



دانشگاه صنعتی شیراز  
دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک  
(گرایش تبدیل انرژی)

# بررسی عددی پدیده برخورد با آب در قایق های پرنده با در نظر گرفتن معادلات دینامیکی حرکت

بوسیله :

حسین قاضی زاده احسایی

استاد راهنما :

دکتر امیرحسین نیک سرشت

شهریور ۱۳۸۹

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

**تقدیم به اسوه های ایثار و فداکاری**

**پدر و مادر عزیزم**

**و**

**همسر مهربانم**

## تشکر و قدردانی

اکنون که این رساله به پایان رسیده است بر خود فرض می دانم که از استاد گرامی جناب آقای دکتر امیرحسین نیک سرشت، که صمیمانه و با دقت نظر این کار زیر نظر ایشان انجام گرفت و همواره در طی این دوره با راهنمایی های ارزشمند خود اینجانب را یاری نمودند خالصانه تشکر و سپاسگزاری نمایم.

از استاد ارجمند جناب آقای دکتر محسن جهانمیری که زحمت مشاوره این رساله را بر عهده گرفتند و در این راه مرا یاری دادند، تشکر ویژه می کنم.

در اینجا بر خود لازم می دانم که از همکاری صمیمانه جناب آقای مهندس هاشم مرادی که در مورد اطلاعات مدل قایق پرنده کمال همکاری را با اینجانب مبذول نمودند، تشکر و قدردانی نمایم.

## چکیده

### بررسی عددی پدیده برخورد با آب در قایق های پرنده با در نظر گرفتن معادلات دینامیکی حرکت

به وسیله:

حسین قاضی زاده احسایی

تخمین نیروی ضربه هیدرودینامیکی در طراحی سازه ها و شناورهای دریایی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. برخورد شدید شناورهای تندرو با سطح آب از قبیل قایق پرنده ها و همچنین برخورد امواج دریا با سازه های دریایی نظیر سکوهای نفتی از نمونه های متداول این پدیده هستند. بررسی بارهای ضربه ای ایجاد شده در اثر برخورد اجسام به سطح آب، تنها با در نظر گرفتن همه عوامل مؤثر بر این پدیده به ویژه تغییر سرعت جسم در حین برخورد امکان پذیر است. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار فلونت، شبیه سازی عددی پدیده برخورد با آب بر اساس روش حجم محدود با در نظر گرفتن معادلات دینامیکی حرکت به همراه یک شبکه متحرک در جریان دو فازی انجام گرفته است و جهت مدل کردن سطح آزاد از مدل حجم سیال استفاده شده است. جهت اعتبارسنجی نتایج ابتدا پدیده ضربه آب حول یک گوشه در حالت دو بعدی به صورت متقارن و نامتقارن و همچنین برخورد متقارن یک گوشه در حالت سه بعدی شبیه سازی شده است. پس از مقایسه نتایج عددی به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی و مشاهده تطبیق مناسب آنها با یکدیگر، پدیده فوق در برخورد متقارن حول کف یک مدل قایق پرنده در حالت سه بعدی شبیه سازی گردیده است. مقایسه نتایج این روش با نتایج آزمایشگاهی انجام گرفته، دقت و مفید بودن این روش را در حل این گونه مسائل مورد تأیید قرار می دهد.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
<b>فصل اول: آشنایی با پدیده اثر سطح</b>	
۱-۱-۱-۱	مقدمه
۲-۱	استفاده از پدیده اثر سطح در طبیعت
۳-۱	پدیده اثر سطحی در شناورهای دریایی
۱-۳-۱	تأثیر طولی اثر سطح
۲-۳-۱	تأثیر عرضی اثر سطح
۴-۱	قایق پرنده
۵-۱	پدیده ضربه هیدرودینامیکی (اسلمینگ) در شناور قایق پرنده
۶-۱	اهداف و مراحل تحقیق
<b>فصل دوم: بررسی تئوری و پیشینه تحقیق ضربه هیدرودینامیکی</b>	
۱-۲	ضربات هیدرودینامیکی
۱-۱-۲	بر خورد آب درون مخازن با دیواره (اسلشینگ)
۲-۱-۲	بر خورد شناور با سطح آب یا با موج (اسلمینگ)
۲-۲	روش های بررسی پدیده های هیدرودینامیکی
۱-۲-۲	دینامیک سیالات محاسباتی و ویژگی های آن
۳-۲	پیشینه تحقیق
<b>فصل سوم: معادلات اساسی حاکم</b>	
۱-۳	معادلات حاکم بر جریان
۱-۱-۳	معادلات حاکم
۲-۳	روش های حل معادلات حاکم
۱-۲-۳	تکنیک های گسسته سازی فضایی
۱-۲-۳	روش تفاوت محدود
۲-۱-۲-۳	روش حجم محدود
۳-۱-۲-۳	روش المان محدود
۴-۱-۲-۳	روش المان طیفی
۳-۳	معرفی الگوریتم های حل عددی
۱-۳-۳	الگوریتم حل غیر همزمان
۲-۳-۳	الگوریتم حل همزمان

صفحه	عنوان
۳۴	۴-۳- آشفتگی
۳۶	۱-۴-۳- مدل های آشفتگی
۳۶	۱-۱-۴-۳- مدل $k-\varepsilon$ Standard
۳۷	۲-۱-۴-۳- مدل $k-\omega$ Standard
۳۸	۳-۱-۴-۳- مدل های Second order closure (RSM)
۳۹	۵-۳- جریان های سطح آزاد
۴۰	۱-۵-۳- مدل سازی سطح آزاد
۴۰	۱-۱-۵-۳- روش های ردیابی سطح (ITM)
۴۱	۲-۱-۵-۳- روش های ردیابی حجم (VTM)
۴۲	۱-۲-۱-۵-۳- روش حجم سیال
۴۴	۲-۲-۱-۵-۳- مدل ریاضی سطح آزاد بر اساس روش حجمی مدل سازی سطح آزاد
۴۵	۳-۲-۱-۵-۳- سیستم معادلات حاکم بر سطح آزاد
۴۶	۶-۳- شبکه متحرک
۴۶	۱-۶-۳- روش SBSM
۴۷	۲-۶-۳- روش DLM
۴۸	۳-۶-۳- روش LRM
۴۹	۴-۶-۳- معادلات بقایی برای شبکه متحرک
۵۰	۷-۳- حرکت جسم صلب
۵۰	۱-۷-۳- سیستم معادلات حاکم بر حرکت جسم صلب
۵۱	۸-۳- برنامه الحاقی و موارد کاربرد آن
۵۱	۱-۸-۳- پارامترهای مربوط به شبکه محاسباتی
۵۳	۲-۸-۳- موقعیت برنامه الحاقی در الگوریتم حل عددی
۵۴	۹-۳- پردازش موازی

### فصل چهارم: نتایج عددی شبیه سازی دو بعدی پدیده ضربه آب

۵۶	۱-۴- مقدمه
۵۶	۲-۴- نتایج عددی حل دو بعدی جریان
۵۷	۱-۲-۴- برخورد متقارن گوشه دو بعدی با سطح آب، دارای چگالی بیشتر از آب
۵۸	۱-۱-۲-۴- تأثیر شبکه متحرک بر نتایج حل عددی پدیده ضربه آب
۵۸	۱-۱-۲-۴- شبکه متحرک به روش DLM
۶۰	۲-۱-۲-۴- شبکه متحرک به روش DLMS
۶۳	۳-۱-۲-۴- شبکه متحرک به روش LRM
۶۴	۴-۱-۲-۴- شبکه متحرک به روش LRDM
۶۸	۲-۱-۲-۴- بررسی عدم وابستگی نتایج حل عددی از گره های شبکه محاسباتی

صفحه	عنوان
۷۱	۴-۲-۱-۳- تأثیر سرعت اولیه در هنگام سقوط آزاد
۷۳	۴-۲-۱-۴- اثر آشفتگی جریان
۷۵	۴-۲-۱-۵- اثر تراکم پذیری
۷۷	۴-۲-۱-۶- مقایسه نتایج حل عددی حاصل از تغییرات سرعت با نتایج حل عددی سرعت ثابت
۸۰	۴-۲-۲-۲- برخورد متقارن گوشه دو بعدی با سطح آب، دارای چگالی کمتر از آب
۸۳	۴-۲-۳-۳- اثر جرم و زاویه عرضی گوشه در پدیده ضربه آب
۸۶	۴-۲-۴-۴- برخورد نامتقارن گوشه دو بعدی با سطح آب
۸۹	۴-۲-۴-۴- اثر عمق اولیه آب
۹۱	۴-۲-۴-۴- اثر انحراف زاویه از حالت متقارن ( $\alpha$ )
<b>فصل پنجم : نتایج عددی شبیه سازی سه بعدی پدیده ضربه آب</b>	
۹۴	۵-۱- مقدمه
۹۴	۵-۲- نتایج عددی حل سه بعدی جریان
۹۵	۵-۲-۱- برخورد متقارن گوشه سه بعدی با سطح آب، دارای چگالی بیشتر از آب
۱۰۰	۵-۲-۱-۱- تأثیر طول حوزه محاسباتی بر نتایج عددی پدیده ضربه آب
۱۰۲	۵-۲-۱-۲- تأثیر تعداد گره های محاسباتی در نتایج عددی
۱۰۶	۵-۲-۲- برخورد متقارن گوشه سه بعدی با سطح آب، دارای چگالی کمتر از آب
۱۰۸	۵-۲-۳- برخورد متقارن کف قایق پرنده در حالت سه بعدی با سطح آب
<b>فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات</b>	
۱۱۵	۶-۱- نتیجه گیری
۱۱۹	۵-۱- پیشنهادات
<b>پیوست ها</b>	
۱۲۰	پیوست (۱)
۱۲۱	فهرست منابع



## فهرست شکلها

صفحه	عنوان
۵	شکل (۱-۱): مقایسه تأثیر عرضی اثر سطح در داخل و خارج از ناحیه اثر سطح
۶	شکل (۲-۱): نمایی از یک قایق پرنده
۸	شکل (۳-۱): مقایسه سرعت قایق پرنده با سایر شناورهای دریایی و هواپیما
۱۰	شکل (۴-۱): واژگون شدن شناور قایق پرنده در اثر وقوع پدیده اسلمینگ
۱۲	شکل (۱-۲): پدیده اسلمینگ در مخزن
۱۳	شکل (۲-۲): مدل سازی اسلمینگ بر اساس هیدرودینامیک محاسباتی
۱۴	شکل (۳-۲): وقوع اسلمینگ
۱۴	شکل (۴-۲): هواپیمایی از نوع Sea Plane در حال فرود بر روی سطح آب
۱۵	شکل (۵-۲): سکوهای دریایی در معرض نیروهای ناشی از برخورد امواج
۱۵	شکل (۶-۲): اسلمینگ لحظه ای و آب آرام در عرشه
۱۹	شکل (۷-۲): نتایج کار تحلیلی فن کارمن بر روی برخورد گوه با آب
۱۹	شکل (۸-۲): آزمایش برخورد گوه با زوایای ۳۰ و ۶۰ با آب
۲۰	شکل (۹-۲): نتایج آزمایشات ورود استوانه به آب (گرینهاو ۱۹۸۳)
۲۱	شکل (۱۰-۲): دستگاه آزمایش برخورد گوه با سطح آب
۲۲	شکل (۱۱-۲): نمودار سرعت و جابجایی در راستای قائم برای برخورد گوه با آب
۲۳	شکل (۱۲-۲): مدل سازی عددی برخورد گوه با آب به روش SPH
۲۴	شکل (۱۳-۲): نتایج مدل سازی عددی اوگر و مقایسه با کار آزمایشگاهی و حل تابع پتانسیل (ژائو ۱۹۹۶)
۳۰	شکل (۱-۳): انواع شبکه بندی
۳۳	شکل (۲-۳): الگوریتم حل غیر همزمان
۳۴	شکل (۳-۳): الگوریتم حل همزمان
۴۲	شکل (۴-۳): نمونه روش حجمی مدل سازی سطح آزاد
۴۳	شکل (۵-۳): کسر حجمی از یک مش گسسته
۴۷	شکل (۶-۳): تغییر شبکه حاصل از روش SBSM
۴۸	شکل (۷-۳): تولید شبکه به روش DML
۴۸	شکل (۸-۳): تولید شبکه به روش LRM
۴۹	شکل (۹-۳): تغییر شکل در حجم کنترل انتخابی
۵۱	شکل (۱۰-۳): اجزاء یک شبکه محاسباتی
۵۳	شکل (۱۱-۳): موقعیت های مختلف برنامه الحاقی در الگوریتم حل عددی
۵۴	شکل (۱۲-۳): ساختار سیستم پردازش متناوب

- شکل (۳-۱۳): ساختار سیستم پردازش موازی ۵۵
- شکل (۴-۱): حوزه محاسباتی ۵۷
- شکل (۴-۲): شبکه محاسباتی مورد استفاده در روش DLM ۵۹
- شکل (۴-۳): انتخاب شرایط مرزی در روش DLM ۵۹
- شکل (۴-۴): تغییرات شبکه متحرک بر حسب زمان پس از رها شدن گوشه ۶۰
- شکل (۴-۵): شبکه محاسباتی مورد استفاده در روش DLMS ۶۱
- شکل (۴-۶): انتخاب شرایط مرزی در روش DLMS ۶۱
- شکل (۴-۷): تغییرات شبکه متحرک بر حسب زمان پس از رها شدن گوشه ۶۲
- شکل (۴-۸): جابجایی شبکه متحرک در مرز جدا کننده از ناحیه ساکن ۶۲
- شکل (۴-۹): شبکه محاسباتی مورد استفاده در روش LRM ۶۳
- شکل (۴-۱۰): انتخاب شرایط مرزی در روش LRM ۶۳
- شکل (۴-۱۱): تغییرات شبکه متحرک بر حسب زمان پس از رها شدن گوشه ۶۴
- شکل (۴-۱۲): شبکه محاسباتی مورد استفاده در روش LRDM ۶۵
- شکل (۴-۱۳): انتخاب شرایط مرزی در روش LRDM ۶۵
- شکل (۴-۱۴): تغییرات شبکه متحرک بر حسب زمان پس از رها شدن گوشه ۶۶
- شکل (۴-۱۵): مقایسه نتایج عددی شبکه های متحرک مختلف با نتایج آزمایشگاهی تغییرات سرعت گوشه بر حسب زمان پس از برخورد گوشه با سطح آزاد آب ۶۷
- شکل (۴-۱۶): مقایسه نتایج عددی شبکه های متحرک مختلف با نتایج آزمایشگاهی تغییرات نیروی قائم (اسلمینگ) بر حسب زمان پس از برخورد گوشه با سطح آزاد آب ۶۷
- شکل (۴-۱۷): مقایسه نتایج عددی شبکه های متحرک مختلف با نتایج آزمایشگاهی توزیع ضریب فشار بر روی گوشه پس از گذشت مدت زمان ۰/۰۱۵۸ ثانیه از برخورد گوشه با سطح آزاد آب ۶۸
- شکل (۴-۱۸): مقایسه نتایج عددی شبکه های محاسباتی با تعداد گره های متفاوت با نتایج آزمایشگاهی تغییرات سرعت گوشه بر حسب زمان پس از برخورد گوشه با سطح آزاد آب ۶۹
- شکل (۴-۱۹): مقایسه نتایج عددی شبکه های محاسباتی با تعداد گره های متفاوت با نتایج آزمایشگاهی تغییرات نیروی قائم (اسلمینگ) بر حسب زمان پس از برخورد گوشه با سطح آزاد آب ۷۰
- شکل (۴-۲۰): مقایسه نتایج عددی شبکه های محاسباتی با تعداد گره های متفاوت با نتایج آزمایشگاهی توزیع ضریب فشار بر روی گوشه پس از گذشت مدت زمان ۰/۰۱۵۸ ثانیه از برخورد گوشه با سطح آزاد آب ۷۰
- شکل (۴-۲۱): مقایسه نتایج عددی تأثیر سرعت اولیه در سقوط آزاد گوشه بر تغییرات سرعت بر حسب زمان ۷۲

- ۷۲ شکل (۴-۲۲): مقایسه نتایج عددی تأثیر سرعت اولیه در سقوط آزاد گوشه بر تغییرات نیروی قائم بر حسب زمان
- ۷۳ شکل (۴-۲۳): مقایسه نتایج عددی تأثیر سرعت اولیه در سقوط آزاد بر توزیع ضریب فشار بر روی گوشه پس از گذشت مدت زمان  $0/0158$  ثانیه از برخورد گوشه با سطح آزاد آب
- ۷۴ شکل (۴-۲۴): مقایسه نتایج عددی جریان آرام و آشفته با نتایج آزمایشگاهی تغییرات سرعت گوشه بر حسب زمان پس از برخورد گوشه با سطح آزاد آب
- ۷۴ شکل (۴-۲۵): مقایسه نتایج عددی جریان آرام و آشفته با نتایج آزمایشگاهی تغییرات نیروی قائم (اسلمینگ) بر حسب زمان پس از برخورد گوشه با سطح آزاد آب
- ۷۵ شکل (۴-۲۶): مقایسه نتایج عددی جریان آرام و آشفته با نتایج آزمایشگاهی توزیع ضریب فشار بر روی گوشه پس از گذشت مدت زمان  $0/0158$  ثانیه از برخورد گوشه با سطح آزاد آب
- ۷۶ شکل (۴-۲۷): مقایسه نتایج عددی سیال تراکم پذیر و تراکم ناپذیر با نتایج آزمایشگاهی تغییرات سرعت گوشه بر حسب زمان پس از برخورد گوشه با سطح آزاد آب
- ۷۶ شکل (۴-۲۸): مقایسه نتایج عددی سیال تراکم پذیر و تراکم ناپذیر با نتایج آزمایشگاهی تغییرات نیروی قائم (اسلمینگ) بر حسب زمان پس از برخورد گوشه با سطح آزاد آب
- ۷۷ شکل (۴-۲۹): مقایسه نتایج عددی سیال تراکم پذیر و تراکم ناپذیر با نتایج آزمایشگاهی توزیع ضریب فشار بر روی گوشه پس از گذشت مدت زمان  $0/0158$  ثانیه از برخورد گوشه با سطح آزاد آب
- ۷۸ شکل (۴-۳۰): مقایسه نتایج عددی نیروی قائم (اسلمینگ) وارد بر گوشه بر حسب زمان در دو حالت سرعت متغیر و سرعت ثابت پس از برخورد
- ۷۸ شکل (۴-۳۱): مقایسه نتایج تغییر شکل سطح آزاد آب در دو حالت الف) سرعت متغیر ب) سرعت ثابت پس از برخورد
- ۷۹ شکل (۴-۳۲): مقایسه نتایج توزیع فشار بر روی گوشه در دو حالت الف) سرعت متغیر ب) سرعت ثابت پس از برخورد
- ۷۹ شکل (۴-۳۳): مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی تغییر شکل سطح آزاد پس از گذشت مدت زمان  $0/063$  ثانیه از برخورد
- ۸۰ شکل (۴-۳۴): حوزه محاسباتی
- ۸۱ شکل (۴-۳۵): مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی تغییرات سرعت گوشه بر حسب زمان پس از برخورد با سطح آب
- ۸۱ شکل (۴-۳۶): مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی جابجایی قائم گوشه بر حسب زمان پس از برخورد با سطح آزاد آب
- ۸۲ شکل (۴-۳۷): تغییرات سرعت جسم در حین پدیده ضربه آب  $(h=1/3m, \theta=25, m=94kg)$

- شکل (۴-۳۸): مقایسه نتایج نیروی قائم وارد بر گوشه بر حسب زمان در دو حالت سرعت متغییر و سرعت ثابت پس از برخورد ( $h=1/3m, \theta=25, m=94kg$ )
- شکل (۴-۳۹): تأثیر پارامتر جرم بر روی توزیع فشار  $0/01$  ثانیه پس از برخورد
- شکل (۴-۴۰): تأثیر پارامتر جرم بر نیروی هیدرودینامیکی حاصل از ضربه آب
- شکل (۴-۴۱): تأثیر پارامتر زاویه عرضی گوشه بر توزیع فشار،  $0/01$  ثانیه پس از برخورد
- شکل (۴-۴۲) - تأثیر پارامتر زاویه عرضی گوشه بر نیروی ضربه هیدرودینامیکی
- شکل (۴-۴۳): حوزه محاسباتی
- شکل (۴-۴۴): شبکه محاسباتی مورد استفاده در شبیه سازی برخورد نامتقارن
- شکل (۴-۴۵): شبکه محاسباتی مورد استفاده در اطراف جسم در شبیه سازی برخورد نامتقارن
- شکل (۴-۴۶): مقایسه نتایج عددی تغییرات سرعت خطی با نتایج آزمایشگاهی در برخورد نامتقارن گوشه با سطح آزاد آب
- شکل (۴-۴۷): مقایسه نتایج عددی تغییرات چرخش زاویه با نتایج آزمایشگاهی در برخورد نامتقارن گوشه با سطح آزاد آب
- شکل (۴-۴۸): تأثیر عمق اولیه آب بر نتایج عددی تغییرات سرعت خطی در برخورد نامتقارن گوشه با سطح آزاد آب
- شکل (۴-۴۹): تأثیر عمق اولیه آب بر نتایج عددی تغییرات چرخش زاویه ای در برخورد نامتقارن گوشه با سطح آزاد آب
- شکل (۴-۵۰): تأثیر عمق اولیه آب بر نتایج عددی تغییرات نیروی ضربه هیدرودینامیکی در برخورد نامتقارن گوشه با سطح آزاد آب
- شکل (۴-۵۱): تأثیر انحراف زاویه از حالت متقارن بر نتایج عددی تغییرات نیروی ضربه هیدرودینامیکی در برخورد نامتقارن گوشه با سطح آزاد آب
- شکل (۴-۵۲): تغییرات شبکه متحرک بر حسب زمان پس از رها شدن گوشه در برخورد نامتقارن
- شکل (۴-۵۳): تغییر شکل سطح آزاد و کانتور توزیع فشار پس از برخورد نامتقارن گوشه با سطح آب
- شکل (۵-۱): حوزه محاسباتی ب) گوشه سه بعدی
- شکل (۵-۲): نمای کلی شبکه محاسباتی سه بعدی مورد استفاده در روش DLM
- شکل (۵-۳): شبکه محاسباتی سه بعدی مورد استفاده در روش DLM در جهات مختلف
- شکل (۵-۴): انتخاب شرایط مرزی در روش DLM
- شکل (۵-۵): مقایسه نتایج حل عددی سه بعدی و دو بعدی با نتایج آزمایشگاهی تغییرات سرعت گوشه بر حسب زمان پس از برخورد گوشه با سطح آزاد آب
- شکل (۵-۶): مقایسه نتایج عددی سه بعدی و دو بعدی با نتایج آزمایشگاهی

- تغییرات نیروی قائم (اسلمینگ) بر حسب زمان پس از برخورد گوشه با سطح آزاد آب  
شکل (۷-۵): مقایسه نتایج عددی سه بعدی و دو بعدی با نتایج آزمایشگاهی  
۹۹ توزیع ضریب فشار بر روی گوشه پس از گذشت مدت زمان ۰/۰۱۵۸ ثانیه از برخورد گوشه با سطح آزاد آب
- شکل (۸-۵): مقایسه نتایج عددی طول های مختلف حوضچه تست عددی  
۱۰۰ با نتایج آزمایشگاهی تغییرات سرعت گوشه بر حسب زمان پس از برخورد گوشه با سطح آزاد آب
- شکل (۹-۵): مقایسه نتایج عددی طول های مختلف حوضچه تست عددی  
۱۰۱ با نتایج آزمایشگاهی تغییرات نیروی قائم (اسلمینگ) بر حسب زمان پس از برخورد گوشه با سطح آزاد آب
- شکل (۱۰-۵): مقایسه نتایج عددی طول های مختلف حوضچه تست عددی  
۱۰۱ با نتایج آزمایشگاهی توزیع ضریب فشار بر روی گوشه پس از گذشت مدت زمان ۰/۰۱۵۸ ثانیه از برخورد گوشه با سطح آزاد آب
- شکل (۱۱-۵): مقایسه نتایج عددی تعداد گره های محاسباتی مختلف با نتایج  
۱۰۲ آزمایشگاهی تغییرات سرعت گوشه بر حسب زمان پس از برخورد گوشه با سطح آزاد آب
- شکل (۱۲-۵): مقایسه نتایج عددی تعداد گره های محاسباتی مختلف با  
۱۰۳ نتایج آزمایشگاهی تغییرات نیروی قائم (اسلمینگ) بر حسب زمان پس از برخورد گوشه با سطح آزاد آب
- شکل (۱۳-۵): مقایسه نتایج عددی تعداد گره های محاسباتی مختلف با  
۱۰۳ نتایج آزمایشگاهی توزیع ضریب فشار بر روی گوشه پس از گذشت مدت زمان ۰/۰۱۵۸ ثانیه از برخورد گوشه با سطح آزاد آب
- شکل (۱۴-۵): تغییرات سطح آزاد آب پس از گذشت ۰/۰۱۵ ثانیه از برخورد  
۱۰۴ گوشه با سطح آب در جهات مختلف
- شکل (۱۵-۵): الف) تغییرات شکل سطح آزاد آب پس از برخورد گوشه سه بعدی  
۱۰۵ با سطح آزاد آب ب) توزیع فشار پس از برخورد گوشه سه بعدی با سطح آزاد آب
- شکل (۱۶-۵): توزیع فشار در مقاطع مختلف گوشه از ابتدای جسم در راستای  
۱۰۶ عمق پس از گذشت مدت زمان ۰/۰۱ ثانیه از برخورد گوشه سه بعدی با سطح آب
- شکل (۱۷-۵): الف) توزیع فشار در مقطع میانی در حالت برخورد گوشه سه بعدی  
۱۰۶ ب) توزیع فشار در حالت برخورد گوشه دوبعدی پس از گذشت مدت زمان ۰/۰۱ ثانیه از برخورد گوشه سه بعدی با سطح آب
- شکل (۱۸-۵): مقایسه نتایج عددی دو بعدی و سه بعدی با نتایج آزمایشگاهی  
۱۰۷ تغییرات سرعت گوشه بر حسب زمان پس از برخورد با سطح آب

- شکل (۵-۱۹): مقایسه نتایج عددی دو بعدی و سه بعدی با نتایج آزمایشگاهی  
 جابجایی قائم گوشه بر حسب زمان پس از برخورد با سطح آزاد آب ۱۰۸
- شکل (۵-۲۰): منحنی قایق پرنده در جهات مختلف ۱۰۹
- شکل (۵-۲۱): حوزه محاسباتی ۱۱۰
- شکل (۵-۲۲): شبکه محاسباتی سه بعدی مورد استفاده حول قایق پرنده ۱۱۱
- شکل (۵-۲۳): شبکه بندی در حوزه محاسباتی ۱۱۱
- شکل (۵-۲۴): نتایج عددی تغییرات سرعت پس از برخورد کف NACA-16 با سطح آب ۱۱۲
- شکل (۵-۲۵): نتایج عددی تغییرات نیروی قائم پس از برخورد کف NACA-16 با سطح آب ۱۱۲
- شکل (۵-۲۶): نتایج عددی تغییرات نیروی قائم وارد بر کف NACA-16 در وزن های مختلف ۱۱۳
- شکل (۵-۲۷): تغییرات سطح آزاد پس از گذشت ۰/۰۳۲ ثانیه از برخورد کف  
 NACA-16 با سطح آب در جهات مختلف ۱۱۳
- شکل (۵-۲۸): تغییرات سطح آزاد پس از برخورد کف قایق پرنده با سطح آب  
 در زمان های مختلف ۱۱۴
- شکل (۵-۲۹): توزیع فشار پس از برخورد کف قایق پرنده با سطح آب در زمان های مختلف ۱۱۴

## فهرست جدولها

صفحه	عنوان
۵۷	جدول (۱-۴): مشخصات حوزه محاسباتی و گوشه دوبعدی
۶۹	جدول (۲-۴): مشخصات تعداد گره های شبکه های محاسباتی
۸۰	جدول (۳-۴): مشخصات حوزه محاسباتی و گوشه دوبعدی
۸۳	جدول (۴-۴): مشخصات حوزه محاسباتی و گوشه دو بعدی
۸۶	جدول (۵-۴): مشخصات حوزه محاسباتی و گوشه دو بعدی
۹۵	جدول (۱-۵): مشخصات حوزه محاسباتی و گوشه سه بعدی
۱۰۲	جدول (۲-۵): مشخصات تعداد گره های شبکه های محاسباتی
۱۰۶	جدول (۳-۵): مشخصات حوزه محاسباتی و گوشه سه بعدی
۱۰۹	جدول (۴-۵): مختصات هندسی مربوط به هندسه قایق پرنده
۱۱۰	جدول (۵-۵): مشخصات حوزه محاسباتی

# فصل اول: آشنایی با پدیده اثر سطح

## ۱-۱- مقدمه

امروزه طراحان زیادی در کشورهای مختلف در زمینه حل مشکل افزایش سرعت وسایل حمل و نقل فعالیت می نمایند. معمولاً وسایل حمل و نقل دریایی یکی از کم سرعت ترین وسایل حمل و نقل می باشند. در طی ۲۰ الی ۲۵ سال اخیر سرعت حمل و نقل هوایی ۳ تا ۴ برابر و سرعت حمل و نقل ریلی ۱/۵ تا ۲ برابر افزایش یافته [۱]، ولی افزایش سرعت حمل و نقل دریایی فقط ۲۰ الی ۲۵ درصد بوده است. در سال ۱۹۷۴ میلادی در روسیه ۲۰ درصد از مسافران توسط خطوط هوایی جابجا شده اند، در حالی که ۲۵ سال قبل از آن، این مقدار تنها ۱/۲ درصد بوده است. در عین حال میزان استفاده از وسایل حمل و نقل دریایی در طی ۲۵ سال اخیر تا ۵ برابر کاهش یافته و به ۰/۸ درصد رسیده است.

این وضعیت در خطوط بین قاره ای بحرانی تر می باشد، چرا که در این خطوط تقریباً ۹۵ درصد مسافران از وسایل حمل و نقل هوایی استفاده می کنند، در صورتی که ۲۰ الی ۲۵ سال پیش مقدار آن فقط چند درصد بوده است. علت اصلی عدم افزایش سرعت حرکت وسایل حمل و نقل دریایی آن است که در شناورهای معمولی توان مصرفی جهت دستیابی به سرعت بالا، به صورت تصاعدی افزایش می یابد (توان مصرفی می تواند متناسب با توان سوم، چهارم و یا حتی توان های بالاتر سرعت باشد). در همین رابطه وسایل حمل و نقل زمینی و هواپیماها در شرایط بهتری قرار دارند.

اساسی ترین روش برای افزایش سرعت حرکت شناورها بیرون آوردن بدنه شناور از آب و قرار دادن آن در هوا می باشد، یعنی در محیطی که چگالی آن تقریباً ۸۰۰ برابر کمتر از چگالی آب بوده و در نتیجه نسبت به آن از انعطاف پذیری بیشتری برخوردار است. برای بیرون کشیدن بدنه از آب و کاهش مقاومت آن، چندین روش شناخته شده است، از جمله: سُر خوردن<sup>۱</sup>، استفاده از هیدروفویل، استفاده از خاصیت روان سازی توسط هوا، استفاده از بالشتک هوا و استفاده از پدیده اثر سطح<sup>۲</sup>. استفاده از هر یک از این روش ها با توجه به کاربرد و محدودیت های موجود می تواند در افزایش سرعت شناورهای دریایی مفید واقع شود.

<sup>۱</sup> Skim (over water)

<sup>۲</sup> Ground Effect



در این فصل سعی بر این است که پدیده اثر سطح به طور مختصر مورد بررسی قرار گیرد و در ادامه یکی از شناورهای دریایی به نام قایق پرنده<sup>۱</sup> که از پدیده اثر سطح در حین پرواز استفاده می کند و وقوع پدیده ضربه هیدرودینامیکی در این نوع از شناورهای دریایی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۱-۲- استفاده از پدیده اثر سطح در طبیعت

بشر از مدت‌ها پیش دریافته بود که پرندگان و ماهی های پرنده برای پرواز به صورت گسترده ای از ناحیه اثر سطح استفاده می کنند. بعدها با پیشرفت علم ثابت گردید که انجام پرواز در نزدیک سطح موجب افزایش کیفیت های آیرودینامیکی می گردد. بشر در اکثر موارد از طبیعت الهام گرفته است. در این زمینه نتایج تحقیقات طولانی مدت دانشمند روس آ. ب. کیستیاکوفسکی [۱]، از اهمیت خاصی برخوردار می باشد.

این دانشمند پس از سال ها مشاهده و تحقیق متوجه شد که ماهی های پرنده در هنگام شتاب گیری بر روی سطح آب، با به حرکت در آوردن سریع دم به سرعت کافی جهت خارج نمودن بخشی از بدن خود از آب می رسند. در این حالت قسمت جلوی بدن ماهی بال آمده و باله های سینه باز می گردند، به گونه ای که سطح لازم جهت تولید نیروی برآ<sup>۲</sup> افزایش می یابد. در این مرحله از پرواز قسمت پایینی دم به صورت یک ملخ عمل نموده و قسمت بالایی آن به همراه تمام بدن ماهی بر روی سطح آب حرکت می کند. در این حالت باله های ناحیه شکم بر خلاف باله های سینه به بدن می چسبند تا مقدار نیروی پسا<sup>۳</sup> در حرکت کاهش یابد. بدین ترتیب حرکت ماهی های پرنده در مرحله شتاب گیری یادآور پرواز قایق های پرنده دارای ملخ آبی می باشد.

پرندگان زیادی نیز برای پرواز خود از سطح آب استفاده می کنند. انواع مختلف مرغ های دریایی، پلیکان ها، مرغابی ها، اردک ها، قوها و دیگر پرندگان مشابه در ارتفاع خیلی پایین تا سطح آب و به عبارت دیگر در منطقه اثر گذاری پدیده سطح پرواز می نمایند. همین امر نشان می دهد که پرواز پرندگان در ناحیه اثر سطح هیچ گونه مشکلی را برای آنها به وجود نمی آورد. دامنه بال زدن پرندگان در نزدیک سطح خیلی کمتر از پرواز معمولی می باشد، اما فرکانس آن ثابت مانده و یا کمی بیشتر می شود. دلیل تمایل غیر ارادی پرندگان برای استفاده هر چه بیشتر از تأثیرات مطلوب سطح با کاهش ارتفاع پرواز، نیز همین امر می باشد. سرعت پرواز

---

<sup>1</sup> Flying Boat

<sup>2</sup> Lift

<sup>3</sup> Drag

پرنندگان در نزدیک سطح ظاهراً به علت کاهش نیروی مقاومت کلی پرواز بر اثر افت نیروی پَسای القایی<sup>۱</sup> بال به صورت چشمگیری افزایش می یابد [۱].

مشاهدات پرواز پرنندگان در نزدیک سطح این امکان را فراهم می نماید تا ویژگی های زیر ثابت گردد:

- نیروی برآ در هنگام بال زدن پرنندگان در نزدیکی سطح نه تنها به کمک زاویه حمله مثبت بال، بلکه به واسطه تجمع هوا در زیر بال به کمک بال زدن نیز تولید می گردد. در نتیجه پرنده به صورت ترکیبی از قایق پرنده و هاورکرافت عمل می کند.
- انحنای زیاد و انعطاف پذیری پرهای بال پرنندگان این امکان را فراهم نموده است تا آنها بتوانند بدون ایجاد تماس، تا حدی زیادی به سطح آب نزدیک شوند. در صورت نزدیک شدن بال به سطح، فشار در قسمت زیرین بال تا حدی افزایش می یابد که وارد نمودن ضربه به آب به سادگی امکان پذیر نمی باشد. پرهای انتهایی بال به بالا خم شده و به صورت همزمان نیروی برآ تا حدی افزایش می یابد که گوئی پرنده خود را بر روی بالشتکی از هوا رها نموده و عملاً نمی تواند با سطح حتی در صورت موجی بودن آب برخورد نماید.
- در عین حال پرواز پرنندگان در نزدیک سطح از مشکلات خاصی از جمله کاهش توانایی انجام مانور نیز برخوردار می باشد و به همین دلیل اکثر پرنندگان در نزدیک سطح آب فقط پرواز مستقیم انجام می دهند. چنانچه در مسیر پرواز مانعی قرار گرفته باشد، پرنده از سطح آب جدا شده و ارتفاع پرواز خود را تا چندین متر افزایش می دهد و پس از گذشتن از مانع مجدداً به سطح آب نزدیک می گردد. کآریو، برتلسون [۲] و دیگران نیز در هنگام انجام تست های قایق پرنده اولیه متوجه این ویژگی پرواز در نزدیک سطح گردیدند. بعدها دیگر سازندگان شناورهای مشابه از جمله الکساندر لپیش آلمانی [۲]، نیز بارها متذکر این ویژگی شدند. بدین صورت که ایجاد پیچش<sup>۲</sup> لازم برای از بین بردن سُرش<sup>۳</sup> قایق پرنده و دور زدن، پیچیده و خطرناک می باشد.
- همچنین مشاهده گردیده است که پرنندگان تنها در صورتی که جهت وزش باد از روبرو باشد و یا در صورت وزش ضعیف باد از جانب و همچنین در صورت آرام بودن سطح آب در نزدیک سطح پرواز می کنند و چنانچه وزش باد در جهت پرواز باشد، به ندرت از اثر سطح استفاده می نمایند.

<sup>1</sup> Induced Drag

<sup>2</sup> Bank

<sup>3</sup> Slipping

با توجه به مطالب ذکر شده می توان نتیجه گیری نمود که نتایج تحقیقات متخصصان علم بیونیک در زمینه مطالعه و بررسی پرواز پرندگان مختلف در نزدیکی سطح می تواند به تکامل قایق های پرنده کمک شایانی نماید.

### ۳-۱- پدیده اثر سطحی در شناورهای دریایی

زمانی که یک بال (یک ایرفویل) به سطح نزدیک می شود، در جریان اطراف بال دو پدیده با هم درگیر می شوند. اثر سطح نامی است که برای هر دو به کار می رود و اغلب با هم اشتباه می شوند. این دو اثر را با نام اثرات طولی و عرضی اثر سطح می شناسیم. این دو اثر باعث کاهش نیروی پسای القایی ( $D$ ) و افزایش نیروی برآ ( $L$ ) می شوند که نهایتاً افزایش نسبت  $L/D$  را در بردارد. این نسبت به عنوان معیاری برای کارایی شناور به شمار می آید. همچنین این نسبت را می توان بوسیله مقدار توان (تراست) لازمه برای یک وزن مشخص بیان کرد. هم چنانکه فاصله بین سطح و بال کاهش می یابد نسبت  $L/D$  افزایش می یابد و شناور با کارایی بهتر به کار خود ادامه می دهد.

#### ۳-۱-۱- تاثیر طولی اثر سطح

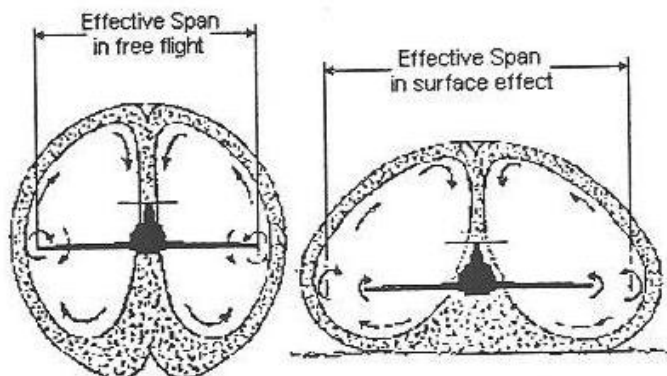
در ابتدا زمانی که مهندسان علوم هوافضا به پدیده اثر سطحی اشاره می نمودند، این پدیده را تنها مؤثر بر طول بال در نظر می گرفتند. نیروی پسای یک شناور می تواند به بخش های مختلفی تقسیم شود که دو منبع اصلی آن نیروهای پسای سطحی و القایی به شمار می رود. پسای پوسته ای در اثر اصطکاک سطح تماس با سیال ایجاد می شود که ارتباط مستقیمی با سطح شناور دارد و به همین علت آن را بدین نام می خوانند.

اما نیروی پسای القایی که بعضاً نیروی پسای القایی برآ نامیده می شود، در اثر تولید نیروی برآ ایجاد می شود. بدین صورت که، در زمان تولید نیروی برآی مثبت توسط بال، فشار استاتیکی سطح زیرین از سطح رویین بال بیشتر است. این نیرو (نیروی برآ) برابر با حاصل ضرب اختلاف فشار میانگین در مساحت بال می باشد. در این حالت در لبه بال به علت برخورد دو سطح پرفشار و کم فشار، یکسری گردابه هایی ایجاد می شود (هوا از سطح پرفشار زیرین به سمت سطح کم فشار بالایی جریان می یابد) و به علت تغییر در توزیع فشار نیروی پسای القایی ایجاد خواهد شد. به بیان ساده تر انرژی ذخیره شده در این گردابه ها از بین رفته و به صورت

نیروی پسای القایی نمایان می شود. این گردابه ها در تمام هواپیماهای در حال پرواز یافت می شود و گاهی نیز قابل رؤیت است. نیروی پسای القایی با افزایش نسبت منظری بال، کاهش خواهد یافت. دلیل این امر ضعیف تر شدن گردابه های نوک بال است زمانی که یک بال در نزدیک سطح پرواز می کند گردابه های ایجاد شده فاقد فضای کافی جهت توسعه یافتن هستند، بنابراین مقدار نشت فشار از سطح پایین کمتر است و گردابه ها ضعیف تر می شوند. از طرف دیگر، گردابه ها یک سطح خارجی را در اطراف بال پوشش می دهند که این امر به طور ظاهری افزایش نسبت منظری بال را در بردارد. در سال ۱۹۲۰ ویسلزبرگر<sup>۱</sup> [۱]، از طریق به کار بردن تئوری خط برای پیرانتل، متوجه این واقعیت شد که در فاصله ای حدود ۱۰ درصد طول دهانه بال از سطح، نیروی پسای القایی حدود ۵۰ درصد کاهش می یابد.

### ۱-۳-۲- تأثیر عرضی اثر سطح

پدیده اثر سطح بدنبال افزایش فشار سطح زیرین بال افزایش نیروی برآ را به همراه دارد. وقتی که بال در نزدیک سطحی قرار گیرد، بالشتکی از هوا بوسیله فشار بالای سطح زیرین ایجاد می شود. از این امر گاهی به صورت تأثیر هوای محبوس شده در زیر بال یاد می شود. اگر فاصله از سطح خیلی کم شود، هوا می تواند در زیر بال به حالت سکون درآید، که این امر باعث ایجاد بیشترین فشار ممکن می شود. در شکل (۱-۱) می توان به وضوح بالشتک هوای فشار بالا را در زیر بال مشاهده کرد. رنگ تیره نمایش دهنده فشار بالا، رنگ روشن نمایش دهنده فشار محیط و بین آن دو نمایش دهنده فشار پایین است. با توجه به این شکل، علاوه بر افزایش فشار در زیر بال، می توان دریافت که ناحیه کم فشار اطراف لبه حمله بال که به بیشینه مکش بر روی لبه حمله اشاره دارد، در حضور اثر سطح شدیدتر می شود که این امر باعث ایجاد جدایی در دماغه می گردد.



شکل (۱-۱): مقایسه تأثیر عرضی اثر سطح در داخل و خارج از ناحیه اثر سطح

<sup>1</sup> Wieselsberger