

# شناسایی دینامیکی یک وسیله‌ی زیرسطحی در حرکت صفحه‌ی با استفاده از روش پاسخ فرکانسی

Original Article

افشین بنازاده (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

محمدسعید سیف (استاد)

محمدجواد خدائی\* (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

هدف نوشتار حاضر، شناسایی مدل دینامیک خطی حرکت در صفحه‌ی افق یک وسیله‌ی زیرسطحی بدون سرنشین به وسیله‌ی برآزش توابع تبدیل آن است. شناسایی، تحلیل و تصحیح طراحی چنین وسایلی به دلیل غیرخطی بودن دینامیک حاکم بر آن‌ها بسیار پرچالش است. در این نوشتار برای نخستین بار به منظور حذف اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها از شناسایی حوزه‌ی فرکانس و الگوریتم‌های ریاضی قوی در آن استفاده شده است. در اینجا پس از مدل‌سازی و شبیه‌سازی حرکت دینامیکی، ورودی جاروی فرکانسی در شبیه‌ساز غیرخطی به کنترل‌کننده‌ی سکان اعمال شده و با استفاده از تحویل حوزه‌ی فرکانس توابع تبدیل زوایه‌ی سمت و نرخ چرخش نسبت به این ورودی محاسبه شده است. نتایج حاصله نشان‌گر مطابقت بسیار خوب این مدل معادل خطی با مدل تحلیلی غیرخطی، و عملکرد خوب آن در حضور نویز به لطف استفاده‌ی مناسب از توابع طیفی و تکنیک پنجره‌بندی است.

واژگان کلیدی: شناسایی حوزه‌ی فرکانس، زیرسطحی بدون سرنشین، مدل معادل خطی، نرم‌افزار سایفر (CIFER).

## ۱. مقدمه

با توسعه و گسترش صنایع دریایی و علوم مرتبط با دریا، امروزه برای انجام بسیاری از کاربردهای کشف و استخراج منابع زیرآبی، بازرسی و جمع‌آوری اطلاعات زیست‌محیطی و نیز نصب، تعمیر و نگهداری سازه‌های ساحلی و دریایی، به‌کارگیری تکنولوژی‌های خاص و جدید برای پاسخ‌گویی به نیازهای روزافزون پیش‌آمده ضروری می‌نماید. وسیله‌های زیرسطحی خودکار<sup>۱</sup> یکی از قدرتمندترین ابزارها برای تحقیقات در زمینه‌های علمی و تجاری‌اند و کاربردهای متنوعی دارند. در سال‌های اخیر تحقیقات پیرامون زیرسطحی‌های بدون سرنشین در کشورهای صنعتی جهان رشد چشمگیری داشته است. علت این موضوع را می‌توان در محدودیت‌های روش‌های کنونی جست‌وجو کرد. نیاز به جست‌وجو در عمق‌های بیشتر و مناطقی که امکان غواصی یا استفاده از زیرسطحی‌های سرنشین‌دار در آن‌ها غیرممکن است از عمده‌ی این دلایل محسوب می‌شود. «شناسایی دینامیکی» فرایندی است که طی آن مدل دقیقی از وسیله، به‌کمک آنالیز پاسخ‌های آن به ورودی‌های معین کنترلی به دست می‌آید.

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۷/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۴/۳/۱۲، پذیرش ۱۳۹۴/۳/۲۶.

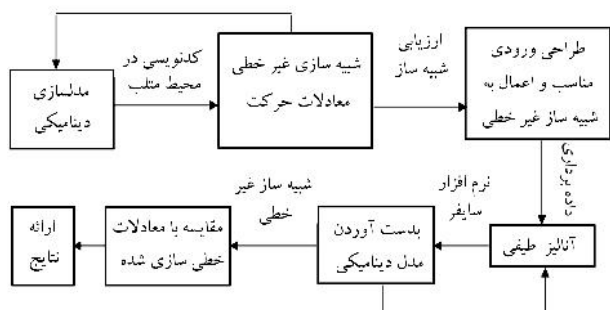
banazadeh@sharif.edu  
seif@sharif.edu  
khodaei\_mjavad@alum.sharif.edu

مدل دینامیکی که در ابتدا بر مبنای فیزیک جسم و به‌روش شبیه‌سازی تولید می‌شود هیچ‌گاه کامل نیست و توانایی پیش‌گویی برخی از پدیده‌های ظریف غیرخطی را ندارد. هدف از شناسایی دینامیکی یک زیرسطحی، افزایش دقت مدل‌سازی به‌منظور کنترل مانور آن است. روش‌های متنوعی برای شناسایی و تخمین پارامترهای یک سیستم از دهه‌ی ۵۰ میلادی تاکنون ارائه شده که با افزایش قدرت محاسباتی و توسعه‌ی الگوریتم‌های شناسایی، توجه به سمت حوزه‌ی فرکانس با توجه به مزایای فراوان آن، با اقبال بیشتری مواجه شده است. همچنین با توجه به سهولت تحلیل سیستم‌های خطی و طراحی کنترل‌کننده برای آنها، تهیه‌ی یک مدل خطی از سیستم‌ها همواره جایگاه خاصی داشته است؛ این مسئله برای سیستم‌های پیچیده‌تر نظیر هواپیماها و سیستم‌های دریایی نیز مطرح بوده است. ارائه‌ی یک مدل خطی از زیرسطحی‌ها در حوزه‌ی فرکانس با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد این حوزه -- نظیر سهولت حذف باياس و انحراف، عدم حساسیت به خطای سنسور اندازه‌گیری و اغتشاشات فرایندی، ایجاد مدل غیر پارامتریک با امکان دست‌یابی به خصوصیات کلیدی دینامیکی و هزینه‌ی محاسباتی کم‌تر -- از مقبولیت بیشتری نسبت به شناسایی حوزه‌ی زمان برخوردار است. یکی از نکات مهم در شناسایی حوزه‌ی فرکانس، استخراج یک مدل

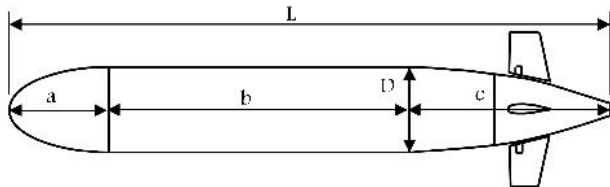
یک ورودی زیگ‌زاگی نتایج هر دو تابع تبدیل مقایسه شده است. نتایج حاصله نشان‌گر آن است که مدل به دست آمده از روش پاسخ فرکانسی در حوزه‌ی فرکانس بسیار غنی‌تر بوده و دینامیک معادل دقیق‌تری به دست آورده است. در شکل ۱ فلوجارت انجام این تحقیق نشان داده شده است.

## ۲. کلیات زیرسطحی ۲-SUT

زیرسطحی ۲-SUT از نوع کروزینگ است که توسط گروهی از دانشجویان کارشناسی ارشد مهندسی دریا در دانشکده‌ی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف برای انجام کارهای تحقیقاتی و تحت عنوان «پایان‌نامه» طراحی و ساخته شده است. دماغه‌ی این زیرسطحی بیضی‌گون بوده، قسمت دم یک معادله‌ی درجه ۳ و قسمت میانی یک استوانه را تشکیل داده‌اند. در شکل ۲، هندسه‌ی کلی ۲-SUT نمایش داده شده است. در جدول ۱ نیز ابعاد بدنه، در جدول ۲ مشخصات سطوح کنترلی، و در جدول ۳ مشخصات پروانه ارائه شده است.



شکل ۱. فلوجارت انجام مطالعه‌ی حاضر.



شکل ۲. شماتیک بدنه‌ی ۲-SUT.

جدول ۱. ابعاد ۲-SUT (برحسب میلی‌متر).

۱۴۱۲	L	طول کل
۲۰۰	D	قطر
۲۳۵	a	طول دماغه
۷۰۶	b	طول استوانه‌ی میانی
۴۷۱	c	طول دم

جدول ۲. مشخصات سطوح کنترلی ۲-SUT.

۴	تعداد
NACA <sup>۰</sup> ۰۱۵	پروفیل
۸۰	وتر (mm)
۱۰۰	دهانه (mm)
۸۸۲۴	مساحت (mm <sup>۲</sup> )
۵۳°	فاصله‌ی محورتا مرکز شناوری (mm)

خطی از سیستم نیمه‌خطی یا غیرخطی است. بنابراین در حالت غیرخطی بهترین تقریب خطی از سیستم غیرخطی به دست می‌آید که مسلماً دارای خطاست. این مسئله برای سیستم‌های دریایی که شامل عبارات غیرخطی و پیچیده‌اند، نیز مطرح است.

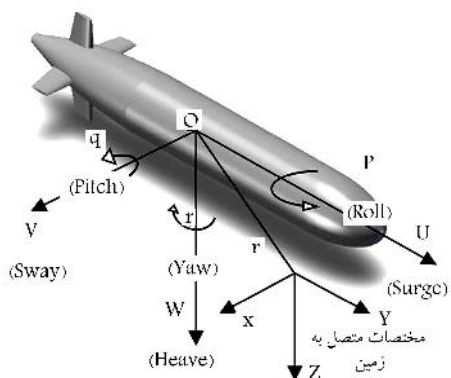
از آنجا که روش‌های شناسایی دینامیکی عمدتاً وابسته به داده‌های مانور وسیله‌اند، با تدوین یک نرم‌افزار شبیه‌ساز غیرخطی اعتبارسنجی شده داده‌های مورد نیاز برای شناسایی تولید خواهد شد. در اینجا مدل ریاضی شامل نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی است که به صورت روابط حرکت بیان می‌شوند؛ شبیه‌سازی دقیق حرکت زیرسطحی‌ها نیز با حل این روابط و به کمک ضرایب هیدرودینامیکی بدنه امکان‌پذیر است. تاکنون روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی زیرسطحی‌ها ارائه شده است.<sup>[۱-۳]</sup>

در نوشتار حاضر با استفاده از روش مدل‌سازی فوسن، حرکات این زیرسطحی در محیط متلب<sup>۲</sup> شبیه‌سازی شده که معادلات آن نیز به‌طور کامل معرفی و اعتبارسنجی شده‌اند. در مطالعه‌ی مدل مانور غیرخطی یک کشتی<sup>[۴]</sup> با استفاده از دو آزمون تجربی چرخش و زیگ‌زاگ، پارامترهای مدل دینامیکی از روش نظری فیلتر کارمن استخراج شده است.

در بررسی مدل خاصی از AUV<sup>[۵]</sup>، محققین پس از جمع‌آوری اطلاعات به دست آمده از آزمون‌های تجربی و با استفاده از روش شناسایی سیستم در حوزه‌ی زمان و روش حداقل مربعات به مدل دینامیکی قابل قبولی دست یافته‌اند. در مطالعه‌ی دیگر<sup>[۶]</sup> از روش شناسایی حوزه‌ی فرکانس برای شناسایی حرکات مانور یک کشتی استفاده شده است. همچنین، شناسایی پارامتریک برای مدل غیرخطی مانور کشتی در حوزه‌ی فرکانس<sup>[۷]</sup> مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین مطالعه‌ی مشابه برای مدل خاصی از یک کشتی انجام شده<sup>[۸]</sup> که در آن، با استفاده از روش پاسخ فرکانسی و نرم‌افزار سایفر توابع تبدیل دینامیکی کشتی به دست آمده و با کمک این مدل یک کنترل‌کننده‌ی PID طراحی شده است. لازم به ذکر است که در شناسایی حوزه‌ی فرکانس سیستم‌های دینامیکی، نرم‌افزار جامعی به نام سایفر وجود دارد که بیشتر در شناسایی وسایل پرنده مورد استفاده قرار می‌گیرد<sup>[۹]</sup> و در تعدادی از مطالعات (نظیر منبع<sup>[۱۰]</sup>) برای شناسایی زیرسیستم‌های مکانیکی مانند یک بازوی انعطاف‌پذیر کاربرد دارد. همچنین شناسایی حوزه‌ی فرکانس یک سیستم سروو<sup>[۱۱]</sup> در حضور غیرخطی لقی و اصطکاک، ارائه شده است. در تحقیق حاضر، از این نرم‌افزار در فرایند شناسایی -- به‌ویژه در راستای بررسی پاسخ‌های فرکانسی و انطباق آنها -- استفاده شده است.

ویژگی اصلی نوشتار حاضر، شناسایی حوزه‌ی فرکانس یک زیرسطحی است که برای اولین بار ارائه می‌شود. در ابتدا از سیگنال ورودی جاری فرکانسی به‌منظور شناسایی استفاده شده است. این کار منجر به تحریک تمامی فرکانس‌های دینامیکی و شناسایی آنها می‌شود. طراحی درست این سیگنال خود دارای نوآوری است.

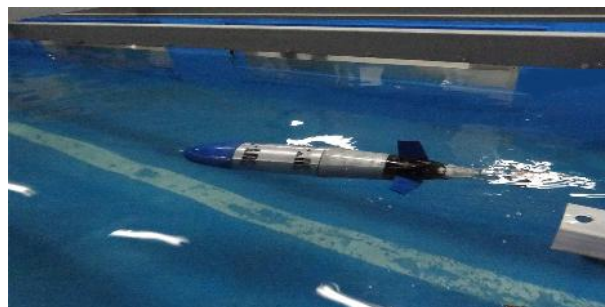
ورودی طراحی شده به‌وسیله‌ی زاویه‌ی کنترلی بالک‌ها (سکان) به شبیه‌ساز غیرخطی اعمال شده و با استفاده از تبدیل فوریه گسسته سریع<sup>۲</sup>، آنالیز طیفی داده‌های به دست آمده به کمک نرم‌افزار سایفر انجام می‌شود. با کمک این آنالیز طیفی بازه فرکانسی تحریک زیرسطحی و نهایتاً توابع تبدیل خطی معادل قابل استخراج خواهد بود. همچنین به‌منظور افزایش مقاومت نسبت به اغتشاشات اندازه‌گیری و عوامل غیرخطی موجود در دینامیک سیستم، از شیوه‌ی پنجره‌بندی استفاده شده که منجر به حذف خطاهای تصادفی و افزایش مقدار تابع همبستگی -- معیار مناسب ارزیابی شناسایی انجام شده -- استفاده شده است. در ادامه، برای مقایسه‌ی بیشتر و ارزیابی مدل به دست آمده، معادلات خطی تحلیلی را نیز به دست آورده و با اعمال



شکل ۴. مختصات متصل به بدنه و متصل به زمین.

جدول ۳. مشخصات پروانه‌ی زیرسطحی SUT-۲.

نوع پروانه	گام ثابت (FPP)
تکی	
سری	X۴۸۲ (Octura)
تعداد پره	۲
قطر (mm)	۸۲
گام (mm)	۴٫۱



شکل ۳. زیرسطحی SUT-۲.

و در آن  $\tau$  نیروهای پیش‌رانش و کنترلی،  $MA$  ماتریس جرم افزوده،  $CA(v)$  ماتریس گریز از مرکز و کریولیس جرم افزوده،  $D(v)$  عبارت میرایی هیدرودینامیکی، و  $g(\eta)$  نیروها و گشتاورهای بازدارنده است. در نهایت معادلات ۶ درجه آزادی به صورت معادلات ۱-۳ تا ۶-۳ است: [۱۵]

$$m \begin{pmatrix} \dot{u} - vr + wq - x_G (q^{\dot{}} + r^{\dot{}}) + \\ y_G (pq - \dot{r}) + z_G (pr + \dot{q}) \end{pmatrix} = \sum X \quad (۱-۳)$$

$$m \begin{pmatrix} \dot{v} - wp + ur - y_G (p^{\dot{}} + r^{\dot{}}) \\ + z_G (qr - \dot{p}) + x_G (pq + \dot{r}) \end{pmatrix} = \sum Y \quad (۲-۳)$$

$$m \begin{pmatrix} \dot{w} - uq + vp - z_G (p^{\dot{}} + q^{\dot{}}) \\ + x_G (rp - \dot{q}) + y_G (rq + \dot{p}) \end{pmatrix} = \sum Z \quad (۳-۳)$$

$$I_X \dot{p} + (I_Z - I_Y)qr - (\dot{r} + pq)I_{XZ} + (r^{\dot{}} - q^{\dot{}})I_{YZ} + (pr - \dot{q})I_{XY} + m \begin{pmatrix} y_G (\dot{w} - uq + vp) \\ -z_G (\dot{v} - wp + ur) \end{pmatrix} = \sum K \quad (۴-۳)$$

$$I_Y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{XY} + (p^{\dot{}} - r^{\dot{}})I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{YZ} + m \begin{pmatrix} z_G (\dot{u} - vr + wq) \\ -x_G (\dot{w} - uq + vp) \end{pmatrix} = \sum M \quad (۵-۳)$$

$$I_Z \dot{r} + (I_Y - I_X)pq - (\dot{q} + rp)I_{YZ} + (q^{\dot{}} - p^{\dot{}})I_{YX} + (rp - \dot{p})I_{XZ} + m \begin{pmatrix} x_G (\dot{v} - wp + ur) \\ -y_G (\dot{u} - vr + wq) \end{pmatrix} = \sum N \quad (۶-۳)$$

سمت راست معادلات بالا همان نیروها و گشتاورهای خارجی است که با روابط ۱-۴ تا ۶-۴ قابل محاسبه‌اند:

$$\sum X = X_{HS} + X_{u|u}|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{Thrust} \quad (۱-۴)$$

$$\sum Y = Y_{HS} + Y_{v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + Y_v\dot{v} + Y_r\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{\delta r}\delta r \quad (۲-۴)$$

جنس بدنه با توجه به ملاحظات چگونگی عمق‌کاری، وزن و خنک‌کاری انتخاب شده است. بدین صورت که تمامی قسمت‌های بدنه دارای ضخامت ۱ سانتی‌متر است. دماغه و دم از جنس PVC و استوانه‌ی میانی آلومینیومی است. [۱۲]

سیستم رانش زیرسطحی به صورت تک‌موتوری است که نیروی پیش‌رانش توسط یک موتور DC تأمین می‌شود. هدایت و کنترل این زیرسطحی به وسیله‌ی چهار سکان با پروفیل NACA ۱۵° انجام می‌شود که از سه سروموتور برای حرکت سکان‌ها استفاده می‌شود. در شکل ۳ زیرسطحی ساخته‌شده‌ی SUT-۲ نمایش داده شده است.

### ۳. شبیه‌سازی دینامیکی

برای شبیه‌سازی حرکت وسایل زیرسطحی سه گام اساسی لازم است: ۱. تعریف دستگاه‌ها و تدوین معادلات حرکت که در واقع بیان‌کننده‌ی حرکت‌اند؛ ۲. تخمین ضرایب هیدرودینامیکی برای توسعه‌ی معادلات نیرو و ممان؛ ۳. حل معادلات و اعتبارسنجی. معادلات حرکتی ۶ درجه آزادی از نوع معادلات دیفرانسیل غیرخطی معمولی است که با استفاده از روش‌های محاسباتی استاندارد به‌سادگی قابل حل است. [۱۳] در اینجا معادلات حرکت زیرسطحی در مختصات محلی (متصل به بدنه) نوشته می‌شود. به این ترتیب مشخصات جرمی و ممان اینرسی تغییر نخواهد کرد. معمولاً مرکز دستگاه مختصات محلی منطبق بر مرکز شناوری انتخاب می‌شود. در شکل ۴ مختصات محلی و کلی نشان داده شده است. [۱۴] معادله‌ی حرکت براساس قانون نیوتن، به صورت رابطه‌ی ۱ نوشته می‌شود. [۱۴] سمت راست معادله‌ی ۱ برابر مجموع نیروهای خارجی است که شامل بخش‌های معادله‌ی ۲ است.

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB(v)}v = \tau_{RB} \quad (۱)$$

$$\tau_{RB} = \tau - MA\dot{v} - CA(v)v - D(v)v - g(\eta) \quad (۲)$$

بنابراین، شتاب در لحظه‌ی  $t$ ، مطابق رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود:

$$\dot{v}(t_0) = M_t^{-1} C(t_0) \quad (9)$$

که در آن  $C$  مجموع سایر جملات است که مقدار آنها در لحظه‌ی  $t_0$  با توجه به سرعت اولیه و روابط ۴ به دست می‌آید.

براساس معادلات ارائه شده در فوق، برنامه‌ی شبیه‌سازی تدوین و حرکت زیرسطحی مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است این کد شبیه‌سازی با فرض حرکت زیرسطحی مغروق در عمق آب در محیط شبیه‌ساز نرم‌افزار متلب نوشته شده، و حرکت سطحی را شبیه‌سازی نمی‌کند.

#### ۴. معرفی روش شناسایی سیستم در حوزه‌ی فرکانس

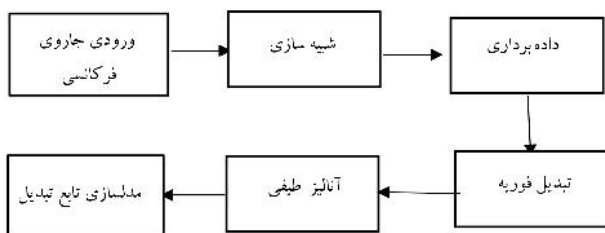
«شناسایی دینامیکی سیستم در حوزه‌ی فرکانس» عبارت است از تعیین یک سیستم خطی معادل براساس مشاهدات ورودی - خروجی. در این روش معمولاً از نمودار بود<sup>۴</sup> در راستای بررسی همسازی نتایج آزمون با شناسایی استفاده می‌شود. پس از جمع‌آوری داده‌های مانور وسیله باید این داده‌ها مورد آنالیز طیفی واقع شود. در شکل ۵ چارت گردشی شناسایی سیستم به روش پاسخ فرکانسی استفاده شده در این نوشتار نشان داده شده است. دو مشخصه‌ی کلیدی آنالیز طیفی تبدیل فوریه گسسته سریع و بهینه‌سازی ترکیب پنجره‌هاست.

#### ۴.۱. تبدیل فوریه گسسته سریع

با اعمال تبدیل فوریه به داده‌های زمانی، پاسخ‌های فرکانسی به دست می‌آیند. استفاده از تبدیل فوریه اولین گام شناسایی دینامیک‌های غیرخطی و تبدیل آن به یک مدل ساده خطی است. تبدیل فوریه‌ی گسسته چنین بیان می‌شود:

$$X(f_k) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp\left(\frac{-2\pi j (kn)}{N}\right) \quad (10)$$

که در آن  $N$  برابر تعداد نقاط فرکانسی است. تبدیل دیگری به نام فوریه گسسته سریع وجود دارد که هزینه‌ی محاسباتی آن در مقایسه با تبدیل فوریه کمتر است، زیرا از ذخیره‌ی اطلاعاتی مراحل قبل و تعداد نقاط فرکانسی کمتر بهره می‌گیرد. رابطه‌ی تبدیل فوریه گسسته سریع در حقیقت همان رابطه‌ی تبدیل فوریه گسسته (رابطه‌ی ۱۰) است، با این تفاوت که با استفاده از الگوریتم بلوشتین<sup>۵</sup> حجم محاسبات به صورت زیر کاهش می‌یابد. در این رابطه،  $kn$  به صورت رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود. با جایگذاری رابطه‌ی ۱۰ در رابطه‌ی ۱۱، رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید. در این رابطه عبارت اول تابع نمایی  $\left(\exp\left(\frac{-\pi j k^2}{N}\right)\right)$  یک بار محاسبه شده و در حافظه قرار می‌گیرد و تا پایان محاسبات دیگر محاسبه نمی‌شود. عبارت دوم و سوم تابع نمایی



شکل ۵. چارت شناسایی سیستم به روش پاسخ فرکانسی این نوشتار.

$$\sum Z = Z_{HS} + Z_{w|w}|w| + Z_{q|q}|q| + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{\delta_s}\delta_s \quad (3-4)$$

$$\sum K = K_{HS} + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{Thrust} \quad (4-4)$$

$$\sum M = M_{HS} + M_{w|w}|w| + M_{q|q}|q| + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{\delta_s}\delta_s \quad (5-4)$$

$$\sum N = N_{HS} + N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{\delta_r}\delta_r \quad (6-4)$$

معادلات ۴ شامل ضرایب هیدرودینامیکی است که باید به روش آزمون یا حل عددی، و یا روش‌های تحلیلی و نیمه تجربی محاسبه شود.<sup>[۱۶، ۱۷]</sup> ضرایب زیرسطحی SUT-۲ با استفاده از این روش‌ها به دست آمده و در نتیجه می‌توان با استفاده از آنها حرکت زیرسطحی را شبیه‌سازی کرد.<sup>[۱۸]</sup> اندیس HS در معادلات ۴ مربوط به نیرو و ممان هیدرواستاتیکی یا همان نیروهای بازدارنده است که چنین محاسبه می‌شود:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B) s\theta \\ -(W - B) c\theta s\phi \\ -(W - B) c\theta c\phi \\ -(y_G W - y_B B) c\theta c\phi + (z_G W - z_B B) c\theta s\phi \\ (z_G W - z_B B) s\theta + (x_G W - x_B B) c\theta c\phi \\ (x_G W - x_B B) c\theta s\phi - (y_G W - y_B B) s\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

عبارت پیش‌رانش ناشی از دوران پروانه‌ی نصب شده در انتهای دم نیز چنین محاسبه می‌شود:

$$\tau = [\rho D^3 K_T J, n^T, \circ, \circ, \rho D^5 K_Q J, n^T, \circ, \circ]^T \quad (6)$$

که با مشخص شدن ضرایب معادلات ۴ با جداسازی جملات شتاب، معادلات به صورت معادله‌ی ۷ نوشته می‌شود، به طوری که ماتریس  $M_t$  عبارت خواهد بود از:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = [M_t]^{-1} \begin{bmatrix} \sum X \\ \sum Y \\ \sum Z \\ \sum K \\ \sum M \\ \sum N \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$M_t = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & \circ & \circ & \circ & m z_G & \circ \\ \circ & m - Y_{\dot{v}} & \circ & -m z_G & \circ & -Y_{\dot{r}} \\ \circ & \circ & m - Z_{\dot{w}} & \circ & Z_{\dot{q}} & \circ \\ \circ & -m z_G & \circ & I_X - K_{\dot{p}} & \circ & \circ \\ m z_G & \circ & -M_{\dot{w}} & \circ & I_Y - M_{\dot{q}} & \circ \\ \circ & -N_{\dot{v}} & \circ & \circ & \circ & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در آن  $u$  ضریب جبران افت انرژی سیگنال ناشی از استفاده از توابع وزن در تکنیک پنجره‌بندی است که مقدار آن برای تابع Hanning window،  $0.612$  است و  $n_r$  تعداد پنجره‌هاست که از رابطه‌ی ۲۲ به دست می‌آید. در این رابطه  $x_f$  ضریب همپوشانی پنجره‌هاست که به منظور افزایش کیفیت شناسایی مورد استفاده قرار گرفته است.

$$n_r = 1 + \frac{\left(\frac{T_{rec}}{T_{win}}\right) - 1}{1 - x_f} \quad (22)$$

برای پنجره‌ی با اندازه‌ی بزرگ‌تر کمیته فرکانس مؤثر در شناسایی کاهش می‌یابد و بنابراین در فرکانس‌های پایین‌تر محتوای اطلاعاتی بهتری حاصل خواهد شد. از طرفی چون تعداد پنجره‌هایی که در محاسبات طیفی میانگین‌گیری می‌شوند نیز کاهش می‌یابد، خطای تصادفی افزایش می‌یابد. برعکس پنجره‌ی با اندازه‌ی کوچک‌تر به معنی تعداد پنجره‌های بیشتری است که میانگین‌گیری شده و بنابراین خطای تصادفی را کاهش می‌دهد. بنابراین دقت شناسایی در فرکانس‌های بالا به‌خوبی افزایش یافته ولی منجر به کاهش محتوای اطلاعاتی در فرکانس‌های پایین‌تر خواهد شد. انتخاب ابعاد پنجره باید بین محتوای اطلاعاتی افزایش یافته در فرکانس‌های پایین و میزان خطای تصادفی کمتر در فرکانس‌های بالا تعادل برقرار کند. بنابراین انتخاب ابعاد مناسب پنجره‌ها نیاز به سعی و خطا دارد.

انتخاب طول نامی پنجره متناسب با بیشترین پریود مورد بررسی است. از طرفی حداقل فرکانس قابل شناسایی متناسب با ابعاد پنجره‌هاست. در عمل به علت اغتشاشات و همپنین ورودی‌های ناخواسته‌ی کنترلی، حداقل فرکانس شناسایی باید دو برابر مقدار معکوس طول پنجره باشد. لذا در هر پنجره دست‌کم دو پریود مفید باید از سیگنال مورد نظر به دام افتد. به عبارت دیگر: [۱۹]

$$T_{win} = 2T_{max} \quad (23)$$

واضح است که بیشینه‌ی ابعاد پنجره با اندازه‌ی کل زمان داده‌برداری شده برابر است. اما تجربه‌های عملی نشان داده که بیشینه‌ی ابعاد پنجره برای نتیجه‌گیری بهتر، باید از این مقدار کوچک‌تر باشد. به‌عنوان یک قانون سرانگشتی می‌توان گفت: [۱۹]

$$T_{win} \leq 0.5T_{rec} \quad (24)$$

و چنانچه از ورودی‌های متوالی برای شناسایی استفاده می‌شود: [۱۹]

$$T_{win} \leq 0.5T_F \quad (25)$$

کمترین طول پنجره باید یک بازه  $10^\circ$  رادیان بر ثانیه از فرکانس را پوشش دهد (بین کمیته و بیشینه فرکانس مؤثر در شناسایی). براین اساس، کمیته اندازه‌ی پنجره را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۲۶ به دست آورد: [۱۹]

$$T_{win_{min}} > 20 \left( \frac{2\pi}{\omega_{max}} \right) \quad (26)$$

برای تعیین میزان کارآمدی توابع تبدیل به دست آمده، معیار تابع هزینه به‌صورت معادله‌ی ۲۷ تعریف می‌شود؛ چنانچه این شاخص کم‌تر از  $10^\circ$  باشد نشان‌گر دقت بالای مدل شناسایی شده است. [۱۹]

$$J = \frac{20}{n_\omega} \sum_{\omega_1}^{\omega_{max}} \omega_\delta \left[ \omega_g \left( \left| \widehat{T_C} \right| - \left| \hat{T} \right| \right)^2 + \omega_P \left( \angle \widehat{T_C} - \angle \hat{T} \right)^2 \right] \quad (27)$$

که داخل انتگرال در هم ضرب شده‌اند نیز برای هر فرکانس یکبار محاسبه شده و در حافظه قرار می‌گیرد و تا فرکانس بعدی دیگر محاسبه نمی‌شود؛ به همین دلیل حجم محاسبات بسیار کاهش می‌یابد.

$$nk = \frac{-(k-n)^2}{2} + \frac{n^2}{2} + \frac{k^2}{2} \quad (11)$$

$$X(f_k) = \Delta t e^{\left(\frac{-\pi j k^2}{N}\right)} \sum_{n=0}^{n-1} x_n e^{\left(\frac{-\pi j n^2}{N}\right)} e^{\left(\frac{-\pi j (k-n)^2}{N}\right)} \quad (12)$$

با استفاده از این تبدیل می‌توان توابع طیفی ورودی - خروجی را محاسبه کرد:

$$\hat{G}_{XX}(f) = \frac{2}{T} |X(f)|^2 \quad (13)$$

$$\hat{G}_{YY}(f) = \frac{2}{T} |Y(f)|^2 \quad (14)$$

$$\hat{G}_{XY}(f) = \frac{2}{T} |X(f) * Y(f)| \quad (15)$$

که تابع پاسخ فرکانسی به صورت معادله‌ی ۱۶ تعریف می‌شود:

$$H(f) = \frac{\hat{G}_{XX}(f)}{\hat{G}_{XY}(f)} \quad (16)$$

ارزیابی شناسایی در حوزه‌ی فرکانس با استفاده از تابع همبستگی<sup>۶</sup> صورت می‌گیرد. چنانچه مقدار این تابع از  $0.6$  بزرگ‌تر باشد و رفتار نوسانی شدیدی نداشته باشد، شناسایی معتبر خواهد بود. این تابع با استفاده از رابطه‌ی ۱۷ قابل محاسبه است: [۱۹]

$$\hat{\gamma}_{xy} = \frac{|\hat{G}_{XY}(f)|^2}{|\hat{G}_{XX}(f)| |\hat{G}_{YY}(f)|} \quad (17)$$

## ۲.۴. بهینه‌سازی ترکیب پنجره‌ها

در فرایند شناسایی در حوزه‌ی فرکانس تعیین دقیق توابع طیفی بسیار اهمیت دارد، و چون عملاً داده‌ها به اغتشاش آلوده‌اند ممکن است بر تخمین توابع طیفی تأثیرگذار باشند. یک روش مناسب برای حذف خطاهای تصادفی<sup>۷</sup> استفاده از تکنیک پنجره‌بندی است. در این روش با استفاده از متوسط‌گیری توابع در چند بازه مختلف، تخمین‌های طیفی یکنواختی تولید می‌شود.

$$T_{win} = \frac{T_{rec}}{n_r} \quad (18)$$

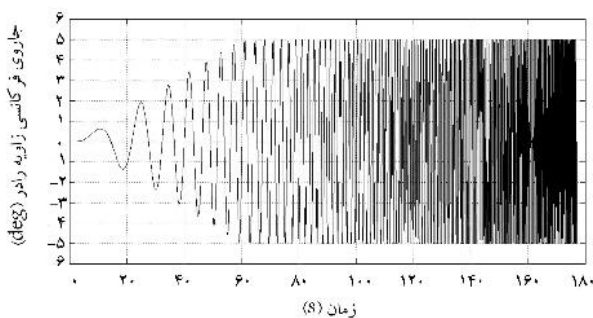
در معادله‌ی ۱۸  $n_r$  و  $T_{win}$  به ترتیب تعداد پنجره‌ها، اندازه‌ی هر پنجره، و مدت زمان داده‌برداری است. به منظور کاهش خطای طیفی می‌توان تاریخچه‌ی زمانی در هر پنجره را در توابع وزنی  $(\omega(t))$  ضرب کرد و تاریخچه‌ی وزن‌دار داده‌ها را به دست آورد که در این نوشتار از تابع طیفی معادله‌ی ۱۹ (به نام Hanning window) استفاده شده است:

$$\omega(t) = \frac{1}{2} (1 - \cos \omega(t)) \quad (19)$$

تخمین نهایی و نرم تابع طیفی ورودی - خروجی براساس رابطه‌ی ۲۰ و ۲۱ به دست خواهد آمد:

$$\hat{G}_{XX}(f) = \frac{1}{u * n_r} \sum_{k=1}^n \tilde{G}_{xx}(f) \quad (20)$$

$$\hat{G}_{YY}(f) = \frac{1}{u * n_r} \sum_{k=1}^n \tilde{G}_{YY}(f) \quad (21)$$



شکل ۷. ورودی جاری فرکانسی.

و بیشینه فرکانس این ورودی مشخص است و به آهستگی تغییر می‌کند و بنابراین از لحاظ ایمنی در مانور حائز اهمیت است.

بر اساس قوانین شناسایی سیستم بین بیشترین فرکانس کاری سیستم ( $\omega_{max}$ )، فرکانس فیلترینگ ( $\omega_f$ ) و فرکانس داده‌برداری ( $\omega_s$ ) باید رابطه‌ی ۲۹ برقرار باشد. [۱۹]

$$\omega_s \geq 5\omega_f \geq 5\omega_{max} \quad (29)$$

در این تحقیق با توجه به این که بازه فرکانسی تحریک سیستم بین ۰٫۶ تا ۳٫۰ رادیان بر ثانیه است و داده‌برداری از طریق نرم‌افزار صورت می‌گیرد، با تنظیم  $\Delta t = 0.001$  نرخ داده‌برداری ۶۲۸۳ رادیان بر ثانیه یا ۱۰۰۰ هرتز شده است که معیارهای ذکر شده را رعایت کرده است. برای تولید جاری فرکانسی می‌توان از معادلات ۳۰ تا ۳۳ بهره برد:

$$\delta_{sweep} = A \sin(\theta(t)) \quad (30)$$

$$\theta(t) = \int_0^{T_{record}} \omega(t) dt \quad (31)$$

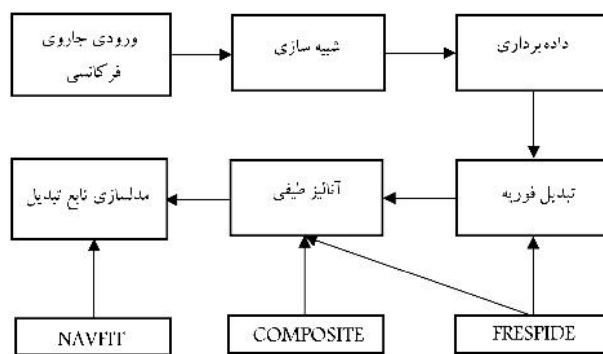
$$\omega(t) = \omega_{min} + K(\omega_{max} - \omega_{min}) \quad (32)$$

$$K = 0.0187 \left[ \exp\left(\frac{4t}{T_{rec}}\right) - 1 \right] \quad (33)$$

که در آن‌ها  $A$  دامنه‌ی سیگنال ورودی و  $T_{record}$  طول مدت زمان تحریک توسط جاری فرکانسی است که با توجه به روابط گفته شده ۱۸۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. در صورتی که مقدار  $A$  به‌طور ناگهانی افزایش یابد پاسخ زاویه‌ی یاو<sup>۸</sup> متقارن نیست و حول نقطه‌ی دیگری نوسان می‌کند و دامنه تا ثانیه‌ی ۶۰ به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. دامنه‌ی نهایی مقدار ۰٫۸۷ رادیان (۵ درجه) است. در شکل ۷ ورودی تولیدشده نشان داده شده است. همچنین نتایج حاصل از اعمال ورودی جاری فرکانسی برای ورودی سکان در بازه فرکانسی ۰٫۲ تا ۳٫۰ رادیان بر ثانیه در شکل‌های ۸ تا ۱۲ نشان داده شده است.

## ۶. نتایج حاصل از تحلیل پاسخ فرکانس

نتایج حاصل از استخراج داده‌ها و استفاده از آنالیز طیفی در نرم‌افزار سایفر در شکل‌های ۱۳ تا ۱۷ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود همه پاسخ‌ها به جز پاسخ  $u$  از مقدار همبستگی قابل قبولی برخوردارند. مطابق انتظار پاسخ سرعت  $u$  (شکل ۱۶) به‌دلیل در نظر نگرفتن تأثیر تغییرات زاویه‌ی سکان در معادله‌ی ۴-۱ برای حرکت سرج، مقدار همبستگی پایینی دارد.



شکل ۶. اجزای مختلف نرم‌افزار سایفر در ارتباط با نمودار بلوکی شناسایی سیستم در این مطالعه.

در این رابطه  $\omega_s$ ، تابع وزن‌دهی وابسته به تابع همبستگی است که بر داده‌هایی با قابلیت بالا تأکید می‌کند و عبارت است از:

$$\omega_s = \left[ 1.58 \left( 1 - e^{-7xy} \right) \right]^2 \quad (28)$$

همچنین  $\omega_p$  و  $\omega_g$  وزن‌های نسبی برای مجذور خطای دامنه و فاز هستند و طبق قرارداد، [۱۹] مقدار آنها به‌ترتیب برابر ۱ و ۰٫۱۷۴۵ است.  $n_w$  تعداد نقاط فرکانسی است و معمولاً برابر ۲۰ انتخاب می‌شود.

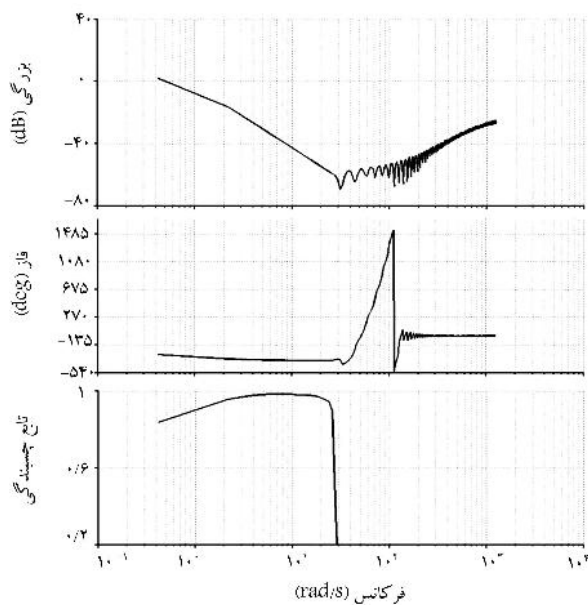
در این تحقیق به‌منظور انجام فرایند شناسایی در حوزه‌ی فرکانس از نرم‌افزار قدرت‌مند سایفر استفاده شده است. نرم‌افزار سایفر مرکب از چند زیربرنامه در راستای تولید داده‌های مناسب، انجام تبدیل‌های فوریه، ترکیب پنجره‌ها، شناسایی مدل تابع تبدیل، شناسایی مدل فضای حالت و نهایتاً ارزیابی مدل شناسایی است.

زیربرنامه‌ی FRESPID پاسخ‌های فرکانسی تک ورودی - تک خروجی را برای محدوده‌ی از پنجره‌های طیفی با استفاده از تبدیل فوریه گسسته سریع محاسبه، و آنها را در پایگاه پاسخ‌های فرکانسی ذخیره می‌کند. با این روش، تاریخچه‌ی زمانی به دست آمده از شبه‌سازی به پاسخ فرکانسی سیستم تبدیل می‌شود. سپس با استفاده از زیربرنامه‌ی COMPOSITE فرایند بهینه‌سازی را برای پنجره‌های چندگانه انجام می‌دهیم تا پاسخ‌های فرکانسی نهایی با دقت بالا و خطای تصادفی کوچک تولید شود.

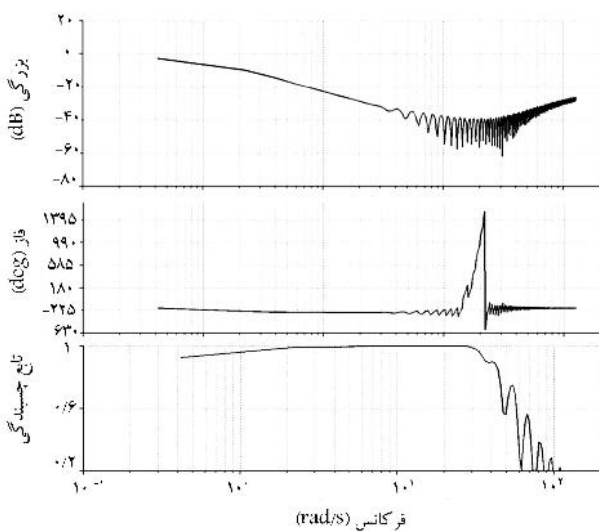
سپس با استفاده از زیربرنامه‌ی NAVFIT، مدل تابع تبدیل به‌صورت قطب و صفر شناسایی شده که به‌خوبی با پاسخ فرکانسی تک ورودی - تک خروجی همخوانی دارد. در شکل ۶ ارتباط اجزای مختلف نرم‌افزار سایفر با بلوک‌های متناظر خود در نمودار بلوکی شناسایی سیستم که در این نوشتار مورد استفاده قرار گرفته، نشان داده شده است.

## ۵. طراحی ورودی مناسب و داده‌برداری

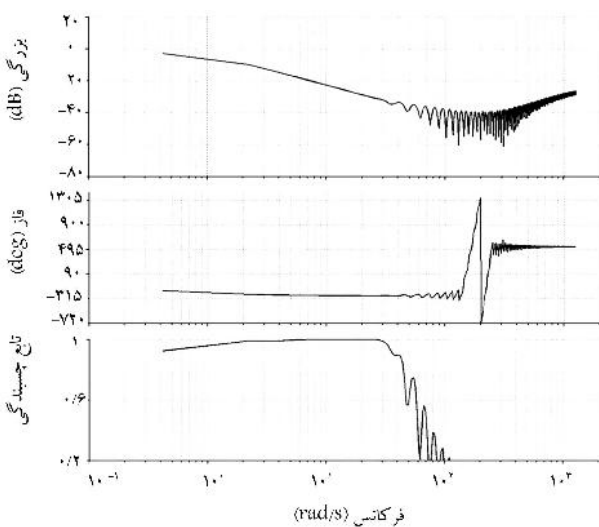
طراحی ورودی بهینه نیازمند آگاهی از ساختار مدل و خصوصیات دینامیکی آن است. منظور از ورودی بهینه ورودی است که بیشترین اطلاعات را در کم‌ترین زمان از سیستم ایجاد کند. طراحی چنین ورودی‌هایی در وسایل بدون سرنشین و غیر متداول بسیار دشوار است. یکی از بهترین ورودی‌های بهینه در شناسایی سیستم جاری فرکانسی است. جاری فرکانسی درحقیقت یک ورودی بهینه با تابع چگالی طیف قدرت یکنواخت است که منجر به پاسخ‌های زمانی متقارن نیز می‌شود. کمینه



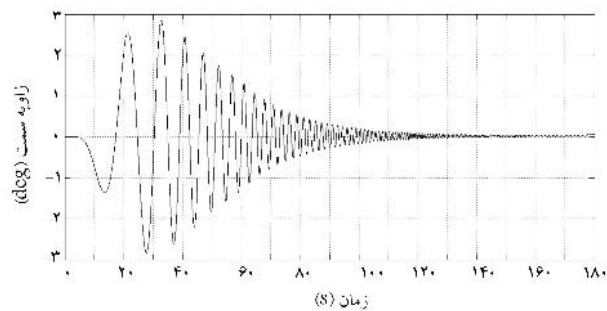
شکل ۱۳. پاسخ فرکانسی زاویه‌ی سمت.



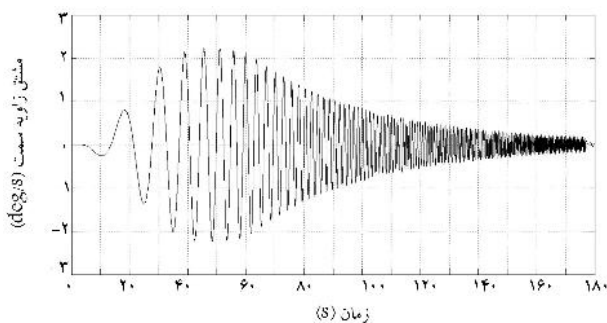
شکل ۱۴. پاسخ فرکانسی نرخ زاویه‌ی سمت.



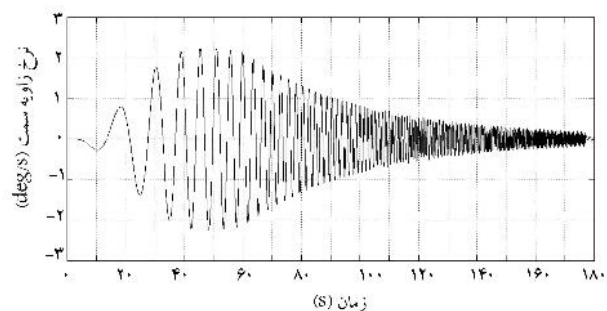
شکل ۱۵. پاسخ فرکانسی مشتق زاویه‌ی سمت.



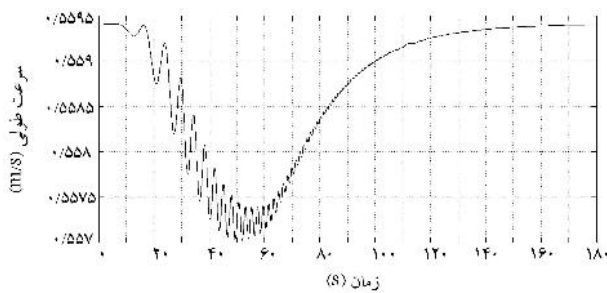
شکل ۸. تغییرات زاویه سمت نسبت به زمان در حرکت صفحه افق.



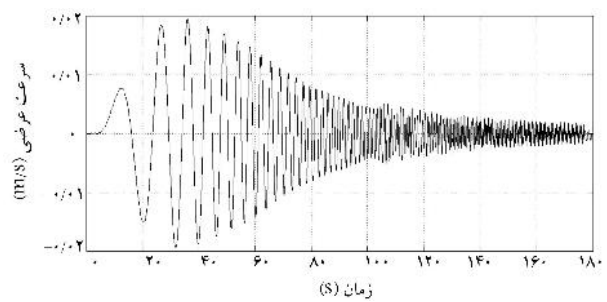
شکل ۹. تغییرات مشتق زاویه سمت نسبت به زمان در حرکت صفحه افق.



شکل ۱۰. تغییرات نرخ زاویه سمت نسبت به زمان در حرکت صفحه افق.



شکل ۱۱. تغییرات سرعت طولی نسبت به زمان در حرکت صفحه افق.



شکل ۱۲. تغییرات سرعت عرضی نسبت به زمان در حرکت صفحه افق.

۱.۶. پاسخ  $\frac{\psi}{\delta_r}$

تابع تبدیل به دست آمده مربوط به این پاسخ به شکل رابطه‌ی ۳۴ است که طبق معیار ۲۷ تابع هزینه‌ی برابر با ۰٫۳۷۶۴ دارد.

$$\frac{\psi}{\delta_r} = \frac{-0,7345s - 0,3341}{s^2 + 1,304s^2 + 0,7533s} \quad (34)$$

این تابع تبدیل دارای سه قطب و یک صفر پایدار است که یکی از قطب‌ها روی مبدأ و قطب مزدوج پایدار آن در نقاط  $0,5729i + 0,652 - 0,5729i - 0,652$  قرار دارد و تنها صفر این تابع تبدیل در نقطه‌ی  $-0,4549$  است.

۲.۶. پاسخ  $\frac{r}{\delta_r}$

تابع تبدیل به دست آمده مربوط به این پاسخ به شکل رابطه‌ی ۳۵ است که طبق معیار ۲۷ تابع هزینه‌ی برابر ۱٫۱۱۸۶ است.

$$\frac{r(s)}{\delta_r(s)} = \frac{-0,7404s - 0,1289}{s^2 + 1,092s + 0,365} \quad (35)$$

این تابع تبدیل دارای دو قطب و یک صفر پایدار است که دو قطب در نقاط  $0,2586i + 0,546 - 0,2586i - 0,546$  قرار دارد و تنها صفر این تابع تبدیل نقطه  $-0,1741$  است.

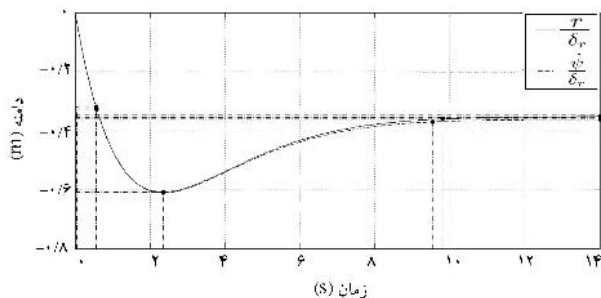
۳.۶. پاسخ  $\frac{\dot{\psi}}{\delta_r}$

تابع تبدیل به دست آمده مربوط به این پاسخ به شکل رابطه‌ی ۳۶ است که طبق معیار ۲۷ تابع هزینه‌ی برابر ۱٫۱۶۳۴ است.

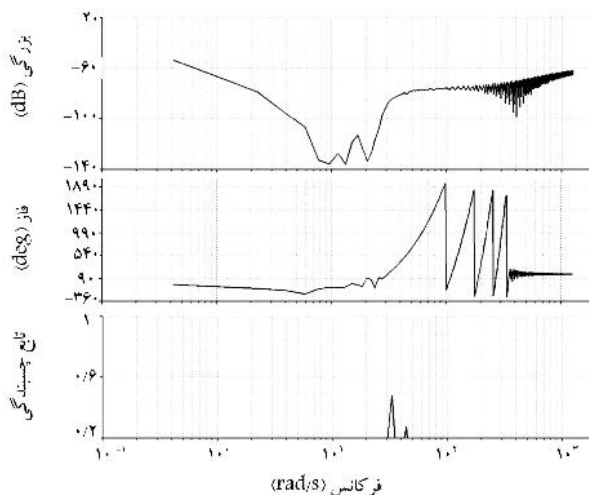
$$\frac{\dot{\psi}}{\delta_r} = \frac{-0,7397s - 0,1357}{s^2 + 1,096s + 0,374} \quad (36)$$

این تابع تبدیل دارای دو قطب و یک صفر پایدار است که دو قطب آن در نقاط  $0,2715i + 0,548 - 0,2715i - 0,548$  قرار دارد و تنها صفر این تابع تبدیل نقطه‌ی  $-0,1835$  است. در شکل ۱۸ پاسخ ورودی پله‌ی تابع تبدیل ۳۵ و ۳۶ و در جدول ۴ نیز مشخصه‌های پاسخ گذرای این دو تابع تبدیل نشان داده شده است.

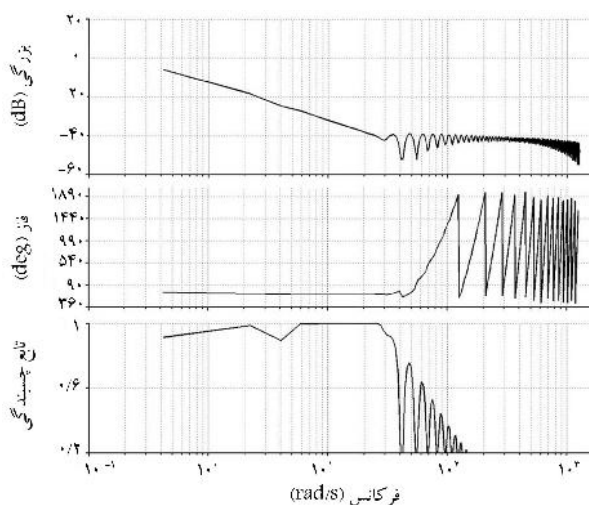
چنانچه صفرو قطب‌های تابع تبدیل  $\frac{\dot{\psi}}{\delta_r}$  را با صفرو قطب‌های تابع تبدیل  $\frac{r}{\delta_r}$  مقایسه کنیم متوجه می‌شویم که ضرایب این دو تابع تبدیل بسیار به هم نزدیک است و اختلاف جزئی میان آنها با توجه به استفاده از شبیه‌سازی غیرخطی در استخراج این توابع، قابل قبول است. چنان‌که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود پاسخ این دو تابع تبدیل بسیار به یکدیگر نزدیک، و تقریباً برابر است.



شکل ۱۸. پاسخ به ورودی پله.



شکل ۱۶. پاسخ فرکانسی سرعت طولی.



شکل ۱۷. پاسخ فرکانسی سرعت عرضی.

با توجه به تحلیل‌های زیر و با استفاده از پنجره‌های زمانی ۱۵، ۲۰ و ۳۰ ثانیه، اقدام به شناسایی سه پاسخ  $\psi$ ،  $\dot{\psi}$  و  $r$  شده است؛ نتایج حاصله برای پنجره‌های زمانی ۱۵ ثانیه عبارت است از:

$$T_{win_{min}} > 20 \left( \frac{2\pi}{\omega_{max}} \right) \Rightarrow T_{win_{min}} > 4,18$$

$$T_{win_{max}} = \frac{2}{f_{min}} = \frac{4\pi}{\omega_{min}} = 62,83 \Rightarrow T_{win_{max}} < 62,83$$

$$T_{rec} > 4 * T_{max} \rightarrow 180 > 125,66$$

پس از به دست آوردن این پاسخ‌ها در زیربرنامه‌ی FRISPID، و حذف خطاها در زیربرنامه‌ی COMPOSITE، با استفاده از زیربرنامه‌ی NAVFIT توابع پاسخ فرکانسی مورد نظر به دست آمد. چنان‌که از پاسخ‌های فرکانسی پیداست دینامیک این زیرسطحی در محدوده‌ی فرکانسی ۰٫۲ تا ۳۰ رفتاری خطی با تابع همبستگی بالای ۰٫۶ دارد که برای به دست آوردن توابع تبدیل از این محدوده استفاده شده است. پس از انجام فرایند مربوط به زیربرنامه‌ی NAVFIT توابع و نتایجی به دست آمد که در ادامه تشریح می‌شود.



با تنظیم دور موتور ۶۰۰ rpm سرعت  $u_0$  برای این زیرسطحی مقدار ۰٫۵۵۹۴ متر بر ثانیه به دست می‌آید که با جاگذاری آن در روابط بالا، مقادیر ماتریس  $a$ ،  $b$  و  $d$  در زیرسطحی SUT-۲ به دست می‌آید (جدول ۵). در نتیجه مقادیر ماتریس  $A$  و  $B$  عبارت خواهد بود از:

$$A = \begin{bmatrix} -0,4729 & -0,1931 & 0 \\ 1,4055 & -0,877 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0,784 \\ -2,336 \\ 0 \end{bmatrix}$$

برای دست‌یابی به توابع تبدیل  $\frac{r(s)}{\delta_r(s)}$  و  $\frac{\psi(s)}{\delta_r(s)}$  باید ماتریس‌های  $C$  و  $D$  را چنین تعریف کرد:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

در واقع با توجه به عبارت دوم معادلات فضای حالت (رابطه‌ی ۴۳) خروجی مورد نظر از طریق ماتریس  $C$  و  $D$  تعریف می‌شود.

$$[y] = [C][x] + [D][u] \quad (43)$$

بدین ترتیب با استفاده از ماتریس‌های  $A$ ،  $B$ ،  $C$ ،  $D$  و دستورات نرم‌افزار متلب توابع تبدیل مطابقت به صورت روابط ۴۴ و ۴۵ به دست می‌آیند:

$$\Rightarrow \frac{r(s)}{\delta_r(s)} = \frac{-0,7311s - 0,0000848}{s^2 + 0,8734s + 0,2874} \quad (44)$$

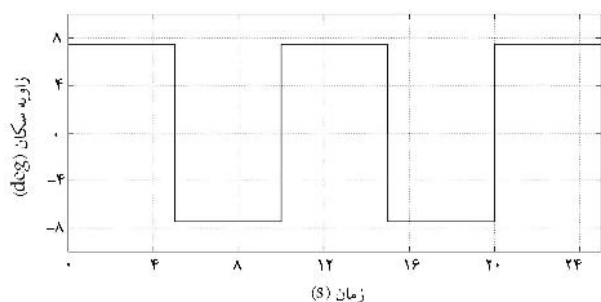
$$\Rightarrow \frac{\psi(s)}{\delta_r(s)} = \frac{-0,7311s - 0,0000848}{s^2 + 0,8734s + 0,2874} \quad (45)$$

### ۸. مقایسه‌ی نتایج

در ادامه، برای مقایسه‌ی توابع به دست آمده از مدل سایفر و مدل حاصل از خطی‌سازی، یک ورودی زیگ‌زاگ مطابق شکل ۱۹ به این توابع و مدل شبیه‌سازی اصلی اعمال شده که نتایج آن در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

جدول ۵. ضرایب محاسبه شده برای ماتریس  $a$ ،  $b$  و  $d$ .

-۱۷,۸۸	$b_{12}$	۷,۹۵	$a_{11}$
۱,۳۳	$b_{21}$	۴,۷۷	$a_{12}$
-۴,۱۲	$b_{22}$	-۴,۷۷	$a_{21}$
۴۴,۴۷	$d_{11}$	۵,۷۴	$a_{22}$
-۱۷,۱۷	$d_{21}$	۲۶,۸۴	$b_{11}$



شکل ۱۹. ورودی زیگ‌زاگ اعمالی به سکان.

جدول ۴. مقایسه‌ی پارامترهای توابع تبدیل ۳۵ و ۳۶ در پاسخ به ورودی پله.

پارامترها	پاسخ $\frac{r}{\delta_r}$	پاسخ $\frac{\psi}{\delta_r}$
زمان خیزش (s)	۰٫۵۰۴	۰٫۵۲۳
حداکثر دامنه	-۰٫۶۰۸	-۰٫۶۱
درصد حداکثر پرش	۷۲٫۱	۶۸٫۱
زمان حداکثر دامنه (s)	۲٫۳۶	۲٫۳۵
زمان نشست (s)	۹٫۸۱	۹٫۵۴

با مقایسه‌ی نتایج دو تابع تبدیل ۳۵ و ۳۶ می‌توان گفت در محدوده‌ی فرکانسی ذکر شده در این تحقیق رابطه‌ی ساده شده‌ی ۳۶ برقرار است.

$$r = \dot{\psi} \quad (37)$$

### ۷. توابع $\frac{r}{\delta_r}$ و $\frac{\psi}{\delta_r}$ به دست آمده از خطی‌سازی معادلات حرکت

معادلات ۴ که بیان‌گر حرکت در صفحه‌ی افق هستند، پس از حذف عبارات غیرخطی و صرف‌نظر از سرعت‌های هیو، سوی، رول و پیچ به روابط ساده شده‌ی ۳۸ و ۳۹ تبدیل می‌شوند.

$$m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) = Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_r ur + Y_v uv + Y_{\delta_r} u^{\delta_r} \delta r \quad (38)$$

$$I_z \dot{r} + m x_G \dot{v} + m x_G ur = N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_r ur + N_v uv + N_{\delta_r} u^{\delta_r} \delta r \quad (39)$$

معادلات ۳۸ و ۳۹ را با فرض سرعت ثابت طولی  $U_0$  می‌توان به صورت معادله‌ی ۴۰ نوشت:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{\delta} \\ N_{\delta} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (40)$$

معادله‌ی ۴۰ را نیز می‌توان به شکل فضای حالت معادله‌ی ۴۱ نوشت:

$$[a][\dot{x}] = [b][x] + d[u] \Rightarrow [a]^{-1}[a][\dot{x}] = [a]^{-1}[b][x] + [a]^{-1}[d][u] \Rightarrow [\dot{x}] = [A][x] + [B][u] \quad (41)$$

ضرایب  $a_{ii}$  و  $b_{ii}$  نیز از روابط ۴۲ به دست می‌آید:

$$a_{11} = m - Y_{\dot{v}} \quad (1-42)$$

$$a_{12} = m x_G - Y_{\dot{r}} \quad (2-42)$$

$$a_{21} = m x_G - N_{\dot{v}} \quad (3-42)$$

$$a_{22} = I_z - N_{\dot{r}} \quad (4-42)$$

$$b_{11} = Y_v u_0 \quad (5-42)$$

$$b_{12} = (Y_r - m) u_0 \quad (6-42)$$

$$b_{21} = N_v u_0 \quad (7-42)$$

$$b_{22} = N_r u_0 - m x_G u_0 \quad (8-42)$$

خطا نشانگر بیشینه اختلاف و معادل ۱۲ درصد است. علت این امر وجود عبارات غیرخطی در مدل شبیه‌سازی و تأثیر آنها بر نتایج به صورت نویز سیستمی است. در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود که بین مدل به دست آمده از سایفر و مدل به دست آمده از خطی‌سازی معادلات وجود دارد که دلیل آن حذف عبارات غیرخطی است. اثبات این موضوع در شکل ۲۱ نشان داده شده است. در این شکل زاویه‌ی سمت ایجاد شده توسط عبارات غیرخطی نشان داده شده، که تقریباً برابر مقدار اختلاف پاسخ خطی‌سازی شده از مقدار شبیه‌سازی غیرخطی است. به عبارت دیگر اگر نمودار شکل ۲۱ را با نمودار خط نقطه‌چین شکل ۲۰ جمع کنیم، تقریباً خط ممتد شکل ۲۰ به دست می‌آید؛ این مقدار خطا با افزایش زمان بیشتر می‌شود چرا که مقادیر غیرخطی سرعت‌های  $v$  و  $w$  که در معادلات حرکت توان دو دارند و با مرور زمان افزایش می‌یابند، در مدل خطی حذف شده‌اند و در نتیجه باعث افزایش خطا می‌شوند.

### ۹. نتیجه‌گیری

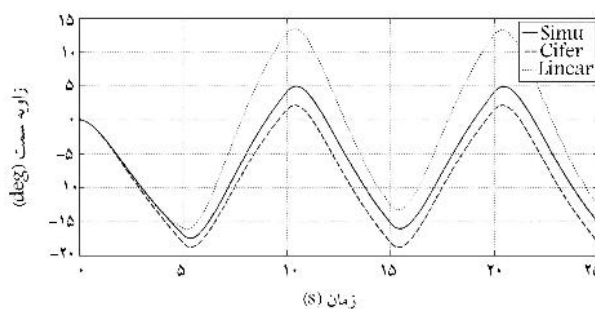
هدف این نوشتار به دست آوردن توابع تبدیل حرکت صفحه افقی یک زیرسطحی با استفاده از روش پاسخ فرکانسی برای طراحی کنترل‌کننده، به منظور مسیریابی زیرسطحی SUT-۲ بوده است. نکته‌ی مهم استفاده از این روش وجود بازه فرکانسی قابل قبول است که در آن مقدار همبستگی بیشتر از ۰٫۶ باشد؛ در این تحقیق این بازه بین ۰٫۲ تا ۲۵ تعیین شده است. در این نوشتار علاوه بر به دست آوردن توابع تبدیل حرکت صفحه افقی، نشان داده شد که از توابع تبدیل به دست آمده از این روش نسبت به توابع تبدیل به دست آمده از روش خطی‌سازی از دقت بالاتری برخوردار است. همچنین نشان داده شد که در بازه فرکانسی ذکر شده استفاده از معادله‌ی ۳۷ امکان‌پذیر است.

### پانویس‌ها

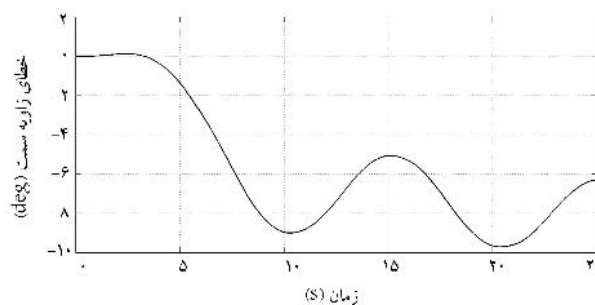
1. Autonomous underwater vehicles (AUV)
2. Matlab
3. Chirp-z
4. Bode
5. Bluestein's algorithm
6. Coherence
7. Random errors
8. Yaw

### منابع (References)

1. Brutzman, D.P., *A Virtual World for an Autonomous Underwater Vehicle*, Chapter 2, Naval Postgraduate School (NPS), Monterey California (December 1994).
2. Healey, A.J., *Dynamics of Marine Vehicle*, Naval Postgraduate School, Monterey California, Unpublished Course Notes (1993).



شکل ۲۰. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده.



شکل ۲۱. زاویه‌ی یاء ایجاد شده در اثر عوامل غیرخطی.

چنان‌که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود خط ممتد زاویه‌ی است که از معادلات اصلی حرکت و از اعمال ورودی زیگ‌زاگ به شبیه‌ساز به دست آمده است. خط نقطه‌چین نشانگر نتایج حاصل از اعمال ورودی زیگ‌زاگ به تابع تبدیل حاصل از خطی‌سازی معادلات حرکت است. خط منقطع نیز نشانگر نتایج حاصل از اعمال ورودی زیگ‌زاگ به تابع تبدیل به دست آمده از نرم‌افزار سایفر است. این میزان

3. Yuh, J. "Modeling and control of underwater robotic vehicles", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **20**(6), pp. 1475-1483 (1990).
4. Shi, C., Zhao, D., Peng, J. and Shen, C. "Identification of ship maneuvering model using extended kalman filters", *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, **3**(1), pp.105-110 (2009).
5. Naeem, W., Sutton, R. and Chudley, J. "System identification, modelling and control of an autonomous underwater vehicle", Marine and Industrial Dynamic Analysis Research Group Department of Mechanical and Marine Engineering University of Plymouth, PL4 8AA, UK (2004).
6. Selvam, R.P., Bhattacharyya, S.K. and Haddara, M. "A frequency domain system identification method for linear ship maneuvering", *Int. Shipbuild. Progr.*, **52**(1), pp. 5-27 (2005).
7. Bhattacharyya, S.K. and Haddara, M.R. "Parametric identification for nonlinear ship maneuvering", *Journal of Ship Research*, **50**(3), pp. 197-207 (2006).

8. Banazadeh, A. and Ghorbani, M.T. "Frequency domain identification of the Nomoto model to facilitate Kalman filter estimation and PID heading control of a patrol vessel", *Journal of Ocean Engineering*, **72**, pp. 344-355 (2013).
9. Student version 5.4.00, *Comprehensive Identification from Frequency Responses (CIFER@)*, UARC, Ames Research Center, Downloadable from <http://uarc.ucsc.edu/flight-control/cifer>.
10. Lai, G. and Ziaei, K. "Application of CIFER in a single flexible link manipulator system", Technical Report of University of Waterloo, pp. 1-61 (2003).
11. Lame, M.N. and Banazadeh, A. "Frequency domain identification of friction and backlash for servomechanisms", *Sharif Mechanical Engineering Journal*, **1**(3), pp. 31-40 (2014).
12. Sadeghzade, B., Rahimiyan, M., Sepahband, P. and Seif, M.S. "Design of AUV" **11**, p.68, MIC2009, Iran. Kish.
13. Lambert, J., *Computational Methods in Ordinary Differential Equations*, Cambridge University Press, New York, Wiley (1973).
14. Fossen, T.I., *Guidance and control of ocean vehicles*, John Wiley & Sons, Chichester England (1994).
15. Prestero, T. "Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle", Master's Thesis, University of California at Davis (2001).
16. de Barros, E.A., Pascoal, A. and de SA, E. "Investigation of a method for predicting AUV derivatives", *Ocean Engineering*, **35**, pp. 1627-1636 (2008).
17. Sarkar, T., Sayer, P.G. and Fraser, S.M. "A study of autonomous underwater vehicle hull forms using computational fluid dynamics", *International Journal For Numerical Methods in Fluids*, **25**(11) pp. 1301-1313 (1997).
18. Sadeghzade, B., Mehdigholi, H. and Seif, M.S. "Numerical modeling on AUVS body and evaluation of hydrodynamic forces", **11**, p.73 MIC2009, Iran. Kish.
19. Tischler, M.B. and Remple, R.K. "Aircraft and rotorcraft system identification: Engineering methods with flight test examples (AIAA education series)", American Institute of Aeronautics and astronautics, Inc., Reston, Virginia (2006).