

بررسی اثر تغییر زاویه عرضی کف قایق پرنده روی نیروی برخورد با آب در فرود متقارن

هاشم مرادی^۱

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

امیرحسین نیک‌سرسشت^۲

دانشکده مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی شیراز

چکیده

قایق‌های پرنده از جمله شناورهای دریایی پرسرعتی هستند که در آنها طراحی مناسب هندسه زیر بدنه، اسکی‌ها و محاسبه نیروهای وارد بر کف آنها برای انتخاب سازه مناسب و همچنین ایجاد شناوری بهتر برای برخاست از سطح آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های تحلیلی بررسی این نیروها با در نظر گرفتن پدیده‌هایی مثل لزجت سیال، نیروی جاذبه، نیروی کشش سطحی و جریان هوای اطراف آب، عملاً امکان پذیر نیست. همچنین ساخت مدل‌های متفاوت و انجام آزمایش روی آنها به زمان و هزینه زیادی نیاز دارد. در این تحقیق، سعی شده که با استفاده از روش عددی حجم محدود و روش حجم سیال معادلات ناویر-استوکس در حالت دو فازی حل شود و اثر تغییر زاویه عرضی مقطع کف قایق پرنده روی نیروهای وارد بر آن بررسی شود. سپس، با استخراج روابطی بر حسب پارامترهای بی‌بعد برای محاسبه مقدار حداکثر نیرو وارد بر کف قایق‌های پرنده و نیز محل اعمال آن، گامی جدید در طراحی راحت‌تر و سریع‌تر و انتخاب مناسب زاویه عرضی و همچنین کاهش هزینه‌های محاسبات و ساخت برداشته شود. نتایج حل حاضر در مقایسه با روش‌های تحلیلی و عددی دیگر دقیق‌تر بوده و در آن اثرات لزجت و آشفتگی سیال، نیروی جاذبه، کشش سطحی و جریان هوای اطراف آب در نظر گرفته شده است.

واژه‌های کلیدی: قایق پرنده، زاویه عرضی، کف قایق پرنده، نیروی برخورد، گوشه

Investigation of the Dead-rise Angle Effects on the Slamming Force of a Flying Boat in Symmetric Landing

H. Moradi

School of Sea Eng.
Shiraz Univ. of Tech.

A. H. Nik-Seresht

School of Mech. & Aerospace Eng.
Malek-Ashtar Univ. of Tech.

ABSTRACT

The suitable design of the keel and skis is of great significance in reduction of impact load on the bottom surface of the flying boats and in hydrodynamic stability during take-off and landing. No theoretical tools are available to handle the effects of viscosity, gravity, and surface tension. Also, the experimental procedures in the laboratory are both time-consuming and expensive. In this paper, numerical simulation of two-phase flow in the water impact problem of a WIG with VOF method and finite volume methods are taken into account and the effect of changing the dead-rise angle on the slamming force is investigated. An algebraic relation based on the dimensionless parameters for the maximum slam force is developed. This is a new step towards choosing the optimum dead-rise angle of the keel and skis of flying boats, faster and easier and decreases the cost of numerical calculations.

Key Words: Flying Boat, Dead-rise Angle, Slamming Force

۱- کارشناس ارشد (نویسنده پاسخگو): h_moradikh@yahoo.com

۲- استادیار

۱- مقدمه

قایق پرنده که به WIG¹ معروف است به شناوری گفته می‌شود که قادر است در نزدیک سطح آب پرواز نماید (شکل ۱). این شناورها را می‌توان وسیله‌ای در محدوده عملکرد بین هاورکرافت و هواپیما دانست که برای بهره‌برداری از مزیت اثر سطح^۲ طراحی شده‌اند و بیشتر در ناحیه نزدیک سطح پرواز می‌کنند. برخی از انواع قایق‌های پرنده می‌توانند تا ارتفاعی همانند ارتفاع پرواز هواپیما پرواز کنند؛ اما اغلب در این شرایط پروازی عملکرد ضعیف‌تری نسبت به هواپیما دارند. قایق پرنده روی بالشتکی از هوا که توسط هندسه خاص شناور و جریان آیرودینامیکی هوا حول آن ایجاد می‌شود حرکت می‌کند. این بالشتک هوا زمانی ایجاد می‌گردد که قایق پرنده از سرعت کافی برخوردار باشد و نیروی بالابر ایجاد شده توانایی جداسازی قایق پرنده را از سطح آب داشته باشد [۱].



شکل (۱): نمایی از یک نوع قایق پرنده.

ضربات آب یکی از بحرانی‌ترین پدیده‌ها در مهندسی سازه‌های دریایی و طراحی شناور است که در چند مورد باعث شکستن سازه و آسیب‌دیدگی شناورها شده است. از جمله اثرات نیروی برخورد با آب در شناورها، تلف کردن سرعت شناور و ایجاد ارتعاش در بدنه آن می‌باشد که نهایتاً منجر به آسیب‌دیدگی کامل سازه شناور می‌شود. با افزایش سرعت شناور، تأثیر این نیرو به شدت افزایش می‌یابد. چون قایق‌های پرنده در محل پله فرود می‌آیند، بنابراین در آنها پدیده ضربه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و اگر سازه قایق پرنده در این ناحیه خوب طراحی نشود می‌تواند باعث شکستگی و یا آسیب‌دیدگی آن شود.

برای محاسبه نیروی حاصل از ضربه هیدرودینامیکی، تحقیقات زیادی صورت گرفته است، ولی به علت وجود پیچیدگی‌های فراوان در این پدیده، هنوز روش تحلیلی مناسبی برای بررسی آن وجود ندارد. ضربه هیدرودینامیکی اولین بار توسط فون کارمن^۳ در سال ۱۹۲۹ مورد مطالعه قرار گرفت. کارمن روشی تحلیلی با استفاده از تئوری اندازه حرکت و روش جرم افزوده برای پیش‌بینی ضربه وارد به هواپیمای آب‌نشین ارائه نمود [۲]. کارمن در این تحقیق با فرض غیرلزج، غیرچرخشی و تراکم‌ناپذیر بودن سیال و بدون در نظر گرفتن اثر نیروی جاذبه و کشش سطحی، رابطه‌ای برای محاسبه نیروی وارد بر یک گوشه بدست آورد و اندازه حرکت جسم را قبل از برخورد برابر با اندازه حرکت جسم بعد از برخورد به اضافه اندازه حرکت مقدار آبی که به همراه جسم به حرکت درمی‌آید، در نظر گرفت. بنابراین نیروی هیدرودینامیکی جسمی که با سرعت ثابت به سطح آب برخورد می‌کند، برابر نرخ تغییر اندازه حرکت جرم آب اضافه شده است. این تئوری توسط وگنر^۴ در سال ۱۹۳۲ اصلاح شد و اثر بالا آمدن آب از دو سمت جسم نیز در نظر گرفته شد [۳]. تحقیقات بیشتر در این زمینه توسط فابولا^۵ [۴] در سال ۱۹۵۷ و فردیناند^۵ [۵] در سال ۱۹۶۶ انجام شده است. نتایج تئوری‌های فوق بدون در نظر گرفتن اسپری آب، اثر نیروی جاذبه و کشش سطحی و جدائی جریان از جسم به دست آمده است. به همین دلیل از سال ۱۹۸۵ روش‌های عددی برای در نظر گرفتن همه عوامل مؤثر در پدیده برخورد و به منظور کسب نتایج بهتر مورد توجه قرار گرفت. آری^۶، سَمز^۸ و مظفری‌جا^۹ از مهمترین افرادی هستند که در این زمینه کار کرده‌اند. در مرجع [۶] روش‌های عددی بکار رفته توسط آنها مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به اهمیت طراحی زیر بدنه قایق پرنده و اثر انتخاب زاویه عرضی مناسب در کاهش مقدار نیروی ضربه و یا کاهش مقدار نیروی پسا در هنگام شناوری، در این مقاله،

3-Von Karman

4-Wagner

5-Fabula

6-Ferdinand

7-Arai

8-Sames

9-Muzafferija

1-Wing In Ground

2-Ground Effect

می‌گردد. این روش، به روش قطعه‌ای خطی^۱ مشهور است [۹-۱۰].

در بررسی سطح آزاد باید دو شرط مرزی دینامیکی و سینماتیکی ذرات ارضاء شود. شرط دینامیکی عملاً همان شرط پیوستگی فشار در سطح آزاد است که به صورت خودبه‌خود در حل معادله ناور-استوکس در سلول‌های دو فاز اعمال می‌شود؛ ولی شرط سینماتیک که بیان‌کننده حرکت سطح آزاد سیال است، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{D\alpha}{Dt} = \frac{\partial\alpha}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla\alpha = 0.0. \quad (1)$$

به تعبیر دیگر، این معادله مشخصه قانون بقای حجم یک فاز نیز می‌باشد که در آن بردار سرعت سیال است. همچنین خصوصیات مانند دانسیته و ویسکوزیته در سلول‌های میانی دو سیال به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\rho^* = \sum \alpha_q \rho_q \quad \mu^* = \sum \alpha_q \mu_q, \quad (2)$$

که در آن، ρ_q و μ_q دانسیته و ویسکوزیته هر فاز و ρ^* و μ^* دانسیته و ویسکوزیته میانگین در سلول‌های دوفازی می‌باشد. در این روش یک معادله اندازه حرکت برای هر دو فاز در کل میدان حل می‌شود و سرعت به‌دست آمده در سلول‌های دو فاز برای هر دو سیال یکسان در نظر گرفته می‌شود. ولی مقادیر ρ و μ در این معادله به نسبت حجمی سیال‌های موجود در حجم کنترل بستگی دارد که از رابطه (۲) قابل محاسبه است. با توجه به اینکه جریان غیرقابل تراکم در نظر گرفته می‌شود، معادله پیوستگی عبارت است از:

$$\text{div } \vec{V} = 0.0, \quad (3)$$

و معادله اندازه حرکت نیز در جهت z برای جریان آرام به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{D}{Dt}(\rho u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} [\mu (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] + \rho g_j + F_j. \quad (4)$$

در این معادله P فشار، g_j شتاب ثقل در جهت z ، F_j نیروهای خارجی در جهت z می‌باشد. ذکر این مطلب لازم است که برای جداسازی ترم‌های جابه‌جایی در معادله اندازه

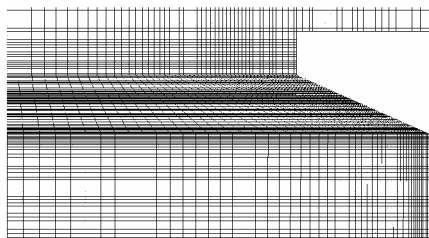
به کمک نرم‌افزاری که بر اساس روش حجم محدود کار می‌کند، جریان دو فاز حول مقطع کف قایق پرنده در محل پله در زاویه‌های عرضی مختلف در فرود متقارن حل شده است. آنگاه با مقایسه نتایج این حل‌ها، رابطه‌هایی کلی بر حسب پارامترهای بی‌بعد برای بیشترین مقدار نیرو و محل اعمال آن در زوایای عرضی مختلف استخراج شده است تا با به‌کار بردن این روابط در طراحی مکرر این وسیله، نیازی به اجرای مجدد و زمانبر حل‌های CFD نباشد.

۲- معادلات حاکم

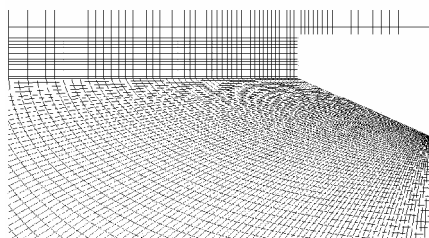
روش حل کردن مسائل سطح آزاد در بررسی دقیق این پدیده تأثیر بسزایی دارد. از این رو انتخاب شیوه مناسب در این خصوص از ضروریات حل عددی می‌باشد. دو روش اساسی از نظر انتخاب نوع شبکه برای حل مسائل سطح آزاد وجود دارد. روش اول، استفاده از شبکه متحرک و منطبق بر سطح آزاد است. این روش عملاً برای جریان‌های ساده کاربرد دارد و در هندسه‌های پیچیده مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. روش دوم، به‌کارگیری شبکه ثابت برای حل مسائل سطح آزاد است، که این روش اغلب در مسائل عملی برای جریان‌های پیچیده بکار گرفته می‌شود [۷-۸].

یکی از متداول‌ترین و قویترین روش‌های مورد استفاده در حل مسائل سطح آزاد در گروه دوم، روش حجم سیال است که در حل مسائل دریایی کاربرد زیادی دارد. با توجه به قابلیت فراوان روش فوق، در این تحقیق نیز برای مدل کردن سطح آزاد سیال از همین روش استفاده شده است. در این روش، یک پارامتر عددی به نام α به عنوان نسبت حجمی یک سیال مرجع در هر سلول نسبت به حجم هر سلول در نظر گرفته می‌شود. اگر سلولی از سیال مرجع کاملاً پر باشد، مقدار α برابر یک و اگر سلولی خالی از سیال مرجع باشد، مقدار α برابر صفر می‌شود. بنابراین در سلول‌هایی که قسمتی از آنها با سیال مرجع پر شده است، مقدار α بین صفر و یک می‌باشد. یادآوری می‌شود که در این روش سطح سیال به صورت غیرمستقیم مدل می‌گردد. یعنی ابتدا نسبت‌های حجمی در مرز دو سیال حساب می‌شود و سپس با توجه به این نسبت‌ها و با استفاده از $\nabla\alpha$ در هر سلول، یک خط به عنوان سطح آزاد رسم

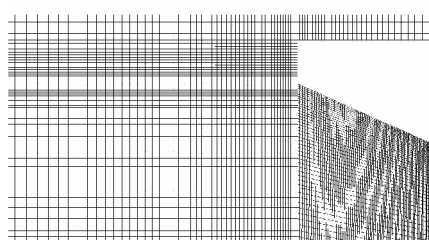
عامل مهم گیر افتادن حباب‌ها، شکستگی زیاد شبکه است. بنابراین چون در شبکه سازمان نیافته، شکستگی‌های زیادی وجود دارد، برای جریان دو فازی مناسب نیست و بهتر است بجای آن از شبکه منظم یا سازمان یافته استفاده شود. مهمترین شبکه‌های استفاده شده در اطراف جسم در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. از میان این شبکه‌ها، شبکه نشان داده شده در شکل ۳ ج به دلیل یکنواخت بودن همگرایی و کم بودن زمان اجرا از شبکه‌های دیگر بهتر است. البته در این نوع شبکه هم مقداری حباب در اطراف جسم محبوس می‌شد که با بهینه‌سازی آن و کم کردن شکستگی‌ها، شبکه شکل ۳ د بدست آمد که در آن هیچ‌گونه حبابی اطراف بدنه باقی نمی‌ماند. بنابراین در ادامه، تمام تحلیل‌ها روی این نوع از شبکه‌بندی انجام شده است.



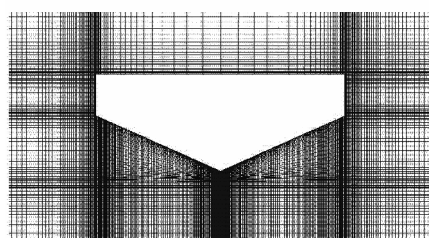
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

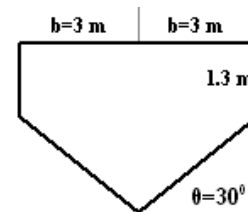
شکل (۳): انواع شبکه حول مدل.

حرکت از تکنیک روش توانی^۱ و برای کوپل معادله فشار و سرعت از روش پیزو^۲ استفاده شده است.

۳- ضربه هیدرودینامیکی یک گوشه

قایق‌های پرنده از جمله شناورهای دریایی پرسرعتی هستند که در طراحی آنها، طراحی بدنه و قسمت زیرین آن از اهمیت خاصی برخوردار است. مقطع سینه زیرین این شناورها و قایق‌ها تقریباً شبیه گوشه است. در شکل ۲ مدل گوشه با زاویه عرضی ۳۰ درجه مشاهده می‌شود. در این مسئله، گوشه با سرعت ثابت ۱۰ m/s به صورت متقارن در جهت قائم بدون در نظر گرفتن حرکت به جلو و اثرات پاشش به سطح آب برخورد می‌کند. برای راحتی حل، جسم ساکن فرض می‌شود و آب با سرعت ثابت به جسم برخورد می‌کند.

با توجه به فاصله زیاد خروجی از جسم شرط خروجی^۳ استفاده می‌شود و در دیوارهای کنار شرط مرزی سرعت ورودی در نظر گرفته شده است.



شکل (۲): مدل گوشه.

برای حل این مسئله ابتدا به بررسی اثر شبکه پرداخته شده و پس از انتخاب بهترین شبکه، در ادامه بررسی‌ها از شبکه مشابه استفاده شده است.

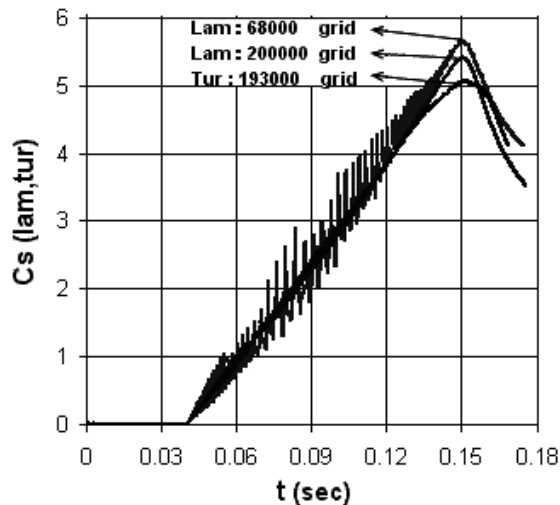
۴- انتخاب بهترین شبکه

برای شبکه‌بندی جسم، میدان محاسباتی از طرفین ۴ برابر عرض کل (۲b)، از پایین ۸ برابر ارتفاع کل و از بالا نصف پایین در نظر گرفته شد. در بخش‌های بعد، دامنه محاسباتی بهینه نیز برای این نوع شکل بدست آمده است. با توجه به دو فازی بودن جریان، ممکن است هنگام بالا آمدن آب در اطراف جسم جامد حباب‌های هوا محبوس شود و روی محاسبه نیروی برخورد اثر قابل توجهی گذارد.

- 1-Power Law
- 2-Piso
- 3-Outflow(Pressure Outlet)

سلولی حدود ۴٪ نسبت به شبکه ۶۸ هزار سلولی کاهش یافته است.

برای مدل کردن جریان آشفته، ابتدا سعی شد از روش $k-\varepsilon$ و یا $k-\omega$ استفاده شود ولی با هر کدام از این روشها، پس از تعدادی تکرار، جوابها ناگهان واگرا می شد. به همین علت از روش RSM¹ استفاده گردید. در شکل ۵ مقایسه بین جریان آشفته با جریان آرام آورده شده است و مشاهده می شود که مقدار ماکزیمم Cs جریان آشفته با شبکه ۱۹۳ هزار نسبت به شبکه ۶۸ هزار جریان آرام حدود ۹٪ و نسبت به شبکه ۲۰۰ هزار جریان آرام حدود ۵٪ کاهش یافته است.

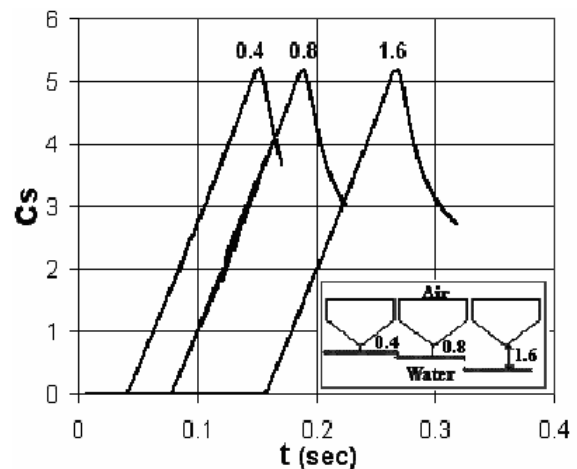


شکل (۵): بررسی اثر شبکه و مقایسه جریان آرام و آشفته (سرعت برخورد ۱۰ m/s، زاویه گوشه ۳۰ درجه)

این محاسبات با استفاده از یک کامپیوتر Pentium IV با سرعت ۲۸۰۰ MHz صورت گرفته است. در جدول ۱ زمان اجرای محاسبات مربوط به شبکه های مختلف مقایسه شده است. مشاهده می شود که زمان اجرای شبکه ۲۰۰ هزار در جریان آرام و شبکه ۱۹۳ هزار در جریان آشفته نسبت به شبکه های ۶۸ هزار جریان آرام به ترتیب ۱۰ و ۲۷ برابر شده است. بنابراین، با توجه به زمانبر بودن اجرای شبکه های ریزتر در جریان آرام و همچنین دشوار بودن انجام حل جریان آشفته در حالت دو فازی و افزایش زمان اجرای آن و نیز با توجه به تعداد اجراهای زیادی که برای

۵- بررسی اثر ارتفاع اولیه بدنه از سطح آب

برای نشان دادن تأثیر ارتفاع اولیه جسم از سطح آب، ارتفاع بی بعد $\frac{h}{2b}$ را که مشخصه فاصله اولیه جسم از سطح آب است، تغییر می دهیم. h فاصله نوک بدنه تا سطح آزاد آب در زمان صفر است. اثر این تغییرات روی ضریب نیروی برخورد $(C_s = \frac{F}{0.5\rho V^2(2b)})$ بر حسب تغییرات زمان برای ارتفاع های بی بعد ۰/۰۶۸، ۰/۱۳۳ و ۰/۲۶۷ که h در آنها به ترتیب ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۶ می باشد در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می شود، این تغییرات اثری روی مقدار حداکثر Cs نداشته است و فقط به علت زیاد شدن ارتفاع، منحنی ها از نظر زمانی جابه جا شده اند. بنابراین برای کاهش زمان اجرا در کل مسائل مورد بررسی در این مقاله، مقدار فاصله اولیه بدون بعد ۰/۰۶۸ در نظر گرفته شده است.



شکل (۴): اثر تغییر ارتفاع بدنه از سطح آب روی ضریب نیروی برخورد Cs (سرعت برخورد ۱۰ m/s، زاویه گوشه ۳۰ درجه).

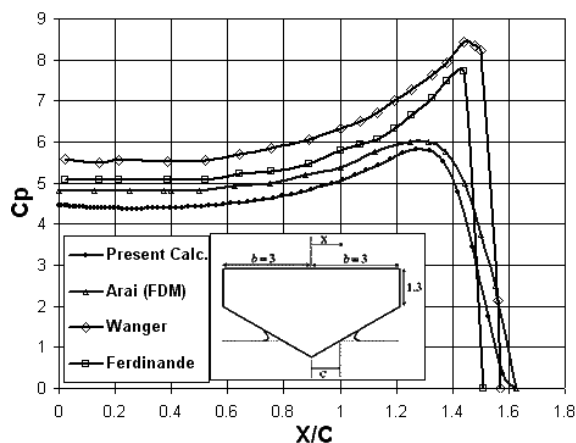
۶- بررسی اثر شبکه در جریان آرام و مقایسه آن با جریان آشفته

با تولید شبکه به تعداد ۶۸، ۱۰۰، ۲۰۰ هزار سلول، اثر ریزتر شدن شبکه روی جوابها بررسی شد. در شکل ۵ تفاوت ضریب نیروی برخورد بین دو شبکه ۶۸ و ۲۰۰ هزار سلولی در جریان آرام مشاهده می شود. همان طور که از شکل پیداست مقدار ماکزیمم Cs در شبکه ۲۰۰ هزار

1-Reynolds Stress Model

محدود (FDM) و بر اساس جریان غیرلزج است [۱۳] و حل تحلیلی و گتر و فردیناند مقایسه شده است. در این شکل ماکزیمم توزیع فشار مربوط به تئوری و گتر است تئوری فوق توسط فردیناند اصلاح شد و حداکثر فشار کاهش یافت. ولی در این تئوری اثر اسپری آب و نیروی جاذبه که باعث کاهش حداکثر فشار روی بدنه می‌شوند در نظر گرفته نشده است. آزی با حل عددی و با فرض غیرلزج بودن سیال و بدون در نظر گرفتن کشش سطحی و اثرات جریان هوا، توزیع فشار را نسبت به تئوری فردیناند کاهش داد. در حل عددی حاضر، همه اثرات بالا در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، توزیع فشار به‌دست آمده از این حل عددی، از حل عددی آزی پایین‌تر است و اثرات لزجت و کشش سطحی و جاذبه، فشار روی بدنه را کاهش داده است. بنابراین، با توجه به این نمودار و تطابق نتایج با استاندارد FAR و IMO دقت حل حاضر از حل آزی نیز بهتر و به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. البته برای اطمینان از دقت جواب‌های به‌دست آمده با این روش، می‌توان مراجع [۱۴-۱۶] را مطالعه کرد.



شکل (۷): توزیع فشار روی بدنه گوشه (سرعت برخورد 10 m/s ، زاویه گوشه 30° و $Vt/b = 0.267$).

پس از اطمینان یافتن از صحت نتایج کسب شده با این روش، مسئله برای ابعاد واقعی مقطع پله زیر بدنه یک قایق پرنده در حال طراحی با زاویه عرضی 18° درجه (شکل ۸) با شرایط گفته شده در قسمت قبل مدل شد. در شبکه‌بندی

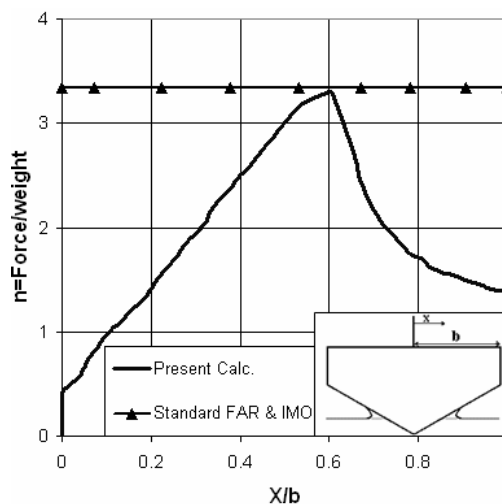
بررسی اثر زاویه عرضی نیاز بود تصمیم گرفته شد که از حل شبکه ۶۸ هزار با دامنه 160×430 در جریان آرام استفاده شود.

جدول (۱): زمان اجرای شبکه‌های آرام و آشفته.

نوع جریان	آرام	آرام	آشفته
تعداد المان‌های شبکه	۶۸۰۰۰	۲۰۰۰۰۰	۱۹۳۰۰۰
زمان اجرا (ساعت)	۱۸	۱۷۵	۴۸۵

۷-مقایسه با حل‌های دیگر

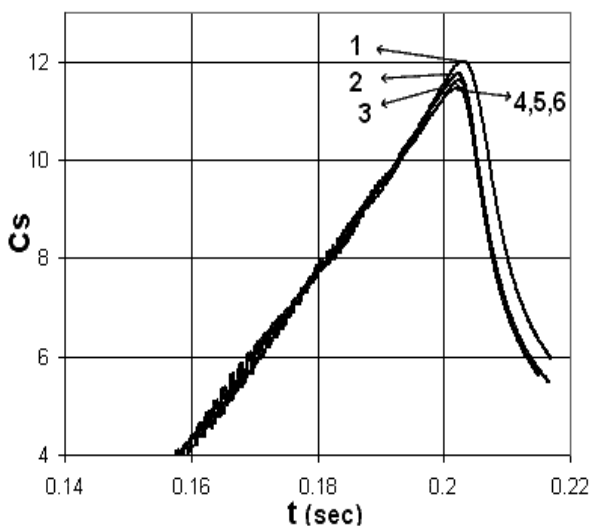
در شکل ۶ نمودار ضریب بار بر حسب عرض بی بعد نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از محاسبات با استاندارد بارگذاری هیدرودینامیکی FAR [۱۱] و IMO [۱۲] تطابق دارد. بنابراین می‌توان در طراحی سازه برای بدست آوردن بار حداکثر به نتایج کسب شده اطمینان کامل داشت.



شکل (۶): نمودار ضریب بار بر حسب عرض بی بعد.

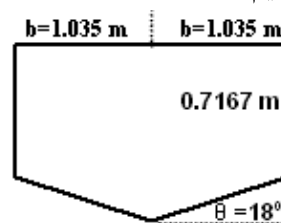
به‌طور کلی، نتایجی که تا به حال برای این مسئله ارائه شده، تخمین بیش از حد نیرو و سنگینی سازه را در پی داشته است. در شکل ۷ ضریب فشار $C_p = \frac{P}{0.5\rho V^2}$ بر حسب عدد بی بعد $\frac{X}{C}$ در زمان t که از رابطه بی‌بعد $\frac{Vt}{b} = 0.267$ به‌دست می‌آید، رسم شده است. در این شکل، حل عددی حاضر با حل عددی آزی که به روش تفاضل

بر هم منطبق می‌شوند. برای اطمینان بیشتر از غیر وابسته بودن جواب به میدان محاسباتی در شکل ۱۰ نمودار C_p بر حسب Y برای همان حالت‌های مشخص شده در جدول ۲ در زمان $t = 0.2018 \text{ sec}$ رسم شده است که در این زمان C_s در محدوده بیشترین مقدار خود قرار دارد. مشاهده می‌شود که با بزرگتر شدن دامنه محاسباتی، فشار روی بدنه کاهش می‌یابد و در نهایت برای سطرهای ۴ به بعد ثابت می‌ماند. بنابراین مشخصات سطر ۴ در جدول ۲ را به عنوان میدان محاسباتی مناسب انتخاب می‌کنیم. البته برای اطمینان بیشتر و راحتی، در تمام زاویه‌ها و ابعاد مختلف، فاصله‌ها از طرفین ۴ برابر در نظر گرفته می‌شوند. همان‌طور که از جدول منحنی‌ها مشخص است فاصله از بالا و پایین تأثیر زیادی بر پارامترهای محاسباتی مسئله نمی‌گذارد؛ پس فاصله از پائین ۶ برابر و فاصله از بالا نصف فاصله از پایین قرار داده می‌شود. ذکر این مطلب لازم است که تمام اندازه‌ها از مرز بیرونی جسم در نظر گرفته شده است.



شکل (۹): نمودار $C_s - t$ در زاویه ۱۸ درجه برای میدان محاسباتی ۶-۱.

که برای ابعاد قبلی بدست آمد، نسبت فاصله بدون بعد اولین گره (Node) تا بدنه را معیار شبکه‌بندی روی ابعاد جدید قرار می‌دهیم.



شکل (۸): مقطع کف قایق پرنده.

به‌طور کلی سرعت قائم یک هواپیمای آبنشین هنگام تماس با آب از مقدار $3/1 \text{ m/s}$ تجاوز نخواهد کرد. این مقدار برای قایق پرنده‌ای که به سطح آب برخورد می‌کند از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$V = 0.61 \left[\frac{Mg}{S} \right]^{1/4} \quad (5)$$

در این معادله، M بیشترین جرم قایق پرنده، g شتاب جاذبه و S تصویر سطح بال قایق پرنده است. طبق محاسبات انجام شده، سرعت برخورد قایق پرنده به سطح آب 3 m/s به‌دست می‌آید. بنابراین در ادامه برای بررسی اثر تغییر زاویه عرضی قایق پرنده از این سرعت استفاده می‌شود.

۸- میدان محاسباتی

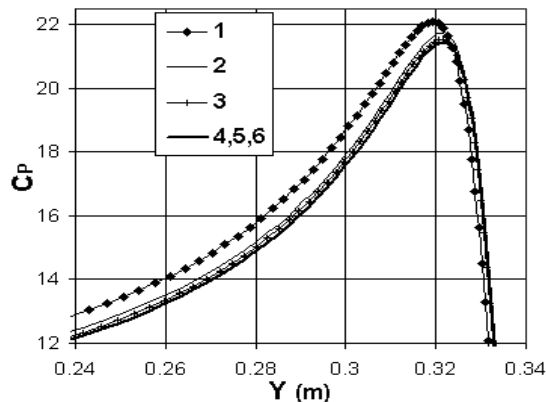
میدان محاسباتی شبکه باید طوری انتخاب شود که مقادیر نیرو و تغییرات فشار مستقل از آن باشد. یعنی اگر میدان محاسباتی بزرگتر از آن در نظر گرفته شود، دیگر اثری روی پارامترهای محاسباتی نداشته باشد. برای این منظور از دامنه‌ای که در جدول ۲ نشان داده شده است شروع کرده و دامنه را آن قدر تغییر داده تا پارامترهای محاسباتی مانند C_p و C_s مستقل از میدان شدند.

با توجه به جدول، اگر اعداد درون جدول را با n نشان دهیم، فاصله دامنه محاسباتی از بالا و یا پایین جسم یعنی n برابر ارتفاع کل جسم که برابر $1/0.54$ است و فاصله از طرفین یعنی n برابر طول کل جسم که $(2b=2/0.7)$ است. با مقایسه اعداد جدول ۲ و همچنین منحنی شکل ۹ که منحنی تغییرات ضریب نیروی ضربه بر حسب زمان می‌باشد، مشاهده می‌شود که از سطر ۴ به بعد اعداد کاملاً

با کمی توجه به این منحنی مشخص می‌شود که با افزایش زاویه عرضی از مقدار حداکثر، این ضریب به سرعت کاسته می‌شود و این به دو علت است: اول اینکه هر چه زاویه بیشتر شود نوک جسم دارای سطح برنده تری شده و با شکافتن آب وارد آن می‌شود و این باعث می‌شود که تغییرات فشار کمتری روی جسم اتفاق بیفتد. در شکل ۱۲ نیز این پدیده برای دو زاویه ۵ و ۳۵ درجه به وضوح دیده می‌شود. در این شکل علاوه بر مشاهده سطح آزاد سیال بعد از برخورد، منحنی C_p در Y/Y_c یکسان برای این دو زاویه در زمان‌های مختلف نیز مشاهده می‌شود. (Y ارتفاع بالا آمدن آب از نوک بدنه می‌باشد و Y_c هم در شکل ۱۵ نشان داده شده است). مشاهده می‌شود که مقدار C_p در نوک جسم در زاویه کمتر (۵ درجه و $t=0/1428\text{Sec}$) بیش از ۸ برابر مقدار C_p در زاویه بیشتر (۳۵ درجه و $t=0/18687\text{Sec}$) می‌باشد (در این زمان‌ها هر دو زاویه دارای Y/Y_c یکسانند). نکته دومی که باعث افزایش نیروی ضربه در زوایای کم می‌شود سطح مؤثر جسم است. در زاویه ۵ درجه سطح مؤثر برای ایجاد نیروی عمودی بیشتر از سطح مؤثر در زاویه ۳۵ درجه می‌باشد. گفتنی است که شکستگی نمودارهای توزیع ضریب فشار در سطح تماس بین دو سیال به علت تغییر دانسیته سیال از آب به هواست و این موضوع باعث افت ناگهانی مقدار ضریب فشار هنگام گذر از سطح آزاد می‌شود (ضریب فشار با عدد دانسیته سیال مرجع یعنی آب بی‌بعد شده است).

همچنین، در شکل ۱۳ می‌توان برای زاویه ۵ درجه به وضوح گردابه‌هایی را مشاهده کرد که در ناحیه هوا، درست روی سطح آزاد اتفاق می‌افتد و باعث مکش آب به بالا و ایجاد یک بالا آمدگی بیشتر در محل انتهایی تماس آب با جسم می‌شود.

بنابراین، اثر انتخاب مناسب زاویه عرضی کف قایق پرنده با توجه به نوع طراحی و مأموریت وسیله بسیار حائز اهمیت است. زیرا طراح باید بین مزیت شناوری بیشتر قایق پرنده در لحظه بلند شدن آن از سطح آب که در زاویه کمتر اتفاق می‌افتد و باعث کوتاه شدن باند برخاست آن می‌شود و مزیت استحکام کف قایق پرنده بخصوص در لحظه فرود که در زاویه بیشتر اتفاق می‌افتد و در نتیجه به هزینه کمتر ساخت منجر می‌شود و همچنین مزیت راحتی ساخت و



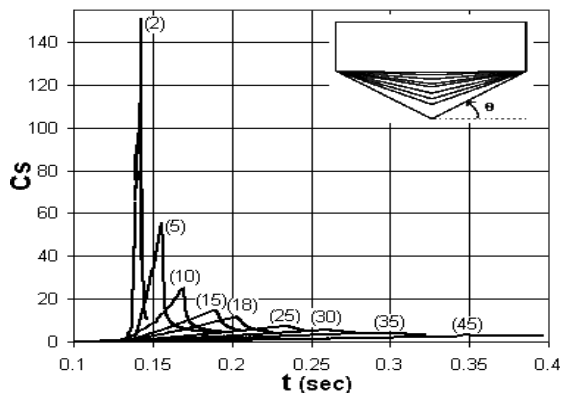
شکل (۱۰): نمودار $C_p - Y$ در زاویه ۱۸ درجه برای میدان محاسباتی ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ در زمان $t=0/2018\text{ sec}$.

جدول (۲): ابعاد مختلف میدان محاسباتی.

مرحله	فاصله از طرفین	فاصله از بالا	فاصله از پایین	$C_s\text{-max}$
۱	۱،۵	۲	۳	۱۲
۲	۲،۵	۳	۵	۱۱،۷۶
۳	۳	۳	۵	۱۱،۶۳
۴	۳،۷۵	۳	۶	۱۱،۴۷
۵	۳،۷۵	۴	۶	۱۱،۴۷
۶	۳،۷۵	۲	۶	۱۱،۴۷

۹- بررسی اثر تغییر زاویه عرضی بر C_s

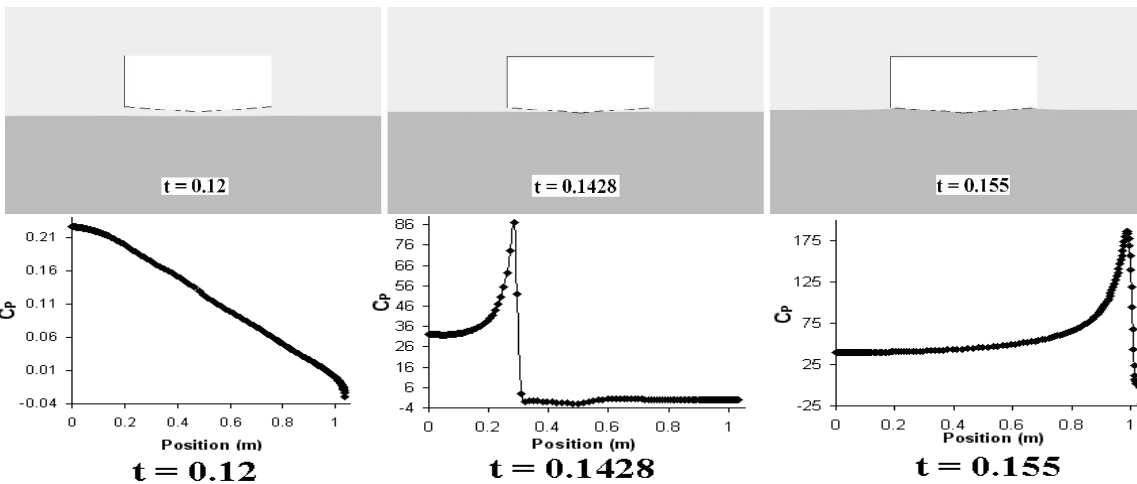
پس از انتخاب مناسب میدان محاسباتی، مسئله شکل ۸ برای زوایای عرضی ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۱۸، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۵ درجه با این میدان مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱۱ نمودار ضریب نیروی ضربه (C_s) بر حسب t در زوایای عرضی مختلف رسم شده است.



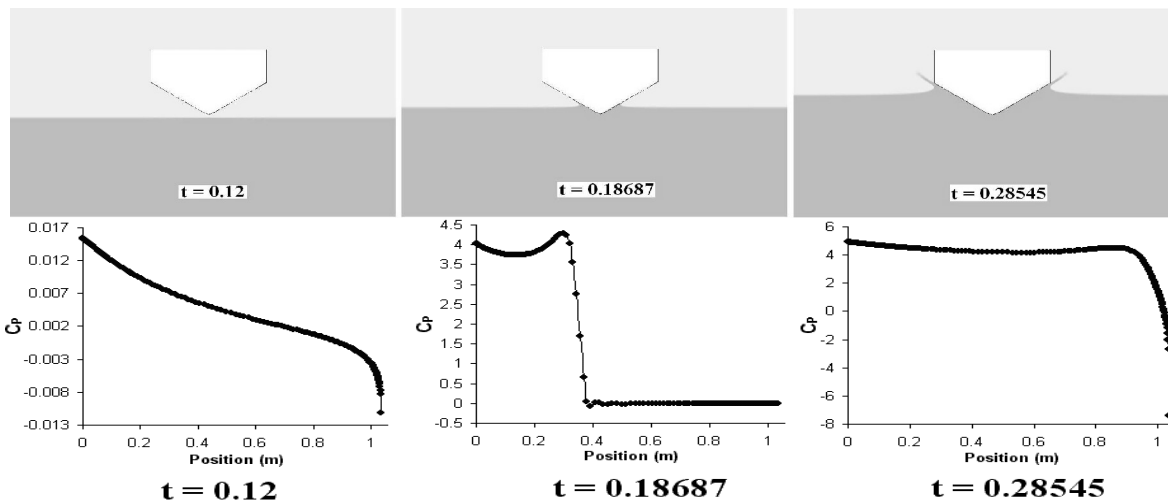
شکل (۱۱): نمودار $C_s - t$ برای زوایای مختلف.

کاهش یابد. گفتنی است که تاکنون در مقالات قبلی رابطهای به این شکل ارائه نشده است.

حالت بهینه‌ای را ایجاد کند. بنابراین در ادامه برای استفاده طراحان، رابطهای برای مقدار Cs ماکزیمم و همچنین محل ماکزیمم این مقدار بر حسب زاویه عرضی ارائه شده تا با استفاده از آن زمان لازم برای رسیدن به یک نقطه بهینه

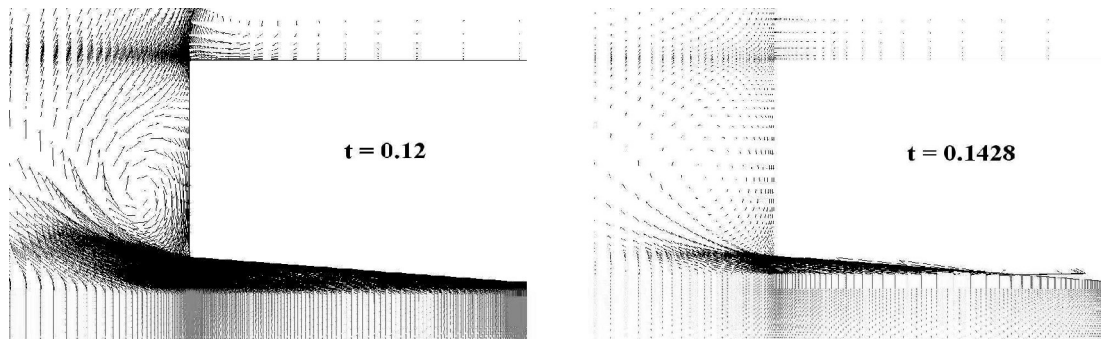


الف: زاویه ۵ درجه.



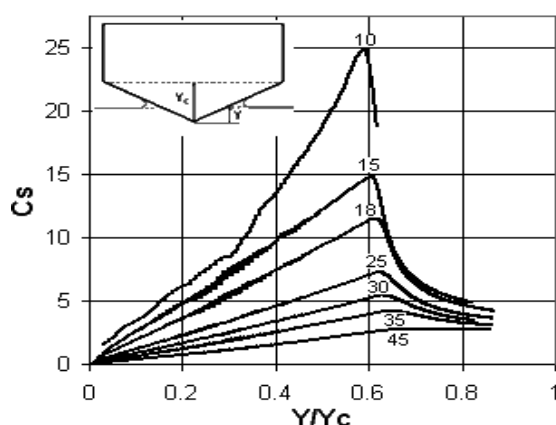
ب: زاویه ۳۵ درجه.

شکل (۱۲): شکل سطح آزاد آب و توزیع فشار روی یک ضلع شناور در Y/Yc یکسان برای زاویه‌های ۵ و ۳۵ درجه.



شکل (۱۳): شکل گردابه‌های به وجود آمده در هوا برای زاویه ۵ درجه.

دقیق محل بدون بعد ماکزیم نیرو پرداخته می‌شود، تا بتوان در همه زوایا و ابعاد از آن استفاده کرد. در شکل ۱۵ نمودار C_s بر حسب Y/Y_c برای زاویه‌های مختلف رسم شده است که در آن Y ارتفاع بالا آمدن آب از نوک بدنه می‌باشد و Y_c هم در شکل نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه، مقدار Y/Y_c افزایش می‌یابد، بنابراین محل ماکزیم نیرو با افزایش زاویه بالاتر می‌رود و همان‌طور که در شکل دیده می‌شود برای زاویه‌های ۱۰ تا ۴۵ درجه، محدوده این نقطه ماکزیم برای Y/Y_c بین ۰/۵۸ تا ۰/۶۹ تغییر می‌کند.

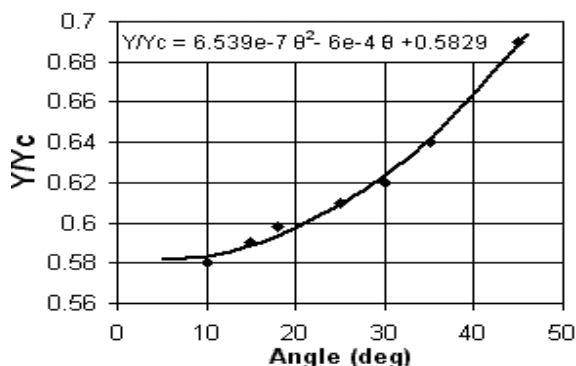


شکل (۱۵): نمودار محل ماکزیم نیرو در زوایای مختلف.

با استفاده از Y/Y_c به دست آمده از زاویه‌های قبل، می‌توان معادله زیر را برای تعیین محل ماکزیم نیرو به دست آورد و از آن در طراحی سازه قایق پرنده استفاده کرد:

$$\frac{Y}{Y_c} = 6.539 \times 10^{-7} \theta^2 - 6 \times 10^{-4} \theta + 0.5829 \quad 10 \leq \theta \leq 45. \quad (7)$$

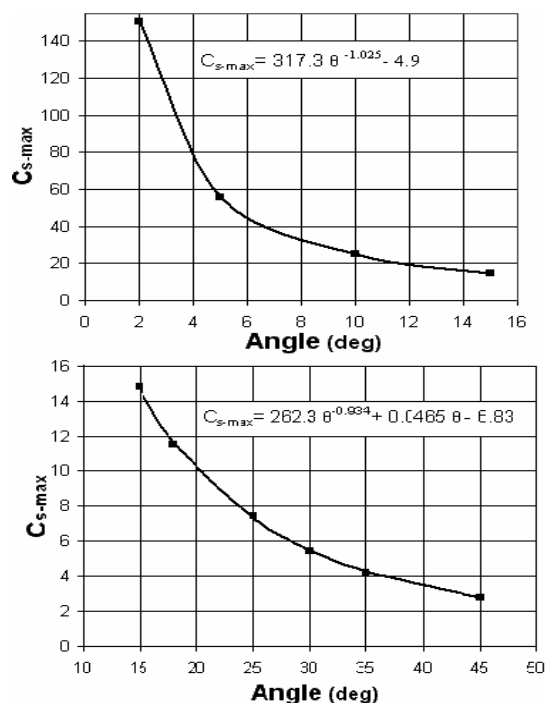
در این معادله θ بر حسب درجه می‌باشد. در شکل ۱۶ نمودار این معادله رسم شده است.



شکل (۱۶): نمودار Y/Y_c در زوایای مختلف.

۱۰- تعیین معادله C_{s-max} بر حسب θ

برای اینکه ضریب نیروی برخورد ماکزیم در دیگر زاویه‌ها بدون اجرای مجدد حاصل شود، می‌توان با استفاده از C_s ماکزیم به دست آمده در زوایای یاد شده، معادله‌ای برای نقاط ماکزیم C_s بر حسب زاویه عرضی به دست آورد. اما بدلیل پرش شدید C_s در زاویه‌های پایین، نمی‌توان معادله‌ای یک ضابطه‌ای با دقت خوب به دست آورد. پس برای داشتن دقت بالا می‌توان از معادله دو ضابطه‌ای زیر استفاده کرد که در زاویه ۱۵ درجه پیوسته می‌باشد. در شکل ۱۴ نمودار این دو معادله رسم شده است.



شکل (۱۴): نمودار به دست آمده از نقاط C_{s-max} در زاویه‌های مختلف.

$$C_{s-max} = \begin{cases} 317.3 \theta^{-1.025} - 4.9 & 2 < \theta \leq 15 \\ 262.3 \theta^{-0.934} + 0.0465 \theta - 6.83 & 15 \leq \theta \leq 45 \end{cases} \quad (8)$$

در این معادله θ بر حسب درجه است. با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد که تمام نقاط C_{s-max} با دقت بسیار خوبی بر این دو منحنی منطبق شده‌اند.

۱۱- تعیین محل ماکزیم نیرو در زوایای مختلف

با توجه به اینکه در طراحی سازه‌ها، محل ماکزیم نیرو نیز از اهمیت خاصی برخوردار است، در این قسمت به تعیین

- Using Computational Fluid Dynamics Techniques”, The 24th Symp. on Naval Hydrodynamics, 2003.
7. Miyata, H. and Nishimura, S. “Finite Difference Simulation of Non-linear Ship Waves”, J. Fluid Mech., Vol. 21, No. 157, pp. 327-357, 1985.
8. Rozhdestvensky, K. “Non-linear Aerodynamics of Ekranoplan in Strong Ground Effect”, The 3rd Int. Conf. on Fast Sea Transportation (FAST 95), Lubeck-travemunde, Munich, Germany, p. 621, 1995.
9. Nikseresht, A.H., Alishahi, M.M., and Emdad, H. “Volume-of-Fluid Interface Tracking with Lagrangian Propagation for Incompressible Free Surface Flows”, Vol. 1, No. 2, pp. 131-140, Scientia Iranica, 2005.
10. Gueyffier, D., Li, J., Nadim, A., Scardovelli, R., and Zaleski, S. “Volume-of-Fluid Interface Tracking with Smoothok Surface Stress Methods for Three-dimensional Flows”, J. Comp Phys, Vol. 1, No. 152, pp. 423-456, 1999.
11. Federal Aviation Requirements, FAR, Part 23-473, 2001.
12. International Maritime Organization, IMO, 2002.
13. Arai, M. and Inoue, Y. “A Computing Method for Analysis of Water Impact of Arbitrary Shaped Bodies”, J. Society of Naval Architects of Japan, Vol. 176, No. 2, pp. 244-251, 1994.

۱۴- خسروی، م.ر.، نیکسرشت، ا.ح.، و علیشاهی، م.م. "بررسی پدیده اسلمینگ در قایق پرنده"، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی دریا، سال سوم، شماره ۵، زمستان ۱۳۸۵.

۱۵- خسروی، م.ر. و نیکسرشت، ا.ح. "حل عددی ضربه هیدرودینامیکی یک شناور WIG"، دوازدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۳.

16. Nikseresht, A.H., Alishahi, M.M., and Emdad, H. “Complete Flow Field Computation Around an ACV (Air-cushion Vehicle), Using 3-D VOF with Lagrangian Propagation in Computational Domain”, Computers & Structures, In Press, Corrected Proof Available Online, 25 October 2007.
17. Stinton, D. “The Anatomy of the Aeroplane”, Foulis & Co Ltd., London, 1980.

۱۲- نتیجه گیری

طراحی مناسب زیر بدنه قایق پرنده و انتخاب زاویه عرضی مناسب، تأثیر زیادی در کاهش نیروی ضربه وارد بر کف قایق پرنده و انتخاب سازه مناسب از نظر استحکام و هزینه دارد. همچنین، مقدار مناسب زاویه عرضی با توجه به نیروی پسای آن، اثر قابل توجهی در شناوری قایق پرنده و نیز طول باند برخاست دارد. پس، انتخاب مناسب و دقیق این زاویه در تعیین مشخصه‌های پروازی قایق پرنده بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله، به حل جریان دو فاز حول یک گوشه و مقطع کف قایق پرنده در زوایای عرضی مختلف پرداخته شده است. با توجه به تطابق نتایج با استانداردهای IMO و FAR، تلاش شده با ارائه دو رابطه بی بعد برای محاسبه حداکثر نیروی وارده بر کف قایق پرنده و محل اعمال این حداکثر نیرو، گامی جدید در راه طراحی قایق‌های پرنده برداشته شود.

تشکر و قدردانی

نگارندگان این مقاله از مجتمع علوم و فناوری دریایی شیراز که قسمتی از هزینه انجام این محاسبات را تقبل نموده‌اند، کمال تشکر را دارند.

مراجع

- ۱- صادقی زاده، م.ر.، حمایتی، م.، ولی، ع.، نیکسرشت، ا.ح.، و فروزانی، ح. "قایق پرنده"، جلد اول، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ۱۳۸۳.
2. Von Karman, T. “The Impact on Seaplane Float During Landing”, NACA TN 321, 1929.
3. Wagner, H. “Landing of Sea Planes”, NACA TM622, 1931.
4. Fabula, A. “Ellips Fitting Approximation of Two-dimensional Normal Symmetric Impact of Rigid Bodies on Water”, The 5th Midwestern Conf. on Fluid Mechanics, University of Michigan, An Arbor, MI, U.S.A., 1957.
5. Ferdinande, V. “Theoretical Considerations on the Penetration of a Wedge into the Water”, Int Shipbuilding Progress, Vol. 13, No. 140, 1966.
6. Reddy D.N., Scanlon T., and Cheng, K. “Prediction of Slam Loads on Wedge Section,