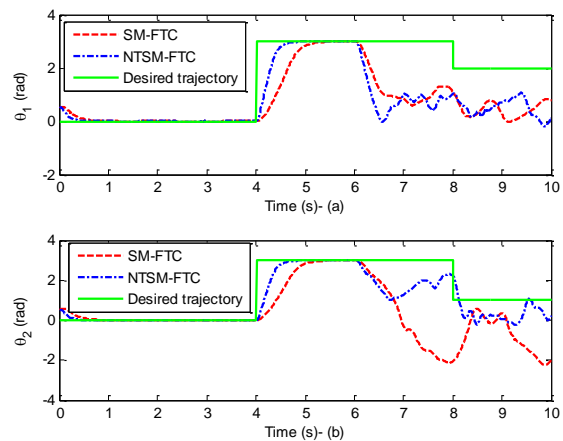


شکل ۹: ردیابی مسیر دلخواه در حضور خطاهای سنسور؛ (a) مکان لینک اول، (b) مکان لینک دوم

جدول ۴: زمان و اندازه ی خطاهای شناسایی شده توسط بخش FDD

سنسور ۴	سنسور ۳	سنسور ۲	سنسور ۱	سناریو
۵/۰۱۱	۳/۰۱	۲/۰۱۵	۷/۰۱	زمان (s)
۳/۰۰۱ (rad/s)	۲۰/۰۰۱ (rad/s)	۴/۹۹۷ (rad)	۱۰/۰۰۷ (rad)	اندازه

برای آنکه توانایی سیستم کنترلی تحمل پذیر خطا را بهتر بیان کنیم؛ اصلاحاتی که در حلقه فیدبک انجام داده ایم را حذف می کنیم، بدین ترتیب کنترل کننده ای خواهیم داشت که در برابر خطاهای سنسور دیگر مقاوم نیست. شکل ۷ نشان دهنده این موضوع است. در این شکل مشاهده می شود که با بروز خطاهای بیان شده در جدول ۳، سیستم توانایی ردیابی مسیر تعیین شده را نداشته و نمی تواند پایداری سیستم را حفظ کند.



شکل ۷: نحوه ردیابی مسیر دلخواه با حذف بخش تحمل پذیر خطای سیستم کنترل کننده

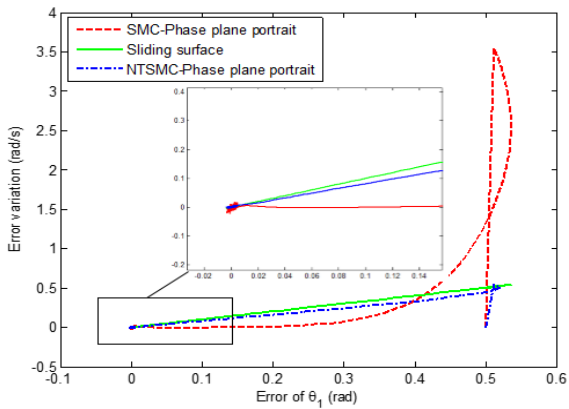
همان طور که در جدول ۳ مشاهده کردیم سنسورها در زمان های متفاوتی دچار خطا شدند، برای آنکه قدرت روش ارائه شده در این مقاله بیش تر نشان داده شود حالتی را فرض می کنیم که دو سنسور در یک زمان یکسان دچار خطا شوند. برای این منظور جدول ۵ را در نظر بگیرید. در این جدول تنها دو سنسور اول و چهارم دچار خطا شده و سنسورهای دیگر سالم هستند. همچنین خطاهای رخ داده در زمان یکسان با اندازه های متفاوت رخ داده است.

جدول ۵: خطاهای رخ داده در سنسورها

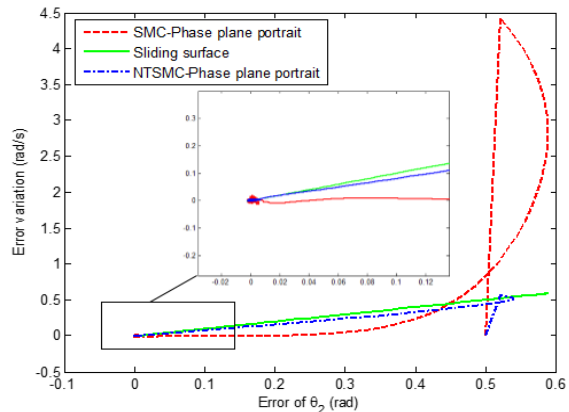
سنسور ۴	سنسور ۳	سنسور ۲	سنسور ۱	سناریو
۶	-	-	۶	زمان (s)
۳۵ (rad/s)	-	-	۲۰ (rad)	اندازه

با در نظر گرفتن جدول ۵ و بهره گیری از سیستم تشخیص و شناسایی خطای مبتنی بر بانکی از فیلترهای کالمن توسعه یافته تطبیقی، زمان و اندازه خطاهای تشخیص داده شده را می توان در جدول ۶ مشاهده کرد.



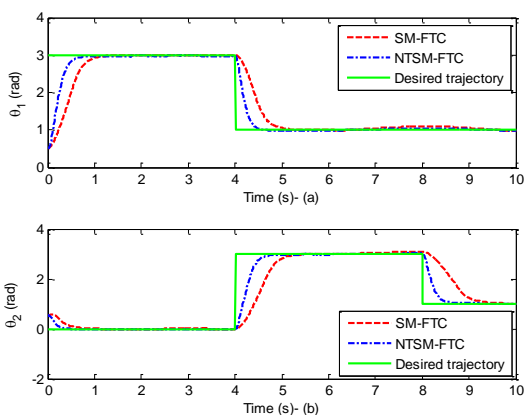


شکل ۱۲: نمودار صفحه فاز خطای ردیابی لینک اول



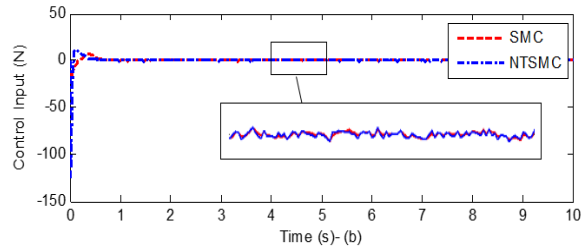
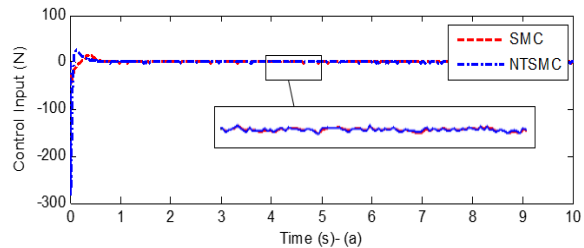
شکل ۱۳: نمودار صفحه فاز خطای ردیابی لینک دوم

در تمامی شبیه‌سازی‌های انجام‌شده فرض بر این بود که هیچ اغتشاش خارجی بر سیستم اثر نمی‌گذارد، با این حال وجود اغتشاش تأثیر چندانی بر عملکرد سیستم‌های FDD و FTC نداشته و این سیستم‌ها می‌توانند همچنان خطاهای رخ داده در سنسورها را تشخیص داده و با آن‌ها مقابله کنند. برای این منظور فرض می‌کنیم که اغتشاشی به صورت  $0.6 \sin(3t)$  بعد از لحظه ششم شبیه‌سازی به سیستم اعمال شده و خروجی سیستم در حضور این اغتشاش و خطاهای رخ داده در جدول ۳، در شکل ۱۴ نشان داده شده است. واضح است که هر یک از کنترل‌های SMC و NTSMC در مقابل این اغتشاش مقاوم هستند.

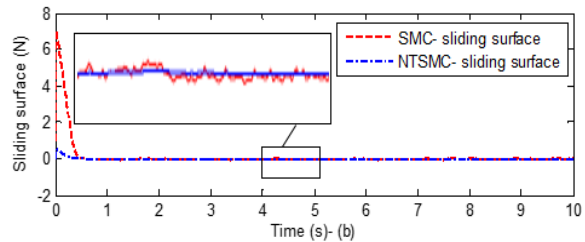
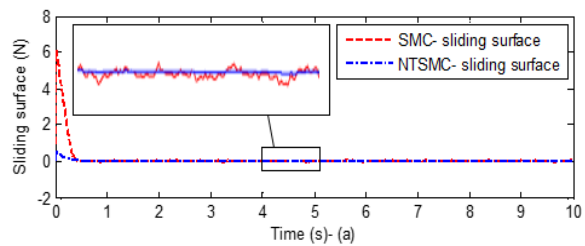


شکل ۱۴: ردیابی مسیر دلخواه توسط ربات در حضور خطاهای سنسور و اغتشاش خارجی

همان‌طور که انتظار می‌رفت کنترل‌کننده‌های FTC ارائه‌شده قادر به ردیابی دقیقی این مسیر هستند. همچنین با بزرگ کردن قسمتی از نمودار در لحظات مشخص‌شده می‌توان وجود پدیده نوسانات شدید (چتیرینگ) را بهتر مشاهده کرد. در این حالت فرض شده است که خطاهای سنسور مطابق جدول ۳ رخ داده‌اند. با در نظر گرفتن این مسیر ردیابی، سیگنال‌های کنترلی تولید شده و همچنین سطوح لغزش در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.



شکل ۱۰: مقایسه سیگنال کنترلی در روش کنترلی SMC و NTSMC؛ (a) لینک اول، (b) لینک دوم



شکل ۱۱: مقایسه سطوح لغزش روش کنترلی SMC و NTSMC؛ (a) لینک اول، (b) لینک دوم

همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۱ می‌توان مشاهده کرد، میزان نوسانات شدید (چتیرینگ) در روش کنترلی NTSMC کم‌تر بوده با این حال در ابتدا سیگنال کنترلی بیش‌تری برای رسیدن به این هدف مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱۰). شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب نمودار صفحه فاز خطای ردیابی لینک‌های ۱ و ۲ را نشان می‌دهد.

## ۵- نتیجه گیری

مقادیر پارامترهای به کاررفته در روابط فوق به صورت زیر در جدول ۷

بیان شده است.

جدول ۷: پارامترهای ربات دو درجه آزادی

لینک نام	$m_i (Kg)$	$L_i (m)$	$L_{c_i} (m)$	$I_i (Kg m^2)$
۱	۱/۰۰	۰/۵	۰/۲۵	۰/۲۵
۲	۱/۰۰	۱/۵۰	۰/۲۵	۰/۲۵

## مراجع

- [1] M. M. Kale, and A. J. Chipperfield, "Stabilized mpc formulations for robust reconfigurable flight control," *Control Engineering Practice*, vol. 13, no. 6, pp. 771-788, 2005.
- [2] A. Paoli, M. Sartini, and S. Lafortune, "Active fault tolerant control of discrete event systems using online diagnostics," *Automatica*, vol. 47, no. 4, pp. 639-649, 2011.
- [3] Z. Gao, B. Jiang, P. Shi, M. Qian, and J. Lin, "Active fault tolerant control design for reusable launch vehicle using adaptive sliding mode technique," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 349, no. 4, pp. 1543-1560, 2012.
- [4] R. Isermann, "Model-based fault-detection and diagnosis-status and applications," *Annual Reviews in Control*, vol. 29, no. 1, pp. 71-85, 2005.
- [5] Y. Ju, "A nonlinear kernel Gaussian mixture model based inferential monitoring approach for fault detection and diagnosis of chemical processes," *Chemical Engineering Science*, no. 68, pp. 506-519, 2012.
- [6] K. Salahshoor, M. Kordestani, and M. S. Khoshro, "Fault detection and diagnosis of an industrial steam turbine using fusion of SVM (support vector machine) and ANFIS (adaptive neuro-fuzzy inference system) classifiers," *Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 5472-5482, 2010.
- [7] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, and S. N. Kavuri, "A review of process fault detection and diagnosis. Part I: Quantitative model based methods," *Comp. Chem. Eng.*, vol. 27, pp. 293-311, 2003.
- [8] Z. W. Dong, Q. Xiaowei, J. Yuren, and M. Fanbin, "An innovation and residual based adaptive UKF algorithm," *Journal of Automatics*, vol. 37, pp. 1798-1804, 2010.
- [9] P. Osinenko, M. Geissler, and T. Herlitzius, "Adaptive unscented Kalman filter with a fuzzy supervisor for electrified drive train tractors," *Fuzzy Systems, IEEE International Conference on*, pp. 322-331, 2014.
- [10] M. A. M. Yusoff, and M. R. Arshad, "Active fault tolerant control of a remotely operated vehicle propulsion system," *Proceeding Eng.*, vol. 41, pp. 622-628, 2012.
- [11] Z. Wang, A. Wahrburg, and S. Rinderknecht, "Consideration of gyroscopic effect in fault detection and isolation for unbalance excited rotor systems," *Int. J. Rotating Machinery*, vol. 2012, pp. 1-14, 2012.
- [12] Z. Wang, R. S. Schittenhelm, M. Borsdorf, and S. Rinderknecht, "Application of augmented observer for fault diagnosis in rotor systems," *Eng. Lett.*, vol. 21, no. 1, pp. 10-17, 2013.
- [13] A. Sabanovic, "Variable structure systems with sliding modes in motion control—a survey," *IEEE Trans. Industrial Informatics*, vol. 7, no. 2, pp. 212-223, 2011.
- [14] Y. Wu, X. Yu, and Z. Man, "Terminal sliding mode control design for uncertain dynamic systems," *Systems and Control Letters*, vol. 34, pp. 281-288, 1998.
- [15] Y. Tan, "Terminal sliding mode control for rigid robots," *Automatica*, vol. 34, no. 1, pp. 51-56, 1998.

در این مقاله، یک روش طراحی کنترل کننده تحمل پذیر خطا برای مقابله با خطاهای سنسور ارائه شد. برای رسیدن به این هدف از بانکی از فیلترهای کالمن توسعه یافته تطبیقی به عنوان سیستم تشخیص و شناسایی برخط خطا بهره گرفتیم. این سیستم قادر است در کمترین زمان ممکن با حداقل خطای تخمین؛ زمان، اندازه و محل رخ دادن خطا را با وجود عدم تطابق بین ماتریس های کواریانس نويز واقعی با مقادیر مورد استفاده در الگوریتم فیلتر کالمن، تشخیص دهد. در ادامه با اعمال تغییر کوچکی در حلقه فیدبک خروجی، سیگنال های اندازه گیری شده خروجی از سنسورها را که دارای خطا بودند را اصلاح کرده و این سیگنال های اصلاح شده را به کنترل کننده اعمال کردیم. شبیه سازی های انجام شده بر روی یک ربات دو درجه آزادی توانایی بخش های مختلف تشخیص و شناسایی خطا و سیستم کنترل کننده مد لغزشی ترمینال غیرتکین تحمل پذیر خطا را به خوبی نشان می دهد. در این شبیه سازی ها نشان داده شد که سیستم FDD قادر است با بهره گیری از بانکی از فیلترهای AEKF ارائه شده در این مقاله، خطاهای رخ داده در زمان های مختلف با اندازه های متفاوت را به خوبی تشخیص دهد این روش حتی قادر است خطاهای همزمان را نیز به درستی شناسایی کند. از طرفی توانایی سیستم FTC مبتنی بر روش NTSMC نیز برای دو حالت خطای همزمان و غیرهمزمان و همچنین حالتی که در سیستم اغتشاش خارجی وجود دارد، نشان داده شد.

## ضمیمه

مقادیر ماتریس های ربات دو درجه آزادی اشاره شده در قسمت شبیه سازی به صورت زیر است:

$$D_{11} = m_1 L_{c1}^2 + m_2 (L_1^2 + L_{c2}^2 + 2L_1 L_{c2} \cos(\theta_2)) + I_1 + I_2 \quad (21)$$

$$D_{12} = m_2 (L_{c2}^2 + L_1 L_{c2} \cos(\theta_2)) + I_2$$

$$D_{21} = m_2 (L_{c2}^2 + L_1 L_{c2} \cos(\theta_2)) + I_2$$

$$D_{22} = m_2 L_{c2}^2 + I_2$$

$$C_{11} = (m_2 L_1 L_{c2} \sin(\theta_2)) \dot{\theta}_2$$

$$C_{12} = (m_2 L_1 L_{c2} \sin(\theta_2)) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)$$

$$C_{21} = -(m_2 L_1 L_{c2} \sin(\theta_2)) \dot{\theta}_1$$

$$C_{22} = 0$$

$$G_1 = (m_1 L_{c1} + m_2 L_1) g \cos(\theta_1) + m_2 L_{c2} g \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$G_2 = m_2 L_{c2} g \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

- [16] Y. Feng, J. Zheng, X. Yu, and N. V. Truong, "Hybrid terminal sliding-mode observer design method for a permanent-magnet synchronous motor control system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 3424-3431, 2009.
- [17] J. Yin, S. Khoo, Z. Man, and X. Yu, "Finite-time stability and instability of stochastic nonlinear systems," *Automatica*, vol. 47, no. 12, pp. 2671-2677, 2013.
- [18] Z. Man, and X. Yu, "Terminal sliding mode control of MIMO linear systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 44, no. 11, pp. 1065-1070, 1997.
- [19] Y. Feng, X. Yu, and F. Han, "On nonsingular terminal sliding mode control of nonlinear systems," *Automatica*, vol. 49, no. 6, pp. 1715-1722, 2013.
- [20] H. Alwi, C. Edwards, and P. P. Menon, "Sensor fault tolerant control using a robust LPV based sliding mode observer," *IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1828-1833, 2012.
- [21] A. Sage, and G. W. Husa, "Adaptive filtering with unknown prior statistics," *Proceedings of Joint Automatic Control Conference*, pp. 760-769, 1969.
- [22] V. M. Becerra, P. D. Roberts, and G. W. Griffiths, "Applying the extended Kalman filter to systems described by nonlinear differential-algebraic equations," *Control Engineering Practice*, vol. 9, no. 3, pp. 267-281, 2001.

#### زیر نویس ها

- <sup>1</sup> Fault Tolerant Control (FTC)  
<sup>2</sup> Fault Detection and Diagnosis (FDD)  
<sup>3</sup> Extended Kalman Filter (EKF)  
<sup>4</sup> Adaptive Extended Kalman Filter (AEKF)  
<sup>5</sup> Sliding Mode Control (SMC)  
<sup>6</sup> Terminal Sliding Mode Control (TSMC)  
<sup>7</sup> Non-singular Terminal Sliding Mode Control (NTSMC)  
<sup>8</sup> Root Mean Squared Error (RMSE)