

شناسایی ضرایب هیدرودینامیک زیرسطحی بدون سرنشین با روش حداکثر مشابهت مبتنی بر الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات

سجاد صادقان بافقی^{۱*}، عبدالمجید خشنود^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی-تهران، sajadsadeqian@email.kntu.ac.ir

۲- دانشیار، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی-تهران، khoshnood@kntu.ac.ir

*نویسنده مخاطب

نواقص طراحی و خطاهای کنترل مرحله تکرار زیرسطحی، اجتناب‌ناپذیر است.

مدلسازی کامپیوتری شناورهای زیرسطحی یکی از بهترین ابزارهای طراحی در فاز اول توسعه آن‌هاست. مدل دینامیکی از شناور زیرسطحی که نشان‌دهنده برهم‌کنش شناور با سیال پیرامون آن است هسته‌ی محیط شبیه‌سازی کامپیوتری است. مدل دینامیکی شامل چند معادله دیفرانسیل حرکت حاکم بر سیستم است که در آن نیروها و گشتاورهای دینامیکی می‌توانند برحسب ضرایب هیدرودینامیکی بیان شوند. بنابراین دانستن مقادیر دقیق این ضرایب که در واقع به معنی یافتن مدل دینامیکی دقیق وسیله است، مسأله‌ای مهم در میان مطالعات مربوط به زیرسطحی‌ها است. ضرایب هیدرودینامیکی مهم‌ترین داده‌های یک شبیه‌سازی زیرسطحی هستند. برای برآورد و محاسبه این ضرایب از روش‌های عددی، نیمه تجربی، تجربی و شناسایی سیستم استفاده می‌شود. روش‌های تجربی معتبرترین راه برای تولید پایگاه داده هیدرودینامیک است اما انجام یک آزمایش در مقایسه با روش‌های دیگر هزینه زیادی دارد. به هر حال روش‌های عددی و نیمه تجربی راه‌های دیگری برای تولید پایگاه داده هیدرودینامیک در فرآیند پیش طراحی یک زیرسطحی هستند که با این روش می‌توان تعداد و در نتیجه هزینه‌های آزمایش‌های هیدرودینامیک را کاهش داد.

اگر چه روش‌های تجربی مانند آزمایش‌های مکانیزم صفحه‌ای در میان آزمایش‌های عملی رایج‌ترین آزمایش است، اما نتایج آن به علت مشکلات عملی آزمایش و عدم تطابق کامل شرایط آزمایش با شرایط واقعی، دارای دقت کافی نیست. همچنین علی‌رغم صرف زمان و هزینه بالا، در هر دور آزمایش، تنها یک یا دو پارامتر سیستم تعیین می‌شود.

استفاده از روش‌های شناسایی سیستم به علت قابلیت استفاده از نتایج آزمایش‌ها، در زمان بسیار محدود و با صرف هزینه‌های بسیار کمتری در مقایسه با روش‌های تجربی و نیز دستیابی به نتایج نسبتاً دقیق، می‌تواند به عنوان روشی کارا در محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی به کار گرفته شود. شناسایی سیستم برای شناورهای زیرسطحی به معنی تخمین تعدادی از مشتقات یا ضرایب هیدرودینامیکی است. این ضرایب، دینامیک شناور را مشخص می‌کنند. چنین اندازه‌گیری‌هایی در طول آزمایش‌ها تمام مقیاس با حسگرهایی که بر روی سیستم نصب می‌شوند فراهم گردیده و سپس توسط یک روش تخمین پارامتر پردازش و تحلیل می‌شوند.

روش دیگری که دقیق‌تر و سریع‌تر است و به راحتی می‌توان آن را برای موارد مختلف تکرار کرد روش شناسایی نام دارد. در این فرآیند با استفاده

چکیده

مدلسازی کامپیوتری شناورهای زیرسطحی یکی از بهترین ابزارهای طراحی در فاز اول توسعه آن‌هاست. در این مدل‌ها یکی از مهم‌ترین عوامل نامعینی ضرایب هیدرودینامیکی هستند که با دانستن آن‌ها می‌توان مدل دقیقی از دینامیک زیرسطحی را یافت. یکی از روش‌های پرکاربرد در زمینه شناسایی سیستم و پارامتر، روش شناسایی حداکثر مشابهت است. این روش، روشی مبتنی بر بهینه‌سازی است که با تنظیم بهینه پارامترها به دنبال تطابق حداکثر بین خروجی مدل و خروجی واقعی سیستم است. در بسیار از روش‌های حداکثر مشابهت از روش‌های مبتنی بر گرادینان استفاده می‌شود که نسبت به حدس اولیه حساس بوده و در سیستم‌های غیرخطی و پیچیده نیز همگرا نمی‌شود. در این مقاله به جای روش‌های مبتنی بر گرادینان از روش بهینه‌سازی فراابتکاری الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شده است. از آنجایی که این روش مبتنی بر جستجوی سراسری فضای جواب‌هاست، از همگرایی بسیار مناسبی برخوردار است و نسبت به حدس اولیه نیز حساس نیست.

واژه های کلیدی: ضرایب هیدرودینامیک، زیرسطحی بدون سرنشین، الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم حداکثر مشابهت، تخمین پارامتر.

۱- مقدمه

تمایل به تحقیق و توسعه در زمینه شناورهای زیرسطحی به دلیل کاربرد این وسایل در اکتشافات، مطالعات هیدروگرافی و کاربردهای دفاعی در سال‌های اخیر گسترش یافته است. شناورهای زیرسطحی بسیاری از نیازهای صنعتی و کاربردی را رفع کرده‌اند. این شناورها قادرند تا انواع سنسورها و دوربین‌های فیلم‌برداری و تجهیزات اقیانوس‌شناسی را حمل کنند. این وسایل به خاطر کم کردن حضور انسان در مناطق پرخطر و قادر ساختن انسان به شناخت مناطق دست‌نیافتنی مورد توجه قرار گرفته‌اند. همچنین این وسایل به خوبی قادر به انجام عملیات مخفیانه و ذخیره حجم بالایی از اطلاعات هستند، که این موضوع به کاربری آن‌ها افزوده است.

توسعه زیرسطحی کاری زمان‌بر و پرهزینه است. نیازمندی‌های فرآیند آزمایش یک نمونه اصلی از زیرسطحی، این هزینه و زمان را افزایش خواهد داد. احتمال آسیب رسیدن به زیرسطحی و حتی از بین رفتن آن به خاطر

پایه‌سازی شده است. روش شناسایی بر اساس روش حداقل مربعات (LS) ارائه شده است.

کاجیا و همکاران [۱۵] مدل پارامتر توده‌ای برای شناور زیرسطحی بدون سرنشین با چارچوب باز شامل برهمکنش‌های پروانه-بدنه و پروانه-پروانه را ارائه داده‌اند. شناسایی پارامترهای مدل شامل روش حداقل مربعات (LS) است که فقط از داده‌های حسگر روی عرشه استفاده می‌کند و نیازی به آزمون‌های حوضچه کشش وجود ندارد. طرح شناسایی بر مبنای آزمون‌های جداگانه برای تخمین ضرایب پسا و پیشران است و اثرات پروانه-بدنه و پروانه-پروانه و پارامترهای لختی متعاقب در نظر گرفته شده است.

مرجع [۱۶] به دو روش تکنیک تخمین حداقل مربعات آفلاین را بر مدل شناور خودکار زیرسطحی غیرخطی اعمال کرده‌اند. یکی از روش‌ها (روش مستقیم) خطای پیش‌بینی شتاب را به حداقل می‌رساند و روش دیگر (روش انتگرالی) خطای پیش‌بینی سرعت یک‌مرحله‌ای را به حداقل می‌رساند.

میسکوویچ و همکاران [۱۷] روشی مبتنی بر خود نوسانی‌ها را معرفی کرده‌اند. می‌توان از این روش برای شناسایی پارامترهای مدل یک درجه آزادی غیرخطی در شناورهای زیرسطحی و سطحی استفاده کرد. آزمایش‌های گسترده‌ای بر روی شناور سطحی بدون سرنشین چارلی انجام شده است تا نتایج سازگار این روش ثابت شود [۱۸]. دو روش بهینه‌سازی غیرخطی را به عنوان ابزاری برای تخمین سیستم در نظر می‌گیرند. هر دو روش بر اساس تکنیک‌های حداقل مربعات آفلاین هستند. ضرایب هیدرودینامیکی AUV-SNUUV I با استفاده از یک فیلتر کالمن بسط‌یافته تخمین زده می‌شوند.

در این مقاله ثابت و همکاران [۱۹] دو الگوریتم فیلترینگ غیرخطی بازگشتی برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی مقایسه می‌شوند. این روش‌ها EKF و نسخه استاندارد UKF هستند که نویز سفید گاوسی موجود در مدل غیرخطی را در نظر می‌گیرند. در این مقاله از اندازه‌گیری کاهش مرتبه یافته نیز برای بهبود برآورد ضریب در مقایسه با سایر آثار مشابه استفاده شده است.

سایر روش‌های غیرخطی اعمال شده برای شناسایی پارامترهای شناور خودکار زیرسطحی در ادامه شرح داده می‌شوند. در [۱۱] از یک مشاهده‌گر مود لغزشی برای تخمین ضرایب شناور خودکار زیرسطحی استفاده شد اما دقت کمتری نسبت به EKF از خود نشان داد. در [۲۰] و [۲۱] تغییر متغیرها برای اعمال روش حداقل مربعات به یک مدل مانور غیرخطی انجام شد. در [۲۲] و [۲۳] الگوریتم حداقل مشابَهت (MLA) به شناورهای خودکار زیرسطحی اعمال شد. در اثر دیگری MLA با EKF مقایسه و مشاهده شد که هر دو می‌توانند پارامترهای مدل را به دقت تخمین بزنند اما برآوردگر MLA همگرایی سریع‌تری نسبت به EKF نمایش می‌گذارد. در [۱۹] و [۲۴] فیلتر کالمن خنثی (UKF) با EKF مقایسه شد و این نتیجه به دست آمد که UKF نتایج دقیق‌تری نسبت به EKF ارائه داده و خطاهای ثابتی را نشان می‌دهد. از دیگر الگوریتم‌های شناسایی اعمال شده بر روی مدل‌های شناور خودکار زیرسطحی می‌توان به رگرسیون چند متغیره [۲۵]، مدل‌سازی فازی [۲۶] و الگوریتم‌های بهینه‌سازی با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری [۲۷]، [۲۸] اشاره کرد.

از حسگرهای روی عرشه پاسخ شناور به ورودی‌های معلوم مختلف مشاهده می‌شود و پارامترهای مجهول تخمین زده می‌شود [۱]. روش شناسایی موضوع بسیاری از تحقیقات دریایی بوده است.

مزیت روش شناسایی سیستم، مقادیر واقع‌گرایانه پارامترهای شناسایی شده به دلیل تنظیم خروجی مدل برای داده‌های تجربی است. با استفاده از شناسایی سیستم بر اساس داده‌های تجربی تولید شده در طول کارآزمایی‌های مدل آزاد حتی می‌توان اثرات نقص‌های هندسی شناور و ضرائبی مانند آنتن‌ها، ترانسیدوسرهای صوتی یا حسگرهای دیگری که بر هندسه بدنه تأثیر می‌گذارند را در نظر گرفت. در نظر گرفتن این اثرات در مدل تحلیلی دشوار است. می‌توان از روش‌های مبتنی بر CFD استفاده کرد اما این روش‌ها به‌ویژه برای تلاش‌های دینامیکی، از نظر محاسباتی پیچیده و زمان‌بر هستند.

روش‌های تخمین ضریب و شناسایی سیستم به مهندسان اجازه می‌دهند تا با استفاده از داده‌های رکورد شده معادله حرکت را تشکیل دهند. همان‌گونه که بیان شد تخمین پارامترها در شناورهای خودکار زیرسطحی برای محققان سیستم‌های دریایی حوزه تحقیقاتی جذابی بوده است. با استفاده از پارامترهای تخمینی می‌توان مدل ریاضی دقیقی ایجاد کرد که به طراحی بهینه سیستم منتهی می‌شود. علاوه بر این، می‌توان از مدل پایه‌سازی شده در طراحی سیستم کنترل استفاده کرد.

به‌طور کلی می‌توان روش‌های تخمین سیستم را در دو گروه طبقه‌بندی کرد: تکنیک‌های آفلاین و تکنیک‌های آنلاین [۳-۲]. تکنیک‌های تخمین سیستم آفلاین متمایل به اتکا به روش‌های تکراری هستند که از مزیت داشتن مجموعه‌ای جامع از داده‌های قابل دسترسی برای پردازش بهره می‌برند [۴-۵]. تکنیک‌های تخمین سیستم آنلاین یا بازگشتی باید به‌محض دستیابی به داده‌ها از آن‌ها استفاده کنند. برآورد سیستم بازگشتی ابزاری گران‌بها در طراحی نظریه‌های کنترل تطبیقی [۶-۸]، الگوریتم‌های نظارت بر سلامت و طراحی سیستم‌های تحمل خطا [۹] است. گسترش دسترسی به توان محاسباتی آنلاین، ظهور فزاینده استفاده از الگوریتم‌های تخمین ضریب بازگشتی را توجیه می‌کند.

فیلتر کالمن بسط‌یافته (EKF) متداول‌ترین روش فیلترینگ غیرخطی در صنایع زیرسطحی محسوب می‌شود که برای تقریب غیرخطی بودن‌ها از خطی‌سازی بلافاصله در هر مرحله استفاده می‌کند [۲] [۱۰-۱۱]. تنظیم و پایه‌سازی فیلتر کالمن بسط‌یافته (EKF) در هنگام مواجهه با غیرخطی‌های عمده می‌تواند دشوار باشد و در موارد شدید، واگرایی را به نمایش می‌گذارد [۱۲]. علی‌رغم عدم کارایی نظری، از EKF به‌طور مؤثری در چندین مسئله تخمین شناور خودکار زیرسطحی استفاده شده است [۱۰، ۱۱].

الساندردی و همکاران [۱۳] ثابت کرده‌اند که مدل‌سازی و شناسایی شناورهای کوچک زیرسطحی با هزینه پایین امکان‌پذیر است. شناسایی پارامترهای مدل منتخب در دو مرحله و بر اساس حداقل مربعات (LS) و تکنیک‌های EKF بوده است. علاوه بر این، شناسایی فقط با استفاده از دستگاه‌های استاندارد آنلاین انجام شده است. الساندردی و همکاران [۱۴] مدل‌سازی و شناسایی حرکت در امتداد محور Z یک شناور زیرسطحی بدون سرنشین (UUV) با چارچوب باز را نیز مطالعه کرده‌اند. تکنیک‌های استاندارد شناسایی سیستم برای انتخاب و شناسایی یک مدل پویای ساده بر اساس داده‌های تجربی به‌دست‌آمده با حسگرهای ناوبری داخل عرشه

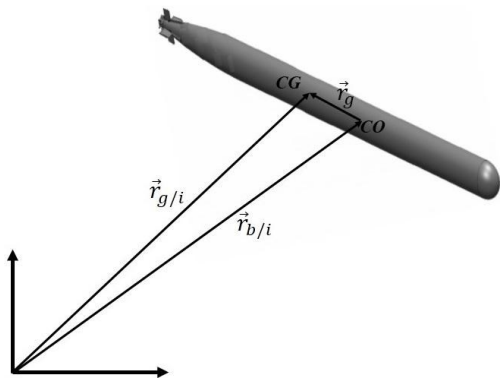
زیرسطحی به فرم ماتریسی ارایه شده است. برای توضیحات بیشتر در خصوص نحوه استخراج این معادله به [۳۱] رجوع شود.

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{RB} \quad (1)$$

$$\tau_{RB} = \tau_{hydrodynamic} + \tau_{hydrostatic} + \tau_{propulsion} \quad (2)$$

که M_{RB} ماتریس اینرسی جرمی، $C_{RB}(v)$ ماتریس نیروی‌های کوریولیس و مرکزگرا، v بردار سرعت‌های خطی و زاویه‌ای و τ_{RB} نیروها و ممان‌های خارجی وارد بر زیرسطحی است. نیروها و ممان‌های خارجی وارد بر زیرسطحی شامل:

- نیروها و ممان‌های هیدرودینامیک که ناشی از حرکت زیرسطحی در سیال است و خود شامل نیروی و ممان‌های جرم افزوده، میرایی ویسکوزی (پسا و برآ) و نیروی ناشی از سطوح کنترلی است.
- نیرو و ممان هیدرواستاتیک که شامل نیرو و ممان ناشی از وزن و نیروی شناوری است.
- نیرو و ممان رانش که ناشی از موتور و پروانه است.



دستگاه اینرسی $\{i\} = \{n\}$

شکل ۱- تعریف مختصات مرکز مختصات CO و مرکز جرم CG.

نیروهای هیدرواستاتیک با دقت بالا از روش تئوری قابل محاسبه هستند. نیروهای پیشران موتور و پروانه با استفاده از تست‌های تجربی و منحنی عملکرد پروانه مدل می‌شوند، اما با توجه به مراجع [۲۱] و [۳۱] و [۳۲] مدلی برای نیروی رانش زیرسطحی‌ها در نظر گرفته شده است که با تخمین ضرایب مدل سیستم رانش با تست تجربی، دقت مدل افزایش می‌یابد.

به طور کلی در مدلسازی دینامیک اجسام شناور با نیروها و ممان‌های جرم‌افزوده مواجه می‌شویم. اجسام شناور در سیال، مستقل از نوع سیال این نیروها و ممان‌های شبه‌ناپایا را تجربه می‌کنند. برای مثال حتی در کاربردهای هوایی، برای کشتی‌های هوایی و بالن‌ها که در هوا شناور هستند نیز نیروها و ممان‌های جرم‌افزوده بر دینامیک جسم موثر هستند و در مدلسازی‌ها در نظر گرفته می‌شوند. از آنجایی که این نیروها و ممان‌ها، ناشی از شتاب وسیله هستند، به نیروها و ممان‌های شتابی نیز معروفند.

$$\tau_{AddedMass} = -M_A \dot{v} \quad (3)$$

چون در حل عددی جدا کردن این نیروها و ممان‌ها باعث ایجاد حلقه جبری می‌شود، این نیروها و ممان‌ها به صورت یک ماتریس به ماتریس جرم و اینرسی اضافه می‌شوند. نام جرم افزوده نیز به خاطر این عمل به این ضرایب اطلاق می‌گردد.

این مقاله [۲۹] به منظور شناسایی ضرایب هیدرودینامیک از الگوریتم جدید که مبتنی بر روش حداقل مربعات بازگشتی است استفاده کرده است در این مقاله ضرایب هیدرودینامیک در همه کانال‌ها شناسایی شده‌اند. روش MILS (Multi Innovation Least Square) روشی است که ابداع این مقاله است و مبتنی بر روش حداقل مربعات بازگشتی می‌باشد.

مرجع [۳۰] یکی از کامل‌ترین مقالات در زمینه شناسایی ضرایب هیدرودینامیک زیرسطحی‌های بدون‌سرنشین است. در نظر گرفتن دینامیک سنسورها و نویزها از برتری‌های این مقاله است. روش تخمین ضرایب در این مقاله مبتنی بر فیلتر کالمن توسعه‌یافته بوده است. در این مقاله برای شناسایی ضرایب روشی گام به گام اتخاذ شده است. ابتدا متغیرهای دینامیک سرعت شناسایی شده است و سپس دینامیک سمت با معلوم بودن پارامترهای کانال سرعت، شناسایی شده‌اند. مانورها در این مقاله بسیار کامل و گام به گام در نظر گرفته شده‌اند.

نکته قابل توجه در فعالیت‌های گذشته تاکنون، عدم توجه به جامعیت در زمینه شناسایی سیستم دینامیک زیرسطحی‌های بدون سرنشین است. در بسیاری از مقالات تنها از یک وجه به این مساله نگاه شده است. همانگونه که بعضی مقالات تنها اثر ساختار مدل را بررسی کرده اند یا بعضی تنها به طراحی ورودی پرداخته‌اند، بدون آنکه به صورت جامع و یکپارچه مساله شناسایی سیستم با در نظر گرفتن تمامی عوامل موثر در آن مورد بررسی قرار دهند. هم به ساختار مدل بپردازند، هم ورودی مناسب و غنی‌ای به سیستم اعمال کنند و هم روش و تکنیکی مناسب را برای شناسایی اتخاذ نمایند. در کنار این موارد، ملاحظات کاربردی زیرسطحی را نیز در نظر بگیرند و به عامل اندازه‌گیری‌های و حالت‌های در دسترس نیز توجه داشته باشند.

در این مقاله ابتدا دینامیک شش درجه آزادی زیرسطحی بدون سرنشین معرفی و توضیح داده می‌شود. سپس در بخش بعدی پارامترهای شناسایی و روش شناسایی ارایه می‌گردند. طراحی ورودی مناسب برای تحریک سیستم از دیگر بخش‌های این مقاله است. در انتها کارایی روش شناسایی حداکثر مشابهت به کمک الگوریتم ازدحام ذرات بررسی شده و نتیجه ارایه می‌گردد.

۲- معادلات حاکم بر زیرسطحی

برای استخراج معادلات حرکت بدنی یک زیرسطحی، نیاز به مطالعه حرکت جسم صلب، هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک است. در استخراج معادلات حرکت از قوانین نیوتن-اویلر استفاده می‌شود. در شکل ۱ بردار موقعیت مرکز مختصات بدنی نسبت به دستگاه اینرسی که همان دستگاه $\{n\}$ در نظر گرفته شده، با $r_{b/i}^+$ نشان داده شده است. همچنین بردار موقعیت مرکز جرم نسبت به دستگاه اینرسی با $r_{g/i}^+$ بیان شده است. r_g^+ بردار فاصله مرکز جرم نسبت به مرکز مختصات است.

در محاسبه معادلات حرکت یک زیرسطحی برای استفاده از مزیت خصوصیات تقارن هندسی زیرسطحی مناسب‌تر است که معادلات حول مبدا اختیاری مرکز مختصات CO (معمولا حول مرکز شناوری) نوشته شوند. چون نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی اغلب در مرکز مختصات محاسبه می‌شوند، قوانین نیوتن و اویلر نیز باید حول مرکز مختصات روابط‌بندی شوند. در رابطه (۱) مدل دینامیک شش درجه آزادی یک

$$\begin{aligned} X_{HD} &= q_{\infty} S_{ref} (Cx_0 + Cx_{\alpha} \alpha^2 + Cx_{\beta} \beta^2) \\ Y_{HD} &= q_{\infty} S_{ref} (Cy_{\beta} \beta + Cy_r \frac{L_{ref}}{V} r + Cy_{\delta} \delta r) \\ Z_{HD} &= q_{\infty} S_{ref} (Cz_{\alpha} \alpha + Cz_q \frac{L_{ref}}{V} q + Cy_{\delta} \delta e) \\ K_{HD} &= q_{\infty} S_{ref} L_{ref} (Cl_p + Cl_{\delta} \delta \alpha) \\ M_{HD} &= q_{\infty} S_{ref} L_{ref} (Cm_{\alpha} \alpha + Cm_q \frac{L_{ref}}{V} q + Cm_{\delta} \delta e) \\ N_{HD} &= q_{\infty} S_{ref} L_{ref} (Cn_{\beta} \beta + Cn_r \frac{L_{ref}}{V} r + Cn_{\delta} \delta r) \end{aligned} \quad (۸)$$

که در آن فشار دینامیکی، L_{ref} طول مرجع - که برابر با قطر در نظر گرفته می شود-، S_{ref} سطح مرجع، V سرعت وسیله، α زاویه حمله و β زاویه سرش جانبی هستند. $\delta r, \delta e, \delta \alpha$ نیز تغییر زوایای سطوح کنترلی بوده و به ترتیب بیانگر ایلرون، الویتور و رادر هستند.

- ضرایب هیدرودینامیک زیرسطحی به سه دسته کلی
 - ضرایب ناشی از زوایای جریان با زیرسطحی یا ضرایب استاتیکی
 - ضرایب ناشی از نرخ های سرعت زاویه ای یا ضرایب دینامیکی
- و ضرایب ناشی از تغییر سطوح کنترلی تقسیم می شوند. این ضرایب در جدول ۱ ارایه گردیده اند.

۳-۲- نیرو و ممان پیشرانش

نیروی پیشرانش با فرض عدم خطا در زاویه نصب در راستای محوری نیرو وارد می کند. از طرفی به خاطر چرخش پروانه، گشتاوری از طرف جریان به زیرسطحی اعمال می گردد. نیرو و ممان پیشرانش به صورت رابطه زیر قابل بیان است.

$$X_{prop} = \rho n^2 D^4 (Ct_0 + Ct_r J) \quad (۹)$$

$$K_{prop} = \rho n^2 D^5 (Cq_0 + Cq_r J) \quad (۱۰)$$

که در آن تعداد دور برحسب دور بر ثانیه و D قطر پروانه است. همانطور که از روابط مشخص است مقدار نیرو و گشتاور پیشران با مجذور دور پروانه نسبت مستقیم دارد. ضرایب Ct و Cq به ترتیب ضرایب پیشران و گشتاور پروانه هستند.

ضرایب پیشران و گشتاور پروانه از طریق نمودارهای عملکردی پروانه استخراج می گردد. این نمودارها برحسب نسبت پیشروی هستند. نسبت پیشروی J ، یک عدد بی بعد از ترکیب سرعت رو به جلو، دور پروانه برحسب دور بر ثانیه و قطر پروانه است.

$$J = \frac{V}{nD} \quad (۱۱)$$

تابعیت ضرایب پیشران و گشتاور پروانه، از ضریب پیشروی می تواند به صورت خطی یا غیرخطی در نظر گرفته شود که خود می تواند باعث پیچیدگی مدل شود.

۴-۲- جمع بندی معادلات حرکت

با توجه به روابط ارایه شده از دینامیک و سینماتیک حرکت زیرسطحی، در نهایت یک مدل شش درجه آزادی از زیرسطحی ارایه می شود. این مدل شامل شش معادله سینماتیک و شش معادله دینامیک حرکت است. در نهایت یک مدل فضای حالت با ۱۲ متغیر حالت همانند رابطه ماتریسی زیر قابل ارایه است.

با این تمهید، نیرو و ممان هیدرودینامیک ناشی از اثر جرم افزوده به سمت چپ معادله می آید و رابطه (۱) به صورت زیر بازنویسی می شود.

$$(M_{RB} + M_A) \dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau'_{RB} \quad (۴)$$

که τ'_{RB} مجموع نیروها و ممانها وارده به زیرسطحی به غیر از نیروی هیدرودینامیک جرم افزوده است. مجموع ماتریس جرمی اینرسی و ماتریس جرم افزوده را ماتریس M می نامیم. این ماتریس در فرم گسترده به صورت زیر خواهد شد:

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{x}} & 0 & 0 & 0 & mz_{\dot{z}} & -my_{\dot{z}} \\ 0 & m - Y_{\dot{y}} & 0 & -mz_{\dot{z}} & 0 & mx_{\dot{z}} - Y_{\dot{z}} \\ 0 & 0 & m - Z_{\dot{z}} & my_{\dot{z}} & -(mx_{\dot{z}} + Z_{\dot{z}}) & 0 \\ 0 & -mz_{\dot{z}} & my_{\dot{z}} & I_x - K_p & 0 & 0 \\ mz_{\dot{z}} & 0 & -(mx_{\dot{z}} + M_{\dot{z}}) & 0 & I_y - K_r & 0 \\ -my_{\dot{z}} & mx_{\dot{z}} & 0 & 0 & 0 & I_z - N_{\dot{z}} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

همانگونه که بیان شد ماتریس $C_{RB}(v)$ ماتریسی شامل ترم های مرکزگرا و کوریولیس کلی است. که در فرم گسترده به صورت زیر خواهد شد.

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_{\dot{z}}q + z_{\dot{z}}r) & m(y_{\dot{z}}p + w) & m(z_{\dot{z}}p - v) \\ m(x_{\dot{z}}q - w) & -m(z_{\dot{z}}r + x_{\dot{z}}p) & m(z_{\dot{z}}q + u) \\ m(x_{\dot{z}}r + v) & m(y_{\dot{z}}r - u) & -m(x_{\dot{z}}p + y_{\dot{z}}q) \\ m(y_{\dot{z}}q + z_{\dot{z}}r) & -m(y_{\dot{z}}p + w) & -m(z_{\dot{z}}p - v) \\ -m(x_{\dot{z}}q - w) & m(z_{\dot{z}}r + x_{\dot{z}}p) & -m(z_{\dot{z}}q + u) \\ -m(x_{\dot{z}}r + v) & -m(y_{\dot{z}}r - u) & m(x_{\dot{z}}p + y_{\dot{z}}q) \\ 0 & -I_y q - I_{yz} p + I_{zz} r & -I_y r - I_{yz} p + I_{zz} q \\ I_{yz} q + I_{zz} p - I_{zz} r & 0 & I_{zz} r + I_{yz} q - I_{zz} p \\ -I_y r - I_{yz} p + I_{zz} q & I_{zz} r + I_{yz} q - I_{zz} p & 0 \end{bmatrix} \quad (۶)$$

در ادامه در مورد نیروها و ممان های اعمالی بر زیرسطحی را توضیحات بیشتری ارایه می شود.

۱-۲- نیروها و ممان های هیدرواستاتیکی

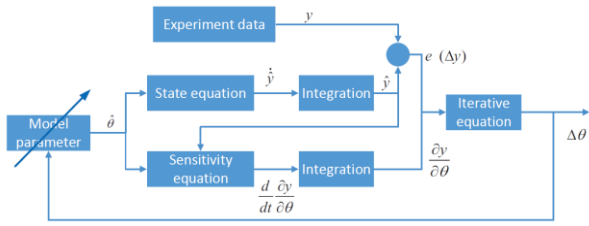
ترکیب اثر نیروهای وزن و شناوری سبب می گردد تا زیرسطحی، نیروها و ممان های هیدرواستاتیکی را تجربه نماید. با استفاده از ماتریس انتقال، معادلات غیرخطی نیروها و ممان های هیدرواستاتیکی در دستگاه بدنی به صورت رابطه (۷) بیان می گردند. در این رابطه W و B به ترتیب نیروی وزن و نیروی شناوری زیرسطحی هستند. [۱۰۹]

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin \theta \\ -(W - B) \cos \theta \sin \phi \\ -(W - B) \cos \theta \cos \phi \\ -(y_g W - y_b B) \cos \theta \cos \phi \\ (z_g W - z_b B) \sin \theta + (x_g W - x_b B) \cos \theta \cos \phi \\ -(x_g W - x_b B) \cos \theta \cos \phi - (y_g W - y_b B) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (۷)$$

۲-۲- نیروها و ممان های هیدرودینامیک

نیرو و ممان هیدرودینامیک وارده به زیرسطحی به صورت شش رابطه زیر در نظر گرفته می شود:

نیز ثبت می‌شوند. خطای بین خروجی مدل و خروجی تست، خطای پیش‌بینی e نامیده می‌شود.



شکل ۲- دیاگرام الگوریتم حداکثر مشابهت.

به کمک خطای پیش‌بینی و رابطه حساسیت‌سنجی مقدار $\Delta\Theta$ مشخص می‌شود. با استفاده از $\Delta\Theta$ مقادیر پارامترها Θ بروزرسانی می‌شوند. این روند باعث کاهش مقدار خطا e می‌شود. این روند تا زمانی که مقدار خطای به مقدار به اندازه کافی کوچک میل کند، ادامه پیدا می‌کند و مقادیر پارامترها در آخرین گام به عنوان پارامترهای شناسایی شده در نظر گرفته می‌شوند.

روش شناسایی حداکثر مشابهت شامل چندین مبحث است که باید در مورد هر کدام به نکاتی توجه کرد. این روش شامل مباحث مدل ریاضی، معادلات حالت، معادلات اندازه‌گیری، رابطه حساسیت‌سنجی و در نهایت پارامترهای شناسایی می‌شود. معادلات دینامیکی و سینماتیکی مرکز جرم وسیله توصیف کننده مدل ریاضی هستند. اگر همین معادلات در فرم فضای حالت بیان شوند، معادلات حالت سیستم به دست می‌آید. معادلات اندازه‌گیری یا مشاهده‌گرها بیانگر ارتباط بین مقادیر واقعی حالت‌ها و مقادیر اندازه‌گیری شده آن‌ها هستند. در طول حرکت وسیله تنها قادریم چند حالت محدود وسیله اندازه‌گیری کنیم و مابقی حالت‌ها می‌بایست از این حالت‌ها معلوم تخمین زده شوند.

رابطه حساسیت‌سنجی نیز از مشتق‌گیری از معادلات دینامیکی حالت و اندازه‌گیری به دست می‌آید.

بردار شناسایی برداری است که از پارامترهای شناسایی تشکیل شده است. با مقاردهی اولیه به پارامترها فرآیند شناسایی ضرایب آغاز می‌شود. برای مقداردهی اولیه به ضرایب هیدرودینامیکی از برآوردهای اولیه که از روش‌های تجربی و شبه‌تجربی بدست می‌آید استفاده می‌گردد. متغیرهای هندسی و جرمی و مشخصه‌های سیستم پیش‌شان نیز معلوم در نظر گرفته می‌شوند و از پیکره‌بندی وسیله و توضیحات فنی زیرسیستم‌ها مشخص می‌شود.

۴- شناسایی ضرایب هیدرودینامیک

گام اول در شناسایی، تشکیل مدل وسیله است. با در نظر گرفتن کوپلینگ بین متغیرهای دینامیکی، معادلات حرکت وسیله، مدل را تشکیل می‌دهند. در این معادلات متغیرهای جرمی و اینرسی و رانشی معلوم در نظر گرفته می‌شوند. مقادیر اولیه ضرایب هیدرودینامیکی استاتیکی، دینامیکی و کنترلی براساس ضرایب موجود در مقالات به دست می‌آیند.

شناسایی ضرایب جرم افزوده از آنجایی که ماهیتی شتابی دارند، بسیار مشکل است. از طرفی این ضرایب تاثیر کمی بر مشخصات هیدرودینامیکی زیرسطحی دارند. با بررسی ضرایب هیدرودینامیک زیرسطحی‌های بدون سرنشین استوانه‌ای شکل (مرجع [۳۳] و [۳۴]) بازه تغییرات ضرایب شتابی محدود خواهد بود، برای نمونه برای دو ضریب $M_{\dot{q}}$ و $Z_{\dot{w}}$ داریم:

$$-3m < Z_{\dot{w}} < 0 \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^{-1}(\tau'_{RB} - C_{RB}(v)) \\ J_{\Theta}(\eta)v \end{bmatrix} \quad (12)$$

متغیرهای حالت به صورت

$$x_{state} = [v \quad \eta]^T \quad (13)$$

قابل تعریف هستند. که شامل سرعت‌های خطی و زاویه و موقعیت و وضعیت چرخش هستند.

$$x_{state} = [u, v, w, p, q, r, \phi, \theta, \psi, X, Y, Z]^T \quad (14)$$

جدول ۱- معرفی ضرایب هیدرودینامیکی و پیش‌شان

توصیف	ضریب
	$X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}$
	$Y_{\dot{r}}, Z_{\dot{q}}$
ضرایب جرم افزوده	$K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}$
	$M_{\dot{w}}, N_{\dot{v}}$
	$Cx_0, Cx_{\alpha^2}, Cx_{\beta^2}$
ضرایب استاتیکی	Cy_{β}, Cz_{α}
	Cm_{α}, Cn_{β}
ضرایب دینامیکی	Cy_r, Cz_q
	Cm_q, Cn_r, Cl_p
ضرایب سطوح کنترلی	$Cy_{\dot{\alpha}}, Cz_{\dot{\alpha}}$
	$Cm_{\dot{\alpha}}, Cn_{\dot{\alpha}}, Cl_{\dot{\alpha}}$
ضرایب پیش‌شان	Ct_0, Ct_J
	Cq_0, Cq_J

۳- الگوریتم شناسایی حداکثر مشابهت

در الگوریتم حداکثر مشابهت با استفاده از داده‌های تجربی پارامترهای مدل به گونه‌ای تنظیم و تغییر و شناسایی می‌شوند که داده‌های خروجی مدل حداکثر تطابق و تشابه و سازگاری را با مدل ریاضی در نظر گرفته شده داشته باشند. نمونه دیاگرام بلوکی این الگوریتم در شکل ۲ نشان داده شده است.

بردار پارامترهای شناسایی به صورت Θ تعریف می‌شوند. مدل دینامیکی و رابطه حساسیت‌سنجی براساس این پارامترها شکل می‌گیرند. با استفاده از مدل دینامیکی رفتار مدل زیرسطحی شبیه‌سازی می‌شود و با استفاده از رابطه حساسیت‌سنجی می‌توان ارتباط خطای مدل را به پارامترهای شناسایی را ارزیابی نمود. معمولاً همیشه یک برآورد اولیه برای بردار Θ که همان بردار پارامترهای شناسایی هستند وجود دارد.

فرآیند شناسایی ضرایب هیدرودینامیک به کمک الگوریتم حداکثر مشابهت به این گونه است که ابتدا براساس یک سناریو خاص زیرسطحی تست تجربی را انجام می‌دهد و داده‌های تست ذخیره می‌شوند. همین سناریو به مدل ریاضی زیرسطحی نیز اعمال می‌گردد و خروجی‌های مدل

زیاد تحریک کرد زیرا که از حد تحمل سیستم خارج است. بنابراین از تقریب ورودی ضربه یا همان پالس استفاده می‌کنیم. برای پالس هم از نظر فیزیکی محدودیت دامنه وجود دارد و نمی‌توان هر دامنه‌ای به سیستم وارد کرد.

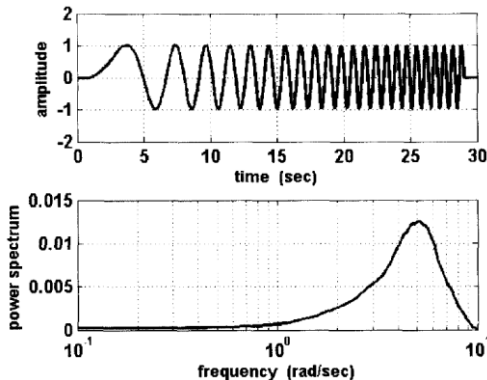
در نوبت سفید نیز طیف فرکانسی هموار است بنابراین سیگنال ورودی خوبی است. همچنین به علت دامنه محدودی که دارد، مشکلات روش‌های قبلی را هم ندارد. پاسخ یک سیستم به نوبت بسیار غنی است و این ورودی را می‌توان برای سیستم‌های غیرخطی به کار برد. البته چون پهنای باند سیستم‌های فیزیکی محدود است وجود همه فرکانس‌ها در ورودی لزومی ندارد و می‌توان از نوبت رنگی استفاده کرد. از آنجا که تغییرات نوبت سفید خیلی زیاد است، وارد کردن آن به یک سیستم فیزیکی می‌تواند مشکل‌ساز باشد و باعث آسیب رساندن به آن شود.

وقتی ایده پالس را با نوبت ترکیب کنیم، سیگنالی به وجود می‌آید که به آن سیگنال باینری شبه تصادفی می‌گویند. هر چه پهنای پالس‌ها بیشتر شود، مدهای کند سیستم بیشتر تحریک و آن را بهتر شناسایی می‌کند. همچنین پالس‌های با پهنای کم، قسمت فرکانس بالای سیستم را مدل می‌کند. لذا می‌توان یک حد پایین و یک حد بالا در نظر گرفت. حد بالا را سه تا چهار برابر زمان غالب شدن کندترین مود سیستم در نظر می‌گیرند و حد پایین را باید با توجه به پهنای باند سیستم تعیین کرد.

سیگنال باینری شبه تصادفی به صورت پالس است و برخی از سیستم‌ها این پالس و تغییر ناگهانی را تحمل نمی‌کنند و به آن حساس‌اند. بنابراین گاهی باید از سیگنالی که تغییرات آن نرم‌تر است، استفاده کرد. بدین منظور از سیگنالی با طیف فرکانسی هموار و محدود - که chirp نامیده می‌شود- استفاده می‌شود.

در سیستم‌های غیرخطی بهترین سیگنالی که می‌توان استفاده کرد، نوبت سفید است؛ زیرا در این سیستم‌ها خاصیت همگنی و برهم‌نهی برقرار نیست. البته سیگنال باینری شبه تصادفی و سیگنال chirp را هم با کمی تغییرات می‌توان استفاده کرد.

چنانچه دانش اولیه از دینامیک سیستم و فرکانس کاری غالب آن وجود نداشته باشد، مانور باید به گونه‌ای طراحی شود که در یک محدوده وسیع فرکانسی، سیستم را تحریک کند. تابع طیف فرکانس در این حالت باید توان تقریباً مساوی در تمامی فرکانس‌ها داشته باشد. «جاروب فرکانس» و «ضربه» از جمله ورودی‌هایی هستند که الزامات فوق را برآورده می‌کنند. نمونه جاروب فرکانس خطی در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۳- جاروب فرکانس خطی.

$$-3I_y < M_q < 0 \quad (16)$$

با توجه به این نکته، مقدار ضرایب شتابی مقدار میانگین این بازه در نظر گرفته می‌شود. به بیان دیگر می‌توان از اثر این ضرایب چشم‌پوشی کرد.

با توجه به این نکات بردار شناسایی ضرایب به صورت زیر خواهد شد:

$$\Theta = [C_{y_{\beta}}, C_{z_{\alpha}}, C_{m_{\alpha}}, C_{n_{\beta}}, C_{y_r}, C_{z_q}, C_{m_q}, C_{n_r}, C_{l_p}, C_{y_{\dot{\beta}}}, C_{y_{\dot{\alpha}}}, C_{y_{\dot{r}}}, C_{y_{\dot{q}}}, C_{m_{\dot{\alpha}}}, C_{n_{\dot{\beta}}}, C_{l_{\dot{\alpha}}}] \quad (17)$$

این بردار شامل ضرایب استاتیکی، دینامیکی و کنترلی است.

الگوریتم شناسایی ضرایب هیدرودینامیک به صورت زیر اجرا می‌شود:

۱- معادلات حالت سیستم که همان معادلات حرکت زیرسطحی هستند، با توجه به مقادیر اولیه ضرایب شناسایی، مقداردهی می‌شوند.

۲- ورودی‌های کنترلی به معادلات حرکت اعمال می‌شوند و خروجی‌های مدل در نظر گرفته در طول زمان شبیه‌سازی استخراج و ثبت می‌گردد.

۳- این خروجی‌ها با خروجی‌های مطلوب مقایسه می‌شود و براساس الگوریتم ازدحام ذرات مقدار پارامتر $\Delta\Theta$ محاسبه می‌گردد.

۴- با استفاده از پارامتر $\Delta\Theta$ ، بردار ضرایب شناسایی Θ بروزآوری می‌شود و دوباره به گام ۱ بازمی‌گردیم.

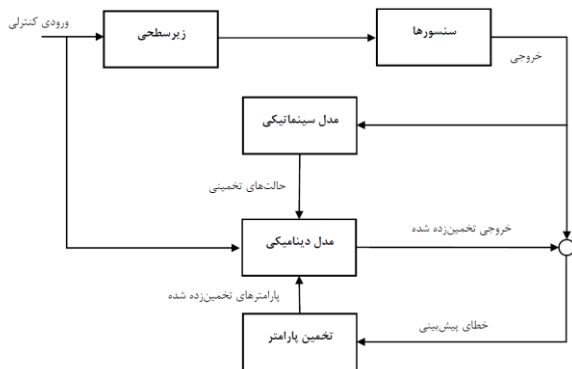
۵- گام ۱ تا ۴ تا رسیدن مقدار خطای پیش‌بینی به حد مطلوب ادامه پیدا می‌کند.

۵- طراحی ورودی مناسب

همانگونه که در معادلات حرکت بیان شد، زیرسطحی دارای چهار ورودی کنترلی (ایلرون، الویتور، رادر و دور پروانه استو) برای شناسایی ضرایب هیدرودینامیک در این مقاله از سه ورودی سطوح کنترلی استفاده شده و ورودی دور موتور ثابت نگه داشته می‌شود.

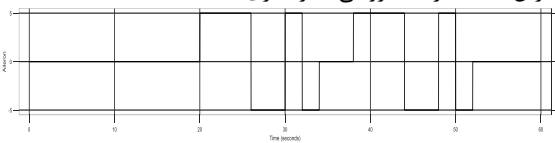
برای شناسایی یک سیستم نیاز به اعمال یک ورودی خوب به سیستم است. ویژگی ورودی خوب این است که به گونه‌ای غنی باشد که همه‌ی مدهای سیستم را تحریک کند تا شناسایی به خوبی صورت گیرد. در سیستم دینامیکی ورودی خروجی یک سری زمانی است. اگر به سیستم ورودی پله وارد کنیم، در خروجی فقط یک بهره و یک ثابت زمانی خواهیم داشت و سیستم‌های مرتبه بالاتر از یک را با یک سیستم مرتبه اول مدل می‌کند. نتیجه اینکه ورودی پله برای مدلسازی هر سیستمی مناسب نیست. اگر بخواهیم در زمان محدود سیستم به طور کامل تحریک شود، از ورودی سینوسی استفاده می‌کنیم. برای مدلسازی می‌توان سینوسی‌های گوناگونی به سیستم اعمال کرد و خروجی‌ها را مشاهده کرد. از این نظر یک روش مدل سازی مناسب است؛ ولی روشی وقت‌گیر است و چندان عملیاتی نیست.

ویژگی ورودی ضربه این است که طیف فرکانسی آن هموار است که ویژگی خوبی محسوب می‌شود. با اعمال ورودی ضربه به سیستم، تمام خصوصیات سیستم مشخص می‌شود زیرا که ضربه تمام فرکانس‌ها را به طور یکسان تحریک می‌کند. اما در دنیای واقعی اعمال ضربه عملی نیست زیرا در یک سیستم فیزیکی نمی‌توان در زمان صفر، انرژی و توان بی‌نهایت به سیستم وارد کرد. همچنین سیستم‌های فیزیکی را نمی‌توان با دامنه



شکل ۵- بلوک دیاگرام شناسایی ضرایب این مقاله.

براساس این دیاگرام با جابه جایی سطوح کنترلی به عنوان ورودی کنترلی، زیرسطحی رفتاری را از خود نشان می دهد و این رفتار توسط شتاب سنج و ژيروسکوپ نرخ و همچنین عمق سنج ثبت می شود. داده های شتاب و نرخ زاویه ای به عنوان ورودی به معادلات سینماتیکی استفاده می شوند و تخمینی برای حالات سیستم زیرسطحی که مولفه های سرعت خطی و زوایای اوپلری است را منجر می شود. حالات تخمینی به همراه ورودی های کنترلی، ورودی مدل دینامیکی هستند که خروجی این مدل دینامیکی مولفه های شتاب خطی و گشتاور محاسبه شده از نرخ و شتاب زاویه ای خواهند بود. در این مرحله الگوریتم حداکثر مشابهت ضرایب هیدرو دینامیکی را به گونه ای تنظیم می کند که خروجی مدل دینامیکی بیشترین شباهت را به خروجی اندازه گیری شده، داشته باشد.



شکل ۶- ورودی های اعمال شده به وسیله.

جهت ارزیابی روش پیشنهادی از داده های شبیه سازی شده برای زیرسطحی اتوساب استفاده می شود. به ازای اعمال ورودی کنترلی، زیرسطحی شتاب خطی، سرعت زاویه ای و عمقی را دارد که در شکل ۷ تغییرات زمانی نشان داده شده است. این متغیرها به عنوان ورودی به الگوریتم حداکثر مشابهت داده می شوند. براساس نتایج اکثریت مشتقات به خوبی تخمین زده شده اند.

شکل ۷ مقایسه خروجی مدل های تخمینی و خروجی اندازه گیری را نشان می دهد. براساس نتایج همی خروجی ها به خوبی بر هم منطبق شده اند. پس می توان گفت که مشتقاتی که تخمین مناسبی نداشته اند تاثیر قابل توجهی در خروجی زیرسطحی نداشته اند و می توان گفت تخمین نامناسب این مشتقات به دلیل حساسیت کم خروجی سیستم به این مشتقات خواهند بود. این موضوع می تواند دو منشا داشته باشد، یا اینکه داده های استفاده شده به اندازه کافی حاوی اطلاعات نبوده اند یا اینکه ساختار مدل استفاده شده ساختار مناسبی نبوده است و امکان حذف این مشتقات از مدل وجود دارد.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله کارایی روش بهینه سازی ازدحام ذرات در الگوریتم حداکثر مشابهت در مساله شناسایی ضرایب هیدرو دینامیک یک زیرسطحی بدون سرنشین ارزیابی گردید. با توجه به نتایج این الگوریتم به خوبی توانسته است ضرایب هیدرو دینامیکی استاتیکی، دینامیکی و کنترلی

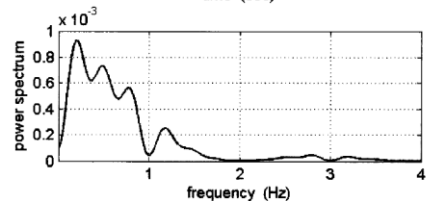
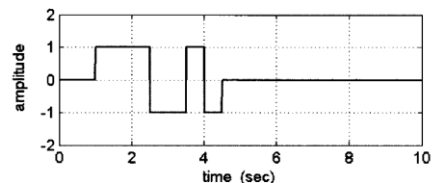
چنانچه دانش اولیه از سیستم و فرکانس طبیعی مودهای غالب پرنده وجود داشته باشد، سیگنال ورودی به گونه ای طراحی می شود که بیشترین توان را در نزدیکی فرکانس کاری سیستم داشته باشد. معمولا در این حالت از انواع «موج مربعی» استفاده می شود. لازم به ذکر است که منظور از طراحی مانور، تعیین پارامترهای زیر است:

- مدت زمان مانور
- تعیین سطوح کنترلی درگیر
- تعیین نوع ورودی (ضربه، جاروب فرکانس، مربعی و ...)

به منظور شناسایی خطی یا غیرخطی حول یک نقطه کار دلخواه، باید وسیله از شرایط مرجع دچار انحراف شود. دامنه اغتشاش اعمال شده معمولا به صورت زیر است:

- ۵ درجه در زاویه حمله
- ۵ درجه در زاویه سرش جانبی
- ۲۰ درجه بر ثانیه در سرعت های زاویه ای
- ۱ تا ۳ متر بر مجذور ثانیه در شتاب های خطی

همانگونه که ذکر شد، سیگنال ضربه، به دلیل انرژی کم معمولا غیر کاربردی است. سیگنال جاروب چون یک محدوده مشخص فرکانسی را پوشش می دهد، شناسایی را به صورت مناسب پوشش می دهد. همچنین لازم به ذکر است که هر سیگنال جاروب به ۶۰ تا ۹۰ ثانیه زمان احتیاج دارد. سیگنال جاروب لازم نیست که با دامنه یکسان یا نرخ یکسان افزایش فرکانس تولید شود؛ بلکه اغتشاشات مختصر موجود روی سیگنال، بر غنای تحریک آن می افزاید. از سیگنال های مهم مورد استفاده در شناسایی، می توان به سیگنال تحریک ۱-۱-۲-۳ و ۱-۲-۱ اشاره کرد که در ادامه یک نمونه از این دو سیگنال مشاهده می شوند.



شکل ۴- سیگنال ۱-۱-۲-۳.

۶- شبیه سازی و شناسایی ضرایب

با توجه به توضیحات داده شده، روش پیشنهادی برای استفاده از الگوریتم حداکثر مشابهت برای شناسایی ضرایب هیدرو دینامیک زیرسطحی توسط بلوک دیاگرامی شکل ۵ پیشنهاد داده می شود.

- Perhinschi, M.G., On-line parameter estimation techniques comparison within a fault tolerant flight control system. *J. Guid. Control Dyn.* 25 (3), 528–537, 2002.
- [10] K., Kim, J., Choi, H.S., Lee, K.Y., Seong, W., Estimation of hydrodynamic coefficients of a Test-bed AUV-SNUUV I by Motion Test. *Oceans'02 MTS/IEEE*, vol 1, pp. 186–190, 2002a.
- [11] Kim, J., Kim, K., Choi, H.S., Seong, W., Lee, K., Estimation of hydrodynamic coefficients for an AUV using nonlinear observers. *IEEE J. Ocean. Eng.* vol. 27 (4), 830–840, 2002b.
- [12] Chowdhary, G., Jategaonkar, R., Aerodynamic parameter estimation from flight data applying extended and unscented Kalman filter. *Aerosp. Sci. Technol.*, 106–117, 2010.
- [13] Alessandri, A., Caccia, M., Indiveri, G., Veruggio, G., Application of LS and EKF techniques to the identification of underwater vehicles, *Proceedings of the 1998 IEEE, International Conference on Control Applications*, Trieste, Italy, 1998a.
- [14] Alessandri, A., Elono, R., Caccia, M., Indiveri, G., Veruggio, G., Experiences on the Modelling and Identification of the Heave Motion of an Open-frame UUV, 1998b.
- [15] Caccia, M., Indiveri, G., Veruggio, G., Modeling and identification of open-frame variable configuration unmanned underwater vehicles. *IEEE J. Ocean. Eng.* vol. 25 (2), 227–240, 2000.
- [16] Ridao, P., Tiano, A., El-Fakdi, A., Carreras, M., Zirilli, A., On the identification of non-linear models of autonomous underwater vehicles. *Control Eng. Pract.*, 1483–1499, 2004.
- [17] Miskovic, N., Vukic, Z., Bibuli, M., Bruzzone, G., Caccia, M., Fast in-field identification of unmanned marine vehicles. *J. Field Robot.* vol 28 (1), 101–120, 2011.
- [18] Fossen, T.I., Ross, A., *Nonlinear Modelling, Identification and Control of UUVs*. The Institution of Engineering and Technology, London, 2006.
- [19] M. T. Sabet, P. Sarhadi, and M. Zarini, "Extended and Unscented Kalman filters for parameter estimation of an autonomous underwater vehicle," *Ocean Eng.*, vol. 91, pp. 329–339, Nov. 2014.
- [20] F. Xu, Z.-J. Zou, J.-C. Yin, and J. Cao, "Identification modeling of underwater vehicles' nonlinear dynamics based on support vector machines," *Ocean Eng.*, vol. 67, pp. 68–76, Jul. 2013.
- [21] O. Hegrehaes, O. Hallingstad, and B. Jalving, "Comparison of mathematical models for the HUGIN 4500 AUV based on experimental data," in *Proc. Symp. Underwater Technol. Workshop Scientific Use Submarine Cables Related Technol.*, pp. 558–567, 2007.
- [22] X. Liang, W. Li, J. Lin, L. Su, and H. Li, "Model identification for autonomous underwater vehicles based on maximum likelihood relaxation algorithm," in *Proc. 2nd Int. Conf. Comput. Model. Simul.*, vol. 1, pp. 128–132, 2010.
- [23] J. C. C. Luque and D. C. Donha, "AUV identification and robust control," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 44, no. 1, pp. 14735–14741, Jan. 2011.
- [24] M. T. Sabet, H. M. Daniali, A. Fathi, and E. Alizadeh, "Identification of an autonomous underwater vehicle hydrodynamic model using the extended, cubature, and transformed unscented Kalman filter," *IEEE J. Ocean.*

زیرسطحی را با دقت حداکثر ۴ درصد شناسایی کند. حساس نبودن به حدس اولیه و همگرایی بسیار خوب جز مزایای ویژه این الگوریتم است که با ترکیب شدن با الگوریتم حداکثر مشابهت می‌تواند به خوبی تمامی ضرایب هیدرودینامیک را در تمامی کانال‌های دینامیکی وسیله شناسایی نماید.

بررسی طراحی ورودی مناسب و هم‌چنین مدل‌سازی مناسب دینامیک زیرسطحی از دیگر دستاوردهای این مقاله است.

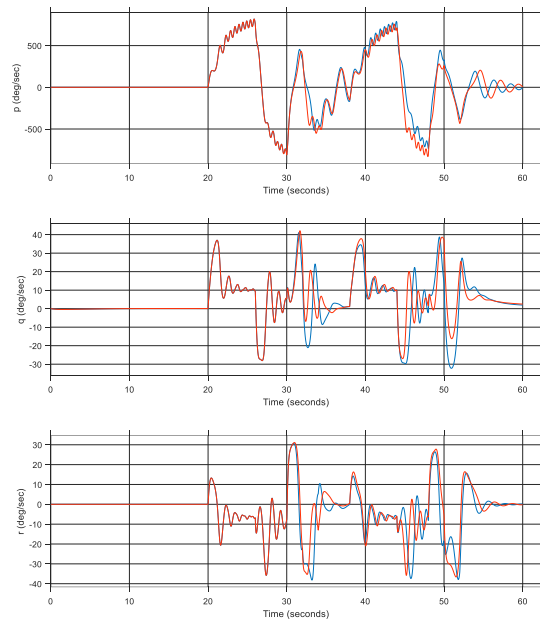
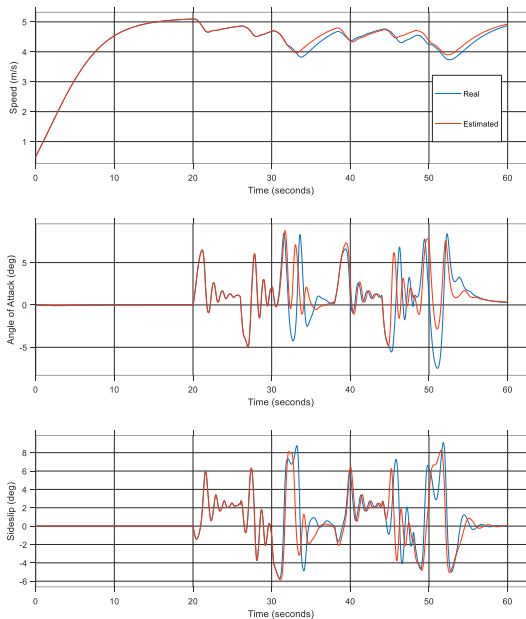
جدول ۲- نتایج شناسایی ضرایب

ضریب	مقدار واقعی	مقدار تخمین زده شده	خطا (درصد)
Cy_{β}	-2.1085	-2.1159	0.3526
Cz_{α}	-2.1085	-2.1754	3.1735
Cm_{α}	+4.0279	4.1441	2.8855
Cn_{β}	-4.0279	-4.0955	1.6771
Cy_r	+6.9059	7.0839	2.5779
Cz_q	-6.9059	-7.0592	2.2197
Cm_q	-24.2711	-25.1205	3.4997
Cn_r	-24.2711	-25.1228	3.5091
Cl_p	-0.06	-0.0622	3.7104

۸- مراجع

- [1] Ljung, L., System identification, in: Procházka, A., Uhlíř, J., Rayner, P.W.J. and Kingsbury, N.G. (eds.), *Signal Analysis and Prediction*, Birkhäuser, Boston, MA, pp. 163–173, 1998.
- [2] Simon, D. *Optimal State Estimation Kalman, H1 and Nonlinear Approaches*. Wiley&Sons publishing, New Jersey, 2006.
- [3] Hartikainen, J., Solin, A., Särkkä, S., *Optimal Filtering*, Department of Biomedical Engineering and Computational Science. Aalto University School of Science, Finland, 2011.
- [4] Feng, X., Jian, Z.Z., Chuan, Y.J., Jian, C., Parametric identification and sensitivity analysis for autonomous underwater vehicles in diving plane. *J. Hydrodyn.* 24 (5), 744–751, 2012.
- [5] Panagou, D., Karras, G., Kyriakopoulos, K., Towards the stabilization of an under actuated underwater vehicle in the presence of unknown disturbances, *Proc. of MTS/IEEE Conference OCEANS '11, 2008*, 1–8, 2008.
- [6] Buckland, J.H., Musgrave, J.L., Walker, B.K., On-line implementation of nonlinear parameter estimation for the space shuttle main engine. *NASA TM-106097*, 1992.
- [7] Chowdhary, G., Lorenz, S., Control of a VTOL UAV using online parameter identification. *AIAA-2005-6409*, 2005.
- [8] Steinber, M.L., Comparison of intelligent, adaptive, and nonlinear flight control laws. *J. Guid., Control Dyn.* 24 (4), 693–699, 2001.
- [9] Song, Y., Campa, G., Napolitano, M., Seanor, B.,

- 17, no. 2, Mar. 2020.
- [30] P. Cardenas and E. A. De Barros, "Estimation of AUV Hydrodynamic Coefficients Using Analytical and System Identification Approaches," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 45, no. 4, pp. 1157–1176, 2020.
- [31] T. I. Fossen, *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*: John Wiley & Sons, 2011.
- [32] T. I. Fossen, *Marine control systems: guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles*: Marine Cybernetics, 2002.
- [33] Hong, E.Y.; Meng, T.K.; Chitre, M. Online system identification of the dynamics of an autonomous underwater vehicle. In *Proceedings of the 2013 IEEE International Underwater Technology Symposium (UT)*, Tokyo, Japan, 5–8 March 2013; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2013; pp. 1–10 .
- [34] Rentschler, M.E.; Hover, F.S.; Chryssostomidis, C. System Identification of Open-Loop Maneuvers Leads to Improved AUV Flight Performance. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2006, 31, 200–208.
- Eng., vol. 43, no. 2, pp. 457–467, Apr. 2018.
- [25] K. Kim and H. S. Choi, "Analysis on the controlled nonlinear motion of a test bed AUV–SNUUV I," *Ocean Eng.*, vol. 34, no. 8, pp. 1138–1150, Jun. 2007.
- [26] O. Hassanein, S. G. Anavatti, and T. Ray, "Fuzzy modeling and control for autonomous underwater vehicle," in *Proc. 5th Int. Conf. Autom., Robot. Appl.*, 2011, pp. 169–174.
- [27] G. C. Karras et al., "On-line identification of autonomous underwater vehicles through global derivative-free optimization," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, pp. 3859–3864, 2013.
- [28] R. Taubert, M. Eichhorn, C. Ament, M. Jacobi, D. Karimanzira, and T. Pfuetzenreuter, "Model identification and controller parameter optimization for an autopilot design for autonomous underwater vehicles," in *Proc. OCEANS Conf.*, Taipei, Taiwan, pp. 1–9, 2014.
- [29] Z. Huajun, T. Xinchi, G. Hang, and X. Shou, "The parameter identification of the autonomous underwater vehicle based on multi-innovation least squares identification algorithm," *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol.



شکل ۷- خروجی مدل و خروجی واقعی.