تعیین مشتقات هیدرودینامیکی نیروی اسوی و گشتاور یاو با آزمایش مکانیزم صفحه ای یک زیر سطحی متقارن

فرهود آذرسينا (*، كريستوفر ويليامز ۲

۱– استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده علوم و فنون دریایی ۲– استاد پژوهشی، انجمن ملی تحقیقات کانادا، موسسه فناوری اقیانوسی

چکیدہ

در این تحقیق، دو مجموعه داده حاصل از آزمایشهای پنج فرم بدنه یک زیرسطحی متقارن حول محور طولی به منظور یافتن مشتقات نوسانی نیروی اسوی و گشتاور یاو نسبت به سرعت و شتاب اسویمورد تحلیل قرار گرفت. برای انجام این آزمایش از مکانیزم حرکت صفحه ای (PMM) در حوضچه ۹۰ متری در موسسه فناوری اقیانوسی، موسسه تحقیقات ملی کانادا استفاده شد. نتایج نشان می دهد که مقادیر این مشتقات که از دادههای آزمایش دینامیکی بدست می آیند تا حدی با مقادیر همان مشتقات که از آزمایش استاتیکی بدست می آیند تفاوت دارند. به علاوه، دادههای آزمایش حاصل از مانورهای دینامیکی نشان دهنده آن است که مقادیر مشتقات مذکور هم به فرکانس نوسانات اجباری مدل زیرسطحی و هم به طول مدل بستگی دارند.

Determination of the Hydrodynamic Force and Moment Derivatives for the Axi-Symmetric Bare Hull of an Underwater Vehicle Using the Planar Motion Mechanism

F. Azarsina¹, Ch. Williams²

Assistant Professor, Graduate School of Marine Science and Technology, I.A.U.
 Science & Research Branch, Tehran, Iran
 Research Engineer, National Research Council Canada, Institute for Ocean

Technology, St. John's, NL, Canada

Abstract

In the present research, two sets of data were analyzed for the purpose of obtaining the oscillatory derivatives of the sway force and yaw moment with respect to the sway velocity and sway acceleration. The results of the analysis show that the values of the derivatives which were calculated from the dynamic test data are somewhat different from the values of the same derivatives which were calculated from the static yaw test data. Moreover, the test data from the dynamic manoeuvres show that the values of these derivatives depend both on the frequency of the forced oscillations and hull length.

Keywords: Underwater vehicle, Hydrodynamic derivatives, PMM, dynamic manoeuvres

^{*} نویسنده مسوول مقاله farhoodazi@gmail.com

۱– مقدمه

آزمایش های زاویه دار ثابت^۱، حرکت اسوی خالص^۲ و حرکت یاو خالص^۳ با مجموعه ای از پنج فرم بدنه یک زیرسطحی متقارن حول محور طولی انجام شد. برای انجام این آزمایشات مکانیزم حرکت صفحه ای (PMM) در حوضچه ۹۰ متری در موسسه فناوری اقیانوسی، موسسه تحقیقات ملی کانادا (^{*}NRC-IOT) استفاده شد. نتایج آزمایش ها به طور مبسوط در [۱] گزارش شده اند.

بدنه لخت⁶ زیر سطحی با نام فینیکس دارای طول کامل ۱/۶۴ متر و قطر ۲۰۲۳ متر یعنی نسبت طول به قطر (LDR) حدود ۸/۵ به یک بوده و با افزودن استوانههایی به بخش میانی بدنه مقادیر LDR برابر ۹/۵، ۱۰/۱۰ ۵/۱۰ و ۱۲/۵ نیز ساخته شد.

شکل ۱ به طور شماتیک بدنه مدل را که زیر PMM نصب شده نشان می دهد. دو بازوی² قائم با پروفیل خط جریانی^۲، دستگاه بالانس^۸ که داخل مدل تعبیه شده را به PMM وصل می کنند. هر بازو از سوراخی که در پوسته سطح مدل در قسمت بدنه میانی تعبیه شده می گذرد، بنابراین بین بازوها و مدل هیچ تماسی نیست. فاصله بین سطح آزاد آب حوضچه و سطح نیست. فاصله بین سطح آزاد آب حوضچه و سطح کشت و عمق آب هم ۲/۱۸ متر بود.بنابراین نسبت بین فاصله مدل تا سطح آب به حداکثر قطر مدل ۲۰۳ میلیمتر برابر ۹/۴ و نیز نسبت بین عمق آب به حداکثر قطر مدل برابر ۱۰/۷ بدست میآیند که در نتیجه هیچ گونه اثر سطح آزاد یا کف به نتایج آزمایشها قابل توجه نیست.



شکل ۱- نمای ساده مدل فینیکس از پهلو کاملا مغروق و کاملا آبگرفته که زیر PMM نصب شده

داخل مدل، بخش "زمين "يا "مرده" * بالانس تنها به بازوهای قائم وصل است. بخش "زنده" یا "متریک"`` بالانس به دو بالکهد دایروی در بخش میانی بدنه وصل است. با این شیوه اتصال بالانس سه مولفه ای تنها نیروهای هیدرودینامیکی (نیروی محوری، نیروی اسوی و گشتاور یاو) که از جریان آب به سطح خارجی مدل وارد می شوند را اندازه می گیرد. با توجه به اینکه هیچ یک از بازوها به قسمت زنده بالانس وصل نیست، بنابراین هیچ جریان انتقال نیرو از بازوها به مدل نیز وجود ندارد. فاصله طولی بازوها از یکدیگر ۷۲۳ میلی متر بود. از طرفی با توجه به سوراخ هایی که در سطح بالایی مدل برای عبور بازوها تعبیه شده آب وارد فضاهای خالی داخل مدل می گردد. در تمام آزمایشهای شتابدار با حرکت اسوی فرض می شود که آب داخل مدل مانند یک جرم صلب همراه مدل حرکت می کند و هیچ هوایی در فضای خالی مدل گیر نمی افتد و سطح آزادی درون مدل وجود ندارد که امكان وقوع پديده اسلاشينگ باشد.

جداول ۱ و ۲، جزئیات مربوط به مدل ها را نشان می دهند. هر یک از پنج مدل در حالت خشک (غیر آبگرفته) در هوا آویخته و جرم آن همانطور که در ستون ششم جدول ۱ دیده می شود، اندازه گیری شد [7]. سپس تمام درزهای مدلها با نوار چسب بسته و عایق شد و آب تا حدی که سر ریز کند درون مدل ها پر شد که جرم مدل های آب گرفته در ستون هفتم جدول ۱ دیده می شود. تفاضل این دو مقدار جرم آب داخل مدل را طبق ستون هشتم جدول ۱ ارائه می دهد. دو ستون آخر جدول ۱ ممان اینرسی مدل ها در حالت خشک و آب گرفته را نشان می دهند. برای اندازه گیری این مقادیر، هر مدل از دو سیم بلند موازی از نقاط اتصال هم فاصله از مرکز جرم مدل که روی سطح بالایی بدنه تعبیه گردیدند آویخته شد که در نتيجه یک آونگ دو ریسمانی^{۱۱} بدست آمد. ممان اینرسی مدل با اندازه گیری پریود نوسانات یاو این آونگ قابل محاسبه بوده؛ همچنین شعاع آویز'' مدل در حالت خشک و آبگرفته تا دقت ۲میلی متر قابل تعیین بود.

LDR	حداکثر قطر [mm]	LOA [mm]	CG مدلخشک از دماغه[mm]	CG مدلاًبگرفته از دماغه[mm]	جرم خشک [kg]	جرم آبگرفته [kg]	جرم آب داخل مخزن [kg]	ممان اینرسی خشک [kg.m ²]	ممان اینرسی آبگرفته [kg.m ²]
٨/٥	۲۰۳	1775	٧٣٤	1 E V	۲ ٤/٣	٤٩/٢	۲ ٤/٩	5/05	۸/۸۲
۹/٥	۲۰۳	1977	710	٩٣٩	20/2	00/٣	۲۹/۷	१/११	18/20
1./0	۲۰۳	2120	917	1.04	۳/۷۲	۲/۳۲	۳0/٩	0/22	۱٦/٧٣
11/0	۲۰۳	۲۳۳۳	1.11	1109	۲/۸ ۲	۷۰/۱	٤١/٩	٦/٧٣	21/25
17/0	۲۰۳	2021	1114	1707	۲۹/۸	٧٧/١	٤٧/٣	۸/٣٤	87/87

جدول ۱- جرم و ممان اینرسی پنج مدل از زیرسطحی فینیکس

جدول ۲- ویژگی های پنج مدل که اَزمایش شدند؛ MC مرکز گشتاور است و LCB فاصله طولی مرکز شناوری از دماغه مدل

LDR	LOA [mm]	مرکز گشتاور از دماغه MC [mm]	LCB (دماغه) [mm]	نسبت MC به LOA	نسبت LCB به LOA	سطح خی <i>س</i> شدہ [m ³]	حجم محصور داخل بدنه [m ³]
٨/٥	1885	777	٨١٥	•/٤٢٧	•/٤٧٣	•/90	•/• 5 5
۹/٥	1977	۸۳۸	910	•/٤٣٥	•/٤٧٥	۱/۰۸	./.01
1./0	212.	٩٤.	1.14	•/٤٤١	•/٤٧٧	171	•/• 04
11/0	۲۳۳۳	1.51	114	•/٤٤٦	•/٤٧٩	۱/۳٤	•/•٦٤
17/0	2022	1128	177.	•/٤01	•/٤٨١	1/27	•/•٧•

گشتاور یاو در این مقاله حول محوری که از مرکز شناوری (CB) می گذرد گزارش می شود. جدول ۲ محل مرکز شناوری به صورت فاصله از دماغه (میلیمتر) و نیز به صورت کسری از طول کل مدل را نشان می دهد [۳]. همچنین سطح خیس شده و حجم مدل ها در جدول ۲ دیده می شوند.

بالانس سه مولفه ای که برای اندازه گیری دو نیروی هیدرودینامیکی (محوری و جانبی) و گشتاور هیدرودینامیکی یاو استفاده شد، دارای دو نیروسنج^{۱۲} جانبی و یک نیروسنج محوری است؛ بدین ترتیب مبدا مختصات متصل به مدلکه حرکات مدل و نیروهای هیدرودینامیکی در آن مختصات محاسبه میشوند همانطور که در جدول ۲ ارائه شده، وسط فاصله بین دو نیروسنج جانبی روی محور طولی بدنه متقارن قرار دارد.

کاربرد PMM برای انجام آزمایشهای مانور مهارشده^{۱۴} و نیز روش متداول برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی به کمک نتایج این آزمایشها موضوعی شناخته شده است که اطلاعات مربوطه در مراجعی مانند [۴]، [۵] و [۶] ارائه شدهاند. در تحقیق حاضر،

دو مجموعه داده تحلیل شدند تا مشتقات نیروی اسوی و گشتاور یاو نسبت به سرعت اسوی و شتاب اسوی یعنی به ترتیب Y_v , Y_v , N_v , و $\sqrt[4]{N}$ بدست آیند. نتایج تحلیل نشان میدهد که مقادیر مشتقاتی که از آزمایشهای دینامیکی بدست آمدند تاحدی متفاوت از مقادیر همان مشتقات حاصل از آزمایشهای استاتیکی هستند و نیز نسبت به طول بدنه تغییرات دارند.

تعیین کردن ضرایب هیدرودینامیکی برای وسایل نقلیه دریایی بخش مهمی از مطالعه و مدلسازی مانور آنها میباشد که این مهم در مانورهای ساده مانند حرکت مستقیم رو به جلو به کمک روابط تجربی-تحلیلی امکان پذیر است، اما در مانورهای پیچیده، این ضرایب به پارامترهایی از جمله زاویه حمله بدنه، سرعت دورانی و شتاب بستگی دارند و در نتیجه آزمایش یا روش عددی دینامیک سیالات بکار میروند. در این مقاله، به منظور تعیین ضرایب هیدرودینامیکی یک زیرسطحی با بدنه متقارن، ابتدا تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده معرفی شده و در ادامه نتایج آزمایش و روش محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بدنه خالی زیرسطحی با مرایب هیدرودینامیکی بدنه خالی زیرسطحی با انجمن مهندسی دریایی ایران

نشریه مهنــدسـی د*ریــا* ـ

۲- دادههای آزمایش حرکت اسوی خالص

در یک مانور اسوی خالص، مرکز جرم شناور در یک مسیر سینوسی حرکت داده می شود و در تمام مسیر، محور طولی شناور با جهت حرکت روبه جلوی ارابه کشش موازی است. به عبارتی، در تمام آزمایشهای اسوی خالص، زاویه یاو شناور مقدار ثابت صفر درجه آزمایشهای اسوی خالص اندازه گیری می شوند، از مقادیر آنها در آزمایش یاو خالص بزرگترند. در این مطالعه، هدف از آزمایشهای اسوی خالص اندازه گیری نیروی اسوی و گشتاور یاو به صورت توابعی از سرعت و شتاب اسوی کالص در جدول ۳ ارائه شدهاند.

همانطور که توضیح داده شد، در آزمایشهای اسوی خالص دستگاه مختصات متصل به شناور و دستگاه مختصات حوضچه کشش با یکدیگر موازی هستند: جهات مثبت محورهای X، Y و Z به ترتیب روبه جلو، به سمت راست (استاربورد) و به سمت پایین تعریف میشوند. با فرض آنکه زمان اندازه گیری در لحظهای که مدل از خط وسط حوضچه کشش در جهت مثبت که مدل از خط وسط حوضچه کشش در جهت مثبت MM به صورت زیر تعریف می شوند:

$$v = v_0 \cos(\omega t)$$
 , $y = A \sin(\omega t)$ (1)

که (0) فرکانس مانور و A و v_0 به ترتیب دامنه جابجایی و سرعت اسوی هستند که v_0 برابر $(0 \times A \times 0)$ است.

مشتق گیری از رابطه (۱) شتاب اسوی PMM که همان شتاب مدل است را بدست میدهد:

$$a_{y} = a_{y0}\cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \tag{(Y)}$$

که a_{y0} دامنه شتاب اسوی PMM است که به صورت a_{y0} دامنه شتاب اسوی $A \times \omega^2$ محاسبه می شود. از طرفی، از نتایج آزمایش می توان نتیجه گرفت که نیروی اسوی که به مدل وارد می شود به صورت زیر قابل نوشتن است:

$$F_{y} = F_{y0} \cos(\omega t + \varphi_{F}) \tag{7}$$

که F_{y0} دامنه نیروی اسوی φ_F اختلاف فاز بین سیگنال های اسوی و سرعت اسوی است یعنی فاز سیگنال سرعت اسوی به اندازه φ_F جلوتر از نیروی اسوی است. گشتاور یاو طی آزمایشهای اسوی خالص به شکل زیر بیان می گردد:

$$M_{z} = M_{z0}\sin(\omega t - \varphi_{M}) \tag{6}$$

که M_{z0} دامنه گشتاور یاو و φ_M اختلاف فاز بین سیگنالهای سینوسی گشتاور یاو و سرعت اسوی میباشد. این اختلاف فاز بسیار نزدیک ۱۸۰درجه است و دامنه گشتاور یاو وارد بر مدلهای مذکور حدود ۲۰ تا ۵۰ (نیوتن در متر) ثبت شده است. دادههای آزمایش برای M_{z0} و (۱۸۰ $-\varphi_M$) درجه در جدول ۳ گزارش شدهاند.

سری های زمانی خام حاصل از آزمایش به کمک تابع filtfilt نرم افزار MATLAB[™] فیلتر شد. این تابع از یک باند فرکانس برای فیلتر کردن سیگنال استفاده نمی کند، بلکه مقدار سیگنال در هر لحظه را با میانگین گیری از n نقطه مجاور آن حساب می کند که در این مطالعه n برابر ۲۰ استفاده شد. با توجه به اینکه فیلتر مذکور دادهها را دوبار: یک بار به جلو و یک بار برگشت مذکور دادهها را دوبار: یک بار به جلو و یک بار برگشت به عقب پردازش می کند هیچ جابجایی فاز^{۱۵} در نتایچ وارد نمی شود که این موضوع در تحلیل حاضر از دادهها که توجه ویژه ای به اختلاف فاز میان سیگنال نیروها و حرکات PMM دارد بسیار مفید است.

۳- نمودار صفحه مجازی^۴

آنچنان که در جدول ۳ دیده می شود، سیگنال نیروی اسوی اختلاف فاز φ_F بزرگتر از $\frac{\pi}{2}$ نسبت به سیگنال سرعت دارد. در شکل ۲ سرعت اسوی برداری به سمت راست، شتاب اسوی برداری به سمت بالا و نیروی اسوی برداری در ربع دوم مختصات دیده میشوند. با افزایش زمان، این بردارها در جهت عقربه ساعت می چرخند بنابراین بردار سرعت همواره نسبت به بردار نیرو به اندازه زاویه φ_F جلوتر است.

Run	I DB	a 190[dag]	Mz0 -			o [m/o ²]		() [md/a]	A [m]
No.	LDK	φ_M - 180[deg]	[N.m]	$\varphi_F = 90[\text{deg}]$	Γ _{y0} [IN]	a ₀ [III/S]	v ₀ [III/8]	w [lau/s]	A [III]
ì	٨/٥	11/2	89/1	٤ ٤/٩	117/A	1/.٣	•/07	1/A	•/٣٢
۲	٨/٥	۹/۱	۲۸/۳	٤٦/٣	1.1	•/٨٥	./00	1/08	•/٣٦
٣	٨/٥	۸/۲	۲۷/٤	٤٩/٧	۹۳/۳	•/٧٢	./00	1/51	•/٤٢
٤	٨/٥	٥/١	5.77	०٣/٩	۸۷/۵	•/٦١	•/00	1/1	•/•
٥	٨/٥	٤/٣	87/4	09/5	۹١/٨	•/01	•/0٨	•/٨٩	•/٦٥
٦	٨/٥	_0/*	۱۰/۳	٦٣/٣	۳0/٤	•/15	۰/۳۱	•/٤٤	•/٧
٧	٨/٥	۱/۳	20/9	٦٣/٤	71/1	•/٣٧	•/0٦	•/٦٦	•/٨٥
٨	٨/٥	۱/۰	۲٦/٧	٦ ٤/٦	97/1	•/٣٩	•/٦•	•/٦٦	۰/۹
٩	٨/٥	-1/•	۲ ٤/٩	٦٨	٧٧/٦	• / ٢ ٤	•/00	•/55	1/10
۱.	٩/٥	11/4	35/1	٤٤/٨	175/8	۱/۰۳	•/04	١/٨	•/٣٢
11	٩/٥	٩/٥	52/2	٤٦/٤	111/4	•/٨٥	•/00	1/08	•/٣٦
۲۱	٩/٥	٦/٤	۳١/٥	٤٩/٤	۱۰۰/۹	•/٧٢	./00	١/٣١	•/٤٢
١٣	٩/٥	٦/٨	۳./۲	٥٣/٢	98/2	•/٦١	./00	1/1	•/0
١٤	٩/٥	٤/٧	۳./٦	٥٨	٩٨/٢	•/01	•/01	•/٨٩	•/٦٥
10	٩/٥	1/1	۱۸/۳	7775	89/9	•/\ ٤	۰/۳۱	•/٤٤	۰/۲
١٦	٩/٥	۲/٤	۲۹/۸	٦٢/٩	97/0	•/٣٧	•/0٦	•/٦٦	•/٨٥
11	٩/٥	١/٤	۳۰/۹	٦٣/٦	99/9	•/٣٩	•/٦•	۰/٦٦	•/٩
١٨	٩/٥	•/0	۲۹/۷	٦٧/٤	۹۱/۲	• / ٢ ٤	./00	•/55	1/10
١٩	۱۰/۵	٦/٥	۳۸/۸	٤٢/٢	187/9	1/.٣	•/04	١/٨	•/٣٢
۲.	۱۰/۰	٤/٦	37/1	٤٢/٨	170/1	•//\0	•/00	1/08	•/٣٦
۲۱	۱۰/٥	٣/٩	۳0/٨	٤٦/٨	١١٢	•/٧٢	./00	١/٣١	•/٤٢
22	۱۰/٥	٣/٢	٣٤/٣	01/1	1.7/0	•/٦١	•/00	1/1	•/0
۲۳	۱./٥	۲/۱	۳0/۲	٥٧/٥	1.7/0	•/01	•/0٨	۰/۸۹	•/٦٥
۲٤	۱۰/٥	_۲/۱	۲./۷	٦٢/٧	57/7	•/\£	۰/۳۱	•/55	۰/۷
۲٥	۱۰/٥	۲/۱	٣٤/٦	٦١/٤	1.7/5	•/٣٧	•/0٦	•/٦٦	•/٨٥
۲٦	۱۰/۰	١/٧	50/9	٦./٣	۱۰۸/٦	٠/٣٩	•/٦•	٠/٦٦	۰/۹
۲۷	۱۰/۰	_•/٣	۳۳/٤	٦٥	۹0/۱	•/٢٤	./00	•/22	1/50
۲۸	11/0	٣/٥	٤٢/٧	٤ • /٧	۱٤٨/٩	۱/۰۳	•/04	١/٨	•/٣٢
۲۹	11/0	٣/٨	٤٢	٤٢/٧	187/2	•//\0	./00	1/08	•/٣٦
۳.	11/0	٤/٤	٤ • /٧	٤0/٩	119/2	•/٧٢	./00	١/٣١	•/£٢
۳۱	11/0	٣/٤	٣٨/٤	٥٢	111/٣	٠/٦١	./00	1/1	•/0
٣٢	11/0	۲/۵	٤٠/١	٥٦/٧	117/2	•/01	•/0٨	۰/۸۹	•/٦٥
۳۳	11/0	•/1	۲ ٤/٢	٦١/٧	٤٤/٤	•/\ź	۰/۳۱	•/٤٤	۰/۷
٣٤	11/0	_•/٣	٣٩/١	٦./٢	۱۰٤/۱	•/٣٧	•/0٦	۰/٦٦	•/٨٥
۳٥	11/0	_۲/۱	٤١	٥٨/٧	117/2	۰/۳۹	۰/٦٠	۰/٦٦	۰/۹
٣٦	11/0	-7/1	۳۸	٦٧/٤	۹۹/۱	۰/۲ ٤	./00	•/٤٤	1/70
٣٧	17/0	1/9	٤0/٥	٤٠/٨	١٤٤/٨	•/٨٥	./00	1/07	•/٣٦
۳۸	17/0	•/٨	20	٤٢/٨	15.	• / ٧ ٩	./00	١/٣١	٠/٤٢
۳۹	17/0	۲/۸	٤٣	0./0	117/1	٠/٦١	./00	1/1	•/•
٤٠	17/0	1/0	٤٤/٨	00/17	114	•/01	•/01	٠/٨٩	•/٦٥
٤١	17/0	١/٠	۲٦/٤	09/٣	٤٤/٢	•/\ ٤	۰/۳۱	٠/٤٤	۰/۷
٤٢	17/0	•/1	٤٥/٦	٥٨/٢	171/5	•/٣٧	•/0٦	۰/٦٦	•/٨٥
٤٣	17/0	•/٣	٤٥/٦	09/1	114/5	٠/٣٩	۰/٦٠	۰/٦٦	۰/٩
٤٤	17/0	-1/V	, ٤٣/١	75/1	1.7/1	۰/۲ ٤	./00	•/٤٤	1/70
L		, .	/ .	/ -					

جدول ٣- نتايج أزمايش اسوى خالص براى پنج بدنه زيرسطحى؛ سرعت كشش ٢ متر بر ثانيه





اگر بردار نیرو در شکل ۲ در راستای محورهای حقیقی و مجازی تصویر گردد به ترتیب : (الف) مولفه نیروی میرایی*F_{y,d}که هم راستا با بردار سرعت اما خلاف جهت آن است؛ و (ب) مولفه نیروی اینرسی <i>F_{y,i} ک*ه هم جهت با بردار شتاب است بدست می آیند. آنچنان که در شکل ۲ دیده می شود، دامنه مولفههای میرایی و اینرسی بردار نیروی اسوی به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$F_{y,d} = -F_{y0}\sin(\varphi_F - \frac{\pi}{2}) \tag{(a)}$$

$$F_{y,i} = F_{y0} \cos(\varphi_F - \frac{\pi}{2}) \tag{(8)}$$

با توجه به داده های آزمایش در جدول ۳، با افزایش فرکانس: (الف) اندازه نیروی اسوی زیاد میشود،(ب) اختلاف فاز φ_F کاهش می یابد، که هر دو مورد باعث میشوند مولفه اینرسی نیروی اسوی بزرگتر شود [۲].

+ مشتقات Y_{v} و N_{v} حاصل از آزمایشهای - (ویهدار ثابت

U در آزمایش زاویه دار ثابت سرعت کشش ارابه U سرعت کل مدل است، بنابراین سرعت اسوی مدل عبارت است از:

$$v = -U\sin\beta \tag{Y}$$

که β زاویه دریفت است؛ یعنی بتا زاویه بین محور طولی مدل و راستای کشش در طی آزمایش زاویه دار ثابت می باشد. بنابراین، شیب منحنی نیروی اسوی و گشتاور یاو نسبت به زاویه دریفت مقادیر مشتقات Y_v گستاور یاو نسبت به زاویه دریفت مقادیر مشتقات V_v مدل بدنه لخت زیر سطحی فینیکس با LDR برابر ۵/۸ مدل بدنه لخت زیر سطحی فینیکس با NM/(m/s) عبارتند از:(N/(m/s) و $Y_v = 1.00$ (m/s) میس عبارتند از: $N_v = 1.00$ (شکلهای ۲-۱۱ و ۲-۱۱ در [1]). سپس ضرایب هیدرودینامیکی بی بعد برای بدنه به طول کل ضرایب هیدرودینامیکی بی بعد برای بدنه به طول کل نظرایب هیدرودینامیکی بی بعد برای بدنه به طول کل نظرایب هیدرودینامیکی بی بعد برای بدنه به طول کل کشتاور بر 20/01 (جدول ۱) و سرعت کششs/ یقسیم مشتق تقسیم مشتق نیرو بر 20/01 و تقسیم مشتق بعد عبارتند از: ۰/۰۰۰ = $V_v = 0.00$. مقدار بعد عبارتند از: ۷۳۰/۰ = $V_v = 0.00$. مقدار منفی برای ضریب گشتاور بدان معناست که اثر سینه زیرسطحی غالب است.

به همین ترتیب برای همه پنج بدنه با نسبت طول به قطرهای ۸/۵ تا ۱۲/۵ مشتقات نیرو و گشتاور بدون بعد از نتایج آزمایشهای زاویه دار ثابت به صورت زیر حساب می شوند:

 $Y'_{\nu} = -[0.037, 0.029, 0.024, 0.02, 0.017]$ (A)

 $N'_{\nu} = -10^{-3} \times [11, 8.1, 6.0, 4.5, 3.5]$ (9)

۵- مشتقات نیروی اسوی نسبت به سرعت و شتاب با استفاده از داده های آزمایش اسوی خالص

برای آنکه ضرایب اسوی از نتایج آزمایش اسوی خالص محاسبه شوند، نیروهای اسوی که توسط نیروسنج های عقب و جلو در راستای جانبی ثبت میشوند را به ترتیب F₁ و F₂ مینامیم و هر یک را به مولفه های هم فاز^{۱۷} و خارج از فاز^{۱۸} نسبت به سیگنال جابجایی اسوی (y(t) تجزیه میکنیم. سپس نتیجه میشود:

 $F_{in} = F_{1,in} + F_{2,in}$ $F_{out} = F_{1,out} + F_{2,out}$ (۱۰) دامنه نیروهای هم فاز و خارج از فاز با توجه به نمودار شکل ۲ به ترتیب برابرند با نیروی اینرسی و نیروی میرایی، یعنی:



که φ_F زاویه ای است که سرعت اسوی PMM جلوتر از نیروی اسوی است. سپس مشتقات نوسانی نیروی اسوی نسبت به شتاب

اسوی و سرعت اسوی به ترتیب به شکل زیر تعریف میشوند [8]:

$$Y_{\dot{v}} = m - (|F_{in}| / a_{y0})$$
(17)

$$Y_{v} = -\left|F_{out}\right| / v_{0} \tag{17}$$

که با توجه به توضیحات بخش های قبل، دامنه سرعت و شتاب اسوی PMM در طی یک مانور اسوی خالص برابرند با $w = A \times \omega^2$ و $m = a_{y0} = A \times \omega^2$ و m جرم مدل در حالت آبگرفته، همانطور که در جدول ۱ تعریف شد، است.

اگر روابط (۱۲) و (۱۳) در فرکانس حرکت اسوی ضرب شوند، آنگاه ضرایب هیدرودینامیکی اسوی به شکل زیر محاسبه می گردند:

$$(|F_{in}|/A)^{0.5}$$
 شيب منحنى $(m-Y_{i})^{0.5}$ (۱۴)

که نسبت به فرکانس رسم شده مانند شکل ۳ . (۱۵) $F_{out} = M_{v}$ منحنی $F_{out} | A$ که نسبت به فرکانس رسم شده مانند شکل ۳.

این روش توسط وان لویون (۱۹۶۴) برای مدل یک شناور سطحی ارائه گردید [۸]. شکل ۳ همانطور که در رابطه (۱۴) بیان شده است با استفاده از دادههای آزمایش اسوی خالص در جدول ۳ برای پنج بدنه زیرسطحی رسم شده است و خطوطی هم به دادههای آزمایش چسبانده^{۱۹} شده اند. شیب خطوط مذکور برای بدنه های بلندتر مقدار بزرگتری دارد.



شکل ۳- نمودار براساس رابطه (۱٤) برای یافتن مشتق نیروی اسوی نسبت به شتاب اسوی

سپس، اگر طرفین رابطه (۱۴) را جابجا و شیب خطوط در شکل ۳ و نیز جرم آبگرفته بدنه ها از جدول ۱ را جاگذاری کنیم، آنگاه مشتق نیروی اسوی Y_{i} برای پنج $\frac{1}{2} \rho I^{3}$ بدنه حساب می شود. اگر مقادیر بدست آمده بر $I_{0} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$ تقسیم شوند، مشتق بی بعد نیروی اسوی نسبت به شتاب اسوی برای بدنه ها با LDR ۵/۸ تا ۱۲/۵ به صورت زیر بدست می آیند:

$$Y'_{v} = -10^{-3} \times [6.9, 4.5, 4.6, 4.0, 3.4]$$
 (19)

به علاوه ، جرم های بدون بعد بدنه های لخت زیرسطحی ها با LDR تا ۱۲/۵ از تقسیم جرم های آبگرفته در جدول ۱ ستون هفتم، بر $\frac{1}{2}
ho l^3$ به ترتیب عبارتند از:

 $m' = 10^{-3} \times [19.2, 15.4, 13.1, 11, 9.4]$ (1Y)

بنابراین می توان نتیجه گرفت که بدنه لخت یک زیرسطحی باریک^{۲۰} طی مانور شتاب دار جانبی دارای مشتق نیروی اسوی نسبت به شتاب به بزرگی حدود یک سوم جرم بدون بعد خودش هست. در حقیقت، Y_i همان جرم افزوده^{۲۱} بدون بعد زیر سطحی با یک علامت منفی است.



شکل ٤- نمودار براساس رابطه (۱۵) برای یافتن مشتق نیروی اسوی نسبت به سرعت اسوی

شکل ۴، همانطور که در رابطه (۱۵) تشریح شده، برای Y_v بدست آوردن مشتق نیروی اسوی نسبت به سرعت Y_v بدست آمده بر $\frac{1}{2}\rho Ul^2$. رسم می شود. سپس مشتق بدست آمده بر $\frac{1}{2}\rho Ul^2$ ، در سرعت کشش U=2 m/s در سرعت کشش آزمایش ها، تقسیم می شود تا مشتق بی بعد نیروی اسوی نسبت به سرعت اسوی برای پنج بدنه با LDA ۵/۸ تا ۱۲/۸ تا ۱۲/۸ به صورت زیر تعیین شوند:

 $Y'_{\nu} = -[0.046, 0.042, 0.035, 0.031, 0.028]_{(\lambda\lambda)}$

در مقایسه با مقادیر بدست آمده از رابطه (۸) که قبلا از نتایج آزمایش زاویه دار ثابت محاسبه شدند، مقادیر حاصل در رابطه (۱۸) گرچه تطابق تقریبی دارند، نشان دهنده آن است که مشتق نیروی اسوی نسبت به سرعت طی یک آزمایش دینامیکی، یعنی اسوی خالص، بزرگتر از آزمایشهای استاتیکی، یعنی زاویه دار ثابت، هستند. این مشاهده ممکن است روایی^{۲۲} محاسبه Y_v از آزمایش زاویه دار ثابت (که روش متداول است) را مورد تردید قرار دهد.

طی آزمایش زاویه دار ثابت، اگر چه زاویه یاو مدل ثابت است، جریان آب از روی بدنه می تواند پدیده های جدایش جریان^{۲۲} و کنده شدن گردابه^{۲۴} را به نمایش گذارد، بنابراین این نوع جریان نیمه پایا^{۲۵} لحاظ می شود. در مرجع [۹] نشان داده شده است که

اختلاف عمده ای میان بارهای دینامیکی که طی یک آزمایش زاویه دار ثابت (شرایط جریان نیمه پایا) و طی یک مانور دینامیکی (شرایط جریان ناپایا^{۲۶}) وجود دارد. در شرایط جریان نیمه پایا بارهای ایرودینامیکی (یا هیدرودینامیکی) که به یک جسم متقارن حول محور در حالت مایل وارد می گردند تنها وابسته به وضعیت لحظه ای جسم (مثلا سرعت جریان، زاویه حمله، زاویه لغزش پهلویی^{۲۲}، زوایای صفحات کنترلی نسبت به بدنه و غیره) هستند و در نتیجه مشتق پایداری^{۸۸} (یا ضریب هیدرودینامیکی) متناظر با بارهای مذکور برای توصیف تابعیت مقدار بارگذاری از وضعیت لحظه ای جسم کفایت می کند.

بر خلاف شرایط بالا، هنگام یک مانور دینامیکی اغلب اختلاف زمانی قابل توجهی میان موقعیت لحظه ای مدل و بارهای هیدرودینامیکی لحظه ای وجود دارد و این اختلاف زمانی توسط روشهای سنتی، که شامل ویژگیهای تابع زمان متغیرهای حالت نیستند، قابل پیش بینی نمی باشد. به عنوان مثال در [۹] نشان داد شده است که برای اجسام متقارن حول محور اصلی اختلاف زمانی قابل توجهی میان رخداد جدایش جریان در شرایط آزمایش نیمه پایا و ناپایا وجود دارد. نویسندگان[۹] چنان اختلاف زمانی را به افزایش چرخش متصل^{۲۹}روی سطح مدل نسبت میدهند که منجر به جلو افتادن زمانی بارگذاری حالت ناپایا نسبت به بارگذاری نیمه پایا می گردد.

۶- مشتقات گشتاور یاو نسبت به سرعت و شتاب با استفاده از داده های آزمایش اسوی خالص

مانند روندی که برای نیرو اسوی انجام شد، مشتقات گشتاور یاونیز به شکل زیر محاسبه می شوند:

$$\widetilde{N}_{v} = G_{in} / a_0, \quad \widetilde{N}_{v} = -G_{out} / v_0 \tag{19}$$

$$G_{in} = -M_{z0} \sin(\varphi_M - \pi),$$

$$G_{out} = M_{z0} \cos(\varphi_M - \pi)$$
(Y ·)

با استفاده از روابط (۱۹) و (۲۰) مشتقات گشتاور یاو (که در فضا دریا^{۳۰} ضرایب نوسانی نیز نامیده میشوند [۶]) محاسبه میشوند و سپس با تقسیم

Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-06



شکل ۵- مشتق بدون بعد گشتاور یاو نسبت به شتاب اسوی طی آزمایش های اسوی خالص

در شکل ۵ دیده میشود که مشتق گشتاور یاو نسبت به شتاب اسوی هنگام مانور اسوی خالص، مقدار بدون بعد N'_{v} نزدیک به صفر دارد که با افزایش فرکانس مانور بالاتر از ۰/۶ (rad/s) مقدار آن منفی می شود. یک منحنی سینوسی به صورت زیر:

$$N'_{\psi} = \mathbf{a} \cdot \sin(\mathbf{b}\omega + \mathbf{c}) \tag{71}$$
$$= 0.6 \times 10^{-3} \sin(1.9\omega + 8.26)$$

از میان کل دادههای آزمایش در شکل ۵ عبور داده شده که عرض از مبدا آن در فرکانس صفر برابر شده که عرض از مبدا آن در فرکانس صفر برابر نیز مقدار $N'_{\nu} \approx 0.5 \times 10^{-3}$ نیز مقدار N'_{ν} برابر ^۳ ۱۰^{-۳} با تغییرات مشابه شکل ۵ نسبت به فرکانس گزارش شد [۸] (شکل ۹ (ب) در مرجع [۶] را ببینید).

مشتق گشتاور یاو نسبت به سرعت اسوی خالص مهمتر از مشتق شتاب گشتاور یاو است. طبق شکل ۶ داده های آزمایش حول یک مقدار متوسط ثابت که خطی پر برای هر LDR است جمع شده اند. مشاهده می شود که برای بدنه بلندتر مشتق بدون بعد N'_{ν} مقدار کوچکتری دارد. اگر مقدار متوسط ثابت به

فرکانس صفر ادامه پیدا کند، آنگاه برای پنج بدنه با ۸/۵ LDR تا ۱۲/۵ داریم:

$$N'_{y} = -10^{-3} \times [9.3, 7.7, 6.6, 5.7, 4.9]$$
 (YY)

در مقایسه با مقادیر حاصل از رابطه (۹) که قبلتر بدست آمدند، مقادیر حاصل در رابطه (۲۲) نشان میدهد که مشتق گشتاور یاو نسبت به سرعت اسوی طی یک آزمایش دینامیکی تا حدی با آزمایش استاتیکی تفاوت دارند.



شکل ٦- مشتق بدون بعد گشتاور یاو نسبت به سرعت اسوی طی آزمایش های اسوی خالص

۷− ترسیم مشتقات نسبت به LDR

اگر داده های روابط (۸) و (۱۸) که به ترتیب نتایج آزمایش های دینامیکی و استاتیکی برای مشتق بدون بعد نیروی اسوی نسبت به سرعت اسوی پنج بدنه لخت با LDR ۵/۵ تا ۲/۵۱بودند، نسبت به LDR در یک نمودار رسم شوند، دو منحنی شکل ۷ بدست میآیند. به همین ترتیب، اگر داده های روابط (۹) و (۲۲) که به ترتیب نتایج آزمایش های دینامیکی و استاتیکی برای مشتق بدون بعد گشتاور یاو نسبت به سرعت اسوی بودند، نسبت به LDR در یک نمودار رسم شوند، دو منحنی شکل ۸ بدست میآیند. خطوطی که در شکل ۷ به نتایج آزمایش استاتیکی و

 $Y'_{v} _{t} fit _{static} = 0.005 \times LDR - 0.077$ (TT)

نشریه مہنــدسـی دریـ

(۲۴)

$$Y'_{v} = fit = dynamic = 0.005 \times LDR - 0.086$$

و خطوط شکل ۸ برای نتایج آزمایش استاتیکیو دینامیکی به ترتیب عبارتند از:

 $N'_{v} fit static = 0.002 \times LDR - 0.026$ (Ya)

$$N'_{v} = fit = dynamic = 0.001 \times LDR - 0.018$$
 (YF)



شکل ۷- مشتق بدون بعد نیروی اسوی نسبت به سرعت اسوی Y_{ν}' بر اساس LDR رسم شده





مسلماً، خطوطی که در شکلهای ۷ و ۸ به دادههای آزمایش نسبت داده شدهاند. در بازه LDR تا ۱۲/۵ تا درست هستند و نباید برای برون یابی بیرون از این بازه استفاده شوند. همچنین لازم به توجه است که شیب خطوط مثبت است، اما در واقع برای یک بدنه باریک تر

(نسبت طول به قطر بزرگتر) بزرگی (قدر مطلق) مشتقات کوچکتر است. نهایتاً، باید توجه شود که فرکانس مانورها بر دامنه و فاز نیروی اسوی و گشتاور یاو طی آزمایشهای اسوی خالص اثر دارد.

۸- جمع بندی و نتیجه گیری

پس از تحلیل دادههای آزمایش برای مانورهای اسوی خالص با کمک PMM برای بدنههای لخت یک زیرسطحی مشاهدات زیر انجام شد:

-1 آزمایش های زاویه دار ثابت به طور متداول برای تعیین مشتقات هیدرودینامیکی نیروی اسوی و گشتور یاو نسبت به سرعت اسوی استفاده می شوند؛ مقادیر Y_v و N_v برای بدنههای لخت با نسبت طول به قطر (LDR) Λ/Λ تا Λ/Λ گزارش شدند.

۲- نتایج آزمایش های اسوی خالص برای تعیین مشتقات هیدرودینامیکی نیروی اسوی و گشتور یاو نسبت به سرعت اسوی و شتاب اسوی مفید هستند؛ در این مقاله، مقادیر Y_v و N_v برای بدنه های لخت با ۸/۵ LDR تا ۸/۵ ۲۵زارش شدند.

۳- مشاهده شد که مقادیر مشتقات هیدرودینامیکی براساس دادههای آزمایش دینامیکی با مقادیر همان مشتقات حاصل از دادههای آزمایش استاتیکی یکسان نیستند.

کليد واژگان

1-Static yaw در این حالت مدل با یک زاویه یاو ثابت بسته و در طول حوضچه کشیده می شود.

2-Pure sway در این حالت مدل در حال کشیده شده در طول حرکت جانبی هم دارد .

3-Pure yaw

در این حالت مدل در مسیر زیگزاگ همواره مماس بر مسیر کشیده می شود.

4- National Research Council- Institute for Ocean Technology
5- Bare hull
6- Struts
7- Streamilned

- ⁷- Sucamine ⁹ balance
- 8- balance

شیب منحنی گشتاور یاو نسبت به شتاب اسوی در مبدا $N_{artheta}$

مختصات β زاویه دریفت مدل^{۳۱}

[kg/m³]چگالی آبho

PMM فرکانس حرکت اسوی PMM

اختلاف فاز بین سیگنال های نیروی اسوی سینوسی و سرعت $arphi_F$

اسوى سينوسى

 $arphi_{M}$ اختلاف فاز بین سیگنال های گشتاور یاو نیروی اسوی سینوسی و سرعت اسوی سینوسی

۹- مراجع

1-Azarsina, F., "Experimental Hydrodynamics and Simulation of Manoeuvring of an Axisymmetric Underwater Vehicle," PhD thesis, Memorial University, April 2009.

2-Hewitt, G. and Waterman, E., "*Phoenix* Model Measurement and Bifilar Swinging," NRC-IOT Report SR-2005-29, December 2005.

3-Williams, C.D., Curtis, T.L., Doucet, J.M., Issac, M.T. and Azarsina, F., "Effects of Hull Length on the Manoeuvring Characteristics of a Slender Underwater Vehicle," OCEANS'06 MTS/IEEE-Boston Conference, September 18 to 21, 2006.

4-Principles of Naval Architecture, Comstock, J.P. (ed), 1967, Chapter VIII Ship Maneuvering and Control, SNAME, 5th reprint 1980.

5-Goodman, A., "Experimental techniques and methods of analysis used in submerged body research," Proc. 3rd Symposium on Naval Hydrodynamics, September 19 to 22, 1960, Scheveningen, The Netherlands.

6-Bishop, R.E.D., and Parkinson, A.G., "On the Planar Motion Mechanism used in Ship Model Testing," Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, Volume 266, Issue 1171, pp. 35-61, 1970.

7-Azarsina, F., Williams, C.D., and Issac, M.T, "Modelling the Hydrodynamic Sway Force Exerted on the Bare-Hull of an Axisymmetric Underwater Vehicle in Lateral Acceleration Manoeuvres," OCEANS'08 MTS/IEEE, Quebec City, September 15 to 18, 2008.

8-Van Leeuwen, G., "The Lateral Damping and Added Mass of an Oscillating 9- Ground / Dead

- 10- Live / metric
- 11-Bifilar pendulum
- 12- Radius of gyration
- 13-Loadcell
- 14- Captive Manoeuvring tests
- 15- Phase shift
- 16- Imaginary plane
- 17- In-phase
- 18- Out-of-phase
- 19- Curve fit
- 20- Slender
- 21- Added mass
- 22- Validity
- 23- Flow-separation
- 24- Vortex-shedding
- 25- Quasi-steady
- 26-Unsteady flow
- 27-Sideslip angle 28-Stability-derivative
- 29- Attached circulation
- 30-Aeronatics
- 31-Drift

در اینجا یعنی زاویه برخورد میان جریان آب و مدل

	علائم
دامنه حرکت جانبی (اسوی)[m]	Α
مرکز شناوری	CB
مرکز جرم	CG
نسبت طول به قطر	LDR
طول کل مدل[m]	LOA یا <i>l</i>
مکانیزم حرکت صفحه ای	PMM
شتاب اسوی (جانبی)[m/s ²]	a_y
نیروی اسوی[N]	F_y, Y
گشتاور ياو[N.m]	M_z, N
جرم مدل با احتساب آبگرفتگی[kg]	m
سرعت ارابه کشش[m/s]	U
سرعت اسوی [m/s]	v
جابجایی اسوی مدل[m]	y(t)
نیروی اسوی بدون ب ع د	Y'
گشتاور ياو بدون بعد	N'
نحنی نیروی اسوی نسبت به سرعت اسوی در مبدا	شيب م $Y_{_{\!$
	مختصات
منحنی گشتاور یاو نسبت به سرعت اسوی در مبدا	شيب $N_{_{V}}$
	مختصات
نحنی نیروی اسوی نسبت به شتاب اسوی در مبدا	شيب م $Y_{\dot{v}}$

مختصات

Flow Separation on a Maneuvering Axisymmetric Body", Journal of Aircraft, vol. 44, no. 4, July-August 2007.

Shipmodel", 1964 Publ. Shipbuilding Lab. Univ. Tech. Delft. No. 23.

9-Hosder, S. and Simpson, R.L., "Experimental Investigation of Unsteady