



دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

# شناسایی دینامیک حرکت یک وسیله نقلیه زیرآبی در مود عمق

استاد راهنما: دکتر سید محمد بزرگ

استاد مشاور: مهندس محسن بیدکی

پژوهش و نگارش: احسان شاهین‌فر

مهر ۱۳۸۸

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک طراحی کاربردی

# شناسایی دینامیک یک وسیله نقلیه زیرآبی در

## مود عمق

استاد راهنما: دکتر سید محمد بزرگ

استاد مشاور: مهندس محسن بیدکی

پژوهش و نگارش: احسان شاهین فر

مهر ۱۳۸۸

## چکیده

افزایش نیاز به استفاده از وسایل زیرآبی خودکار برای کاربردهای نظامی و صنعتی باعث شده است تا تحقیقات در این زمینه در دهه اخیر افزایش یابد. نیاز به مدل‌های ریاضی دقیق با استفاده از روش‌هایی عملی و اقتصادی، به عنوان یک مرحله مهم در کنترل و شبیه‌سازی این سیستم‌ها، باعث شده تا زمینه شناسایی سیستم و تخمین پارامتر مورد توجه ویژه قرار گیرد. در این پروژه به شناسایی و تخمین ضرایب هیدرودینامیک یک وسیله زیرآبی خودکار در مود حرکتی عمق پرداخته شده است.

الگوریتم مورد استفاده، الگوریتم حداکثر شباهت اصلاح شده بوده که ترکیبی از تخمین‌گر حداکثر شباهت و فیلتر کالمن است. این الگوریتم قادر به تخمین پارامترهای یک سیستم در حضور نویز اندازه‌گیر و نویز فرآیند است، که در آن نویز فرآیند و نویز اندازه‌گیر مستقل از یکدیگر و به صورت گوسی با میانگین صفر و سفید در نظر گرفته شده‌اند. در این پروژه تغییراتی در مراحل اجرای الگوریتم شناسایی حداکثر شباهت اصلاح شده داده شده است. یکی از این تغییرات استفاده از فیلتر کالمن با حافظه محو شونده به جای فیلتر کالمن معمولی برای افزایش دقت تخمین متغیرهای حالت و دیگری استفاده از روش نیوتن میرا شونده به جای روش نیوتن-رافسون برای بهینه‌سازی معادله شباهت است.

ابتدا الگوریتم شناسایی بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده مربوط به مود حرکتی عمق یک وسیله نمونه پیاده‌سازی شده، و نتایج حاصل با مقادیر مدل شبیه‌سازی مقایسه شده‌اند. سپس الگوریتم شناسایی بر اساس نتایج تست میدانی یک وسیله زیرآبی واقعی پیاده‌سازی شده و نتایج تخمین الگوریتم شناسایی حداکثر شباهت اصلاح شده با الگوریتم بهینه شده در این پروژه مقایسه شده‌اند.

## فهرست مطالب

فصل ۱ - مقدمه .....	۱
۱-۱ تعریف ضرایب هیدرودینامیکی و روش‌های محاسبه آنها .....	۲
۲-۱ مقدمه‌ای بر تئوری شناسایی سیستم .....	۵
۳-۱ تاریخچه شناسایی وسایل زیرآبی خودکار .....	۷
فصل ۲ - سینماتیک و سینتیک حرکت .....	۱۱
۱-۲ سینماتیک حرکت .....	۱۱
۱-۱-۲ دستگاه‌های مختصات .....	۱۱
۲-۱-۲ زوایای اوپلر .....	۱۴
۳-۱-۲ دوران‌های اصلی .....	۱۶
۴-۱-۲ تبدیل سرعت‌های خطی و زاویه‌ای .....	۱۷
۲-۲ سینتیک حرکت .....	۱۹
۱-۲-۲ مکانیک نیوتنی و لاگرانژی .....	۱۹
۲-۲-۲ دینامیک جسم صلب در شش درجه آزادی .....	۲۱
۳-۲-۲ نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیک .....	۲۳
۳-۲ تفکیک حرکت AUV در مودهای حرکتی مختلف .....	۲۶
۱-۳-۲ مود حرکتی سرعت .....	۲۷
۲-۳-۲ مود حرکت فرمان .....	۲۷
۳-۳-۲ مود حرکت شیرجه یا عمق زنی .....	۲۸
۴-۳-۲ مود حرکتی چرخش .....	۲۹
فصل ۳ - شناسایی سیستم .....	۳۰
۱-۳ جمع آوری اطلاعات در مورد سیستم .....	۳۰

۳-۲	انتخاب یک مدل برای نمایش سیستم	۳۱
۳-۲-۱	تقسیم بندی کلی مدل‌های استفاده شده در فرآیند شناسایی سیستم	۳۳
۳-۳	انتخاب یک معیار برای تخمین مجهولات مدل	۳۵
۳-۳-۱	ارزش‌گذاری مدل‌های یک سیستم	۳۷
۳-۳-۲	رگرسیون خطی و روش حداقل مربعات	۳۸
۳-۳-۳	معیار تخمین حداقل مربعات	۳۸
۳-۳-۴	روش حداقل مربعات وزن‌دار	۳۹
۳-۳-۵	چهار چوب آماری برای تخمین پارامتر و روش حداکثر شباهت	۴۰
۳-۳-۶	کمینه کردن معادله شباهت	۴۴
۳-۴	معتبرسازی نتایج به دست آمده	۴۵
۳-۵	فیلتر کالمن	۴۶
۳-۵-۱	مقدمه‌ای بر فیلتر کالمن	۴۶
۳-۵-۲	فرمولاسیون و روابط ریاضی	۴۶
۳-۵-۳	مسئله واگرایی در فیلتر کالمن	۴۸
۳-۵-۴	فیلتر کالمن با حافظه محو شونده	۴۹
۳-۶	الگوریتم حداکثر شباهت اصلاح شده برای تخمین پارامتر	۵۰
<b>فصل ۴ - نتایج اجرای الگوریتم شناسایی</b>		
۴-۱	شناسایی بر اساس اطلاعات شبیه‌سازی شده	۵۴
۴-۲	شناسایی یک مدل واقعی	۵۹
<b>فصل ۵ نتیجه‌گیری</b>		
۵-۱	پیشنهاد برای تحقیقات آینده	۶۷
<b>مراجع</b>		
		۶۸

## فهرست شکل‌ها و نمودارها

۳	شکل ۱-۱
۷	شکل ۲-۱
۱۰	شکل ۱-۲
۱۲	شکل ۲-۲
۱۶	شکل ۳-۲
۲۱	شکل ۴-۲
۳۳	شکل ۱-۳
۴۹	شکل ۲-۳
۵۵	شکل ۱-۴
۵۷	شکل ۲-۴
۵۸	شکل ۳-۴
۶۰	شکل ۴-۴
۵۹	شکل ۵-۴
۶۱	شکل ۶-۴
۶۲	شکل ۷-۴
۶۳	شکل ۸-۴
۶۴	شکل ۹-۴
۶۵	شکل ۱۰-۴
۶۵	شکل ۱۱-۴

## فصل اول

### مقدمه

کاهش منابع طبیعی و میل شناخت دنیای طبیعت و تغییرات آن باعث افزایش توجه به کلیه شاخه‌های علمی مربوط به زیر آب شده است. برای مثال نیروهای دریایی در سال‌های اخیر توجه زیادی به کسب هر چه بیشتر اطلاعات از مناطق ناشناخته‌ی زیر دریا دارند تا در موفقیت آنها در جنگ کمک کند. در سیستم‌های دفاعی، زیر آب یکی از مناطق استراتژیک به حساب می‌آید. پیشرفت‌های حاصل در زمینه مین‌های دریایی و نیاز به کنترل سواحل دریایی باعث شده تا توجه ویژه‌ای به برتری کشورها در زیر آب شود.

وسایل زیرآبی بدون سرنشین امروزه بسیاری از این نیازها را رفع کرده‌اند. این وسایل قادرند تا انواع سنسورها و دوربین‌های فیلم‌برداری و وسایل مربوط به اقیانوس‌شناسی را حمل کنند. این وسایل به خاطر کم کردن حضور انسان در مناطق پرخطر و قادر ساختن انسان به شناخت مناطق دست نیافتنی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. همچنین این وسایل به خوبی قادر به انجام عملیات مخفیانه و ذخیره حجم بالایی از اطلاعات هستند، که این موضوع نیز به کاربری آنها افزوده است.

یکی از انواع وسایل زیرآبی بدون سرنشین، وسایل زیر آبی خودکار<sup>۱</sup> هستند. این وسایل قادرند بدون نیاز به انسان عملیات خود را انجام دهند. به همین علت AUV می‌تواند مسافت‌های طولانی‌تر و در مکان‌های پرخطرتر از محل خود را طی کند. پیشرفت‌های حاصل در ارتباطات صوتی نیز کمک می‌کند تا این وسایل بتوانند با یک مرکز هدایت در ارتباط باشند و اطلاعات را به طور دایمی با مرکز مبادله کنند. به طور مثال این وسیله به راحتی می‌تواند اطلاعات یک میدان مین را مشخص کرده و به مرکز ارسال کند [۱].

افزایش تقاضا برای استفاده از وسایل زیرآبی خودکار و وسایل زیرآبی بدون سرنشین<sup>۲</sup> برای مقاصد اقتصادی و نظامی، در دهه‌های اخیر باعث ایجاد یک زمینه وسیع تحقیقاتی در این رشته شده است. به طور مثال مشکل شناسایی مکان مین‌های مخفی دریایی به کمک AUV حل شده است.

در آینده می‌توان شاهد پیشرفت‌های زیادی در قابلیت‌های AUV برای انجام ماموریت‌های پیچیده‌تر بود، ولی تکنولوژی در این زمینه هنوز نیاز به پیشرفت دارد تا AUV را قادر سازد تا کلیه ماموریت‌های مورد نیاز را به تنهایی انجام دهد [۲].

## ۱-۱- تعریف ضرایب هیدرودینامیکی و روش‌های محاسبه آنها

عبارات موجود در معادلات حرکت که نمایانگر نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی وارد بر یک وسیله زیرآبی هستند معمولاً حول یک وضعیت مرجع مناسب توسط سری تیلور بسط داده می‌شوند. برای هواپیماها و وسایل دریایی این وضعیت مرجع حالتی است که وسیله با سرعت ثابت  $U_0$  به سمت جلو حرکت می‌کند.

برای یک وسیله زیرآبی خودکار همانگونه که در شکل ۱-۱ نمایش داده شده است یک

<sup>1</sup> Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

<sup>2</sup> Unmanned Undersea Vehicles (UUVs)



دستگاه مختصات در مرکز جرم وسیله قرار داده می‌شود. سه مؤلفه نیروی هیدرودینامیک وارد بر وسیله در سه جهت  $x$  و  $y$  و  $z$  به ترتیب با  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  و به همین صورت گشتاورهای هیدرودینامیکی وارد بر وسیله با  $M$ ،  $K$  و  $N$  نمایش داده شده‌اند. به صورت کلی نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی وارد بر یک وسیله زیرآبی را می‌توان بر اساس مولفه‌های سرعت خطی ( $u$ ،  $v$  و  $w$ ) و مولفه‌های سرعت زاویه‌ای ( $p$ ،  $q$  و  $r$ ) به صورت زیر بسط داد:

$$X = X_0 + X_u u + X_v v + X_w w + X_p p + X_q q + X_r r \quad (1-1)$$

$$Y = Y_0 + Y_u u + Y_v v + Y_w w + Y_p p + Y_q q + Y_r r \quad (2-1)$$

$$Z = Z_0 + Z_u u + Z_v v + Z_w w + Z_p p + Z_q q + Z_r r \quad (3-1)$$

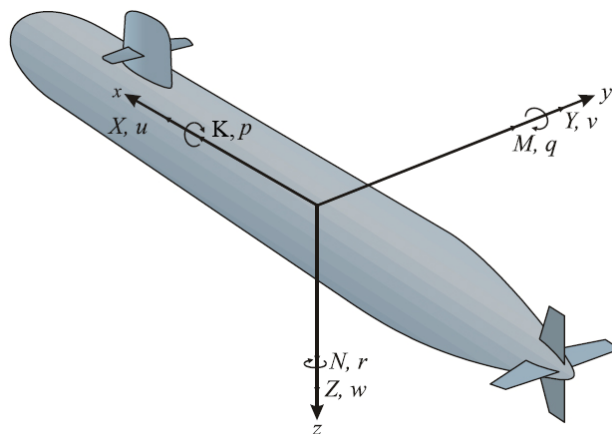
$$K = K_0 + K_u u + K_v v + K_w w + K_p p + K_q q + K_r r \quad (4-1)$$

$$M = M_0 + M_u u + M_v v + M_w w + M_p p + M_q q + M_r r \quad (5-1)$$

$$N = N_0 + N_u u + N_v v + N_w w + N_p p + N_q q + N_r r \quad (6-1)$$

$$X_u = \frac{\partial X}{\partial u} \quad (7-1)$$

در اینجا مولفه‌های اندیس‌دار، مشتقات جزئی هستند که با استفاده از (7-1) به دست آمده و مولفه‌های با اندیس 0 هم نمایانگر مقادیر نیروها و گشتاورها در وضعیت مرجع هستند. مولفه‌های اندیس‌دار در روابط بالا ضرایب هیدرودینامیکی نامیده می‌شوند [3].



شکل 1-1 محور مختصات در نظر گرفته شده برای یک AUV

ضرایب هیدرودینامیک به وسایلی چون زیردریایی، روبات‌های زیرآبی، اژدرها و سایر وسایلی که در داخل آب و یا هر سیالی شبیه به آب حرکت می‌کنند، مربوط می‌شود. محاسبه این ضرایب یکی از مهم‌ترین و موثرترین کارها در زمینه مدلسازی چنین وسایلی است. روش‌های مختلفی برای محاسبه این ضرایب وجود دارد که عبارتند از:

۱- روش تونل باد یا تونل آب

۲- روش تقریبی تئوری نواری<sup>۱</sup> و روش‌های نیمه تجربی DATCOM

۳- روش دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۲</sup>

۴- روش‌های شناسایی سیستم و تخمین پارامتر

روش اولیه به دلیل بالا بودن هزینه‌های مدل‌سازی و همچنین محدودیت‌های مقیاس در مراحل اولیه طراحی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. روش‌های دوم نیز دارای دقت پایینی هستند. اما دو روش آخر در سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۴].

اگر نتایج دقیق و مناسبی از تست وسیله در اختیار باشد، روش شناسایی و تخمین پارامترهای سیستم یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیک و یا پارامترهای دینامیکی یک وسیله زیرآبی است. تخمین حداکثر شباهت<sup>۳</sup> و فیلتر کالمن<sup>۴</sup> یکی از روش‌های عددی مناسب و استاندارد برای شناسایی سیستم در این زمینه است. در این روش تخمین از خواص آماری داده‌ها و پارامترها استفاده شده و با در نظر گرفتن نویزهای اندازه‌گیری و فرآیند، مقادیر مناسبی برای ضرایب و پارامترهای سیستم ارائه می‌دهد [۴].

---

<sup>1</sup> Strip Theory

<sup>2</sup> CDF (Calculating Fluid Dynamic)

<sup>3</sup> Maximum Likelihood

<sup>4</sup> Kalman Filter

## ۱-۲- مقدمه‌ای بر تئوری شناسایی سیستم

یک فرد از ابتدای زندگی، همچنان که رشد می‌کند با محیط اطراف ارتباط برقرار کرده و به مرور یاد می‌گیرد تا اعمال خود را با پیش‌بینی تاثیرات آنها کنترل نماید، که این پیش‌بینی‌ها بر اساس یک مدل درونی بر گرفته از واقعیت‌ها و با استفاده از تجربیات قبلی وی انجام می‌گیرد. با شروع فعالیت‌های ابتدایی به مرور قادر می‌شود تا فعالیت‌های پیچیده‌تری همچون راه رفتن، دویدن و ... را انجام داده و سرانجام این توانایی‌ها را در طراحی وسایل پیچیده‌تر (راديو، هواپیما، ...) برای پاسخگویی به نیازهایش به کار گیرد. وی همچنین برای بهتر فهمیدن جهان اطراف خود مدل‌هایی از آن می‌سازد، هیچ‌گاه کل طبیعت را به صورت یکجا بررسی نمی‌کند و فقط اجزای مورد نیاز خود را در نظر گرفته و به صورت یک مدل توصیف می‌نماید. به این قسمت کوچک در نظر گرفته شده از کل، یک سیستم و به بقیه طبیعت، محیط آن سیستم گفته می‌شود. مدلسازی سیستم‌ها به مرور و با پیشرفت علم بهبود یافت ولی همواره این پرسش وجود داشت که یک مدل ریاضی از یک سیستم را چگونه می‌توان بر سیستم واقعی منطبق کرد [۵].

پیشرفت تئوری شناسایی در علم کنترل در ادامه پیشرفت‌های کنترل بر اساس مدلسازی سیستم در سال‌های نزدیک به ۱۹۶۰ به وجود آمد. تا اواخر دهه ۵۰ اکثر طراحی‌های کنترلی بر اساس تحلیل‌های بود<sup>۱</sup>، نایکوئیست<sup>۲</sup>، نمودار نیکولز<sup>۳</sup> و یا بر اساس تحلیل پاسخ پله<sup>۴</sup> انجام می‌گرفت که این روش‌ها فقط به سیستم‌های تک ورودی، تک خروجی می‌پرداختند. در حدود سال ۱۹۶۰ کالمن، فیلتری معرفی کرد که به افتخار او به نامش به ثبت رسید و به عنوان بنیادی برای کنترل بر اساس مدل قرار گرفت. در سال‌های اخیر اکثر کارهای انجام شده در شناسایی سیستم در زمینه‌های اقتصاد و ارتباطات انجام شده است. پایه تئوری احتمالاتی تخمین پارامتر بر اساس

---

<sup>۱</sup> Bode

<sup>۲</sup> Nyquist

<sup>۳</sup> Nichols Chart

<sup>۴</sup> Step Response Analyses

کارهای گوس<sup>۱</sup> و فیشر<sup>۲</sup> بنا شد و اکثر پیشرفت‌های حاصل در این زمینه بین سال‌های ۱۹۲۰ تا ۱۹۷۰ انجام گرفت [۶]. سال ۱۹۶۵ را به خاطر دو مقاله پایه [۶] و [۷] می‌توان سال تولد تئوری شناسایی سیستم در کنترل دانست. این دو مقاله راه را برای پیشرفت‌های بعدی و به خصوص دو تکنیک شناسایی زیر فضا<sup>۳</sup> و تخمین خطای پیشگویی<sup>۴</sup> که امروزه از روشهای رایج در شناسایی سیستم به شمار می‌روند هموار کردند [۵].

از اواسط دهه ۷۰ روش تخمین خطای پیشگویی به عنوان روش غالب در تئوری شناسایی سیستم استفاده شد. اکثر تحقیقات در این دوره بر روی مسایل شناسایی پذیری<sup>۵</sup>، برای سیستم‌های حلقه بسته و چند متغیر انجام شد که هدف اصلی بررسی شناسایی پذیری یافتن شرایطی بود که تحت آن مدل تخمین زده شده به سیستم واقعی همگرا شود.

حدود سال ۱۹۷۶ اولین تلاش‌ها برای در نظر گرفتن تئوری شناسایی سیستم به عنوان یک تئوری تخمین انجام گرفت، به صورتی که باید به دنبال محتمل‌ترین تخمین از مدل سیستم واقعی بود، [۸] و [۹]. بنابراین دید غالب در تئوری شناسایی سیستم از جستجو برای یافتن بهترین مدل برای سیستم واقعی به یافتن مشخصات بهترین تخمین تغییر پیدا کرد و در نتیجه مشخص کردن مدل خطا به نکته مهم در تحقیقات تبدیل شد. مهم‌ترین اتفاق زمانی افتاد که لیونگ<sup>۶</sup> مفهوم بایاس و واریانس خطا را برای یک تابع تبدیل تخمین زده شده ارائه کرد [۱۰].

از سال ۱۹۹۰ تئوری شناسایی سیستم به طور وسیع در موارد مختلف از جمله طراحی تجربی، شناسایی مدار بسته، شناسایی در حوزه فرکانس و تخمین نامعین<sup>۷</sup> مورد استفاده قرار گرفت [۵]. یکی از استفاده‌های این تئوری در تخمین پارامترهای نامعین یک سیستم است، که به خاطر هزینه بسیار پایین آن نسبت به روش‌های مشابه به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد.

---

<sup>1</sup> Gauss

<sup>2</sup> Fisher

<sup>3</sup> Subspace Identification

<sup>4</sup> Prediction-Error

<sup>5</sup> Identifiability

<sup>6</sup> L.Ljung

<sup>7</sup> Uncertainty Estimation

### ۱-۳- تاریخچه شناسایی وسایل زیرآبی خودکار

در سال ۱۹۹۸ در مرجع [۱۱] استفاده از روشهای حداقل مربعات (LS)<sup>۱</sup> و فیلتر کالمن توسعه یافته<sup>۲</sup> برای شناسایی یک وسیله زیرآبی ارائه شد. در این مقاله مدل یک وسیله زیر آبی بدون سرنشین (ROV)<sup>۳</sup> در نظر گرفته شده و هدف نشان دادن امکان شناسایی و تخمین پارامترهای یک ROV کوچک با هزینه ناچیز است. شناسایی تنها با چند وسیله استاندارد نصب شده انجام گرفته و پارامترهای مدل با کمک دو روش حداقل مربعات و فیلتر کالمن توسعه یافته تخمین و شناسایی شده‌اند. این مقاله توجه اصلی خود را به تخمین یک ROV معطوف کرده که از لحاظ دینامیکی با AUV متفاوت است. ولی با توجه به اینکه روش شناسایی سیستم و تخمین پارامترها را برای یک مسئله واقعی استفاده کرده حایز اهمیت می‌باشد. از طرفی به علت استفاده از LS حل اندکی ساده‌تر شده است.

در [۱۲] در سال ۲۰۰۲، تخمین ضرایب هیدرودینامیک یک AUV با استفاده از مشاهده کننده‌های غیر خطی ارائه شد. در این مقاله یک AUV واقعی در نظر گرفته شده و نتایج حاصل بر روی آن امتحان شده‌اند. در اینجا از دو مشاهده‌گر فیلتر کالمن توسعه یافته و SMO<sup>۴</sup> برای تخمین پارامترهای سیستم استفاده شده است. از نتایج برای طراحی کنترل کننده حرکت در عمق و مسیریابی استفاده شده است. به علت اینکه مدل AUV مورد نظر شدیداً غیرخطی است از کنترل مود لغزشی برای کاهش اثر غیرخطی بودن و نویز و نامعینی پارامترها استفاده شده است. از مزیت‌های این مقاله تخمین پارامترهای نامعین در کلیه مودهای حرکتی AUV و دقت خوب روش بوده است. هرچند که در هر مورد خطای تعدادی از پارامترهای محاسبه شده تا ۳۷٪ نیز افزایش می‌یابد.

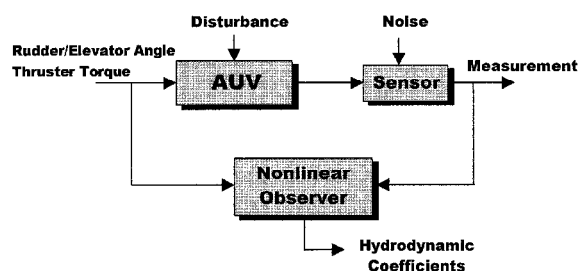
---

<sup>1</sup> Least Square (LS)

<sup>2</sup> Extended Kalman Filter (EKF)

<sup>3</sup> Remotely Operated Vehicle (ROV)

<sup>4</sup> Sliding Mode Observer



شکل ۲-۱ نمایش نحوه عملکرد تخمین مرجع [۱۲]

پس از آن در سال ۲۰۰۷ [۱۳]، شناسایی یک وسیله خودکار زیر آبی با استفاده از مشاهده-گر فیلتر کالمن را ارایه کرد. در این مقاله یک مدل خطی گسسته از یک AUV در نظر گرفته شده است. هدف استفاده از مشاهده-گر فیلتر کالمن<sup>۱</sup> برای تخمین پارامترهای یک سیستم خطی است. در اینجا مسئله به مود دوران حول محور قائم محدود شده و در پایان نتایج به دست آمده با یک مدل واقعی مقایسه شده است. مزایای حاصل از این روش را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱- این روش می‌تواند به صورت خودکار یک مدل چند ورودی، چند خروجی بر اساس اندازه‌گیری‌های ورودی و خروجی تولید کند.

۲- این روش، یک مرتبه مناسب از سیستم را برای تخمین در نظر می‌گیرد حتی هنگامی که نویز زیادی موجود باشد.

در سال ۲۰۰۷ در مرجع [۴] شناسایی AUV در مود فرمان برای اهداف کنترلی و تخمین پارامتر همزمان با استفاده از فیلتر کالمن و تخمین‌گر حداکثر شباهت<sup>۲</sup> انجام شده است. از فواید استفاده همزمان این دو روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- افزایش دقت تخمین در محیط با نویز بیشتر نسبت به دیگر روش‌ها

۲- همچنین با افزایش مراحل MLE دقت تخمین و عملکرد آن بهبود می‌یابد.

در این مقاله به تخمین در مود فرمان یک AUV پرداخته با استفاده از اطلاعات شبیه‌سازی

<sup>1</sup> Observer Kalman Filter Identification (OKID)

<sup>2</sup> Maximum Likelihood Estimator (MLE)

شده در سه مرحله و با اضافه نمودن ۱۰٪ و ۲۰٪ و ۳۰٪ خطا به بررسی میزان دقت و نحوه عملکرد روش پرداخته شده است.

نحوه عمل در این روش دارای دقت خوبی است ولی در این مقاله فقط مود فرمان بررسی شده و مودهای دیگر در تخمین استفاده نشده‌اند. و همچنین نتایج به جای بررسی بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی از اطلاعات شبیه‌سازی شده برای شناسایی یک AUV استفاده شده است. در این پروژه با استفاده از الگوریتم حداکثر شباهت به همراه فیلتر کالمن به تخمین پارامترهای یک AUV در مود عمق پرداخته می‌شود. برای این کار ابتدا الگوریتم شناسایی برای یک مدل ریاضی پیاده شده و پارامترهای مجهول آن در مود عمق تخمین زده می‌شوند. سپس با استفاده از اطلاعات ورودی و خروجی از یک سیستم واقعی به تخمین پارامترهای هیدرودینامیکی یک وسیله نمونه در مود حرکتی عمق پرداخته می‌شود.

در فصل دوم معادلات دینامیکی حاکم بر یک وسیله زیر آبی معرفی خواهد شد. در این فصل ابتدا از دید سینماتیکی معادلات حرکت یک وسیله زیر آبی و همچنین چگونگی تبدیل بردارهای حرکتی وسیله از یک مختصات به مختصات دیگر بررسی شده است. در پایان نیز معادلات مربوط به مودهای تفکیک شده حرکت وسیله بیان شده‌اند.

در فصل سوم مبانی شناسایی و تخمین پارامترهای مجهول یک سیستم مطرح شده و انواع مدل‌های مورد استفاده برای شناسایی یک سیستم تشریح شده‌اند. در انتهای فصل نیز الگوریتم شناسایی مورد استفاده در این پروژه که به الگوریتم شناسایی حداکثر شباهت اصلاح شده معروف است تشریح شده و روند انجام شناسایی و تخمین ضرایب هیدرودینامیکی یک وسیله زیر آبی به کمک این الگوریتم معرفی شده است.

در فصل چهارم نتایج حاصل از اجرای الگوریتم شناسایی در دو مرحله نشان داده شده‌اند. همان گونه که گفته شد در مرحله اول الگوریتم برای یک مدل ریاضی و بر اساس ورودی‌ها و خروجی‌های شبیه‌سازی شده اجرا شده و نتایج حاصل از تخمین پارامترها و جداول مقایسه‌ای نتایج با مقادیر اصلی ارائه شده است. در مرحله دوم نیز حاصل اعمال همان الگوریتم شناسایی بر

یک سیستم واقعی و بر اساس ورودی‌ها و خروجی‌ها میدانی اعمال شده و نتایج حاصل از شناسایی بیان شده‌اند.

نتایج حاصل از این تحقیق در فصل پنجم جمع‌بندی شده و زمینه‌هایی برای ادامه تحقیقات معرفی شده‌اند.



## فصل دوم

### سینماتیک و سینتیک حرکت

#### ۲-۱- سینماتیک حرکت

##### ۲-۱-۱- دستگاه‌های مختصات

برای نمایش وضعیت یک وسیله متحرک روی زمین از دستگاه‌های مختصات مختلفی استفاده می‌شود، که در زیر معرفی شده‌اند.

الف- دستگاه مختصات متصل به مرکز زمین که به صورت ثابت و بدون حرکت در نظر گرفته می‌شود ( $ECI^1$ ).

ب- دستگاه مختصات متصل به زمین که یک محور آن در امتداد قطب شمال است و دو محور دیگر همراه با زمین دوران می‌کنند ( $ECEF^2$ ).

پ- دستگاه مختصات متصل بر روی سطح زمین که محورهای آن در امتداد شمال، شرق و مرکز زمین در نظر گرفته می‌شوند ( $NED^3$ ).

ت- دستگاه مختصات بدنه که به وسیله متحرک متصل می‌شود ( $Body^4$ ).

در شکل ۱-۲ این دستگاه‌های مختصات نمایش داده شده‌اند.

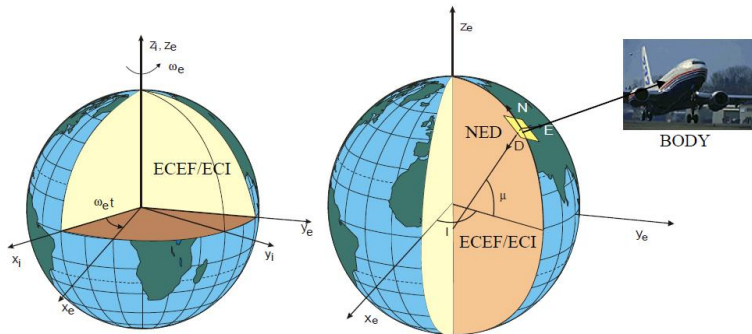
---

<sup>1</sup> Earth-Centered Inertial Frame

<sup>2</sup> Earth-Centered Earth-Fixed Frame

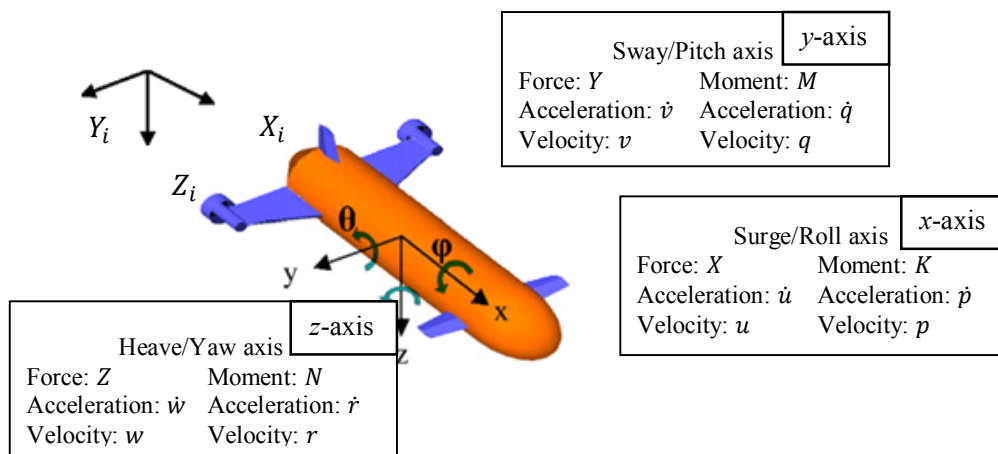
<sup>3</sup> North-East-Down Frame

<sup>4</sup> Body fixed frame



شکل ۱-۲ انواع دستگاه مختصات مرسوم برای نمایش وضعیت یک جسم

هنگام تحلیل حرکت وسایل زیر آبی در شش درجه آزادی معمولاً دو دستگاه مختصات بدنه (متصل به وسیله)، و دستگاه مختصات NED استفاده می‌شود. معمولاً برای وسایل زیرآبی با سرعت کم می‌توان از شتاب نقاط روی زمین صرف نظر کرد، بنابراین دستگاه مختصات NED را می‌توان برای اینگونه وسایل زیر آبی به عنوان یک دستگاه مختصات اینرسی در نظر گرفت. با این فرض دستگاه مختصات XYZ متصل به زمین به عنوان یک دستگاه مختصات اینرسی برای AUV در نظر گرفته می‌شود. نحوه قرار گرفتن این دو دستگاه مختصات و همچنین نحوه نامگذاری محورهای آنها برای AUV در شکل ۲-۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۲ نمایش دستگاه‌های مختصات برای یک AUV

در جدول ۱-۲ نمادهای مورد استفاده در مدلسازی AUV و نحوه نامگذاری سرعت‌ها، نیروها و جابجایی‌ها نشان داده شده و این نامگذاری بر اساس استاندارد SNAME<sup>۱</sup> انجام گرفته است. لازم به توضیح است که موقعیت‌های یک جسم (جابجایی-ها و دوران‌ها) در مختصات اینرسی معنی و مفهوم پیدا می‌کند، زیرا ناظر ساکن در دستگاه اینرسی می‌تواند مسیر حرکت دوران جسم را تشخیص دهد. اما سرعت‌ها (خطی و دورانی) معمولاً نسبت به مختصات بدنه اندازه‌گیری می‌شود، بنابراین نمی‌توان مستقیماً از سرعت‌های خطی و دورانی در دستگاه بدنه انتگرال‌گیری کرد و به جابجایی‌ها و دوران‌ها دست یافت، بلکه باید سرعت‌ها را از دستگاه مختصات بدنه به مختصات اینرسی تبدیل کرد.

جدول ۱-۲ نمادهای مورد استفاده برای مدلسازی وسایل دریایی

مکان و زوایای اوپلری	سرعت‌های خطی و زاویه‌ای	نیروها و گشتاورها	درجه آزادی
x	u	X	۱ حرکت در جهت محور x (surge)
y	v	Y	۲ حرکت در جهت محور y (sway)
z	w	Z	۳ حرکت در جهت محور z (heave)
$\phi$	p	K	۴ دوران حول محور x (roll)
$\theta$	q	M	۵ دوران حول محور y (pitch)
$\psi$	r	N	۶ دوران حول محور z (yaw)

کمیت‌های مختلف تعریف شده در جدول ۱-۲، اساس تعریف مشخصه‌های حرکتی یک AUV را در بر دارد به طوری که برای حرکت شش درجه آزادی می‌توان بردارهای زیر را در نظر گرفت.

<sup>۱</sup> The Society of Naval Architects and Marine Engineers

$$\begin{aligned}
\eta &= \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} & \eta_1 &= \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} & \eta_2 &= \begin{bmatrix} \phi \\ \psi \end{bmatrix} \\
v &= \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} & v_1 &= \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} & v_2 &= \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \\
\tau &= \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} & \tau_1 &= \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} & \tau_2 &= \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{۱-۲}$$

که در آن،  $\eta$  بردار موقعیت انتقالی و زاویه‌ای در دستگاه اینرسی،  $U$  بردار سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای در دستگاه بدنه و  $\tau$  بردار نیروها و گشتاورهای وارد بر جسم در دستگاه بدنه است. در هدایت و کنترل یک AUV معمولاً جابجایی زاویه‌ای را به وسیله زوایای اوپلر و یا کواترنین‌ها<sup>۱</sup> نمایش می‌دهند. در واقع زوایای اوپلر و یا کواترنین‌ها رابطه بین دستگاه مختصات بدنه و دستگاه مختصات اینرسی را بیان می‌کنند [۱۴].

## ۲-۱-۲- زوایای اوپلر

در حرکت یک وسیله می‌توان مولفه‌های حرکتی وسیله را که در دستگاه مختصات بدنه اندازه‌گیری شده‌اند در دستگاه مختصات اینرسی محاسبه نمود. برای مثال برای سرعت داریم:

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1 \tag{۲-۲}$$

که  $J_1(\eta_2)$  ماتریس انتقال این تبدیل نامیده می‌شود، و به همین صورت برای یک تبدیل عکس از مختصات اینرسی به مختصات بدنه داریم:

$$v_1 = J_1^{-1}(\eta_2)\dot{\eta}_1 \tag{۳-۲}$$

در ادامه نحوه محاسبه ماتریس انتقال  $J_1(\eta_2)$  بررسی خواهد شد.

**تعریف ۲-۱:** حرکت یک جسم صلب یا دستگاه مختصات  $B$  نسبت به جسم صلب یا

<sup>۱</sup> quaternion