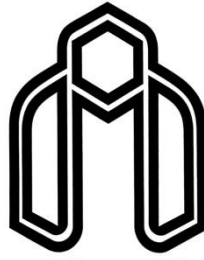


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده برق و رباتیک

گروه کنترل

# کنترل فازی تطبیقی ارتفاع یک زیردریایی

دانشجو :

مریم حسنی

استاد راهنما :

دکتر علی اکبرزاده کلات

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

زمستان ۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده برق و رباتیک

گروه کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم مریم حسنی

تحت عنوان:

کنترل فازی تطبیقی ارتفاع یک زیردریایی

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد  
مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نمایندة تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به آنان که دوستشان دارم

پدر

مادر

خواهر و برادرم

با تشکر از استاد گرانقدر:

جناب آقای دکتر اکبرزاده

که در انجام این مهم، مدیون راهنمایی ایشانم

## تعهد نامه

اینجانب **مریم حسنی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کنترل فازی تطبیقی ارتفاع یک زیردریایی تحت راهنمایی جناب آقای دکتر اکبرزاده متعهد می شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در 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 صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این 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 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 صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده فارسی

در این پایان نامه به ارائه دو روش پیشنهادی بر اساس کنترل فازی تطبیقی غیرمستقیم بر روی ربات-های زیرآبی می‌پردازیم. در این روش‌ها، حداقل زمان اجرا، بهبود قابلیت تطبیق پارامترها و همچنین حداقل خطا نسبت به مسیر و هدف، مطلوب است. در روش اول، با توجه به تاثیرات نامطلوب ناشی از حضور اختلالات خارجی، از کنترل فازی تطبیقی استفاده نموده و به اصلاح قوانین تطبیق پرداخته شده است. با بررسی این روش بر روی سیستم عمق یک ربات زیرآبی نشان داده می‌شود که علاوه بر بهبود خطای ردیابی، سرعت همگرایی پارامترها نیز افزایش یافته است. همچنین با ارائه‌ی یک تابع لیاپانوف نوین جهت استخراج قوانین تطبیق پیشنهادی، پایداری سیستم نشان داده شده است. در روش دوم، ابتدا قانون کنترلی جهت تضمین عملکرد ردیابی و همگرایی سریعتر پارامتری در حضور ساختارهای نامشخص و اختلالات خارجی تعریف شده است. سپس یک مدل شناسایی سری-موازی برای بدست آوردن خطای پیش‌بین معرفی شده است. در این روش، پارامترها توسط قانون تطبیق، مرکب از خطای ردیابی و خطای پیش‌بین تنظیم شده‌اند که این طرح سبب کاهش خطای ردیابی و بهبود همگرایی پارامترها گردیده است. پایداری کلی سیستم حلقه بسته با آنالیز لیاپانوف اثبات شده است. سیستم کنترل تضمین می‌کند که تمام سیگنال‌های درگیر کراندار می‌باشند. همچنین در این روش به اثبات محدوده‌های ریاضی بر روی خطای ردیابی پرداخته و با استفاده از این محدودیت‌ها نشان داده می‌شود که چطور پارامترهای طراحی شده‌ی کنترل کننده می‌توانند سبب عملکرد مطلوب گردند. نتایج شبیه سازی بر روی سیستم عمق یک ربات زیرآبی با در نظر گرفتن حفظ موقعیت آن در صفحه XY عملکرد مناسب روش را نشان داده است.

**واژگان کلیدی:** کنترل فازی تطبیقی، ربات زیر آبی، تطبیق مرکب، پایداری، تابع لیاپانوف

## فهرست مطالب

### فصل ۱: مقدمه

۱-۱	مقدمه	۲
۲-۱	معرفی شناورهای زیرآبی	۴
۳-۱	شناورهای بدون سرنشین (ربات‌های زیرآبی)	۴
۴-۱	ربات زیرآبی کنترل از راه دور	۵
۱-۴-۱	تعریف ربات زیرآبی کنترل از راه دور	۶
۲-۴-۱	مراحل تاریخی توسعه ربات زیرآبی کنترل از راه دور	۷
۳-۴-۱	طبقه‌بندی ربات‌های زیرآبی کنترل از راه دور	۱۰
۴-۴-۱	مزایا و معایب ربات‌های زیرآبی کنترل از راه دور	۱۳
۵-۱	وسایل زیرآبی هوشمند	۱۵
۱-۵-۱	تعریف ربات زیرآبی هوشمند	۱۵
۲-۵-۱	مراحل تاریخی توسعه ربات‌های زیرآبی هوشمند	۱۶
۳-۵-۱	کاربردهای ربات زیرآبی هوشمند	۱۷
۱-۳-۵-۱	کاربردها در صنایع فراساحلی	۱۷
۲-۳-۵-۱	کاربردهای نظامی	۱۷
۳-۳-۵-۱	کاربردهای تحقیقاتی	۱۸
۴-۵-۱	منابع تامین قدرت در ربات‌های زیرآبی هوشمند	۱۹
۵-۵-۱	محدودیت‌ها و معایب ربات زیرآبی هوشمند	۱۹
۶-۵-۱	مزایای ربات زیرآبی هوشمند	۲۰
۶-۱	افق‌های آینده	۲۲
۷-۱	تعریف مساله و اهداف تحقیق	۲۳
۱-۷-۱	دینامیک و مدل‌سازی	۲۴
۲-۷-۱	طراحی سیستم کنترلی	۲۵
۸-۱	مروری بر تحقیقات پیشین	۲۶
۱-۸-۱	مدلسازی	۲۶
۲-۸-۱	فعالیت‌های کنترلی انجام شده	۲۷
۹-۱	مروری بر ساختار پایان‌نامه	۳۳



## فصل ۲: دینامیک سیستم ربات‌های زیرآبی

۳۶	۱-۲ مقدمه.....
۳۶	۲-۲ ساختار سیستم مورد استفاده.....
۳۸	۳-۲ معادلات دینامیکی وسیله.....
۴۰	۴-۲ نیروهای بازیابی.....
۴۰	۵-۲ نیروها و ماتریس‌های هیدرودینامیکی.....
۴۲	۱-۵-۲ میرایی درجه دو.....
۴۳	۲-۵-۲ اینرسی افزوده.....
۴۳	۶-۲ نیروهای پیشران.....
۴۵	۷-۲ سیستم موقعیت دینامیکی.....
۴۷	۸-۲ نمایش فضای حالت در روش غیرمستقیم.....
۴۷	۹-۲ پارامترهای مدل AUV.....
۴۸	۱۰-۲ مقایسه روش مستقیم و غیرمستقیم در غوص ربات.....

## فصل ۳: کنترل فازی تطبیقی ترکیبی مقاوم در حضور اغتشاشات خارجی

۵۰	۱-۳ مقدمه.....
۵۲	۲-۳ سیستم‌های منطق فازی.....
۵۳	۳-۳ نمایش سیستم.....
۵۴	۴-۳ هدف کنترل.....
۵۵	۵-۳ کنترل کننده فازی تطبیقی.....
۵۸	۶-۳ قوانین تطبیق.....
۶۱	۷-۳ تضمین پایداری.....
۶۳	۸-۳ آنالیز عملکرد.....
۶۳	۹-۳ بررسی طرح پیشنهادی بر روی سیستم کنترل عمق AUV.....

## فصل ۴: کنترل فازی تطبیقی ترکیبی با تخمین زن خطای پیش‌بین

۷۲	۱-۴ مقدمه.....
۷۳	۲-۴ سیستم.....
۷۳	۳-۴ هدف کنترل.....
۷۴	۴-۴ طراحی قانون کنترل.....

۷۶	۵-۴ ردیابی و مدل‌سازی.....
۷۷	۶-۴ قوانین تطبیق.....
۷۹	۷-۴ آنالیز پایداری حلقه کنترل.....
۸۲	۸-۴ آنالیز عملکرد.....
۸۶	۹-۴ بررسی طرح پیشنهادی بر روی سیستم یک ROV.....

## فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۹۸	۱-۵ نتیجه‌گیری.....
۹۸	۲-۵ پیشنهادات.....
۱۰۰	مراجع.....

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: دسته‌بندی شناورهای زیرآبی [۲]..... ۴
- شکل ۲-۱: نمایی از یک زیردریایی [۳]..... ۵
- شکل ۳-۱: نمایی از یک ROV [۵]..... ۱۱
- شکل ۴-۱: اجزاء سیستم ROV [۵]..... ۱۳
- شکل ۵-۱: The Whitehead PUV/Torpedo [۵]..... ۱۴
- شکل ۶-۱: The Sims-Edison Torpedo [۵]..... ۱۴
- شکل ۷-۱: CURV i [۵]..... ۱۵
- شکل ۸-۱: نمایی از یک AUV [۶]..... ۲۱
- شکل ۹-۱: بلوک دیاگرام طرح انجام شده [۳۳]..... ۳۷
- شکل ۱-۲: نمایش ROV با دو سیستم مختصات [۲۳]..... ۴۱
- شکل ۲-۲: نمایش ربات مورد استفاده در زیر آب [۲۳]..... ۴۲
- شکل ۱-۳: طرح کلی سیستم کنترل فازی تطبیقی مقاوم پیشنهادی..... ۶۵
- شکل ۲-۳: توابع تعلق مربوط به ورودی  $f$ ..... ۶۹
- شکل ۳-۳: ردیابی عمق در روش پیشنهادی..... ۷۰
- شکل ۴-۳: ورودی کنترل..... ۷۱
- شکل ۵-۳: انطباق بردار  $\hat{\theta}_f$  در روش پیشنهادی..... ۷۱
- شکل ۶-۳: انطباق بردار  $\hat{\theta}_g$  در روش پیشنهادی..... ۷۲
- شکل ۷-۳: ردیابی عمق در روش کلاسیک..... ۷۳
- شکل ۸-۳: انطباق بردار  $\hat{\theta}_f$  در روش کلاسیک..... ۷۳
- شکل ۹-۳: انطباق بردار  $\hat{\theta}_g$  در روش کلاسیک..... ۷۴
- شکل ۱-۴: شناسایی مدل..... ۸۳
- شکل ۲-۴: بلوک دیاگرام طرح پیشنهادی..... ۸۴
- شکل ۳-۴: توابع تعلق ورودی سیستم فازی..... ۹۰
- شکل ۴-۴: تغییر حالت  $x$ ..... ۹۲
- شکل ۵-۴: نیروی پیشران  $\bar{T}_x$ ..... ۹۲
- شکل ۶-۴: همگرایی بردار پارامتری  $\hat{\theta}_f$  در راستای محور  $x$ ..... ۹۲
- شکل ۷-۴: همگرایی بردار پارامتری  $\hat{\theta}_g$  در راستای محور  $x$ ..... ۹۲
- شکل ۸-۴: تغییر حالت  $y$ ..... ۹۳
- شکل ۹-۴: نیروی پیشران  $\bar{T}_y$ ..... ۹۳
- شکل ۱۰-۴: همگرایی بردار پارامتری  $\hat{\theta}_f$  در راستای محور  $y$ ..... ۹۳

- شکل ۴-۱۱: همگرایی بردار پارامتری  $\hat{\theta}_g$  در راستای محور  $\psi$ ..... ۹۳
- شکل ۴-۱۲: تغییر ارتفاع  $z$ ..... ۹۴
- شکل ۴-۱۳: سیگنال کنترل  $\bar{t}_z$ ..... ۹۴
- شکل ۴-۱۴: همگرایی بردار پارامتری  $\hat{\theta}_f$  در راستای محور  $z$ ..... ۹۴
- شکل ۴-۱۵: همگرایی بردار پارامتری  $\hat{\theta}_g$  در راستای محور  $z$ ..... ۹۴
- شکل ۴-۱۶: تغییر حالت  $\psi$ ..... ۹۵
- شکل ۴-۱۷: نیروی پیشران  $\bar{t}_\psi$ ..... ۹۵
- شکل ۴-۱۸: همگرایی بردار پارامتری  $\hat{\theta}_f$  در راستای محور  $\psi$ ..... ۹۵
- شکل ۴-۱۹: همگرایی بردار پارامتری  $\hat{\theta}_g$  در راستای محور  $\psi$ ..... ۹۵
- شکل ۴-۲۰: تغییر حالت  $x$  در روش فازی تطبیقی کلاسیک..... ۹۶
- شکل ۴-۲۱: نیروی پیشران  $\bar{t}_x$ ..... ۹۶
- شکل ۴-۲۲: همگرایی  $\hat{\theta}_f$  در راستای محور  $x$ ..... ۹۶
- شکل ۴-۲۳: همگرایی  $\hat{\theta}_g$  در راستای محور  $x$ ..... ۹۶
- شکل ۴-۲۴: تغییر حالت  $\psi$  در روش فازی تطبیقی کلاسیک..... ۹۷
- شکل ۴-۲۵: نیروی پیشران  $\bar{t}_y$ ..... ۹۷
- شکل ۴-۲۶: همگرایی  $\hat{\theta}_f$  در راستای محور  $\psi$ ..... ۹۷
- شکل ۴-۲۷: همگرایی  $\hat{\theta}_g$  در راستای محور  $\psi$ ..... ۹۷
- شکل ۴-۲۸: تغییر ارتفاع  $z$  در روش فازی تطبیقی کلاسیک..... ۹۸
- شکل ۴-۲۹: نیروی پیشران  $\bar{t}_z$ ..... ۹۸
- شکل ۴-۳۰: همگرایی  $\hat{\theta}_f$  در راستای محور  $z$ ..... ۹۸
- شکل ۴-۳۱: همگرایی  $\hat{\theta}_g$  در راستای محور  $z$ ..... ۹۸
- شکل ۴-۳۲: تغییر حالت  $\psi$  در روش فازی تطبیقی کلاسیک..... ۹۹
- شکل ۴-۳۳: نیروی پیشران  $\bar{t}_\psi$ ..... ۹۹
- شکل ۴-۳۴: همگرایی  $\hat{\theta}_f$  در راستای محور  $\psi$ ..... ۹۹
- شکل ۴-۳۵: همگرایی  $\hat{\theta}_g$  در راستای محور  $\psi$ ..... ۹۹

## فهرست جداول

جدول ۱-۲: پارامترهای ربات..... ۵۲

جدول ۲-۲: مقایسه روش مستقیم و غیرمستقیم در غوص ربات..... ۵۳

---

# فصل ١ :

## مقدمه

---

## ۱-۱ مقدمه

پوشش بیش از ۷۰ درصد سطح زمین توسط آب و وجود حجم وسیعی از منابع معدنی و حیاتی در اقیانوس‌ها، بیانگر نقش مهم منابع و صنایع دریایی در زندگی انسان‌ها می‌باشد. به همین دلیل مطالعه و بررسی بسیاری از سیستم‌های کنترلی مرتبط با دریا، همواره مورد توجه محققان قرار گرفته است که در واقع از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین سیستم‌های کنترل، می‌باشند. از جمله این سیستم‌ها می‌توان زیردریایی‌ها<sup>۱</sup>، ربات‌های زیرآبی<sup>۲</sup>، اژدرها<sup>۳</sup>، موشک‌های زیرآبی<sup>۴</sup>، کشتی‌ها<sup>۵</sup>، ناوهای دریایی<sup>۶</sup> و ... را نام برد. در این میان، وسایل زیر آبی از لحاظ حرکت در زیر آب به صورت مخفی و بدون سر و صدا و همچنین غوص کردن در اعماق دریا، نسبت به شناورهای سطحی دارای مزیت می‌باشند. تاریخچه این وسایل به ۹ قرن پیش از میلاد مسیح باز می‌گردد که از پوست بادکرده حیوانات به عنوان مخزن هوا برای رفتن به زیر آب استفاده می‌شد. این قدمت ساخت نشان از آرزوی دیرینه انسان‌ها برای آگاهی از دنیای عجیب زیر آب و تسخیر آن دارد [۱].

در سال‌های اخیر، استفاده از ابزارآلات مهندسی که قابلیت بکارگیری در اعماق آب را داشته و کاربری‌های متنوع در فضا و بستر دریا را ممکن می‌سازند، چنان توسعه و گسترش یافته که توانایی بشر را در بررسی، تحقیق و کار در اعماق دریا به شدت متحول نموده است. در بسیاری از صنایع مختلف و گوناگون، استفاده از تجهیزاتی که بتوان آن‌ها را بدون حضور مستقیم نیروی انسانی و از راه دور هدایت و کنترل نمود به جزء جدانشدنی کاربردهای تجاری و صنعتی بدل گشته است، بگونه‌ای که انجام بسیاری از پروژه‌های مهندسی و تحقیقاتی بدون آن‌ها امکان پذیر نیست. این تجهیزات شامل ربات‌ها و بازوهای مکانیکی است که قابلیت انجام عملیات از پیش برنامه ریزی شده و

---

<sup>1</sup> Submarines

<sup>2</sup> Underwater Robots

<sup>3</sup> Torpedoes

<sup>4</sup> Underwater rockets

<sup>5</sup> Ships

<sup>6</sup> Vessels

نیز اجرای فرامین لحظه‌ای کاربر را به نحوی مناسب و دقیق، دارند. در صنایع زیردریایی بنا به دلایلی که گفته شد، استفاده از فن‌آوری رباتیک در سال‌های اخیر توسعه و گسترش فراوانی یافته و در بسیاری از شاخه‌های علوم و مهندسی نقش مهم و اساسی پیدا نموده‌اند. بهبود و افزایش کارایی این تکنولوژی نیازمند افزایش مطالعات مهندسی بر روی تمامی انواع و اجزای سیستم‌ها و ربات‌های زیرسطحی، جهت انجام عملیات پیچیده‌تر و فرامین متنوع‌تر بوده و به این منظور حجم عظیمی از مطالعات و تحقیقات مهندسی در سراسر جهان در رشته‌ها و تخصص‌های متفاوت بر این موضوع متمرکز گشته‌اند [۱].

در کشور ما نیز به علت وجود منابع نفت و گاز در بستر دریا و توجه به این امر که در آینده این منابع در اعماق بیشتر خواهد بود و از طرف دیگر وجود مرزهای آبی گسترده و لزوم صیانت از این مرزها، توسعه و استفاده از این دانش و فناوری از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. در این بین وسایل زیر آبی بدون سرنشین به عنوان تجهیزات بسیار پیشرفته و وظیفه انجام یا پشتیبانی عملیات دریایی را بر عهده دارند. علت این موضوع را می‌توان در محدودیت‌هایی که روش‌های کنونی دارند جستجو کرد. نیاز به جستجو در عمق‌های بیشتر و مناطقی که امکان غواصی یا استفاده از زیردریایی‌های سرنشین دار در آن‌ها غیرممکن است از عمده این دلایل محسوب می‌شوند.

تمام آنچه که مطرح گردید در یک جمله بیان کننده لزوم دستیابی به این دانش و فناوری می‌باشد. بعلاوه شباهت اصطلاحات بکار رفته، نیروها و معادلات حرکت حاکم بر شناورهای زیرسطحی و همچنین ایجاد یک دسته بندی جامع پیرامون تمامی انواع شناورها و گردآوری تمایزها، مزایا، برتری و معایب هر گروه نسبت به گروه دیگر، در این‌جا ابتدا به بررسی کاربردها و ویژگی‌های این وسایل و زیرگروه‌های آن پرداخته و در ادامه ضمن بیان تحقیقات صورت گرفته در سال‌های پیشین، بستر لازم برای ورود به فصل‌های بعد، فراهم آمده است.



## ۲-۱ معرفی شناورهای زیر آبی

این شناورها با توجه به قابلیت‌ها و طریقه استفاده تقسیم‌بندی می‌شوند. یکی از راه‌های دسته‌بندی آن‌ها، قرار دادن در یکی از دو گروه سیستم‌های با سرنشین<sup>۱</sup> و بدون سرنشین<sup>۲</sup> می‌باشد که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. با توجه به این مطلب که موضوع این پایان نامه مربوط به شناورهای زیر آبی بدون سرنشین می‌باشد، در ادامه تمرکز بر روی این دسته خواهد بود [۲].



شکل (۱-۱): دسته بندی شناورهای زیر آبی [۲]

## ۳-۱ شناورهای بدون سرنشین (ربات‌های زیر آبی):<sup>۳</sup>

دسته دیگر شناورهای زیر آبی، کلاس بدون سرنشین می‌باشد. این دسته شناورها به دو زیر مجموعه سیستم‌های کابل‌دار و بدون کابل تقسیم می‌شوند که عمده‌ترین نمایندگان این دو بخش به ترتیب ربات‌های کنترل از راه دور<sup>۴</sup> و ربات‌های بدون سرنشین هوشمند<sup>۵</sup> می‌باشند. تاکنون بیش از ۱۰۰ مدل ROV و بیش از ۵۰ نوع AUV ساخته شده است [۴].

<sup>۱</sup> Manned

<sup>۲</sup> Unmanned

<sup>۳</sup> Underwater Robot Vehicle (URV)

<sup>۴</sup> Remotely Operated Vehicle (ROV)

<sup>۵</sup> Automatic Underwater vehicle (AUV)

## ۴-۱ ربات زیرآبی کنترل از راه دور:



شکل (۳-۱): نمایی از یک ROV [۵]

در این بخش به معرفی اجمالی دستگاه‌های کنترل از راه دور زیرآبی متصل با کابل و بدون سرنشین پرداخته‌ایم. از ویژگی‌های کلی ROVها می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود [۲]:

- بدون سرنشین
- ابعاد کوچک تر نسبت به زیردریایی
- کنترل به وسیله اپراتور از طریق کابل
- مصرف انرژی پایین
- هزینه ساخت و تولید پایین
- مهمترین کاربرد: انجام عملیات اجرایی در یک محدوده مشخص

مهمترین ویژگی این ربات‌ها استفاده از کابل می‌باشد.

## ۱-۴-۱ تعریف ربات زیر آبی کنترل از راه دور

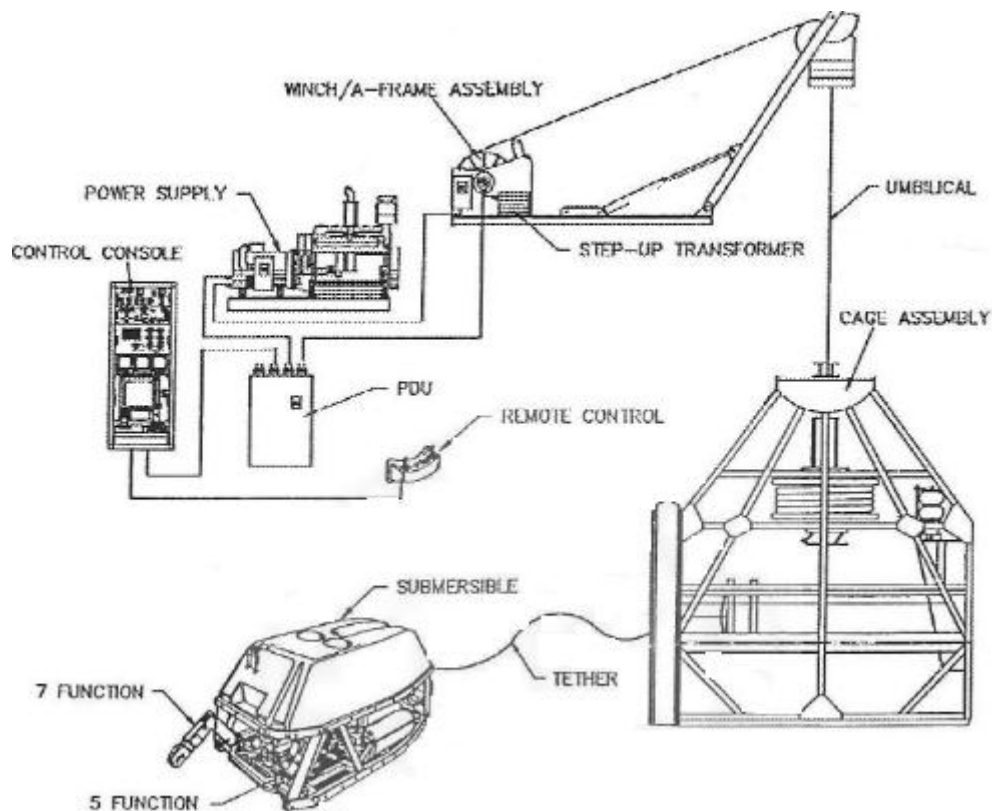
یک وسیله کنترل از راه دور زیر آبی، یک ربات زیر آبی می باشد که در محیط سرد و خطرناک زیر دریا و تحت فشار آب، ماموریت خواسته شده را انجام می دهد تا کاربر آن در محیطی راحت و مناسب قرار داشته باشد. این وسایل، ابزارهای بسیار مناسبی برای عملیات های زیر آبی می باشند [۵].

ROVها تنها شامل دستگاهی که به زیر آب می روند نیستند؛ بلکه سیستمی است متشکل از دستگاهی که توسط کابل به قسمت کنترل روی سطح آب متصل است، اتصال بند ناف<sup>۱</sup>، سیستم نقل و انتقال و به آب اندازی (شامل جرثقیل، وینچ، قرقه و سیستم محافظ)، وسایل کنترلی و تامین قدرت. در شکل (۱-۴) این اجزا نمایش داده شده است. هر جزء باید در پیشبرد طراحی مورد توجه قرار گیرد. اتصال فیزیکی بین یک ROV و شناور حمایت کننده را بعنوان اتصال بند ناف<sup>۱</sup> می شناسند. اتصال بند ناف معمولاً یک کابل پوشش دار یا بدون پوشش است که شامل یک کانال الکتریکی یا هیدرولیکی برای تامین قدرت وسیله و یک کانال ارتباط و تبادل اطلاعات برای انتقال سیگنال ها بین ROV و شناور حمایت کننده می باشد. بنابراین یک اتصال بند ناف، کنترل از راه دور ROV را در حین عملکرد فراهم می کند. بدین ترتیب که کابل، انرژی الکتریکی و سیگنال های کنترلی را به وسیله هدایت کرده و وضعیت آن، تصاویر تلویزیونی و اطلاعات و داده های بدست آمده توسط حسگرها را برای کاربر می آورد. در بسیاری از موارد، کابل دارای اعضای کششی مستحکم می باشد تا اگر لازم بود تحمل وزن وسیله را داشته باشد و بالاخره تولید کننده برق یا توان مصرفی بر حسب نیاز، برق "AC" یا "DC" در ولتاژها و فرکانس های مختلف می باشد [۵].

---

<sup>1</sup> Umbilical

ROVها بطور عادی با سیستم‌های رانش بر روی خودشان، سیستم‌های هدایت و ناوبری، سیستم‌های ارتباطی، سیستم‌های تصویری و نوری و تجهیزات مکانیکی برای رفتن و انجام دادن عملیات، بازوهای مکانیکی<sup>۱</sup>، ابزارهای جانبی و غیره در محل مورد نظر تجهیز می‌گردند [۵].



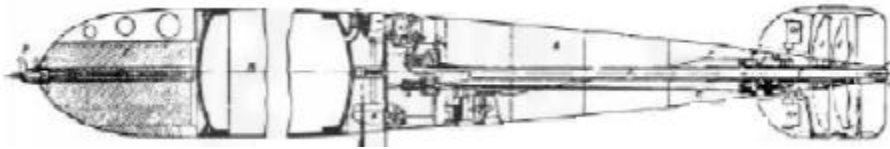
شکل (۴-۱): اجزاء سیستم ROV [۵]

## ۲-۴-۱ مراحل تاریخی توسعه ربات زیرآبی کنترل از راه دور

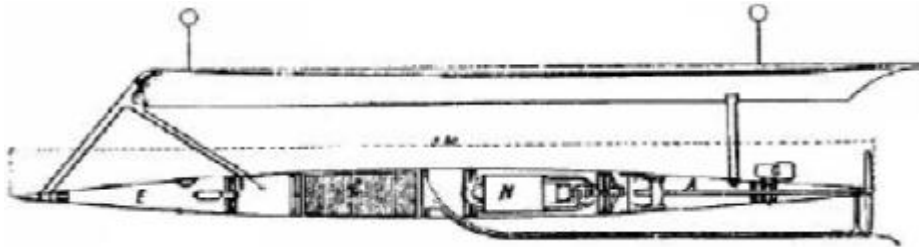
پدر این وسایل در واقع "PUV"<sup>۲</sup> یا یک نوع اژدر می‌باشد که در حقیقت در گروه و دسته بندی این وسایل قرار نمی‌گیرد. این اژدر در سال ۱۸۶۴ ساخته شد (شکل (۱-۵)). توسعه و پیشرفت این اژدر با ساخته شدن اولین اژدر کنترل شونده با سیم توسط سیمز و ادیسون در سال ۱۸۹۱ ادامه یافت (شکل (۱-۶)) [۵].

<sup>1</sup> Manipulators

<sup>2</sup> Progeramred Underwater Vehicle



شکل (۱-۵): The Whitehead PUV/Torpedo [۵]



شکل (۱-۶): The Sims-Edison Torpedo [۵]

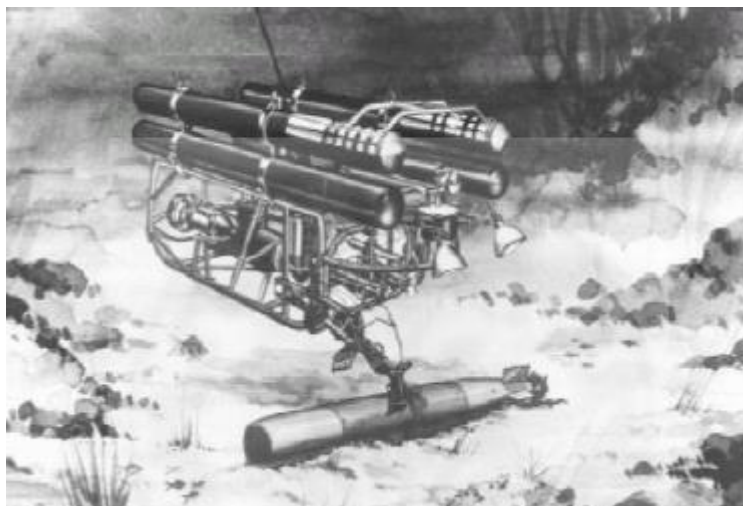
اما اینکه دقیقا چه کسی اولین "ROV" را ساخته است، مشخص نمی‌باشد؛ ولی گفته می‌شود که دیمیتری ربیکف<sup>۱</sup> اولین آنها را با نام پودل<sup>۲</sup> در سال ۱۹۵۳ ساخته است [۵].

همزمان با این شخص، نیروی دریایی آمریکا دنبال روش بهینه‌تری برای پیدا کردن اشیا و مهمات نظامی از بستر دریا بود تا اینکه موفق شد در سال ۱۹۹۶ یک بمب اتمی گم شده در یک حادثه دریایی در اسپانیا را توسط "CURV"<sup>۳</sup> (شکل ۱-۷) پیدا کند و با این کار وسایل کنترل از راه دور زیرآبی در کانون توجه قرار گرفتند [۵].

<sup>۱</sup> Dimitri Rebikoff

<sup>۲</sup> POODLE

<sup>۳</sup> Cable Controled Underwater Research Vehicle



شکل (۱-۷): CURV i [۵]

مرحله بعدی توسعه این تکنولوژی، توسط صنایع تجاری، که آینده آن را در صنایع نفت و گاز روشن می‌دیدند، شروع شد. استفاده از این وسایل در اکتشاف و استخراج نفت و گاز از اواسط دهه ۱۹۷۰ شروع شد.

با پیشرفت تکنولوژی و ساخته شدن وسایل کنترل از راه دور زیرآبی عمیق‌تر (تا ۳۰۰۰ متر)، قیمت آن‌ها هم رو به کاهش گذاشت؛ بطوری که ارگان‌های پلیس و موسسات علمی و تحقیقاتی هم توانستند از وسایل کوچک تا وسایل بزرگ را برای تحقیقات و بازرسی خریداری کنند.

بطور کلی توسعه و رشد این صنعت را میتوان به دوران‌های زیر تقسیم کرد [۵]:

- دوران کودکی : سال‌های ۱۹۵۳ تا ۱۹۶۵
- دوران نوجوانی: سال‌های ۱۹۶۶ تا ۱۹۷۴
- دوران جوانی: سال‌های ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۲
- دوران بلوغ: سال‌های ۱۹۸۳ تا ۱۹۸۹
- دوران کمال: از ۱۹۹۰ تا کنون

## ۳-۴-۱ طبقه بندی ربات‌های زیرآبی کنترل از راه دور:

این وسایل را از نظر تجاری به دو نوع عمده ساحلی و فرا ساحلی تقسیم می‌کنند؛ اما به طور کلی وسایل کنترل از راه دور زیرآبی را می‌توان به انواع زیر طبقه بندی کرد [۶۵]:

- ۱- وسایل کوچک<sup>۱</sup>
- . وسایل ارزان<sup>۲</sup>
- . وسایل با سیم راهنما<sup>۳</sup>
- . وسایل الکتریکی با توانایی بالا<sup>۴</sup>
- ۲- وسایل متوسط<sup>۵</sup>
- ۳- وسایل بزرگ گروه عملیاتی<sup>۶</sup>
- ۴- وسایل فوق عمیق<sup>۷</sup>
- ۵- سیستم‌های یدک شونده<sup>۸</sup>
- ۶- خزنده هایی که روی بستر دریا حرکت می‌کنند.<sup>۹</sup>

### ۱-۳-۴-۱ وسایل کوچک

وسایل کوچک همان وسایل ارزان قیمت می‌باشند که بیشتر آن‌ها دارای سیستم محرکه الکتریکی بوده و حداکثر تا عمق ۳۰۰ متر پایین می‌روند. اختصاراً به آنها "LCROV" نیز گفته می‌شود و بیشتر برای مقاصد مشاهده و بازرسی بکار می‌روند [۶۵].

---

<sup>1</sup> Small vehicles

<sup>2</sup> Low cost ROVs

<sup>3</sup> Wire-guided

<sup>4</sup> High capability electric ROVs

<sup>5</sup> Medium sized vehicles

<sup>6</sup> Large, work class vehicles

<sup>7</sup> Ultra-deep vehicles

<sup>8</sup> Towed vehicles

<sup>9</sup> Bottom crawlers and plows

#### ۱-۴-۳-۲ وسایل ارزان

این کلاس نسبت به دیگر انواع ارزان تر می‌باشد. ارزان قیمت‌ترین آن‌ها بیشتر برای کارهای تفریحی و گران‌ترین آن‌ها بیشتر برای مقاصد معاینه و بازرسی می‌باشند. از این وسایل بیشتر برای مقاصد مشاهده و بازرسی در علوم، تفریحات دریایی، جستجو و نجات، بازرسی سدها و بندرها، تمرین و کارآموزی، نیروگاه‌های اتمی و صنایع نفت و گاز ساحلی استفاده می‌شود [۶۵].

#### ۱-۴-۳-۳ وسایل با سیم راهنما

این کلاس اساساً در مواقعی استفاده می‌شوند که بتوان منبع تامین انرژی (باتری، سلول‌های الکتریکی و غیره) را روی خود وسیله حمل کرد، در اینصورت فقط یک کابل نوری بسیار نازک برای تبادل اطلاعات بین وسیله و کاربر روی سطح آب لازم خواهد بود که باعث کاهش شدید درگ وارده به سیستم می‌شود. این وسایل برای محدوده وسیعی از کارهای علمی و تجاری که زمان ماموریت کم و وسیله کوچک کافی می‌باشد، قابل استفاده می‌باشند [۶۵].

#### ۱-۴-۳-۴ وسایل الکتریکی با توانایی بالا

در این وسایل از سیستم محرکه الکتریکی یا تراسترهای "brushless DC" استفاده می‌شود و می‌توانند در عمق ۶۰۰۰ متری با توان مصرفی و هزینه پایین کار کنند اما انجام دادن کارهای سنگین با آن‌ها ممکن نمی‌باشد. این وسایل در صنایع نظامی و کارهای علمی و تحقیقاتی طرفداران بسیاری پیدا کرده‌اند چرا که از سکوت و آرامش بالایی در حین کارکردن برخوردارند و نیز ماموریت‌هایی که در کارهای نظامی و یا علمی انجام می‌شوند به پیچیدگی ماموریت‌های محوله در صنایع نفت و گاز نیستند [۶۵].

#### ۱-۴-۳-۵ وسایل متوسط

این وسایل دارای رانش الکترو-هیدرولیکی با توان مصرفی بین ۲۰ تا ۱۰۰ اسب بخار می‌باشند. جرم آنها بین ۱۰۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلوگرم و بویانسی مثبتی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم دارند. اغلب آن‌ها



دارای یک عدد بازوی مکانیکی می‌باشند ولی اندازه‌های بزرگتر آن‌ها دو عدد دارند. بعضی از آن‌ها نیز قابلیت حمل بار از طریق اسکلت بدنه تا حدود ۴۵۰ کیلوگرم را دارند. این کلاس برای کار کردن در شرایط جریان‌های زیرآبی نسبتاً سریع مناسب می‌باشند و در مواردی مثل پشتیبانی حفاری، پشتیبانی کارهای سخت، معاینه و بازرسی خطوط لوله و غیره استفاده می‌شوند [۶۵].

#### ۱-۴-۳-۶ وسایل بزرگ گروه عملیاتی

این وسایل برای کارکردن در آب‌های عمیق تا ۲۵۰۰ متر که جریان زیرآبی هم دارند مناسب می‌باشند. توان مصرفی آنها بین ۱۰۰ تا ۲۵۰ اسب بخار می‌باشد و می‌توانند تا ۵۰۰۰ کیلوگرم بار را از طریق فریم خود حمل کنند. از نظر جرمی در بازه ۲۰۰۰ تا ۶۵۰۰ کیلوگرم قرار دارند (بدون ابزارهای جانبی) و ارتفاع بعضی از آن‌ها بعد از نصب ابزار، به ۲/۴ متر می‌رسد. چون این وسایل برای حمل لوازم عملیاتی‌های زیرآبی هم استفاده می‌شود؛ برای همین بسیار بزرگ و قدرتمند می‌باشند و توانایی حمل بارهای سنگین را دارند و معمولاً در صنعت به آنها کلاس "heavy work" هم گفته می‌شود [۶۵].

#### ۱-۴-۳-۷ وسایل فوق عمیق

این وسایل برای عمق‌های بیشتر از ۴۰۰۰ متر ساخته شده‌اند و در طراحی آن‌ها سعی شده است که از حداقل توان مصرفی ممکن برخوردار باشند تا بتوان قطر کابل ارتباطی آنها را کمتر کرده و در نتیجه اثر دینامیکی کابل کمتر گردد و برای همین بیشتر برای عملیات‌های تحقیقاتی و بازرسی و عملی مناسب هستند [۶۵].

#### ۱-۴-۳-۸ سیستم‌های یدک شونده

استفاده از این وسایل بدین صورت است که ابتدا آن‌ها را درون آب انداخته و سپس توسط شناور آن را می‌کشند. داشتن سرعت و عمق یکنواخت، هنگام کار کردن آن‌ها مهم می‌باشد. اغلب این وسایل سنگین هستند و برای رسیدن به عمق موردنظر از تغییر طول کابل استفاده می‌شود. امروزه از کابل-

های قوی الکترومکانیکی به همراه فیبر نوری استفاده می‌شود که پهنای باند بسیار خوبی برای تبادل اطلاعات دارند. استفاده‌های مهمی که از این وسایل می‌شود، شامل جمع آوری اطلاعات اقیانوس شناسی، تحقیق و تجسس، مسیر یابی، یافتن خطوط لوله، تحقیقات زیست محیطی و غیره می‌باشد [۶۵].

#### ۹-۳-۴-۱ خزنده‌هایی که روی بستر دریا حرکت می‌کنند

مهمترین استفاده‌ای که از این وسایل می‌شود، کابل گذاری یا خارج کردن کابل از زیر خاک می‌باشد. این وسایل یکی از ابزارهای لازم برای کندن گودال را بسته به نوع خاک بستر دریا با خود حمل می‌کنند [۶۵].

#### ۴-۴-۱ مزایا و معایب ربات‌هی زیرآبی کنترل از راه دور:

از این دستگاه‌ها بطور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف استفاده می‌شود، چرا که آن‌ها دارای دو مزیت عمده‌ی کاهش هزینه عملیات و افزایش ایمنی پرسنل می‌باشند. در کشور ما نیز استفاده زیادی از این وسایل (مخصوصاً در صنایع نفت و گاز) می‌شود؛ ولی متأسفانه در حال حاضر استفاده از آن‌ها بصورت خرید یا اجاره از خارج کشور می‌باشد. امروزه کاربرد ROV بخاطر یک دسته مشکلات محدود شده است. یک گروه از مشکلات این ربات‌ها وابسته به کابل است که تعدادی از این مشکلات در زیر ذکر شده است [۶۵]:

- گیرکردن کابل و گره‌خوردگی آن در محیط عملیاتی در دسر ساز است.
- وسایل زیرآبی که به یک شناور سطحی اتصال فیزیکی دارد، تحت اثر حرکات وسایل سطحی حرکت می‌کنند. بنابراین در زمانی که وسیله زیرآبی در نزدیک هدف ثابت مانند لوله و دهانه چاه قرار می‌گیرد، حرکت القایی قائم می‌تواند وسیله و هدف ثابت را دچار خرابی کند. برای

برطرف کردن این مشکل سعی می‌شود توسط سیستم‌های کنترلی حرکت قائم (heave)

شناور به دستگاه زیرآب منتقل نگردد.

- یکی دیگر از محدودیت‌های ROVها طول محدود کابل‌های آنهاست که سبب محدود کردن عملکرد وسیع وسیله می‌شود.
- نیروهایی که از کابل به ROV و بالعکس وارد می‌شوند می‌توانند بقدری بزرگ شوند که بر نیروهای دیگر (شامل نیروی موتورها) غلبه کنند. بدلیل توانایی این وسایل در حرکت در جهات مختلف، حالت‌هایی که کشش در کابل از بین برود، اجتناب‌ناپذیر می‌باشند.
- استفاده از کابل مشکلاتی همچون افت انرژی، افزایش نیروهای هیدرودینامیکی وارده، افزایش اغتشاش وارده با سیستم، تاثیر منفی کابل در کنترل وسیله، افزایش احتمال به تله افتادن وسیله را بطور کلی در پی دارد. بنابراین در مدلسازی وسایل کنترل از راه دور زیرآبی (UROV) مدلسازی دقیق کابل از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد.

مشکل دیگر ROV هزینه عملکرد بالای آن است و این بدین علت است که ROV نیاز به حمایت فراوان دارند، مانند کاربر، تکنیسین و شناور سطحی حمایت کننده. مشکل اصلی این وسایل، نیاز به استقرار یک وسیله مانند کشتی در نزدیکی محل استفاده از وسیله می‌باشد تا کاربر بتواند بطور دائم وسیله را کنترل کند [۷].

## ۵-۱ وسایل زیرآبی هوشمند:

با یک نگاه اجمالی به موضوعات مطرح شده در این بخش، می‌توان به اهمیت و برتری استفاده از AUV نسبت به دیگر شناورهای بدون سرنشین زیرآبی در انجام بسیاری از ماموریت‌ها پی برد که باعث ایجاد یک رقابت تنگاتنگ در بین کشورهای توسعه یافته و همچنین در حال توسعه جهت دستیابی به فناوری AUVها شده است. از بعد اقتصادی نیز این مسئله قابل بررسی می‌باشد که

بکارگیری سیستم AUV موجب کاهش هزینه نظارت و بازرسی سنتی و صرفه جویی در زمان می-  
شود. با یک بررسی ساده می توان دریافت تمام این موارد در خصوص کشور ما نیز صادق است [۲].

## ۱-۵-۱ تعریف ربات زیرآبی هوشمند

AUV ها جدیدترین نسل وسایل زیر آبی هستند که برای حذف عامل انسانی در هدایت و کنترل وسیله طراحی شده اند. آن ها ارتباطی با کشتی مادر ندارند و منابع انرژی و فرامین کنترلی داخل وسیله قرار می گیرد. این وسایل بطور سنتی از یک خط ارتباطی صوتی برای مرتبط کردن دستگاه با کاربر استفاده میکنند. از تکنولوژی AUV در خیلی موارد تحقیقاتی استفاده می گردد؛ چراکه با استفاده از این وسایل می توان بدون کمک گرفتن از جایی دیگر، اقیانوس و بستر آن را بررسی نمود. بطور کلی ویژگی های عمومی AUV ها عبارتند از [۲]:

- بدون سرنشین
- ابعاد کوچک تر نسبت به زیردریایی
- کنترل خودکار و خود مختار
- مصرف انرژی پایین
- هزینه ساخت و تولید بالاتر از ROV
- مهم ترین کاربرد: فراساحلی، نظامی، تحقیقاتی



شکل (۱-۸): نمایی از یک AUV [۶]

## ۱-۵-۲ مراحل تاریخی توسعه ربات‌های زیرآبی هوشمند

یک بررسی اجمالی به سیر تاریخی توسعه AUVها، کمک زیادی در شناخت وضعیت این سامانه خواهد داشت. بطور کلی می‌توان این توسعه را در چند گام زمانی بررسی نمود [۲].

۱۹۸۰-۱۹۷۰- ایده پروری، تحقیق درمورد پتانسیل AUV. در این مرحله علوم پایه بررسی شده و چندین محیط آزمایشگاهی ساخته شد.

۱۹۸۰-۱۹۹۰- آزمایش بر روی نمونه‌های اولیه AUV. در این دوره پیشرفت در تکنولوژی به تلاش‌ها و فعالیت‌های توسعه‌ای جان تازه داد و این وسایل مورد آزمایش قرار گرفته و بکار گرفته و طراحی شدند.

۲۰۰۰-۱۹۹۰- توسعه تکنولوژی در راستای نیل به اهداف. در این دوره سرمایه‌گذاری‌ها گسترش پیدا نمود و تعداد زیادی AUV در سرتاسر دنیا تولید شد. این دوره را می‌توان دوره بیداری کاربران نامید.

۲۰۱۳-۲۰۰۰- رشد بازار تجاری. اولین محصولات تجاری واقعی بوجود آمدند.

## ۱-۵-۳ کاربردهای ربات‌های زیرآبی هوشمند

در این بخش نگاهی اجمالی و عمیق به حوزه‌های کاربردی و رویکردهای لازم در بکارگیری سامانه AUV ارائه می‌گردد. به طور کلی می‌توان کاربرد AUVها را در سه بخش فراساحلی، نظامی و تحقیقاتی دسته بندی نمود [۲].

### ۱-۳-۵-۱ کاربردها در صنایع فراساحلی

در این حوزه دور نمای استفاده از AUVها در دو گروه اصلی از AUVها شامل ماشین‌های نظارت و بازرسی برای جمع‌آوری اطلاعات و دیگری نوعی ماشین هیبرید AUV/ROV برای انجام عملیات در

زیر آب می‌باشد. نظارت و بازرسی از مراکز استخراج، مسیر لوله‌ها، اندازه‌گیری جریان زیرآبی حول لوله‌ها و تاسیسات و همچنین انجام عملیات در زیر آب از کاربردهای دسته اول می‌باشد. با استفاده از سیستم‌های هیبریدی امکان انجام اپراتوری و کنترل بر روی خطوط لوله انتقال و چاه‌ها از روی سکوها دریایی محیا می‌شود [۲].

در آینده علاوه بر عمیق‌تر شدن و گسترش مساحت تاسیسات زیردریایی، شاهد افزایش تعداد تاسیسات نیز خواهیم بود و در صورت استفاده از این سامانه‌ها، در هزینه بازرسی‌ها صرفه‌جویی می‌شود که نشان از توسعه استفاده از این سامانه در آینده می‌باشد [۲].

### ۱-۵-۳-۲ کاربردهای نظامی

کاربرد اولیه و درحال گذر AUVها، شکار و خنثی سازی مین‌ها بوده است که موضوع ROV نیز هست. با این حال AUVها توسط زیردریایی‌ها کنترل می‌شوند (نه از طریق کشتی‌ها). امروزه فعالیت‌های گسترده‌ای درخصوص کاربرد این سامانه در نیروهای واکنش سریع انجام می‌شود. از کاربردهای دیگر می‌توان استفاده از این سامانه جهت مصارف جاسوسی، نظارت، اکتشاف مقدماتی، اقیانوس‌شناسی تاکتیکی، ارتباطات، ناوبری و جنگ زیر دریا اشاره کرد [۲].

توسعه در این حوزه طی دهه‌های گذشته انجام شده و هم اکنون این سامانه‌ها در این حوزه عملیاتی شده‌اند. همانگونه که ذکر شد، کاربرد اولیه و درحال گذر آن‌ها، شکار و خنثی سازی مین‌ها بوده است. ارتش‌ها با ذهنیت اژدرها و موشک‌های کروز چندین میلیون دلاری و نیز بدلیل نیاز به قابلیت اطمینان بالا و پیچیدگی مأموریت‌هایشان، حاضر بودند هزینه‌های بالاتری را متحمل شوند. بر همین اساس هدف فعلی نیروی دریایی آمریکا وانگلیس طراحی و ساخت LMRS AUV<sup>1</sup> است که نوعی ماشین قابل حمل توسط زیر دریایی است. همچنین نیروی دریایی آمریکا برنامه ۵۰ ساله جهت توسعه UUV جهت مصارف جاسوسی، نظارت، اکتشاف مقدماتی، مین‌یابی و خنثی سازی مین،

---

<sup>1</sup> Long Term Reconnaissance System

اقیانوس‌شناسی تاکتیکی، ارتباطات، ناوبری و جنگ زیر دریا تدوین نموده است. این برنامه از سال ۲۰۰۰ بکار گرفته شده و کلیه سرمایه‌گذاری‌ها را جهت‌دهی نموده است [۲].

### ۱-۵-۳ کاربردهای تحقیقاتی

استفاده از AUV‌های ساده جهت دستیابی به دانش و فناوری AUV، استفاده ابزاری از AUV‌ها جهت مصارف تحقیقاتی مانند بررسی کف دریا و استفاده از این AUV‌ها بصورت کاتالیزوری برای افزایش شمار AUV‌های عملیاتی از ده‌ها مورد به صدها مورد از مهم‌ترین اهداف و کاربردها در حوزه تحقیقاتی بوده است [۲].

### ۱-۵-۴ منابع تامین قدرت در ربات‌های زیرآبی هوشمند

یک مساله همیشگی برای ربات‌های مستقل، منبع تامین قدرت آن‌هاست. در این وسایل ابتدا از باتری‌های اسید سرب و بعدها از باتری‌های لیتیم-یون استفاده شد که بیشتر دوام داشتند و هنگام شارژ و شارژ مجدد، سریعتر عمل می‌کردند. سلول‌های خورشیدی نیز منبع دیگر تامین قدرت است. استفاده از باتری‌ها محدوده و سرعت وسایل را محدود می‌کند. بهمین دلیل دستگاه باید بنحوی طراحی گردد که مطابق با خطوط جریان باشد و کمترین نیروی درگ را تحمل کند. همچنین برای مواقعی که باتری‌ها ضعیف شوند، تمام سیستم‌ها بجز وسیله تعیین موقعیت خاموش می‌گردند. تلاش‌های زیادی برای بهبود بازدهی فتوسل‌ها و نیازمندی‌های سیستم قدرت صورت می‌گیرد. امروزه تکنولوژی سلول سوختی نیز مطرح می‌گردد که امید می‌رود در آینده مورد استفاده قرار گیرد [۷].

### ۱-۵-۵ محدودیت‌ها و معایب ربات زیرآبی هوشمند

AUV محدودیت‌هایی دارد که اجازه عملیات زیرآبی خاصی را به آن می‌دهد. بعنوان مثال، AUV بر خلاف ROV انرژی مورد نیاز خودش را حمل می‌کند. بعلا این‌که این منابع تامین انرژی ظرفیت محدودی دارند عملیاتی که نیاز به قدرت زیادی دارند مانند برشکاری و حفاری توسط AUV مقدور

نیست. بعلاوه زمان عملیات AUV در زیر آب متناسب با زمان تامین منبع قدرت آن محدود می‌گردد. بنابراین AUV باید حین عملیات و در فواصل معلوم زمانی برای بازیابی قدرت به سطح آب بیاید این فرایند باعث بوجود آمدن خطراتی برای AUVها می‌گردد و همچنین مساله منبع تامین مجدد قدرت نیز مطرح است. عیب دیگر AUV این است که ارتباط بین آن و تکنیسین محدود است [۸۵و۸].

AUVها بطور سنتی از یک خط ارتباطی صوتی برای مرتبط کردن دستگاه با کاربر استفاده می‌کنند. بعلت اینکه این ارتباطات صوتی اطلاعات را به سرعت و دقت کابل‌های الکتریکی یا رشته‌های نوری انتقال نمی‌دهند، انتقال اطلاعات رمزی شده کاربر به دستگاه بخوبی صورت نمی‌گیرد. بنابراین AUVها در مواجهه با وظایف غیرقابل پیش بینی که نیاز به مقدار زیادی از اطلاعات ورودی کاربر دارد دچار مشکل می‌شوند [۸۷و۸].

کاهش اندازه، هزینه و قدرت مورد استفاده کامپیوترها و وسایل الکترونیکی و حسگرهای AUVها، سیستم‌های هدایت و کنترل، توسعه وسایل کوچک دریایی را همراه با کاهش هزینه‌های عملکردی و توسعه‌ای میسر ساخته است [۸۷و۸].

هنوز هم AUVها نسبت به سیستم‌های دیگر، سیستم‌های خیلی پیچیده‌ای هستند که گرانت، سخت‌تر برای عملکرد و سخت‌تر برای نگهداری هستند. هزینه‌های بالای AUVها بیانگر این است که خطرات خرابی و از دست دادن وسیله در عملیات، پارامتر مهمی است. افزون بر این نرم افزار مورد نیاز برای کنترل یک وسیله مستقل (AUV) در محیط پرخطر اقیانوس تقریباً پیچیده است و نیاز به مهارت برای عملکرد و نگهداری دارد [۸۷و۸].



## ۱-۵-۶ مزایای ربات زیرآبی هوشمند

AUVها هوشمند بوده و در حین مأموریت نیازی به برقراری ارتباط با اپراتور ندارد. در مقایسه با ROVها، AUVها در مقابل حرکات قائم<sup>۱</sup> تاثیرپذیر نیستند چرا که بوسیله کنترل کننده سطحی اتصال فیزیکی در AUVها منابع قدرت، سیستم رانش و سیستم کنترل از پیش برنامه ریزی شده بر روی خود وسیله قرار دارند. پس از قرار گرفتن در آب از روی وسیله یا سکوی سطحی، AUV بر اساس برنامه از پیش تنظیم شده به زیر آب می‌رود و عملیات را انجام داده و به سطح آب باز می‌گردد. در این حالت AUVها عملیات زیرآبی را بدون نیاز به کنترل دقیق انجام می‌دهند. همچنین اینکه عملکرد AUVها از ROVها هزینه کمتری دارد چراکه نیاز به اتصال بند نافی و شناور حمایت کننده سطحی ندارند [۵].

از فواید AUV در صنعت و تکنولوژی که سبب روی آوردن ما به این وسایل هوشمند شده است می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۲و۷]:

### ۱- فواید نظامی:

- کاهش هزینه ناشی از خطرات عملکردی
- ساخت این وسایل نیاز به زمان کمتری نسبت به زمان مورد نیاز برای ساخت انواع مختلف کشتی‌ها دارد.
- اشخاص کنترل کننده دستگاه از محیط خطرناک به دور می‌مانند.
- منافع مورد توجهی نسبت به هزینه صرف شده عاید می‌گردد.

### ۲- فواید تجاری:

- هزینه اولیه کم

---

<sup>1</sup> Heave

- هزینه عملکردی پایین
- توانایی بررسی مستقل از میزان عمق
- قابلیت جابجایی مناسب
- کاهش هزینه تعمیرات

به همین دلیل با بهبود اندازه، وسایل الکترونیکی و حسگرهای AUV ها و سیستم‌های هدایت و کنترل، به توسعه این کلاس از شناورهای زیرآبی می‌پردازیم.

## ۶-۱ افق‌های آینده

تا کنون یک سیستم کامل برای ربات‌های زیرآبی ساخته نشده است. نقص این دستگاه‌ها در هر دو زمینه نرم افزاری و سخت افزاری مشهود است. در راستای بهبود عملکرد ربات‌های زیرآبی موارد زیر پیشنهاد می‌شود.

- بهبود سیستم‌های کنترل در این ربات‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.
- کاهش اندازه، هزینه و قدرت مورد استفاده کامپیوترها و وسایل الکترونیکی و حسگرهای و دیگر تجهیزات روی آنها از اهداف دیگر پیش روی هستند.
- تلاش برای گسترش نرم افزارهای مورد استفاده به منظور درک و تحلیل موارد مختلف برای ربات‌ها.
- امید می‌رود که وسیله ای طراحی گردد که با محیط سازگاری بیشتری کسب کند. با استفاده از یک سیستم ارتباطی امکان تغییر جزئیات ماموریت در هر زمان امکان پذیر باشد.
- تحقیقات بر روی بعضی شکل‌های ارتباطات آکوستیک و قابلیت‌های مکان‌یاب ماهواره‌ای.
- تلاش برای غلبه بر محدودیت‌های جرم این ربات‌ها و هزینه‌های قدرت.
- نیاز به کاهش محدودیت‌های ناشی از هوای طوفانی و شرایط مختلف دریا.

- علاوه بر کار بر روی تکنولوژی‌های باتری‌های جدید وسلول سوختی باید بهینه سازی استفاده و شارژ باتری‌ها نیز بررسی گردند. این کارها هزینه‌های انرژی را کمینه می‌کند ضمن اینکه باعث افزایش قابلیت اعتماد و عملکرد وسیله می‌گردد.
- امروزه ربات‌های زیرآبی برای بازرسی‌های مستقیم مناسب هستند. با بهبود هوش مصنوعی کارهای پیچیده‌تر مانند بازرسی و به تصویر کشیدن و تامین اطلاعات ساخت امکان‌پذیر می‌گردد.
- در بررسی‌های فراساحلی هدف، کاهش هزینه بازرسی برای دستیابی به نقشه منطقه با جزئیات است. این وظیفه را می‌توان توسط ربات‌های کوچک که با یکدیگر فعالیت می‌کنند انجام داد. با فراهم آوری همه اطلاعات بهترین تصمیم مهندسی یا عملی یا نظامی را می‌توان اتخاذ کرد.

## ۷-۱ تعریف مسئله و اهداف تحقیق

همانطور که بطور مفصل ذکر شد، ربات‌های زیرآبی بدلیل مزایا و کاربردهای فراوانی که نسبت به سایر وسایل زیرآبی دارند، در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. طراحان این وسایل، با چهار مسئله مهم برای طراحی روبرو هستند که هر یک نقش بسزایی در کارآیی مطلوب و کنترل دقیق این ربات‌ها دارند. این ۴ مساله که کاملا به یکدیگر وابسته اند عبارتند از [۱]:

- طراحی وسیله
- کارآیی حسگرها
- دینامیک و مدل‌سازی
- طراحی سیستم کنترلی

در طراحی وسیله، به کاهش هر چه بیشتر مقاومت و هیدرودینامیکی شدن شکل توجه ویژه شده است و در زمینه کارایی حسگرها، با توجه به این مطلب که با افزایش تعداد حسگرها اطلاعات دقیق-تری به سیستم کنترل ارسال شده و خروجی سیستم کنترلی مطمئن تر شده که موجب افزایش کارایی وسیله، ردیابی موفق و کنترل دقیق آن می‌شود، توجه شده است. پیرامون دو مساله اول تا بدین حد از توضیحات در مورد آنان بسنده نموده‌ایم چرا که تلاش این پایان نامه بر روی دو مساله آخر صورت پذیرفته است.

### ۱-۷-۱ دینامیک و مدل‌سازی

دینامیک حرکت یک شناور از جمله موارد مهم در حفظ مسیر می‌باشد. دینامیک ربات‌های زیر آب بسیار غیرخطی، دارای تزویج، کوپل، متغیر با زمان و شامل پارامترهای متعددی است که هر یک از این پارامترها به نوبه خود دارای عدم قطعیت می‌باشند. بنابراین مدل کردن دینامیکی این وسایل بسیار مشکل و پیچیده بوده و بدست آوردن یک مدل دینامیکی دقیق از آن‌ها امکان پذیر نمی‌باشد. موارد زیادی مانند قابل پیش‌بینی نبودن ضرایب مربوط به جرم افزوده و مقاومت شناور (با وجود انجام آزمایش‌های فراوان شناسایی سیستم)، غیرخطی بودن دینامیک تراسترها بخصوص در سرعت‌های کم، وجود انواع عدم قطعیت‌ها، اغتشاشات پیش‌بینی نشده محیطی همچون بروز باد و ایجاد امواج از قبل پیش‌بینی نشده و تغییرات دینامیکی با افزودن یا بستن تجهیزات با توجه به کاربرد، باعث پیچیده و مشکل‌تر شدن مدل کردن ربات‌های زیر آبی شده است که البته بستر ناشناخته دریا نیز بر این دشواری افزوده است [۱].

هرچقدر دقت مدل‌سازی وسیله زیر آبی و امواج دقیقتر شود مدل نهایی پیچیده‌تر گردیده آنگاه طراحی و اجرای چنین سیستم کنترلی مشکل‌تر می‌شود. لذا همواره بین دقت سیستم کنترل و پیچیدگی مدل یک بده‌بستان وجود دارد. به همین منظور معمولاً از مدل‌های دینامیکی ساده استفاده شده و در طراحی AUV سعی بر قوی‌تر کردن سیستم‌های کنترلی برای فایق آمدن بر مشکلات مدل

کردن مذکور می‌باشد. بدین منظور سیستم کنترلی طراحی شده باید بسیار مقاوم، هوشمند و دارای انعطاف کافی برای کارکرد در شرایط مختلف و دینامیک‌های مختلف سیستم باشد.

## ۱-۷-۲ طراحی سیستم کنترلی

مهم‌ترین بخش تحقیقات انجام شده در حوضه‌ی ربات‌های زیرآبی، مربوط به طراحی سیستم کنترل آن‌ها می‌باشد.

در طی اجرای وظایف مشخص ذکر شده برای شناورهای زیرآبی، برای افزایش قابلیت اطمینان با توجه به مقرون به صرفه بودن هزینه‌ها، نیازمند استفاده از کنترل کننده‌ها می‌باشیم. اما کنترل وسایل نقلیه زیر آب بدلیل وجود دینامیک‌های غیر خطی سیستم، اثرات هیدرودینامیک‌های غیرخطی مبهم و متغیر، حضور نیروهای تولیدی توسط حرکت سیال، تغییر مرکز ثقل و مرکز شناوری، اغتشاشات خارجی، نویزها، عدم وجود یک مدل دقیق از دینامیک‌ها و پارامترهای سیستم و عدم قطعیت پارامتری کار آسانی نیست. در واقع، طراحی سیستم کنترلی، بعلاوه شرایط کاری نامناسب زیرآب و کوپل شدن اثرات دینامیکی و هیدرودینامیکی با مشکلات فراوانی روبروست. وجود جریان‌های زیرآبی که گاهی سرعتی چند برابر سرعت ماکسیمم یک ربات را دارند به تنهایی مشکلات طراحی را نشان می‌دهد. بنابراین با روش‌های معمولی کنترل، امکان کنترل مناسب این مدل وجود ندارد؛ لذا مجبور به استفاده از ترکیب تکنیک‌های کنترل مختلف بوده تا بتوان با این سیستم کنترلی بر مشکلات ذکر شده فایده‌آمده [۱].

در اکثر سیستم‌ها و بخصوص سیستم پیش رو، سعی شده با استفاده از نظریه‌های غیرخطی، کنترل کننده‌ای بهتر از کنترل کننده‌های خطی طراحی شود. سیستم کنترلی طراحی شده همچنین بایستی

علاوه بر دارا بودن توانایی‌های عنوان شده، بسیار ساده باشد تا امکان اعمال مستقیم<sup>۱</sup> کنترل کننده بر روی دستگاه میسر شود.

اهداف کلی موردنظر به موارد ذیل خلاصه می‌شود:

- کنترل سرعت<sup>۲</sup>
- ردیابی و کنترل موقعیت دینامیکی<sup>۳</sup>
- کنترل جهت حرکت و عمق<sup>۴</sup>

## ۸-۱ مروری بر تحقیقات پیشین

در این بخش با بررسی و مروری بر تحقیقات انجام شده در دو زمینه مدلسازی و کارهای کنترلی، زمینه‌ای برای آغاز فصل‌های بعد را فراهم می‌آوریم.

### ۱-۸-۱ مدلسازی

مدلسازی این گونه وسایل بخاطر پیچیدگی بالای دینامیک آن‌ها از جمله تحقیقاتی است که هنوز هم در حال انجام است. چندین نوع مدلسازی و روش‌های شناسایی برای دینامیک ربات‌های زیرآبی ارائه شده است.

در خصوص مدلسازی ربات‌های زیرآب، یو نوعی مدلسازی را برای کنترل تطبیقی ROVها ارائه داد. مدل دینامیکی ROV توسط ۶ معادله دیفرانسیل غیرخطی، درجه اول و متغیر با زمان بیان شد. این مدل دارای پارامترهای متعددی است که نیاز به شناسایی از طریق آزمایشات هیدرو دینامیکی را دارا می‌باشد [۹].

---

<sup>1</sup> on-line

<sup>2</sup> speed control

<sup>3</sup> dynamic positioning and tracking

<sup>4</sup> steering and depth control

در سال ۱۹۹۰، میروویچ معادلات حاکم بر حرکت را به شکل کامل‌تری نسبت به قوانین کرشهف بیان کرد. او بجای انرژی سینیتیک از مفهوم لاگرانژ برای مدلسازی معادلات استفاده نمود [۱۰].

در سال ۱۹۹۱، فوسن و همکارش معادلات حاکم بر حرکت را از دیدگاه لاگرانژی بیان کردند. این نوع فرموله کردن معادلات، خواص بسیار کاملی از دینامیک وسایل دریایی (خصوصاً ربات‌های زیرآبی) را دارا می‌باشد. با اینگونه مدلسازی، نداشت مهمی بین ورودی‌های کنترل و متغیرهای حرکت تحت کنترل بدست آمد [۱۱].

در سال ۱۹۹۵ مجدداً فوسن و فوجلستاد مدلسازی ۶ درجه آزادی وسایل دریایی را بطور کامل بیان کردند. همچنین در این کار آن‌ها شکل برداری نیروهای مختلف وارد بر وسایل دریایی را در قالب معادلات ۶ درجه آزادی نشان دادند [۱۲].

تحقیقات بسیار دیگری نیز در این زمینه صورت گرفته است.

## ۲-۸-۱ فعالیت‌های کنترلی انجام شده

تعداد زیادی از مقالات، اختصاص به موقعیت دینامیکی وسایل زیر آبی یافته است؛ که نمایانگر نیاز به گسترش کنترل کننده می‌باشد. با توجه به دینامیک‌های غیرخطی مرتبه بالای سیستم و دشواری مدلسازی محیط و اثر آن بر روی وسیله، کنترل در این محیط بی‌ساختار و نامطمئن بسیار مشکل است، بنابراین روش‌های کنترلی مرسوم بهترین انتخاب نبوده و نمی‌تواند عملکرد دریایی موردنظر را تضمین نمایند [۱۳ و ۱۴]. به همین دلیل دسته دوم تحقیقات و مطالعات، بر روی هدایت و خصوصاً کنترل ربات‌های زیرآبی انجام شده است. برای آشنایی با نیازمندی‌های سیستم‌های کنترل برای ربات‌های زیرآبی، انواع مختلف طرح‌های کنترل، استفاده شده است. از مهم‌ترین کارهای کنترلی انجام شده می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

کریستس<sup>۱</sup> و همکارانش برای کنترل حرکت در عمق یک ربات زیر دریا از معادلات ساده شده حرکت آن در عمق استفاده کردند و یک کنترلگر تطبیقی- لغزشی را طراحی کردند. همچنین به منظور کاهش تعداد حسگرهای gyro (حسگرهای اندازه گیری زاویه pitch و سرعت زاویه ای q) از یک رویتگر برای تخمین این متغیرها استفاده کردند. این رویتگر مبتنی بر مدل خطی غالب سیستم بود [۱۵].

یوه<sup>۲</sup> با درنظر گرفتن دینامیک نیروی پیشران به توصیف ربات‌های زیرآبی پرداخت و یک کنترل تطبیقی زمان گسسته برای آنها پیشنهاد نمود تا سیستم توانایی تطبیق با تغییرات دینامیک وسیله و محیط پیرامون را داشته باشد [۹]. اما این روش معایبی نیز داشت از جمله اینکه نسبت به دینامیک مدل نشده مقاوم نبود. در جهت برطرف نمودن مشکلات، یوه کنترل لغزشی تطبیقی را ارائه داد که عملکرد و کارایی بهتری را برای زیردریایی نشان می‌داد، زیرا این کنترل کننده قادر به تنظیم با تغییرات محیط بوده و نیازمند دانشی کمتر از سیستم می‌باشد؛ چرا که قاعده تعدیل می‌تواند در جهت یادگیری دینامیک سیستم در طی عملیات زمان حقیقی کمک نماید. اما این روش معایبی همچون هزینه بالای پیاده سازی و مشکل بودن تحلیل نتایج سیستم کنترل را، به دلیل غیرخطی و متغیر بودن با زمان، به دنبال داشت و قادر به تضمین پایداری سیستم نبود. پس او به بررسی کنترل شبکه-های عصبی پرداخت که عملکرد خوبی از ردیابی برای طیف وسیعی از سرعت خودرو را ارائه می‌داد [۱۶]. این روش برخلاف سیستم‌های کنترل تطبیقی مرسوم نسبت به دینامیک‌های مدل نشده مقاوم بوده و همچنین خطای ردیابی نسبت به کنترل لغزشی تطبیقی کمی بهتر گردید [۱۴ و ۱۷].

جالونگ<sup>۳</sup> [۱۸] برای کنترل یک نمونه وسیله زیر آبی بنام NDRE-AUV که یک ربات زیرآبی متعلق به وزارت دفاع نروژ است، کنترلگری خطی طراحی کرد.

---

<sup>1</sup> Cristis

<sup>2</sup> Yuh

<sup>3</sup> Jalving



در تمامی مراجع گفته شده تا بدین جا، فرض بر این بوده است که ربات‌های زیرآبی حول محور طولی خود هیچ چرخشی نداشته باشند و بنابراین، مانورهای حرکتی از یکدیگر مستقل شده و برای هر مانور حرکتی بطور جداگانه کنترل‌کننده‌های مختلف طراحی شده‌اند.

فوسن<sup>۱</sup> و بلانکه<sup>۲</sup> یک رویکرد غیرخطی را یک کنترل‌کننده انتگرالی پس‌خوردی خروجی ترکیب نموده و پایداری نمایی آن را اثبات نمودند [۱۹].

محققان در [۲۰] به ارزیابی یک خانواده از کنترل‌کننده‌های ردیابی مسیر مبتنی بر مدل نوعی ROV بنام JHUROV<sup>۳</sup> برای مانور در سرعت‌های پایین پرداختند. مدل استفاده شده در این مقاله، ساده و بدون کوپل ولی در عین حال معتبر از لحاظ تجربی می‌باشد. کنترل‌کننده‌های مورد استفاده در سیستم حلقه بسته، کنترل تناسبی- مشتقی، کنترل‌های مبتنی بر مدل ثابت (کنترل‌کننده خطی سازی دقیق<sup>۴</sup> و کنترل‌کننده غیر خطی<sup>۵</sup>) و کنترل‌کننده تطبیقی مبتنی بر مدل می‌باشد. کنترل‌کننده تناسبی- مشتقی بعلاوه مزیت سهولت پیاده‌سازی مورد استفاده واقع می‌شود. کنترل‌کننده تطبیقی به تخمین مستقیم پارامترها برای ردیابی مسیر و ردیابی سرعت پرداخته است. در انتها پایداری روش و همگرایی مجانبی حالت‌های مدل به مسیر مرجع نشان داده شده است. در این مرجع به بررسی نتایج حاصل از این کنترل‌کننده‌ها در رنج وسیعی از شرایط همچون اشباع تراستر، پارامتر-های تطبیق پرداخته شده و نشان داده می‌شود که: ۱- در ردیابی مسیر، کنترل‌کننده NL بهتر از EL و کنترل‌کننده EL بهتر از PD عمل کرده است؛ ۲- کنترل‌کننده‌های مبتنی بر مدل در مقابل نویز حسگر، عدم قطعیت‌ها و دینامیک‌های سیستم مدل نشده مقاوم می‌باشد؛ و ۳- عملکرد کنترل‌کننده‌ها بطور قابل توجهی در حضور اشباع تراستر تنزل می‌یابد. اما در این میان کنترل‌کننده‌های NL و EL در مقابل این اثر مدل نشده بهتر از کنترل‌کننده‌های تطبیقی متناظرشان رفتار می‌کنند.

---

<sup>1</sup> Fossen

<sup>2</sup> Blanke

<sup>3</sup> Johns Hopkins University Remotely Operated Underwater Vehicle

<sup>4</sup> Exact linearizing (EL)

<sup>5</sup> Nonlinear (NL)

یورگر<sup>۱</sup> و اسلوتین<sup>۲</sup> طرح مود لغزشی را برای کنترل مسیر وسایل زیرآبی تک ورودی تک خروجی ارائه نمودند که تا اندازه‌ای موفق عمل نمود و برای مقابله با عدم قطعیت‌های ضرایب هیدرودینامیکی و پارامترهای هیدرودینامیکی و عبارات کوپل در نظر گرفته نشده استفاده شد [۲۱]. در واقع، اخیراً توجه زیادی به کنترل مود لغزشی برای کنترل ربات‌های زیرآبی بعلت و ویژگی سادگی و مقاوم بودن شده است. این کنترل کننده، در کنار مقاوم بودن به تغییرات پارامتری، به اغتشاشات نیز حساس نیست و به عنوان یک استراتژی مفید برای سیستم‌های نامشخص بکار می‌رود. در کنترل مود لغزشی، یک فرض حیاتی این است که عدم قطعیت‌ها محدود بوده و محدوده‌ی آن برای طراح مشخص باشد. این محدوده‌ها یک نشان مهم برای امکان پایداری تضمین شده سیستم حلقه بسته می‌باشد. متأسفانه، بدلیل پیچیدگی عدم قطعیت‌های ساختاری در دینامیک‌های وسایل زیرآبی، بعضی محدوده‌ها به راحتی بدست نمی‌آیند. کریستی و همکارانش یک کنترل کننده مود لغزشی تطبیقی برای کنترل یک وسیله زیرآبی در صفحه عمودی پیشنهاد نمودند. این طرح با فرض در نظر نگرفتن دینامیک‌های غیرخطی وسیله و محیط انجام شد. نتایج نشان‌دهنده‌ی عملکرد مطلوب کنترل کننده مود لغزشی تطبیقی نسبت به کنترل کننده خطی کلاسیک در طیف وسیعی از سرعت بود [۲۲].

هوانگ<sup>۳</sup> و کروزر<sup>۴</sup> یک کنترل مود لغزشی مقاوم برای دینامیک یک ROV بدون نیاز به دانش قبلی نسبت به محدوده‌های عدم قطعیت‌های پارامتری پیشنهاد کردند [۲۳].

محققان در [۲۴] از کنترل کننده مود لغزشی فازی تطبیقی برای یک وسیله زیرآبی استفاده نمودند. برای تخمین دینامیک‌های نامشخص در کنترل کننده مود لغزشی از سیستم‌های استنباط فازی استفاده شد. با استفاده از منطق فازی می‌توان از مدل سازی هیدرودینامیک پیچیده برای زیردریایی اجتناب نموده و کنترل کننده می‌تواند خود را با جریان‌های اقیانوسی مختلف و با تغییرات ویژگی‌های

---

<sup>1</sup> Yoerger

<sup>2</sup> Slotine

<sup>3</sup> Hoang

<sup>4</sup> Kreuzer

استاتیکی و دینامیکی وفق دهد. عیب این روش، حضور متغیرهای حالت در قوانین فازی می‌باشد؛ زیرا در سیستم‌های مرتبه بالاتر تعداد مجموعه‌های فازی و قوانین فازی بشدت زیاد می‌شود.

بسا<sup>۱</sup> و همکارانش یک کنترل کننده اسلایدینگ مود فازی تطبیقی برای تنظیم جابجایی عمودی وسایل زیرآبی با کنترل از راه دور پیشنهاد نمودند [۲۵]. تنظیم عمق پذیرفته شده اصولاً بر اساس روش کنترل اسلایدینگ مود صورت پذیرفت و از یک سیستم استنتاج فازی تطبیقی پایدار برای مقابله با عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات استفاده شد. با استفاده از تئوری پایداری لیاپانوف و لم باربالات، ویژگی پایداری و همگرایی سیستمهای حلقه بسته استنباط شد. سپس آن‌ها این طرح را در شناسایی اغتشاش‌های خارجی برای کنترل موقعیت دینامیکی وسایل زیرآبی با ۴ درجه آزادی بکار بستند [۲۶]. در واقع بسا برای تخمین اغتشاشات خارجی تصادفی، از یک سیستم استنتاج فازی استفاده نموده و از متغیر سوئیچینگ مود لغزشی "s" بعنوان متغیر فرض منطقی نمود. او همچنین فرض کرد که تخمین جرم، ماتریس‌های هیدرودینامیک و مایل به مرکز می‌توانند با مقداری محدوده‌های کوچک بر روی پارامترها بدست آیند.

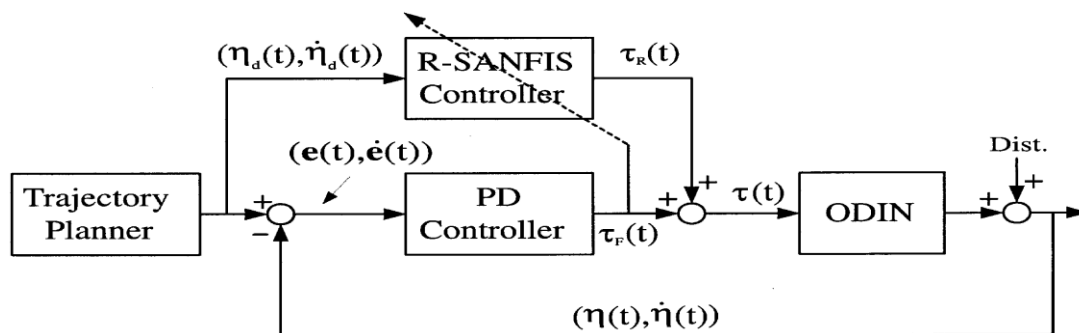
ونگ<sup>۲</sup> و همکارش به ارائه یک کنترل فازی عصبی تطبیقی بعنوان یک کنترل کننده پیشخورد و یک کنترل تناسبی- مشتقی بعنوان یک کنترل کننده پسخورد برای کنترل یک AUV پرداخته و نشان داده شده است که این روش نسبت به کنترل تطبیقی مرسوم و یا کنترل فازی عصبی پیشخورد عملکرد مطلوبتری از جهت ردیابی، همگرایی سریعتر و کاهش هزینه‌ها در بر دارد [۲۷]. این طرح، همانطور که در شکل (۱-۹) مشاهده می‌شود، از یک سیستم فازی عصبی، شامل توابع پایه فازی برای تخمین بهتر توابع غیرخطی و رفتار دینامیکی وسیله، جهت مدلسازی AUV استفاده شده است و سپس بعنوان یک کنترل کننده پیشخورد برای محاسبه گشتاور اسمی AUV، بکار رفته است. کنترل کننده پسخورد PD، خطای سیستم را برای ردیابی مسیر موردنظر با وجود اغتشاشات مختلف و

---

<sup>1</sup> Bessa

<sup>2</sup> Wang

اختلالات غیر منتظره مانند اثر جریان‌های آب، حداقل می‌کند. توسط کنترل کننده PD از سیگنال-های خطای تولید شده، برای تطبیق پارامترها، جهت ساختن کنترل فازی-عصبی استفاده شد و در انتها پایداری مجانبی کلی سیستم با انتخاب مناسب متغیرهای کنترل کننده PD نشان داده می‌شود.



شکل (۹-۱): بلوک دیاگرام طرح انجام شده [۳۳]

با بررسی تحقیقات انجام شده و بررسی مزایا و معایب روش‌های فوق، برای بررسی سیستم کنترلی مورد نظر از روش فازی تطبیقی غیر مستقیم استفاده نموده‌ایم.

## ۹-۱ مروری بر ساختار پایان‌نامه:

هدف این پایان‌نامه طراحی کنترل‌کننده‌ای برای ردگیری و باقی ماندن در مسیر و عمق داده شده می‌باشد. اولین هدف برای رسیدن به هدف داده شده، ایجاد یک مدل از سیستم می‌باشد. قدم بعدی طراحی کنترل‌کننده است. در این راستا پایان‌نامه بدین ترتیب پایه‌ریزی شده است:

در فصل دوم، به بررسی دینامیک و مدل‌سازی ربات‌های زیرآبی پرداخته شده است.

در فصل سوم، به طراحی روش پیشنهادی پرداخته و عملکرد آن را بر روی ربات مورد نظر بررسی و مقایسه می‌شود. پایداری سیستم کنترل نیز تضمین شده است.

در فصل چهارم، به ارائه طرحی پیشنهادی بر روی یک ربات زیرآبی پرداخته و با اثبات پایداری سیستم، به مقایسه عملکرد این روش با کنترل فازی تطبیقی مود لغزشی کلاسیک پرداخته شده است.

در فصل پنجم، نتیجه گیری نهایی و پیشنهادات ارائه شده است.

---

## فصل ۲ :

# دینامیک سیستم ربات‌های زیرآبی

---

## ۱-۲ مقدمه

در این فصل ابتدا به بررسی معادلات سینماتیکی و دینامیکی حرکت ربات‌های زیر سطحی پرداخته شده است و شبیه‌سازی یک ربات زیرآبی با در نظر گرفتن حرکات افقی و عمودی با استفاده از جعبه ابزار SIMULINK نرم افزار MATLAB انجام شده است. سپس یک نمونه‌ی دیگر از ربات‌ها در نظر گرفته شده و به نحوه استنباط تنها معادلات عمق یک ربات آزمایشگاهی، پرداخته شده است. در این فصل شرح کامل معادلات، فرضیات و ساده سازی‌ها در نظر گرفته شده است.

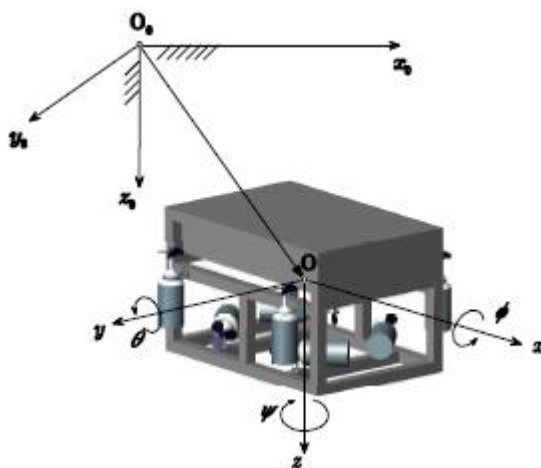
## ۲-۲ ساختار سیستم مورد استفاده:

برای تعیین رفتار فیزیکی شناور در یک سیال فراگیر نیاز به دانستن دو سیستم مختصات، یکی سیستم مختصات جهانی و ثابت و دیگری سیستم مختصات متحرک و متصل به جسم می‌باشد. سیستم مختصات جهانی و ثابت نسبت به زمین تعریف می‌شود. همچنین گاهی اوقات به عنوان مرجع سیستم مختصات زمینی یا سیستم مختصات اینرسی استفاده می‌شود که در شکل (۱-۲) بصورت سه محور اصلی دو به دو عمود بر هم در یک نقطه اختیاری در سطح اقیانوس، بطوری که شمال متناظر با محور  $X_0$ ، شرق منطبق بر  $Y_0$  و افزایش عمق منطبق بر محور  $Z_0$ ، نشان داده شده است. بنابراین همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود  $XYZ$  نمایانگر دستگاه مختصات متصل به جسم و  $X_0Y_0Z_0$  دستگاه مختصات زمین است.

همانطور که از شکل مشخص است موتور- پیشران‌های در راستای محور  $Z$ ، حرکت  $heave$  و دوران  $yaw$  را ایجاد می‌کنند، موتور- پیشران‌های در راستای محور  $X$ ، حرکت  $surge$  و دوران  $roll$  را ایجاد می‌کنند و موتور- پیشران‌های در راستای محور  $Y$ ، حرکت  $sway$  و دوران  $pitch$  را ایجاد می‌کنند.

پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در این تحقیق، بر اساس پارامترهای ROV طراحی شده بر اساس یک مدل که در موسسه مهندسی اقیانوس و مکانیک دانشگاه هامبورگ<sup>۱</sup> ساخته و توسعه یافته، انتخاب شده‌اند. این مدل آزمایشگاهی در شکل (۲-۲) نمایش داده شده است. سیستم نیروی محرکه از ۸ پروانه دریایی که توسط موتور DC رانده می‌شوند، تشکیل شده است. آرایش موتورها بگونه‌ای در نظر گرفته شده که وسیله توانایی حرکت و عمل کردن در ۶ درجه آزادی را داشته باشد [۲۳].

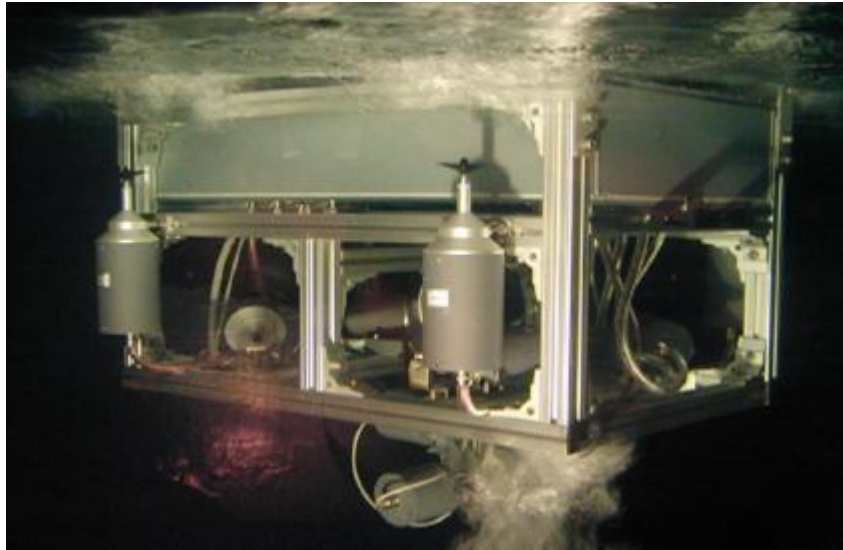
طرح این نوع ربات، مکعب مستطیل شکل با ساختار سازه‌ای شکل است که موتور-پیشران‌ها و محفظه‌های باتری به بدنه متصل شده‌اند. در این مدل، بدلیل عملکرد وسیله در عمق بطور معمول بیشتر از ۲۰ متر و در نتیجه قرار گرفتن در زیر منطقه تحت تاثیر موج، نیروها/گشتاورهای ناشی از موج قابل اغماض فرض می‌شوند. وزن خالص وسیله بیرون از آب حدود ۸۰ کیلوگرم است و بگونه‌ای طراحی شده که شناوری آن تا اندازه‌ای بزرگتر از وزن آن باشد [۲۳].



شکل (۲-۱): نمایش ROV با دو سیستم مختصات [۲۳]

<sup>1</sup> the Institute of Mechanics and Ocean Engineering of Hamburg University of Technology





شکل (۲-۲): نمایش ربات مورد استفاده در زیر آب [۲۳]

## ۳-۲ معادلات دینامیکی وسیله

یک مدل مناسب برای توصیف رفتار دینامیکی وسیله زیرآبی باید شامل دینامیک‌های بدنه صلب وسیله، دینامیک‌های کابل مهار و یک نمایش از دینامیک‌های سیال محاط باشد. با در نظر گرفتن معادلات سینماتیکی و دینامیکی حرکت برای شبیه‌سازی حرکت ربات‌های زیرسطحی ۱۲ معادله دیفرانسیل مرتبه اول باید بطور همزمان توسط نرم افزار حل شوند. معادلات حرکت وسایل زیرسطحی در مختصات متصل به جسم با ۶ درجه آزادی (DOF) عبارتند از [۱]:

$$M\dot{v} + k(v) + h(v) + g(\eta) + p = \tau \quad (۱-۲)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (۲-۲)$$

که  $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$  بردار حالت و موقعیت در مختصات اینرسیال و  $v = [u, v, w, p, q, r]^T$  بردار سرعت خطی و زاویه ای در مختصات بدنه جسم است.  $M$  یک ماتریس ثابت  $6 \times 6$  مثبت معین متقارن متشکل از جرم بدنه صلب و اینرسی افزوده هیدرودینامیکی می‌باشد. مسلماً برای این نوع از ربات‌ها، مولفه‌های جرم ماتریس  $M$  در جهات مختلف متفاوت است، چون جرم‌های افزوده متفاوتند. که این تفاوت ناشی از فرم بدنه‌ی ربات زیرسطحی در زیر آب است.  $k(v)$  ماتریس  $6 \times 6$  نامتقارن و بر

حسب  $v$  خطی است که شامل نیروهای کوریولیس و گریز از مرکز است.  $h(v)$  که نمایانگر میرایی درجه دو هیدرودینامیکی است در واقع یک ماتریس میرایی  $6 \times 6$ ، مثبت معین و شامل عبارات لیفت، درگ و همچنین اصطکاک بدنه و میرایی ویسکوز می‌باشد.  $g(\eta)$  نیز یک بردار  $6 \times 1$  در بر گیرنده نیروهای/گشتاورهای باقیمانده (نیروهای/گشتاورهای جاذبه و شناوری) است.  $p$  نمایانگر اغتشاشات محیطی و اغتشاشات ناشی از نیروی حاصل از کابل افسار است و در نهایت،  $\tau$  بردار نیروهای خارجی و بردار گشتاورها و ورودی کنترل است [۱].

می‌توان معادلات دینامیک سیستم را در صفحه از مختصات بدنه به مختصات زمین انتقال داد که به ماتریس انتقال آن ژاکوبین گفته می‌شود و با ماتریس  $6 \times 6$   $J(\eta)$  نشان داده شده است [۱]:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0 \\ 0 & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \quad (۳-۲)$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} \cos(\psi)\cos(\theta) & -\sin(\psi)\cos(\phi) + \cos(\psi)\sin(\theta)\sin(\phi) & \sin(\psi)\sin(\phi) + \cos(\psi)\cos(\phi)\sin(\theta) \\ \sin(\psi)\cos(\theta) & \cos(\psi)\cos(\phi) + \sin(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) & -\cos(\psi)\sin(\phi) + \sin(\theta)\sin(\psi)\cos(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta)\sin(\phi) & \cos(\theta)\cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (۴-۲)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi)\tan(\theta) & \cos(\phi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi)/\cos(\theta) & \cos(\phi)/\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (۵-۲)$$

در بخش‌های زیر بطور مفصل‌تر، پیرامون نیروها و گشتاورهای موثر بر وسیله زیر آبی توضیح خواهیم داد. همچنین به این امر باید توجه نمود که در ROVها، معمولاً زوایای roll  $(\phi)$  و pitch  $(\theta)$  کوچک در نظر گرفته شده و داریم  $\theta \approx 0, \phi \approx 0$ ، که سبب جدا شدن حرکت عمودی (heave) از حرکت در صفحه افقی و کاهش مرتبه سیستم به ۴ درجه آزادی می‌شود و  $\eta = [x, y, z, \psi]^T$  در نظر گرفته شده است [۲۵ و ۲۶ و ۲۸]. در سیستم مذکور این فرض در نظر گرفته شده است.

## ۴-۲ نیروهای بازیابی

نیروی وزن، نیروی کشش وسیله زیر آبی است و شناوری نیرویی است که در جهت مخالف نیروی وزن وارد می‌شود که سبب صعود ربات می‌شود. بنابراین اگر شناوری بزرگتر از نیروی وزن باشد، ربات بسمت بالا حرکت کرده و اگر کوچکتر باشد، ربات در حالت مغروق است. برای باقی ماندن وسیله در یک عمق ثابت، این دو نیرو باید دقیقاً با هم برابر باشند. نیروهای تولید شده بعلاوه جاذبه  $(mg)$  و شناوری  $(\rho_W g V_W)$ ، می‌تواند توسط بردار  $g(\eta) \in \mathbb{R}^6$  نشان داده شود:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} \mathcal{R}^T [0 \ 0 \ (\rho_W g V_W - mg)]^T \\ r_f \times \mathcal{R}^T [0 \ 0 \ \rho_W g V_W]^T - r_g \times \mathcal{R}^T [0 \ 0 \ mg]^T \end{bmatrix} \quad (۶-۲)$$

$\mathcal{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  مخفف ماتریس دوران و چرخش است.  $m$  جرم وسیله،  $g$  شتاب جاذبه زمین،  $\rho_W$  چگالی آب،  $V_W$  حجم آب جابجا شده است. بردارهای  $r_g$  و  $r_f$  نمایانگر مرکز شناوری و ثقل در مختصات بدنه می‌باشند [۲۹و۱].

## ۵-۲ نیروها و ماتریس‌های هیدرودینامیکی

با توجه به رنج سرعتی که وسایل زیرآبی با کنترل از راه دور عمل می‌کنند و هرگز از ۲ متر بر ثانیه تجاوز نمی‌کند، نیروهای هیدرودینامیکی توسط معادله مورپسن، بصورت زیر تخمین زده می‌شود [۲۵و۲۶و۲۹]:

$$F_h = \frac{1}{2} C_d \rho_W A |v|v + C_m \rho_W V_W \dot{v} + \rho_W V_W \dot{v}_W \quad (۷-۲)$$

که  $A$  نمایانگر مساحت مرجع ROV،  $\rho_W$  چگالی مایع،  $C_m$  ضریب جرم افزوده،  $V_W$  حجم مایع جابجا شده،  $v$  و  $\dot{v}$  سرعت و شتاب مربوطه بین جسم صلب و مایع و  $\dot{v}_W$  شتاب جریان‌های زیر آبی است.

عبارت آخر معادله (۷-۲) نیروی *Froude-Kryloff* نامیده شده که با توجه به قابل اغماض بودن شتاب جریان‌های زیر آبی در عمق مورد نظر، قابل اغماض می‌باشد. ضریب  $C_m \rho W V_W$  در عبارت دوم، جرم افزوده هیدرودینامیکی نامیده شده و می‌تواند در ماتریس اینرسی  $M$ ، بعنوان جرم‌های افزوده گنجانده شود. اولین عبارت معادله نمایانگر میرایی درجه دو هیدرودینامیک غیرخطی می‌باشد. میرایی بسبب حرکت ROV در مایع توسط ضریب  $C_d$  نشان داده شده است و دارای ویژگی غیرخطی بسبب عبارت  $|v|v$  می‌باشد. میرایی در  $h(v)$  گنجانده می‌شود، که یک ماتریس اکیدا مثبت و حقیقی است. تعیین  $C_m$  و  $C_d$  بصورت تئوری دشوار است و از طریق اندازه‌گیری‌ها و بصورت تجربی مشخص می‌شوند و بطور معمول وابسته به هندسه وسیله می‌باشند.

نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که معادله مورپسن بیانگر اثرات هیدرودینامیکی حاصل از حرکت جسم صلب در مایع، با دقت کافی می‌باشد.

در حالت کلی بدست آوردن مقادیر تحلیلی برای ماتریس‌های مربوط کاری بسیار دشوار است. برای محاسبه ضرایب مرتبط با نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از جرم افزوده و ماتریس میرایی معمولاً از آزمایش‌های عملی در تونل باد بهره می‌گیرند. با در نظر گرفتن این نکته که در ROVها برخلاف AUVها امکان برقراری ارتباط با روی سطح از طریق کابل امکان پذیر است و قابلیت شارژ مداوم منبع انرژی وسیله (باتری‌ها) در حین عملکرد وسیله، وجود دارد. همچنین این وسایل قادر به حرکت با سرعت بالا نمی‌باشند. در نتیجه در اکثر ROVهای صنعتی، طرح هندسی کاملاً هیدرودینامیکی برای وسیله در نظر گرفته نمی‌شود و طرح‌های اغلب این نوع از ربات‌های زیرسطحی مکعب مستطیل شکل با ساختار سازه ای شکل است که موتور-پیشران‌ها و محفظه‌های باتری به بدنه متصل شده‌اند.

در این مدل، بدلیل عملکرد وسیله در عمق بطور معمول بیشتر از ۲۰ متر و در نتیجه قرار گرفتن در زیر منطقه تحت تاثیر موج، نیروها/گشتاورهای ناشی از موج قابل اغماض فرض می‌شوند. تغییر چگالی آب نیز قابل اغماض در نظر گرفته شده است.

## ۲-۵-۱ میرایی درجه دو

تأثیرات میرایی هیدرودینامیک  $h(v)$  بر وسیله بخاطر حرکات چرخشی و خطی است و بصورت زیر در مختصات بدنه جسم توصیف می‌شود:

$$h(v) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} C_{D_x}(v') \rho_W V_W^{\frac{2}{3}} |v'|^2 \\ \frac{1}{2} C_{D_y}(v') \rho_W V_W^{\frac{2}{3}} |v'|^2 \\ \frac{1}{2} C_{D_z}(v') \rho_W V_W^{\frac{2}{3}} |v'|^2 \\ \frac{1}{2} C_{D_{\alpha t}}(v') \rho_W V_W |v'|^2 + \frac{1}{2} C_{D_{\alpha r}} \rho_W V_W^{\frac{5}{3}} p |p| \\ \frac{1}{2} C_{D_{\beta t}}(v') \rho_W V_W |v'|^2 + \frac{1}{2} C_{D_{\beta r}} \rho_W V_W^{\frac{5}{3}} q |q| \\ \frac{1}{2} C_{D_{\gamma t}}(v') \rho_W V_W |v'|^2 + \frac{1}{2} C_{D_{\gamma r}} \rho_W V_W^{\frac{5}{3}} r |r| \end{bmatrix} \quad (۸-۲)$$

که  $v' = [u, v, w]$  یک بردار شامل تنها سه عبارت اول بردار  $v$  یعنی سرعت‌های خطی است. پارامترهای  $C_{D_x}, C_{D_y}, C_{D_z}, C_{D_{\alpha t}}, C_{D_{\alpha r}}, C_{D_{\beta t}}, C_{D_{\beta r}}, C_{D_{\gamma t}}, C_{D_{\gamma r}}$  وابسته به شکل هندسی وسیله بوده و در یک تونل باد یا بصورت آنلاین با الگوریتم‌های تطبیقی در تانک آب محاسبه می‌شوند [۲۹۱].

در وسیله مورد استفاده شده در این بخش، با این فرض که وسیله مورد نظر متقارن و حرکت بدون کوپل باشد و با صرفنظر از میرایی خطی،  $h(v)$  به ماتریس  $h(v) = [125u|u|, 175v|v|, 250w|w|, 12.5r|r|]$  ساده شده است [۲۶].

## ۲-۵-۲ اینرسی افزوده

با در نظر گرفتن عملکرد وسیله زیرآبی در سرعت‌های پایین، ماتریس اینرسی افزوده  $M_A \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  بصورت ماتریس قطری بدست می‌آید، زیرا ترم‌های غیر قطری ماتریس اینرسی جسم صلب وسیله نسبت به مولفه‌های قطری از مرتبه کوچکتری هستند و در این مرحله از شبیه‌سازی دینامیکی می-

توان از آن‌ها صرف‌نظر نمود و در مراحل بعدی در بردار نیروهای اغتشاش وارد شود. بنابراین بصورت زیر تعریف می‌شود [۲۹]:

$$M_A = \text{diag} \{ C_{M_x} \rho_W V_W, C_{M_y} \rho_W V_W, C_{M_z} \rho_W V_W, C_{M_\alpha} \rho_W V_W, C_{M_\beta} \rho_W V_W, C_{M_\gamma} \rho_W V_W \} \quad (9-2)$$

همانند محاسبه میرایی هیدرودینامیکی، ضرایب  $C_{M_x}$ ،  $C_{M_y}$ ،  $C_{M_z}$ ،  $C_{M_\alpha}$ ،  $C_{M_\beta}$  و  $C_{M_\gamma}$  بصورت تجربی محاسبه می‌شوند. ماتریس  $M_A$  در نهایت با ماتریس جرم بدنه صلب ترکیب می‌شود و ماتریس  $M$  موجود در رابطه بدست می‌آید. در وسیله مذکور ماتریس  $M$  بر حسب کیلوگرم بصورت زیر در نظر گرفته شده است [۲۶]:

$$M = \text{diag}\{80,80,100,8\} \quad (10-2)$$

## ۶-۲ نیروهای پیشران

وسایل نقلیه زیر آب، بطور معمول با پیشران‌های پره‌ای الکتریکی مجهزاند. در سرعت‌های پایین، رفتار دینامیکی وسیله تحت تاثیر دینامیک‌های غیرخطی سیستم تراستر قرار دارد. با توجه به رفتار دینامیکی تراستر و با در نظر گرفتن سرعت زاویه ای پروانه ( $\Omega$ ) بعنوان متغیر حالت، مدل مرتبه اول غیرخطی زیر، در نظر گرفته می‌شود [۲۹]:

$$J_{msp} \dot{\Omega} + k_v \Omega |\Omega| = \frac{k_t}{R_m} V_m \quad (11-2)$$

$$F_p = C_T \Omega |\Omega| \quad (12-2)$$

که  $J_{msp}$  اینرسی موتور شفت و پروانه،  $V_m$  ولتاژ ورودی موتور،  $F_p$  نیروی تراستر منتهج از تراسترهای دریایی و  $C_T$  تابعی از نسبت پیشبرد است. ثابت‌های  $k_t$  و  $R_m$  که نمایانگر ثابت گشتاور موتور و مقاومت سیم پیچ هستند، را می‌توان از داده‌ها و اطلاعات موتور به دست آورد. مقادیر  $k_v$  و  $C_T$  وابسته به ویژگی‌های ساختاری هر تراستر است که بطور تجربی بدست می‌آیند.

$F_p \in \mathbb{R}^N$  بردار خروجی سیستم تراستر با دینامیک‌های غیرخطی و کاملاً پیچیده است. علاوه بر این، ارتباط بین گشتاور وارده بر وسیله  $\tau$  و نیرو محرکه پروانه‌ها  $F_p$  نیز بشدت غیرخطی است. بطور معمول، نیروی تراستر و بردار گشتاور، یک تابع پیچیده وابسته به بردار سرعت وسیله  $v \in R^6$  و متغیر کنترل  $\Omega \in \mathbb{R}^N$  خواهد بود. در اینجا  $N$  تعداد ورودی کنترل، بعنوان مثال تعداد تراسترهاست. جزئیات نظری و نتایج آزمایش از رفتار تراسترها دریافت می‌شود. بطور معمول، وسایل زیر آبی توسط موتورهای DC بدون جاروبک رانده می‌شوند. با این فرض که ثابت زمانی دینامیک‌های تراستر بسیار کوچکتر از ثابت زمانی دینامیک‌های وسیله است، یک مدل تراستر استاتیک ساده غالباً استفاده می‌شود. هر نیروی تراستر  $F_p$  متناسب با  $|\Omega|$  است، بطوریکه  $\Omega$  سرعت زاویه ای پروانه تراستر است و متناسب با ولتاژ موتور  $V_m$  می‌باشد. نیروی موثر بر وسیله که توسط هر کدام از  $N$  تراستر تولید می‌شود، در مختصات بدنه جسم توسط نگاشت خطی نشان داده می‌شود [۱ و ۲۶]:

$$\tau = BF_p \quad (۱۳-۲)$$

$B \in \mathbb{R}^{6 \times N}$  یک ماتریس ثابت و معین است که وابسته به وضعیت و پیکر بندی تراسترها بر روی وسیله بوده و نمایانگر توزیع نیروهای تراستر بر روی وسیله است.

## ۷-۲ سیستم موقعیت دینامیکی

برای اهداف کنترلی، مدل دینامیکی وسایل زیرآبی معمولاً با توجه به مرجع مختصات اینرسیال توسط بردار حالت و مکان  $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$  نشان داده می‌شود. بنابراین با بازنویسی رابطه (۲-۲) به شکل زیر:

$$v = J^{-1}(\eta)\dot{\eta} \quad (۱۴-۲)$$

بدست می‌آید:

$$\dot{v} = \dot{J}^{-1}\dot{\eta} + J^{-1}\ddot{\eta} \quad (۱۵-۲)$$

بنابراین معادله حرکت ربات زیرآبی (۱-۲) در مختصات زمین بشکل زیر نوشته می‌شود:

$$\bar{M}\ddot{\eta} + \bar{k} + \bar{h} + \bar{g} + \bar{p} = \bar{\tau} \quad (۱۶-۲)$$

که:

$$\begin{aligned} \bar{M} &= J^{-T}MJ^{-1} \quad , \quad \bar{k} = J^{-T}k + J^{-T}MJ^{-1}\dot{\eta} \quad , \quad \bar{h} = J^{-T}h \quad , \quad \bar{g} = J^{-T}g \quad , \\ \bar{p} &= J^{-T}p \quad , \quad \bar{\tau} = J^{-T}\tau \end{aligned} \quad (۱۷-۲)$$

همانطور که اشاره کردیم پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در شبیه سازی‌های انجام گرفته بر اساس پارامترهای ROV طراحی شده در این تحقیق بر حسب مرجع [۲۶] انتخاب شده و سیستم در حالت ۴ درجه آزادی در نظر گرفته شده است. بنابراین در نهایت معادله بالا بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\ddot{\eta}_i = \bar{m}_i^{-1}(\bar{\tau}_i - \bar{k}_i - \bar{h}_i - \bar{p}_i) ; i = 1,2,3,4 \quad (۱۸-۲)$$

که  $\eta_i, \bar{\tau}_i, \bar{k}_i, \bar{h}_i, \bar{p}_i$  اجزاء  $\eta = [x, y, z, \psi]$  ،  $\bar{\tau}, \bar{k}, \bar{h}, \bar{p}$  بوده و  $\bar{m}_i$  عبارات قطر اصلی ماتریس  $J^{-T}MJ^{-1}$  می‌باشد. عبارات غیرقطری  $J^{-T}MJ^{-1}$  در  $\bar{p}$  گنجانده شده است.

در نتیجه  $\eta$  که مکان و جهت وسیله در هر لحظه در دستگاه مختصات اینرسیال است، محاسبه می‌گردد.

با توجه به قانون کنترل و نیروی کنترل موردنیاز ( $\bar{\tau}$ ) ، نیروی تولیدی از هر تراستربصورت زیر بدست می‌آید:

$$F_p = B^T(BB^T)^{-1}J^{-1}\bar{\tau} \quad (۱۹-۲)$$

$BB^T$  نامنفرد و  $B^T(BB^T)^{-1}$  معکوس کننده ماتریس  $B$  است. با در نظر گرفتن نیروهای پیشران معادله (۱۲-۲)، سرعت زاویه‌ای مربوطه برای هر پروانه به راحتی تخمین زده می‌شود.

در سیستمی که بیان شد انرژی موجود در باتری‌ها توسط یک موتور الکتریکی به محور گرداننده پروانه انتقال یافته و حرکت پروانه، یک نیروی پیشبرنده تولید می‌کند. قدرت دور و فرم پروانه در



میزان ایجاد این نیرو موثر است که بر نیروهای مقاوم بر حرکت وسیله غلبه می‌کند و حرکت را با سرعت و شتاب معین فراهم می‌آورد. این روش، روش مستقیم در حرکت ربات نامیده می‌شود.

روش دیگری نیز تحت عنوان روش غیرمستقیم برای تغییر عمق ربات وجود دارد. در این روش از یک کمپرسور متغیر برای وارد یا خارج ساختن مقدار معینی آب در کمپرسور و در نتیجه تغییر حجم استفاده می‌شود. با تغییر حجم، مرکز شناوری تغییر می‌کند و باعث ایجاد نیروهای رو به بالا یا پایین بر وسیله می‌شود و کنترل بر صعود یا غوص یا ماندن در عمق معین را امکان‌پذیر می‌سازد. برای در نظر گرفتن این روش، نمونه دیگری از ربات‌های زیرآبی مورد توجه قرار گرفته است. هدف از بررسی این ربات حفظ و ردیابی عمق مورد نظر می‌باشد. پارامترها با توجه به ربات هوشمند در نظر گرفته شده است. معادلات حرکت ربات AUV مذکور در راستای محور عمق در روش غیرمستقیم در بخش بعد بیان شده است [۳۰].

## ۸-۲ نمایش فضای حالت حرکت در روش غیرمستقیم

عمق ربات توسط نیروی رو به بالا یا پایین تولید شده از تغییر حجم کمپرسور، تغییر می‌کند. اما از آنجا که متاسفانه هیچ حسگری جهت کنترل حجم وجود ندارد، بنابراین حجم نمی‌تواند به عنوان داده ورودی مورد استفاده قرار گیرد و بجای آن، نیروی فشار کمپرسور بعنوان ورودی سیستم کنترل مورد بررسی قرار می‌گیرد. با در نظر گرفتن متغیر حالت اول به عنوان عمق ربات بر حسب متر، معادله در فضای حالت بصورت زیر نوشته می‌شود [۳۰]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = k_1 \times x_3 - k_2 \times x_2 \times |x_2| \\ \dot{x}_3 = k \times u \end{cases} \quad (27-2)$$

که  $k_1 = \frac{\rho \times g}{m}$  و  $k_2 = \frac{1}{2 \times m} \times \rho \times A \times c_w$  می‌باشد و  $k$  فاکتور انتقال از کمپرسور و  $u$  ورودی

است و در بازه‌ی  $-1 \leq u \leq 1$  قرار دارد.

## ۹-۲ پارامترهای مدل AUV

در واقع پنج پارامتر به توصیف کلی سیستم می پردازد که عبارتند از: وزن ( $m$ )، سطح ( $A$ )، ضریب درگ ربات ( $c_w$ )، عامل انتقال بین موتور و لغزنده ی حجم ( $k$ ) و چگالی آب ( $\rho$ ). مقادیر این پارامترها در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول (۹-۲): پارامترهای ربات [۳۰]

پارامتر	مقدار
$\rho$	$1000 \text{ kg} * \text{m}^{-3}$
$A$	$8 * 10^{-3} \text{ m}^2$
$c_w$	0.75
$m$	0.434kg
$c_{lin}$	0.15
$k$	$2.5 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

## ۱۰-۲ مقایسه روش مستقیم و غیرمستقیم در غوص ربات

بهترین روش غوص ترکیبی از هر دو روش مستقیم و غیرمستقیم است. ویژگی های این دو روش بطور مختصر در جدول (۱۰-۲) آمده است [۳۰].

جدول (۱۰-۲): مقایسه روش مستقیم و غیرمستقیم در غوص ربات

غیرمستقیم	مستقیم
مصرف انرژی صرفاً برای تغییر عمق	مصرف انرژی بطور دائم
نیاز به تانک فشار دارد	نیاز به پروانه دارد
برای کنترل بسیار پیچیده است	راحت کنترل میشود
صعود با جابجایی موتور صورت میگیرد	صعود خودبخود انجام میشود اگر موتور کار نکند



---

## فصل ۳ :

کنترل فازی تطبیقی ترکیبی مقاوم در حضور

اغتصابات خارجی

---

## ۱-۳ مقدمه

کنترل تطبیقی برای کنترل سیستم‌هایی با دینامیک نامشخص بکار می‌رود و وابسته به مدل نیست. در اصل، سیستم تحت کنترل می‌تواند دارای عدم قطعیت ساختاری و پارامتری باشد و هدف اساسی کنترل تطبیقی حفظ عملکرد سیستم کنترل در حضور این عدم قطعیت‌ها است. با این حال، نظریه کنترل تطبیقی متعارف می‌تواند تنها در سیستم‌های با ساختار دینامیکی شناخته شده، اما پارامترهای ناشناخته (پارامترهایی ثابت یا دارای تغییرات آهسته) کاربرد داشته باشد. علاوه بر این، کنترل کننده‌های تطبیقی مرسوم نمی‌توانند از دانش بشر که بصورت متغیرهای زبانی بیان می‌شود، استفاده کند [۳۱ و ۳۲].

کنترل فازی<sup>۱</sup> یکی دیگر از روش‌های وابسته به مدل است که در سیستم‌هایی که مدل دقیق آن‌ها در دسترس نیست و دانش بشری برای ایجاد قوانین کیفی آن‌ها وجود دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، کنترل کننده توسط قوانین اگر-آنگاه فازی حاصل از تجربه بشر، تحلیل می‌شود. کنترل کننده‌های فازی با استفاده از قواعد مدل سازی فازی و یا قوانین کنترل فازی ساخته می‌شوند. قوانین مدل سازی فازی، قواعد اگر-آنگاه فازی‌اند که به توصیف رفتار سیستم تحت کنترل پرداخته و نشان دهنده یک مدل از سیستم می‌باشند. قوانین کنترل فازی به توصیف یک قانون کنترل می‌پردازند [۳۱]. با این حال، در برخی موارد، قوانین فازی کافی منتجه از تجربه کارشناسان، برای ساخت یک کنترل کننده منطق فازی وجود ندارد. علاوه بر این، اگر دینامیک‌های سیستم، بشدت متغیر با زمان باشند، کنترل کننده فازی عملکرد رضایت بخشی ندارد. به همین دلیل، به منظور حفظ عملکرد سازگار و مطمئن، از کنترل کننده‌های فازی تطبیقی استفاده شده است [۳۱].

---

<sup>۱</sup> Fuzzy control (FC)

کنترل‌کننده‌های فازی تطبیقی بر اساس چگونگی انسجام قوانین فازی دسته‌بندی می‌شوند. ونگ یک "کنترل‌کننده فازی مستقیم" پایدار بر اساس قوانین کنترل فازی، و یک "کنترل‌کننده فازی غیر مستقیم" پایدار بر اساس قوانین مدل‌سازی فازی برای سیستم‌های غیرخطی ارائه داده است [۳۱].

بدلیل حضور اغتشاشات خارجی و نویز و تاثیر آن‌ها بر روی پارامترهای سیستم، کنترل فازی تطبیقی باید در مقابل خطای تقریب و اختلالات خارجی مقاوم باشد. به همین دلیل بسیاری از فنون مقاوم از جمله کنترل مود لغزشی گسترش یافته و در بسیاری از این روش‌ها از ترکیب مود لغزشی با منطق فازی استفاده شده است. لو و همکارانشان از کنترل‌کننده مود لغزشی برای تضعیف اثر خطای تقریب حاصل از سیستم فازی و اغتشاشات خارجی استفاده نمودند. اما این روش منجر به تحریک دینامیک-های مدل نشده فرکانس بالا در کنترل شد [۳۳].

یک راه برای بهبود عملکرد سیستم حلقه بسته و مقاوم بودن، پیشنهاد قوانین تطبیقی مرکب می‌باشد که نسبت به کنترل تطبیقی کلاسیک برای سیستم‌های خطی، عملکرد تطبیق سریعتر و نرمتری را از خود نشان می‌دهد [۳۲ و ۳۴]. در مقایسه با کنترل فازی تطبیقی، تطبیق مرکب با بهره‌گیری از هر دو خطای ردیابی و مدلسازی، عملکرد بهتر و همگرایی پارامتر مطلوبتری را فراهم می‌آورد [۳۵].

در این فصل برای افزایش مقاوم بودن سیستم‌های کنترل فازی تطبیقی در مقابل اغتشاشات خارجی و تضمین عملکرد مطلوب در ردیابی مسیر و همگرایی پارامتری، یک طرح تطبیقی مرکب نوین در قوانین تطبیق پیشنهاد شده است و در انتها با ارائه یک تابع لیاپانوف پیشنهادی، پایداری سیستم حلقه بسته نشان داده می‌شود.

بطور کلی این فصل بدین ترتیب سازماندهی می‌شود: در بخش دوم، سیستم‌های منطق فازی به عنوان تخمینگر، معرفی می‌شوند. در بخش سوم، ما به ساخت یک کنترل‌کننده با استفاده از سیستم‌های فازی تطبیقی می‌پردازیم و یک قانون تطبیقی مرکب برای تنظیم پارامترهای آن پیشنهاد می‌دهیم. در بخش چهارم، عملکرد سیستم تطبیقی ترکیبی پیشنهادی با استفاده از روش لیاپانوف تجزیه و

تحلیل شده است. در بخش پنجم نتایج حاصل از شبیه سازی بر روی سیستم مرتبه سه کنترل عمق یک ربات زیرآبی هوشمند ارائه شده است و نتایج مقایسه این روش با روش کلاسیک مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲-۳ سیستم‌های منطق فازی

در این بخش بطور خلاصه در مورد سیستم‌های منطق فازی برای تخمین توابع غیرخطی صحبت می‌کنیم که یک نگاشت از  $U \subset R^n$  به  $R$  را انجام می‌دهد. بطوری که  $U_i \subset R^n, (i = 1, 2, \dots, n)$ ،  $U = U_1 \times \dots \times U_n$  می‌باشند. یک مجموعه فازی  $F$  از  $U$ ، توسط یک تابع عضویت  $\mu_F: U \rightarrow [0, 1]$  مشخص می‌شود. بطور کلی سیستم‌های منطق فازی از ۴ قسمت شامل فازی‌ساز، پایگاه قواعد فازی، موتور استنتاج فازی و غیرفازی‌ساز تشکیل شده‌اند [۳۱].

پایگاه قواعد فازی متشکل از قواعد اگر- آنگاه فازی بصورت زیر می‌باشد:

$R^l$ : اگر  $x_1, x_2, \dots, x_n$  و  $F_n^l$  باشد، آنگاه  $y, G^l$  است.

که  $\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in U$  ورودی سیستم منطق فازی و  $y \in R$  خروجی آن است.  $G^l$  و  $F_i^l$  مجموعه‌های فازی در  $U_i (i = 1, 2, \dots, n)$  و  $R$  هستند.  $M$  که  $l=1, 2, \dots, M$  تعداد قواعد اگر- آنگاه در پایگاه قوانین فازی است. در قسمت موتور استنتاج فازی، اصول منطق فازی برای ترکیب قواعد استفاده می‌شوند. فازی‌ساز بعنوان نگاشتی از یک نقطه  $\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in U$  به یک مجموعه فازی در  $U$  تعریف شده است. حداقل دو انتخاب ممکن برای فازی‌ساز داریم: فازی‌ساز منفرد و فازی-ساز غیرمنفرد بدلیل سادگی و محاسبات کمتر غالباً از فازی‌ساز منفرد استفاده شده است. غیرفازی‌ساز بعنوان یک نگاشت از مجموعه فازی در  $R$  به یک نقطه قطعی در  $R$  تعریف می‌گردد. روش معمول مورد استفاده در غیرفازی‌ساز، میانگین مراکز است [۳۱].

در سیستم منطق فازی با استفاده از مدل استنتاج فازی ضرب، فازی ساز منفرد و غیر فازی ساز میانگین مراکز داریم:

$$y(\underline{x}) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l \left[ \prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right]}{\sum_{l=1}^M \left[ \prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right]} \quad (1-3)$$

به منظور افزودن دقت تقریب،  $\mu_{F_i^l}$ ها را ثابت در نظر گرفته و  $\bar{y}^l$ ها را بعنوان پارامترهای قابل تنظیم در نظر گرفته ایم. بنابراین، فرمول قبل را بدین شکل می توانیم بنویسیم:

$$y(\underline{x}) = \underline{\theta}^T \underline{\xi}(\underline{x}) \quad (2-3)$$

که  $\underline{\theta} = (\theta^1, \theta^2, \dots, \theta^M)^T \triangleq (\bar{y}^1, \bar{y}^2, \dots, \bar{y}^M)$  بردار پارامترهاست و توابع پایه فازی بشکل زیر تعریف می شوند:

$$\xi^j(\underline{x}) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^j}(x_i)}{\sum_{l=1}^M \left[ \prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right]}, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (3-3)$$

سیستم منطق فازی (۲-۳) قادر به تخمین هر تابع پیوسته حقیقی غیر خطی می باشد [۳۱].

### ۳-۳ نمایش سیستم

سیستم تحت کنترل مرتبه  $n$  بفرم زیر در نظر گرفته می شود:

$$\dot{x}^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + g(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})u + d(t) \quad (4-3)$$

$$y = x \quad (5-3)$$

فرض کرده ایم توابع  $f$  و  $g$  توابع پیوسته حقیقی محدود اما نامعلوم باشند؛  $d$  اغتشاش خارجی سیستم

می باشد که نامشخص اما محدود است؛  $u \in R$  و  $y \in R$  ورودی و خروجی سیستم و  $\underline{x} =$

$(x_1, x_2, \dots, x_n)^T = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T \in R^n$  بردار حالت سیستم است که در دسترس و

مشخص می باشد. برای آنکه سیستم کنترل پذیر باشد باید برای تمام مقادیر  $\underline{x}$  مورد نظر،  $g(\underline{x}) \neq 0$



باشد. باتوجه به اینکه  $g(\underline{x})$  پیوسته است، بدون از دست دادن عمومیت، فرض می‌کنیم که برای تمام مقدار  $\underline{x} \in U_c$ ،  $g(\underline{x}) > 0$  باشد.

## ۴-۳ هدف کنترل

ابتدا هدف کنترل، پیدا کردن یک قانون کنترل پسخورد<sup>۱</sup>  $u = u(\underline{x}, t)$  است، بطوریکه خروجی سیستم یعنی  $y$ ، خروجی ایده‌آل  $y_m$  را تا حد امکان دنبال کند. خطای ردیابی خروجی  $e = y_m - y$ ، بردار حالت خطا  $\underline{e} = (e, \dot{e}, \dots, e^{n-1})^T = (e_1, e_2, \dots, e_n)^T \in R^n$ ، بردار خطای پارامتری  $\underline{\phi} = \underline{\theta}^* - \underline{\theta}$  تعریف می‌شوند که  $\underline{\theta}$  بردار دسته‌ای از پارامترهای تخمین زده شده‌ی سیستم منطق فازی (۲-۳) و  $\underline{\theta}^*$  بردار پارامتر بهینه سیستم منطق فازی است.  $\underline{k} = (k_1, \dots, k_n)^T \in R^n$  را بگونه‌ای قرار می‌دهیم که تمام ریشه‌های معادله  $h(p) = p^n + k_n p^{(n-1)} + \dots + k_1 = 0$  در نیمه باز چپ صفحه مختلط باشد. پس مسئله مورد نظر، طراحی یک قانون کنترل است بطوریکه اهداف زیر را تامین کند [۳۱ و ۳۲]:

(۱) سیستم حلقه بسته بطور کلی پایدار باشد و تمام متغیرهای  $\underline{\phi}$ ،  $\underline{\theta}$ ،  $\underline{e}$ ،  $\underline{x}$  و  $u$ ، در حضور تخمین سیستم منطق فازی و اغتشاشات خارجی کراندار باشند. علاوه بر این، خطای ردیابی تا حد ممکن کوچک باشد.

(۲) در غیاب خطای تقریب سیستم فازی و اغتشاشات خارجی، ردیابی پایدار مجانبی زیر حاصل آید:

$$e^{(n)} + k_n e^{(n-1)} + \dots + k_1 e = 0 \quad (۶-۳)$$

و بردار پارامتری تخمین زده شده  $\underline{\theta}$ ، به بردار پارامتری بهینه  $\underline{\theta}^*$  همگرا شود. ( $t \rightarrow \infty$ )  
بخش بعد به ارائه قانون کنترلی پرداخته شده است که دوهدف کنترلی گفته شده در بالا را برآورده ساخته است.

<sup>۱</sup> feedback

## ۵-۳ کنترل کننده فازی تطبیقی

در فضای بردار حالت خطا، تعریف زیر استفاده شده است [۳۶]:

$$s = \underline{c}^T e \quad (۷-۳)$$

که  $\underline{c} = (c_1, c_2, \dots, c_{n-1}, 1)^T$  بطوریکه تمام ریشه‌های  $h(p) = p^{n-1} + c_{n-1}p^{n-2} + \dots + c_2p + c_1 = 0$  در نیمه باز چپ صفحه مختلط واقع شده‌اند.

اکنون مسئله‌ی کنترل سیستم (۳-۴) را در نظر بگیرد. اگر دینامیک‌های دستگاه شناخته شده باشد و  $d=0$  باشد، آنگاه ورودی کنترل بصورت زیرانتخاب می‌شود:

$$u^* = \frac{1}{g(\underline{x})} [-f(\underline{x}) + y_m^{(n)} + k_d s + \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1}] \quad (۸-۳)$$

$k_d$  یک پارامتر ثابت و مثبت است و بگونه‌ای انتخاب شده است که تمام ریشه‌های معادله‌ی:

$$h(p) = p^n + (k_d + c_{n-1})p^{n-1} + (k_d c_{n-1} + c_{n-2})p^{n-2} + \dots + (k_d c_2 + c_1)p + k_d c_1 = 0 \quad (۹-۳)$$

در نیمه باز چپ صفحه مختلط واقع شوند. زیرا با قرار دادن قانون کنترل (۳-۸) در (۳-۴) دینامیک‌های خطای زیر نتیجه می‌شود:

$$e^{(n)} + (k_d + c_{n-1})e^{(n-1)} + \dots + (k_d c_2 + c_1)\dot{e} + k_d c_1 e = 0 \quad (۱۰-۳)$$

$$\Rightarrow e^{(n)} + k_n e^{(n-1)} + \dots + k_1 e = 0 \quad (۱۱-۳)$$

که در نتیجه  $\underline{k} = (k_1, \dots, k_n)^T = (k_d c_1, k_d c_2 + c_1, \dots, k_d c_{n-1} + c_{n-2}, k_d + c_{n-1})^T$

خواهیم داشت  $\lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| = 0$ ، و ردیابی مسیر مرجع بطور مجانبی تامین می‌شود.

اما از آنجا که  $f$  و  $g$  توابعی نامعلوم و  $d$  مخالف صفر می‌باشد، لذا کنترل کننده ایده آل (۳-۸) نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین از تخمین‌های این توابع توسط سیستم‌های منطق فازی استفاده

می‌کنیم. حال برای حضور دینامیک  $d$  در داخل سیستم فازی،  $f_T := f + d$  را تعریف نموده و در نتیجه با در نظر گرفتن کلی عدم قطعیت‌ها، به تخمین توابع  $f_T$  و  $g$  بر اساس رابطه (۳-۱) پرداخته و روابط زیر را داریم:

$$\hat{f}(x|\underline{\theta}_f) = \underline{\theta}_f^T \underline{\xi}(x) \quad \text{و} \quad \hat{g}(x|\underline{\theta}_g) = \underline{\theta}_g^T \underline{\xi}(x) \quad (۱۲-۳)$$

$\underline{\theta}_f$  و  $\underline{\theta}_g$  بردارهای پارامتری سیستم‌های منطق فازی  $\hat{f}$  و  $\hat{g}$  می‌باشند که از مراکز مجموعه‌های فازی، در قسمت قواعد اگر-آنگاه فازی، تشکیل شده‌اند. مرکز مجموعه فازی نقطه ای است که توابع عضویت به حداکثر مقدار خود می‌رسند.  $\underline{\xi}(x)$  بردار پایه فازی است که از رابطه (۳-۳) حاصل می‌آید [۳۱].

حال با جاگذاری سیستم‌های فازی تخمینی در رابطه (۳-۸)، کنترل کننده معادل بصورت زیر بدست می‌آید:

$$u_c = \frac{1}{\hat{g}(x|\underline{\theta}_g)} \left[ -\hat{f}(x|\underline{\theta}_f) + y_m^{(n)}(t) + k_d s + \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1} \right] \quad (۱۳-۳)$$

از رابطه فوق، داریم:

$$y_m^{(n)} = \hat{f}(x|\underline{\theta}_f) + \hat{g}(x|\underline{\theta}_g) u_c - k_d s - \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1} \quad (۱۴-۳)$$

با توجه به خطای ردیابی  $e = y_m - y$  و در نتیجه  $e^n = y_m^n - y^n = y_m^n - x^n$  و روابط (۳-۳)

(۱۴) و (۳-۴)، معادله حلقه بسته دینامیک خطای ردیابی بشکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$e^{(n)} = -k_d s - \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1} + \left[ \hat{f}(x|\underline{\theta}_f) - f(x) - d \right] + \left[ \hat{g}(x|\underline{\theta}_g) - g(x) \right] u_c \quad (۱۵-۳)$$

اکنون به تعریف بردارهای پارامتر بهینه می‌پردازیم:

$$\underline{\theta}_f^* = \arg \min_{\underline{\theta}_f \in \Omega_{\theta_f}} \left[ \sup_{x \in \Omega_x} \left| \hat{f}(x|\underline{\theta}_f) - f(x) \right| \right] \quad (۱۶-۳)$$

$$\underline{\theta}_g^* = \arg \min_{\underline{\theta}_g \in \Omega_{\theta_g}} \left[ \sup_{\underline{x} \in \Omega_x} \left| \hat{g}(\underline{x} | \underline{\theta}_g) - g(\underline{x}) \right| \right] \quad (17-3)$$

$\Omega_{\theta_f}$ ،  $\Omega_{\theta_g}$  و  $\Omega_x$  مجموعه‌های محدود و مناسب بر روی  $\underline{\theta}_f$  و  $\underline{\theta}_g$  و  $\underline{x}$  هستند. از آنجا که در قانون کنترل از معکوس  $\underline{\theta}_g$  استفاده شده پس مجموعه حاوی این پارامترها بدین صورت تعریف می‌گردد:

$$\Omega_g \triangleq \{ \underline{\theta}_g = (\underline{\theta}_g^1, \underline{\theta}_g^2, \dots, \underline{\theta}_g^M)^T \in R^M \mid \underline{\theta}_g^l \geq \delta > 0; l = 1, 2, \dots, M \} \quad (18-3)$$

$\delta$  یک پارامتر مثبت است.

بنابراین  $\hat{f}(\underline{x} | \underline{\theta}_f^*)$  و  $\hat{g}(\underline{x} | \underline{\theta}_g^*)$  بهترین تقریب‌گرهای  $f_T(\underline{x})$  و  $g(\underline{x})$  در میان همه سیستم‌های فازی می‌باشند. خطای تقریب حداقل<sup>۱</sup> بدین شکل تعریف شده است:

$$w = w(\underline{x}, \underline{\theta}_f, \underline{\theta}_g, t) \triangleq [\hat{f}(\underline{x} | \underline{\theta}_f^*) - f_T(\underline{x})] + [\hat{g}(\underline{x} | \underline{\theta}_g^*) - g(\underline{x})] u_c \quad (19-3)$$

توجه داریم که بردارهای  $\underline{\theta}_f^*$ ،  $\underline{\theta}_g^*$  تنها برای اهداف تحلیلی مورد نیاز بوده و مقادیر دقیقشان مورد نیاز نمی‌باشد. با استفاده از رابطه (۱۹-۳)، معادله (۱۵-۳) بشکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$e^{(n)} = -k_d s - \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1} + \left[ [\hat{f}(\underline{x} | \underline{\theta}_f) - \hat{f}(\underline{x} | \underline{\theta}_f^*)] + [\hat{g}(\underline{x} | \underline{\theta}_g) - \hat{g}(\underline{x} | \underline{\theta}_g^*)] u_c \right] + w \quad (20-3)$$

از رابطه (۷-۳)، مشتق واحد خطای ردیابی بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\dot{s} = e^{(n)} + \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1} \quad (21-3)$$

از رابطه (۲۰-۳) و (۲۱-۳) داریم:

$$\dot{s} = -k_d s + [\hat{f}(\underline{x} | \underline{\theta}_f) - f(\underline{x}) - d] + [\hat{g}(\underline{x} | \underline{\theta}_g) - g(\underline{x})] u_c \quad (22-3)$$

$$\dot{s} = -k_d s + \left[ [\hat{f}(\underline{x} | \underline{\theta}_f) - \hat{f}(\underline{x} | \underline{\theta}_f^*)] + [\hat{g}(\underline{x} | \underline{\theta}_g) - \hat{g}(\underline{x} | \underline{\theta}_g^*)] u_c \right] + w \quad (23-3)$$

<sup>۱</sup> minimum approximation error

$$\dot{s} = -k_d s + \underline{\xi}^T(\underline{x}) \underline{\phi}_f + \underline{\xi}^T(\underline{x}) \underline{\phi}_g u_c + w \quad (21) \quad (24-3)$$

که  $\underline{\phi}_g = \underline{\phi}_g(t) \triangleq \underline{\theta}_g(t) - \underline{\theta}_g^*$  و  $\underline{\phi}_f = \underline{\phi}_f(t) \triangleq \underline{\theta}_f(t) - \underline{\theta}_f^*$  می‌باشد.

وظیفه بعدی ما پیدا کردن یک قاعده تعدیل برای  $\underline{\theta}_g$  و  $\underline{\theta}_f$  می‌باشد، بطوریکه خطای ردیابی  $e$  حداقل گردد.

### ۳-۶ قوانین تطبیق

در این قسمت، یک الگوریتم تطبیقی برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده (۳-۱۳) پیشنهاد داده‌ایم. هدف تنظیم پارامترها بگونه‌ای است که به مقدار بهینه‌شان همگرا شوند ( $\underline{\theta}_f \rightarrow \underline{\theta}_f^*$ ,  $\underline{\theta}_g \rightarrow \underline{\theta}_g^*$ ) که در نتیجه  $\hat{f}(\underline{x}|\underline{\theta}_f)$  و  $\hat{g}(\underline{x}|\underline{\theta}_g)$  تخمین خوبی برای  $f_T(\underline{x})$  و  $g(\underline{x})$  خواهند بود و  $u_c \rightarrow u^*$ .

در کنترل کننده طرح کلاسیک و مرسوم، بردارهای پارامتری  $\underline{\theta}_f$  و  $\underline{\theta}_g$  متناسب با قوانین زیر به روز می‌شوند [۴۹]:

$$\dot{\underline{\theta}}_f = -\gamma_1 \underline{\xi}_f(\underline{x}) \underline{c}^T \underline{e} = -\gamma_1 s \underline{\xi}_f(\underline{x}) \quad (25-3)$$

$$\dot{\underline{\theta}}_g = -\gamma_2 \underline{\xi}_g(\underline{x}) \underline{c}^T \underline{e} u = -\gamma_2 s \underline{\xi}_g(\underline{x}) u_c \quad (26-3)$$

$\gamma_1$  و  $\gamma_2$  ضرایب تطبیقی می‌باشند.

این قوانین گویای این مطلب می‌باشند که پارامترهای سیستم فازی به نسبت مقدار فاصله از ابرصفحه‌ی  $s = \underline{c}^T \underline{e} = 0$  تغییر می‌کنند. بدین معنا که پارامترها تا زمانی که  $s \neq 0$  باشند، تنظیم می‌شوند. اما متمایل شدن خطاهای ردیابی بسمت صفر، لزوماً به معنای  $\underline{\phi}_f \rightarrow \underline{0}$  و  $\underline{\phi}_g \rightarrow \underline{0}$  نخواهد بود. در حقیقت این قانون تنها می‌تواند خطاهای پارامتری ( $\underline{\phi}_g$  و  $\underline{\phi}_f$ ) را از طریق تاثیرشان بر معیار خطای ردیابی کاهش دهد و این لزوماً به معنای همگرایی پارامترها به مقادیر بهینه پارامتری نمی‌باشد. یک ایده غلبه بر چنین رفتار مزاحم، ترکیب منابع مختلف اطلاعات در تطبیق پارامترها است. با

برگرفتن از ایده حضور خطای پیش‌بین در مراجع [۳۷ و ۳۵] و تعریف آن بصورت رابطه (۳-۲۷)، به اصلاح قوانین تطبیق پرداخته شده است.

خطای پیش‌بین  $\varepsilon$  بصورت زیر تعریف می‌شود [۳۷ و ۳۵]:

$$\varepsilon = \varepsilon(t) \triangleq [\hat{f}(\underline{x}|\underline{\theta}_f) - f(\underline{x}) - d] + [\hat{g}(\underline{x}|\underline{\theta}_g) - g(\underline{x})] u_c \quad (۳-۲۷)$$

که بصورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\varepsilon = \underline{\xi}^T(\underline{x})\underline{\phi}_f + \underline{\xi}^T(\underline{x})\underline{\phi}_g u_c + w \quad (۳-۲۸)$$

با توجه به روابط (۳-۲۸) و (۳-۲۴)، خطای پیش‌بین معادل رابطه زیر می‌باشد:

$$\varepsilon = \dot{s} + k_d s \quad (۳-۲۹)$$

اکنون بر اساس بحث فوق، قوانین تطبیقی مرکب زیر را با بهره‌گیری از خطاهای ردیابی و خطای پیش‌بین پیشنهاد داده می‌شود:

$$\dot{\underline{\theta}}_f = -\gamma_1(\varepsilon + \gamma s)\underline{\xi}(\underline{x}) \quad (۳-۳۰)$$

$$\dot{\underline{\theta}}_g = -\gamma_2(\varepsilon + \gamma s)\underline{\xi}(\underline{x})u_c \quad (۳-۳۱)$$

$\gamma_1$ ،  $\gamma_2$  و  $\gamma$  پارامترهایی مثبت هستند که در این پایان نامه با روش سعی و خطا محاسبه شده‌اند.

بر طبق رابطه (۳-۲۸)، روابط (۳-۳۰) و (۳-۳۱) بشکل زیر بازنویسی شده‌اند:

$$\dot{\underline{\theta}}_f = -\gamma_1[(\dot{s} + k_d s) + \gamma s]\underline{\xi}(\underline{x}) \quad (۳-۳۲)$$

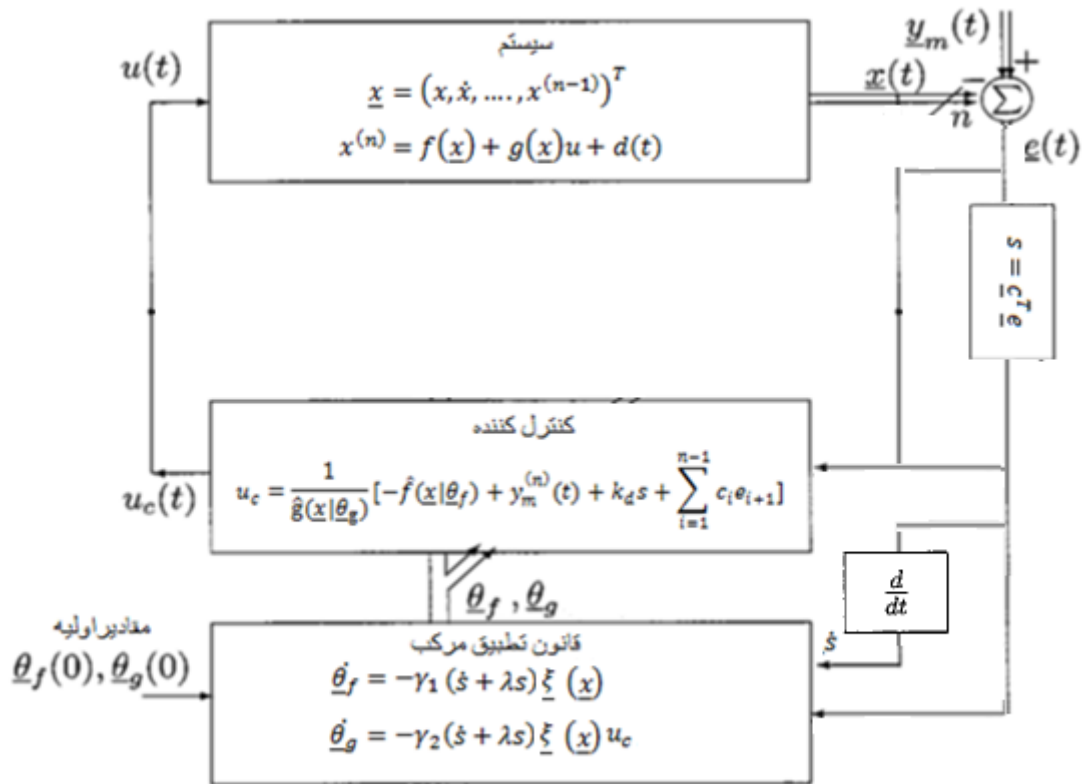
$$\dot{\underline{\theta}}_g = -\gamma_2[(\dot{s} + k_d s) + \gamma s]\underline{\xi}(\underline{x})u_c \quad (۳-۳۳)$$

با تعریف  $\lambda = k_d + \gamma$  و روابط بالا داریم:

$$\dot{\underline{\theta}}_f = -\gamma_1(\dot{s} + \lambda s)\underline{\xi}(\underline{x}) \quad (۳-۳۴)$$

$$\dot{\underline{\theta}}_g = -\gamma_2(\dot{s} + \lambda s)\underline{\xi}(\underline{x})u_c \quad (۳-۳۵)$$

در تنظیم پارامترها از قوانین (۳۴-۳) و (۳۵-۳) بهره جسته‌ایم. بطور کلی طرح کنترل پیشنهادی در شکل (۱-۳) نشان داده شده است. در بخش بعد پایداری سیستم حلقه بسته با قوانین تطبیق فوق، با ارائه تابع لیپانوف مناسب نشان داده شده است.



شکل (۱-۳): طرح کلی سیستم کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی

### ۷-۳ تضمین پایداری

با در نظر گرفتن روابط (۳۴-۳) و (۳۵-۳)، برای نشان دادن پایداری سیستم از تابع لیپانوف پیشنهادی بصورت زیر استفاده شده است:

$$V = \frac{\lambda + k_d}{2} s^2 + k_d^2 \int_0^t s^2 dt + \int_0^t \dot{s}^2 dt + \frac{1}{2\gamma_1} \underline{\phi}_f^T \underline{\phi}_f + \frac{1}{2\gamma_2} \underline{\phi}_g^T \underline{\phi}_g \quad (۳۶-۳)$$

همانطور که قبلا نیز اشاره نمودیم پارامترهای  $\lambda$ ،  $k_d$ ،  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$  مثبت‌اند و در نتیجه تابع لیپانوف پیشنهادی، تابعی مثبت معین است.

با محاسبه مشتق تابع لیاپانوف (۳-۳۶) نسبت به زمان و دانستن این مطلب که  $\dot{\underline{\theta}}_g = \underline{\dot{\theta}}_g$  ،  $\dot{\underline{\theta}}_f = \underline{\dot{\theta}}_f$  (زیرا  $\underline{\theta}_f^*$  و  $\underline{\theta}_g^*$  ثابت‌اند و متغیر با زمان نیستند.)، داریم:

$$\dot{V} = \frac{dV(t)}{dt} = (\lambda + k_d)s\dot{s} + k_d^2 s^2 + \dot{s}^2 + \frac{1}{\gamma_1} \underline{\phi}_f^T \underline{\dot{\theta}}_f + \frac{1}{\gamma_2} \underline{\phi}_g^T \underline{\dot{\theta}}_g \quad (37-3)$$

همانطور که در بخش قبل گفتیم  $\lambda = k_d + \gamma$  تعریف شد. از این تعریف رابطه  $k_d^2 = \lambda k_d - \gamma k_d$  بدست می‌آید. با توجه به این رابطه و جایگذاری آن در رابطه (۳-۳۷) داریم:

$$\dot{V} = (\lambda + k_d)s^2 + \lambda k_d s^2 + \dot{s}^2 - \gamma k_d s^2 + \frac{1}{\gamma_1} \underline{\phi}_f^T \underline{\dot{\theta}}_f + \frac{1}{\gamma_2} \underline{\phi}_g^T \underline{\dot{\theta}}_g \quad (38-3)$$

$$\Rightarrow \dot{V} = (\dot{s} + \lambda s)(\dot{s} + k_d s) - \gamma k_d s^2 + \frac{1}{\gamma_1} \underline{\phi}_f^T \underline{\dot{\theta}}_f + \frac{1}{\gamma_2} \underline{\phi}_g^T \underline{\dot{\theta}}_g \quad (39-3)$$

با استفاده از رابطه (۳-۲۴)، رابطه فوق را به شکل زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$\dot{V} = -\gamma k_d s^2 + (\dot{s} + \lambda s) \left( \underline{\xi}^T(\underline{x}) \underline{\phi}_f + \underline{\xi}^T(\underline{x}) \underline{\phi}_g u_c + w \right) + \frac{1}{\gamma_1} \underline{\phi}_f^T \underline{\dot{\theta}}_f + \frac{1}{2\gamma_2} \underline{\phi}_g^T \underline{\dot{\theta}}_g \quad (40-3)$$

$$\Rightarrow \dot{V} = -\gamma k_d s^2 + \underline{\phi}_f^T \left( \frac{\underline{\dot{\theta}}_f}{\gamma_1} + (\dot{s} + \lambda s) \underline{\xi}^T(\underline{x}) \right) + \underline{\phi}_g^T \left( \frac{\underline{\dot{\theta}}_g}{\gamma_2} + (\dot{s} + \lambda s) \underline{\xi}^T(\underline{x}) u_c \right) + (\dot{s} + \lambda s) w \quad (41-3)$$

همانطور که ملاحظه شده است از رابطه فوق، قوانین تطبیق (۳-۳۴) و (۳-۳۵) بدست آمده و می‌نویسیم:

$$\dot{V} = -\gamma k_d s^2 + (\dot{s} + \lambda s) w \quad (42-3)$$

با در نظر گرفتن تعداد قواعد کافی برای سیستم‌های فازی  $\hat{f}(\underline{x}|\underline{\theta}_f)$  و  $\hat{g}(\underline{x}|\underline{\theta}_g)$  می‌توان بطور قراردادی  $w$  را بسیار کوچک در نظر گرفت و در نتیجه  $|\gamma k_d s^2| \ll (\dot{s} + \lambda s) w$  خواهد بود و رابطه (۳-۴۲) بصورت زیر نوشته می‌شود:



$$\dot{V} \approx -\gamma k_d s^2 \leq 0$$

(۴۳-۳)

## ۸-۳ آنالیز عملکرد

در این جا به نتایج حاصل از بررسی رابطه (۴۳-۳) پرداخته‌ایم.

۱- با توجه به مثبت معین بودن  $V$  و منفی نیمه معین بودن  $\dot{V}$ ، پایداری سیستم تضمین شده است.  
 ۲-  $\dot{V}$  منفی نیمه معین است، در نتیجه  $V$  همگرا و کراندار است که از رابطه (۳۶-۳) نتیجه می‌شود پارامترهای  $s, \dot{s}, \phi_f, \phi_g$  کراندار هستند. همچنین بر طبق رابطه (۱۲-۳)،  $\xi(\underline{x})$  کراندار است زیرا هر کدام از عبارات آن بزرگتر از ۱ نیست. همانطور که قبلاً بیان کردیم با مقدار دهی مناسب شرایط اولیه و قانون تطبیق،  $\hat{\theta}_g \geq \delta > 0$  تضمین شده و از آنجا که  $\hat{g}(\underline{x}|\underline{\theta}_g)$  میانگین وزنی پارامترهای  $\underline{\theta}_g$  است، داریم  $\hat{g}(\underline{x}|\underline{\theta}_g) \geq \delta > 0$ . بنابراین با فرض کراندار بودن  $y_m^{(n)}$  و فرمول (۱۴-۳)، نتیجه می‌شود  $u_c$  کراندار است. از رابطه (۱۹-۳) و کراندار بودن تمامی عبارات سمت راست آن، کراندار بودن  $w \in \ell_\infty$  ضمانت شده است. راه دیگر اثبات کراندار بودن  $\dot{s}$ ، این است که با توجه به رابطه (۲۴-۳) و کراندار بودن تمام متغیرهای سمت راست، نتیجه می‌گیریم که  $\dot{s} \in \ell_\infty$ . بنابراین، تمام متغیرها در سمت راست عبارات قوانین تطبیق کرندار بوده و  $\underline{x}, \underline{\theta}_f, \underline{\theta}_g$  کراندار هستند.

## ۹-۳ بررسی طرح پیشنهادی بر روی سیستم کنترل عمق AUV

در این بخش کنترل کننده فازی تطبیقی پیشنهادی برای کنترل سیستم حرکت در جهت عمودی یک ربات زیرآبی هوشمند در نظر گرفته شده است. مدل دینامیکی سیستم در حضور اغتشاش خارجی در فصل قبل آورده شده است.

جهت محاسبه توابع پایه‌ای فازی، دو سیستم فازی طراحی شده است که  $\dot{e}$  و  $e + k_1 \dot{e}$  ورودی‌های سیستم فازی می‌باشند. ثابت  $k_1$  توسط طراح تعیین می‌شود. اگر ۳ تابع تعلق برای هر ورودی فازی در نظر گرفته شود فضای کنترل با  $3 \times 3 = 9$  قانون فازی پوشش داده می‌شود. مزیت این روش نسبت

به حالتی که سه ورودی  $e$ ،  $\dot{e}$  و  $\ddot{e}$  را بصورت جداگانه برای سیستم فازی در نظر گرفته شود، در کاهش تعداد قوانین استفاده شده می‌باشد و در نتیجه سرعت سیستم افزایش می‌یابد. در این مورد، قوانین از ۲۷ به ۹ تا کاهش یافته است. قوانین فازی زبانی بفرم ممدانی بدین صورت نوشته شده‌اند [۳۱]:

قانون  $l$  ام: اگر  $\dot{e}$ ،  $A_l$  و  $e + k_1\dot{e}$ ،  $B_l$  باشد، آنگاه  $f$ ،  $C_l$  است. (۴۴-۳)

قانون  $l$  ام: اگر  $\dot{e}$ ،  $A_l$  و  $e + k_1\dot{e}$ ،  $B_l$  باشد، آنگاه  $\hat{g}$ ،  $C_l$  است. (۴۵-۳)

قوانین بالا به  $l$  ام قانون فازی اشاره دارد و  $l = 0, 1, \dots, L$  می‌باشد.  $A_l$  و  $B_l$  ترم‌های زبانی مقدم مربوط به ورودی‌های سیستم فازی بوده و  $C_l$  برچسب مربوط به نتیجه قانون  $l$  ام می‌باشد.  $A_l$ ،  $B_l$  و  $C_l$  توابع تعلق فازی مربوط به  $\dot{e}$ ،  $e + k_1\dot{e}$  و  $\hat{f}$  یا  $\hat{g}$  هستند. سه گروه فازی به صورت  $Z$ ،  $P$  و  $N$  برای هر متغیر ورودی مطابق شکل (۲-۳) در نظر گرفته شده است. در شکل (۲-۳) توابع عضویت برای ورودی  $\dot{e}$  را بعنوان نمونه نشان داده شده است. این توابع تعلق با توابع ریاضی داده شده بصورت زیر تعریف شده‌اند.

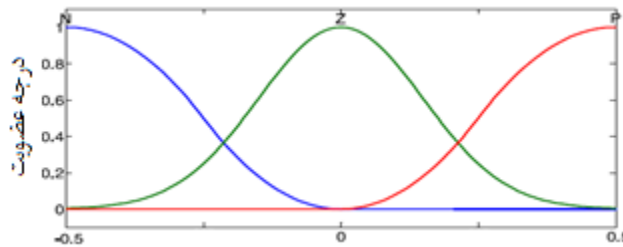
$$\mu_P(\dot{e}) = \begin{cases} 0 & \dot{e} \leq 0 \\ 2\dot{e}^2 & 0 \leq \dot{e} \leq 0.5 \\ 1 - 2(\dot{e} - 1)^2 & 0.5 \leq \dot{e} \leq 1 \\ 1 & 1 \leq \dot{e} \end{cases}$$

$$\mu_N(\dot{e}) = \begin{cases} 1 & \dot{e} \leq -1 \\ 1 - 2(\dot{e} + 1)^2 & -1 \leq \dot{e} \leq -0.5 \\ 2\dot{e}^2 & -0.5 \leq \dot{e} \leq 0 \\ 0 & 0 \leq \dot{e} \end{cases} \quad (۴۶-۳)$$

$$\mu_Z(\dot{e}) = \exp\left(-\frac{\dot{e}^2}{2\sigma^2}\right), \sigma = 0.3$$

سیستم فازی بگونه‌ای طراحی می‌شود که شرایط پیوستگی، سازگاری و کامل بودن را برقرار نماید [۳۱]. پیوستگی بدین معناست که خروجی سیستم فازی ناپیوسته نباشد. سازگاری به این مفهوم است که دو یا چند قانون فازی نتوان یافت که بخش آنگاه یکسان داشته باشند. کامل بودن بدین صورت است که به ازای هر مقدار از ورودی‌ها در بازه مورد نظر حداقل یک قانون فازی فعال شود.

گروه‌های فازی هر متغیر فازی نیز باید کل بازه موردنظر را پوشش دهند و به ازای هر مقدار از متغیر ورودی حداقل یک گروه فازی باید فعال شود.



شکل (۳-۲): توابع تعلق مربوط به ورودی  $\dot{e}$

توابع تعلق  $e + k_1\dot{e}$  را نیز همانند توابع تعلق  $\dot{e}$  انتخاب نموده‌ایم. با استفاده از فازی‌ساز منفرد، موتور استنتاج ممدانی و غیرفازی‌ساز میانگین مراکز برای محاسبه‌ی خروجی در کنترل‌کننده‌ی فازی، خواهیم داشت:

$$\hat{f} = \sum_{l=1}^9 \hat{\theta}_f^l \underline{\xi}^l(\dot{e}, e + k_1\dot{e}) = \underline{\hat{\theta}}_f^T \underline{\xi}(\dot{e}, e + k_1\dot{e}), \quad (47-3)$$

$$\hat{g} = \sum_{l=1}^9 \hat{\theta}_g^l \underline{\xi}^l(\dot{e}, e + k_1\dot{e}) = \underline{\hat{\theta}}_g^T \underline{\xi}(\dot{e}, e + k_1\dot{e})$$

که در آن  $\underline{\hat{\theta}}_f^l$  و  $\underline{\hat{\theta}}_g^l$  پارامترهای آزاد قابل تنظیم و  $\underline{\xi}(\dot{e}, e + k_1\dot{e})$  یک مقدار مثبت است که توسط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\underline{\xi}(\dot{e}, e + k_1\dot{e}) = \frac{\mu_{A_l}(\dot{e})\mu_{B_l}(e + k_1\dot{e})}{\sum_{i=1}^9 \mu_{A_i}(\dot{e})\mu_{B_i}(e + k_1\dot{e})} \quad (48-3)$$

$\mu_{A_l}$  و  $\mu_{B_l}$  توابع عضویت در بازه  $[0,1]$  و مربوط به  $\dot{e}$  و  $e + k_1\dot{e}$  می‌باشند. برای کاهش محاسبات و افزودن سرعت شبیه‌سازی‌ها از بردار پایه فازی مشترک برای تخمین توابع  $f_T$  و  $g$  استفاده نموده‌ایم. از رابطه‌ی بالا می‌توان به عنوان بلوک سازنده‌ی کنترل‌کننده‌ی فازی تطبیقی استفاده کرد. تمام پارامترها در  $\underline{\xi}$  در ابتدای روند طراحی ثابت می‌شوند و تنها پارامتر آزاد طراحی  $\hat{\theta}$  می‌باشد که توسط قانون تطبیق مشخص می‌شود. این قانون تطبیق می‌تواند فرایند سعی و خطا را برای یافتن قوانین

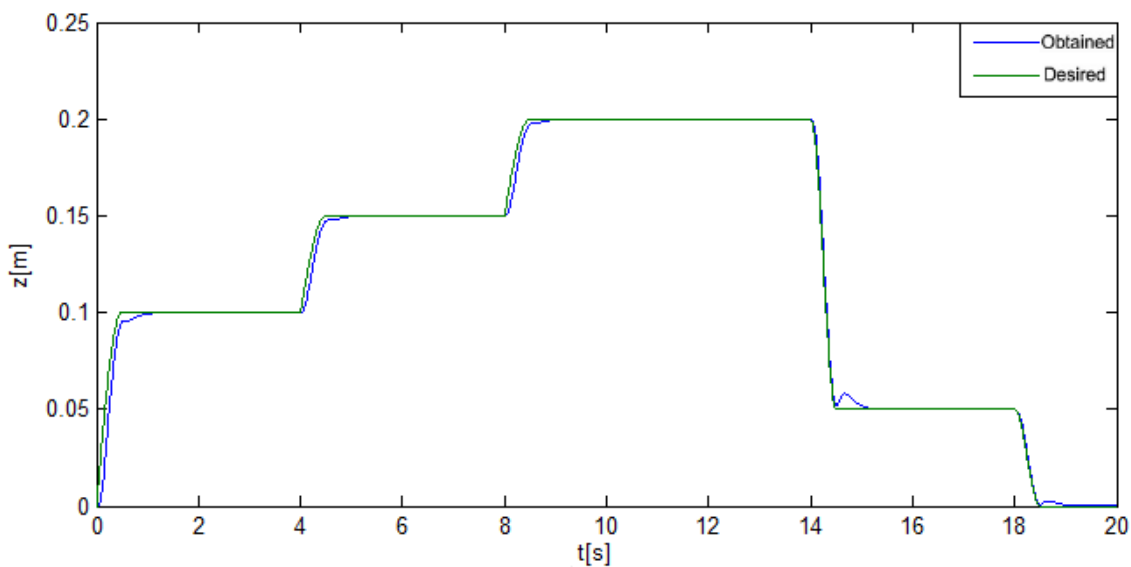
صحیح فازی در کنترل فازی حذف کند، زیرا سیستم AUV در حالت کلی دینامیک‌های پیچیده و غیرخطی دارد و طراحی کنترل‌کننده فازی آن، دشوار می‌باشد. جهت اجرای شبیه‌سازی از قانون کنترل (۳-۱۳) و قوانین تطبیق (۳-۳۴) و (۳-۳۵) استفاده می‌نماییم. به منظور بدست آوردن عملکرد مطلوب و بدست آمدن نتیجه بهتر، پارامترهای مورد نیاز در کنترل ردگیری ربات با روش سعی و خطا تنظیم شده و بصورت زیر انتخاب شده‌اند:

$$k_d = 10, \quad c_1 = 110, \quad c_2 = 21, \quad \gamma_1 = 500, \quad \gamma = 0.1, \quad \gamma_2 = 0.001,$$

$$k_1 = 0.1, \quad \hat{\theta}_f(0) = \mathbf{0}, \quad \hat{\theta}_g(0) = \mathbf{rand}, \quad T(\text{زمان نمونه برداری}) = 0.01$$

مقادیر اولیه بردار  $\hat{\theta}_g$  باید بصورت غیرصفر انتخاب شود زیرا در قانون کنترل از معکوس  $\hat{\theta}_g^T \xi(\dot{e}, e + k_1 \ddot{e})$  استفاده می‌شود و این مقدار نمی‌تواند صفر باشد، بنابراین از تابع دلخواه  $\mathbf{rand}$  برای تولید مقادیرهای اولیه این بردار استفاده شده است. زمان اجرای شبیه‌سازی ۲۰ ثانیه انتخاب شده است. اغتشاش خارجی بوسیله یک تابع موج مربعی در ثانیه چهاردهم تا پانزدهم با دامنه ۰.۱ به سیستم کنترل اعمال می‌شود و می‌توان تاثیر عدم قطعیت خارجی را بر سیستم کنترل مشاهده نمود.

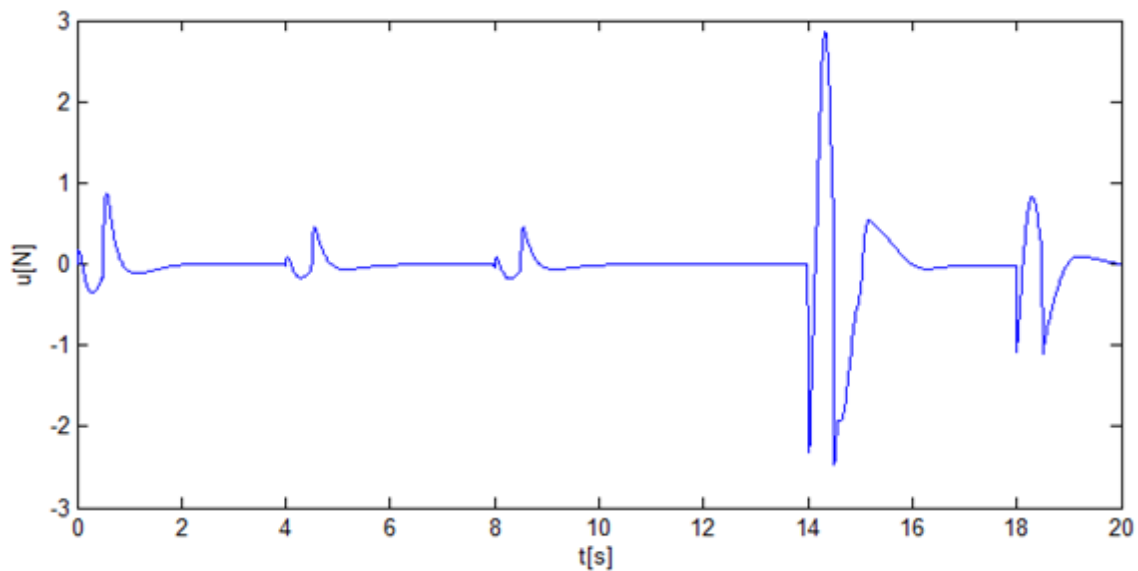
شکل (۳-۳) مسیر مطلوب و خطای ردگیری سیستم کنترل را در حضور اغتشاش نمایش می‌دهد.



شکل (۳-۳): ردیابی عمق در روش پیشنهادی

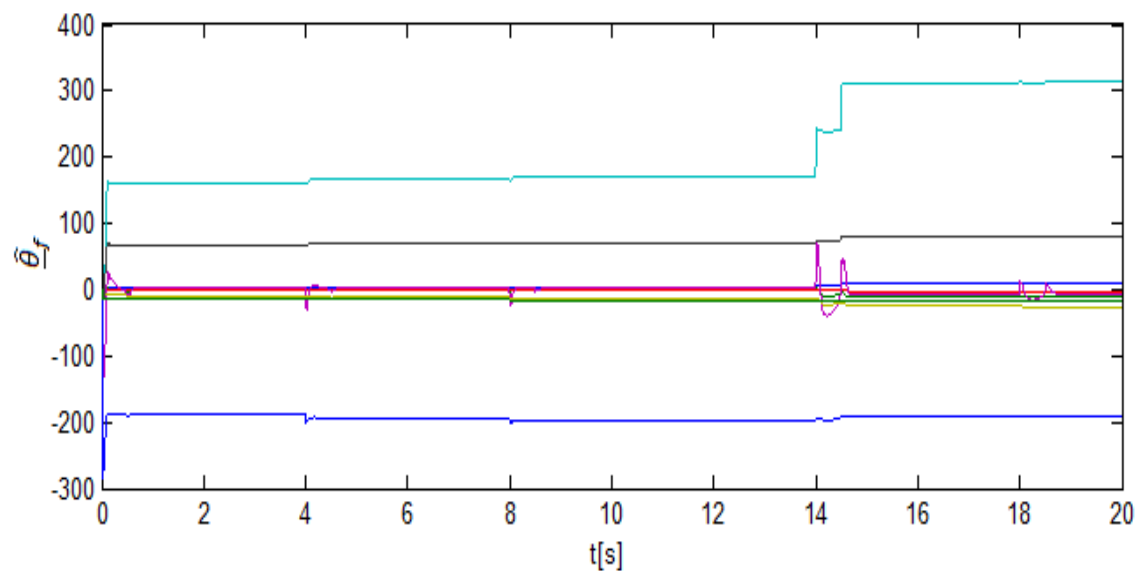
همانطور که مشاهده شده، ردیابی مسیر مورد نظر تا حد زیادی تامین گشته است. خطای اولیه در ردگیری وابسته به موقعیت هندسی ربات است، گشتاور گرانشی تابع این موقعیت است.

سیگنال کنترل ربات در شکل (۴-۳) پاسخ سیستم را نشان می‌دهد و اندازه گشتاور در محدوده مجاز می‌باشد.

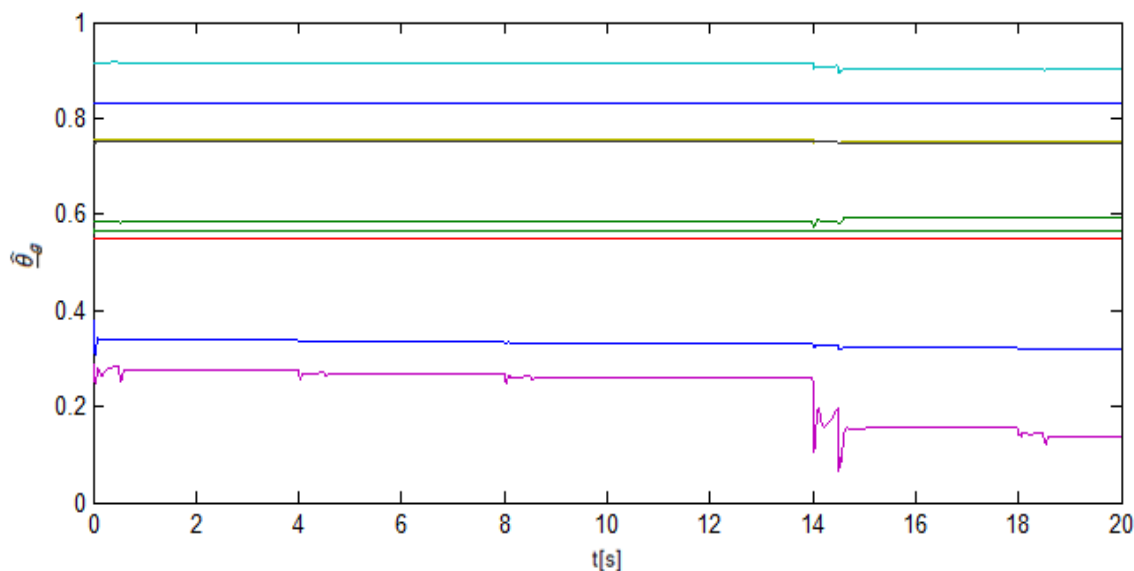


شکل (۴-۳): ورودی کنترل

تطبیق پارامترهای  $\hat{\theta}_f$  و  $\hat{\theta}_g$  در شکل‌های (۵-۳) و (۶-۳) نشان داده شده است.



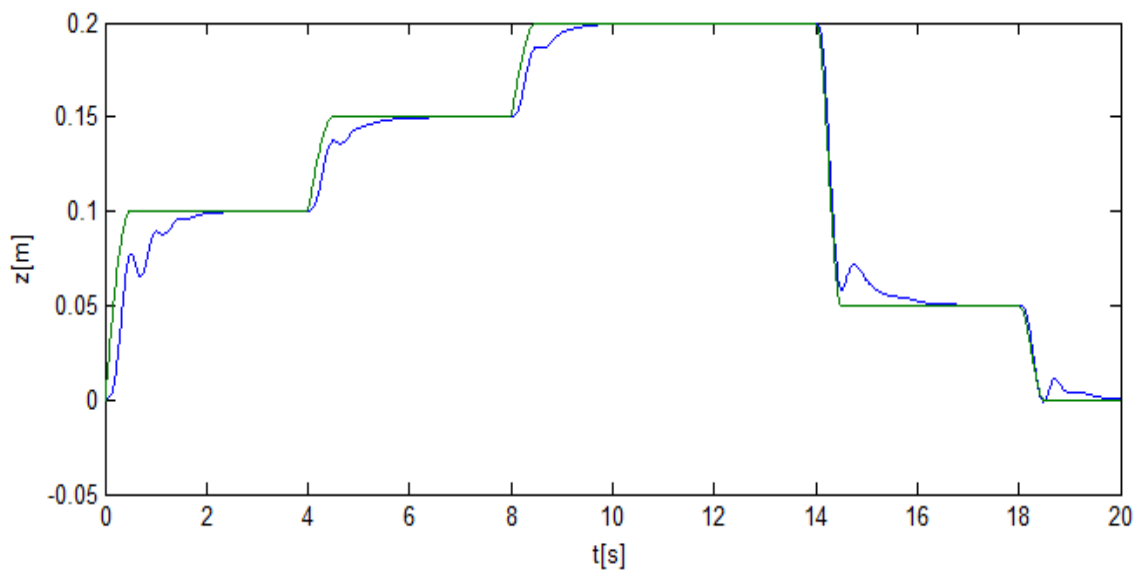
شکل (۵-۳): انطباق بردار  $\hat{\theta}_f$  در روش پیشنهادی



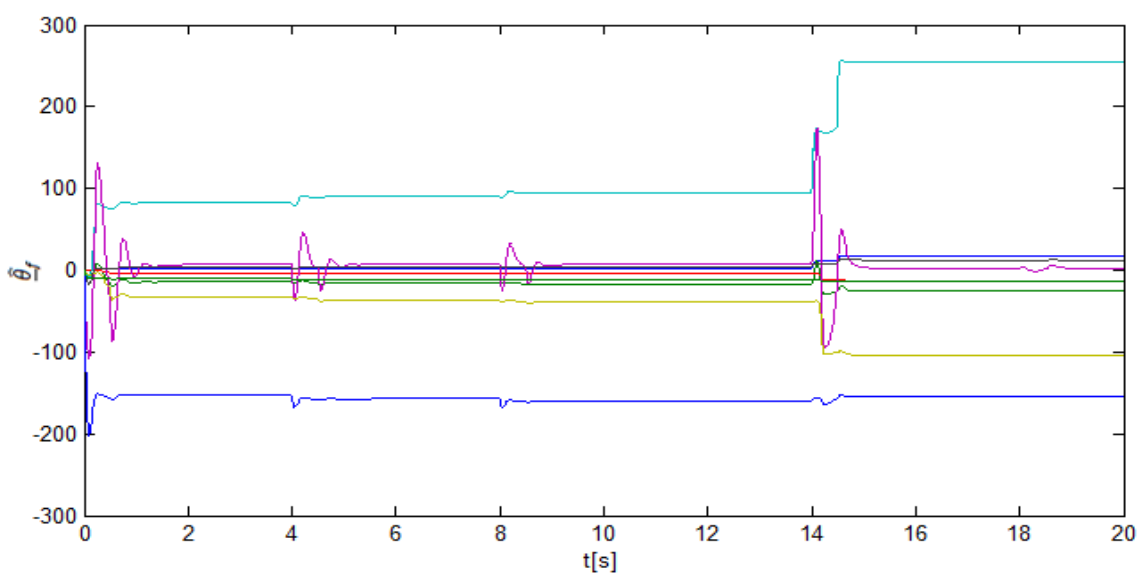
شکل (۳-۶): انطباق بردار  $\hat{g}$  در روش پیشنهادی

تطبیق پارامترهای سیستم فازی در شکل‌های (۳-۵) و (۳-۶) نشان می‌دهد که اغلب پارامترها در فرایند تطبیق شرکت نموده‌اند. همچنین نشان داده شده است که همه پارامترها به مقدار ثابتی همگرا می‌شوند. عملکرد سیستم کنترل نشان می‌دهد که در مقابل عدم قطعیت مقاوم است.

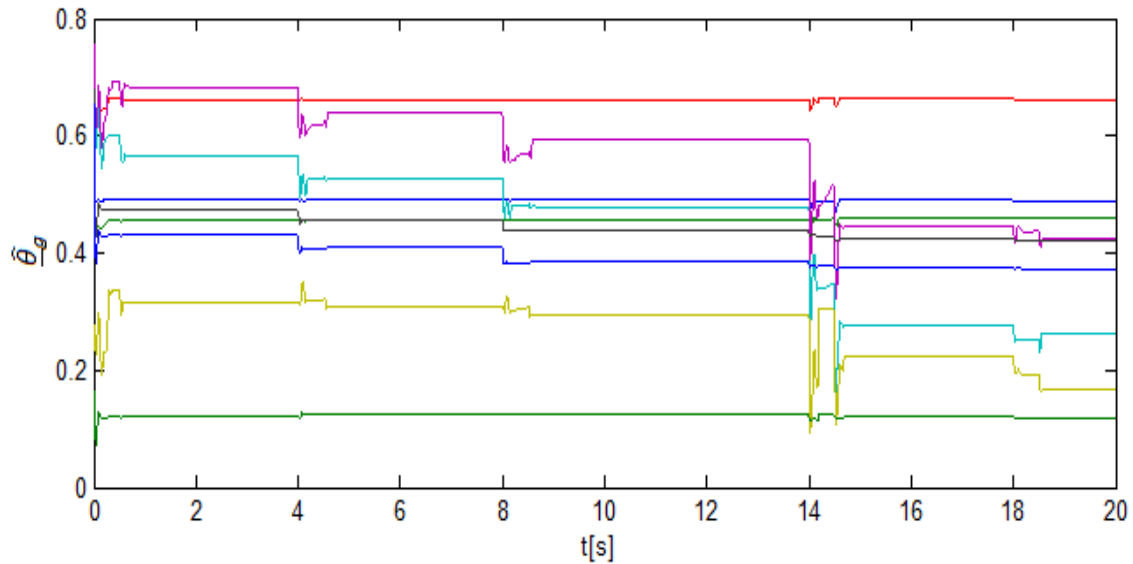
حال برای تاکید بر عملکرد مطلوب روش پیشنهادی، به مقایسه آن با روش کنترل فازی تطبیقی کلاسیک با قانون کنترل (۳-۱۳) و قوانین تطبیق (۳-۲۵) و (۳-۲۶) پرداخته شده است. شکل (۳-۷) ردیابی مسیر مطلوب داده شده و شکل‌های (۳-۸) و (۳-۹) قدرت انطباق پارامتری را در روش کنترل فازی تطبیقی مرسوم نشان می‌دهند.



شکل (۷-۳): ردیابی عمق در روش کلاسیک



شکل (۸-۳): انطباق بردار  $\hat{\theta}_f$  در روش کلاسیک



شکل (۳-۹): انطباق بردار  $\hat{\theta}_g$  در روش کلاسیک

همانگونه که از مقایسه اشکال بر می آید، روش پیشنهادی دارای خطای ردیابی کمتری است و همچنین انطباق و همگرایی پارامتری در آن بسیار نرمتر و سریعتر صورت گرفته است. در نهایت بطور کلی می توان گفت که روش کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی علاوه بر عدم وابستگی به مدل سیستم، دارای عملکرد ردیابی مناسب و خوبی است و در مواجهه با عدم قطعیتها نیز بسیار مقاوم عمل نموده است. همانگونه که تحلیل گردید سیستم کنترل پایدار است.



---

## فصل ۴ :

کنترل فازی تطبیقی ترکیبی با تخمین زن

خطای پیش‌بین

---

## ۱-۴ مقدمه

در سال‌های اخیر، توجه زیادی به کنترل فازی تطبیقی برای سیستم‌های غیرخطی شده است. بخصوص زمانی که مدل دقیقی از سیستم در دسترس نیست یا مدل دارای تغییرات پارامتری پیش بینی نشده است و بخواهیم عملکرد کنترل را افزایش دهیم.

در کاربردهای عملی، اغتشاشات خارجی و نویز به طور مستمر بر روی متغیرهای سیستم اثر می‌گذارد. بنابراین، کنترل فازی تطبیقی باید در مقابل خطای تخمین حاصل از سیستم‌های فازی و اختلالات خارجی مقاوم باشد. با این وجود، به دلیل اثر زیاد خطای تخمین و اغتشاشات خارجی بر روی خطای ردیابی، عملکرد ردیابی تضعیف می‌شود [۳۲]. در این موارد، خطای پارامتری در فرایند انطباق به اندازه کافی کوچک نخواهد بود حتی اگر خطای ردیابی کوچک باشد و این امر در سیستم‌های کنترل فازی تطبیقی کلاسیک حضور می‌یابد. یک راه برای کاهش خطاهای موجود، ایجاد خطای پیش‌بین بعنوان اطلاعات پس‌خورده اضافی در کنترل کننده‌های فازی تطبیقی می‌باشد که ردیابی سریعتر و همگرایی بهتر پارامتری را به دنبال داشت [۳۵]. در این راهکار،  $n$  امین مشتق خروجی در سیستم با مرتبه  $n$  نیاز است که شناخته شده باشد و این مسئله در کاربردهای عملی تا حدودی غیرواقعی است. به همین دلیل برای رهایی از این محدودیت، یک مدل شناسایی سری - موازی با یک فیلتر پایین‌گذر معرفی شد [۳۸] و در مسائل کنترل موتور بکار گرفته شد که عملکرد مطلوبی را به دنبال داشت [۳۷ و ۳۹].

در این فصل از روش قوانین تطبیق مرکب از خطای ردیابی و خطای پیش‌بین برای موقعیت دینامیکی یک ربات زیرآبی با کنترل از راه دور استفاده شده است. ابتدا قانون کنترلی جهت تضمین عملکرد ردیابی و همگرایی سریعتر پارامتری در حضور ساختارهای نامشخص و اختلالات خارجی تعریف شده است. سپس یک مدل شناسایی سری - موازی برای بدست آوردن خطای پیش‌بین معرفی شده است. مقاوم بودن سیستم حلقه بسته در حضور اغتشاشات خارجی و خطاهای باقیمانده توسط کنترل کننده

برگرفته از معادله ریکاتی و یک عبارت جبران کننده خطای پیش‌بین، تضمین شده است. در نهایت، پایداری و مقاوم بودن سیستم حلقه بسته اثبات می‌شود. نشان خواهیم داد که این روش، عملکرد مطلوبی را برای سیستم کنترل فراهم نموده است و کارآمد بودن روش را بر روی ربات موردنظر نشان داده است.

این فصل بدین صورت دسته بندی می‌شود: در بخش ۲ مدل سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ در بخش ۳ روش طراحی کنترل کننده پیشنهاد شده است؛ در قسمت ۴ به بررسی تابع لیاپانوف پیشنهادی پرداخته می‌شود. در قسمت ۵ نتایج شبیه سازی آورده شده است و نتیجه‌گیری می‌شود.

## ۲-۴ سیستم

سیستم MIMO غیرخطی وسیله زیرآبی با کنترل از راه دور در فصل ۲ بفرم کلی زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} \ddot{x}_i = f_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) + g_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}})\bar{\tau}_i + d(t) \\ y_i = x_i \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (1-4)$$

که  $x_i$  متغیرهای بردار حالت  $\underline{x} = (x, y, z, \psi)^T$  می‌باشند و کراندار هستند.  $\bar{\tau}_i$  سطرهای بردار  $4 \times 1$  ورودی کنترل  $\bar{\tau}$  و  $y_i$  خروجی‌های سیستم می‌باشند. در اینجا فرض بر این است که  $f_i$  و  $g_i$  توابع نامشخص محدود و  $d(t)$  اغتشاش خارجی نامشخص محدود است.

## ۳-۴ هدف کنترل

هدف کنترل طراحی یک کنترل کننده فازی تطبیقی است بطوری که:

(۱) سیستم حلقه بسته پایدار باشد و تمام متغیرها محدود باشند.

(۲) عملکرد ردیابی تضمین شود.

بردار سیگنال ورودی مورد نظر برای آامین متغیر بردار حالت بصورت  $\underline{y}_{d_i} = (y_{d_i}, \dot{y}_{d_i})^T$  و خروجی سیستم برای آامین متغیر بردار حالت بصورت  $\underline{y}_i = (y_i, \dot{y}_i)^T$  نشان داده می‌شود. خطای ردیابی خروجی  $e_i = y_{d_i} - y_i = y_{d_i} - x_i$  بردار خطا  $\underline{e}_i^T = \underline{y}_{d_i} - \underline{y}_i = (e_i, \dot{e}_i)^T$  و بردار خطای کلی بصورت  $\mathbf{E}_i = [\underline{e}_i; \varepsilon_{F_i}]$  در نظر گرفته شده که  $\varepsilon_{F_i}$  خطای مدلسازی فیلتر شده برای آامین متغیر بردار حالت است که در بخش‌های بعد بطور مفصل در مورد آن سخن می‌گوییم.

## ۴-۴ طراحی قانون کنترل

بطور ایده‌آل اگر توابع  $f_i$  و  $g_i$  مشخص و  $d = 0$  باشد، یک کنترل‌کننده پسخورد مشخص برای پایدار نمودن سیستم (۱-۴) در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن  $\underline{k}_i = (k_{0_i}, k_{1_i})^T \in R^n$  بطوریکه  $h(s) = s^2 + k_{1_i}s + k_{0_i} = 0$  یک چندجمله‌ای هرولتز باشد؛  $s$  یک متغیر مختلط است. قانون کنترل ایده‌آل زیر را خواهیم داشت:

$$\bar{t}_i^* = \frac{1}{g_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}})} [-f_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) + \ddot{y}_{d_i} + \underline{k}_i^T \underline{e}_i] \quad (۲-۴)$$

با قراردادن رابطه (۲-۴) در (۱-۴) داریم:

$$\ddot{e}_i + k_{1_i}\dot{e}_i + k_{0_i}e_i = 0 \quad (۳-۴)$$

به استناد انتخاب  $\underline{k}_i$  داریم:  $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\underline{e}_i(t)\| = 0$  که نرم اقلیدسی استاندارد است. اما از آنجا که  $f_i$  و  $g_i$  توابعی نامعلوم و  $d$  مخالف صفر می‌باشند، لذا کنترل‌کننده ایده‌آل (۲-۴) نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. برای حل این قضیه از تخمین‌های این توابع توسط سیستم‌های منطق فازی استفاده می‌شود. نکته حائز اهمیت، این است که دینامیک‌های  $d$  می‌تواند داخل سیستم منطق فازی حضور یابد [۳۲]. بنابراین با تعریف  $f_{T_i} := f_i + d$ ، عدم قطعیت غیرخطی کل، در نظر گرفته می‌شود. در طرح غیرمستقیم، دینامیک‌های  $f_{T_i}$  و  $g_i$  توسط سیستم‌های منطق فازی بفرم گفته شده در فصل پیش، تخمین زده می‌شوند:

$$\hat{f}_i(\underline{x}, \underline{\dot{x}}|\hat{\theta}_{f_i}) = \hat{\theta}_{f_i}^T \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) , \quad \hat{g}_i(\underline{x}, \underline{\dot{x}}|\hat{\theta}_{g_i}) = \hat{\theta}_{g_i}^T \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) \quad (4-4)$$

$\hat{\theta}_{f_i}$  و  $\hat{\theta}_{g_i}$  بردارهای پارامتری در حال تنظیم با قوانین تطبیقی و  $\underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}})$  بردار پایه‌ای فازی می‌باشند. از روابط (۲-۴) و (۴-۴)، قانون کنترل زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\bar{u}_i = \frac{1}{\hat{g}_i(\underline{x}, \underline{\dot{x}}|\hat{\theta}_{g_i})} [-\hat{f}_i(\underline{x}, \underline{\dot{x}}|\hat{\theta}_{f_i}) + \ddot{y}_{d_i} + \underline{k}_i^T \underline{e}_i] + u_{1_i} \quad (5-4)$$

$u_{1_i}$  بصورت زیر طراحی می‌شود:

$$u_{1_i} = \frac{1}{\hat{g}_i(\underline{x}, \underline{\dot{x}}|\hat{\theta}_{g_i})} [u_{f_i} + u_i] \quad (6-4)$$

$u_i$  و  $u_{f_i}$  بصورت زیر در نظر گرفته می‌شوند [۴۰]:

$$u_i = W_i \text{sgn}(e_i^T P_i b) \quad (7-4)$$

$$u_{f_i} = \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}})^T \theta_i \quad (8-4)$$

$$\theta_i = \gamma_4 \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) b^T P_i e_i + \gamma_5 \int \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) b^T P_i e_i d\tau + \gamma_4 \frac{d}{dt} (\underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) b^T P_i e_i) \quad (9-4)$$

که  $\phi_{3_i} = \phi_{1_i}$  و  $\phi_{2_i} = \int \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) b^T P_i e_i d\tau$  ،  $\phi_{1_i} = \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) b^T P_i e_i$  بدین صورت تعریف می‌شوند.

عبارت  $u_{1_i}$  در قانون کنترل، برای [۴۰]:

(۱) جبران اغتشاشات خارجی  $d$ ؛

(۲) جبران خطای حاصل از تخمین توابع غیرخطی  $f_{T_i}$  و  $g_i$  توسط سیستم‌های فازی؛

(۳) همگرایی سریعتر پارامتری؛

بکار می‌رود.

## ۵-۴ ردیابی و مدل‌سازی

از رابطه (۵-۴) بدست می‌آید:

$$\dot{y}_{d_i} = -\underline{k}_i^T \underline{e}_i + \hat{f}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}} | \hat{\theta}_{f_i}) + \hat{g}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}} | \hat{\theta}_{g_i}) \bar{t}_i - \hat{g}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}} | \hat{\theta}_{g_i}) u_{1_i} \quad (۱۰-۴)$$

از رابطه (۱۰-۴) و (۱-۴) بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \ddot{e}_i = \dot{y}_{d_i} - \ddot{x}_i = & -\underline{k}_i^T \underline{e}_i \\ & + \left[ \hat{f}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}} | \hat{\theta}_{f_i}) - f_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) - d \right] + \left[ \hat{g}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}} | \hat{\theta}_{g_i}) - g_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) \right] \bar{t}_i \\ & - \hat{g}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}} | \hat{\theta}_{g_i}) u_{1_i} \end{aligned} \quad (۱۱-۴)$$

با در نظر گرفتن  $f_{T_i}(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) = f_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) - d$  در نتیجه داریم:

$$\begin{aligned} \dot{e}_i = A \underline{e}_i - b \underline{k}_i^T \underline{e}_i \\ + b \left[ \hat{f}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}} | \hat{\theta}_{f_i}) - f_{T_i}(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) \right] + \left[ \hat{g}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}} | \hat{\theta}_{g_i}) - g_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) \right] \bar{t}_i \\ - b \hat{g}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}} | \hat{\theta}_{g_i}) u_{1_i} \end{aligned} \quad (۱۲-۴)$$

و  $\underline{k}_i = \begin{bmatrix} k_{0_i} \\ k_{1_i} \end{bmatrix}$ ،  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ،  $b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$  می‌باشد.

بردارهای پارامترهای بهینه بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\underline{\theta}_{f_i}^* = \arg \min_{\hat{\theta}_{f_i} \in \Omega_{f_i}} \left[ \sup_{\underline{x} \in D} |f_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) - \hat{f}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}} | \hat{\theta}_{f_i})| \right] \quad (۱۳-۴)$$

$$\underline{\theta}_{g_i}^* = \arg \min_{\hat{\theta}_{g_i} \in \Omega_{g_i}} \left[ \sup_{\underline{x} \in D} |g_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) - \hat{g}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}} | \hat{\theta}_{g_i})| \right] \quad (۱۴-۴)$$

$\Omega_{f_i}$ ،  $\Omega_{g_i}$  و  $D$  مجموعه‌های محدود و مناسب بر روی  $\hat{\theta}_{f_i}$  و  $\hat{\theta}_{g_i}$  و  $\underline{x}$  هستند.

خطای تقریب حداقل، بدین صورت تعریف می‌شود:

$$w_i := \left[ f_{T_i}(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) - \hat{f}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}} | \underline{\theta}_{f_i}^*) \right] + \left[ g_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) - \hat{g}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}} | \underline{\theta}_{g_i}^*) \right] \bar{t}_i \quad (۱۵-۴)$$

و محدوده بالای خطای تقریب حداقل، بدین صورت است:

$$W_i = \sup_{\underline{x} \in D} [|f_{T_i}(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) - \hat{f}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}}|\theta_{f_i}^*) + (g_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) - \hat{g}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}}|\theta_{g_i}^*))\bar{\tau}_i|] \quad (16-4)$$

با تعریف  $\Lambda_i = A_i e_i - b k_i^T e_i$  و  $\tilde{\theta}_{g_i}(t) = \hat{\theta}_{g_i}(t) - \theta_{g_i}^*$ ،  $\tilde{\theta}_{f_i}(t) = \hat{\theta}_{f_i}(t) - \theta_{f_i}^*$  دینامیک‌های

خطای ردیابی بصورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\dot{e}_i = \Lambda_i e_i + b [\tilde{\theta}_{f_i}^T \xi(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) + \tilde{\theta}_{g_i}^T \xi(\underline{x}, \dot{\underline{x}})\bar{\tau}_i - w_i - u_{f_i} - u_i] \quad (17-4)$$

وظیفه بعدی ما پیدا کردن یک قاعده تعدیل برای  $\hat{\theta}_{g_i}$  و  $\hat{\theta}_{f_i}$  می‌باشد، بطوریکه خطای ردیابی  $e_i$  حداقل گردد.

## ۶-۴ قوانین تطبیق:

در این قسمت از یک الگوریتم تطبیق مرکب از خطای ردیابی و خطای پیش‌بین استفاده شده است.

برای محاسبه خطای پیش‌بین، ابتدا مدل شناسایی سری و موازی زیر را برای شناسایی دستگاه غیر

خطی (۱-۴) تعریف شده است [۳۸ و ۴۱]:

$$\ddot{\hat{x}}_i = \hat{f}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) + \hat{g}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}})\bar{\tau}_i \quad (18-4)$$

که  $u \in R$  ورودی مدل شناسایی،  $\hat{x} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)^T \in R^n$  و  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T =$

$(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T \in R^n$  بردارهای حالت مدل شناسایی شده و سیستم هستند.  $\hat{f}$  و  $\hat{g}$ ، سیستم-

های منطق فازی به فرم (۴-۴) می‌باشند.

تنظیم پارامترهای مدل در یک طرح شناسایی، می‌تواند به عنوان یک فرایند تنظیم مجموعه‌ای از

پارامترهای متناسب با داده‌های ورودی و خروجی در دسترس سیستم، در نظر گرفته شود. این جفت-

های ورودی و خروجی توسط تحریک سیستم با سیگنال ورودی جمع‌آوری و با اندازه‌گیری خروجی

درگیر بدست می‌آیند. در طرح شناسایی، همانطور که یک سیگنال ورودی سیستم را تحریک و

برانگیخته می‌کند، بطور هم‌زمان مدل شناسایی شده و خطای پیش‌بین که تفاوت بین خروجی مدل

شناسایی شده و خروجی سیستم اندازه‌گیری شده می‌باشد؛ توسط یک الگوریتم تطبیقی برای تنظیم

پارامترها استفاده می‌شود. در اینجا، از سیگنال کنترل  $u_c$ ، بعنوان سیگنال ورودی برای تحریک مدل شناسایی شده، استفاده می‌شود. در نتیجه از همین ورودی در رابطه (۴-۱۸) استفاده نموده و خطای پیش‌بین برای نامین متغیر حالت، بصورت زیر تعریف می‌شود [۳۵]:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i(t) \triangleq \ddot{\hat{x}}_i(t) - \ddot{x}_i(t) \quad (۱۹-۴)$$

همانطور که از رابطه (۴-۱۹) مشاهده می‌شود، محاسبه خطای پیش‌بین نیاز به دانستن  $\ddot{x}$  دارد و این موضوع، غیر عملی است زیرا  $\ddot{x}$  غیر قابل اندازه‌گیری می‌باشد و برای محاسبه آن باید از روش مشتق-گیری مستقیم استفاده نمود که این کار به خاطر مشکلات نویز مطلوب نمی‌باشد. به همین دلیل برای رسیدن به انطباق مرکب، از خطای مدل‌سازی فیلترشده تعریف شده بصورت زیر در یک سیستم با مرتبه  $n$ ، استفاده شده است [۳۷]:

$$\varepsilon_{F_i} := \hat{\dot{x}}_i - \dot{x}_i \quad (۲۰-۴)$$

و از مدل شناسایی سری - موازی با فیلتر پایین گذر بصورت زیر استفاده می‌شود [۴۷]:

$$\ddot{\hat{x}}_i = -\alpha_{F_i} \hat{\dot{x}}_i + \alpha_{F_i} \dot{x}_i + \hat{f}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) + \hat{g}_i(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) \bar{t}_i \quad (۲۱-۴)$$

با ترکیب روابط (۴-۲۰)، (۴-۲۱) و (۴-۱)، برای سیستم مورد نظر دینامیک‌های خطای مدل‌سازی بشکل زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\dot{\varepsilon}_{F_i} = -\alpha_{F_i} \varepsilon_{F_i} + \tilde{\theta}_{f_i}^T \underline{\xi}(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) + \tilde{\theta}_{g_i}^T \underline{\xi}(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) \bar{t}_i - w_i + v_i \quad (۲۲-۴)$$

$v_i$  عبارت جبران مدل‌سازی است و بفرم زیر در نظر گرفته شده است [۴۲]:

$$v_i = -\hat{w}_i \tanh\left(\frac{0.2785 \cdot \gamma_i \varepsilon_{F_i} \hat{w}_i}{\varepsilon_i}\right) \quad (۲۳-۴)$$

$\varepsilon_i$  یک ثابت مثبت و کوچک است که توسط طراح مشخص می‌شود.  $\hat{w}_i$  یک متغیر است که برای تخمین خطای تقریب رابطه‌ی (۴-۱۵)، مورد استفاده قرار گرفته است و توسط رابطه زیر به روز می‌شود:



$$\hat{W}_i = \gamma_{w_i} |\gamma_i \varepsilon_{F_i}| \quad (24-4)$$

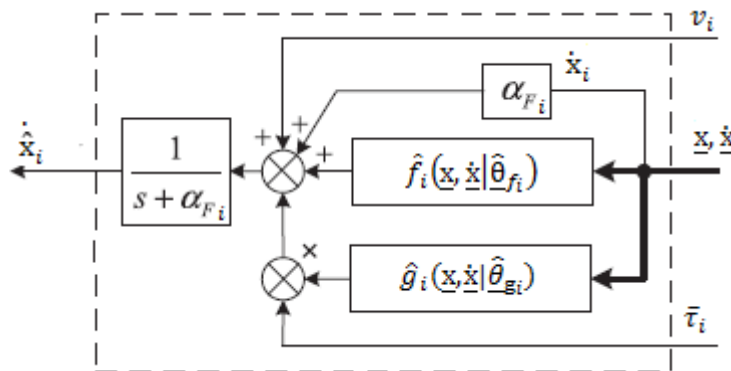
روابط (۲۲-۴) و (۲۳-۴) بعنوان مدل شناسایی و رابطه (۶-۴) بعنوان کنترل کننده ردیابی در نظر گرفته شده‌اند. اکنون، بر اساس بحث فوق، قانون تطبیقی ترکیبی زیر را با بهره‌گیری از خطای ردیابی و خطای پیش‌بین فیلتر شده برای تنظیم پارامترها پیشنهاد شده است:

$$\hat{\theta}_{f_i} = -\gamma_{1_i} [\gamma_i \varepsilon_{F_i} + \underline{e}_i^T P_i b] \underline{\xi}(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) \quad (25-4)$$

$$\hat{\theta}_{g_i} = -\gamma_{2_i} [\gamma_i \varepsilon_{F_i} + \underline{e}_i^T P_i b] \underline{\xi}(\underline{x}, \dot{\underline{x}}) \bar{\tau}_i \quad (26-4)$$

که  $\gamma_{1_i}, \gamma_{2_i}, \gamma_i$  پارامترهایی مثبت می‌باشند.

بلوک دیاگرام شناسایی مدل در شکل (۱-۴) نشان داده شده است.



شکل (۱-۴): شناسایی مدل

## ۷-۴ آنالیز پایداری حلقه کنترل

$\psi_{w_i}$  بصورت  $\psi_{w_i} = \hat{w}_i - W_i$  تعریف شده است. برای نشان دادن پایداری سیستم، تابع لیپانوف زیر پیشنهاد می‌شود:

$$V = \frac{1}{2} \underline{e}_i^T P_i \underline{e}_i + \frac{1}{2\gamma_{1_i}} \tilde{\theta}_{f_i}^T \tilde{\theta}_{f_i} + \frac{1}{2\gamma_{2_i}} \tilde{\theta}_{g_i}^T \tilde{\theta}_{g_i} + \frac{\gamma_i}{2} \varepsilon_{F_i}^2 + \frac{\gamma_{4_i}}{2} \underline{\phi}_{1_i}^T \underline{\phi}_{1_i} + \frac{\gamma_{5_i}}{2} \underline{\phi}_{2_i}^T \underline{\phi}_{2_i} + \frac{1}{2\gamma_{w_i}} \psi_{w_i}^2 \quad (27-4)$$

با مشتق گرفتن از رابطه فوق نسبت به زمان داریم:

$$\begin{aligned}\dot{V} = & \frac{1}{2} \underline{e}_i^T \left( \Lambda_i^T P_i + P_i \Lambda_i \right) \underline{e}_i \\ & + \underline{e}_i^T P_i b \left( \tilde{\theta}_{f_i}^T \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) + \tilde{\theta}_{g_i}^T \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) \bar{t}_i - w_i - u_i - u_{\infty_i} \right) \\ & + \frac{1}{\gamma_{1_i}} \tilde{\theta}_{f_i}^T \dot{\theta}_{f_i} + \frac{1}{\gamma_{2_i}} \tilde{\theta}_{g_i}^T \dot{\theta}_{g_i} + \gamma_i \varepsilon_{F_i} \dot{\varepsilon}_{F_i} + \gamma_{4_i} \underline{\phi}_{1_i}^T \dot{\underline{\phi}}_{1_i} + \gamma_{5_i} \underline{\phi}_{2_i}^T \dot{\underline{\phi}}_{2_i} \\ & + \frac{1}{\gamma_{w_i}} \psi_{w_i} \dot{\psi}_{w_i}\end{aligned}\quad (28-4)$$

$P_i$  یک ماتریس مثبت معین متقارن می باشد. اکنون از معادله گفته شده در زیر استفاده می شود:

$$\Lambda_i^T P_i + P_i \Lambda_i + Q_i = 0 \quad (29-4)$$

$Q_i$  یک ماتریس مثبت معین متقارن  $2 \times 2$  دلخواه می باشد. حال دوباره به بازنویسی روابط می پردازیم.

$$\begin{aligned}\dot{V} = & -\frac{1}{2} \underline{e}_i^T Q_i \underline{e}_i + \underline{e}_i^T P_i b \left( \tilde{\theta}_{f_i}^T \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) + \tilde{\theta}_{g_i}^T \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) \bar{t}_i - w_i - u_i - u_{f_i} \right) \\ & + \gamma_i \varepsilon_{F_i} \left( -\alpha_{F_i} \varepsilon_{F_i} + \tilde{\theta}_{f_i}^T \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) + \tilde{\theta}_{g_i}^T \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) \bar{t}_i - w_i \right. \\ & \left. + v_i \right) + \frac{1}{\gamma_{1_i}} \tilde{\theta}_{f_i}^T \dot{\theta}_{f_i} + \frac{1}{\gamma_{2_i}} \tilde{\theta}_{g_i}^T \dot{\theta}_{g_i} + \gamma_{4_i} \underline{\phi}_{1_i}^T \dot{\underline{\phi}}_{1_i} \\ & + \gamma_{5_i} \underline{\phi}_{2_i}^T \dot{\underline{\phi}}_{2_i} + \frac{1}{\gamma_{w_i}} \psi_{w_i} \dot{\psi}_{w_i}\end{aligned}\quad (30-4)$$

$$\begin{aligned}\Rightarrow \dot{V} = & -\frac{1}{2} \underline{e}_i^T Q_i \underline{e}_i - \gamma_i \alpha_{F_i} \varepsilon_{F_i}^2 + \gamma_i \varepsilon_{F_i} (-w_i + v_i) \\ & + \tilde{\theta}_{f_i}^T \left( \frac{\dot{\theta}_{f_i}}{\gamma_{1_i}} + (\gamma_i \varepsilon_{F_i} + \underline{e}_i^T P_i b) \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) \right) \\ & + \tilde{\theta}_{g_i}^T \left( \frac{\dot{\theta}_{g_i}}{\gamma_{2_i}} + (\gamma_i \varepsilon_{F_i} + \underline{e}_i^T P_i b) \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) \bar{t}_i \right) \\ & - \underline{e}_i^T P_i b (u_{f_i} + u_i + w_i) + \gamma_{4_i} \underline{\phi}_{1_i}^T \dot{\underline{\phi}}_{1_i} + \gamma_{5_i} \underline{\phi}_{2_i}^T \dot{\underline{\phi}}_{2_i} \\ & + \frac{1}{\gamma_{w_i}} \psi_{w_i} \dot{\psi}_{w_i}\end{aligned}\quad (31-4)$$

که قوانین تطبیق (25-4) و (26-4) بدست می آید و مشتق تابع لیاپانوف بدین صورت بازنویسی می -

شود:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\frac{1}{2} \underline{e}_i^T Q_i \underline{e}_i - \gamma_i \alpha_i \varepsilon_{F_i}^2 - \underline{e}_i^T P_i b u_{f_i} + \gamma_{4_i} \dot{\underline{\phi}}_{1_i}^T \underline{\phi}_{1_i} + \gamma_{5_i} \dot{\underline{\phi}}_{2_i}^T \underline{\phi}_{2_i} \\ & + \gamma_i \varepsilon_{F_i} (-w_i + v_i) + \frac{1}{\gamma_{w_i}} \psi_{w_i} \dot{\psi}_{w_i} \end{aligned} \quad (32-4)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\frac{1}{2} \underline{e}_i^T Q_i \underline{e}_i - \gamma_i \alpha_i \varepsilon_{F_i}^2 - \underline{e}_i^T P_i b \left( \underline{\xi}(\underline{x}, \dot{\underline{x}})^T (\gamma_{4_i} \underline{\phi}_{1_i} + \gamma_{5_i} \underline{\phi}_{2_i} + \gamma_{4_i} \underline{\phi}_{3_i}) \right) \\ & + \gamma_{4_i} \dot{\underline{\phi}}_{1_i}^T \underline{\phi}_{1_i} + \gamma_{5_i} \dot{\underline{\phi}}_{2_i}^T \underline{\phi}_{2_i} \\ & + \gamma_i \varepsilon_{F_i} \left( -\hat{w}_i \tanh \left( \frac{0.2785 \cdot \gamma_i \varepsilon_{F_i} \hat{w}_i}{\varepsilon_i} \right) - w_i \right) \\ & + \frac{1}{\gamma_{w_i}} (\hat{w}_i - W_i) \dot{\hat{w}}_i \end{aligned} \quad (33-4)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\frac{1}{2} \underline{e}_i^T Q_i \underline{e}_i - \gamma_i \alpha_i \varepsilon_{F_i}^2 - \gamma_{4_i} \underline{\phi}_{1_i}^T \underline{\phi}_{1_i} - \gamma_{5_i} \underline{\phi}_{2_i}^T \underline{\phi}_{2_i} - \gamma_{4_i} \underline{\phi}_{1_i}^T \underline{\phi}_{3_i} \\ & + \gamma_{4_i} \dot{\underline{\phi}}_{1_i}^T \underline{\phi}_{1_i} + \gamma_{5_i} \dot{\underline{\phi}}_{2_i}^T \underline{\phi}_{2_i} - \gamma_i \varepsilon_{F_i} \hat{w}_i \tanh \left( \frac{0.2785 \cdot \gamma_i \varepsilon_{F_i} \hat{w}_i}{\varepsilon_i} \right) \\ & - \gamma_i \varepsilon_{F_i} w_i + \frac{1}{\gamma_{w_i}} \hat{w}_i \dot{\hat{w}}_i - \frac{1}{\gamma_{w_i}} W_i \dot{\hat{w}}_i \end{aligned} \quad (34-4)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\frac{1}{2} \underline{e}_i^T Q_i \underline{e}_i - \gamma_i \alpha_i \varepsilon_{F_i}^2 - \gamma_{4_i} \underline{\phi}_{1_i}^T \underline{\phi}_{1_i} - \gamma_{5_i} \dot{\underline{\phi}}_{2_i}^T \underline{\phi}_{2_i} - \gamma_{4_i} \underline{\phi}_{1_i}^T \underline{\phi}_{1_i} \\ & + \gamma_{4_i} \underline{\phi}_{1_i}^T \underline{\phi}_{1_i} + \gamma_{5_i} \dot{\underline{\phi}}_{2_i}^T \underline{\phi}_{2_i} - \gamma_i \varepsilon_{F_i} \hat{w}_i \tanh \left( \frac{0.2785 \cdot \gamma_i \varepsilon_{F_i} \hat{w}_i}{\varepsilon_i} \right) \\ & - \gamma_i \varepsilon_{F_i} w_i + \hat{w}_i |\gamma_i \varepsilon_{F_i}| - W_i |\gamma_i \varepsilon_{F_i}| \end{aligned} \quad (35-4)$$

با دانستن این حقیقت که  $|a|b - ab \tanh(0.2875 ab/\varepsilon) \leq \varepsilon$  [52]، داریم:

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} \underline{e}_i^T Q_i \underline{e}_i - \gamma_i \alpha_i \varepsilon_{F_i}^2 - \gamma_{4_i} \underline{\phi}_{1_i}^T \underline{\phi}_{1_i} + \varepsilon_i - \gamma_i \varepsilon_{F_i} w_i - W_i |\gamma_i \varepsilon_{F_i}| \quad (36-4)$$

$$\Rightarrow \dot{V} \leq -\frac{1}{2} \underline{e}_i^T Q_i \underline{e}_i - \gamma_i \alpha_i \varepsilon_{F_i}^2 + \varepsilon_i \quad (37-4)$$

## ۸-۴ آنالیز عملکرد:

نتایج حاصل از رابطه (37-4) را این چنین گردآوری نموده‌ایم.

۱- همانطور که مشاهده می‌شود سیگنال  $u_{f_i}$ ، سبب منفی‌تر شدن مشتق تابع لیاپانوف می‌شود. همچنین در طرح ترکیبی، مشاهده می‌شود که نرخ کاهش تابع لیاپانوف وابسته به خطای پیش‌بین است. هرچقدر  $\dot{V}$  منفی‌تر باشد نه تنها پایداری سیستم حلقه بسته قوت می‌یابد بلکه پاسخ گذرا نیز قوت می‌یابد و منفی‌تر بودن آن نشان می‌دهد که کاهش تابع لیاپانوف سریع‌تر است [۳۲]. ملاحظه می‌شود در قوانین تطبیقی مرکب  $e_i \neq 0$  و  $\varepsilon_{F_i} \neq 0$  باعث کاهش تابع لیاپانوف می‌شود. بنابراین با استفاده از قانون پیشنهادی، حتی اگر  $\underline{e} = \underline{0}$  باشد،  $\varepsilon_{F_i}$  سبب کاهش تابع لیاپانوف می‌شود. و بدین معناست که این قانون، همگرایی پارامتر را قوت می‌بخشد.

۲- از آنجا که  $\varepsilon_i$  توسط طراح بسیار کوچک در نظر گرفته شده است؛ پس  $\dot{V} \leq 0$  می‌باشد، در نتیجه  $V$  همگرا و کراندار است که کراندار بودن خطای ردیابی، خطای پارامتری،  $\hat{\theta}_{f_i}$  و  $\hat{\theta}_{g_i}$  نتیجه می‌شود. از رابطه (۴-۶)  $u_{1i}$  کراندار است. در نتیجه سیستم حلقه بسته پایدار بوده و تمام سیگنال‌های درگیر هم‌چون بردار حالت، سیگنال کنترل و خطا کراندار می‌باشند. اکنون کران خطای ردیابی در طرح فوق را با محاسبات ریاضی نشان می‌دهیم.

با توجه به  $E_i = [e_i; \varepsilon_{F_i}]$  و در نظر گرفتن  $\gamma_i \alpha_i = \beta_i$  و  $Q'_i = \text{diag}(Q_i, 2\beta_i)$  می‌توانیم بنویسیم:

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} E_i^T Q'_i E_i + \varepsilon_i \quad (38-4)$$

و نوشته می‌شود:

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} \lambda_{\min}(Q'_i) |E_i|^2 + \varepsilon_i \quad (39-4)$$

$$\begin{aligned}
\dot{V} \leq & -\frac{1}{2} \frac{\lambda_{\min}(Q'_i)}{\lambda_{\max}(P_i)} \lambda_{\max}(P_i) |E_i|^2 + \epsilon_i \\
& - \frac{1}{2\gamma_{1i}} \frac{\lambda_{\min}(Q'_i)}{\lambda_{\max}(P_i)} \left( |\tilde{\theta}_{f_i}|^2 - \max |\tilde{\theta}_{f_i}|^2 \right) \\
& - \frac{1}{2\gamma_{2i}} \frac{\lambda_{\min}(Q'_i)}{\lambda_{\max}(P_i)} \left( |\tilde{\theta}_{g_i}|^2 - \max |\tilde{\theta}_{g_i}|^2 \right) \\
& - \frac{\gamma_i}{2} \frac{\lambda_{\min}(Q'_i)}{\lambda_{\max}(P_i)} \left( \epsilon_{F_i}^2 - \max(\epsilon_{F_i}^2) \right) \\
& - \frac{\gamma_{4i}}{2} \frac{\lambda_{\min}(Q'_i)}{\lambda_{\max}(P_i)} \left( |\underline{\phi}_{1i}|^2 - \max |\underline{\phi}_{1i}|^2 \right) \\
& - \frac{\gamma_{5i}}{2} \frac{\lambda_{\min}(Q'_i)}{\lambda_{\max}(P_i)} \left( |\underline{\phi}_{2i}|^2 - \max |\underline{\phi}_{2i}|^2 \right) \\
& - \frac{1}{2\gamma_{w_i}} \frac{\lambda_{\min}(Q'_i)}{\lambda_{\max}(P_i)} \left( \psi_{w_i}^2 - \max(\psi_{w_i}^2) \right)
\end{aligned} \tag{۴۰-۴}$$

با در نظر گرفتن دو تعریف:

$$k_{\min} = \frac{\lambda_{\min}(Q'_i)}{\lambda_{\max}(P_i)} \tag{۴۱-۴}$$

$$\begin{aligned}
V_r = & \frac{1}{2} \lambda_{\max}(P_i) \frac{2\epsilon_i}{\lambda_{\min}(Q'_i)} + \frac{1}{2\gamma_{1i}} \max |\tilde{\theta}_{f_i}|^2 + \frac{1}{2\gamma_{2i}} \max |\tilde{\theta}_{g_i}|^2 \\
& + \frac{\gamma_i}{2} \max(\epsilon_{F_i}^2) + \frac{\gamma_{4i}}{2} \max |\underline{\phi}_{1i}|^2 + \frac{\gamma_{5i}}{2} \max |\underline{\phi}_{2i}|^2 \\
& + \frac{1}{2\gamma_{w_i}} \max(\psi_{w_i}^2)
\end{aligned} \tag{۴۲-۴}$$

معادله (۴۰-۴) بازنویسی شده است:

$$\begin{aligned}
\dot{V} \leq & -k_{\min} \left( \frac{1}{2} \lambda_{\max}(P_i) |E_i|^2 + \frac{1}{2\gamma_{1i}} |\tilde{\theta}_{f_i}|^2 + \frac{1}{2\gamma_{2i}} |\tilde{\theta}_{g_i}|^2 + \frac{\gamma_i}{2} \epsilon_{F_i}^2 \right. \\
& \left. + \frac{\gamma_{4i}}{2} |\underline{\phi}_{1i}|^2 + \frac{\gamma_{5i}}{2} |\underline{\phi}_{2i}|^2 + \frac{1}{2\gamma_{w_i}} \psi_{w_i}^2 \right) + k_{\min} V_r
\end{aligned} \tag{۴۳-۴}$$

همانطور که می دانیم رابطه زیر همواره برقرار است.

$$V \leq \frac{1}{2} \lambda_{\max}(P_i) |E_i|^2 + \frac{1}{2\gamma_{1i}} |\tilde{\theta}_{f_i}|^2 + \frac{1}{2\gamma_{2i}} |\tilde{\theta}_{g_i}|^2 + \frac{\gamma_i}{2} \varepsilon_{F_i}^2 + \frac{\gamma_{4i}}{2} |\underline{\phi}_{1i}|^2 + \frac{\gamma_{5i}}{2} |\underline{\phi}_{2i}|^2 + \frac{1}{2\gamma_{w_i}} \psi_{w_i}^2 \quad (44-4)$$

با توجه به این حقیقت؛ برای هر  $t$  می نویسیم:

$$\dot{V} \leq -k_{\min} V + k_{\min} V_r \quad (45-4)$$

از آنجا که  $V_r$  طبق تعریف آن، ثابتی مثبت معین می باشد، بنابراین:

$$V(t) \leq (V(0) - V_r) \exp(-k_{\min} t) + V_r \quad (46-4)$$

$$V(t) \leq \max(V(0), V_r) \quad (47-4)$$

$V(0)$  و  $V_r$  ثابت‌هایی مثبت اند. چون  $V(t) \geq \frac{1}{2} \underline{e}_i^T P_i \underline{e}_i \geq \frac{1}{2} \lambda_{\min}(P_i) |\underline{e}_i|^2$  داریم:

$$\frac{1}{2} \lambda_{\min}(P_i) |\underline{e}_i|^2 \leq \max(V(0), V_r) \quad (48-4)$$

$$\Leftrightarrow |\underline{e}_i| \leq \sqrt{\frac{2 \max(V(0), V_r)}{\lambda_{\min}(P_i)}} \quad (49-4)$$

همانطور که ملاحظه می شود برای بهبود عملکرد ردیابی، می توانیم  $\lambda_{\min}(P_i)$ ،  $k_{\min}$ ،  $\gamma_{1i}$ ،  $\gamma_{2i}$ ،  $\gamma_{w_i}$  و  $\lambda_{\min}(Q'_i)$  را افزایش و  $\varepsilon_i$  و  $W_i$  را کاهش دهیم.، زیرا از رابطه (47-4) داریم:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V(t) \leq V_r \quad (50-4)$$

و چون  $V(t) \geq \frac{1}{2} \underline{e}_i^T P_i \underline{e}_i \geq \frac{1}{2} \lambda_{\min}(P_i) |\underline{e}_i|^2 \geq \frac{1}{2} \lambda_{\min}(P_i) e_i^2$  داریم:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \lambda_{\min}(P_i) e_i^2 \leq V_r \quad (51-4)$$

$$\Leftrightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} |e_i| \leq \sqrt{\frac{2V_r}{\lambda_{\min}(P_i)}} \quad (52-4)$$

همچنین برای تعیین محدوده خطای پیش‌بین، از آنجا که  $V(t) \geq \frac{\gamma_i}{2} \varepsilon_{Fi}^2$  و رابطه (۴-۴۷) داریم:

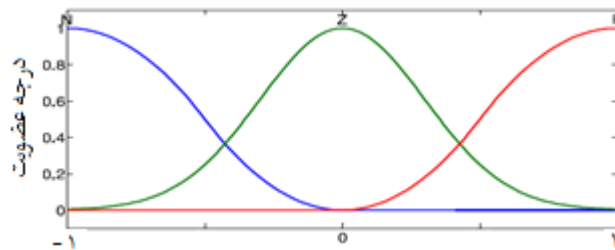
$$|\varepsilon_F| \leq \sqrt{\frac{2\max(V(0), V_r)}{\gamma_i}} \quad (۴-۵۳)$$

در این قسمت علاوه بر پایداری سیستم، با نشان دادن محدوده فوق، عوامل موثر برای تنظیم کارآمد کنترل کننده نیز نشان داده می‌شود. اکنون می‌توانیم پارامترها را به نحوی تنظیم نماییم که بردار خطا در منطقه مطلوب و سطح دقت مورد نظر ما باقی بماند و همچنین می‌توان به همین صورت به تعیین کران‌های بردار حالت و سیگنال کنترل و در نتیجه تعیین عوامل موثر بر آن‌ها پرداخت.

## ۹-۴ بررسی طرح پیشنهادی بر روی سیستم یک ROV:

در این بخش کنترل کننده پیشنهادی بر روی سیستم ROV مطرح شده در فصل دو، اعمال شده است. جهت تخمین توابع، دو موضوع اهمیت می‌یابد. یکی اینکه هر چه تعداد قواعد فازی بیشتر باشد، تخمین بهتر صورت می‌پذیرد و دیگری اینکه هر چه تعداد قواعد کمتر باشد سرعت سیستم بهبود می‌یابد. با در نظر گرفتن این دو مطلب، برای محاسبه توابع فازی، ورودی‌های سیستم فازی را بدین صورت در نظر می‌گیریم. برای حرکت در راستای محور  $x$ ، جهت تخمین تابع  $f_1$  ورودی‌های  $e_1$ ،  $\dot{e}_1$ ،  $e_2$  و  $\dot{e}_2$  و برای تخمین تابع  $g_1$  ورودی‌های  $e_1$  و  $\dot{e}_1$  در نظر گرفته شده است که پارامترهای  $k_1$  و  $k_2$  توسط خود طراح با روش سعی و خطا تعیین شده است. برای حرکت در راستای محور  $y$ ، جهت تخمین تابع  $f_2$  ورودی‌های  $e_1$ ،  $\dot{e}_1$ ،  $e_2$  و  $\dot{e}_2$  و برای تخمین تابع  $g_2$  ورودی‌های  $e_2$  و  $\dot{e}_2$  در نظر گرفته شده است. برای حرکت حول زاویه  $\gamma$ ، جهت تخمین تابع  $f_3$  ورودی‌های  $e_3$  و  $\dot{e}_3$  و برای تخمین تابع  $g_3$  ورودی‌های  $e_3$  و  $\dot{e}_3$  در نظر گرفته شده است. برای حرکت در راستای محور  $z$ ، جهت تخمین تابع  $f_4$  ورودی‌های  $e_4$  و  $\dot{e}_4$  و برای تخمین تابع  $g_4$  ورودی-

های  $e_4$  و  $\dot{e}_4$  در نظر گرفته شده است. برای هر متغیر ورودی، سه گروه فازی به صورت  $Z$ ،  $P$  و  $N$  به شکل توابع گوسین، مطابق شکل (۳-۴) در نظر گرفته شده است.



شکل (۳-۴): توابع تعلق ورودی سیستم فازی

پارامترهای مورد نیاز در کنترل ردگیری ربات با روش سعی و خطا بصورت زیر تنظیم شده‌اند:

$$i = 1: \gamma_1 = 100, \gamma = 0.8, \gamma_2 = 0.1, k_0 = 200, k_1 = 100, Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \gamma_4 = 0.1, \gamma_5 = 0.01, \gamma_w = 0.6, \epsilon = 0.001, \alpha_F = 10$$

$$i = 2: \gamma_1 = 500, \gamma = 0.8, \gamma_2 = 0.1, k_0 = 200, k_1 = 100, Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \gamma_4 = 0.1, \gamma_5 = 0.01, \gamma_w = 0.1, \epsilon = 0.001, \alpha_F = 10$$

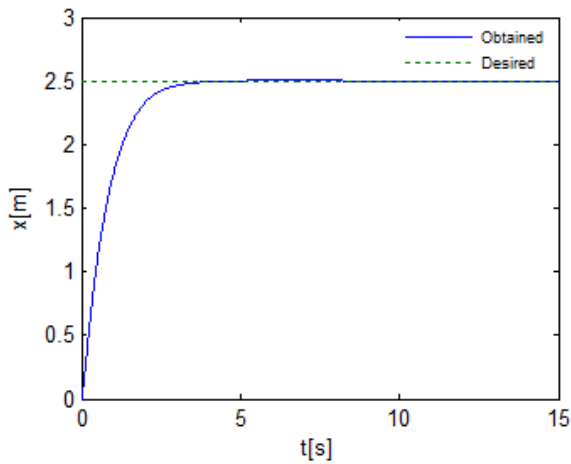
$$i = 3: \gamma_1 = 100, \gamma = 0.8, \gamma_2 = 0.1, k_0 = 4, k_1 = 4, Q = \begin{bmatrix} 500 & 0 \\ 0 & 500 \end{bmatrix}, \gamma_4 = 0.1, \gamma_5 = 0.1, \gamma_w = 0.8, \epsilon = 0.001, \alpha_F = 10$$

$$i = 4: \gamma_1 = 40, \gamma = 0.8, \gamma_2 = 0.1, k_0 = 500, k_1 = 100, Q = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}, \gamma_4 = 5, \gamma_5 = 3, \gamma_w = 0.8, \epsilon = 0.001, \alpha_F = 10$$

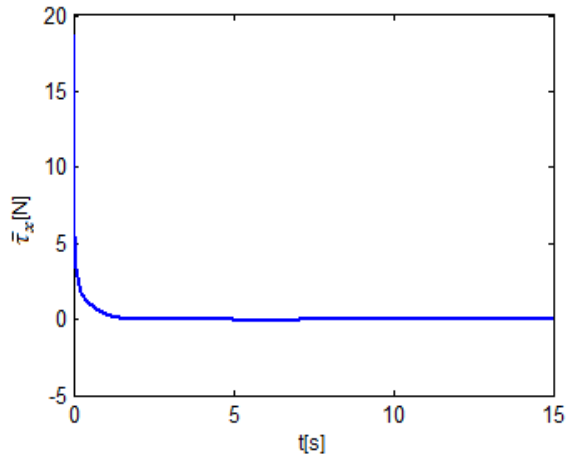
همچنین  $\hat{\theta}_f(0) = \mathbf{0}$  در نظر گرفته شده است. بعلت استفاده از معکوس  $\hat{\theta}_g$  در قانون کنترل، مقادیر اولیه بردار  $\hat{\theta}_g$  بصورت غیرصفر با استفاده از تابع دلخواه  $rand$  انتخاب شده است. زمان اجرای شبیه سازی ۱۴ ثانیه و زمان نمونه برداری ۰.۰۱ ثانیه انتخاب شده است. اغتشاش خارجی بوسیله یک تابع موج مربعی در ثانیه پنجم تا هفتم با دامنه ۱ به سیستم کنترل اعمال می‌شود.



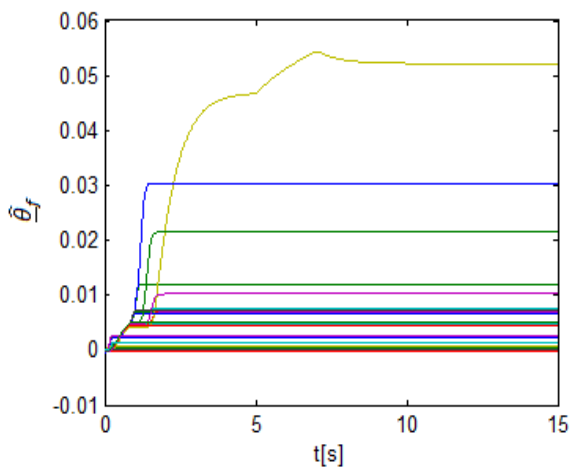
وسیله زیرآبی از حالت اولیه  $\underline{x}_0 = [0,0,0,0]$  شروع به حرکت نموده است. مسیر مطلوب و خطای ردگیری سیستم کنترل در حضور اغتشاش خارجی، در راستای محور  $x$  در شکل (۴-۴)؛ در راستای محور  $y$ ، در شکل (۸-۴)؛ در راستای محور  $z$ ، در شکل (۱۲-۴) و در راستای زاویه  $\psi$  در شکل (۴-۱۶) آمده است. همانطور که در اشکال مشاهده شده است حتی در حضور اغتشاشات خارجی، کنترل کننده پیشنهادی قادر به تامین ردیابی مسیر با یک خطای کوچک است و می‌توان مقاوم بودن سیستم را در مقابل عدم قطعیت خارجی را بر سیستم کنترل مشاهده نمود. تغییرات ناگهانی روی شکل خطای ردیابی، اثر اغتشاش خارجی را نشان می‌دهد که بصورت پالس مربعی است. سیگنال‌های کنترل ربات در شکل، پاسخ سریع سیستم برای جبران اغتشاش خارجی را نشان می‌دهد.



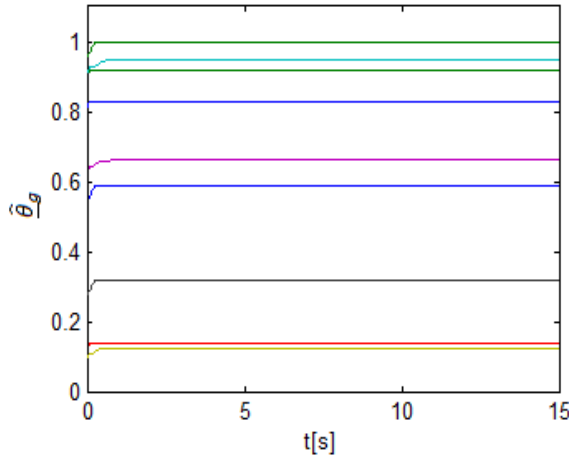
شکل (۴-۴): تغییر حالت  $x$



شکل (۴-۵): نیروی پیشران  $\tau_x$

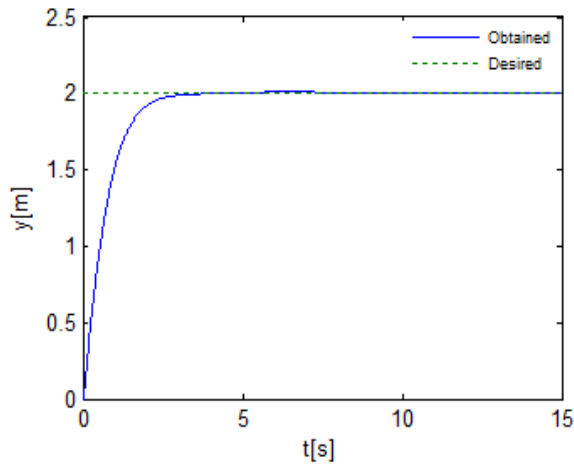


شکل (۴-۶): همگرایی بردار پارامتری  $\hat{\theta}_f$  در راستای محور  $x$

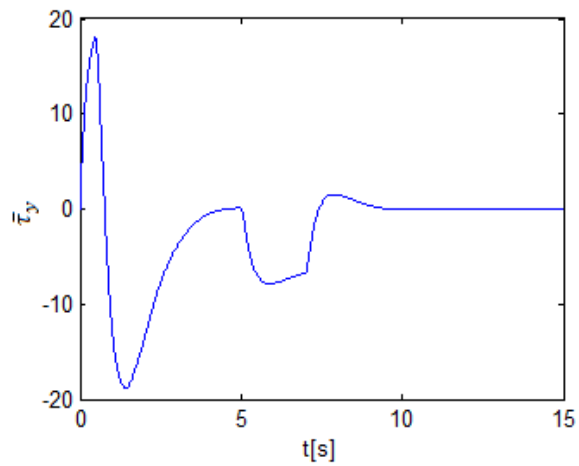


شکل (۴-۷): همگرایی بردار پارامتری  $\hat{\theta}_\theta$  در راستای محور  $x$

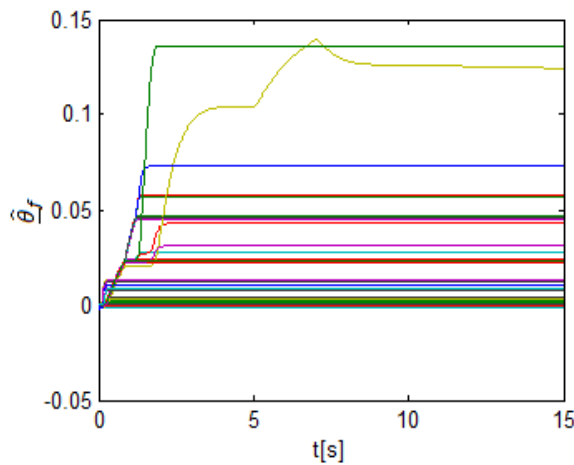
سیگنال‌های کنترل ربات در راستای هر محور در اشکال (۴-۵)، (۴-۹)، (۴-۱۳) و (۴-۱۷) پاسخ سیستم را نشان می‌دهد و اندازه گشتاورها در محدوده مجاز می‌باشد.



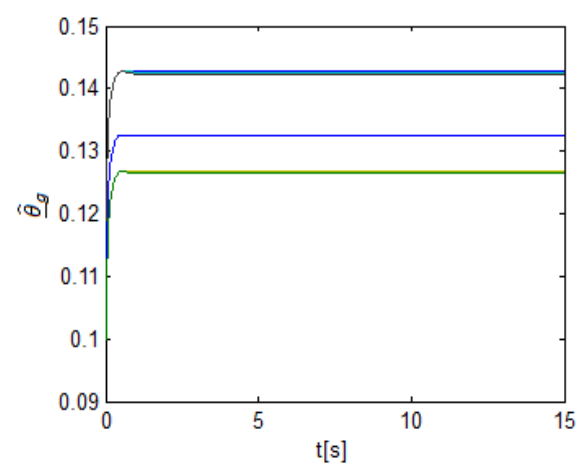
شکل (۴-۸): تغییر حالت  $y$



شکل (۴-۹): نیروی پیشران  $\bar{\tau}_y$

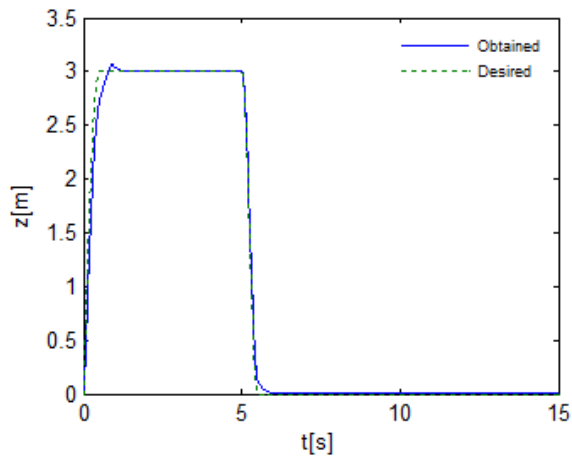


شکل (۴-۱۰): همگرایی بردار پارامتری  $\hat{\theta}_f$  در راستای محور  $y$

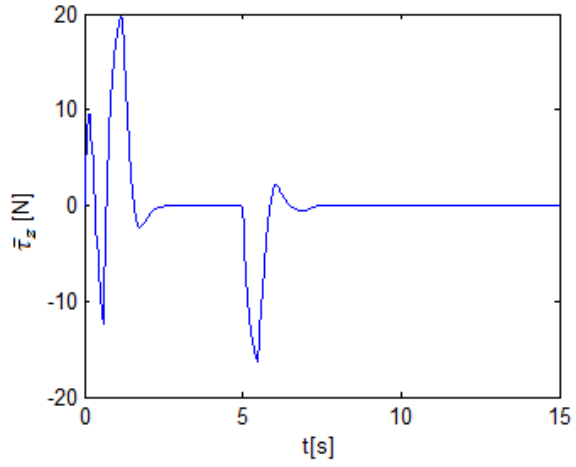


شکل (۴-۱۱): همگرایی بردار پارامتری  $\hat{\theta}_g$  در راستای محور  $y$

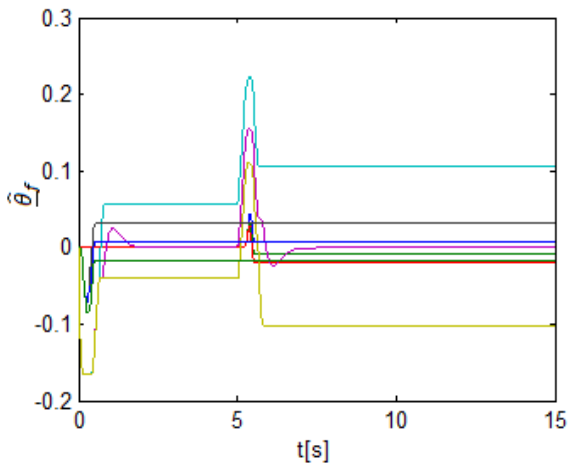
تطبیق پارامترهای  $\hat{\theta}_f$  و  $\hat{\theta}_g$  در راستای هر محور در اشکال (۴-۶)، (۴-۷)، (۴-۱۰)، (۴-۱۱)، (۴-۱۴)، (۴-۱۵)، (۴-۱۸) و (۴-۱۹) آمده است. تطبیق پارامترها نشان می‌دهد که اغلب پارامترها در فرایند تطبیق شرکت نموده‌اند و در روند کاهش خطا تقریباً همه قوانین فازی فعال می‌شوند. بعلاوه همه پارامترها به مقدار ثابتی همگرا می‌شوند.



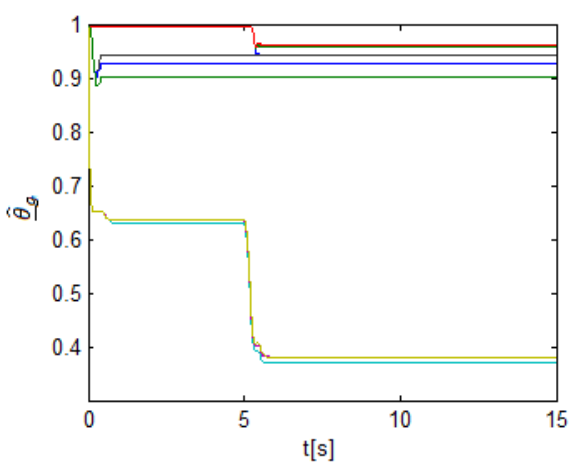
شکل (۴-۱۲): تغییر ارتفاع  $z$



شکل (۴-۱۳): سیگنال کنترل  $\bar{\tau}_z$

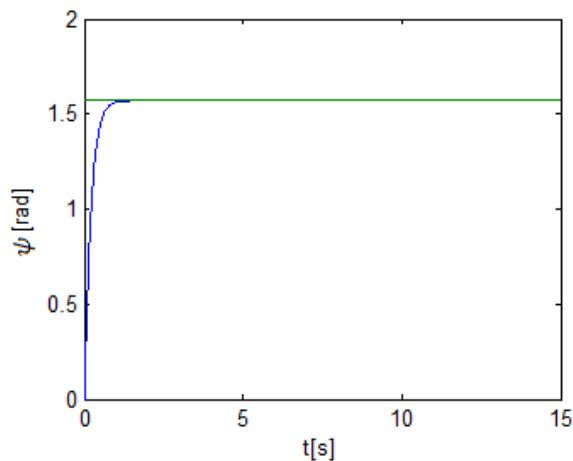


شکل (۴-۱۴): همگرایی بردار پارامتری  $\hat{\theta}_f$  در راستای محور  $z$

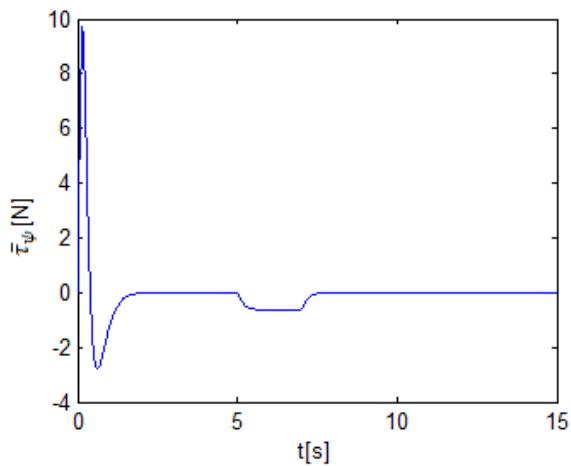


شکل (۴-۱۵): همگرایی بردار پارامتری  $\hat{\theta}_g$  در راستای محور  $z$

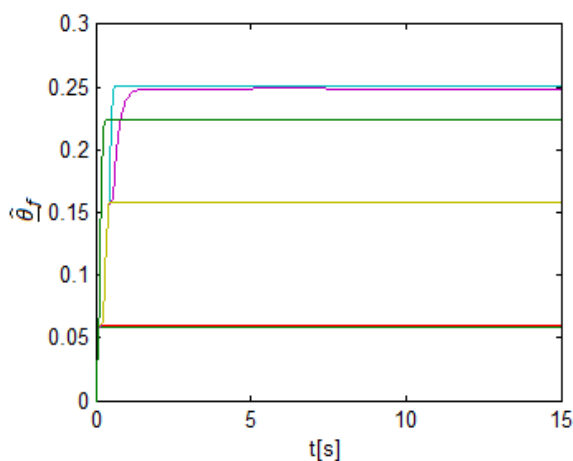
ملاحظه می‌شود که طرح پیشنهادی دارای عملکرد مطلوبی است.



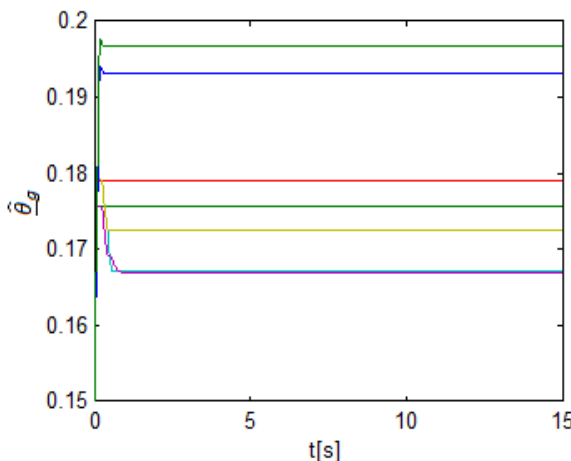
شکل (۴-۱۶): تغییر حالت  $\psi$



شکل (۴-۱۷): نیروی پیشران  $\bar{\tau}_\psi$



شکل (۴-۱۸): همگرایی بردار پارامتری  $\hat{f}$  در راستای محور  $\psi$



شکل (۴-۱۹): همگرایی بردار پارامتری  $\hat{g}$  در راستای محور  $\psi$

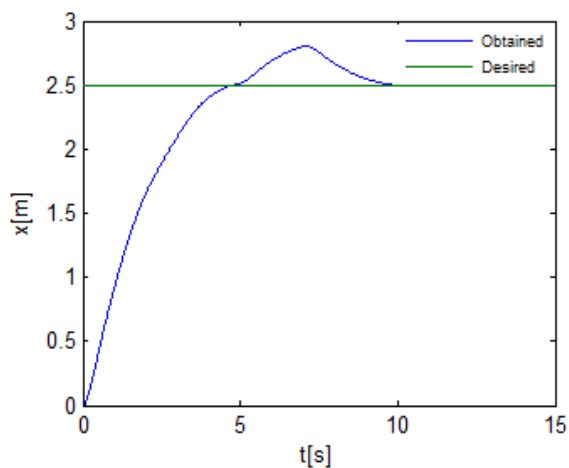
سپس به مقایسه نتایج حاصل از عملکرد روش پیشنهادی نسبت به کنترل فازی تطبیقی استاندارد می پردازیم. در واقع روش استاندارد از قانون کنترل:

$$\bar{\tau}_i = \frac{1}{\hat{g}_i(\underline{x}, \underline{\dot{x}} | \hat{\theta}_{g_i})} [-\hat{f}_i(\underline{x}, \underline{\dot{x}} | \hat{\theta}_{f_i}) + \ddot{y}_{d_i} + \underline{k}_i^T \underline{e}_i] \quad (۵۶-۴)$$

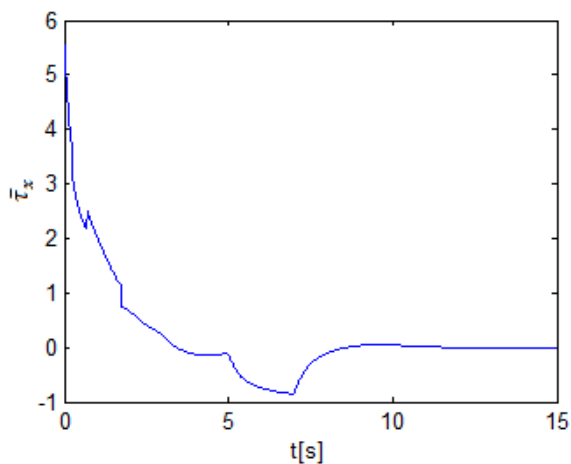
و قوانین تطبیق زیر بهره جسته شده است.

$$\dot{\hat{\theta}}_{f_i} = -\gamma_{1_i} \cdot [e_i^T P_i b] \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) \quad (۵۷-۴)$$

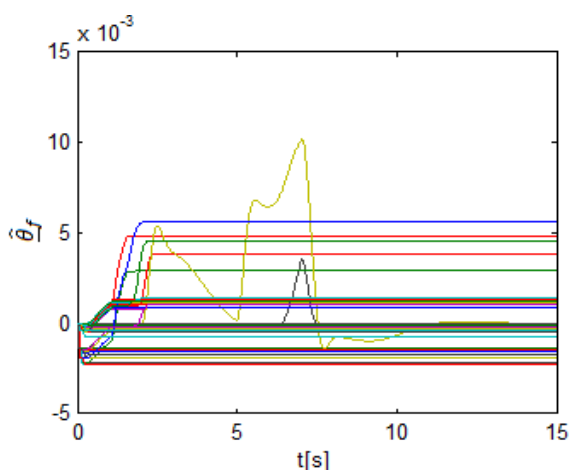
$$\dot{\hat{\theta}}_{g_i} = -\gamma_{2_i} \cdot [e_i^T P_i b] \underline{\xi}(\underline{x}, \underline{\dot{x}}) \bar{\tau}_i \quad (۵۸-۴)$$



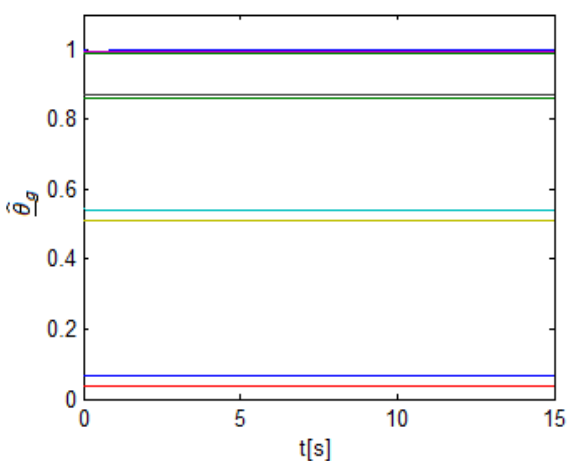
شکل (۴-۲۰): تغییر حالت  $x$  در روش فازی تطبیقی کلاسیک



شکل (۴-۲۱): نیروی پیشران  $\bar{F}_x$

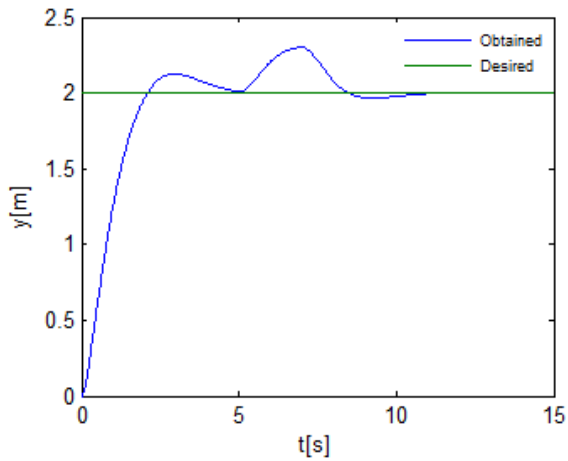


شکل (۴-۲۲): همگرایی  $\hat{\theta}_f$  در راستای محور  $x$

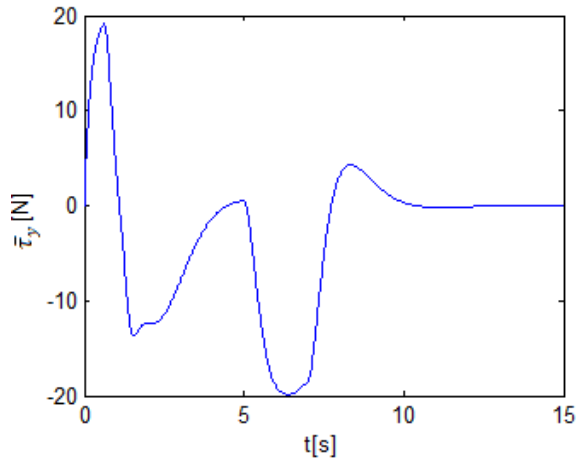


شکل (۴-۲۳): همگرایی  $\hat{\theta}_g$  در راستای محور  $x$

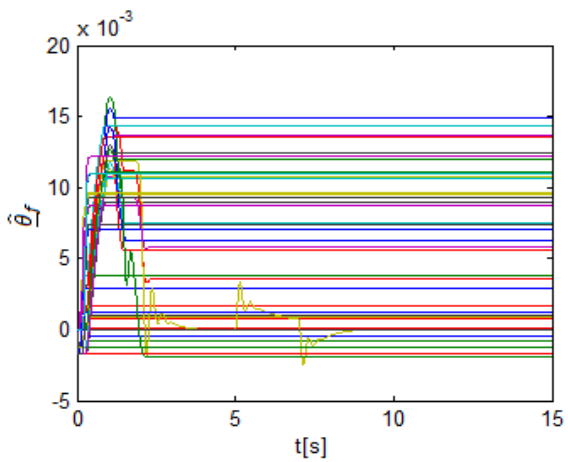
از مقایسه نتایج حاصل از اشکال (۴-۲۰)، (۴-۲۴)، (۴-۲۸) و (۴-۳۲) با اشکال (۴-۴)، (۴-۸)، (۴-۱۶) و (۴-۱۲) که نمایانگر تغییر حالت در راستای هر محور در روش فازی تطبیقی استاندارد و روش پیشنهادی می‌باشند، نتیجه شده است که خطای ردیابی در روش پیشنهادی نسبت به روش استاندارد کوچکتر است و اغتشاش خارجی بیشتر جبران شده است.



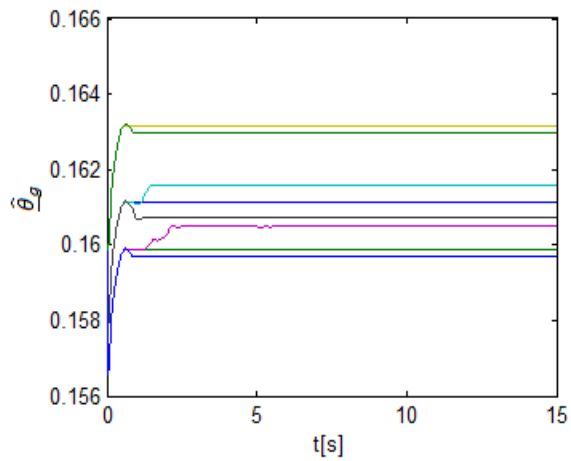
شکل (۲۴-۴): تغییر حالت  $y$  در روش فازی تطبیقی کلاسیک



شکل (۲۵-۴): نیروی پیشران  $\bar{\tau}_y$

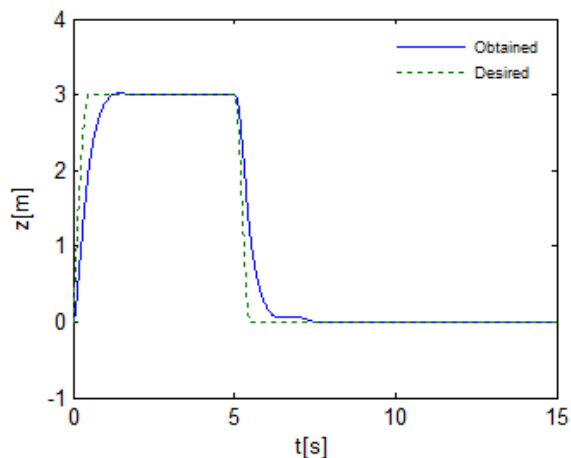


شکل (۲۶-۴): همگرایی  $\hat{\theta}_f$  در راستای محور  $y$

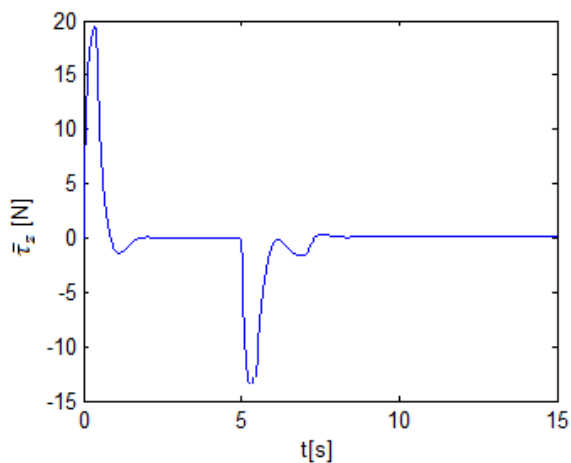


شکل (۲۷-۴): همگرایی  $\hat{\theta}_g$  در راستای محور  $y$

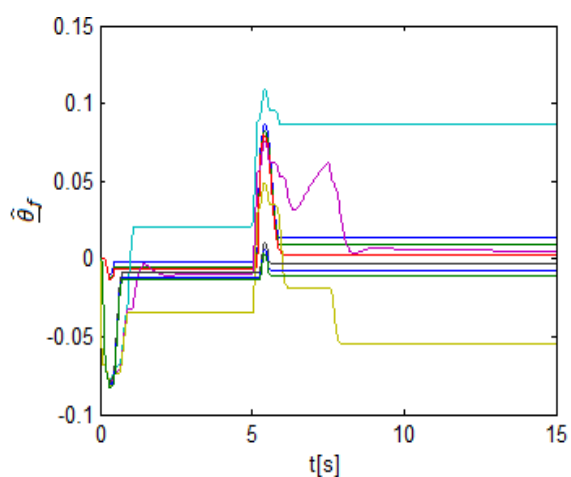
از مقایسه نتایج حاصل از اشکال (۲۱-۴)، (۲۵-۴)، (۲۹-۴) و (۳۳-۴) با اشکال (۵-۴)، (۹-۴)، (۴-۱۳) و (۴-۱۷) که نمایانگر ورودی کنترل در راستای هر محور در روش فازی تطبیقی استاندارد و روش پیشنهادی می‌باشند.



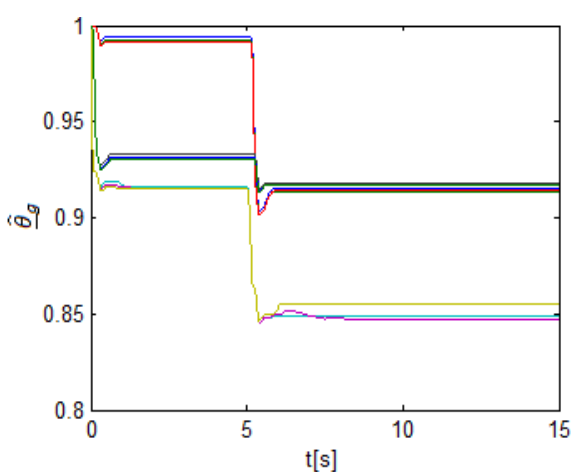
شکل (۲۸-۴): تغییر ارتفاع در روش فازی تطبیقی کلاسیک



شکل (۲۹-۴): نیروی پیشران  $\bar{\tau}_z$



شکل (۳۰-۴): همگرایی  $\hat{\theta}_f$  در راستای محور z



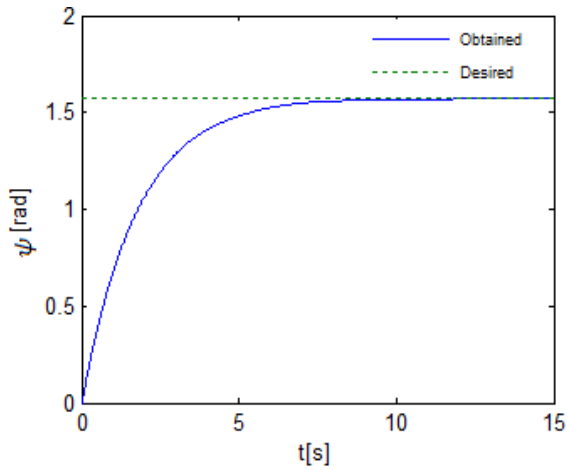
شکل (۳۱-۴): همگرایی  $\hat{\theta}_\theta$  در راستای محور z

از مقایسه نتایج حاصل از اشکال (۲۲-۴)، (۲۳-۴)، (۲۶-۴)، (۲۷-۴)، (۳۰-۴)، (۳۱-۴)، (۳۴-۴) و

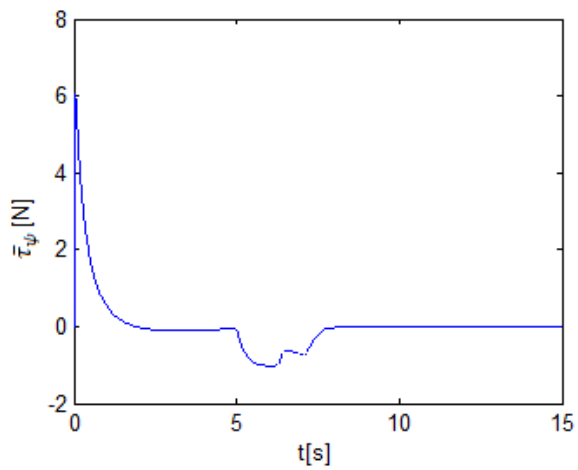
(۳۵-۴) که همگرایی پارامترهای در حال تنظیم را نشان می‌دهند با اشکال متناظرشان در روش

پیشنهادی، نتیجه شده است که روش پیشنهادی در این فصل سرعت همگرایی پارامترها را افزایش

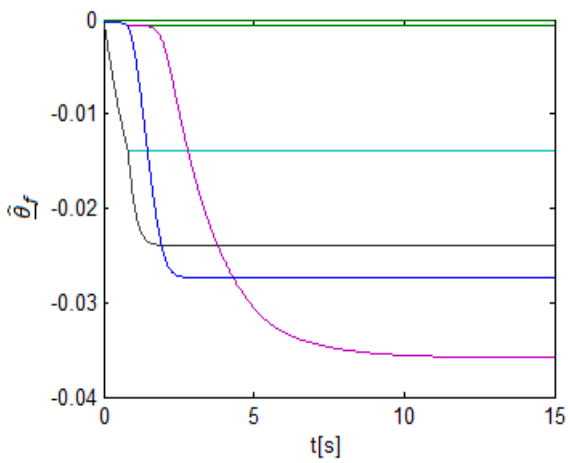
داده و قابلیت همگرایی پارامتری بهبود یافته است.



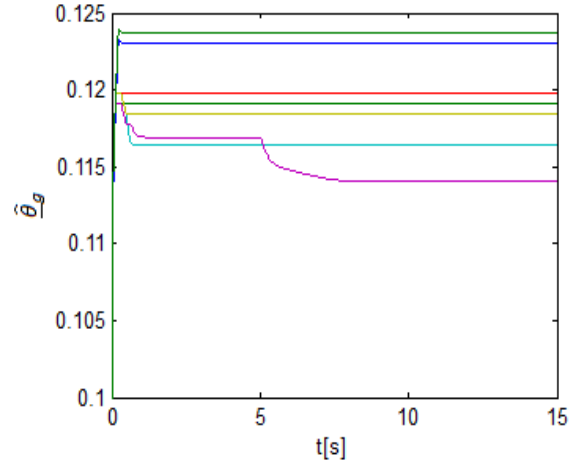
شکل (۴-۳۲): تغییر حالت  $\psi$  در روش فازی تطبیقی کلاسیک



شکل (۴-۳۳): نیروی پیشران  $\bar{\tau}_\psi$



شکل (۴-۳۴): همگرایی  $\theta_f$  در راستای محور  $\psi$



شکل (۴-۳۵): همگرایی  $\theta_g$  در راستای محور  $\psi$

در نهایت بطور کلی می‌توان گفت که روش کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی دارای عملکرد ردیابی و تنظیم مناسب و خوبی است. همچنین علاوه بر اینکه از مدل مستقل است، در مقابل اغتشاشات خارجی مقاوم می‌باشد و قابلیت مقابله با آن‌ها را دارد. همچنین همانگونه که تحلیل گردید سیستم کنترل پایدار است.





---

## فصل ۵ :

### نتیجه گیری و پیشنهادات

---

## ۱-۵ نتیجه گیری

در این پایان نامه، به کنترل فازی تطبیقی با استراتژی قوانین تطبیق مرکب به خوبی توجه شده است. هر یک از روش های کنترلی پیشنهادی مذکور طراحی، تحلیل و شبیه سازی شده است و به ارزیابی عملکرد سیستم کنترل در ردیابی مسیر مطلوب پرداخته شده است. در کنترل کننده ی زمان پیوسته فازی تطبیقی غیرمستقیم موجود از قوانین تطبیق مرکب به منظور کاهش خطای ردیابی و خطای پیش بین و افزایش قدرت همگرایی پارامترها استفاده شده است و پایداری آنها با تحلیل ریاضی اثبات گردید. شبیه سازی ها نشان می دهند که که عملکرد مطلوب کنترل موقعیت ربات در مقابل اغتشاشات محقق شده است و هنگام روبرویی با اغتشاش خارجی مقاوم بوده و کنترل کننده ی پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده های کلاسیک دارد. در بسیاری از روش های کنترلی از همه ی حالت های سیستم بعنوان ورودی فازی استفاده می شود. اما به منظور کاهش محاسبات در این پایان نامه از ترکیب حالت ها با هم استفاده نموده که این کار منجر به افزایش سرعت سیستم می شود.

روش پیشنهادی بررسی شده در فصل چهار نسبت به روش های ارائه شده در سال های پیشین در حوزه ی قوانین تطبیق مرکب از خطای ردیابی و خطای پیش بین، عملکرد بهتری را در مقابل اغتشاشات از خود نشان می دهد. اما ضعف این روش در مقایسه با روش پیشنهادی بررسی شده در فصل سوم، در افزایش پارامترهای مورد بررسی توسط طراح و افزایش پیچیدگی محاسبات می باشد و کنترل فازی تطبیقی مود لغزشی با قوانین مرکب ارائه شده دارای ساختار ساده تری می باشد.

## ۲-۵ پیشنهادات

پیشنهادات زیر برای ادامه تحقیقات ارائه می گردد:

- می توان با بررسی عملکرد سیستم فازی تطبیقی بجای تطبیق همه ی پارامترها تنها چند پارامتر مورد نیاز را تطبیق نمود و سایر پارامترها را بعنوان ثابت در نظر گرفت.

- می‌توان روش فازی تطبیقی را با روش‌های کنترل غیر خطی دیگر ترکیب نمود و عملکرد کنترل را بهبود بخشید.
- می‌توان برای انتخاب پارامترهای طراحی از روش‌های هوشمند برای پیدا کردن پارامترهای طراحی بهینه استفاده نمود.
- می‌توان از رویکرد برای حذف فرض در دسترس بودن حالت‌های سیستم استفاده نمود.
- پیاده‌سازی عملی سیستم کنترل پیشنهاد می‌شود.

1. Fossen, T. I. (1994) "*Guidance and control of ocean vehicles*", Jhon Wiley & Sons, University of Trondheim Norway.
2. لوئی پور م. (۱۳۸۹) "رویکردها و ملزومات کسب و توسعه دانش و فناوری ربات‌های هوشمند زیرآبی (AUV)", دوازدهمین همایش صنایع دریایی ایران، زیباکنار.
3. Joubert, P. N. (2004) "Some Aspects of Submarine Design Part 1. Hydrodynamics", *Defence Science and Technology Organisation ,Technical Report DSTO-TR-1622*.
4. Budiyo, A. (2009) "Advances in unmanned underwater vehicles technologies: Modeling, control and guidance perspectives", *Indian Journal of Marine Sciences*, 38, 3, pp.282-295.
5. Wernli, R. L., and Christ, R. D. (2013) "*The ROV Manual*", Second Edition: A User Guide For Remotely Operated Vehicles, 2013.
6. Azis, F. A., Aras, M. S. M., Rashid, M. Z. A., Othman, M. N., and Abdullah, S. S. (2012) "Problem Identification for Underwater Remotely Operated Vehicle (ROV): A Case Study", *International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, Procedia Engineering*, 41, 1, pp. 554 – 560.
7. Yuh, J. (2000) "Design and control of autonomous underwater robots: A survey", *Autonomous Robots*, 8, 1, pp. 7–24.
8. Marani, M., Choi, S. K., and Yuh, J., (2009) "Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUV's", *Journal of ocean engineering*, 36, 1, pp. 15-29.
9. Yuh, J. (1990) "Modeling and control of underwater robotic vehicles", *IEEE Trans. Syst. Man. Cyber*, 20, 6, pp 1475-1483.
10. Meirovitch, L. (1990) "*Dynamics and control structure*", Wiley New York.

11. Sagatun, S. I., and Fossen, T. I. (1991) "Lagrangian formulation of underwater vehicles", *Dynamics Proceedings of the IEEE Int. Confs. Syst. Man. Cyber.*, 2, pp. 1024-1034.
12. Fossen, T. I., and Fjellstad, O. E. (1995) "Nonlinear modeling of marine vehicles in 6 degree of freedom", *Journal of Mathematical modeling of systems*, 1, 1, pp. 1-11.
13. Goheen, K. R., and Jefferys, E. R. (1990) "Multivariable self-tuning autopilots for autonomous and remotely operated underwater vehicles", *IEEE J. Oceanic Eng.*, 15, 3, pp. 144–151.
14. Yuh, J. (1994) "Learning control for underwater robotic vehicles", *IEEE Control Systems Magazine*, 14, 2, pp 39–46.
15. Cristi, R., Popoulias, A., and Healey, A. (1990) "Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicles in the dive plane", *IEEE J. Oceanic Eng.*, 15, 3, pp. 152-160.
16. Yuh, J. (1990) " A neural net controller for underwater robotic vehicles ", *IEEE J. Ocean. Eng.*, 15, 3, pp. 161-166.
17. Yuh, J., and Lakshmi, R. (1993) "An intelligent control system for remotely operated vehicles", *IEEE J. Oceanic Eng.*, 18, 1, pp. 55-62.
18. Jalving, B. (1994) "The NDRE-AUV flight control system", *IEEE J. Oceanic Eng.*, 19, 4, pp. 497-501.
19. Fossen, T. I., and Blanke, M. (2000) "Nonlinear output feedback control of underwater vehicle propellers using feedback from estimated axial flow velocity", *IEEE J. Oceanic Eng.*, 25, 2, pp. 241-255.
20. Smallwood, D. A., and Whitcomb, L. L. (2004) "Model-based dynamic positioning of underwater robotic vehicles: Theory and experiment", *IEEE J. Oceanic Eng.*, 29, 1, pp. 169-186.
21. Yoerger, D. R., and Slotine J.-J. E. (1985) "Robust trajectory control of underwater vehicles", *IEEE J. Oceanic Eng.*, 10, 4, pp. 462-470.

22. Christi, R., Papoulias, F. A., and Healey, A. J. (1990) "Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicles in dive plane", *IEEE J. Oceanic Eng.*, 15, 3, pp. 152-160.
23. Hoang, N. Q., and Kreuzer, E. (2008) "A robust adaptive sliding mode controller for remotely operated vehicles", *Technische Mechanik*, 28, 3-4, pp. 185-193.
24. Sebastian, E., and Sotelo, M. A. (2007) "Adaptive fuzzy sliding mode controller for the kinematic variables of an underwater vehicle", *Journal of Intelligent and Robotic systems*, 49, 2, pp. 189-215.
25. Bessa, W. M., Dutra, M. S., and Kreuzer, E. (2008) "Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller", *Robotics and Autonomous System*, 56, 8, pp. 670-677.
26. Bessa, W. M., Dutra, M. S., and Kreuzer, E. (2010) "An adaptive fuzzy sliding mode controller for remotely operated underwater vehicles", *Robotics and Autonomous System*, 58, 1, pp. 16-26.
27. Wang, J.-S., and Lee, C. S. G. (2003) "Self-adaptive recurrent neuro-fuzzy control of an autonomous underwater vehicle", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 19, 2, pp. 283-295.
28. Da Cunha, J. P. V. S., Costa, R. R., and Hsu, L. (1995) "Design of a high performance variable structure control of ROVs", *IEEE J. Oceanic Eng.*, 20, 1, pp. 42-55.
29. Bessa, W. M., Dutra, M. S., and Kreuzer, E. (2007) "Adaptive fuzzy sliding mode control of underwater robotic vehicles", in *DINAME 2007-Proceedings of the XII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics*.
30. Weyer, M. van de (2011) "Depth control of an Underwater Robot", Institute of Parallel and Distributed Systems University of Stuttgart.
31. Wang, L. X. (1996) "*A course in fuzzy systems and control*", Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
32. Slotine, J. J. E., and Li, W. (1991) "*Applied Nonlinear Control*", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
33. Lu, Y. S., and Chen, J. S. (1994) "A self-organizing fuzzy sliding-mode controller design for a class of nonlinear servo systems", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 41, 5, pp. 492-502.

34. Duarte, M. A., and Narendra, K. S. (1989) "Combined direct and indirect approach to adaptive control", *IEEE Trans. Autom. Control*, 34, 10, pp. 1071-1075.
35. Hojati, M., and Gazor, S. (2002) "Hybrid adaptive fuzzy identification and control of nonlinear systems", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, 10, 2, pp. 198-210.
36. Wang, J., Rad, A. B., and Chan, P. T. (2001) "Indirect adaptive fuzzy slidingmode control: Part I: fuzzy switching", *Fuzzy Sets and Systems*, 122, 1, pp. 21-30.
37. Bellomo, D., Naso, D., and Babuska, R. (2008) "Adaptive fuzzy control of a non-linear servo-drive: Theory and experimental results", *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 21, 6, pp. 846–857.
38. Wang, L. X. (1995) "Design and analysis of fuzzy identifiers of nonlinear dynamic systems", *IEEE Trans. Autom. Control*, 40, 1, pp. 11-23.
39. Naso, D., Cupertino, F., and Turchiano, B. (2010) " Precise position control of tubular linear motors with neural networks and composite learning", *Control Eng. Practice*, 18, 5, pp. 515–522.
40. Hamzaoui, A., Essounbouli, N., Benmahammed, KH., and Zaytoon, J. (2004) "State observer based robust adaptive fuzzy controller for nonlinear uncertain and perturbed systems", *IEEE Trans. Syst. Man. Cyber. - Part B: Cybernetics*, 34, 2, pp. 942-950.
41. Narendra, K. S., and Parthasarathy, K. (1990) "Identification and control of dynamical systems using neural networks", *IEEE Trans. Neural Networks*, 1, 1, pp. 4-27.
42. Phan, P. A., and Gale, T. (2007) "Two-Mode adaptive fuzzy control with approximation error estimator", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, 15, 5, pp. 943-955.



**Abstract:**

This thesis presents two adaptive fuzzy control method based on indirect approaches on underwater robots. In this method, the minimum run time, improvement adaptation parameters and the minimum error with respect to the purpose and direction is desirable. In the first method, due to undesired effects caused by the presence of external disturbances, a robust adaptive fuzzy controller has been used to implement the laws. Evaluation of this method on the depth of an underwater robot shows the tracking error and convergence speed parameter is improved. It also presents a new Lyapunov function to extract the implementation of the proposed rules, the system stability is shown. In the second approach, the control law to guarantee tracking performance and faster convergence structures in the presence of parameter uncertainty and external disturbances is defined. The series–parallel identification model to obtain the prediction error is introduced. In this way, the composite adaptive laws utilize both tracking and prediction errors. Overall stability of the closed-loop system is proved by Lyapunov analysis. The control system ensures that all signals involved are bounded. Simulation results on the depth of underwater robot with respect to its position in the XY plane has shown good performance.

**Keywords:** Adaptive fuzzy control, Underwater robot, Hybrid adaptation, Stability, Lyapunov theory



**Shahrood University of Technology**

Department of Electrical and Robotic Engineering

M.Sc.thesis

**Adaptive Fuzzy Depth Control of an Underwater Vehicle**

**Maryam Hasani**

Supervisors:

Dr. A. Akbarzadeh Kalat

Winter 2014