

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



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

بررسی عددی اثر موجی بودن سطح بر نیروی درگ

نگارش:

سید محمد کمال عباس پور

استاد راهنما:

دکتر رضا مهريار

استاد مشاور:

دکتر مسعود خراتی کوپائی

تیر ۱۳۹۳

## بسمه تعالی

بررسی عددی اثر موجی بودن سطح بر نیروی درگ

پایان نامه ارائه شده به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی

نگارش:

سید محمد کمال عباس پور

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

گروه تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا

دانشگاه صنعتی شیراز

ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران با درجه: خیلی خوب

دکتر رضا مهریار، استادیار دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا(استاد راهنما) .....

دکترمسعود خراتی کوپایی، استادیار دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا(استاد مشاور).....

دکتر امیر حسین نیک سرشت، دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا(استاد داور).....

---

مدیر امور آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه:.....

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه صنعتی شیراز است.

## تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

اینجانب سید محمد کمال عباس پور دانشجوی رشته مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی) مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد به شماره دانشجویی ۹۰۱۴۴۰۲۲ تأیید می‌نماید کلیه نتایج این پایان‌نامه/رساله، بدون هیچگونه دخل و تصرف، حاصل مستقیم پژوهش صورت گرفته توسط اینجانب است. در مورد اقتباس مستقیم و غیر مستقیم از سایر آثار علمی، اعم از کتاب، مقاله، پایان‌نامه با رعایت امانت و اخلاق علمی، مشخصات کامل منبع مذکور درج شده است. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص مقامات ذی صلاح دانشگاه صنعتی شیراز، مطابق قوانین و مقررات مربوط و آئین‌نامه‌های آموزشی، پژوهشی و انضباطی عمل خواهد شد و اینجانب حق هرگونه اعتراض و تجدیدنظر را، نسبت به رأی صادره، از خود ساقط می‌کند. همچنین، هرگونه مسئولیت ناشی از تخلف نسبت به صحت و اصالت نتایج مندرج در پایان‌نامه/رساله در برابر اشخاص ذی‌نفع (اعم از حقیقی و حقوقی) و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) متوجه اینجانب خواهد بود و دانشگاه صنعتی شیراز هیچ‌گونه مسئولیتی در این زمینه نخواهند داشت.

تبصره ۱- کلیه حقوق مادی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تبصره ۲- اینجانب تعهد می‌نماید بدون اخذ مجوز از دانشگاه صنعتی شیراز دستاوردهای این پایان‌نامه/رساله را منتشر نکند و یا در اختیار دیگران قرار ندهد.

تاریخ و امضاء

## مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج پایان‌نامه متعلق به دانشگاه و انتشار نتایج نیز تابع مقرارت دانشگاهی است و با موافقت استاد راهنما به شرح زیر، بلامانع است:

- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضا:

## چکیده

### بررسی عددی اثر موجی بودن سطح بر نیروی درگ

نگارش:

سید محمد کمال عباس پور

با توجه به توانایی های ذاتی برخی از جانداران دریایی در حرکت در آب، توجه خاصی به امکان الهام گرفتن از آن ها شده است. دلفین جزو آبیانی است که به منظور دست یافتن به کاهش درگ از طریق الگو گیری از پوستش مورد توجه قرار گرفته است و تحقیقات متعددی انجام شده است.

در این تحقیق بر اساس روش عددی، به منظور بررسی اثرات انعطاف پذیری پوست دلفین بر روی جریان سیال حول آن و نیروی درگ وارد شده بر آن، یک صفحه دو بعدی موج دار ابتدا به صورت ثابت و سپس به صورت متحرک بررسی شده است. این صفحه به منظور داشتن شباهت بیشتر به رفتار حرکتی پوست، حرکت افقی نداشته است و فقط در راستای عمودی دارای حرکت نوسانی می باشد.

نتایج حاصله نشان می دهد که اگر صفحه بدون حرکت در نظر گرفته شود در مقایسه با صفحه صاف ۲۰ درصد درگ اصطکاکی کمتری خواهد داشت، اما درگ فشاری تحمیل شده به آن باعث می شود که درگ کلی افزایش پیدا کند. اگر صفحه متحرک باشد ضریب نیروی درگ آن به صورت نوسانی بر اساس زمان تغییر می کند و حتی در بعضی از شرایط نیروی درگ منفی حاصل شده است و لذا امکان کاهش نیروی درگ توسط این پوشش ها وجود دارد.

**واژه های کلیدی:** الهام از طبیعت. مطالعه عددی، جریان سیال، کاهش نیروی درگ، صفحه

موج دار متحرک

## فهرست مطالب

### فصل اول:

۱	مقدمه
۱-۱-۱	مقدمه
۱-۲-۱	الگو گیری از برخی جانداران دریایی:
۱-۲-۱-۱	پوست زبر کوسه
۱-۲-۱-۲	پوست ناهموار بادبان ماهی
۱-۲-۱-۳	باله های وال کوهان دار
۱-۲-۱-۴	حباب در پر های پنگوئن
۱-۲-۱-۵	پوست انعطاف پذیر دلفین

### فصل دوم:

۷	مروری بر تحقیقات انجام شده
۱-۱-۱	انعطاف پذیری پوست دلفین
۱-۲-۱	بررسی تجربی استفاده از پوشش های انعطاف پذیر
۱-۲-۱-۱	آزمایش با استفاده از سیال هوا
۱-۲-۱-۲	پوشش شیار دار عمود بر جریان
۱-۲-۱-۳	آزمایش با استفاده از سیال آب
۱-۲-۱-۳-۱	چروک های تشکیل شده بر روی پوشش انعطاف پذیر ناشی از عبور سیال
۱-۲-۱-۳-۲	بررسی انعطاف پذیری پوست دلفین با استفاده از ساختارهای موجی بدون حرکت
۱-۲-۱-۳-۲-۱	تحقیق های عددی انجام شده برای مدل سازی اجسام موجی شکل
۱-۲-۱-۳-۲-۲	آزمایش های انجام شده برای مدل سازی انعطاف پذیری پوست دلفین [۲۹]
۱-۲-۱-۳-۲-۳	بررسی انعطاف پذیری پوست دلفین با استفاده از ساختار موجی متحرک [۳۰]

### فصل سوم:

۲۶	معادلات حاکم و روش شبیه سازی
۱-۳-۱	مقدمه
۱-۳-۲	تعریف مسئله:
۱-۳-۳	معادلات حاکم

۲۹	..... مدل های آشفتگی	۳-۴-۲۹
۲۹	..... مدل $k-\omega$	۳-۴-۱-۲۹
۳۰	..... $sst\ k-\omega$	۳-۴-۲-۳۰
۳۰	..... spalart allmaras	۳-۴-۳-۳۰
۳۱	..... مدل سازی حرکت موج	۳-۵-۱-۳۱
۳۱	..... حرکت افقی موج با سرعتی در جهت سرعت جریان آزاد:	۳-۵-۱-۳۱
۳۲	..... حرکت عمودی یک موج انعطاف پذیر:	۳-۵-۲-۳۲
۳۳	..... حرکت عمودی و افقی یک موج انعطاف پذیر:	۳-۵-۳-۳۳
۳۴	..... معادله حرکت موج انعطاف پذیر (عمودی)	۳-۵-۴-۳۴
۳۸	..... معادله حرکت موج انعطاف پذیر (افقی)	۳-۵-۵-۳۸
۴۱	..... شبکه متحرک	۳-۶-۴۱

## فصل چهارم:

۴۳	نتایج شبیه سازی و تفسیر آنها	
۴۴	..... مقدمه:	۴-۱-۴۴
۴۴	..... نتایج حل عددی:	۴-۲-۴۴
۴۴	..... شبیه سازی جریان سیال آب بر روی یک صفحه صاف	۴-۲-۱-۴۴
۴۸	..... شبیه سازی جریان آب روی صفحه موج دار ثابت	۴-۲-۲-۴۸
۴۹	..... بررسی استقلال از شبکه محاسباتی	۴-۲-۳-۴۹
۵۴	..... اعتبار سنجی نتایج ساختار موجی انعطاف پذیر (متحرک)	۴-۳-۱-۵۴
۵۵	..... شبیه سازی در جریان آرام	۴-۳-۱-۵۵
	..... محاسبه درگ وارد بر سطح در جریان مغشوش (با استفاده از مدل spalart allmaras)	۴-۳-۲-۵۵
۵۹	..... محاسبه درگ وارد بر سطح در جریان مغشوش (با استفاده از مدل $sst(k-w)$ )	۴-۳-۳-۵۹
۶۰	..... بررسی شدت اغتشاشات جریان بر درگ وارد بر صفحه موجدار	۴-۳-۴-۶۰
۶۲	..... بررسی اثر اندازه شبکه محاسباتی و گام های زمانی	۴-۳-۵-۶۲
۶۴	..... بررسی حرکت افقی و عمودی موج	۴-۳-۶-۶۴
۶۶	..... دلایل تفاوت نتایج عددی با نتایج تحقیق تجربی	۴-۳-۷-۶۶
۶۷	..... صفحه موج دار متحرک در جریان آب	۴-۳-۸-۶۷



## فصل پنجم:

### جمع بندی و پیشنهادها

۷۵

۷۶ ..... ۱-۵- جمع بندی

۷۷ ..... ۲-۵- پیشنهادها

۷۸

مراجع

## فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) سرعت شنای تعدادی از سریع‌ترین جانداران دریایی..... ۳
- شکل (۲-۱) بادبان ماهی [۳]..... ۴
- شکل (۳-۱) وال کوهان دار الف- تصویری از وال ب- نمای کلی باله وال و برآمدگی‌های لبه  
حمله آن..... ۵
- شکل (۴-۱) حباب‌های آزاد شده از پنگوئن..... ۶
- شکل (۱-۲) نحوه بکارگیری پوششی مشابه با پوست دلفین [۱۳]..... ۹
- شکل (۲-۲) شدت توربولانس بر حسب فاصله از صفحه برای چند پوشش انعطاف‌پذیر..... ۱۱
- شکل (۳-۲) صفحه‌ای با مقطع ایرفویل مانند مورد استفاده در آزمایش لی [۱۵]..... ۱۱
- شکل (۴-۲) نسبت کاهش درگ با توجه به سرعت جریان آزاد..... ۱۲
- شکل (۵-۲) پوشش بکار رفته در تحقیق سینها [۱۶] و اثر آن بر روی جریان..... ۱۳
- شکل (۶-۲) نحوه جریان اطراف تریلر [۱۶]..... ۱۳
- شکل (۷-۲) اثر پوشش انعطاف‌پذیر بر روی جریان اطراف خودروی ون [۱۷]..... ۱۴
- شکل (۸-۲) اثر استفاده از پوشش انعطاف‌پذیر بر روی میزان گرد و غبار ایجاد شده روی شیشه  
عقب خودرو..... ۱۴
- شکل (۹-۲) تشخیص محل نصب پوشش با آغشته کردن سطح با روغن. مسیر عبور جریان از چپ  
به راست بوده است..... ۱۵
- شکل (۱۰-۲) اثر وجود پوشش روی سطح، مسیر جریان از چپ به راست..... ۱۵
- شکل (۱۱-۲) اثر وجود پوشش بر روی تغییرات نسبت نیروی لیفت به نیروی درگ بر حسب  
سرعت جریان..... ۱۶
- شکل (۱۲-۲) تأثیر سرعت بر روی ضریب درگ در نتیجه استفاده از پوشش در مجاورت آب..... ۱۸
- شکل (۱۳-۲) چروک‌های ایجاد شده بر روی پوشش انعطاف‌پذیر هنگام قرارگیری در معرض  
جریان آب..... ۲۰
- شکل (۱۴-۲) یک نمونه پوشش آزمایش شده [۲۵]..... ۲۱
- شکل (۱۵-۲) صفحات انتخابی با شیارهای مختلف برای بررسی اثر شیار بر نیروی درگ..... ۲۲
- شکل (۱۶-۲) نحوه ایجاد شکل سینوسی موج [۲۹]..... ۲۳
- شکل (۱۷-۲) ضریب درگ فشاری، اصطکاکی و کلی مدل‌های آزمایش..... ۲۳

- شکل (۲-۱۸) صفحه موجی آزمایش شده ..... ۲۴
- شکل (۲-۱۹) نیروی درگ وارد بر پوشش موجی بر حسب فرکانس حرکت ..... ۲۴
- شکل (۳-۱) سطح موجی ..... ۲۷
- شکل (۳-۲) حرکت افقی یک ساختار موجی صلب ..... ۳۲
- شکل (۳-۳) نمایی از حرکت عمودی سطح موج (فلش ها جهت حرکت نقاط را نشان می دهند) ..... ۳۳
- شکل (۳-۴) نمایی از حرکت عمودی و افقی سطح موج (فلش ها جهت حرکت نقاط را نشان می دهند) ..... ۳۴
- شکل (۳-۵) فرم اولیه بدست آمده برای صفحه موج دار با گذشت زمان برای فرکانس یک هرترتز ..... ۳۶
- شکل (۳-۶) فرم تصحیح یافته صفحه موج دار به منظور ثابت ماندن ابتدا و انتهای صفحه در لحظات مختلف ..... ۳۷
- شکل (۳-۷) طول برابر نمودار برای دو نقطه متناظر در زمان  $t$  و  $t+dt$  ..... ۳۸
- شکل (۳-۸) حرکت شبکه محاسباتی در یک بازه زمانی ..... ۴۲
- شکل (۴-۱) شرایط مرزی در نظر گرفته شده در حوزه محاسباتی ..... ۴۵
- شکل (۴-۲) شرایط مرزی در نظر گرفته شده در حوزه محاسباتی ..... ۴۷
- شکل (۴-۳) مقایسه نیروی درگ وارد بر صفحه صاف بر اساس سرعت ورودی سیال ..... ۴۷
- شکل (۴-۴) مشخصات صفحه موجی شکل برای انجام شبیه سازی عددی مطابق با روش آزمایشی [۲۹] ..... ۴۸
- شکل (۴-۵) نیروی درگ وارد بر سطح صاف و سطح موجی بر واحد سطح ..... ۵۰
- شکل (۴-۶) نیروی درگ فشاری وارد بر سطح موجی ..... ۵۱
- شکل (۴-۷) فشار استاتیکی ..... ۵۲
- شکل (۴-۸) نیروی درگ فشاری وارد بر یک طول موج ..... ۵۲
- شکل (۴-۹) نیروی درگ اصطکاکی وارد بر سطح موجی ..... ۵۳
- شکل (۴-۱۰) نیروی درگ اصطکاکی وارد بر یک طول موج ..... ۵۳
- شکل (۴-۱۱) پروفیل سرعت بر اساس فاصله از سطح ..... ۵۴
- شکل (۴-۱۲) صفحه فلزی و هفت سیلندر هوا ..... ۵۴
- شکل (۴-۱۳) اندازه دامنه و طول موج صفحه موج دار متحرک ..... ۵۵

- شکل (۴-۱۴) تغییرات ضریب درگ برای کل صفحه موجدار متحرک در جریان آرام با سرعت ۲ متر بر ثانیه..... ۵۶
- شکل (۴-۱۵) مقایسه متوسط نیروی درگ وارد بر صفحه موجدار متحرک در جریان آرام با سرعت ۲ متر در ثانیه..... ۵۷
- شکل (۴-۱۶) تغییرات ضریب درگ برای کل صفحه موجدار متحرک در جریان آرام با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه..... ۵۸
- شکل (۴-۱۷) مقایسه متوسط نیروی درگ وارد بر صفحه موجدار متحرک در جریان آرام با سرعت ۱/۵ متر در ثانیه..... ۵۹
- شکل (۴-۱۸) تغییرات ضریب درگ برای کل صفحه در زمانی که فرکانس حرکت برابر چهار بوده است..... ۶۰
- شکل (۴-۱۹) تغییرات ضریب درگ برای کل صفحه موجدار متحرک در جریان مغشوش..... ۶۱
- شکل (۴-۲۰) متوسط نیروی درگ وارد بر سطح موجی در جریان مغشوش آب با سرعت ۲ متر در ثانیه..... ۶۲
- شکل (۴-۲۱) تغییرات ضریب درگ برای کل صفحه موجدار متحرک بر حسب شدت اغتشاشات جریان..... ۶۳
- شکل (۴-۲۲) نیروی درگ متوسط بر حسب شدت توربولانس..... ۶۴
- شکل (۴-۲۳) مقایسه شبیه سازی حرکت عمودی مطلق با شبیه سازی حرکت عمودی به همراه حرکت افقی..... ۶۶
- شکل (۴-۲۴) مقدار +  $\gamma$  در فرکانس شش هرتز..... ۶۹
- شکل (۴-۲۵) تغییرات ضریب نیروی درگ وارد بر صفحه موج دار بر حسب فرکانس حرکت موج..... ۷۰
- شکل (۴-۲۶) تغییرات نیروی درگ فشاری و اصطکاکی موضعی روی صفحه موج دار برای فرکانس ۶ هرتز..... ۷۰
- شکل (۴-۲۷) تغییرات نیروی اصطکاکی موضعی روی یک طول موج برای فرکانس های مختلف..... ۷۱
- شکل (۴-۲۸) تغییرات نیروی فشاری موضعی روی یک طول موج برای فرکانس های مختلف..... ۷۱
- شکل (۴-۲۹) فشار استاتیکی بر اساس شکل موج در دو فرکانس ۴ و ۶ هرتز..... ۷۲
- شکل (۴-۳۰) نیروهای وارد بر یک طول موج..... ۷۳

## فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۲) مشخصات پوشش‌های مورد استفاده در تحقیقات گروه آمریکایی و بریتانیایی [۲۰]	۱۷
جدول (۱-۴) اعداد بر اساس متر است.	۴۷
جدول (۲-۴) مقدار ضریب درگ بر اساس تعداد سلول‌های مورد استفاده در حوزه محاسباتی....	۴۹
جدول (۳-۴) مقایسه ضریب درگ وارد بر سطح موجی شکل با نتایج تجربی.....	۴۹
جدول (۴-۴) مقدار ضریب درگ بر اساس تعداد سلول‌های مورد استفاده در حوزه محاسباتی و	
گام‌های زمانی.....	۶۵
جدول (۵-۴) مقدار ضریب درگ بر اساس تعداد سلول‌های مورد استفاده در حوزه محاسباتی و	
گام‌های زمانی.....	۶۸
جدول (۶-۴) مقایسه نیروهای وارد بر صفحه موجدار متحرک با صفحه صاف.....	۷۴

## فهرست نشانه‌های اختصاری

$t$	زمان
$m$	مکان
$F$	نیرو
$\rho$	چگالی
$u$	سرعت افقی
$v$	سرعت عمودی
$c_d$	ضریب درگ
$a$	دامنه موج
$\lambda$	طول موج
$f$	فرکانس
$Re$	عدد رینولدز
$E$	مدول الاستیسیته
$c$	سرعت حرکت موج
$k$	انرژی جنبشی آشفتگی
$\omega$	نرخ اتلاف مخصوص آشفتگی

## فهرست کلمات اختصاری

CFD	Computational fluid dynamics
DNS	direct numerical solution
LES	large eddy simulation

# فصل اول:

## مقدمه



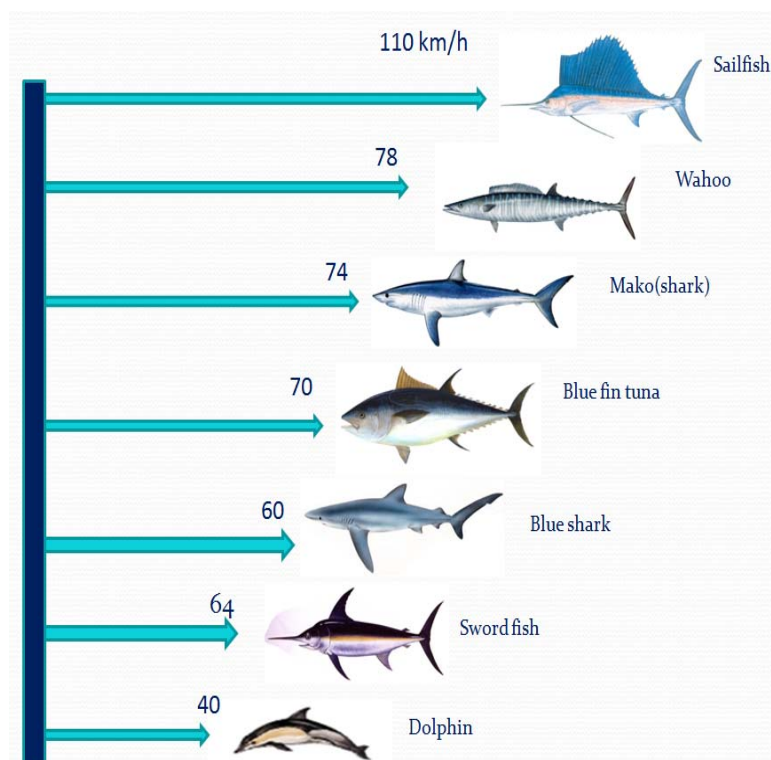
در حال حاضر موضوع تأمین انرژی یکی از بزرگترین مسئله های مورد توجه دنیای امروز در کلیه کشورها است و با رشد روز افزون تقاضا و همچنین افزایش قیمت آن، اهمیت و توجه بیشتری را در تأمین و مصرف بهینه آن می طلبد. منابعی مانند سوخت های فسیلی، هسته ای، بادی و یا خورشیدی برای تأمین انرژی در سراسر جهان مورد استفاده قرار می گیرند که هر کدام از آن ها مشکلات خاصی را دارند.

به عنوان مثال: سوخت های فسیلی علاوه بر مشکلات زیست محیطی، محدود بوده و متعلق به نسلهای آتی نیز می باشد. لذا تبدیل نفت خام در صنایع تبدیل پتروشیمی ارزش افزوده بیشتری را به همراه دارد. در مقابل تولید برق از طریق نیروگاه اتمی، آلودگی نیروگاههای کنونی را ندارد. اما باقی مانده سوخت هسته ای (زباله هسته ای) برای هزاران سال باقی می ماند. این مواد، پرتوزا هستند و خطر نشت مواد رادیواکتیو از این زباله ها زیاد است. همچنین تاسیس نیروگاه هسته ای بسیار گران و پرهزینه بوده و منابع اورانیوم نیز محدود است.

از میان انرژی های نو، انرژی باد بستگی به نحوه وزش باد در مناطق بادگیر دارد پس یکی از منابع ناپایدار است و تولید باد به فاکتورهای متعددی نظیر سرعت باد وابسته است. برخی منتقدان بر این باورند که انرژی باد در مواردی که تقاضا بالاست، پیشنهاد مناسبی نیست. در خصوص بهره گیری از انرژی خورشیدی نیز هزینه ی اولیه مهم ترین ایراد راه اندازی این سیستم ها با توجه به لزوم بکارگیری سیستم ذخیره سازی انرژی خورشیدی است. سلول های خورشیدی مساحت زیادی را دربرمی گیرند. میزان انرژی جذب شده بستگی به موقعیت خورشید و به وضعیت آب و هوایی دارد و در طول شب امکان استفاده از آن وجود ندارد.

یکی از صنعت های وابسته به انرژی حمل و نقل است، که برای کاهش مشکلات ناشی از تأمین انرژی لازم است که تحقیقات در ارتباط با کم کردن سوخت مصرفی در این صنعت انجام شود. در حوزه حمل و نقل دریایی و صنایع مرتبط به آن، یکی از روش های مورد توجه برای کاهش مصرف سوخت الهام گرفتن از شنای جانداران دریایی است. برخی از آن ها توانایی شنا کردن با سرعت های بالایی را دارند (شکل (۱-۱)) و یا اینکه بعضی از آن ها مجبور به طی کردن مسافت های طولانی برای یافتن غذا در دریاها و اقیانوس ها می باشند. بنابر این می توان دریافت که ویژگی های هیدرودینامیکی این

جانداران یکی از عوامل مهم می باشد.



شکل (۱-۱) سرعت شنای تعدادی از سریع ترین جانداران دریایی

## ۱-۲-۱- الگوگیری از برخی جانداران دریایی:

تا کنون فعالیت های زیادی برای کاهش درگ از طریق الگوگیری و بررسی جانداران دریایی انجام شده است، در ادامه مشخصات برخی از جانداران دریایی آورده شده است.

### ۱-۲-۱- پوست زبر کوسه

کوسه دارای پوستی است که اگر لمس شود مانند یک سمباده احساس می شود [۱]. به طوری که پوست کوسه در بعضی از گونه ها باعث کاهش درگ در حدود ده درصد می شود [۲].

## ۱-۲-۲- پوست ناهموار بادبان ماهی<sup>۱</sup>

بادبان ماهی بر روی پوست خود دارای برآمدگی های وی شکل است، که مقیاس آن ها در حدود ۵ میلی متر و بسیار درشت تر از زبری پوست کوسه می باشد، لذا اگر این برجستگی ها باعث کاهش درگ شوند برای الگوگیری از آن ها و تولید سطوح مشابه تجهیزات ساده تری را برای ساخت نیاز دارد.



ب- برجستگی های پوست



الف- شکل ظاهری

شکل (۱-۲) بادبان ماهی [۳]

تحقیقات انجام گرفته بر روی پوست این نوع ماهی ها نتایج متضادی به همراه داشته است. در یک تحقیق که بر روی این برآمدگی ها انجام شده است؛ اعلام شده است که درگ وارد بر صفحه مجهز به این برجستگی ها کمتر از درگ وارد بر صفحه صاف بوده است [۴]. در حالی که دو تحقیق دیگر که بر روی این برجستگی ها انجام شده است نشان داده است که این برجستگی ها اثر مطلوبی بر کاهش درگ ندارند. [۳و۵]

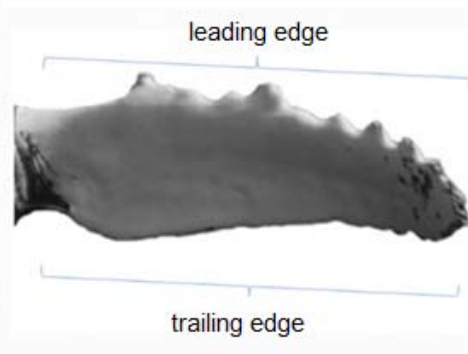
<sup>1</sup> Sail fish

### ۱-۲-۳- باله های وال کوهان دار

وال کوهان دار<sup>۱</sup> دارای باله های سینه ای منحصر به فردی است، در لبه جلوی این باله ها برآمدگی هایی وجود دارد که باعث شده است مطابق با شکل (۱-۳) لبه حمله در این باله ها ظاهری موجی شکل پیدا کند. بررسی هایی بر روی اثر موجی شکل بودن لبه حمله در باله های این جاندار انجام شده است که در آن ها؛ امکان کاهش درگ و به عقب افتادن پدیده واماندگی به دلیل این الگوی شکلی بررسی شده است. [۶، ۷، ۸ و ۹]



الف-



ب-

شکل (۱-۳) وال کوهان دار الف- تصویری از وال ب- نمای کلی باله وال و برآمدگی های لبه حمله آن

### ۱-۲-۴- حباب در پر های پنگوئن

تصویر برداری و فیلم برداری از حرکت پنگوئن نشان داده است که این پرنده در هنگام شنا به سمت سطح آب، هوایی را که در بین پرهای خود محبوس کرده است را آزاد می کند تصویر و نتیجه آزاد شدن این حباب های هوا در آب باعث روان کاری سطح بدن پرنده و کاهش درگ آن می شوند. بررسی های انجام گرفته نشان می دهد که فاصله پرها ۲۰ میکرو متر است و در هر یک سانتی متر مربع ده تا یازده پر وجود دارد [۱۰] به طوریکه این پرنده دارای پرپشت ترین بدن از نظر داشتن پر در بین پرندگان است. شکل (۱-۴) نمایی از آزاد شدن حباب های هوا را نشان می دهد.

<sup>1</sup> Humpback whale