

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

فرهود آذرسینا<sup>۱\*</sup>، کریستوفر ویلیامز<sup>۲</sup>

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

### چکیده

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 مکانیزیم حرکت صفحه ای (PMM) در حوضچه ۹۰ متری در موسسه فناوری اقیانوسی، موسسه تحقیقات ملی کانادا استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر این مشتقات که از داده‌های آزمایش دینامیکی بدست می‌آیند تا حدی با مقادیر همان مشتقات که از آزمایش استاتیکی بدست می‌آیند 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.

کلمات کلیدی: زیرسطحی، مشتقات هیدرودینامیکی، مکانیزیم حرکت صفحه ای، مانورهای دینامیکی

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

F. Azarsina<sup>1</sup>, Ch. Williams<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Graduate School of Marine Science and Technology, I.A.U. Science & Research Branch, Tehran, Iran

2- 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

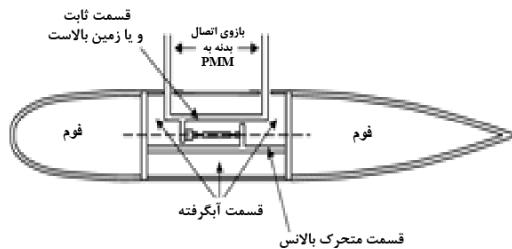
\*نویسنده مسؤول مقاله farhoodazi@gmail.com

## ۱- مقدمه

آزمایش‌های زاویه‌دار ثابت<sup>۱</sup>، حرکت اسوی خالص<sup>۲</sup> و حرکت یاو خالص<sup>۳</sup> با مجموعه‌ای از پنج فرم بدنی یک زیرسطحی متقارن حول محور طولی انجام شد. برای انجام این آزمایشات مکانیزم حرکت صفحه‌ای (PMM) در حوضچه ۹۰ متری در موسسه فناوری اقیانوسی، موسسه تحقیقات ملی کانادا (NRC-IOT<sup>۴</sup>) استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها به طور مبسوط در [۱] گزارش شده‌اند.

بدنه لخت<sup>۵</sup> زیر سطحی با نام فینیکس دارای طول کامل ۱/۶۴ متر و قطر ۳/۲۰ متر یعنی نسبت طول به قطر (LDR) حدود ۸/۵ به یک بوده و با افزودن استوانه‌هایی به بخش میانی بدن مقدادر LDR برابر ۱۱/۵، ۱۰/۵، ۹/۵ و ۱۲/۵ نیز ساخته شد.

شکل ۱ به طور شماتیک بدن مدل را که زیر PMM نصب شده نشان می‌دهد. دو بازوی<sup>۶</sup> قائم با پروفیل خط جریانی<sup>۷</sup>، دستگاه بالانس<sup>۸</sup> که داخل مدل تعییه شده را به PMM وصل می‌کنند. هر بازو از سوراخی که در پوسته سطح مدل در قسمت بدن میانی تعییه شده می‌گذرد، بنابراین بین بازوها و مدل هیچ تماسی نیست. فاصله بین سطح آزاد آب حوضچه و سطح بالایی مدل در تمام آزمایشها به اندازه ۱/۰۹ متر تنظیم گشت و عمق آب هم ۲/۱۸ متر بود. بنابراین نسبت بین ۲۰۳ فاصله مدل تا سطح آب به حداقل قطر مدل ۵/۴ میلیمتر برابر ۱۰/۷ بود. نیز نسبت بین عمق آب به حداقل قطر مدل برابر ۱۰/۷ بودست می‌آیند که در نتیجه هیچ‌گونه اثر سطح آزاد یا کف به نتایج آزمایش‌ها قابل توجه نیست.



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

داخل مدل، بخش "رمین" یا "مرده"<sup>۹</sup> بالانس تنها به بازوی‌های قائم وصل است. بخش "زنده" یا "متریک"<sup>۱۰</sup> بالانس به دو بالکهد دایروی در بخش میانی بدن وصل است. با این شیوه اتصال بالانس سه مولفه‌ای تنها نیروهای هیدرودینامیکی (نیروی محوری، نیروی اسوی و گشتاور یا و) که از جریان آب به سطح خارجی مدل وارد می‌شوند را اندازه می‌گیرد. 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 سوراخ‌هایی که در سطح بالایی مدل برای عبور بازوها تعییه شده آب وارد فضاهای خالی داخل مدل می‌گردد. در تمام آزمایش‌های شتابدار با حرکت اسوی فرض می‌شود که آب داخل مدل مانند یک جرم صلب همراه مدل حرکت می‌کند و هیچ هوایی در فضای خالی مدل گیر نمی‌افتد و سطح آزادی درون مدل وجود ندارد که امکان وقوع پدیده اسلامشینگ باشد.

جداول ۱ و ۲، جزئیات مربوط به مدل‌ها را نشان می‌دهند. هر یک از پنج مدل در حالت خشک (غیر آبگرفته) در هوا آویخته و جرم آن همانطور که در ستون ششم جدول ۱ دیده می‌شود، اندازه گیری شد [۲]. سپس تمام درزهای مدل‌ها با نوار چسب بسته و عایق شد و آب تا حدی که سر ریز کند درون مدل‌ها پر شد که جرم مدل‌های آب گرفته در ستون هفتم جدول ۱ دیده می‌شود. تفاضل این دو مقدار جرم آب داخل مدل را طبق ستون هشتم جدول ۱ ارائه می‌دهد. دو ستون آخر جدول ۱ ممان اینرسی مدل‌ها در حالت خشک و آب گرفته را نشان می‌دهند. 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 بدن تعییه گردیدند آویخته شد که در نتیجه یک آونگ دو ریسمانی<sup>۱۱</sup> بdst آمد. ممان اینرسی مدل با اندازه گیری پریود نوسانات یا این آونگ قابل محاسبه بوده؛ همچنین شاعع آویز<sup>۱۲</sup> مدل در حالت خشک و آبگرفته تا دقت ۲ میلی متر قابل تعیین بود.

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

LDR	حداکثر قطر [mm]	LOA [mm]	حداکثر از CG دماغه [mm]	CG دماغه از [mm]	CG مدلابگرفته از دماغه [mm]	مدلابگرفته از دماغه [kg]	جرم خشک [kg]	جرم آب داخل مخزن [kg]	مان اینرسی خشک [kg.m <sup>2</sup> ]	مان اینرسی آبگرفته [kg.m <sup>2</sup> ]
۸/۵	۲۰۳	۱۷۲۴	۷۳۶	۸۴۷	۲۴/۳	۴۹/۲	۲۴/۹	۳/۰۲	۸/۸۲	
۹/۵	۲۰۳	۱۹۲۷	۸۱۵	۹۳۹	۲۵/۶	۵۵/۳	۲۹/۷	۴/۴۹	۱۲/۲۵	
۱۰/۵	۲۰۳	۲۱۳۰	۹۱۲	۱۰۰۷	۲۷/۳	۶۳/۲	۳۵/۹	۵/۴۴	۱۶/۷۳	
۱۱/۵	۲۰۳	۲۳۳۳	۱۰۱۱	۱۱۰۹	۲۸/۲	۷۰/۱	۴۱/۹	۶/۷۳	۲۱/۸۴	
۱۲/۵	۲۰۳	۲۵۳۶	۱۱۱۸	۱۲۰۶	۲۹/۸	۷۷/۱	۴۷/۳	۸/۳۴	۳۲/۳۶	

### جدول ۲- ویژگی های پنج مدل که آزمایش 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	LCB LOA به	نسبت سطح خیس شده [m <sup>3</sup> ]	حجم محصور داخل بدن [m <sup>3</sup> ]
۸/۵	۱۷۲۴	۷۳۶	۸۱۵	۰/۴۲۷	۰/۴۷۳	۰/۹۵	۰/۰۴۴
۹/۵	۱۹۲۷	۸۳۸	۹۱۵	۰/۴۳۵	۰/۴۷۵	۱/۰۸	۰/۰۵۱
۱۰/۵	۲۱۳۰	۹۴۰	۱۰۱۷	۰/۴۴۱	۰/۴۷۷	۱/۲۱	۰/۰۵۷
۱۱/۵	۲۳۳۳	۱۰۴۱	۱۱۸	۰/۴۴۶	۰/۴۷۹	۱/۳۴	۰/۰۶۴
۱۲/۵	۲۵۳۶	۱۱۴۳	۱۲۲۰	۰/۴۵۱	۰/۴۸۱	۱/۴۷	۰/۰۷۰

دو مجموعه داده تحلیل شدند تا مشتقات نیروی اسوی و گشتاور یا و نسبت به سرعت اسوی و شتاب اسوی یعنی به ترتیب  $Y_v$ ,  $Y_h$ ,  $N_v$  و  $N_h$  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 بدن 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 بدن، 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 بدن متقارن، ابتدا تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده معرفی شده و در ادامه نتایج آزمایش و روش محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بدن خالی زیرسطحی با استفاده از داده‌های آزمایش ارائه می‌گردد.

گشتاور یا و در این مقاله حول محوری که از مرکز شناوری (CB) می‌گذرد گزارش می‌شود. جدول ۲ محل مرکز شناوری به صورت فاصله از دماغه (میلیمتر) و نیز به صورت کسری از طول کل مدل را نشان می‌دهد [۳]. همچنین سطح خیس شده و حجم مدل‌ها در جدول ۲ دیده می‌شوند.

بالانس سه مولفه ای که برای اندازه‌گیری دو نیروی هیدرودینامیکی (محوری و جانبی) و گشتاور هیدرودینامیکی یا و استفاده شد، دارای دو نیروسنج ۱۳ جانبی و یک نیروسنج محوری است؛ بدین ترتیب مبدأ 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 بدن متقارن قرار دارد.

کاربرد PMM برای انجام آزمایش‌های مانور مهارشده<sup>۱۴</sup> 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،

که  $F_{y0}$  دامنه نیروی اسوی و  $\varphi_F$  اختلاف فاز بین سیگنال های اسوی و سرعت اسوی است یعنی فاز سیگنال سرعت اسوی به اندازه  $\varphi_F$  جلوتر از نیروی اسوی است.

گشتاور یاو طی آزمایشها اسوی خالص به شکل زیر بیان می گردد:

$$M_z = M_{z0} \sin(\omega t - \varphi_M) \quad (4)$$

که  $M_{z0}$  دامنه گشتاور یاو و  $\varphi_M$  اختلاف فاز بین سیگنال های سینوسی گشتاور یاو و سرعت اسوی می باشد. این اختلاف فاز بسیار نزدیک ۱۸۰ درجه است و دامنه گشتاور یاو وارد بر مدل های مذکور حدود ۲۰ تا ۵۰ (نیوتون در متر) ثبت شده است. داده های آزمایش برای  $M_{z0}$  و  $(\varphi_M - 180^\circ)$  درجه در جدول ۳ گزارش شده اند.

سری های زمانی خام حاصل از آزمایش به کمکتابع نرم افزار MATLAB<sup>TM</sup> 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 داده ها را دوبار: یک بار به جلو و یک بار برگشت به عقب پردازش می کند هیچ جابجایی فاز  $180^\circ$  در نتایج وارد نمی شود که این موضوع در تحلیل حاضر از داده ها که توجه ویژه ای به اختلاف فاز میان سیگنال نیروها و حرکات PMM دارد بسیار مفید است.

### ۳- نمودار صفحه مجازی<sup>۱۶</sup>

آنچنان که در جدول ۳ دیده می شود، سیگنال نیروی اسوی اختلاف فاز  $\varphi_F$  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 می شوند. با افزایش زمان، این بردارها در جهت عقربه ساعت می چرخند بنابراین بردار سرعت همواره نسبت به بردار نیرو به اندازه زاویه  $\varphi_F$  جلوتر است.

### ۲- داده های 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 اربه کشش موازی است. به عبارتی، در تمام آزمایشها اسوی خالص، زاویه یاو شناور مقدار ثابت صفر درجه است. در نتیجه، نیروی اسوی و گشتاور یاو که طی آزمایشها اسوی خالص اندازه گیری می شوند، از مقادیر آنها در آزمایش یاو خالص بزرگترند. در این مطالعه، هدف از آزمایشها اسوی خالص اندازه گیری نیروی اسوی و گشتاور یاو به صورت توابعی از سرعت و شتاب اسوی PMM است. داده های آزمایش مانور اسوی خالص در جدول ۳ ارائه شده اند.

همانطور که توضیح داده شد، در آزمایشها 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 می شوند. با فرض آنکه زمان اندازه گیری در لحظه ای که مدل از خط وسط حوضچه کشش در جهت مثبت  $y$  می گذرد آغاز می شود، جابجایی و حرکت اسوی PMM به صورت زیر تعریف می شوند:

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

که  $v_0$  فرکانس مانور و  $A$  و  $v_0$  به ترتیب دامنه جابجایی و سرعت اسوی هستند که  $v_0$  برابر  $v_0$  است.

مشتق گیری از رابطه (1) شتاب اسوی PMM که همان شتاب مدل است را بدست می دهد:

$$a_y = a_{y0} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

که  $a_{y0}$  دامنه شتاب اسوی PMM است که به صورت  $A \times \omega^2$  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:

$$F_y = F_{y0} \cos(\omega t + \varphi_F) \quad (3)$$

جدول ۳- نتایج آزمایش اسوی خالص برای پنج بدنه زیرسطحی؛ سرعت کشنش ۲ متر بر ثانیه

Run No.	LDR	$\varphi_M - 180[\text{deg}]$	Mz0 - [N.m]	$\varphi_F - 90[\text{deg}]$	Fy0[N]	$a_0[\text{m/s}^2]$	v0[m/s]	$\omega [\text{rad/s}]$	A [m]
۱	۸/۰	۱۱/۴	۲۹/۶	۴۴/۹	۱۱۲/۸	۱/۰۳	۰/۵۷	۱/۸	۰/۳۲
۲	۸/۰	۹/۱	۲۸/۳	۴۶/۳	۱۰۱	۰/۸۵	۰/۰۵	۱/۵۳	۰/۳۶
۳	۸/۰	۸/۲	۲۷/۴	۴۹/۷	۹۳/۳	۰/۷۲	۰/۰۵	۱/۳۱	۰/۴۲
۴	۸/۰	۵/۱	۴.۲۶	۵۳/۹	۸۷/۰	۰/۶۱	۰/۰۵	۱/۱	۰/۵
۵	۸/۰	۴/۳	۲۶/۸	۵۹/۴	۹۱/۸	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۸۹	۰/۶۵
۶	۸/۰	-۵/۰	۱۰/۳	۶۳/۳	۳۵/۴	۰/۱۴	۰/۳۱	۰/۴۴	۰/۷
۷	۸/۰	۱/۳	۲۰/۹	۶۳/۴	۸۶/۱	۰/۳۷	۰/۰۶	۰/۶۶	۰/۸۵
۸	۸/۰	۱/۰	۲۶/۷	۶۴/۶	۹۳/۱	۰/۳۹	۰/۶۰	۰/۶۶	۰/۹
۹	۸/۰	-۱/۰	۲۴/۹	۶۸	۷۷/۶	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۴۴	۱/۲۵
۱۰	۹/۰	۱۱/۸	۳۴/۱	۴۴/۸	۱۲۵/۳	۱/۰۳	۰/۰۷	۱/۸	۰/۳۲
۱۱	۹/۰	۹/۰	۳۲/۷	۴۷/۴	۱۱۱/۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۱/۵۳	۰/۳۶
۱۲	۹/۰	۶/۴	۳۱/۵	۴۹/۴	۱۰۰/۹	۰/۰۷۲	۰/۰۵	۱/۳۱	۰/۴۲
۱۳	۹/۰	۶/۸	۳۰/۲	۵۳/۲	۹۳/۴	۰/۶۱	۰/۰۵	۱/۱	۰/۵
۱۴	۹/۰	۴/۷	۳۰/۶	۵۸	۹۸/۲	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۸۹	۰/۶۵
۱۵	۹/۰	۱/۱	۱۸/۳	۶۲/۲	۳۹/۹	۰/۱۴	۰/۳۱	۰/۴۴	۰/۷
۱۶	۹/۰	۲/۴	۲۹/۸	۶۲/۹	۹۲/۰	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۶۶	۰/۸۵
۱۷	۹/۰	۱/۴	۳۰/۹	۶۳/۶	۹۹/۹	۰/۰۹	۰/۶۰	۰/۶۶	۰/۹
۱۸	۹/۰	۰/۰	۲۹/۷	۶۷/۴	۹۱/۲	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۴۴	۱/۲۵
۱۹	۱۰/۰	۶/۰	۳۸/۸	۴۲/۲	۱۳۸/۹	۱/۰۳	۰/۰۷	۱/۸	۰/۳۲
۲۰	۱۰/۰	۴/۶	۳۷/۱	۴۲/۸	۱۲۵/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۱/۵۳	۰/۳۶
۲۱	۱۰/۰	۳/۹	۳۰/۸	۴۶/۸	۱۱۲	۰/۰۷۲	۰/۰۵	۱/۳۱	۰/۴۲
۲۲	۱۰/۰	۳/۲	۳۴/۳	۵۱/۸	۱۰۳/۰	۰/۶۱	۰/۰۵	۱/۱	۰/۵
۲۳	۱۰/۰	۱/۲	۳۰/۲	۵۷/۰	۱۰۷/۰	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۸۹	۰/۶۵
۲۴	۱۰/۰	-۲/۱	۲۰/۷	۶۲/۷	۴۲/۱	۰/۱۴	۰/۳۱	۰/۴۴	۰/۷
۲۵	۱۰/۰	۲/۱	۳۴/۶	۶۱/۴	۱۰۲/۴	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۶۶	۰/۸۵
۲۶	۱۰/۰	۱/۷	۳۰/۹	۶۰/۳	۱۰۸/۶	۰/۰۹	۰/۶۰	۰/۶۶	۰/۹
۲۷	۱۰/۰	-۰/۳	۳۳/۴	۶۰	۹۵/۱	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۴۴	۱/۲۵
۲۸	۱۱/۰	۳/۰	۴۲/۷	۴۰/۷	۱۴۸/۹	۱/۰۳	۰/۰۷	۱/۸	۰/۳۲
۲۹	۱۱/۰	۳/۸	۴۲	۴۲/۷	۱۳۲/۷	۰/۰۵	۰/۰۵	۱/۵۳	۰/۳۶
۳۰	۱۱/۰	۴/۴	۴۰/۷	۴۵/۹	۱۱۹/۷	۰/۰۷۲	۰/۰۵	۱/۳۱	۰/۴۲
۳۱	۱۱/۰	۳/۴	۳۸/۴	۵۲	۱۱۱/۳	۰/۶۱	۰/۰۵	۱/۱	۰/۵
۳۲	۱۱/۰	۲/۰	۴۰/۱	۵۶/۷	۱۱۳/۷	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۸۹	۰/۶۵
۳۳	۱۱/۰	۰/۱	۲۴/۲	۶۱/۷	۴۴/۴	۰/۱۴	۰/۳۱	۰/۴۴	۰/۷
۳۴	۱۱/۰	-۰/۳	۳۹/۱	۶۰/۲	۱۰۴/۱	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۶۶	۰/۸۵
۳۵	۱۱/۰	-۲/۱	۴۱	۵۸/۷	۱۱۲/۷	۰/۰۹	۰/۶۰	۰/۶۶	۰/۹
۳۶	۱۱/۰	-۲/۱	۲۸	۶۷/۴	۹۹/۱	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۴۴	۱/۲۵
۳۷	۱۲/۰	۱/۹	۴۵/۰	۴۰/۸	۱۴۴/۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۱/۵۳	۰/۳۶
۳۸	۱۲/۰	۰/۸	۴۵	۴۲/۸	۱۲۰	۰/۰۷۲	۰/۰۵	۱/۳۱	۰/۴۲
۳۹	۱۲/۰	۲/۸	۴۳	۵۰/۰	۱۱۶/۶	۰/۶۱	۰/۰۵	۱/۱	۰/۵
۴۰	۱۲/۰	۱/۰	۴۴/۸	۵۵/۳	۱۱۸	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۸۹	۰/۶۵
۴۱	۱۲/۰	۱/۰	۲۶/۴	۵۹/۳	۴۴/۲	۰/۱۴	۰/۳۱	۰/۴۴	۰/۷
۴۲	۱۲/۰	۰/۱	۴۵/۶	۵۸/۲	۱۲۱/۳	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۶۶	۰/۸۵
۴۳	۱۲/۰	۰/۳	۴۵/۶	۵۹/۲	۱۱۸/۴	۰/۰۹	۰/۶۰	۰/۶۶	۰/۹
۴۴	۱۲/۰	-۱/۷	۴۳/۱	۶۴/۱	۱۰۳/۸	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۴۴	۱/۲۵

که  $\beta$  زاویه دریفت است؛ یعنی بنا زاویه بین محور طولی مدل و راستای کشش در طی آزمایش زاویه دار ثابت می باشد. بنابراین، شب منحنی نیروی اسوی و گشتاور یا نسبت به زاویه دریفت مقادیر مشتقات  $Y_v$  و  $N_v$  را نتیجه می دهد. شب منحنی های مذکور برای مدل بدن لخت زیر سطحی فینیکس با LDR برابر  $8/5$  عبارتند از:  $Y_v \approx -11.0 \text{ N/(m/s)}$  و  $N_v \approx -58 \text{ N}$  (شکلهای ۱۰-۲ و ۱۱-۲ در [۱]). سپس ضرایب هیدرودینامیکی بی بعد برای بدن به طول کل  $U = 2 \text{ m/s}$  از  $= 1/724 \text{ m}$  (جدول ۱) و سرعت کشش  $a_y$  از  $0.5 \rho U l^2$  تقسیم مشتق نیرو بر  $0.5 \rho U l^3$  و تقسیم مشتق گشتاور بر  $0.5 \rho U l^3$  بدست می آیند که این ضرایب بی بعد عبارتند از:  $Y'_v = -0.11$  و  $N'_v = -0.37$ . مقدار منفی برای ضریب گشتاور بدان معناست که اثر سینه زیرسطحی غالب است.

به همین ترتیب برای همه پنج بدن با نسبت طول به قطرهای تا  $12/5$  مشتقات نیرو و گشتاور بدون بعد از نتایج آزمایش های زاویه دار ثابت به صورت زیر حساب می شوند:

$$Y'_v = [-0.037, 0.029, 0.024, 0.02, 0.017] \quad (8)$$

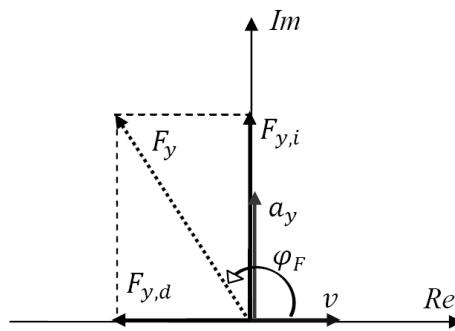
$$N'_v = -10^{-3} \times [11, 8.1, 6.0, 4.5, 3.5] \quad (9)$$

#### 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 می شوند را به ترتیب  $F_1$  و  $F_2$  می نامیم و هر یک را به مولفه های هم فاز<sup>۱۷</sup> و خارج از فاز<sup>۱۸</sup> نسبت به سیگنال جابجایی اسوی  $y(t)$  تجزیه می کنیم. سپس نتیجه می شود:

$$F_{in} = F_{1,in} + F_{2,in} \quad F_{out} = F_{1,out} + F_{2,out} \quad (10)$$

دامنه نیروهای هم فاز و خارج از فاز با توجه به نمودار شکل ۲ به ترتیب برابرند با نیروی اینرسی و نیروی میرایی، یعنی:



شکل ۲- بردارهای سرعت، شتاب و نیرو در صفحه اعداد مختلط

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  $F_{y,i}$  که هم جهت با بردار شتاب است بدست می آیند.  
آجنبان که در شکل ۲ دیده می شود، دامنه مولفه های میرایی و اینرسی بردار نیروی اسوی به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$F_{y,d} = -F_{y0} \sin(\varphi_F - \frac{\pi}{2}) \quad (5)$$

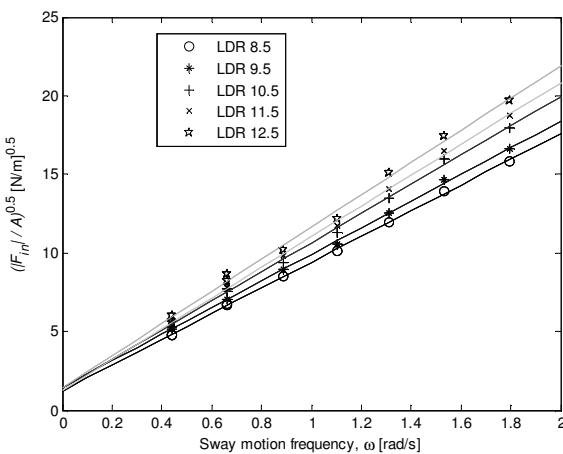
$$F_{y,i} = F_{y0} \cos(\varphi_F - \frac{\pi}{2}) \quad (6)$$

با توجه به داده های آزمایش در جدول ۳، با افزایش فرکانس: (الف) اندازه نیروی اسوی زیاد می شود، (ب) اختلاف فاز  $\varphi_F$  کاهش می یابد، که هر دو مورد باعث می شوند مولفه اینرسی نیروی اسوی بزرگتر شود [۷].

#### ۶- مشتقات $Y_v$ و $N_v$ حاصل از آزمایش های زاویه دار ثابت

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

$$v = -U \sin \beta \quad (7)$$



شکل ۳- نمودار براساس رابطه (۱۴) برای یافتن مشتق نیروی اسوی نسبت به شتاب اسوی

سپس، اگر طرفین رابطه (۱۴) را جابجا و شبی خطوط در شکل ۳ و نیز جرم آبگرفته بدنها از جدول ۱ را جاگذاری کنیم، آنگاه مشتق نیروی اسوی  $Y_{\dot{v}}$  برای پنج بدن حساب می‌شود. اگر مقادیر بدست آمده بر  $\frac{1}{2}\rho l^3$  تقسیم شوند، مشتق بی بعد نیروی اسوی نسبت به شتاب اسوی برای بدنها با LDR ۸/۵ تا ۱۲/۵ به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$Y'_{\dot{v}} = -10^{-3} \times [6.9, 4.5, 4.6, 4.0, 3.4] \quad (16)$$

به علاوه، جرم‌های بدون بعد بدنها لخت زیرسطحی‌ها با LDR ۸/۵ تا ۱۲/۵ از تقسیم جرم‌های آبگرفته در جدول ۱ ستون هفتم، بر  $\frac{1}{2}\rho l^3$  به ترتیب عبارتند از:

$$m' = 10^{-3} \times [19.2, 15.4, 13.1, 11, 9.4] \quad (17)$$

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بدن لخت یک زیرسطحی باریک<sup>۲۰</sup> طی مانور شتاب دار جانبی دارای مشتق نیروی اسوی نسبت به شتاب به بزرگی حدود یک سوم جرم بدون بعد خودش هست. در حقیقت،  $Y_{\dot{v}}$  همان جرم افزوده<sup>۲۱</sup> بدون بعد زیر سطحی با یک علامت منفی است.

$$|F_{in}| = F_{y0} \cos(\varphi_F - \frac{\pi}{2}) \quad (11)$$

$$|F_{out}| = F_{y0} \sin(\varphi_F - \frac{\pi}{2})$$

که  $\varphi_F$  زاویه‌ای 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 [۶]:

$$Y_{\dot{v}} = m - (|F_{in}|/a_{y0}) \quad (12)$$

$$Y_v = -|F_{out}|/v_0 \quad (13)$$

که با توجه به توضیحات بخش‌های قبل، دامنه سرعت و شتاب اسوی PMM در طی یک مانور اسوی خالص برابرند با  $v_0 = A \times \omega$  و  $a_{y0} = A \times \omega^2$  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 می‌گردند:

$$(|F_{in}|/A)^{0.5} = (m - Y_{\dot{v}})^{0.5} \quad (14)$$

که نسبت به فرکانس رسم شده مانند شکل ۳.  
 $|F_{out}|/A = Y_v$  شیب منحنی<sup>۲۲</sup> که نسبت به فرکانس رسم شده مانند شکل ۳.

این روش توسط وان لویون (۱۹۶۴)<sup>۲۳</sup> 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 بدن زیر سطحی رسم شده است و خطوطی هم به داده‌های آزمایش چسبانده<sup>۲۴</sup> شده‌اند. شیب خطوط مذکور برای بدن‌های بلندتر مقدار بزرگتری دارد.

اختلاف عمدہ ای میان بارہای دینامیکی کہ طی یک آزمایش زاویہ دار ثابت (شرایط جریان نیمه پایا) و طی یک مانور دینامیکی (شرایط جریان ناپایا<sup>۲۶</sup>) وجود دارد. در شرایط جریان نیمه پایا بارہای ایروودینامیکی (یا هیدرودینامیکی) که به یک جسم متقارن حول محور در حالت مایل وارد می‌گردد تنها وابسته به وضعیت لحظه‌ای جسم (مثلا سرعت جریان، زاویه حمله، زاویه لغزش پهلوی<sup>۲۷</sup>، زوایای صفحات کنترلی نسبت به بدنه وغیره) هستند و در نتیجه مشتق پایداری<sup>۲۸</sup> (یا ضریب هیدرودینامیکی) متناظر با بارهای مذکور برای توصیف تابعیت مقدار بارگذاری از وضعیت لحظه‌ای جسم کفايت می‌کند.

بر خلاف شرایط بالا، هنگام یک مانور دینامیکی اغلب اختلاف زمانی قابل توجهی میان موقعیت لحظه‌ای مدل و بارهای هیدرودینامیکی لحظه ای وجود دارد و این اختلاف زمانی توسط روشهای سنتی، که شامل ویژگی‌های تابع زمان متغیرهای حالت نیستند، قابل پیش‌بینی نمی‌باشد. 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. نویسنده‌گان [۹] چنان اختلاف زمانی را به افزایش چرخش متصل روی سطح مدل نسبت می‌دهند که منجر به جلو افتادن زمانی بارگذاری حالت ناپایا نسبت به بارگذاری نیمه پایا می‌گردد.

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

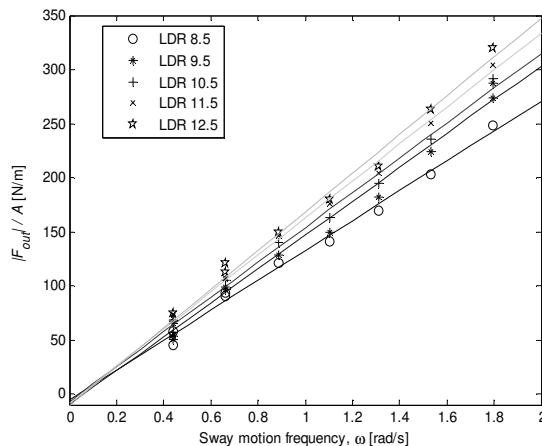
مانند روندی که برای نیرو اسوی انجام شد، مشتقات گشتاور یاونیز به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$\tilde{N}_{\dot{v}} = G_{in} / a_0, \quad \tilde{N}_v = -G_{out} / v_0 \quad (19)$$

$$G_{in} = -M_{z0} \sin(\varphi_M - \pi), \quad (20)$$

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

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



شکل ۴- نمودار براساس رابطه (۱۵) برای یافتن مشتق نیروی اسوی نسبت به سرعت اسوی

شکل ۴، همانطور که در رابطه (۱۵) تشریح شده، برای بدست آوردن مشتق نیروی اسوی نسبت به سرعت  $Y_v$  رسم می‌شود. سپس مشتق بدست آمده بر  $\frac{1}{2} \rho U l^2$  در سرعت کشش  $U = 2 \text{ m/s}$  برای تمام آزمایش‌ها، تقسیم می‌شود تا مشتق بی بعد نیروی اسوی نسبت به سرعت اسوی برای پنج بدنه با  $LDR = 8/5$  تا  $12/5$  به صورت زیر تعیین شوند:

$$Y'_v = [-0.046, 0.042, 0.035, 0.031, 0.028] \quad (18)$$

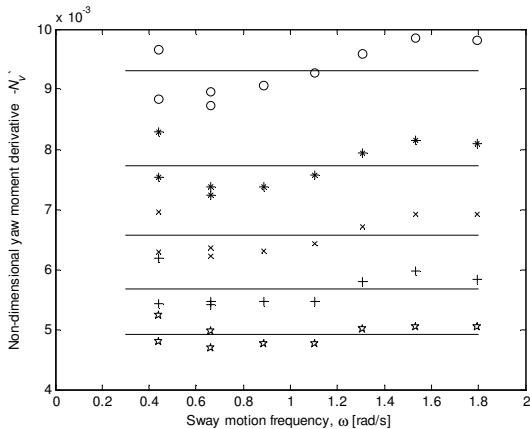
در مقایسه با مقدار بدست آمده از رابطه (۸) که قبل از نتایج آزمایش زاویه دار ثابت محاسبه شدند، مقدار حاصل در رابطه (۱۸) گرچه تطابق تقریبی دارند، نشان دهنده آن است که مشتق نیروی اسوی نسبت به سرعت طی یک آزمایش دینامیکی، یعنی اسوی خالص، بزرگتر از آزمایش‌های استاتیکی، یعنی زاویه دار ثابت، هستند. این مشاهده ممکن است روابط<sup>۲۲</sup> 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 می‌تواند پدیده‌های جدایش جریان<sup>۲۳</sup> و کنده شدن گردهای<sup>۲۴</sup> را به نمایش گذارد، بنابراین این نوع جریان نیمه پایا<sup>۲۵</sup> لحاظ می‌شود. در مرجع [۹] نشان داده شده است که

فرکانس صفر ادامه پیدا کند، آنگاه برای پنج بدن با  $8/5$  تا  $12/5$  LDR

$$N'_v = -10^{-3} \times [9.3, 7.7, 6.6, 5.7, 4.9] \quad (22)$$

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 ۶- مشتق بدون بعد گشتاور یاو نسبت به سرعت اسوی طی آزمایش‌های اسوی خالص

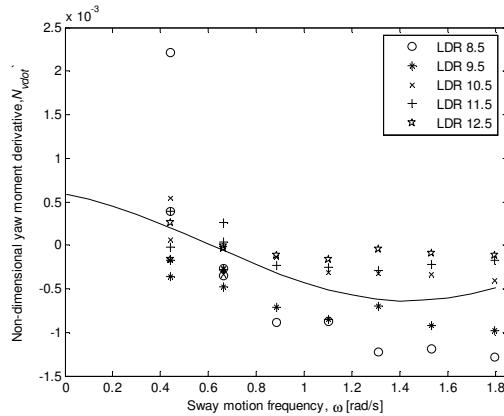
#### ۷- ترسیم مشتقات نسبت به LDR

اگر داده‌های روابط (۸) و (۱۸) که به ترتیب نتایج آزمایش‌های دینامیکی و استاتیکی برای مشتق بدون بعد نیروی اسوی نسبت به سرعت اسوی پنج بدن لخت با  $LDR = 8/5$  تا  $12/5$  بودند، نسبت به  $LDR$  در یک نمودار رسم شوند، دو منحنی شکل ۷ بدست می‌آیند. به همین ترتیب، اگر داده‌های روابط (۹) و (۲۲) که به ترتیب نتایج آزمایش‌های 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 دینامیکی نسبت داده شده اند به ترتیب عبارتند از:

$$Y'_v - fit\_static = 0.005 \times LDR - 0.077 \quad (23)$$

مشتق سرعت و شتاب به ترتیب بر  $\frac{1}{2} \rho U l^3$  و  $\frac{1}{2} \rho U l^4$  بی بعد می‌شوند که مقادیر این مشتقات بدون بعد در شکلهای ۵ و ۶ رسم شده‌اند.



شکل ۵- مشتق بدون بعد گشتاور یاو نسبت به شتاب اسوی طی آزمایش‌های 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  $0.6$  (rad/s) مقدار آن منفی می‌شود. یک منحنی سینوسی به صورت زیر:

$$\begin{aligned} N'_v &= a \cdot \sin(b\omega + c) \\ &= 0.6 \times 10^{-3} \sin(1.9\omega + 8.26) \end{aligned} \quad (21)$$

از میان کل داده‌های آزمایش در شکل ۵ عبور داده شده که عرض از مبدأ آن در فرکانس صفر برابر  $N'_v \approx 0.5 \times 10^{-3}$  است. برای مدل یک شناور سطحی نیز مقدار  $N'_v$  برابر  $10^{-3}$  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 داده‌های آزمایش حول یک مقدار متوسط ثابت که خطی پر برای هر  $LDR$  است جمع شده‌اند. مشاهده می‌شود که برای بدن بلندر مشتق بدون بعد  $N'_v$  مقدار کوچکتری دارد. اگر مقدار متوسط ثابت به

(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 یا و طی آزمایش‌های اسوی خالص اثر دارد.

#### - جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

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

۱- آزمایش‌های زاویه دار ثابت به طور متداول برای تعیین مشتقات هیدرودینامیکی نیروی اسوی و گشتور یا و نسبت به سرعت اسوی استفاده می‌شوند؛ مقادیر  $N_v$  و  $Y_v$  برای بدنه‌های لخت با نسبت طول به قطر  $LDR$  ۸/۵ تا ۱۲/۵ گزارش شدند.

۲- نتایج آزمایش‌های اسوی خالص برای تعیین مشتقات هیدرودینامیکی نیروی اسوی و گشتور یا و نسبت به سرعت اسوی و شتاب اسوی مفید هستند؛ در این مقاله، مقادیر  $Y_v$  و  $N_v$  برای بدنه‌های لخت با  $LDR$  ۸/۵ تا ۱۲/۵ گزارش شدند.

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

#### کلید واژگان

##### 1-Static yaw

در این حالت مدل با یک زاویه یا و ثابت بسته و در طول حوضچه کشیده می‌شود.

##### 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 می‌شود.

4- National Research Council- Institute for Ocean Technology

5- Bare hull

6- Struts

7- Streamlined

8- balance

$$(24)$$

$$Y'_v - fit\_dynamic = 0.005 \times LDR - 0.086$$

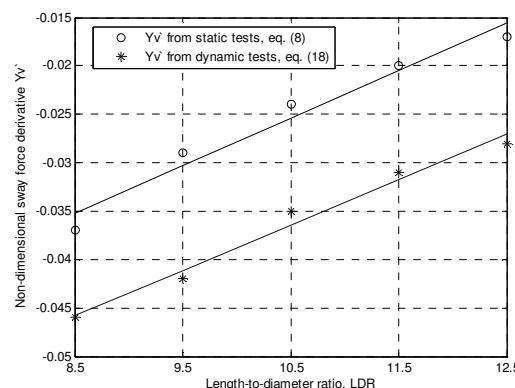
و خطوط شکل ۸ برای نتایج آزمایش استاتیکی و دینامیکی به ترتیب عبارتند از:

$$(25)$$

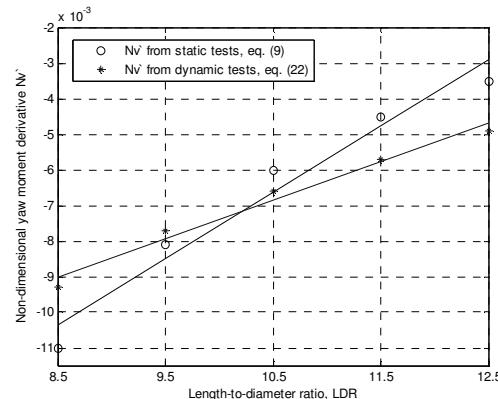
$$N'_v - fit\_static = 0.002 \times LDR - 0.026$$

$$(26)$$

$$N'_v - fit\_dynamic = 0.001 \times LDR - 0.018$$



شکل ۷- مشتق بدون بعد نیروی اسوی نسبت به سرعت اسوی  $Y'_v$  بر اساس  $LDR$  رسم شده



شکل ۸- مشتق بدون بعد گشتاور یا و نسبت به سرعت اسوی  $N'_v$  بر اساس  $LDR$  رسم شده

مسلمان، خطوطی که در شکلهای ۷ و ۸ به داده‌های آزمایش نسبت داده شده‌اند. در بازه  $12/5$  تا  $8/5 LDR$  درست هستند و نباید برای برون یابی بیرون از این بازه استفاده شوند. همچنین لازم به توجه است که شبیه خطوط مثبت است، اما در واقع برای یک بدنه باریک تر

$N_{\dot{\varphi}}$	شیب منحنی گشتاور یاو نسبت به شتاب اسوی در مبدا
	مختصات
$\beta$	زاویه دریفت مدل <sup>(۳)</sup> [deg]
$\rho$	چگالی آب [kg/m <sup>3</sup> ]
$\omega$	فرکانس حرکت اسوی
$\varphi_f$	اختلاف فاز بین سیگنال های نیروی اسوی سینوسی و سرعت اسوی سینوسی
$M_{\dot{\varphi}}$	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. 3<sup>rd</sup> 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- Aeronautics
- 31- Drift

در اینجا یعنی زاویه برخورد میان جریان آب و مدل

## علائم

damنه حرکت جانبی (اسوی) [m]	$A$
مرکز شناوری	CB
مرکز جرم	CG
نسبت طول به قطر	LDR
طول کل مدل [m]	$l$ یا LOA
مکانیزم حرکت صفحه‌ای	PMM
شتاب اسوی (جانبی) [m/s <sup>2</sup> ]	$a_y$
نیروی اسوی [N]	$F_y, Y$
گشتاور یاو [N.m]	$M_z, N$
جرم مدل با احتساب آبگرفتگی [kg]	$m$
سرعت ارایه کشش [m/s]	$U$
سرعت اسوی [m/s]	$v$
جابجایی اسوی مدل [m]	$y(t)$
نیروی اسوی بدون بعد	$Y'$
گشتاور یاو بدون بعد	$N'$
شیب منحنی نیروی اسوی نسبت به سرعت اسوی در مبدا	$Y_v$
مختصات	
شیب منحنی گشتاور یاو نسبت به سرعت اسوی در مبدا	$N_{\dot{\varphi}}$
مختصات	
شیب منحنی نیروی اسوی نسبت به شتاب اسوی در مبدا	$Y_{\ddot{\varphi}}$
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