

## بررسی تأثیر وزنی پارامترهای موثر بر ضرایب هیدرودینامیکی در طراحی پروانه‌های نیمه مغروق

نگین دنیویزاده<sup>۱</sup>، روزبه شفقت<sup>۲\*</sup>، مرتضی دردل<sup>۲</sup>، سعید محمدزاده نقارچی<sup>۲</sup>

۱. مهندسی دریا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۲۰

شناسه دیجیتال (DOI): [10.22113/jmst.2017.42946](https://doi.org/10.22113/jmst.2017.42946)

### چکیده

شناورهای تندروی پروازی با کاربری‌های گسترده و گوناگون تفریحی، ورزشی، تجاری و نظامی، به طور معمول دارای سرعت بالای ۳۰ گره دریایی می‌باشند. با توجه به محدودیت‌های طراحی، به‌کارگیری سیستم نیروی محرکه در شناورهای تندروی پروازی، یک موضوع بسیار کلیدی و حساس است که با در نظر گرفتن ویژگی‌های مطلوب پروانه‌های نیمه‌مغروق، استفاده از آنها در سیستم پیش‌رانش این دسته از شناورها، کاربرد زیادی پیدا کرده است. دستیابی به مناسب‌ترین راندمان و تراست موردنیاز، مستلزم تعیین دقیق ضرایب هیدرودینامیکی تراست و گشتاور می‌باشد. با توجه به اهمیت تعیین این ضرایب و وابستگی آنها به پارامترهای فیزیکی و هندسی گوناگون، شناخت تأثیر این پارامترها بر ضرایب هیدرودینامیکی ضروری است؛ لذا در این پژوهش با استخراج داده‌های آزمون‌های تجربی انجام شده در مطالعات پیشین برای پروانه‌های نیمه مغروق و با روش تحلیل حساسیت، مقدار وزن هر پارامتر و تأثیر متقابل پارامترها بر عملکرد پروانه‌ی نیمه‌مغروق به منظور ارزیابی ضرایب هیدرودینامیکی تراست، گشتاور و در نتیجه بازده پروانه، مورد نظر بوده است. در این روش برای بدست آوردن وزن هر پارامتر، متغیرهای دیگر ثابت در نظر گرفته می‌شود و تأثیر میزان تغییر پارامتر مورد نظر بر ضرایب هیدرودینامیکی و بازده پروانه بررسی می‌شود. براساس نتایج به دست آمده، دو پارامتر زاویه‌ی اسکیو و نسبت گام در مقایسه با دیگر پارامترها، بیشترین تأثیر را در تغییر راندمان پروانه دارند؛ درحالی که تغییر پارامتر نسبت مغروقت، تأثیری چندانی در راندمان پروانه و تغییر آن نخواهد داشت.

**واژه‌های کلیدی:** پروانه‌ی نیمه‌مغروق، تست تجربی پروانه، ضرایب هیدرودینامیکی، تأثیر وزنی، طراحی پروانه.

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: [rshafaghat@nit.ac.ir](mailto:rshafaghat@nit.ac.ir)

## ۱. مقدمه

طراحی پروانه‌های نیمه‌مغروق به عنوان یکی از پیچیده‌ترین و در عین حال جذاب‌ترین مسایل مورد بحث پژوهشگران و کارشناسان صنایع دریایی در زمینه‌ی هیدرودینامیک شناورهای تندرو در دنیا به حساب می‌آید (karimi, Nikfarjam et al. 2007). مطالعات مفیدی پیرامون مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم رانش شناورهای نظامی انجام شده است (Sadr and Khanzade, 2014). از مشخصات عملیاتی بسیار برجسته این نوع پروانه‌ها، حرکت در دو محیط سیالاتی متفاوت و با سرعت بسیار بالا است. مزایای پروانه‌های نیمه‌مغروق باعث شده که اکثر شناورهای تندرو از این نوع پروانه‌ها استفاده نمایند.

نخستین پژوهش‌ها در این حیطه در سال ۱۹۶۸ توسط هادلر<sup>۱</sup> و هکر<sup>۲</sup> انجام شده است که توانسته پایه‌ی مناسبی ارائه کند تا در اغلب متون تحقیقاتی، به خصوص برای اعتبارسنجی با کار تئوری، از آن استفاده شود (Hadler and Hecker, 1968). در سال ۱۹۹۶ اولفسون<sup>۳</sup> در سوئد، با انجام تست بر روی پروانه‌های ۴ پره‌ای در تونل کاویتاسیون، به بررسی تأثیر عدد فرود پرداخت (Olofsson, 1996). پیتیر کوین دیسون<sup>۴</sup> در سال ۲۰۰۰ در تز دکتری خود در دانشگاه آتلانتای آمریکا، نتایج تست‌های ۴ مدل مختلف از پروانه‌های نیمه‌مغروق و تأثیر پارامتر اسکیو را ارائه کرده است (P. K. Dyson, 2000). نوزاوا<sup>۵</sup> و تاکایاما<sup>۶</sup> در سال ۲۰۰۲ در ژاپن، نوسانات تراست و گشتاور پروانه، نوسانات تنش‌های پره، موقعیت زاویه‌ای پروانه را در نسبت مغروقیت‌های گوناگون اندازه‌گیری کرده‌اند (Nozawa, Takayama et al. 2002). لوریو<sup>۷</sup>

در سال ۲۰۱۱ در دانشگاه آتلانتیک فلوریدا آمریکا همانند دیسون دو پارامتر زاویه‌ی یاو<sup>۸</sup> و زاویه‌ی اسکیو<sup>۹</sup> را از پارامترهای مؤثر بر عملکرد پروانه‌ی نیمه‌مغروق معرفی کرد (Lorio 2011). میسرا<sup>۱۰</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲، ۴ نوع پروانه‌ی نیمه‌مغروق را در شرایط مختلف مورد بررسی و تست قرار داد و نتایج حاصل از تست را توسط روش شبکه‌ی عصبی فرمول‌بندی نمود (Misra, Gokarn et al. 2012).

در طراحی و انتخاب پروانه، مهم‌ترین مرحله، تعیین مقادیر حداقل تراست و حداکثر گشتاور مجاز پروانه، از طریق روابط ارائه شده برای ضرایب هیدرودینامیکی تراست  $K_T$  و گشتاور  $K_Q$  است. در تعیین ضرایب هیدرودینامیکی، پارامترهای مختلفی دخیل هستند. این پارامترها شامل ویژگی‌های هندسی مانند تعداد پره ( $Z$ )، نسبت گام به قطر ( $P/D$ )، نسبت سطح گسترش‌یافته (EAR)، زاویه‌ی ریک<sup>۱۱</sup> ( $\theta$ )، مقطع پره و نیز ویژگی‌های فیزیکی، مانند زاویه‌ی محور شافت، ضریب پیشروی ( $J$ )، نسبت مغروقیت ( $I_T$ ) و اعداد بی‌بعد رینولدز ( $Re$ )، کاویتاسیون ( $\sigma$ )، ویر ( $We$ ) و فرود ( $Fr$ ) می‌باشند.

در دو مطالعه‌ی تجربی، توسط دیسون و لوریو، علاوه بر پارامترهای بیان شده، دو پارامتر زاویه‌ی عرضی شفت و زاویه اسکیو نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به‌طور کلی پارامترهای مؤثر در تعیین ضرایب هیدرودینامیکی  $K_Q$  و  $K_T$  در پروانه‌های نیمه‌مغروق، به صورت یک تابع (رابطه‌ی (۱))، بیان می‌شود (ghasemi, hasanvand et al., 2008):

$$(1)$$

$$K_T \text{ or } K_Q = f(Z, P/D, EAR, \theta, \gamma, \psi, J, Fr, Re, We, \sigma, I_T)$$

که در رابطه‌ی بالا، ضریب پیشروی براساس رابطه (۲) مشخص خواهد شد که  $D$  قطر پروانه و  $n$  دور پروانه است.

Yaw angle<sup>۸</sup>

Skew angle<sup>۹</sup>

Misra<sup>۱۰</sup>

Rake angle<sup>۱۱</sup>

Hadler<sup>۱</sup>

Hacher<sup>۲</sup>

Olofsson<sup>۳</sup>

Dayson<sup>۴</sup>

Nozawa<sup>۵</sup>

Takayama<sup>۶</sup>

Lorio<sup>۷</sup>

هیدرودینامیکی براساس ضرایب پیشروی، با استفاده از داده‌های تست‌های تجربی برای یک پروانه مشخص، ارائه می‌گردد.

## ۲. مواد و روش‌ها

در طراحی پروانه‌ی نیمه‌مغروق، برای رسیدن به شرط تراست مطلوب و قید حداقل گشتاور مجاز، با توجه به این‌که ضریب پیشروی ثابت است، باید توجه داشت که با تغییر کدام پارامتر، شرط تراست و گشتاور سریع‌تر ارضا می‌شود. این پارامترها شامل زاویه‌ی اسکيو، نسبت گام به قطر، نسبت مغروقت، زاویه‌ی محور شفت و زاویه‌ی عرضی شفت (زاویه یاو) می‌باشند. برای این‌که بتوان شرایط را برای یک بررسی جامع فراهم نمود، دسترسی به داده‌های قابل اعتماد بسیار مهم است. در این راستا ابتدا تمامی داده‌های تست‌های تجربی مراجع مختلف (در مجموع داده‌های ۹۶ تست) استخراج شده است و حدود ۱۶۰۰ نقطه با در نظر گرفتن مقادیر مشخص ۸ متغیر  $I_T$ ،  $J$ ،  $\psi$ ،  $\gamma$ ،  $\theta$ ،  $P/D$  و  $Z$  و نیز ضرایب هیدرودینامیکی  $K_Q$  و  $K_T$  به دست آمده است. شایان ذکر است که بازه‌های ذکر شده در تمامی تست‌ها، با توجه به امکانات موجود آزمایشگاهی برای آن تست و دستیابی به هدف مورد بررسی در آن پژوهش، انتخاب و به صورت جدول (۱) است.

$$J = \frac{V}{nD} \quad (2)$$

در خصوص طراحی پروانه‌های نیمه‌مغروق از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که از میان حل‌های عددی و تست‌های تجربی، نتایج تجربی منطقی‌تر بوده و دلیل اصلی آن عملکرد این دسته از پروانه‌ها و پیچیدگی مدل کردن رفتار پروانه‌ی نیمه‌مغروق می‌باشد. با بررسی نتایج حل‌های عددی و تست‌های تجربی دیده می‌شود که تا به حال مطالعه‌ی دقیق و جامعی در خصوص تاثیر هر کدام از پارامترهای نام‌برده، انجام نشده و تنها به بررسی ضرایب هیدرودینامیکی و راندمان پروانه پرداخته شده است؛ در حالی که تغییر در هر کدام از این پارامترها تاثیر عمده‌ای بر ضرایب هیدرودینامیکی و راندمان پروانه خواهد داشت. لذا شایان توجه است که شناخت دقیق‌تر تأثیرات وزنی هر یک از پارامترها، کمک فراوانی در تصحیح و بازطراحی جهت دستیابی به عملکرد مطلوب خواهد نمود (Shomalipur, Saeidi, et al. 2013). در این مطالعه، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مراجع مختلف، ضمن بررسی تاثیر پارامترهای گوناگون بر ضرایب هیدرودینامیکی، بررسی خواهد شد که در ضرایب پیشروی ۰/۱ تا ۱/۶ و در حالی که سایر پارامترها ثابت است، تغییر در یک پارامتر، چه اثراتی در روند تغییرات ضرایب  $K_T$  و  $K_Q$  ایجاد خواهد کرد. برای بیان بهتر، تاثیر هر کدام از پارامترها به صورت نمودارهای ضرایب

جدول ۱: مشخصات و شرایط تست‌های انجام شده در مراجع

پارامتر	فرراندو	دیسون	نوزاوا وتاکایاما	لوریو	میسرا
تعداد پره	۵	۵، ۴	۳	۴	۴
نسبت گام	۰/۸، ۱، ۱/۲	۱/۵۲	۱، ۱/۳، ۱/۶	۱/۸۸	۰/۸، ۱، ۱/۲، ۱/۴
نسبت مغروقت	۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷	۰/۳، ۰/۵، ۰/۸	۰/۳۳	۰/۳۳، ۰/۵	۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۷
نسبت سطح	۰/۶۷	۰/۶۷، ۰/۸۵			۰/۴۵، ۰/۶، ۰/۷
زاویه انحراف شفت	۶	۴، ۸	۰	۰، ۷/۵، ۱۵	۵
زاویه یاو	۰	۰، ۱۵	۰	۰، ۱۵، ۳۰	۰
زاویه اسکيو		-۰/۵، ۰، ۰/۵			

به این ترتیب بررسی هر پارامتر برگزیده در قالب یک «نمونه‌ی آماری» انجام شده است. جدول (۲)، نمونه‌های آماری مربوط به هر پارامتر برگزیده را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، تنها متغیر در هر ردیف، پارامتر مورد بررسی می‌باشد. البته در برخی موارد از عبارت "نامشخص" استفاده شده است که مربوط به حالتی می‌شود که بر اساس مراجع مورد بررسی، هیچ اطلاعی در رابطه با آن پارامتر وجود ندارد.

با توجه به نمونه‌های آماری برگزیده، محدوده‌ی تغییرات پارامترها و گام تغییر آن‌ها، تعیین و در جدول (۳) نشان داده شده است.

به دلیل متفاوت بودن ضرایب پیشروی در داده‌های تست‌های انجام شده و برای بررسی بهتر این داده‌ها، مقادیر  $K_Q$  و  $K_T$  در ضرایب پیشروی ۰/۵ تا ۱/۶ و با فاصله‌های ۰/۱ برای تمامی تست‌ها، میان‌یابی شده است. شایان ذکر است که پس از به‌دست‌آوردن ضرایب تراست و گشتاور، مقدار بازده نیز براساس رابطه‌ی (۲) به‌دست خواهد آمد.

$$\eta = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (3)$$

پس از میان‌یابی ضرایب هیدرودینامیکی  $K_Q$  و  $K_T$  و با توجه به داده‌های به دست آمده، با انتخاب بازه‌ای معتبر، تأثیر تغییرات هر پارامتر در این بازه با فرض ثابت بودن پارامترهای دیگر مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۲: نمونه‌های استفاده شده برای بررسی تأثیر پارامترها

EAR	$\psi$	$\gamma$	P/D	$I_T$	Skew	پارامتر مورد نظر
۰/۶۷	صفر درجه	۸ درجه	۱/۵۲	۵۰ درصد	-	«نمونه‌ی ۱» (تأثیر زاویه شلاقی)
۰/۶۷	نامشخص	۸ درجه	۱/۵۲	-	نامشخص	«نمونه‌ی ۲» (تأثیر نسبت مغروقیت)
نامشخص	صفر درجه	۸ درجه	-	۳۳ درصد	صفر درجه	«نمونه‌ی ۳» (تأثیر نسبت گام)
نامشخص	۱۵ درجه	-	۱/۸۸	۳۳ درصد	صفر درجه	«نمونه‌ی ۴» (تأثیر زاویه محور شفت)
۰/۶۷	-	۸ درجه	۱/۵۲	۵۰ درصد	صفر درجه	«نمونه‌ی ۵» (تأثیر زاویه عرضی شفت)

جدول ۳: محدوده‌ی پارامترهای بررسی شده

تغییر	محدوده	پارامتر
۱	۴ تا ۵	تعداد پره
۰/۱	۰/۳ تا ۰/۸	نسبت مغروقیت
۰/۲	۱/۴ تا ۰/۸	نسبت گام
۰/۵ رادیان	۰/۵ تا -۰/۵ رادیان	زاویه اسکيو
۷/۵ درجه	۰ تا ۱۵ درجه	زاویه محور شفت
۱۵ درجه	۰ تا ۱۵ درجه	زاویه یاو
	۰/۴۵ و ۰/۶ و ۰/۷	نسبت سطح

برای ارزیابی و شناخت تأثیر هر یک از پارامترهای بیان شده از روش تحلیل حساسیت استفاده شده است. تحلیل حساسیت یک ابزار مهم برای ارزیابی پارامترها، تخمین پارامترها، طراحی بهینه و کنترل بهینه می‌باشد. تحلیل حساسیت به مطالعه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی در یک مدل آماری گفته می‌شود. به عبارت دیگر روشی برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل آماری به صورت سازمان‌یافته (سیستماتیک) است که

پیشروی مشخص، مقدار تغییرات  $K_T$  و  $K_Q$  (شیب خط عبوری از نقاط تست موجود در نمودار ضرایب هیدرودینامیکی (Trend) - پارامتر مورد بحث) به دست آمده است که این مقدار به صورت یک ضریب موثر بزرگتر از صفر است که حاصل ضرب این عدد در مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی اولیه نشان دهنده تغییرات ضریب تراست و گشتاور می باشد. اگر این ضریب عددی بین صفر و یک باشد سبب کاهش مقدار ضرایب هیدرودینامیکی می شود و همچنین مقدار ضرایب هیدرودینامیکی با این شیب تغییر خواهند داشت.

### ۳. نتایج

«نمونه ۱» مربوط به اثرات تغییرات زاویه اسکيو می باشد که برای بررسی این پارامتر از داده های تجربی تست انجام شده توسط دیسون استفاده شده است. با برازش دادن بهترین منحنی (چند جمله ای درجه ۳) از این داده ها، نمودارهای شکل (۱) ترسیم شده اند. براساس نمودارهای شکل (۱)، ایجاد زاویه اسکيو جلو و یا عقب، هر دو سبب افزایش ضریب تراست می شود.

طبق محدوده ی تعریف شده برای زاویه ی اسکيو (جدول (۲))، به منظور بررسی تغییرات بر روی ضرایب هیدرودینامیکی تراست و گشتاور، بازه ی تغییرات زاویه ی اسکيو [۰/۵، -۰/۵] با گام تغییرات ۰/۵ رادیان در نظر گرفته می شود. تأثیر وزنی این پارامتر به صورت شیب خط عبوری از آن نقاط با روش آنالیز حساسیت، در ضرایب پیشروی ۰/۶ تا ۱/۳ (با توجه به محدوده ی انجام تست و نتایج آن) تعیین شده است. با توجه به ارزیابی های انجام شده، در یک ضریب پیشروی مشخص، به ازای تغییر زاویه ی اسکيو به اندازه ی ۰/۵ رادیان، تغییرات ضرایب هیدرودینامیک رفتاری خطی دارد (در جدول (۴)). هرگاه ضریب پیشروی طرح ۰/۸ باشد، ضریب موثر بر  $K_T$ ، ۰/۹۸۱ بوده و به معنی کاهش ۲ درصدی در

بتوان تاثیرات این تغییرات را در خروجی مدل پیش بینی کرد. روش های مختلفی برای بیان تحلیل حساسیت وجود دارد که طبقه بندی این روش ها عموماً به صورت (۱) ریاضی، (۲) آماری و (۳) گرافیکی می باشد.

یکی از ساده ترین و رایج ترین روش های ریاضی، تغییر یک پارامتر-در یک زمان<sup>۱</sup> (OAT)، برای بررسی اثر این پارامتر در خروجی می باشد در این روش که به صورتی محلی و نسبت به یک نقطه سنجیده می شود، ابتدا یک پارامتر ورودی را در حالی که تمامی پارامترهای دیگر بدون تغییر باشند، تغییر می دهیم سپس پارامتر متغیر را به حالت اول برمی گردانیم و برای تمام پارامترهای موثر این روش را تکرار می کنیم

اگر تابع خروجی به صورت زیر باشد:

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)$$

برای بدست آوردن اثر هر کدام از پارامترها کافی است نسبت به پارامتر مورد نظر برای یک نقطه ثابت ( $X_0$ ) مشتقات جزئی به صورت زیر گرفت.

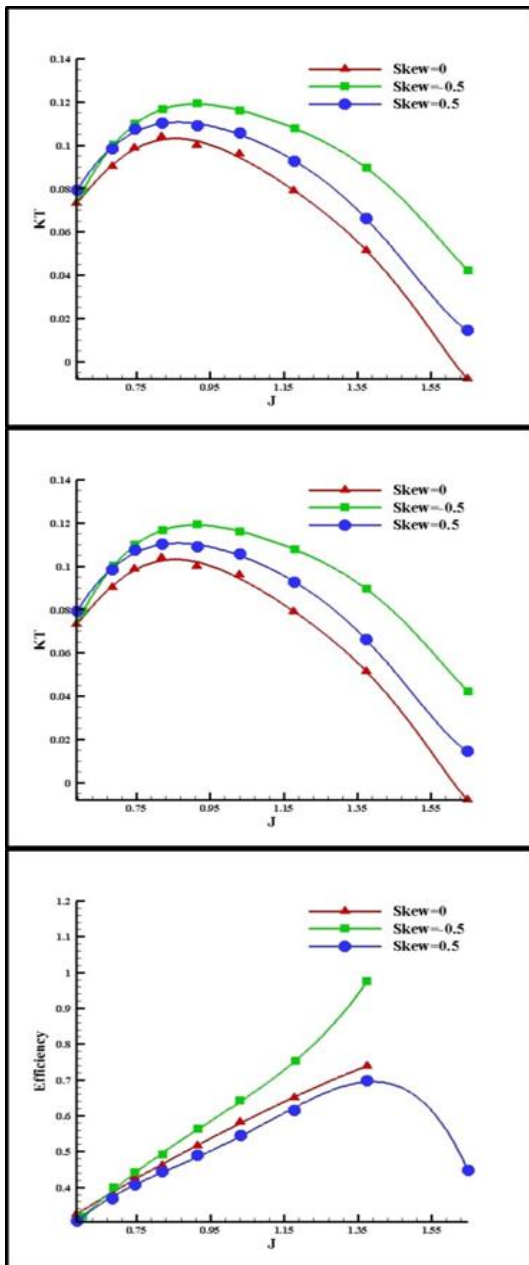
$$\left. \frac{\partial Y}{\partial X_i} \right|_{X_0}$$

نکته مهم که در این روش آنالیز حساسیت باید به آن توجه نمود این است که در این روش، میزان تغییرات<sup>۲</sup> در پارامتر مورد نظر در تمامی بازه های مختلف برای پارامترهای مختلف، یکسان می باشد. در این پژوهش از روش محلی<sup>۳</sup> در آنالیز حساسیت استفاده شده است. در این روش شیب خروجی مدل را در نقطه داده شده در محل ورودی از طریق محاسبه مشتق جزئی در آن نقطه، محاسبه می کنند. نکته مهم که در روش آنالیز حساسیت باید به آن توجه نمود این است که در این روش، روند تغییرات در تمامی بازه های مختلف برای پارامترهای مختلف، یکسان می باشد. در روش تحلیل حساسیت با توجه به نمونه های برگزیده، در هر ضریب

<sup>۱</sup> One At a Time

<sup>۲</sup> Trend

<sup>۳</sup> Local



شکل ۱: تأثیر پارامتر زاویه اسکيو بر روی ضرایب هیدرودینامیکی و بازده پروانه نیمه‌مغروق ۴ پره‌ای

براساس نمودارهای شکل (۳) نتیجه می‌شود، افزایش زاویه انحراف محور شفت، سبب کاهش ضریب تراست و افزایش ضریب گشتاور می‌شود. بنابراین، مطابق رابطه‌ی (۲)، بازده پروانه، با ایجاد و افزایش زاویه انحراف شفت، کاهش می‌یابد.

تراست می‌باشد و ضریب موثر بر گشتاور ۰/۰۰۵ است و هیچ تغییری در گشتاور پروانه ایجاد نمی‌شود. در بررسی پارامتر مغروقیّت از «نمونه‌ی ۲» استفاده شده است که داده‌های تست انجام شده توسط دیسون می‌باشد. در نمودار شکل (۲) همانند نمودار شکل (۱) از بهترین منحنی گذرانده شده برای ضرایب هیدرودینامیکی  $K_T$  و  $K_Q$  و بازده  $\eta$  برای پروانه‌ی ۴ پره‌ای و در سه نسبت مغروقیّت ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۸ به دست آمده است. با بررسی داده‌های تجربی برای محدوده نسبت مغروقیّت‌های ۰/۴ تا ۰/۸ و با تغییر ۰/۱، تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی مطابق جدول (۵) به دست آمد. در یک ضریب پیشروی مشخص، به ازای تغییر نسبت مغروقیّت به اندازه‌ی ۰/۱، تغییرات ضرایب هیدرودینامیک رفتاری خطی دارد (در جدول (۵)). همان‌طور که از نمودارهای شکل (۲) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت مغروقیّت، ضرایب  $K_T$  و  $K_Q$  افزایش قابل توجهی خواهند داشت. با بررسی این پارامتر در سایر آزمایش‌ها نتیجه می‌شود هرچه نسبت مغروقیّت به ۰/۳۵ نزدیک‌تر باشد، بازده بیشتر خواهد بود. در شرایطی که به تراستی بیشتر نیاز است و از حداکثر گشتاور مجاز نیز تجاوز نشود، با افزایش غوطه‌وری می‌توان به این مطلوب رسید و یا برعکس در حالتی که شرایط تراست به خوبی ارضا شده، ولی گشتاور ایجاد شده بیش از حداکثر مجاز باشد، با کاهش غوطه‌وری می‌توان به حالت مناسب دست یافت. پارامتر نسبت مغروقیّت در تغییر بازده پروانه تأثیر چندانی ندارد و افزایش این پارامتر سبب افزایش ضرایب هیدرودینامیکی تراست و گشتاور می‌گردد. تنها آزمایشی که به‌طور خاص، به اندازه‌گیری تأثیر پارامتر زاویه محور شفت پرداخته است، مربوط به آزمایش لوریو در سال ۲۰۱۱ می‌باشد (P. K. Dyson, 2000). نتایج این تست، در سه زاویه‌ی انحراف برابر ۰، ۷/۵ و ۱۵ درجه و بر اساس «نمونه‌ی ۴» ارائه شده است (شکل (۳)).

جدول ۵: تأثیر افزایش ۰/۱ نسبت مغروقت بر ضرایب

هیدرودینامیکی در هر ضریب پیشروی

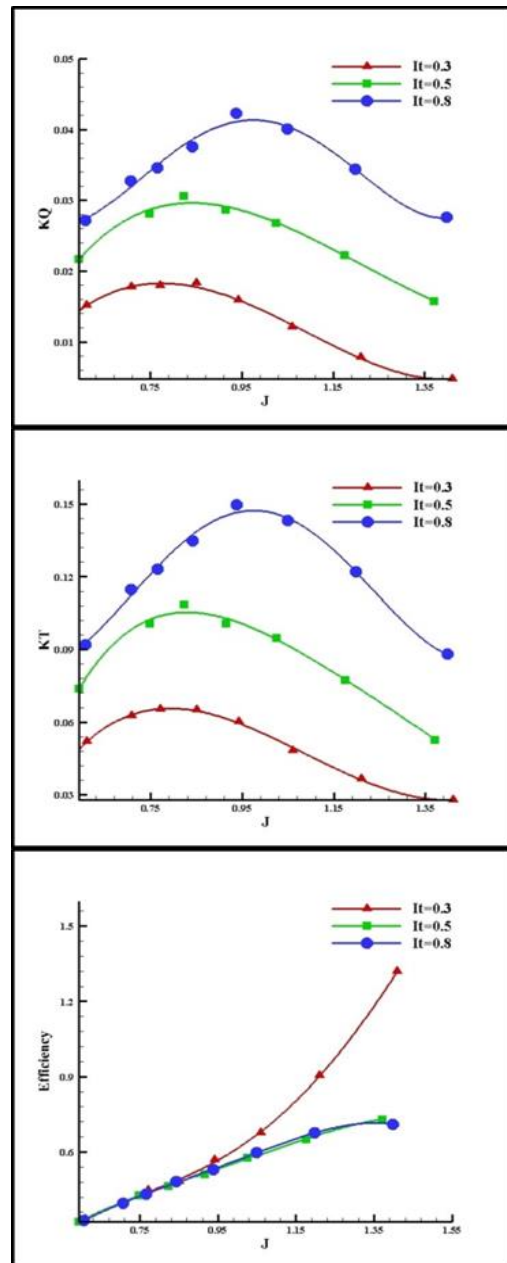
ضریب پیشروی J	ضریب موثر در تغییر $K_Q$	ضریب موثر در تغییر $K_T$	ضریب موثر در تغییر $\eta$
۰/۵	۱/۰۶۸۳۶	۱/۰۵۳۶	۰/۹۸۶
۰/۶	۱/۱۸۷۳۳	۱/۱۹۴۸	۱/۰۰۶
۰/۷	۱/۱۹۸۷۳	۱/۱۸۹۲	۰/۹۹۲
۰/۸	۱/۱۸۷۵	۱/۱۸۱۲	۰/۹۹۵
۰/۹	۱/۱۹۷۲۸	۱/۲۳۰۱	۱/۰۲۷
۱	۱/۲۱۳۸	۱/۲۵۱۱	۱/۰۳۱
۱/۱	۱/۲۱۰۹۳	۱/۴۹۶۷	۱/۲۳۶
۱/۲	۱/۱۹۳۰۸	۱/۱۸۸۲	۰/۹۹۶
۱/۳	۱/۱۸۸۳	۱/۱۶	۰/۹۷۶
۱/۴	۱/۲۲۰۷۴		

جدول ۴: تأثیر کاهش ۰/۵ رادیان زاویه اسکوپ بر

ضرایب هیدرودینامیکی در هر ضریب پیشروی

ضریب پیشروی J	ضریب موثر در تغییر $K_Q$	ضریب موثر در تغییر $K_T$	ضریب موثر در تغییر $\eta$
۰/۶	۰/۸۷۴۸	۱/۰۰۱۲	۱/۱۴۵
۰/۷	۰/۷۷۲	۱/۱۲۱۷	۱/۴۵۳
۰/۸	۱/۰۰۰۵	۰/۹۸۱	۰/۹۸۱
۰/۹	۱/۲۹۱۱	۱/۱۰۸۳	۰/۸۵۸
۱	۰/۹۵۴۳	۱/۲۸۳۴	۱/۳۴۵
۱/۱	۰/۹۰۸۷	۱/۳۹۹۴	۱/۵۴
۱/۲	۱/۰۸۱۳	۱/۷۴۵۶	۱/۶۱۴
۱/۳	۱/۴۰۹۳	۱/۹۹۸	۱/۴۱۸

در «نمونه ۵» برای بررسی تأثیر تغییرات زاویه یاو، از داده‌های تجربی تست انجام شده توسط دیسون (P. K. Dyson. 2000)، روی پروانه‌ی ۵ پره‌ای، استفاده شده است و در نمودارهای شکل (۴) این تأثیرات دیده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش زاویه یاو، ضرایب هیدرودینامیکی  $K_Q$  و  $K_T$  کاهش می‌یابند. شدت این کاهش، در ضریب  $K_T$  کمتر از ضریب  $K_Q$  می‌باشد. بنابراین، اگرچه پیش‌بینی



شکل ۲: میزان ضرایب هیدرودینامیکی و راندمان در مغروقت ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۸

نتایج این بررسی در محدوده ۰ تا ۱۵ درجه و با تغییر گام ۷/۵ درجه مطابق جدول (۶) می‌باشد. با توجه به ارزیابی‌های انجام شده بر اساس روش تحلیل حساسیت، در یک ضریب پیشروی مشخص، به ازای تغییر زاویه‌ی محور شفت به اندازه‌ی ۷/۵ درجه، تغییرات ضرایب هیدرودینامیک رفتاری خطی دارد (در جدول (۶)).

جدول ۶: تأثیر افزایش ۷/۵ درجه زاویه محور شفت بر ضرایب هیدرودینامیکی در هر ضریب پیشروی

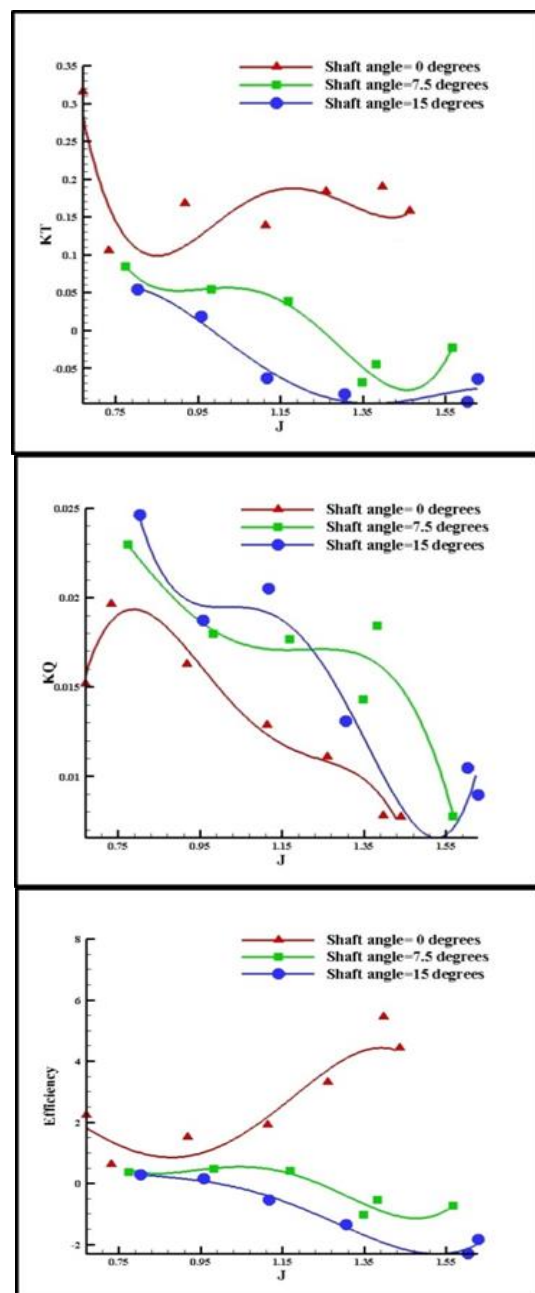
ضریب پیشروی	ضریب موثر در تغییر $K_T$	ضریب موثر در تغییر $K_Q$	ضریب $J$
۰/۶	۰/۲۴۲۴	۱/۳۴۰۱	۰/۶
۰/۷	۰/۲۲۷۸	۱/۲۷۶	۰/۷
۰/۸	۰/۳۷۹	۱/۲۷۵۵	۰/۸
۰/۹	۰/۷۸۳	۱/۲۴	۰/۹
۱	۰/۴۶۵۴	۱/۲۴۱۲	۱
۱/۱	۰/۴۰۲۳	۱/۳۱۷	۱/۱
۱/۲	۰/۴۹۹	۱/۳۳۴	۱/۲
۱/۳	۰/۲۳۷	۱/۸۶۹	۱/۳
۱/۴	۰/۲۳۹	۱/۳۵۷	۱/۴
		۱/۵۵۲۴	۱/۵

تأثیر این پارامتر فیزیکی در محدوده ۰ تا ۱۵ درجه و با تغییر گام ۵ درجه مطابق جدول (۷) است. با توجه به ارزیابی‌های انجام شده بر اساس روش تحلیل حساسیت، در یک ضریب پیشروی مشخص، به ازای تغییر زاویه‌ی یاو به اندازه‌ی ۱۰ درجه، تغییرات ضرایب هیدرودینامیک رفتاری خطی دارد (در جدول (۷)).

جدول ۷: تأثیر افزایش ۱۵ درجه زاویه یاو بر ضرایب هیدرودینامیکی در هر ضریب پیشروی

ضریب پیشروی	ضریب موثر در تغییر $K_T$	ضریب موثر در تغییر $K_Q$	ضریب $J$
۰/۶	۱/۰۰۵۴	۰/۹۸۴۲	۰/۶
۰/۷	۱/۰۱۵۲	۱/۰۳۶	۰/۷
۰/۸	۱/۰۰۷۱	۱/۰۳۱	۰/۸
۰/۹	۱/۰۱۲۴	۱/۰۷۰۳	۰/۹
۱	۱/۰۱۷۲	۰/۹۹۴۸	۱
۱/۱	۰/۹۹۲۲	۰/۹۶۸۳	۱/۱
۱/۲	۰/۹۶۶۸	۰/۹۳۳۵	۱/۲
۱/۳	۰/۹۵۶۱	۰/۹۳۰۳	۱/۳

تغییرات بازده عملکرد پروانه با توجه به کاهش همزمان دو ضریب هیدرودینامیکی و مطابق رابطه‌ی (۲)، مشکل می‌باشد، اما انتظار می‌رود که بازده عملکرد پروانه افزایش یابد. تأثیر پارامتر زاویه یاو، علاوه بر نمودارهای شکل (۴) که برای پروانه‌ی ۴ پره‌ای بدون اسکيو می‌باشد، برای ضرایب پروانه‌های ۴ پره‌ای با زاویه اسکيو و نیز پروانه ۵ پره‌ای ارائه شده در تست دیسون بررسی شد.



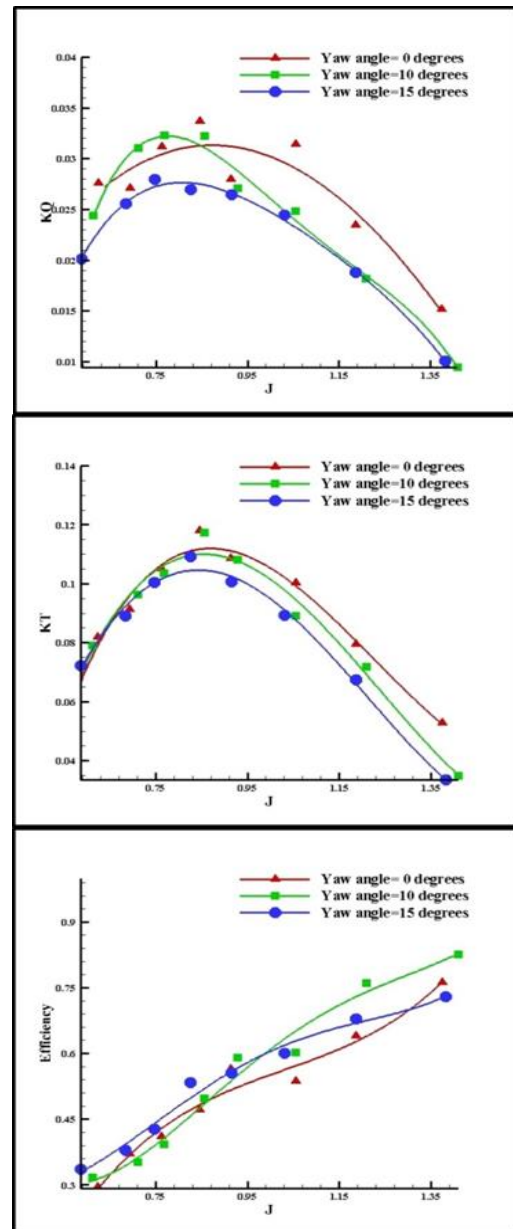
شکل ۳: تأثیر پارامتر زاویه انحراف محور شفت بر روی ضرایب هیدرودینامیکی و بازده پروانه نیمه‌مغروق



خصوص براساس جداول (۳) تا (۷) و تمامی نمونه‌های به‌دست‌آمده از آزمون‌های تجربی، ضرایب موثر در تمامی ضرایب پیشروی بدست آمده و سپس به صورت میانگین تاثیر وزنی همه‌ی پارامترها، به صورت درصدی از قطاع دایره، در نمودارهای شکل‌های (۵) تا (۷) ارائه شده است که بعضی از مقادیر مثبت و برخی منفی می‌باشد که مجموع قدرمطلق تمام این مقادیر برابر یک دایره کامل می‌باشد. به ترتیب مقادیر مثبت و منفی نشان دهنده‌ی تاثیر این پارامتر در افزایش و کاهش ضریب مربوطه هیدرودینامیکی و بازده می‌باشد.

در شکل (۵) سه نمودار ضرایب تراست، گشتاور و بازدهی در ضریب پیشروی  $0.6$  دیده می‌شود. در این شکل با توجه به مقادیر موجود در نمودار  $K_T$  دیده می‌شود که دو پارامتر تعداد پره و نسبت گام دارای علامت منفی می‌باشد و بنابراین سبب کاهش تراست می‌شود و در حالی که دیگر پارامترها تاثیری مثبت دارند.

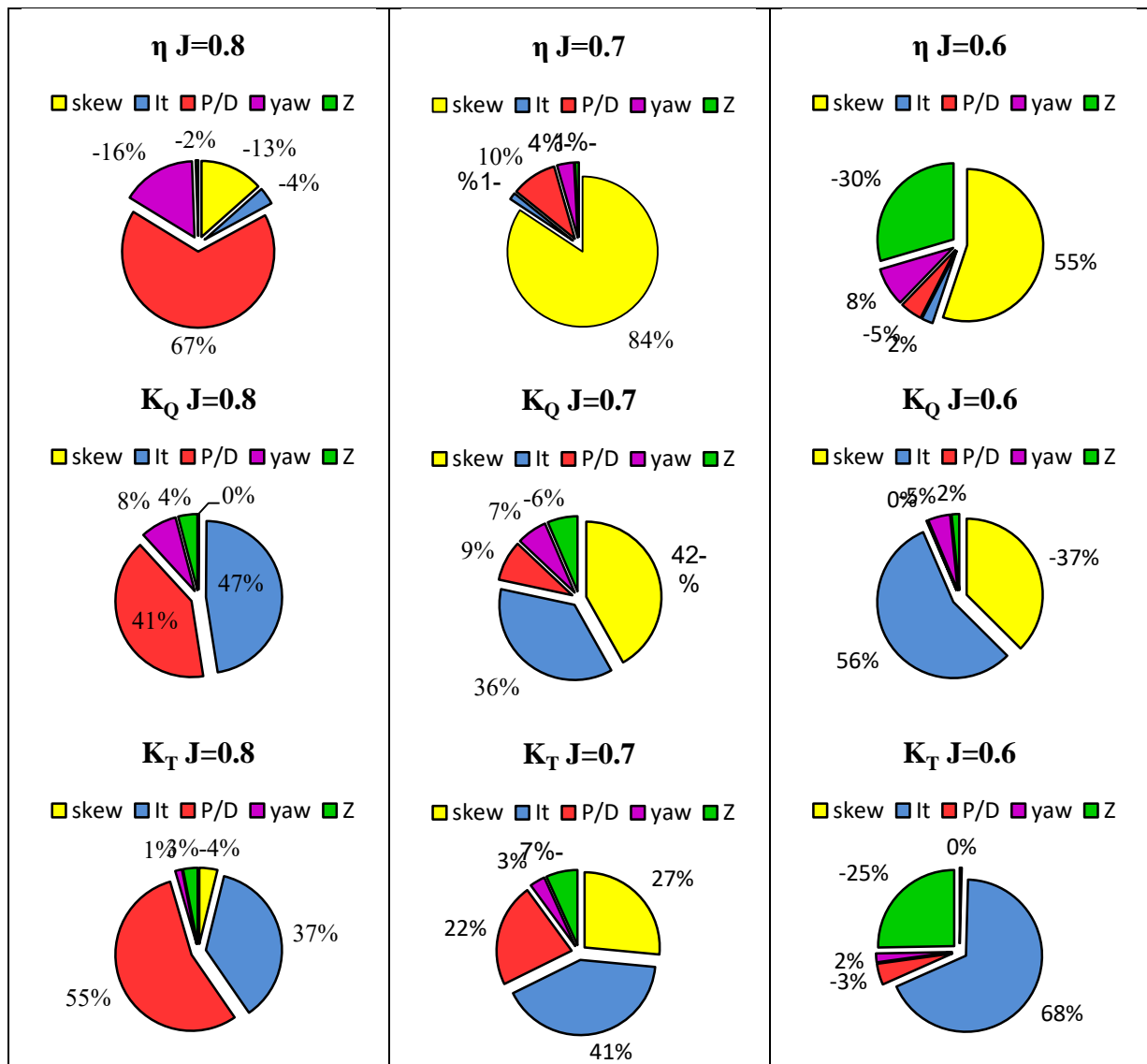
برای دستیابی به تراست بیشتر در ضریب پیشروی  $0.7$ ، با توجه به نمودار  $K_T$  در شکل (۶)، دیده می‌شود که سهم نسبت مغروقت بیشتر بوده است و با تغییر این پارامتر می‌توان سریع‌تر به تراست مورد نظر رسید؛ در حالی که زاویه یاو کمترین تاثیر در افزایش دارد. در حالت کلی تاثیر زائیه اسکيو سبب افزایش بازده پروانه می‌شود. با توجه به شکل (۷) دیده می‌شود که در ضریب پیشروی  $0.8$ ، مهمترین پارامتر و تاثیرگذارترین پارامتر، نسبت گام می‌باشد که هم سبب افزایش تراست و هم گشتاور می‌باشد و تاثیر به سزایی در افزایش بازدهی دارد. به طور مشابه برای ضرایب پیشروی  $0.9$  تا  $1/3$  نیز تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی بررسی شده است. به این ترتیب، با چشم‌پوشی از ضریب پیشروی‌های  $0.8$  و  $0.9$ ، کاهش پارامتر زاویه اسکيو بیشترین تاثیر را در مقایسه با سایر پارامترها در افزایش بازدهی پروانه داشته، در



شکل ۴: تأثیر پارامتر زاویه یاو بر روی ضرایب هیدرودینامیکی و بازده پروانه نیمه‌مغروق ۴ پره‌ای

طبق نتایج تأثیر این پارامتر در تغییر بازده سیستم و همین‌طور در ارضا کردن شرایط بسیار کم است. باتوجه به مطالب گفته شده؛ در یک شناور پس از برآورد نیازهای حداقل تراست، حداکثر گشتاور و بازدهی مناسب، گاهی دیده می‌شود که پروانه‌ی طراحی و انتخاب شده پاسخگوی نیازهای شناور نمی‌باشد و باتوجه به این نیازها لازم است تا با تغییر پارامترهای پروانه این نیازها برطرف شود. در این

دو حالت ۰/۸ و ۰/۹، پارامتر نسبت گام بیشترین تأثیر را در افزایش بازدهی دارد.



شکل ۷: وزن پارامترهای مؤثر در تغییر ضرایب هیدرودینامیکی در ضریب پیشروی ۰/۸

شکل ۶: وزن پارامترهای مؤثر در تغییر ضرایب هیدرودینامیکی در ضریب پیشروی ۰/۷

شکل ۵: وزن پارامترهای مؤثر در تغییر ضرایب هیدرودینامیکی در ضریب پیشروی ۰/۶

می‌باشد). می‌باشد و تغییر در پارامترهای زاویه یاو و اسکيو به ازای هر گام، به ترتیب سبب کاهش بازدهی به میزان ۳ و ۲ درصد می‌شوند. افزایش بازدهی با تغییر نسبت گام در ضریب پیشروی ۰/۹، ۵۶ درصد نسبت به گام قبلی می‌باشد. و پارامترهای زاویه اسکيو سبب کاهش بازدهی به میزان ۱۵ درصد می‌شوند. همان طور که بیان شد تأثیر پارامتر زاویه اسکيو در ضریب پیشروی ۱ و بالاتر بیش از دیگر پارامترها است

در ضریب پیشروی ۰/۷، با تغییر یک گام در زاویه اسکيو، افزایش بازدهی برابر با ۴۵ درصد می‌باشد<sup>۱۶</sup>. افزایش بازدهی با تغییر نسبت گام در ضریب پیشروی ۰/۸، ۹ درصد نسبت به گام قبلی (بازده اولیه ۱/۴

<sup>۱۶</sup> درصد ارائه شده برای هر پارامتر در نمودارهای شکل (۷)، تنها مقایسه‌ای بین پارامترهای موجود می‌باشد و نشان‌دهنده میزان تغییر نیست.

## منابع

- B. S., Yin Lu Young, et al. 2002. Numerical Modeling of Supercavitating and Surface-Piercing Propellers. Department of civil engineering, The university of texas at austin. Ph. D.
- Ghasemi, H., M. A. Hasanvand, et al. 2008. Hydrodynamic analysis of surface-piercing propeller. The sixth annual conference of the fundamentals of design and use of high speed draft. mazandaran, chaloos.
- Hadler, J. B. and R. Hecker. 1968. Performance of Partially Submerged Propellers. Proc 7th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics. Rome.
- Karimi, M. H., M. Nikfarjam, et al. 2007. Access to technical knowledge to design and build semi-submersible propeller. 6th National Symposium of Marine Industries, mazandaran, noor.
- Lorio, J. M. 2011. Open Water Testing of a Surface Piercing Propeller with Varying Submergence, Yaw Angle and Inclination Angle. Boca Raton, Florida, The College of Engineering and Computer Science. Master of Science in Ocean Engineering.
- M, Ferrando. 1997. "Surface piercing propellers: state of the art." *Oceanic Eng. International* 1 2: 40-49.
- M, Ferrando. and S. A. 1996. "Surface Piercing Propellers: Testing Methodologies, Result Analysis and Comments on Open Water Characteristics." (Small Craft Marine Engineering Resistance & Propulsion Symposium): 1-27.
- M, Ferrando. and S. A. 1999. "Surface piercing propellers: model tests procedures and comments on related a dimensional parameters." (Proceedings 5th Symposium on High Speed Marine Vehicles, Capri 24-26 March 1999.)
- M, Ferrando. V. M, et al. 2006. "Influence of Weber number on Surface Piercing Propellers model tests scaling." (Proceedings of 7th International Conference on Hydrodynamics (ICHHD), Ischia, 4-6 October 2006.

و از  $J=1$  تا  $J=1.3$  به ترتیب سبب افزایش  $0.34\%$ ،  $0.54\%$ ،  $0.61\%$  و  $0.41\%$  در بازدهی پروانه نسبت به گام قبلی می‌گردد.

## ۴. بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه تأثیر پارامترهای نسبت مغروقیت، زاویه یاو، زاویه اسکيو، زاویه انحراف محور شفت و نسبت گام به قطر، با استفاده از داده‌های تجربی تست‌های مختلف، ارزیابی شد. مهم‌ترین دستاوردهای این مطالعه عبارتند از:

- افزایش نسبت مغروقیت، سبب افزایش ضرایب هیدرودینامیکی تراست و گشتاور می‌شود، اما تأثیر چندانی بر روی بازده ندارد.
  - افزایش زاویه یاو، معمولاً سبب کاهش ضرایب هیدرودینامیکی می‌شود.
  - وجود زاویه اسکيو در هندسه پروانه، سبب افزایش ضرایب هیدرودینامیکی می‌شود. اما بازده پروانه، به ترتیب در اسکيو عقب، اسکيو مستقیم و اسکيو جلو کاهش می‌یابد.
  - افزایش زاویه انحراف شفت، سبب کاهش ضرایب هیدرودینامیکی می‌شود.
  - افزایش نسبت گام، سبب افزایش زیادی در مقدار ضرایب هیدرودینامیکی و نیز محدوده‌ی سرعت عملکرد شده، و همچنین مقدار حداکثر بازده نیز افزایش می‌یابد.
- طبق نتایج نمودارهای بخش دوم، دو پارامتر زاویه اسکيو و نسبت گام به قطر بیشترین تأثیر را در تغییر راندمان پروانه دارند و پارامترهایی مانند نسبت مغروقیت، که پارامتری فیزیکی بوده و حین نصب تأثیرگذار خواهد بود، می‌تواند بدون تغییر راندمان ضرایب تراست و گشتاور را افزایش یا کاهش دهد و بدین ترتیب در ارضا کردن شرایط، مؤثر واقع شوند.

- Misra, S. C., R. P. Gokarn, et al. 2012. "Development of a Four-Bladed Surface Piercing Propeller Series." *Naval Engineer s Journals* No. 124-4.
- Nozawa, K., N. Takayama, et al. 2002. *Hydrodynamic Performance and Exciting Force of SPP*. Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Osaka University Japan-IHI Marine United INC Japan.
- Olofsson, N. 1996. *Force and flow characteristics of a partially submerged propeller*. Department of Naval Architecture and Ocean Engineering. Goteborg, Chalmers University of Technology. Doctoral Thesis.
- P. K. Dyson. 2000. *Modelling, testing and design, of a surface piercing propeller drive*.
- Sadr, S., Khanzade, M., 2014. *Modeling and Simulation Electrical Propulsion System of Military Vessels*. *Journal of Marine Science and Technology* 13(2): 11-20.
- Shomalipur. B., saeidi, N., Kaabi, A., Hallafi, H., Reshnodi, A., 2013. *Evaluation of service level and the traffic transport patterns of the Imam Khomeini port transport network using traffic engineering patterns*. *Journal of Marine Science and Technology* 12(2): 115-129.

## Investigation of effect weight of parameters affecting the hydrodynamic coefficients in design of surface-piercing propellers

Donyavizadeh, Negin<sup>1</sup>. Shafaghat, Rouzbeh<sup>\*2</sup>. Dardel, Morteza<sup>2</sup>. Negharchi, Saeid Mohammadzade<sup>2</sup>

1. Ocean engineering, Babol Noshirvani University of Technology

2. Mechanical engineering faculty, Babol Noshirvani University of Technology

### Abstract

High speed craft with the wide and various uses of entertainment, sporting, commercial and military, usually has a top speed of 30 knots. Due to the limitations of the design, use of propulsion system is a key issue, with regard to the desirable features surface-piercing propeller, their use in the propulsion system of the vessel, has been very useful. High efficiency, no restrictions to increase the diameter, resistance equipment supplied propeller removed, the proper functioning of cavitation, are examples of these features. To achieve the best efficiency and thrust requirements, requires accurate determination of the coefficient of hydrodynamic thrust and torque. Given the importance of determining the coefficients and their dependence on various physical parameters and geometric, it is necessary to understand the effect of these parameters on the hydrodynamic coefficients, so in this study, experimental tests and collect data using sensitivity analysis, the weight of each parameter and the interaction of parameters surface-piercing propeller to evaluate the hydrodynamic coefficients on the propeller thrust, propeller torque, and therefore performance, is desired. Based on the results obtained, the parameters of step angle, skew and compared to other parameters, have the greatest impact in changing the propeller efficiency, while changing the ratio Immersion, the change will have little impact on efficiency and propeller.

**Key words:** surface-piercing propellers, propeller experimental testing, hydrodynamic coefficients, weight effect, design of propeller.

Figure 1. The effect of skew angle on the hydrodynamic coefficients and efficiency of surface piercing propeller with 4 blade.

Figure 2. The hydrodynamic coefficients and efficiency at  $I_t=0.3,0.5,0.8$ .

Figure 3. The effect of shaft angle on the hydrodynamic coefficients and efficiency of surface piercing propeller.

Figure 4. The effect of yaw angle on the hydrodynamic coefficients and efficiency of surface piercing propeller with 4 blade.

Figure 5. The weights of effective parameters in change of the hydrodynamic coefficients at  $J=0.6$ .

Figure 6. The weights of effective parameters in change of the hydrodynamic coefficients at  $J=0.7$ .

Figure 7. The weights of effective parameters in change of the hydrodynamic coefficients at  $J=0.8$ .

Table 1. The terms and conditions of the tests performed in different references.

Table 2. The samples used to evaluate the effect of parameters.

Table 3. Range of The evaluated parameters.

Table 4. The effect of reduce 0.5 radian in skew angle on the hydrodynamic coefficients at each advance ratio.

Table 5. The effect of increase 0.1 in immersion on the hydrodynamic coefficients at each advance ratio.

Table 6. The effect of increase 7.5 degrees in shaft angle on the hydrodynamic coefficients at each advance ratio.

Table 7. The effect of increase 15 degrees in yaw angle on the hydrodynamic coefficients at each advance ratio.

\* Responding author, Email: rshafaghat@nit.ac.ir