

## محاسبه تحلیلی نیروی پسای وارد بر هواناو در آب آرام و موج به منظور طراحی ملخ هوایی سامانه پیشرانش

مصطفی منفرد مسقانی<sup>۱\*</sup>، سید علیرضا شجاعی<sup>۲</sup>

[mmonfared@mut.ac.ir](mailto:mmonfared@mut.ac.ir)

[sadatshojaei70@gmail.com](mailto:sadatshojaei70@gmail.com)

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول، استادیار، مجتمع هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران.

<sup>۲</sup> فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، مجتمع هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۳

### چکیده

هواناو شناوری دومانظوره بوده که با استقرار روی بالشتکی از هوای فشرده با نیروی رانش به نسبت کمی روی سطوح آبی و خاکی حرکت می‌کند. این نوع شناور از قسمت‌های متعددی تشکیل شده که بسیاری از آن‌ها مختص این شناور بوده و در دیگر شناورها استفاده نمی‌شود. بنابراین تخمین مناسب نیروی پسای وارد بر این نوع وسایل نسبت به سایر شناورها بسیار پیچیده است. در این پژوهش، در ابتدا، انواع نیروی پسای وارد بر هواناوها در آب موج تشریح شده و روابط تحلیلی مورد استفاده برای هر کدام از موارد مطرح شده ارائه شده است؛ سپس برای نمونه نیروی پسای کل وارد بر یک هواناو با شرایط مشخص برای آب آرام و شرایط دریایی فورس ۳ محاسبه شده است. نتایج بیانگر این است که نیروی پسای هامپ در سرعت حدود ۱۰/۲ نات برای آب آرام و شرایط دریایی فورس ۳ به ترتیب در حدود ۳۰ و ۳۶/۲ کیلونیوتن است. همچنین ملخ مناسب برای هواناو مذکور به منظور تأمین نیروی پیشرانش برای غلبه بر نیروی پسای وارد بر هواناو طراحی شده و محاسبات مربوط به آن مانند نیروی پیشرانش ملخ بر حسب سرعت وسیله ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: هواناو، نیروی پسا، سرعت هامپ، آب آرام و موج، ملخ پیشران

## ۱. مقدمه

در بیانی ساده هواناو شامل سازه دریایی است که با یک سامانه معلق ماندن از سطح بلند شده و در نهایت با به کارگیری یک سامانه رانش حرکت می‌کند. نیروی پسای وارده بر یک هواناو در اثر حرکت وسیله روی سطح آب ایجاد می‌شود. نیروی پسای یکی از مهم‌ترین نیروهایی است که بر هواناو تأثیر می‌گذارد. این نیرو مستقیماً بر عملکرد و کارایی هواناو تأثیر دارد و کاهش آن می‌تواند به بهبود مصرف سوخت و افزایش سرعت و برد عملیاتی منجر شود. روش‌های مختلفی برای محاسبه نیروی پسا در هواناو وجود دارد که شامل مدل‌های تجربی، تحلیلی، عددی و ترکیبی می‌شوند. مدل‌های تجربی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، تجربی توسعه یافته و از آزمایش‌های میدانی بهره می‌برند. مدل‌های تحلیلی بر اساس اصول و معادلات بنیادی مکانیک سیالات مانند معادله‌های ناویر - استوکس توسعه می‌یابند. مدل‌های عددی از شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای و روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی استفاده می‌کنند تا جریان هوا و آب در اطراف هواناو را با دقت بالا شبیه‌سازی کنند. روش‌های ترکیبی از ترکیب مدل‌های تجربی، تحلیلی و عددی بهره می‌برند تا دقت بیشتری در محاسبات نیروی پسا به دست آورند. انتخاب روش مناسب به دقت مورد نیاز، منابع موجود و نوع کاربرد بستگی دارد و در عمل، استفاده ترکیبی از روش‌های مختلف می‌تواند به دقت و اطمینان بالاتری در محاسبات نیروی پسا در هواناو منجر شود. روش محاسبه نیروهای پسا وارده بر هواناو مشابه با تخمین نیروی پسای یک وسیله بدنه سرشی یا یک هواپیمای آب‌نشین یا قایق پرنده قبل از برخاست است. علاوه بر مؤلفه‌های نیروی پسای هیدرودینامیکی مرتبط با کشتی‌های معمولی، نیروی پسای هواناوها مؤلفه‌هایی مانند نیروی پسا پاششی<sup>۱</sup>، پسا اصطکاکی دامن و پسا اینرسی دامن نیز دارد. بنابراین محاسبات نیروی پسای وارد بر هواناو از سایر وسایل دریایی پیچیده‌تر است. به‌طور کلی نیروی پسای کل وارد بر یک هواناو به شرح زیر است [۱]:

$$R_{acv} = R_w + R_a + R_m + R_{sk} + R_{a''} \quad (1)$$

که در رابطه فوق  $R_{acv}$  نیروی پسا کل هواناو،  $R_w$  نیروی پسای تولید موج<sup>۲</sup> ناشی از بالشتک هوا،  $R_a$  نیروی پسای فرم آیرودینامیکی<sup>۳</sup>،  $R_m$  نیروی پسای مومنتوم آیرودینامیکی<sup>۴</sup>،  $R_{sk}$  نیروی پسای دامن<sup>۵</sup> و  $R_{a''}$  نیروی پسای مومنتوم ناشی از فرار هوا از دامن‌های جلو و عقب هواناو است. در ادامه روش‌های تحلیلی تعیین هر کدام از مؤلفه‌های نیروی پسای مذکور تشریح شده است.

## ۲. نیروی پسای تولید موج

بدنه به وسیله سطحی که شامل یک تابع پتانسیل متغیر است، نمایش داده می‌شود. این تابع پتانسیل، بیانگر فشار مثبت در بخش جلوی جسم و فشار مکش اطراف بخش انتهایی وسیله است. به‌منظور ساده‌سازی، بالشتک هوا با یک سطح مستطیلی شکل با توزیع فشار یکنواخت معادل‌سازی می‌شود، بنابراین نیروی پسای تولید موج را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه نمود [۲]:

$$R_w = C_w \left[ \frac{p_c^2 \cdot B_c}{\rho_w \cdot g} \right] \quad (2)$$

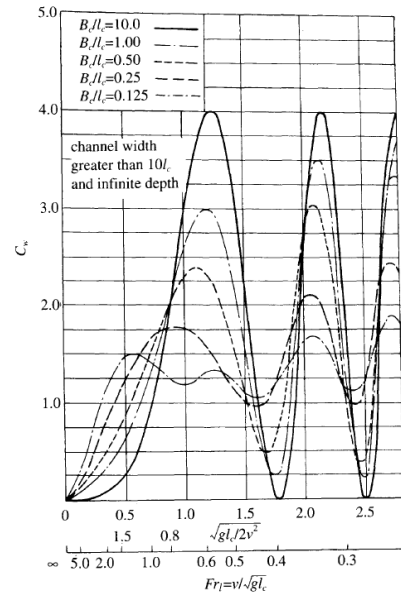
که

$$C_w = f \left( Fr, \frac{l_c}{B_c} \right) \quad (3)$$

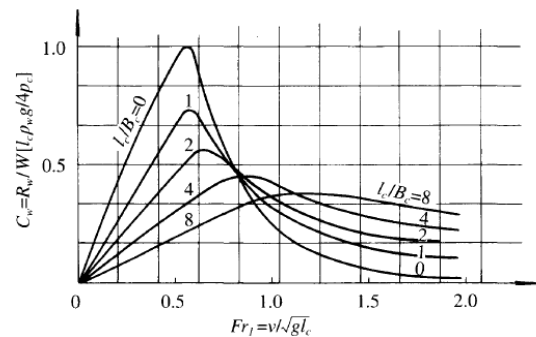
در رابطه بالا  $R_w$  نیروی پسای تولید موج (N)،  $p_c$  فشار بالشتک (N/m<sup>2</sup>)،  $B_c$  عرض بالشتک (m)،  $l_c$  طول بالشتک (m)،  $\rho_w$  دانسیته آب (kg/m<sup>3</sup>)،  $g$  شتاب جاذبه (m/s<sup>2</sup>)، و  $C_w$  ضریب پسای تولید موج ناشی از حرکت بالشتک هوا روی یک مسیر آبی با طول نامحدود (شکل ۱) هستند.

شکل ۱ بیانگر  $C_w$  برحسب عدد فرود برای نسبت‌های مختلف  $\frac{l_c}{B_c}$  می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که برای نسبت  $\frac{l_c}{B_c}$  در محدوده ۲ تا ۴، مقدار نیروی پسا در حدود عدد  $Fr=0.33$ ، افزایش چشمگیری داشته؛ بنابراین در طی طراحی وسیله، تأمین نیروی پیشرانس لازم در این محدوده سرعت می‌بایست در نظر گرفته شود. شکل ۲ که با تفسیر از شکل ۱ به‌دست آمده است، نشان‌دهنده تغییر  $C_w$  نسبت به  $\frac{l_c}{B_c}$  برای اعداد فرود

مختلف است که برای نسبت کمتر از حدود ۶، نیروی پسای هامپ اولیه در عدد فرود ۰/۵۶ شروع می شود.



شکل ۱.  $C_w$  بر حسب عدد فرود برای نسبت های مختلف  $\frac{B_c}{l_c}$



شکل ۲.  $C_w$  بر حسب عدد فرود برای نسبت های ثابت  $\frac{l_c}{B_c}$

ذکر این نکته حائز اهمیت است که نیروی پسای تولید موج با  $p_c^2$  و عرض بالشتک نسبت مستقیم دارد. همچنین نیروی پسای وسیله به میزان قابل توجهی با افزایش طول آن کاهش می یابد. در حقیقت نیروی پسای تولید موج را می توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\frac{R_w}{\rho_c S_c} = \frac{R_w}{W} = \sin a' \quad (4)$$

که  $a'$  شیب متوسط موج تولید شده توسط حرکت بالشتک هوایی است. بنابراین معادله ۲ را می توان به صورت زیر نوشت:

$$R_w = C_w \left[ \frac{p_c^2 \cdot B_c}{\rho_w \cdot g} \right] = C_w \cdot \frac{1}{\rho_w g} \cdot \frac{p_c}{l_c} \quad (5)$$

یا در حالت دیگر:

$$\frac{R_w}{W} = f \left( Fr, \frac{l_c}{B_c}, \frac{p_c}{l_c} \right) \quad (6)$$

که  $\frac{p_c}{l_c}$  نسبت فشار به طول هواناو است. همان طور که گفته شد، نیروی پسای تولید موج تابعی از نسبت طول به عرض بالشتک، نسبت فشار به طول و عدد فرود است. بنابراین نسبت طول به عرض بالشتک نقش بسیار مهمی در افزایش عملکرد وسیله خواهد داشت.

همچنین از رابطه زیر برای تخمین نیروی پسای تولید موج استفاده می شود:

$$R_w = C_w (4 p_c W) / \rho_w g l_c \quad (7)$$

که  $l_c$  طول معادل بالشتک است که  $l_c = \frac{S_c}{B_c}$  بوده و  $S_c$  مساحت بالشتک است.

با مقایسه ضرایب برای نیروی پسای تولید موج بالشتک هوایی با طرح های مختلف، بالشتک هوایی مستطیلی به طور ویژه در نزدیکی سرعت هامپ دارای حداقل ضریب می باشد. همچنین با در نظر گرفتن نسبت نیروهای پسا و برآ  $\frac{R_w}{W}$  بالشتک هوایی مستطیلی شرایط بسیار مناسبی دارد.

ضریب شکل برای یک بالشتک هوایی به صورت نسبت میان پوش مستطیلی به مساحت واقعی تعریف می شود:

$$\varphi_s = \left( \frac{l_c B_c}{S_c} \right)^2 \quad (8)$$

همچنین نسبت بی بعد فشار به طول بالشتک برابر است با:

$$\bar{p}_c = \frac{W / l_c B_c}{(\rho_w g l_c)} \quad (9)$$

بنابراین:

$$\frac{R_w}{W} = C_w \varphi_s \bar{p}_c \quad (10)$$

از معادله های بالا می توان نتیجه گرفت که برای مقادیر ثابت طول بالشتک  $l_c$ ، عرض بالشتک  $B_c$  و وزن وسیله  $W$ ، نسبت بی بعد فشار-طول بالشتک ثابت خواهد بود و  $\varphi_s$  با تغییر شکل بالشتک، تغییر می کند. بالشتک هوایی با سطح مقطع مستطیلی، حداقل مقدار  $\varphi_s$  را دارا بوده که برابر با یک است،

طراحی سازه فوقانی هواناوها به این نکته می‌بایست توجه ویژه نمود [۱ و ۳].

در حالت کلی، ضریب  $C_a$  در محدوده ۰/۴ تا ۰/۶ در نظر گرفته می‌شود. مقادیر حدی ۰/۳ و ۰/۷۵، به ترتیب برای خطوط آیرودینامیکی مناسب و نامناسب است. برای نمونه ضریب  $C_a$  برای US Voyager و JEFF(B) به دلیل داشتن عرشه باز برای جا دادن مخازن و بارهای بزرگ، مقدار ۰/۷۵ را دارد.

جدول ۱ ضریب آیرودینامیکی  $C_a$  برای هواناوهای مختلف [۱]

نوع هواناو	ضریب $C_a$
SR.N2	25.0
SR.N4	3.0
SR.N5	38.0
SKMR.1	398.0
SK-5	28.0
JEFF (B)	495.0
Voyageur	75.0
N500	3.0

#### ۴. نیروی پَسای مومنتوم

هوای فشرده می‌بایست به درون بالشتک هوایی دمیده شود تا جایگزین هوای نشسته خارج شده از زیر دامن‌های بالشتک شود و وسیله روی بالشتک حرکت کند. بنابراین سرعت جرم هوای فشرده شده درون بالشتک می‌بایست تا سرعت وسیله افزایش یابد. نیروی پَسای ناشی از تغییر مومنتوم جرم هوای مذکور را نیروی پَسای مومنتوم می‌نامند و به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱]:

$$R_m = \rho_a Qv \quad (12)$$

که  $R_m$  نیروی پَسای مومنتوم (N)،  $Q$  نرخ جریان هوای ورودی ( $m^3/s$ )،  $\rho_a$  دانسیته هوا ( $kg/m^3$ ) و  $v$  سرعت وسیله ( $m/s$ ) است.

همچنین مقدار  $C_w$  نیز در این حالت کمینه خواهد بود. بنابراین بالشتک هوایی با شکل مستطیلی علاوه بر مزیت نسبت مناسب نیروی پَسای تولید موج به وزن، توانایی برخاست بسیار مناسبی در طی سرعت هامپ خواهد داشت.

انتخاب شکل مناسب بالشتک در کنار پارامترهای نسبت مناسب نیروی پَسای مناسب به برآ و قابلیت بالا در برخاست، مواردی مانند چیدمانی وسیله، پیکربندی، ساخت دامن و مقاومت‌های لازم برای حرکت در آب دریا را نیز می‌بایست در نظر گرفت.

مطالعات مطرح شده در این بخش با فرض توزیع یکنواخت فشار هوای درون بالشتک همراه با یک ناپوستگی به صورت تغییر ناگهانی فشار در لبه‌های بالشتک است. تغییر ناگهانی فشار برای هواناوها با دامن‌های انعطاف پذیر وجود ندارد و بنابراین روش‌های مذکور مقداری خطای محاسباتی دارد.

#### ۳. نیروی پَسای شکل آیرودینامیکی

نیروی پَسای شکل آیرودینامیکی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_a = C_a \frac{\rho_a}{2} S_a v^2 \quad (11)$$

که  $R_a$  نیروی پَسای شکل آیرودینامیکی (N)،  $C_a$  ضریب آیرودینامیکی نیروی پَسای شکل و  $S_a$  مساحت تصویر شده پیشانی بدنه در بالای آب ( $m^2$ ) است.  $C_a$  به میزان قابل توجهی با پروفیل آیرودینامیکی بدنه وسیله وابسته است. مقدار این ضریب به طور معمول از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به آزمون‌های تونل باد به دست می‌آید. جدول ۱ [۱] بیانگر داده‌های آزمون تونل باد مربوط به ضریب  $C_a$  برای مدل‌ها و وسایل مختلف است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار ضریب  $C_a$  برای هواناوها به طور کلی کوچک است. نیروی پَسای آیرودینامیکی هواناوها به دلیل سرعت طراحی بالای آن‌ها، بخش مهمی از نیروی پَسای کل را شامل می‌شود. به طور نمونه نیروی پَسای آیرودینامیکی هواناو 711-A ساخت کشور چین در حدود ۳۰ درصد از نیروی پَسای کل در سرعت ۸۵ کیلومتر بر ساعت را شامل می‌شود. بنابراین در

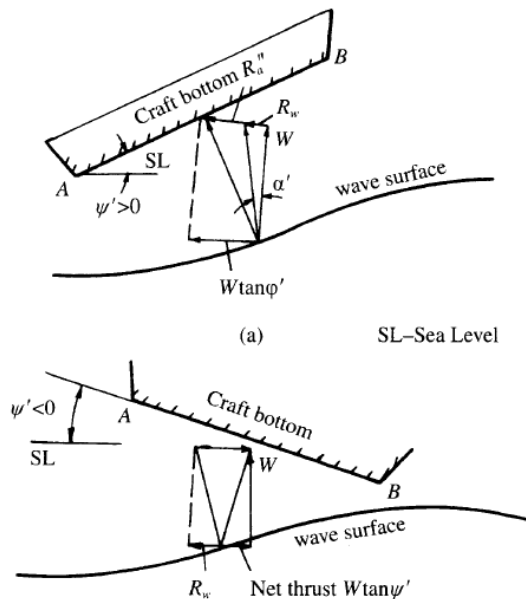
الف: هنگامی که  $\Psi' > 0$  آنگاه وسیله برای حالتی که دماغه آن به سمت بالا است، حرکت می کند  
بنابراین:

$$R_{a'} = W \tan \psi' - R_w \quad (16)$$

ب: هنگامی که  $\Psi' < 0$  آنگاه وسیله برای حالتی که دماغه آن به سمت پایین می باشد حرکت می کند.  
بنابراین:

$$R_{a'} = -W \tan \psi' - R_w < 0 \quad (17)$$

که در این حالت  $R_{a''}$  تبدیل به یک نیروی پیشرانس برای وسیله می شود.



شکل ۳. نمای شماتیک از دامن های جلو و عقب هواناو [۱]

## ۶. نیروی پسای دامن

مؤلفه های نیروی پسای دامن به شرح زیر است:

$$R_{sk} = R_{sf} + R_{sp} + R_{ss} + R_{si} \quad (18)$$

که  $R_{sk}$  نیروی پسای کل دامن،  $R_{sf}$  نیروی پسای اصطکاکی دامن،  $R_{sp}$  نیروی پسای فشاری دامن،  $R_{ss}$  نیروی پسای اسپری دامن و  $R_{si}$  نیروی پسای اینرسی دامن هستند [۱].

درواقع  $R_{si}$  نیروی پسای تولید موج ناشی از ارتعاشات دامن در فرکانس بالایی است و به همین دلیل با توجه به اینکه این

## ۵. نیروی پسای مومنتوم ناشی از فرار هوا

بر اساس تئوری مومنتوم، نیروی پسای مومنتوم ناشی از فرار هوا از دامن های جلو و عقب هواناو که اصطلاحاً پسای توازن نیز نامیده می شود را می توان از رابطه زیر محاسبه نمود [۱]:

$$R_{a'} = \rho_a (\phi h_1 B_c P - \phi h_2 B_c P) \approx W a'' \quad (13)$$

که  $R_{a'}$  نیروی پسای توازن،  $\phi$  ضریب تخلیه ناشی هوا (که در حالت کلی مقداری بین ۰/۵ تا ۰/۶ در نظر گرفته می شود)،  $h_1$  فاصله ناشی هوا در جلو وسیله که همان فاصله عمودی میان نوک پایین دامن های جلو وسیله و خط آبخور بوده (m)،  $h_2$  فاصله ناشی هوا در عقب وسیله (m)،  $a''$  زاویه تریم میان خط آبخور و خط اتصال نوک های پایین جلو/عقب وسیله است (°)،  $p_c$  فشار بالشتک ( $N/m^2$ ) و  $P$  برابر است با:

$$P = \sqrt{2 p_c / \rho_a} \quad (14)$$

همچنین  $R_{a''}$  را می توان به صورت زیر نیز محاسبه نمود:

$$R_{a''} = \frac{W}{l_c} [(z_b - t_{bi}) - (z_s - t_{si})] \quad (15)$$

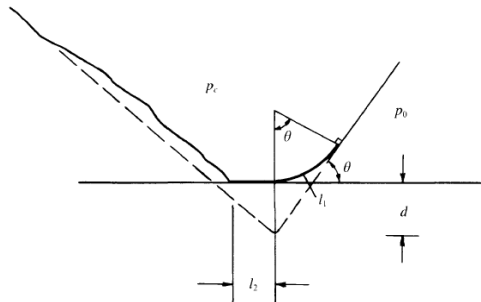
که در این رابطه  $z_b$  و  $z_s$  به ترتیب فاصله عمودی نوک پایینی دامن های جلو و عقب هواناو از خط پایه هستند (m) و  $t_{bi}$  و  $t_{si}$  نیز فاصله عمودی خط آب در جلو و عقب شناور نسبت به خط پایه هستند.

$R_{a''}$  به نسبت طول به عرض بالشتک، عدد فرود، نسبت فشار به طول بالشتک، محل مرکز ثقل (CG) وسیله و  $z_b$  و  $z_s$  وابسته است. به طور کلی پیش بینی و تخمین مناسب از  $R_{a''}$  دشوار است. با توجه به نوع هواناوهای طراحی شده، مقدار  $a''$  در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۵ در نظر گرفته می شود [۱ و ۳].

همچنین با توجه به شکل ۳، چنانچه خط AB یک خط ارتباطی میان لبه پایینی بالشتک در سینه و پاشنه وسیله باشد و  $\Psi'$  زاویه میان سطح دریا و خط AB باشد، آنگاه نتایج زیر قابل استخراج است:

$$R_{sf} = 0.032 \left( \frac{k}{p_z} \right)^{0.2} p_z q_w \quad (21)$$

که ضریب زبری معادل و فشار دینامیکی  $0.5\rho_w V^2$  می باشد.



شکل ۴. تغییر شکل دامن انعطاف پذیر در تماس با آب [۱]

#### ۶-۲. نیروی پسای فشاری دامن

این نیرو با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$R_{sp} = (p_c - p_0)d = p_c d \quad (22)$$

همان طور که گفته شد، تخمین سایر مؤلفه های نیروی پسای دامن مانند نیروی پسای اسپری و اینرسی بسیار دشوار است. بنابراین از روابط تجربی جهت تخمین نیروی پسای کل دامن استفاده می شود:

$$R_{sk} = R_{sk1} + R_{sk2} \quad (23)$$

$$R_{sk1} = C_{sk1} \times 10^{-6} \left( \frac{h}{I_j} \right)^{-0.34} I_j S_c^{0.5} q_w \quad (24)$$

$$R_{sk2} = C_{sk2} R_w \quad (25)$$

$$C_{sk2} = \left[ 2.8167 \left( \frac{p}{I_c} \right)^{-0.259} \right] - 1 \quad (26)$$

که  $R_{sk1}$  نیروی پسای خیس شوندگی و  $R_{sk2}$  نیروی پسای تولید موج ناشی از دامن می باشد.  $h$  متوسط فاصله هوای نشی بوده که در شرایط استاتیکی معلق ماندن هوانا و برابر با  $h = \frac{S_j}{I_j}$  می باشد.  $S_j$  بیانگر مساحت هوای نشی زیر دامن و  $I_j$  طول محیطی هوای نشی است. همچنین همان طور که قبلاً اشاره شد  $R_w$  نیروی پسای تولید موج بالشتک است. همچنین ضریب  $C_{sk1}$  به طور معمول در بازه ۲/۵ تا ۳/۵ در نظر گرفته می شود یا از رابطه زیر به دست می آید:

نیروی پسا وابسته به جرم دامن آن را نیروی پسای اینرسی می نامند.

$R_{sp}$  نیز در نتیجه فشار بالشتک و بارهای داخلی روی بخش تغییر شکل یافته دامن در بالای آب است که سبب ایجاد بالانس موضعی میان فشار آب وارده به بخش مغروق دامن در آب است.

به طور کلی نیروی پسای اصطکاکی دامن بیشترین سهم را در میان سایر مؤلفه دارد. نیروی پسای دامن برای آزمایش های انجام شده روی مدل در حوضچه کشش از مقادیر مربوط به آزمون های مقیاس کامل مدل کمتر بوده و در حدود ۳۵ درصد از نیروی پسای کل را شامل می شود در صورتی که در آزمایش های مربوط به مدل با مقیاس واقعی، برای زوایای تریم نامناسب این سهم در حدود ۵۵ درصد از سهم نیروی پسای کل است. در ادامه هر کدام از مؤلفه های مربوط به نیروی پسای دامن تشریح شده است.

#### ۶-۱. نیروی پسای اصطکاکی دامن

با توجه به شکل ۴، نیروی وارد بر دامن و همچنین تغییر شکل مربوط به آن را می توان به شرح زیر محاسبه نمود:

$$L_1 + L_2 = \frac{[d + R(1 - \cos \theta)]}{\sin \theta} \quad (19)$$

$L_1$  طول کمان بخشی از دامن که در تماس با سطح آب (m)،  $L_2$  بخش مسطح از دامن در نزدیکی سطح آب (m)،  $R$  شعاع انحنای بخش خمیده دامن (m)،  $d$  عمق درون آب دامن (m) و  $\theta$  زاویه انحراف دامن ( $^\circ$ ) می باشند [۴].

با نوشتن بالانس نیرویی نتیجه زیر حاصل می شود:

$$D = (p_c - p_0)R = p_c R = R_{sf} \quad (20)$$

$D$  کشش دامن بر واحد عرض (N/m)،  $p_c$  فشار بالشتک ( $N/m^2$ )،  $p_0$  فشار اتمسفر بوده که صفر در نظر گرفته می شود.

از آنجایی که عدد رینولدز برای دامن بالا بوده و سطح دامن نیز زبر است،

آنگاه:

$$A_3 = \frac{0.0435}{Fr_l} + 19.28\bar{x}_G^2 - 0.01956\bar{w} + 0.00048\bar{w}^2 - 2.29\bar{w} - \frac{0.0033}{k_p - 1} - 0.0502\alpha_k + 0.0582\alpha_\sigma - 0.01625\bar{Q} + 0.00295\bar{w}$$

پارامترهای به کار گرفته شده در معادله بالا در جدول ۲ تشریح شده است [۴].

جدول ۲. پارامترهای موجود در معادله نیروی پسای حرکت در امواج

$\bar{h}_B = \frac{h_B}{h_{\Gamma_0}}$	ارتفاع نسبی موج در امواج منظم
$h_B$	ارتفاع موج در امواج منظم، m
$h_{\Gamma_0}$	ارتفاع رسیور، m
$\bar{x}_G = \frac{x_G}{l_c}$	فاصله بی بعد مرکز ثقل وسیله از مرکز ثقل سطح بالشتک در طول
$x_G$	فاصله مرکز ثقل شناور از مرکز ثقل سطح بالشتک در طول، m
$\bar{h}_\varepsilon = \frac{h_\varepsilon}{h_{\Gamma_0}}$	ارتفاع نسبی فینگرها
$h_\varepsilon$	ارتفاع فینگرها، m
$\bar{\lambda}_B = \frac{\lambda_B}{l_c}$	طول موج نسبی
$\lambda_B$	طول موج، m
$\bar{Q}_h = Q \left( h_{\Gamma_0} \sqrt{\frac{2W}{\rho}} \right)^{-1}$	ضریب دبی هوا
$\bar{w} = \sqrt{\frac{2\pi}{\lambda_B} + Fr_l \left( \frac{2\pi}{\lambda_B} \right)}$	فرکانس نسبی
$\bar{W} = \frac{W}{\rho g S^2}$	ضریب بارگذاری
$\sigma\alpha$	زاویه شاخص انعطاف پذیری بخش های جانبی
$k\alpha$	زاویه شاخص انعطاف پذیری عقب
$k_p$	ضریب فشار

## ۷-۲. نیروی پسای باقی مانده

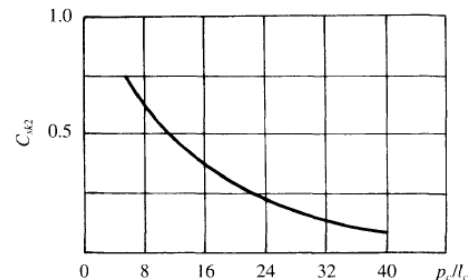
نیروی پسای باقی مانده هواناو در امواج بر اساس روابط تجربی و تست های آزمایشگاهی به شرح زیر است [۵]:

$$R_0 = 0.063G(A + B + C + D) \quad (30)$$

$$A = -0.00019 + 0.70939\bar{x}_G + 0.07559(10\bar{x}_G)^2 - 0.10470(10\bar{x}_G)^3$$

$$C_{sk1} = 1.35 + 0.11 \frac{P_c}{l_c} \quad (27)$$

به علاوه اینکه ضریب  $C_{sk2}$  از معادله ۲۶ یا شکل ۵ به دست می آید [۵ و ۶].



شکل ۵. ضریب  $C_{sk2}$  بر حسب نسبت  $p_c/l_c$  [۱]

## ۷. محاسبه نیروی پسا در آب موج

در این بخش از پژوهش با استفاده از استانداردهای طراحی به دست آمده از نتایج تجربی در حوضچه کشش، نیروهای مقاوم وارده بر هواناو در آب موج محاسبه شده است. بر این اساس نیروی پسای کل وارد بر هواناو در آب موج به شرح زیر است:

$$R_{tot} = R_w + R_m + R_a + R_0 + \Delta R \quad (28)$$

که  $R_w$ ،  $R_m$ ،  $R_a$ ،  $R_0$  و  $\Delta R$  به ترتیب بیانگر نیروی پسای موج سازی، نیروی پسای مومنتوم، نیروی پسای آیرودینامیکی، نیروی پسای باقی مانده و نیروی پسای حرکت در امواج هستند. در ادامه نحوه محاسبه هر کدام از این نیروها به تفکیک بیان شده است. نیروهای پسای آیرودینامیکی و پسای مومنتوم مشابه با حالت جریان آرام است [۴].

## ۷-۱. نیروی پسای حرکت در امواج

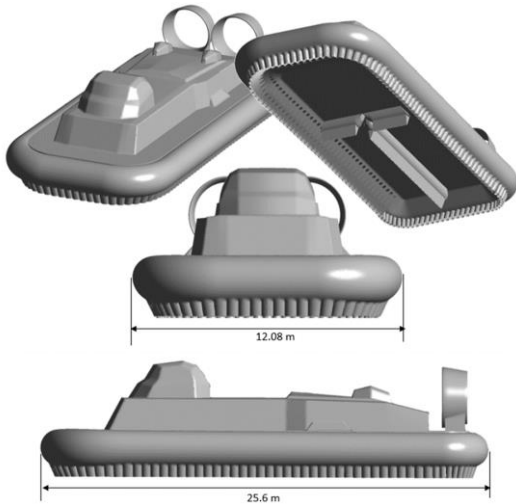
نیروی پسای حرکت هواناو در امواج بر اساس روابط تجربی و تست های آزمایشگاهی به شرح زیر است:

$$\frac{\Delta R}{W} = 0.00136 - \bar{h}_B \cdot (A_1) + \bar{h}_B^2 [A_2 + A_3] - 0.051\bar{h}_B^3 \quad (29)$$

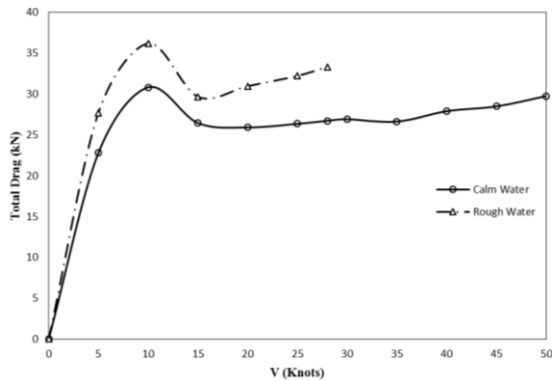
$$A_1 = \left( 0.2376 \frac{\bar{x}_G}{Fr_l} + 0.0672 Fr_l \cdot \bar{h}_\varepsilon \right)$$

$$A_2 = Fr_l \cdot \left( \begin{array}{l} 0.7216 - 0.0504 Fr_l - 2.353 \bar{x}_G \\ + 2.554 Fr_l \cdot \bar{x}_G^2 - 0.0582 \bar{\lambda}_B \\ - 2.044 \bar{Q}_h + 3.41 \bar{Q}_h^2 \end{array} \right)$$

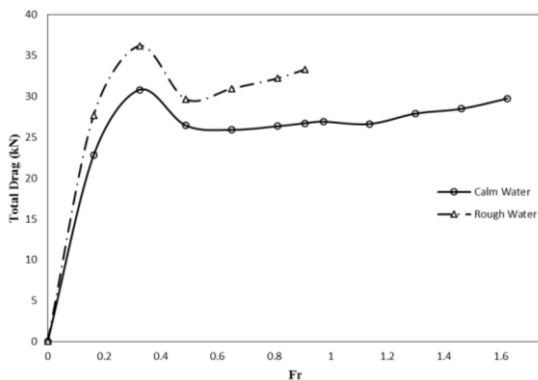
حدود ۳۰ و ۳۶/۲ کیلونیوتن است. همچنین بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل ۸، پسای هامپ در فرود ۰/۳۳ رخ داده است.



شکل ۶. مدل هندسی هواناو مورد مطالعه



شکل ۷. نیروی پسای هامپ بر حسب سرعت



شکل ۸. نیروی پسای هامپ بر حسب عدد فرود طولی

### ۹. محاسبات نیروی پیشرانس ملخ هوایی هواناو

در این بخش، ملخ هواناو برای تولید نیروی پیشرانس مورد نیاز برای حرکت در آب آرام، موج طراحی و تحلیل

$$B = -0.16229Fr_i \bar{x}_G + 0.00253Fr_i^2 + 0.00816 \frac{1}{Fr_i^2} + 0.01363(10\bar{x}_G)^3$$

$$C = 1.61875 \times 0.276\bar{x}_G - 0.2123 - 0.22425 \times 0.2\bar{x}_G$$

$$D = 0.21163\bar{Q}_h - 0.20044 \frac{\bar{G}_\eta}{1.1} + 0.0006 \frac{4}{1}$$

در رابطه فوق  $\eta$  بیانگر نسبت طول به عرض بالشتک و مابقی پارامترها در جدول ۲ معرفی شده است.

### ۷-۳. نیروی پسای موج سازی

مقدار پسای موج سازی برابر است با:

$$R_w = \frac{k_B B_c P_c^2}{\gamma} \quad (31)$$

که در رابطه بالا  $k_B$  ضریب تجربی پسای موج سازی،  $B_c$  عرض بالشتک،  $P_c$  فشار بالشتک و  $\gamma$  وزن مخصوص آب است.

### ۸. محاسبات نیروی پسای وارد بر یک هواناو

در ادامه به منظور بررسی روابط تحلیلی ارائه شده، نیروی پسای وارد بر یک هواناو با شرایط مشخص برای شرایط آب آرام و شرایط دریایی فورس ۳ محاسبه شده است. هواناو مورد نظر در شکل ۶ نشان داده شده است. طول و عرض هواناو در حالت معلق ماندن به ترتیب برابر با ۲۵/۶ و ۱۲/۰۸ متر است. همچنین ارتفاع بالشتک ۱/۴ متر است. به علاوه اینکه وزن کلی هواناو ۵۰ تن در نظر گرفته شده است.

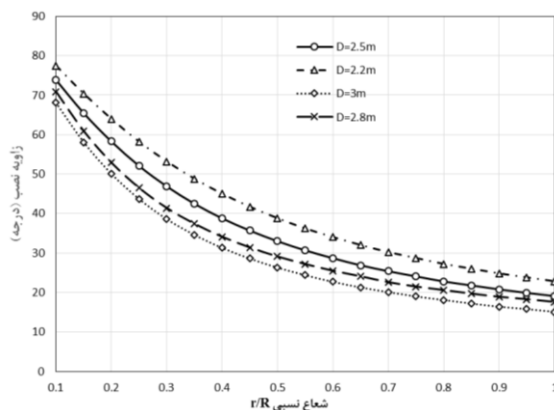
حداکثر سرعت هواناو در آب آرام و شرایط دریایی فورس ۳ به ترتیب ۵۰ نات و ۲۸ نات لحاظ شده است.

نتایج مربوط به نیروی پسای وارد بر هواناو، بر اساس روابط تحلیلی ارائه شده (۳۰) در بخش های قبلی و با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۱/۲ در شکل های ۷ و ۸ نسبت به سرعت و عدد فرود نمایش داده شده است. همان طور که از نتایج مشخص است نیروی پسای هامپ در سرعت حدود ۱۰/۲ نات برای آب آرام و شرایط دریایی فورس ۳ به ترتیب در

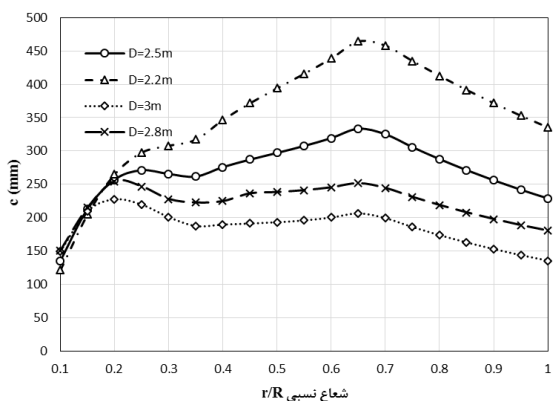


113 برای انتقال هموار از ناحیه B به C استفاده شده است. پروفیل Clark Y دارای سطح صاف در زیر خود بوده و برای مقطع تیغه از ۵۰٪ شعاع به بالا مناسب است (ناحیه D). با عبور از ناحیه میانی عدد ماخ محلی روی پره ملخ به تدریج افزایش می‌یابد. از این رو انتخاب پروفیل‌هایی با قابلیت عملکرد بهینه در این گونه رژیم جریان سیال، الزامی است. پروفیل MH 114 برای مقطع میانی بین ناحیه D و E مطلوب است. پروفیل MH 116 نیز برای ناحیه F نزدیکی نوک تیغه عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد. در انتها نیز استفاده از پروفیل MH 120 برای نوک تیغه استفاده شده است. جدول زیر ویژگی ابعادی و عملکردی پروفیل مقاطع منتخب را نشان می‌دهد [۷ و ۸].

بنابراین براساس مقاطع انتخاب‌شده، پارامترهای هندسی ملخ طراحی شده برحسب شعاع نسبی در نمودارهای ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱۰. زاویه نصب ملخ با قطرهای مختلف برحسب شعاع نسبی

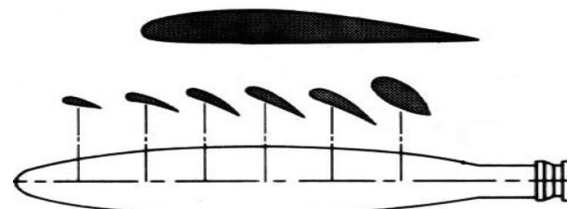


شکل ۱۱. وتر ملخ با قطرهای مختلف برحسب شعاع نسبی

شده است. طراحی بر اساس مقادیر اولیه طراحی، شامل توان موتور، حداکثر سرعت وسیله و دور ملخ انجام پذیرفته که به ترتیب برابر با ۷۵۰ اسب بخار، ۵۰ نات و ۱۴۰۰ دور در دقیقه در نظر گرفته شده است.

از آنجاکه برای تأمین نیروی پیشران از دو ملخ استفاده شده است، بنابراین دو موتور با توان‌های مساوی اسب بخار ۷۵۰ در نظر گرفته شده است. بنابراین با توجه به موارد یادشده و محدودیت‌های ابعادی، محاسبات ملخ برای قطرهای ۲/۲، ۲/۵، ۲/۸ و ۳ متر و تعداد پره‌های ۵ عدد انجام شده است.

مطابق شکل زیر از ۶ ناحیه با سطح مقطع‌های متفاوت برای طراحی پروفیل پره ملخ استفاده شده است. هرکدام از ایرفویل‌های موجود با توجه به خصوصیات هندسی خود برای مقطع خاصی از پره ملخ مناسبند.



شکل ۹. نمونه تغییرات پروفیل سطح مقطع در طول پره ملخ

در ریشه پره به علت تنش پیچشی زیاد از ایرفویل‌هایی با نسبت منطری (نسبت ضخامت به وتر) بالا استفاده می‌شود. از طرفی دیگر در نواحی نزدیک به ریشه سرعت مماسی پایین است، لذا برای تولید نیروی برآ و برطرف نمودن مشکل سرعت مماسی، زوایای حمله نسبت به سایر مقاطع بیشتر می‌شود. پروفیل MH 126 برای ریشه ملخ گزینه مناسبی است. در ناحیه A، این پروفیل محدوده وسیع‌تری از زاویه حمله را بدون جدایش پوشش می‌دهد و ضخامت لازمه را برای این مقطع دارا می‌باشد. با دور شدن از ریشه پره، رفته‌رفته از میزان نسبت منطری و زاویه حمله کاسته می‌شود. پروفیل MH 112 برای مقطعی از پره ملخ که پس از ریشه قرار می‌گیرد (ناحیه B) مناسب است. این پروفیل عملکردی مشابه با پروفیل ناحیه A داشته که بهبود سرعت مماسی سبب کاهش نسبی زاویه حمله و نسبت منطری در این ناحیه می‌شود. در ناحیه C شرایط با افزایش سرعت از پروفیل MH

## ۱۰. نتیجه گیری

نیروی پسای هواناو در آب آرام شامل عبارت‌های نیروی پسای تولید موج ناشی از بالشتک هوا، نیروی پسای فرم آیرودینامیکی، نیروی پسای مونتوم آیرودینامیکی، نیروی پسای دامن و نیروی پسای مونتوم ناشی از فرار هوا از دامن‌های جلو و عقب هواناو است.

نیروی پسای موج‌سازی، نیروی پسای مونتوم، نیروی پسای آیرودینامیکی، نیروی پسای باقی‌مانده و نیروی پسای حرکت در امواج، عبارات اصلی نیروی پسای وارد بر هواناو در آب موج هستند.

بر اساس نتایج تجربی، برای نسبت  $l/B_c$  در محدوده ۲ تا ۴، مقدار نیروی پسا در حدود عدد  $Fr=0.33$ ، افزایش چشمگیری داشته، بنابراین در طی طراحی وسیله، تأمین نیروی پیشرانس لازم در این محدوده سرعت می‌بایست در نظر گرفته شود.

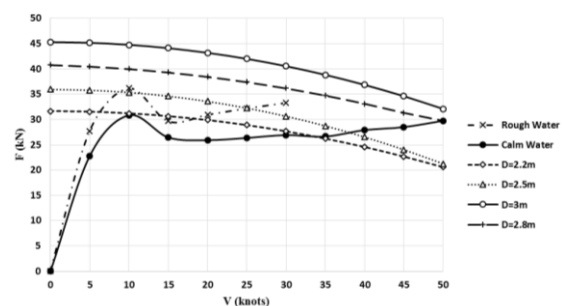
نیروی پسای تولید موج، تابعی از نسبت طول به عرض بالشتک، نسبت فشار به طول و عدد فرود است. بنابراین طراحی مناسب نسبت طول به عرض بالشتک نقش بسیار مهمی در افزایش کارایی وسیله دارد.

به دلیل سرعت بالای هواناوها، نیروی پسای آیرودینامیکی بخش مهمی از نیروی پسای کل را شامل می‌شود. همچنین ضریب آیرودینامیکی  $C_a$  در محدوده ۰/۴ تا ۰/۶ قرار دارد و مقادیر حدی ۰/۳ و ۰/۷۵، به ترتیب برای وسایل با خطوط آیرودینامیکی مناسب و نامناسب در نظر گرفته می‌شود.

نتایج تحلیلی مربوط به هواناو مورد مطالعه بیانگر این است که نیروی پسای هامپ در سرعت حدود ۱۰/۲ نات برای آب آرام و شرایط دریایی فورس ۳ به ترتیب در حدود ۳۰ و ۳۶/۲ کیلونیوتن است. همچنین پسای هامپ در عدد فرود ۰/۳۳ رخ داده است.

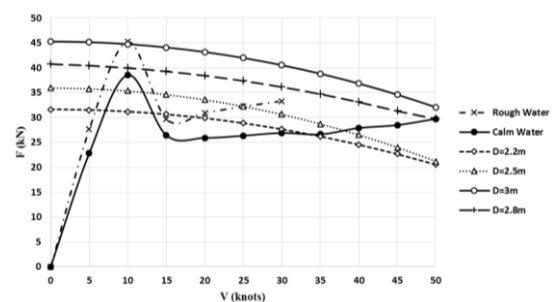
نیروی پیشرانس ملخ به ازای سرعت‌های مختلف وسیله در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این نمودار به منظور مقایسه نیروی پیشرانس برای ملخ با قطرهای مختلف، مقادیر نیروی پسا برای جریان آب آرام و موج نیز در نمودار نشان داده شده است. همان‌طور که عنوان شد مقادیر نیروی پسا با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۱/۲ طراحی شده است. به‌طور معمول برای تحلیل دقیق‌تر مقدار نیروی پسای هامپ با ضریب اطمینان ۱/۵ نیز مورد ارزیابی قرار گرفته و در نمودار ۱۳ نشان داده شده است.

نتایج بیانگر این موضوع است که ملخ با قطر ۳ متر حتی برای حالتی که نیروی پسای سرعت هامپ با ضریب اطمینان ۱/۵ نیز در نظر گرفته شده است، نیروی پیشرانس مورد نیاز در آب آرام و شرایط دریایی فورس ۳ را تأمین می‌کند. همچنین چنانچه ضریب اطمینان ۱/۲ در نظر گرفته شود، ملخ با قطر ۲/۸ نیروی پیشرانس لازم در سرعت‌های مختلف در آب آرام و شرایط دریایی ۳ را تأمین می‌کند و ملخ با قطر ۲/۵ برای آب آرام تا سرعت ۴۰ نات و برای شرایط دریایی ۳ تا سرعت ۲۵ نات، نیروی پیشرانس مورد نظر را ایجاد می‌کند.



شکل ۱۲. تغییرات نیروی رانش بر حسب سرعت در مقایسه با نیروی پسا با

ضریب اطمینان ۱/۲



شکل ۱۳. تغییرات نیروی رانش بر حسب سرعت در مقایسه با نیروی پسا با

ضریب اطمینان ۱/۵ برای سرعت هامپ

g	شتاب جاذبه، $m/s^2$
Q	نرخ جریان هوا، $m^3/s$
$\rho_w$	دانشیته آب، $kg/m^3$
$\rho_a$	دانشیته هوا، $kg/m^3$
$\dot{a}$	شیب متوسط موج، °
$\ddot{a}$	زاویه تریم، °
$\theta$	زاویه انحراف دامن، °
$\alpha_\sigma$	زاویه شاخص انعطاف پذیری جانبی، °
$\alpha_k$	زاویه شاخص انعطاف پذیری عقب، °
$l_c$	طول بالشتک، m
$B_c$	عرض بالشتک، m
$h_1$	فاصله عمودی نشتی هوا در جلو وسیله، m
$h_2$	فاصله عمودی نشتی هوا در عقب وسیله، m
$z_b$	فاصله عمودی دامن جلو از خط پایه وسیله، m
$z_s$	فاصله عمودی دامن عقب از خط پایه وسیله، m
$t_{bi}$	فاصله عمودی خط آب خور جلو از خط پایه وسیله، m
$t_{si}$	فاصله عمودی خط آب خور عقب از خط پایه وسیله، m
$L_1$	طول کمان دامن در تماس با آب، m
$L_2$	طول بخش مسطح دامن در نزدیکی سطح آب، m
R	شعاع انحنای دامن، m
d	عمق دامن درون آب، m
$L_2$	طول بخش مسطح دامن در نزدیکی سطح آب، m
$L_2$	طول بخش مسطح دامن در نزدیکی سطح آب، m
$h_B$	ارتفاع موج در امواج منظم، m
$\bar{h}_B$	ارتفاع نسبی موج، m
$h_{r0}$	ارتفاع رسیور، m
$h_e$	ارتفاع فینگر، m
$\bar{h}_e$	ارتفاع نسبی فینگر، m
$\lambda_B$	طول موج، m
$\bar{\lambda}_B$	طول موج نسبی، m
$x_G$	فاصله طولی مرکز ثقل از مرکز ثقل سطح بالشتک، m
$\bar{x}_G$	فاصله بی بعد مرکز ثقل، m
$S_a$	مساحت تصویر شده، $m^2$
Fr	عدد فرود
$C_w$	ضریب پسای تولید موج
$\Phi_s$	ضریب شکل بالشتک
$\varphi$	ضریب تخلیه نشتی هوا
$C_a$	ضریب آیرودینامیکی

- نتایج بیانگر این موضوع است که ملخ با قطر ۳ متر حتی برای حالتی که نیروی پسای سرعت هامپ با ضریب اطمینان ۱/۵ نیز در نظر گرفته شده است، نیروی پیشرانش موردنیاز در آب آرام و شرایط دریایی فورس ۳ را تأمین می کند. همچنین چنانچه ضریب اطمینان ۱/۲ در نظر گرفته شود، ملخ با قطر ۲/۸ نیروی پیشرانش لازم در سرعت های مختلف در آب آرام و شرایط دریایی ۳ را تأمین می کند و ملخ با قطر ۲/۵ برای آب آرام تا سرعت ۴۰ نات و برای شرایط دریایی ۳ تا سرعت ۲۵ نات، نیروی پیشرانش موردنظر را ایجاد می کند.

### سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از محققان دانشگاه صنعتی مالک اشتر که ما را در انجام این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند.

### پیوست

$R_{acv}$	نیروی پسای کل، N
$R_w$	نیروی تولید موج، N
$R_a$	نیروی پسای فرم آیرودینامیکی، N
$R_m$	نیروی پسای مومنتوم آیرودینامیکی، N
$R_{a'}$	نیروی پسای ناشی از فرار هوا، N
$R_o$	نیروی پسای باقیمانده، N
$\Delta R$	نیروی پسای حرکت در امواج، N
$R_{sk}$	نیروی پسای دامن، N
$R_{sf}$	نیروی پسای اصطکاکی دامن، N
$R_{sp}$	نیروی پسای فشاری دامن، N
$R_{ss}$	نیروی پسای اسپری دامن، N
$R_{si}$	نیروی پسای اینرسی دامن، N
W	وزن وسیله، N
D	کشش دامن، N/m
$P_c$	فشار بالشتک، Pa
$\bar{P}_c$	فشار بی بعد بالشتک
$P_o$	فشار اتمسفر، Pa
$q_w$	فشار دینامیکی، Pa
V	سرعت وسیله، m/s

k	ضریب زبری
k <sub>p</sub>	ضریب فشار
k <sub>B</sub>	ضریب تجربی پسای موج سازی
$\bar{W}$	ضریب بارگذاری
$\bar{Q}_k$	ضریب دبی هوا
$\bar{\omega}$	فرکانس نسبی

### مراجع

- [1] Yun L, Bliault A. Theory and design of air cushion craft. Elsevier; 2000 May 26.
- [2] Newman JN. Wave resistance of a moving pressure distribution in a canal. DTMB report. 1962.
- [3] Hoerner SF. Fluid Dynamic Drag, published by the author. Midland Park, NJ. 1965:16-35.
- [4] Plackett M, Wade R. Design aspects of seal systems for air cushion vehicles. In:Advanced Marine Vehicles Conference 1978 Apr 17 (p. 755).
- [5] Plackett M. Design Aspects of Seal Systems for Air Cushion Vehicles. AIAA/SNAME Advanced Marine Vehicles Conference. U.S.A: San Diego, California; 1978.
- [6] Chaplin JB. Amphibious Surface Effect Vehicle Technology--Past, Present and Future. 1974.
- [7] Houghton EL, Carpenter PW. Aerodynamics for engineering students. Elsevier; 2003 Feb 12.
- [8] Trillo RL. Jane's high-speed marine craft and air cushion vehicles. (No Title). 1989.

### پی نوشت ها

- <sup>1</sup> Spray Drag
- <sup>2</sup> Wave-Making Drag
- <sup>3</sup> Aerodynamic Profile Drag
- <sup>4</sup> Aerodynamic Momentum Drag
- <sup>5</sup> Skirt Drag