

دانشکده مهندسی

# طراحی کنترل کننده تحمل پذیر خطا برای ماهواره با در نظر گرفتن آسیب عملگر

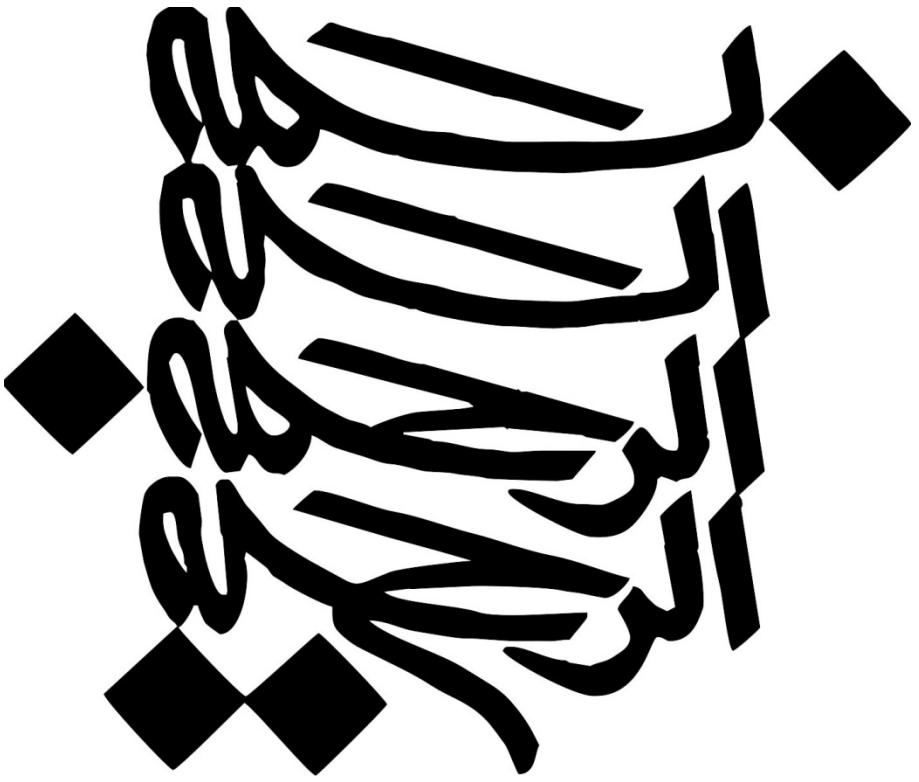
رساله برای دریافت درجه دکتری  
در رشته مهندسی برق گرایش کنترل

دانیال بوستان

اساتید راهنما:

دکتر سیدکمال حسینی ثانی      دکتر ناصر پریز

بهمن ماه ۱۳۹۲





دفتر مدیریت تحصیلات تکمیلی

### \* فرم ارزشیابی پایان نامه دکتر \* \*

نام و نام خانوادگی دانشجو: دانشجوی بهمن شماره دانشجویی: ..... رشته تحصیلی: مهندسی مهندسی  
 گرایش تحصیلی: ..... نام دانشکده: ..... گروه آموزشی: ..... استاد راهنما: دکتر بهمن دکتر پرین

مشخصات مقاله چاپ شده (حداقل یک مقاله)

عنوان مقاله: Adaptive Fault-Tolerant Spacecraft Attitude Control Design With Transient Response Control  
 نام مجله: IEEE Trans. Mechatronics محل انتشار: ..... سال انتشار: .....

عنوان پایان نامه: .....

ملاحظات	نمره کسب شده	حداکثر نمره	معیارهای ارزشیابی
		۳	کیفیت نگارش
			انسجام در تنظیم و تدوین مطالب، حسن نگارش و رعایت دستورالعمل کیفیت تصاویر، اشکال و منحنی های استفاده شده
		۱۱	کیفیت علمی
			بررسی تاریخچه موضوع و بیان سابقه پژوهشی در موضوع
			ابتکار و نوآوری
			ارزش علمی و یا کاربردی
		۳	کیفیت ارائه
			استفاده از منابع و مواخذ به لحاظ کمی و کیفی (به روز بودن) کیفیت نظرات و پیشنهادات برای ادامه تحقیق
		۲	مقاله
		۱	اتمام به موقع
	۱۹,۱۵	۲۰	نمره پایان نامه

ر	نام و نام خانوادگی	مرتبیه علمی	سمت *	نام دانشگاه عضو دفاع	امضاء
۱	دکتر بهمن	استادیار	استاد راهنمای اول	فردوسی محمد	
۲	دکتر پرین	استاد	استاد راهنمای دوم	فردوسی محمد	
۳	دکتر نوری	استادیار	عضو دفاع خارجی	صدیقی فرزانه	
۴	دکتر مومنی	دانشیار	عضو دفاع خارجی	ترتیب مددین	
۵	دکتر تقیپور	استادیار	عضو دفاع داخلی	فردوسی محمد	
۶	دکتر کریم پور	دانشیار	عضو دفاع داخلی	فردوسی محمد	
۷	دکتر سعادت محمد	استادیار	نماینده تحصیلات تکمیلی	فردوسی محمد	

\* سمت در پایان نامه منظور استاد راهنما، استاد مشاور، عضو دفاع داخلی، عضو دفاع خارجی (مدعو)، نماینده تحصیلات تکمیلی می باشد.

جلسه دفاع در تاریخ ۹۴/۱۱/۹ با حضور هیأت داوران تشکیل و پایان نامه:

مورد قبول واقع شد و با اخذ نمره حرف نوروز در ۱۹۱۵ عدد حرف نوروز در ۱۹۱۵ عدد با درجه ..... ارزشیابی شد.

مورد شناخته شد.

نام و نام خانوادگی مدیر گروه: دکتر بهمن

امضاء مدیر گروه: .....

## اظهار نامه

اینجانب دانیال بوستان دانشجوی دوره دکتری رشته دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد نویسنده رساله طراحی کنترل کننده تحمل پذیر خطا برای ماهواره با در نظر گرفتن آسیب عملگر تحت راهنمایی دکتر سیدکمال حسینی ثانی و دکتر ناصر پریز متعهد می شوم:

- تحقیقات در این رساله/پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله/پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه فردوسی مشهد » و یا « Ferdowsi University of Mashhad » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله/پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله/ پایان نامه رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله/پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله/پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله/پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تقدیم ہے:

ہمسرم، کہ ہموارہ درکنارم بود؛

پدرم، کہ ہموارہ یاورم بود؛

دخترم، کہ چشم انتظارش، ہستم

و

مادرم، کہ مشوق حرکتہم بود؛ روحش شاد و قرین رحمت.

## تشکر و قدردانی:

بدین وسیله مراتب تشکر خود را از تمامی افرادی که در طول انجام این رساله، با راهنمایی‌های خود مرا مدیون خود ساخته‌اند ابراز می‌دارم. علی‌الخصوص اساتید راهنمای بزرگووارم جناب آقای دکتر سید کمال حسینی ثانی و دکتر ناصر پریز که بی‌شک بدون حمایت‌ها و راهنمایی‌های آنها، انجام این تحقیق ممکن نبود.

## چکیده

در این رساله به طراحی کنترل کننده تحمل پذیر خطابرای ماهواره پرداخته شده است که کمترین وابستگی را به دقت اطلاعات در دسترس از آسیب داشته و در عین حال، دارای عملکرد مناسبی باشد. به همین منظور، استفاده از روش های کنترل تحمل پذیر خطا به روش غیرفعال در دستور کار قرار گرفته و به منظور بهبود عملکرد این دسته از کنترل کننده ها بخصوص در حالت گذرا، پیشنهادهایی ارائه گردیده است. آسیب مورد مطالعه در این رساله، آسیب ضرب-شونده در عملگر انتخاب شده است.

در ابتدا با استفاده از روش کنترل ساختار متغیر، کنترل کننده ردیاب تحمل پذیر خطا جهت مواجهه با آسیب ضرب شونده در عملگر طراحی شده است. پایداری نمایی این روش، به کمک روش مستقیم لیاپونوف و توسط یک پارامتر تطبیقی تضمین شده است

بدلیل عملکرد نامطلوب روش فوق در زمان صفر شدن پارامتر تطبیق، کنترل کننده دیگری با استفاده از روش کنترل ساختار متغیر پیشنهاد گردیده است. در روش دوم، پایداری سیستم حلقه بسته از دیدگاه کراندارای غایی یکنواخت اثبات شده است.

در روش سوم و به منظور بهبود کیفیت پاسخ گذرا، با تغییراتی در روش دوم و با افزودن یک پارامتر، کنترل کننده دیگری معرفی گردیده و پایداری سیستم حلقه بسته مجدداً از دیدگاه کراندارای یکنواخت اثبات شده است. طراحی کنترل کننده ای که علاوه بر جبران اثرات منفی آسیب، به کنترل حالت گذرا نیز توجه داشته باشد جزء نوآوری های این رساله بوده است.

در روش چهارم، با تغییراتی در روش سوم، پارامتر کنترل کننده حالت گذرا محدود به بازه [۱ و ۰] شده تا از اثرات جانبی منفی این پارامتر، جلوگیری شود.

در طراحی کنترل کننده های فوق، محدودیت دامنه ورودی، مستقیماً در کنترل کننده در نظر گرفته شده است که این ویژگی مشکلات موجود در استفاده از عملگر اشباع را در سایر روش ها، به خوبی مرتفع می سازد.

روش آخر این رساله به روش کنترلی می پردازد که برخلاف سایر روش های تطبیقی، از اصل اطمینان از هم آرزی استفاده نمی کند. به همین دلیل امکان تغییر در روند تطبیق پارامتر در اختیار طراح قرار گرفته است. کنترل کننده پیشنهادی دارای این مزیت بوده که بدون اطلاع دقیق از آسیب موجود در سیستم و ماتریس ممان اینرسی، همزمان هم به کنترل حالت گذرا و هم مقابله با اثرات منفی آسیب می پردازد.

آنچه باعث تمایز روش های پیشنهادی این رساله از روش های موجود گردیده است، عدم نیاز روش های پیشنهادی به اطلاع دقیق از شدت آسیب و امکان ردیابی مسیر در حضور اغتشاش خارجی است.

نتایج شبیه سازی نشان از عملکرد مطلوب روش های پیشنهادی در ردیابی مسیری با تغییرات سریع با وجود اغتشاش خارجی، محدودیت دامنه ورودی و آسیب ضرب شونده موجود در عملگر دارد.

۱	.....	۱ مقدمه
۳	.....	۱-۱ دسته بندی آسیب‌ها
۵	.....	۲-۱ مدل سازی آسیب
۵	.....	۱-۲-۱ آسیب ضرب شونده
۷	.....	۲-۲-۱ آسیب جمع شونده
۹	.....	۳-۲-۱ آسیب در اجزا
۹	.....	۳-۱ اجزاء اصلی در یک سیستم کنترل تحمل پذیر خطا
۱۳	.....	۴-۱ زیرسیستم تعیین و کنترل وضعیت
۱۴	.....	۱-۴-۱ روشهای نمایش وضعیت
۱۵	.....	۲-۴-۱ معادلات حاکم بر حرکت ماهواره
۱۷	.....	۳-۴-۱ دینامیک و سینماتیک خطا در ماهواره
۱۸	.....	۴-۴-۱ روشی دیگر برای محاسبه معادلات حرکت ماهواره
۱۹	.....	۵-۱ اهداف رساله
۲۱	.....	۶-۱ نوآوریهای رساله
۲۲	.....	۷-۱ ساختار رساله
۲۳	.....	۲ تکنیک‌های کنترل تحمل پذیر خطا
۲۳	.....	۱-۲ روشهای غیرفعال
۲۵	.....	۲-۲ روشهای فعال
۳۳	.....	۳-۲ مرور مقالات
۳۳	.....	۱-۳-۲ تشخیص و جداسازی آسیب
۳۵	.....	۲-۳-۲ کنترل تحمل پذیر خطا با در نظر گرفتن آسیب شناخته شده
۳۸	.....	۳-۳-۲ کنترل تحمل پذیر خطا با در نظر گرفتن تشخیص و جداسازی آسیب
۴۰	.....	۳ کنترل ساختار متغیر
۴۰	.....	۱-۳ معرفی روش کنترل ساختار متغیر و استفاده از آن در کنترل وضعیت ماهواره
۴۱	.....	۲-۳ مقاله اول: کنترل غیر تحمل پذیر خطا با امکان ردیابی مسیر
۴۱	.....	۳-۳ مقاله دوم: کنترل تحمل پذیر خطا با عدم امکان ردیابی مسیر
۴۲	.....	۴-۳ روش پیشنهادی اول: کنترل تحمل پذیر خطا با امکان ردیابی مسیر و اثبات پایداری مجانبی
۴۷	.....	۵-۳ روش پیشنهادی دوم: کنترل تحمل پذیر خطا با امکان ردیابی مسیر و پایداری UUB



۴۸	.....	۳-۵-۱ طراحی کنترل کننده تحمل پذیر خطا.....
۵۳	.....	۳-۶ روش پیشنهادی سوم: کنترل تحمل پذیر خطا با امکان ردیابی مسیر و کنترل حالت گذرا.....
۵۴	.....	۳-۶-۱ طراحی کنترل کننده تحمل پذیر خطا.....
۵۸	.....	۳-۷ روش پیشنهادی چهارم: کنترل تحمل پذیر خطا با امکان ردیابی مسیر و کنترل حالت گذرا.....
۵۸	.....	۳-۷-۱ طراحی کنترل کننده تحمل پذیر خطا.....
۶۰	.....	<b>۴ شناورسازی و تغییرناپذیری (I&amp;I)</b>
۶۰	.....	۴-۱ مفهوم شناور سازی و تغییرناپذیری
۶۲	.....	۴-۲ تعریف مسئله
۶۳	.....	۴-۳ کنترل تطبیقی با استفاده از منیفولد جاذب.....
۶۳	.....	۴-۳-۱ مسئله ساده شده.....
۶۴	.....	۴-۳-۲ کنترل کننده تطبیقی جدید.....
۶۵	.....	۴-۳-۳ منیفولد جاذب در روند تطبیق.....
۶۵	.....	۴-۴ روش پیشنهادی پنجم: کنترل کننده تحمل پذیر خطا به روش I&I.....
۶۹	.....	<b>۵ شبیه سازی</b>
۶۹	.....	۵-۱ سناریوی شبیه سازی شده.....
۷۲	.....	۵-۱-۱ روش پیشنهادی اول: کنترل کننده تحمل پذیر خطا با امکان ردیابی و اثبات پایداری نمایی.....
۷۶	.....	۵-۱-۲ روش پیشنهادی دوم: کنترل کننده تحمل پذیر خطا با امکان ردیابی و اثبات پایداری UUB.....
۸۰	.....	۵-۱-۳ روش پیشنهادی سوم: کنترل کننده تحمل پذیر خطا با امکان ردیابی و کنترل حالت گذرا و... UUB
۸۴	.....	۵-۱-۴ روش پیشنهادی چهارم: کنترل کننده تحمل پذیر خطا با امکان ردیابی و کنترل حالت گذرا و... UUB
۸۸	.....	۵-۱-۵ روش پیشنهادی پنجم: کنترل کننده تحمل پذیر خطا با روش I&I.....
۹۳	.....	<b>۶ نتیجه گیری و پیشنهاداتی برای ادامه کار.....</b>
۹۳	.....	۶-۱ نتیجه گیری.....
۹۴	.....	۶-۲ پیشنهاداتی برای ادامه کار.....
۹۶	.....	<b>مراجع</b>

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱: دسته‌بندی خطاها ..... ۳
- شکل ۲: آسیب ضرب‌شونده (راست) و آسیب جمع‌شونده (چپ) ..... ۴
- شکل ۳: آسیب متناوب (راست)، آسیب ابتدایی (وسط) و آسیب ناگهانی (چپ) ..... ۵
- شکل ۴: ناپایداری سیستم پس از وقوع آسیب در عملگر ..... ۶
- شکل ۵: تفاوت نمایش آسیب جمع‌شونده (راست) با آسیب ضرب‌شونده (چپ) در نمایش آسیب کلی در عملگر ..... ۸
- شکل ۶: عناصر اصلی سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا به روش فعال ..... ۱۰
- شکل ۷: بلوک دیاگرام زیرسیستم تعیین و کنترل وضعیت ..... ۱۴
- شکل ۸: روشهای کنترل تحمل‌پذیر خطا ..... ۳۲
- شکل ۹: میزان سلامت عملگرها ..... ۷۱
- شکل ۱۰: مسیر مورد نظر برای ردیابی (سرعت زاویه‌ای) ..... ۷۱
- شکل ۱۱: مسیر مورد نظر برای ردیابی (کواترنیون) ..... ۷۲
- شکل ۱۲: خطای وضعیت، (a): روش پیشنهادی اول، (b): روش پیشنهادی در مقاله اول، (c): روش پیشنهادی در مقاله دوم، (d): کنترل‌کننده PD، خط نقطه چین: زمان تغییر وضعیت سیستم از نرمال به آسیب دیده، ..... ۷۳
- شکل ۱۳: خطای سرعت زاویه‌ای، (a): روش پیشنهادی اول، (b): روش پیشنهادی در مقاله اول، (c): روش پیشنهادی در مقاله دوم، (d): کنترل‌کننده PD، خط نقطه چین: زمان تغییر وضعیت سیستم از نرمال به آسیب دیده، ..... ۷۴
- شکل ۱۴: سیگنال کنترل، (a): روش پیشنهادی اول، (b): روش پیشنهادی در مقاله اول، (c): روش پیشنهادی در مقاله دوم، (d): کنترل‌کننده PD، خط نقطه چین: زمان تغییر وضعیت سیستم از نرمال به آسیب دیده، ..... ۷۵
- شکل ۱۵: جمله تطبیقی  $k(t)$  ..... ۷۶
- شکل ۱۶: خطای وضعیت، (a): روش پیشنهادی دوم، (b): روش پیشنهادی در مقاله اول، (c): روش پیشنهادی در مقاله دوم، (d): کنترل‌کننده PD، خط نقطه چین: زمان تغییر وضعیت سیستم از نرمال به آسیب دیده، ..... ۷۷
- شکل ۱۷: خطای سرعت زاویه‌ای، (a): روش پیشنهادی دوم، (b): روش پیشنهادی در مقاله اول، (c): روش پیشنهادی در مقاله دوم، (d): کنترل‌کننده PD، خط نقطه چین: زمان تغییر وضعیت سیستم از نرمال به آسیب دیده، ..... ۷۸
- شکل ۱۸: سیگنال کنترل، (a): روش پیشنهادی دوم، (b): روش پیشنهادی در مقاله اول، (c): روش پیشنهادی در مقاله دوم، (d): کنترل‌کننده PD، خط نقطه چین: زمان تغییر وضعیت سیستم از نرمال به آسیب دیده، ..... ۷۹
- شکل ۱۹: جمله تطبیقی  $k(t)$  ..... ۸۰
- شکل ۲۰: خطای وضعیت (شکل (a): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 15$ ، شکل (b): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 1$ ، شکل (c): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 0$  و شکل (d): کنترل‌کننده PD، خط نقطه چین: زمان تغییر وضعیت سیستم از نرمال به آسیب دیده ..... ۸۱

- شکل ۲۱: خطای سرعت‌های زاویه‌ای (شکل (a): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 15$  ، شکل (b): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 1$  ، شکل (c): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 0$  و شکل (d): کنترل‌کننده PD، خط نقطه چین: زمان تغییر وضعیت سیستم از نرمال به آسیب دیده..... ۸۲
- شکل ۲۲: سیگنال کنترل (شکل (a): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 15$  ، شکل (b): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 1$  ، شکل (c): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 0$  و شکل (d): کنترل‌کننده PD، خط نقطه چین: زمان تغییر وضعیت سیستم از نرمال به آسیب دیده..... ۸۳
- شکل ۲۳: تغییرات  $k(t)$  به ازای مقادیر مختلف  $\rho$  ..... ۸۴
- شکل ۲۴: خطای وضعیت (شکل (a): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 1$  ، شکل (b): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 0.5$  ، شکل (c): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 0$  و شکل (d): کنترل‌کننده PD، خط نقطه چین: زمان تغییر وضعیت سیستم از نرمال به آسیب دیده..... ۸۵
- شکل ۲۵: خطای سرعت‌های زاویه‌ای (شکل (a): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 1$  ، شکل (b): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 0.5$  ، شکل (c): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 0$  و شکل (d): کنترل‌کننده PD، خط نقطه چین: زمان تغییر وضعیت سیستم از نرمال به آسیب دیده..... ۸۶
- شکل ۲۶: سیگنال کنترل (شکل (a): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 1$  ، شکل (b): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 0.5$  ، شکل (c): کنترل‌کننده پیشنهادی  $\rho = 0$  و شکل (d): کنترل‌کننده PD، خط نقطه چین: زمان تغییر وضعیت سیستم از نرمال به آسیب دیده..... ۸۷
- شکل ۲۷: تغییرات  $k(t)$  به ازای مقادیر مختلف  $\rho$  ..... ۸۸
- شکل ۲۸: خطای وضعیت، (شکل (a): کنترل‌کننده پیشنهادی روش I&I، شکل (b): کنترل‌کننده تطبیقی کلاسیک، شکل (c): کنترل‌کننده پیشنهادی روش VSC و شکل (d): کنترل‌کننده PD، خط نقطه چین: زمان تغییر وضعیت سیستم از نرمال به آسیب دیده) ..... ۹۰
- شکل ۲۹: خطای سرعت‌های زاویه‌ای، (شکل (a): کنترل‌کننده پیشنهادی روش I&I، شکل (b): کنترل‌کننده تطبیقی کلاسیک، شکل (c): کنترل‌کننده پیشنهادی روش VSC و شکل (d): کنترل‌کننده PD، خط نقطه چین: زمان تغییر وضعیت سیستم از نرمال به آسیب دیده) ..... ۹۱
- شکل ۳۰: سیگنال کنترل، (شکل (a): کنترل‌کننده پیشنهادی روش I&I، شکل (b): کنترل‌کننده تطبیقی کلاسیک، شکل (c): کنترل‌کننده پیشنهادی روش VSC و شکل (d): کنترل‌کننده PD، خط نقطه چین: زمان تغییر وضعیت سیستم از نرمال به آسیب دیده) ..... ۹۲

## فهرست علائم اختصاری

<b>AC</b>	Adaptive control	کنترل تطبیقی
<b>ADCS</b>	Attitude determination and control subsystem	زیرسیستم تعیین و کنترل وضعیت
<b>CEP</b>	Certainty equivalence principle	اصل اطمینان از هم ارزی
<b>EsA, EA</b>	Eigenstructure assignment	تخصیص ساختار مشخصه
<b>EKF</b>	Extended Kalman filter	فیلتر کالمن توسعه یافته
<b>eMPC</b>	Explicit model predictive control	کنترل مدل پیشبین صریح
<b>FDD</b>	Fault Detection and Diagnosis	تشخیص و جداسازی آسیب
<b>FTC</b>	Fault tolerant control	کنترل تحمل پذیر خطا
<b>FTCS</b>	Fault tolerant control system	سیستم کنترل تحمل پذیر خطا
<b>GIMC</b>	Generalized internal model control	کنترل مدل داخلی تعمیم یافته
<b>I&amp;I</b>	Immersion and invariance	شناورسازی و تغییرناپذیری
<b>IC</b>	Intelligent control	کنترل هوشمند
<b>IMM</b>	Interactive multiple model	چند مدلی تعاملی
<b>IRU</b>	Internal reference unit	واحد مرجع داخلی
<b>LMI</b>	Linear matrix inequality	نامساوی خطی ماتریسی
<b>LPV</b>	Linear parameter varying	پارامتر متغیر خطی
<b>LQ</b>	Linear quadratic	مربعی خطی
<b>MM</b>	Multiple model	چند مدلی
<b>MPC</b>	Model predictive control	کنترل مدل پیشبین
<b>MRP</b>	Modified Rodriguez parameters	پارامترهای رودریگوز تغییر یافته
<b>PIM</b>	Pseudo inverse method	روش معکوس کاذب
<b>PMF</b>	Perfect model following	تعقیب مدل کامل
<b>QFT</b>	Quantitative feedback theory	قضیه پاسخور کمی
<b>SMC</b>	Sliding mode control	کنترل مد لغزشی
<b>UUB</b>	Uniformly ultimately bounded	کراندار غایی یکنواخت
<b>VSC</b>	Variable structure control	کنترل ساختار متغیر



امروزه سیستم‌های کنترل را می‌توان به وفور در اطراف خود مشاهده کرد. به عنوان مثال در آسانسورها، خودروها، کشتی‌ها، هواپیماها و ماهواره‌ها حضور چنین سیستم‌هایی بسیار چشم‌گیر است. عملکرد پیوسته این سیستم‌ها، آسایش و آرامش را برای انسانها به ارمغان آورده است. اما در صورت بروز آسیب در چنین سیستم‌هایی چه اتفاقی خواهد افتاد؟

در یک سیستم، آسیب، رخدادی است که به ندرت و اغلب در زمانی که انتظار آن نمی‌رود، اتفاق می‌افتد. در [۱]، تعریف زیر برای آسیب ارائه شده است:

آسیب، انحراف پیشبینی نشده (غیرمجاز) حداقل یکی از خصوصیات یا پارامترهای سیستم از شرایط و مقادیر استاندارد، معمول یا قابل قبول آن است.

عموما آسیب‌ها به سختی قابل پیشبینی بوده و جلوگیری از آنها نیز تقریبا محال است. نتیجه عملکرد نادرست یک زیر مجموعه در عملکرد کل مجموعه، ابعاد و شکل‌های گوناگونی می‌تواند داشته باشد که در شدیدترین حالت می‌تواند به شکل خسارات مالی و جانی غیرقابل جبران در یک سیستم حساس و پیچیده ظاهر گردد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲]:

- انفجار در نیروگاه اتمی چرنوبیل اوکراین در ۲۶ آوریل ۱۹۸۶. در این حادثه حدود ۳۰ نفر در لحظه وقوع حادثه و ۱۵۰۰۰ نفر بعد از آن کشته شده و حدود ۵۰۰۰۰۰ نفر نیز دچار معلولیت شدند. همچنین تخمین زده شده است که حدود ۵ میلیون نفر در کشورهای اوکراین، بلاروس و روسیه در معرض تشعشعات رادیو اکتیو قرار گرفته اند.
- سقوط پرواز شماره ۱۹۱ خطوط هواپیمایی آمریکا در ۲۵ می ۱۹۷۹. در این حادثه ۲۷۳ نفر جان خود را از دست دادند.
- انفجار موشک آریان ۵ در ۴ ژوئن ۱۹۹۶. در این حادثه بروز آسیب در واحد مرجع داخلی<sup>۱</sup> (که وظیفه ارسال اطلاعات ارتفاع و مسیر را به واحد کنترل برعهده داشت)، باعث شد تا اطلاعات وضعیت نادرستی به واحد کنترل ارسال شده و ماموریت با شکست مواجه گردد.
- سقوط هواپیمای باری در ۴ اکتبر ۱۹۹۲. در این حادثه جدایی موتور از بال راست هواپیما باعث شد تا هواپیما بر روی یک ساختمان ۱۱ طبقه سقوط نماید.

سوالی که بلافاصله به ذهن خطور می‌نماید این است که آیا امکان انجام کاری وجود داشته است که از بروز این حوادث جلوگیری گردد؟ در حالیکه در اغلب موارد بروز آسیب در سیستم اجتناب ناپذیر است و نمی‌توان از آن جلوگیری نمود، تحلیل‌ها نشان می‌دهند که می‌توان از مشکلاتی که به واسطه بروز آسیب در سیستم به وجود می‌آید دوری جست و یا حداقل شدت آن را (از لحاظ خسارات مالی و تلفات) کمینه کرد.

اگر بتوان آسیب را شناسایی کرد، در بسیاری از موارد با تغییر ساختار سیستم کنترلی، ادامه عملکرد ایمن سیستم امکان پذیر است. البته این ادامه عملکرد احتمالاً با کاهش کارایی سیستم همراه خواهد بود.

امکان دستیابی به عملکرد ایمن، به کمک طراحی سیستم کنترل تحمل پذیر خطا (FTCS)<sup>۲</sup> میسر خواهد بود. به عنوان مثال در نیروگاه اتمی چرنوبیل، در صورتی که FTCS وجود داشت، این امکان بود که سیستم قبل از انفجار به صورت ایمن خاموش شود و یا در مثال موشک آریان ۵ در آخرین لحظه قبل از انفجار، اطلاعات ارتفاع معمول سیستم با اطلاعات دیگری جایگزین شده بود که سیستم کنترل قابلیت تحلیل آن را نداشت و یا در مثال هواپیمای باری، شبیه سازی نشان داد که با تغییر در ساختار کنترلی، امکان فرود ایمن هواپیما با وجود بروز آسیب ممکن بوده است.

تمامی مثال‌های فوق نیاز به عکس العمل مناسب به وقوع آسیب را در سیستم‌های مدرن امروزی نشان می‌دهد تا به توان به کمک آن ایمنی، قابلیت اطمینان و در دسترس بودن سیستم را افزایش داد.

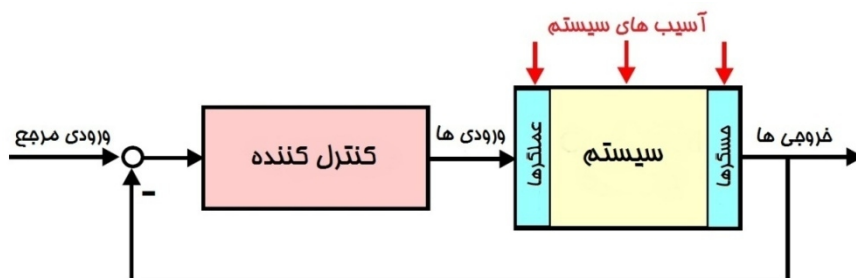
---

<sup>۱</sup> Internal reference unit (IRU)

<sup>۲</sup> Fault tolerant control system (FTCS)

## ۱-۱ دسته بندی آسیب‌ها

آسیب رخدادی است که می‌تواند در قسمت‌های مختلف یک سیستم کنترل بروز نماید. در سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر خطا، یکی از روش‌های دسته‌بندی آسیب‌ها، به گونه‌ای است که آسیب‌ها را با توجه به محل وقوع آنها دسته‌بندی می‌نمایند (شکل ۱).



شکل ۱: دسته‌بندی خطاها

**آسیب در عملگر:** این آسیب نمایانگر از دست دادن تمام و یا قسمتی از توان کنترلی در عملگرهاست. مثالی از از دست دادن کامل یک عملگر، چسبیدن<sup>۱</sup> عملگر است که در این حالت علی‌رغم تغییر در فرمان، در خروجی عملگر تغییری دیده نمی‌شود، به عنوان مثال در اثر شکستن، بریدن یا سوختن سیم‌بندی، اتصال کوتاه و یا وجود جسم خارجی در عملگر، بروز این آسیب در سیستم قابل پیشبینی خواهد بود.

در صورت بروز آسیب جزئی<sup>۲</sup> در عملگر، تنها قسمتی از توان عملگر قابل استفاده خواهد بود. نشتی هوا یا روغن، افزایش مقاومت داخلی و یا افت ولتاژ تغذیه می‌تواند باعث بروز آسیب جزئی در عملگر گردد.

لازم به ذکر است که استفاده از افزونگی<sup>۳</sup> در عملگرها برای افزایش توانایی سیستم در جبران‌سازی آسیب در همه‌جا امکان‌پذیر نمی‌باشد، چرا که این روش منجر به افزایش هزینه، وزن و ابعاد سیستم خواهد شد که این مسائل در سیستم‌های هوافضا، نمود بیشتری دارد.

**آسیب در حسگرها:** این آسیب بیانگر دریافت اطلاعات نادرست از حسگرهاست. این نوع آسیب را نیز می‌توان به دو دسته جزئی و کلی تقسیم نمود. در آسیب کلی، اطلاعات دریافت شده از حسگر، ارتباطی با مقدار واقعی پارامتر فیزیکی اندازه‌گیری شده ندارد. عواملی مانند قطع سیم و یا از بین رفتن سطح تماس می‌توانند باعث بروز چنین آسیبی گردند. در حالتی که آسیب جزئی در حسگر رخ داده باشد، مقدار خوانده شده با مقدار متغیر فیزیکی مرتبط بوده بطوری

<sup>۱</sup> Stuck<sup>۲</sup> Partial<sup>۳</sup> Redundancy

که هنوز می‌توان اطلاعات مفیدی از مقدار اندازه‌گیری شده بدست آورد. عواملی مانند کاهش بهره<sup>۱</sup>، وجود یک مقدار ثابت انحراف<sup>۲</sup> و یا افزایش میزان نویز باعث بروز چنین آسیبی در سیستم می‌گردند.

بدلیل کوچکتر بودن ابعاد حسگرها، بمنظور بالا بردن قابلیت اطمینان و بالاتر بردن توان سیستم در مواجهه با آسیب، معمولا در یک سیستم از چند حسگر برای اندازه‌گیری یک پارامتر استفاده می‌گردد. به عنوان مثال استفاده از سه حسگر برای اندازه‌گیری یک پارامتر و انجام رای گیری دو از سه، قابلیت اطمینان مناسبی برای دسترسی به اطلاعات یک پارامتر بدست می‌آید. همچنین با استفاده از این روش می‌توان از آسیب دیده بودن حداکثر یک حسگر مطلع شد.

**آسیب در اجزاء سیستم:** این نوع آسیب در اجزای سیستم تحت کنترل رخ می‌دهد. همچنین تمامی آسیب‌هایی را که نتوان در دسته بندی آسیب در حسگر و یا آسیب در عملگر قرار داد، در این حوزه دسته بندی می‌شوند. این نوع آسیب، نمایانگر تغییر در پارامترهای فیزیکی سیستم مانند جرم، ضریب آیرودینامیک، ثابت میرایی و... می‌باشد که اغلب بدلیل آسیبی که در ساختار فیزیکی سیستم به وجود آمده، ظاهر می‌گردد. نتیجه این نوع آسیب نیز به صورت تغییر در رفتار دینامیکی سیستم تحت کنترل نمود پیدا می‌کند. بدلیل تنوع بالای این نوع آسیب، این دسته از آسیب‌ها مجموعه بسیار گسترده‌ای از شرایط پیش‌بینی نشده را پوشش می‌دهد. لذا مواجهه با این دسته از آسیب‌ها نسبت به دو دسته دیگر با مشکلات بسیار بیشتری روبروست.

علاوه بر دسته‌بندی فوق، بر حسب نحوه مدل‌سازی آسیب، می‌توان آسیب‌ها را به دو دسته ضرب‌شونده<sup>۳</sup> و جمع‌شونده<sup>۴</sup> تقسیم‌بندی نمود. عموماً از آسیب جمع‌شونده برای بیان آسیب موجود در اجزا سیستم و از آسیب ضرب‌شونده برای بیان آسیب موجود در حسگرها و یا عملگرها استفاده می‌شود.



شکل ۲: آسیب ضرب‌شونده (راست) و آسیب جمع‌شونده (چپ)

همچنین می‌توان با توجه به خصوصیات زمانی وقوع یک آسیب، دسته‌بندی شامل ناگهانی<sup>۵</sup>، ابتدایی<sup>۶</sup> و متناوب<sup>۱</sup> نیز پیشنهاد شده است. آسیب ناگهانی معمولاً بلافاصله بعد از آسیب سخت افزاری به وقوع می‌پیوندد. این نوع

<sup>۱</sup> Gain

<sup>۲</sup> Offset

<sup>۳</sup> Multiplicative

<sup>۴</sup> Additive

<sup>۵</sup> Abrupt

<sup>۶</sup> Incipient



آسیب معمولاً شدید بوده و تاثیر سریع و زیادی بر عملکرد و حتی پایداری سیستم دارند. آسیب ابتدایی معرف تغییرات آرام یک پارامتر در طول زمان است که عموماً به دلیل فرسودگی سیستم ظاهر می‌شود. شناسایی این آسیب به دلیل تغییرات کند آن دشوار است. این نوع آسیب معمولاً با شدت کمتری عملکرد سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهد. ظهور و ناپدید شدن آسیب‌های متناوب در یک سیستم عموماً به تناوب رخ می‌دهد. مثالی از این نوع آسیب، وجود یک سیم در سیستم است که به خوبی به محل اتصال خود متصل نگردیده است.



شکل ۳: آسیب متناوب (راست)، آسیب ابتدایی (وسط) و آسیب ناگهانی (چپ)

## ۲-۱ مدل‌سازی آسیب

همانگونه که در قسمت قبل ذکر شد، با توجه به نحوه نمایش آسیب، می‌توان آسیب‌ها را به دو دسته کلی ضرب شونده و جمع شونده تقسیم‌بندی نمود. در این قسمت مدل‌سازی ریاضی آسیب بررسی خواهد شد. همچنین با توجه به عمومیت فضای حالت، از این نوع نمایش برای مدل‌سازی سیستم استفاده خواهد شد.

ارتباط میان ورودی سیستم  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$  به خروجی اندازه‌گیری شده سیستم  $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^p$  بر حسب حالات سیستم  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$  به صورت زیر بیان می‌شود:

$$S_{normal} : \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \end{cases} \quad (1)$$

### ۱-۲-۱ آسیب ضرب شونده

از آسیب ضرب شونده، عموماً برای نمایش آسیب موجود در حسگر و عملگر استفاده می‌شود. آسیب عملگر نمایانگر عملکرد غیر صحیح عملگرهای سیستم است. نشتی روغن هیدرولیک، قطع شدن سیم‌ها، چسبیدن سطوح کنترلی و... را می‌توان نمونه‌هایی از این نوع آسیب نام برد. چنین نوع آسیبی به عنوان تغییر ناگهانی ورودی از مقدار نامی

به  $\mathbf{u}$

$$\mathbf{u}^f = \mathbf{u} + (\mathbf{I} - \Sigma_A)(\bar{\mathbf{u}} - \mathbf{u}) \quad (2)$$

مدل می‌شود. در این عبارت  $\bar{\mathbf{u}} \in \mathbb{R}^m$  برداری است که معرف آسیب چسبیدن سطوح کنترلی بوده و به همین دلیل امکان تغییر در مقدار آن توسط کنترل‌کننده وجود ندارد.  $\sigma_i^a \in \mathbb{R}^+$ ،  $\Sigma_A = \text{diag} \{[\sigma_1^a, \sigma_2^a, \dots, \sigma_m^a]\}$  معرف

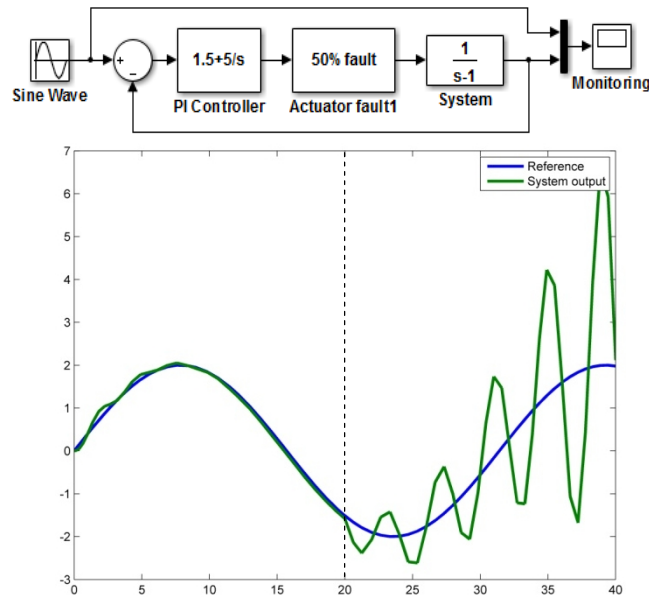
آسیب در عملگر بوده که در آن  $\sigma_i^a = 1$  نشان‌دهنده عدم وجود آسیب و  $\sigma_i^a = 0$  نمایانگر آسیب کلی (از کار افتادن) عملگر است. در عبارت فوق با فرض  $\bar{u} = 0$ ، رابطه فوق به  $u^f = \Sigma_A u$  تبدیل شده که بیانگر ساده‌ترین مدل آسیب ضرب‌شونده در عملگر می‌باشد. با جایگذاری (2) در (1) رابطه زیر بدست می‌آید:

$$S_{\text{faulty,multiplicative,actuator}} : \begin{cases} \dot{x} = Ax + B\Sigma_A u + B(I - \Sigma_A)\bar{u} \\ y = Cx + D\Sigma_A u + D(I - \Sigma_A)\bar{u} \end{cases} \quad (3)$$

مدل فوق به عنوان مدل آسیب ضرب‌شونده نام‌گذاری شده و در مقالات متعددی [۳]، [۴] و [۵] از این مدل استفاده شده است.

باید به این نکته دقت کرد که اگر چه آسیب ضرب‌شونده در عملگر به خودی خود تغییری در دینامیک سیستم تحت کنترل ایجاد نمی‌کند، اما می‌تواند تاثیر بسیار زیادی بر دینامیک سیستم حلقه بسته داشته باشد. این نوع آسیب، حتی می‌تواند کنترل‌پذیری سیستم را نیز تحت الشعاع قرار دهد. به عنوان مثال برای سیستمی با تابع انتقال  $G(s) = \frac{1}{s-1}$  که با کنترل‌کننده تناسبی - انتگرالی  $C(s) = 1.5 + \frac{5}{s}$  کنترل می‌شود نتایج شبیه‌سازی سیستم حلقه بسته با آسیب ضرب‌شونده در عملگر و شدت ۵۰ درصد ( $\bar{u} = 0, \Sigma_A = 0.5$ )، و با ورودی سینوسی، در شکل ۴ نشان داده شده است [۲]. همانگونه که از این شکل پیداست، این سیستم توانایی ردیابی ورودی سینوسی را در حالت بدون آسیب (۲۰ ثانیه اول) داراست. اما پس از تزریق آسیب به عملگر سیستم در ثانیه ۲۰، سیستم حلقه بسته ناپایدار گردیده است.

این مثال به خوبی گویای این مطلب است که حتی یک آسیب بسیار ساده نیز می‌تواند عملکرد سیستم را تحت تاثیر قرار داده و حتی منجر به ناپایداری آن گردد.



شکل ۴: ناپایداری سیستم پس از وقوع آسیب در عملگر، خطچین: لحظه وقوع آسیب

به همین ترتیب، آسیب در حسگرها نیز نمایانگر دریافت نادرست اطلاعات از حسگرهاست. لذا در صورت بروز چنین آسیبی، خروجی واقعی سیستم با خروجی (متغیر) اندازه‌گیری شده تفاوت خواهد داشت. آسیب ضرب‌شونده در حسگر را نیز می‌توان به صورت زیر مدل نمود:

$$\mathbf{y}^f = \mathbf{y} + (\mathbf{I} - \Sigma_s)(\bar{\mathbf{y}} - \mathbf{y}) \quad (4)$$

که در آن بردار انحراف<sup>۱</sup> حسگر بوده که معرف انحراف ثابت خروجی حسگر از مقدار واقعی است. به عنوان مثال این پارامتر در حسگر ژایروسکوپ بصورت میانگین خروجی، زمانی که حسگر ثابت می‌باشد، تعریف می‌گردد. همچنین  $\sigma_i^s \in \mathbb{R}$ ،  $\Sigma_s = \text{diag}\{\sigma_1^s, \dots, \sigma_p^s\}$  تعریف می‌گردد. در این حالت  $\sigma_i^s = 0$  معرف آسیب کامل و  $\sigma_i^s = 1$  به معنی سالم بودن حسگر مورد استفاده است. با جایگذاری رابطه (4) در رابطه (1) داریم:

$$S_{\text{faulty, multiplicative, sensor}} : \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \Sigma_s \mathbf{C}\mathbf{x} + \Sigma_s \mathbf{D}\mathbf{u} + (\mathbf{I} - \Sigma_s)\bar{\mathbf{y}} \end{cases} \quad (5)$$

با ترکیب آسیب ضرب‌شونده در حسگر و عملگر، می‌توان به معادلات حالت زیر رسید:

$$S_{\text{faulty, multiplicative, sensor and actuator}} : \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\Sigma_A \mathbf{u} + \mathbf{B}(\mathbf{I} - \Sigma_A)\bar{\mathbf{u}} \\ \mathbf{y} = \Sigma_s \mathbf{C}\mathbf{x} + \Sigma_s \mathbf{D}\Sigma_A \mathbf{u} + \Sigma_s \mathbf{D}(\mathbf{I} - \Sigma_A)\bar{\mathbf{u}} + (\mathbf{I} - \Sigma_s)\bar{\mathbf{y}} \end{cases} \quad (6)$$

آسیب ضرب‌شونده، روش مناسبی برای بیان آسیب در حسگرها و عملگرها می‌باشد اما این آسیب در نمایش آسیب موجود در اجزای سیستم کارایی ندارد. همچنین این نوع نمایش آسیب عموماً در مورد سیستم‌هایی به کار می‌رود که از مدل فضای حالت آن برای طراحی کنترل‌کننده استفاده می‌شود.

همچنین در این پژوهش همواره فرض بر آن است که سیستم مورد مطالعه حتی پس از وقوع آسیب در حسگرها یا عملگرهای آن پایدارپذیر باقی بماند. چرا که در غیر این صورت، از کنترل‌کننده تحمل‌پذیر خطا نمی‌توان انتظار برآوردن عملکرد مناسب در کنار حفظ پایداری سیستم را داشت.

### ۱-۲-۲ آسیب جمع‌شونده

آسیب جمع‌شونده، عمومیت بیشتری از آسیب ضرب‌شونده دارد. مدل فضای حالت سیستمی که دارای آسیب جمع‌شونده در حسگرها و عملگرهای خود است، بصورت رابطه زیر می‌باشد:

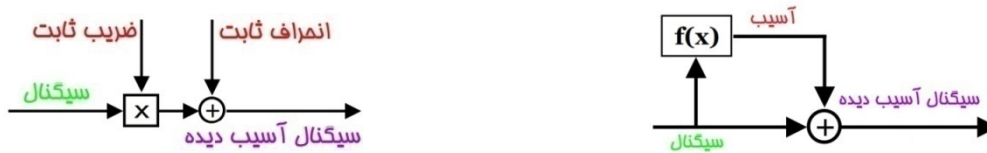
$$S_{\text{faulty, additive, sensor and actuator}} : \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{F}\mathbf{f} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} + \mathbf{E}\mathbf{f} \end{cases} \quad (7)$$

در عبارت فوق  $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^{n_f}$  سیگنالی است که معرف خطاست. این فرم نمایش می‌تواند برای مدل‌سازی دسته گسترده‌ای از آسیب‌ها شامل آسیب در حسگرها، آسیب در عملگرها و نیز آسیب در اجزای سیستم به کار رود. با این

وجود، استفاده از مدل (7)، باعث وابستگی سیگنال  $f$  به یکی از سیگنال‌های  $u, y$  و یا  $x$  می‌گردد. به عنوان مثال، اگر هدف مدل‌سازی آسیب کامل در عملگرها باشد ( $\Sigma_A = 0, \bar{u} = 0$ ) در رابطه (2)، در این صورت برای یکسان بودن رابطه (7) با رابطه (3)، باید  $f$  به گونه‌ای انتخاب شود که رابطه زیر برقرار باشد.

$$\begin{bmatrix} F \\ E \end{bmatrix} f = - \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix} u \quad (8)$$

در این صورت،  $f$  تابعی از  $u$  خواهد بود. واضح است که سیگنال آسیبی که وابسته به سیگنال کنترل باشد، به هیچ عنوان مطلوب طراح کنترل‌کننده برای سیستم نخواهد بود. از طرف دیگر، با استفاده از نمایش آسیب ضرب‌شونده، سیگنال آسیب  $f$ ، مستقل از  $u$  خواهد بود.



شکل 5: تفاوت نمایش آسیب جمع‌شونده (راست) با آسیب ضرب‌شونده (چپ) در نمایش آسیب کلی در عملگر

مشکل دیگری که نمایش آسیب جمع‌شونده با آن روبروست، زمانی بروز پیدا می‌کند که هر دو آسیب حسگر و عملگر در سیستم وجود داشته باشد. در این حالت در رابطه ورودی خروجی سیستم، تمایز این دو آسیب از یکدیگر بسیار مشکل شده چراکه وجود هر یک از این دو باعث تغییر در مقدار خروجی می‌گردد. لذا اتخاذ تصمیم مناسب برای مواجهه با آسیب، ناممکن خواهد بود. برای روشن تر شدن موضوع، سیستم زیر را در نظر گرفته:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + f^a \\ y &= Cx + Du + f^s \end{aligned} \quad (9)$$

با نوشتن تابع انتقال این سیستم داریم:

$$y(s) = (C(sI - A)^{-1}B + D)u + C(sI - A)^{-1}f^a + f^s \quad (10)$$

در این رابطه مشخص است که تاثیر آسیب عملگر بر خروجی علاوه بر سیگنال  $f^a$  توسط  $f^s$  نیز قابل مدل‌سازی است. اما مزیت این نوع نمایش، همانگونه که قبلا نیز ذکر شد، در این نکته است که این نوع نمایش، قابلیت پوشش دسته عمومی‌تری از آسیب‌ها را نسبت به نمایش آسیب ضرب‌شونده داراست. علاوه بر آن این نوع نمایش برای سیستم‌های تشخیص و جداسازی آسیب (FDD)<sup>1</sup> نیز مناسب‌تر است؛ چرا که در این نوع نمایش، آسیب بر خلاف نمایش آسیب ضرب‌شونده که تغییر در ماتریس‌های فضای حالت را در بر دارد، تنها با یک سیگنال مدل می‌گردد. به همین دلیل بسیاری از روش‌های FDD، به شناسایی آسیب جمع‌شونده اختصاص پیدا کرده‌اند [۶-۸].