



دانشگاه صنعتی شیراز  
دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا

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

**شبیه سازی عددی یک جسم متقارن محوری هنگام خروج از آب**  
**(Numerical Simulation of Water-exit of an Axisymmetric Body)**

**به وسیله:**

شهاب مشاری

**اساتید راهنما :**

دکتر امیرحسین نیک سرشت

دکتر رضا مهریار

شهریور ۱۳۸۹

سلامی

## بسمه تعالی

### شبهه سازی عددی یک جسم متقارن محوری هنگام خروج از آب

پایان نامه ارائه شده به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی

توسط:

شهاب مشاری

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

گروه تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا

دانشگاه صنعتی شیراز

ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران با درجه : عالی

دکتر امیر حسین نیک سرشت، استادیار مهندسی مکانیک (استاد راهنما).....

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

دکتر بهادر سرانجام، استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر (داور).....

دکتر مسعود خراتی کوپایی، استادیار مهندسی مکانیک (داور).....

---

مدیر امور آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه :

---

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه صنعتی شیراز است.

شهریور ۱۳۸۹

## تقدیم به

### پدر بزرگوارم

که همواره مدیون حمایت‌های بی‌دریغش هستم

9

### مادر عزیزم

که همواره از محبت‌های عاشقانه‌اش بهره‌مند هستم.

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است

و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند

# سپاسگزاری

سپاس خدا را که هر چه هست از اوست و اینکه نیازم را بی‌پاسخ نگذارد و مرا یاری نمود تا قسمتی از عمر خود را در راه تحصیل علم و دانش سپری نمایم.

سپاس خدا را که خانواده را کانون امن جهت تربیت و پیشرفت انسان، و پدر و مادر را تکیه‌گاهی مطمئن برای فرزندان قرار داد.

سپاس خدای را که همواره استادانی دلسوز و فرزانه را راهنمایم قرار داد تا در راه دراز و بی‌پایان تحصیل علم، تسکینی بر عطش سیری ناپذیرم باشند.

بر خود لازم می‌دانم که از تمامی عزیزانی که در مراحل مختلف انجام این تحقیق مرا یاری نمودند، تشکر و قدردانی نمایم.

با تشکر از یاوران همیشگی‌ام

پدر و مادر

با تشکر از مشوقان واقعی راه علم

استاد ارجمند جناب آقای دکتر نیک سرشت،

استاد گرامی جناب آقای دکتر مهریار

## چکیده

### شبیه سازی عددی یک جسم متقارن محوری هنگام خروج از آب

به وسیلهی:

شهاب مشاری

با پیشرفت‌های روز به روز علم و تکنولوژی، نیاز به ساخت وسایل حرکتی زیر سطحی به سطحی بیشتر می‌شود و امروزه یکی از مهم‌ترین و کلیدی‌ترین عناصر در تحقیقات کسورهای که دارای مرز دریایی هستند، می‌باشد و به همین دلیل جریان‌های دوفازی موضوع تحقیق و بررسی تعداد کثیری از محققین در سایر نقاط جهان شده است. از ابتدای تحقیقات پیرامون جریان‌های دوفازی تاکنون شاهد پیشرفت‌های زیادی در این زمینه بوده‌ایم و هنوز هم این مبحث در حال پیشرفت است. یکی از جهش‌های بزرگ در این زمینه ظهور کامپیوترهای پرسرعت و در نتیجه گرایش به سمت دینامیک سیالات محاسباتی بوده است.

در این تحقیق ابتدا خروج یک استوانه از آب با سرعت ثابت بررسی، سپس خروج یک استوانه از آب با سرعت متغیر در حالت دو و سه بعدی شبیه سازی شده و در ادامه خروج از آب جسمی متقارن محوری با پروفیلی مشابه موشک انجام شده است. در این پروژه برای مدل کردن سطح آزاد (جریان دوفازی حول جسم) هنگام خروج از آب از روش حجم سیال (VOF) و برای حل معادلات حاکم از روش حجم محدود، استفاده شده است. برای بدست آوردن ضرائب نیروی فشاری و لزجی در حالت سرعت متغیر، نیاز به در نظر گرفتن تغییرات سرعت ناشی از تغییر فاز حرکت می‌باشد که این کار با استفاده از شبکه دینامیکی (حل معادلات دینامیکی حرکت جسم صلب) انجام شده است.

## فهرست

### فصل اول - مقدمه

- ۱-۱- هدف ..... ۲
- ۲-۱- تاریخچه ..... ۳

### فصل دوم - معادلات حاکم

- ۱-۲- معادله بقاء جرم ..... ۷
- ۲-۲- معادله بقاء ممنتوم ( معادلات ناویر-استوکس) ..... ۷
- ۳-۲- جریان آشفته ..... ۹
- ۴-۲- روشهای مدل کردن جریان آشفته ..... ۱۲
- ۵-۲- معادله سطح آزاد ..... ۱۴
- ۶-۲- روشهای مدل کردن سطح آزاد ..... ۱۵
- ۷-۲- روشهای ردیابی سطح آزاد ..... ۱۵
- ۷-۲-۱- روش تابع ارتفاع ..... ۱۶
- ۷-۲-۲- روش قطعه خط ..... ۱۶
- ۷-۲-۳- روش قراردادی اوپلری-لاگرانژی ..... ۱۷
- ۸-۲- روشهای ردیابی حجم ..... ۱۷
- ۸-۲-۱- روش نشانگر و سلول ..... ۱۸
- ۸-۲-۲- روش حجم سیال ..... ۱۹
- ۸-۲-۳- روش تنظیم سطح ..... ۲۱
- ۹-۲- معادلات دینامیکی حرکت جسم صلب ..... ۲۱
- ۹-۲-۱- معادله به فرم پایستار برای شبکه دینامیکی ..... ۲۳

### فصل سوم - روش حل عددی

- ۱-۳- دینامیک سیالات محاسباتی ..... ۲۵
- ۱-۱-۲- روشهای گسسته سازی فضایی معادله دیفرانسیل جزئی ..... ۲۶
- ۱-۱-۳- روش تفاضل محدود ..... ۲۶
- ۱-۱-۳-۲- روش اجزاء محدود ..... ۲۷
- ۱-۱-۳-۳- روش حجم محدود ..... ۲۸
- ۱-۱-۳-۴- روش المان طیفی ..... ۲۹
- ۲-۱-۳- روشهای گسسته سازی زمانی معادله دیفرانسیل جزئی ..... ۲۹
- ۱-۲-۱-۳- روش صریح ..... ۳۰
- ۲-۲-۱-۳- روش ضمنی ..... ۳۰
- ۲-۳- معرفی نرم افزار ..... ۳۱
- ۱-۲-۳- Gambit نرم افزار ..... ۳۲

۳۲.....	۱-۱-۲-۳ پارامترهای مربوط به شبکه محاسباتی
۳۵.....	۲-۲-۳ نرم افزار <b>Fluent</b>
۳۵.....	۱-۲-۲-۳ تحلیلگر تفکیکی
۳۶.....	۲-۲-۲-۳ تحلیلگر همبسته
۳۶.....	۳-۲-۲-۳ برنامه الحاقی
۳۶.....	۳-۲-۲ شبکه متحرک
۳۷.....	۱-۳-۲-۳ شبکه لغزشی
۳۹.....	۲-۳-۲-۳ شبکه دینامیکی

### فصل چهارم - نتایج عددی

۴۶.....	۱-۴ خروج استوانه از آب با سرعت ثابت
۴۹.....	۲-۴ خروج موشک از آب با سرعت ثابت
۵۰.....	۱-۲-۴ خروج موشک از آب با شبکه سازمان یافته
۵۳.....	۲-۲-۴ خروج موشک از آب با شبکه ترکیبی
۵۵.....	۳-۲-۴ خروج موشک از آب در حالت متقارن محوری
۵۸.....	۳-۴ خروج استوانه از آب با در نظر گرفتن اثر تغییر سرعت
۵۹.....	۱-۳-۴ بررسی اثر جرم در خروج استوانه از آب به روش (DLM)، (SBSM)
۷۳.....	۲-۳-۴ بررسی اثر عمق رها سازی در خروج استوانه از آب به روش (DLM)، (SBSM)
۷۸.....	۳-۳-۴ خروج استوانه از آب به روش (LRM)
۸۳.....	۴-۳-۴ بررسی خروج مایل استوانه از آب
۸۷.....	۴-۴ برخورد استوانه به آب به روش (LRM)

### فصل پنجم - جمع بندی و نتیجه گیری

۹۴.....	پیشنهادات
۹۵.....	پیوست A
۹۶.....	فصل ششم - منابع



## فهرست جدول ها

- جدول ۱-۲ ضرائب ثابت لاندر و اسپالدینگ برای معادلات  $k - \epsilon$  ..... ۱۴
- جدول ۱-۳ مقایسه انواع المانهای شبکه دوبعدی. .... ۳۳
- جدول ۲-۳ مقایسه انواع المانهای شبکه سه بعدی. .... ۳۴
- جدول ۱-۴ دادههای ورودی برای حل معادلات دینامیکی شش درجه آزادی. .... ۵۸
- جدول ۲-۴ مراحل مختلف شبیه سازی به روش (SBSM) و (DLM). .... ۵۹
- جدول ۳-۴ شبیه سازی اثر عمق رها سازی استوانه. .... ۷۳

## فهرست شکل ها

- شکل (۱-۲) مدلسازی جریان آشفته هوای ورودی به داخل AIR-INTAKE هواپیمای عمود پرواز. ۱۰
- شکل (۲-۲) تغییرات کمیت  $\Phi$  برحسب زمان T. ۱۱
- شکل (۳-۲) روشهای مدل کردن جریان آشفته. ۱۴
- شکل (۴-۲) روشهای ردیابی سطح آزاد. ۱۶
- شکل (۵-۲) روش تابع ارتفاع. ۱۶
- شکل (۶-۲) روشهای ردیابی حجم. ۱۸
- شکل (۷-۲) روش نشانگر و سلول. ۱۸
- شکل (۸-۲) روش حجم سیال. ۲۰
- شکل (۹-۲) مختصات چرخشی جسم صلب. ۲۳
- شکل (۱-۳) نقاط شبکه تفاضل محدود دوبعدی. ۲۷
- شکل (۲-۳) کاربرد روش اجزاء محدود در مسائل سیالات و تحلیل جامدات. ۲۸
- شکل (۳-۳) حجم کنترل جهت گسسته سازی نقاط داخلی دامنه. ۲۹
- شکل (۴-۳) شبکه محاسباتی. ۳۲
- شکل (۵-۳) مراحل مختلف تولید فضای مورد نظر. ۳۳
- شکل (۶-۳) اثر دو برابر نمودن تعداد المانها در انجام محاسبات. ۳۴
- شکل (۷-۳) نرم افزار فلوئنت. ۳۵
- شکل (۸-۳) استفاده از شبکه لغزشی در حل مسائل. ۳۷
- شکل (۹-۳) نحوه حرکت شبکه لغزشی. ۳۸
- شکل (۱۰-۳) سطوح داخلی مشترک شبکه دوبعدی. ۳۹
- شکل (۱۱-۳) تغییر شکل حاصل از روش (SBSM). ۴۱
- شکل (۱۲-۳) استفاده از روش (BLSM). ۴۲
- شکل (۱۳-۳) تولید شبکه به روش (DLM). ۴۳
- شکل (۱۴-۳) تولید شبکه به روش (LRM). ۴۴
- شکل (۱-۴) شبکه سازمان یافته اطراف استوانه. ۴۶
- شکل (۲-۴) خروج از آب استوانه با سرعت ثابت. ۴۷
- شکل (۳-۴) تغییر شکل سطح آزاد هنگام خروج استوانه از آب ( $T = 0.195 \text{ SEC}$ ). ۴۸
- شکل (۴-۴) تغییر شکل سطح آزاد در خروج استوانه از آب ( $T = 0.220 \text{ SEC}$ ). ۴۸
- شکل (۵-۴) کانتور توزیع فشار (PA) ( $T = 0.190 \text{ SEC}$ ). ۴۸
- شکل (۶-۴) کانتور توزیع فشار (PA) ( $T = 0.220 \text{ SEC}$ ). ۴۸
- شکل (۷-۴) تغییر شکل سطح آزاد هنگام خروج از آب استوانه (حل جریان توربولانس). ۴۹
- شکل (۸-۴) شبکه سازمان یافته اطراف موشک. ۵۰
- شکل (۹-۴) تغییر شکل سطح آزاد هنگام خروج از آب موشک. ۵۱
- شکل (۱۰-۴) کانتور مؤلفه سرعت (M/S) در راستای محور Y. ۵۲
- شکل (۱۱-۴) بردارهای سرعت در قسمت نوک و انتهای موشک. ۵۲
- شکل (۱۲-۴) شبکه ترکیبی اطراف موشک. ۵۳

- شکل (۴-۱۳) کانتور مؤلفه سرعت (M/S) در راستای محور Y. ۵۴.....
- شکل (۴-۱۴) بردارهای سرعت در قسمت نوک و انتهای موشک. ۵۴.....
- شکل (۴-۱۵) شبکه متقارن محوری اطراف موشک. ۵۵.....
- شکل (۴-۱۶) تغییر شکل سطح آزاد هنگام خروج از آب موشک. ۵۶.....
- شکل (۴-۱۷) بردارهای سرعت در قسمت نوک و انتهای موشک. ۵۶.....
- شکل (۴-۱۸) کانتور مؤلفه سرعت (M/S) در راستای محور Y. ۵۷.....
- شکل (۴-۱۹) الگوریتم عددی شبیه سازی هیدرودینامیکی حرکت. ۵۸.....
- شکل (۴-۲۰) نیروهای وارده بر استوانه. ۶۰.....
- شکل (۴-۲۱) حرکت شبکه دینامیکی به روش (SBSM)، (DLM). ۶۰.....
- شکل (۴-۲۲) تغییر شکل سطح آزاد در خروج استوانه از آب (مرحله ۱). ۶۱.....
- شکل (۴-۲۳) عکسهای آزمایشگاهی از حبابهای هوای به دام افتاده در فاز خروج از آب [۶]. ۶۲.....
- شکل (۴-۲۴) ضریب نیروی درگ مرحله اول خروج و برخورد استوانه با آب. ۶۲.....
- شکل (۴-۲۵) نمودار سرعت نتایج عددی (خط با نقطه) و آزمایشگاهی مرجع [۶]. ۶۳.....
- شکل (۴-۲۶) مقایسه نمودار سرعت مرحله ۱ تحقیق حاضر با نتایج عددی و آزمایشگاهی مرجع [۶]. ۶۳.....
- شکل (۴-۲۷) مقایسه نمودار جابجایی مرحله ۱ تحقیق حاضر با نتایج عددی و آزمایشگاهی مرجع [۶]. ۶۴.....
- شکل (۴-۲۸) مقایسه نمودار سرعت مرحله ۱ و ۲ تحقیق حاضر با نتایج عددی و آزمایشگاهی مرجع [۶]. ۶۵.....
- شکل (۴-۲۹) مقایسه نمودار جابجایی مرحله ۱ و ۲ تحقیق حاضر با نتایج عددی و آزمایشگاهی مرجع [۶]. ۶۵.....
- شکل (۴-۳۰) نحوه تغییر شکل سطح آزاد هنگام خروج و ورود استوانه به آب (مرحله ۲). ۶۶.....
- شکل (۴-۳۱) کانتور فشار دینامیکی هنگام خروج و ورود به آب استوانه (مرحله ۲). ۶۸.....
- شکل (۴-۳۲) تغییر شکل سطح آزاد در خروج استوانه از آب (مرحله ۳). ۶۹.....
- شکل (۴-۳۳) تغییر شکل سطح آزاد در خروج استوانه از آب (مرحله ۴). ۶۹.....
- شکل (۴-۳۴) تغییر شکل سطح آزاد در خروج استوانه از آب (مرحله ۵). ۷۰.....
- شکل (۴-۳۵) تغییر شکل سطح آزاد در خروج استوانه از آب (مرحله ۶). ۷۱.....
- شکل (۴-۳۶) مقایسه نمودار سرعت مراحل مختلف جدول ۴-۳. ۷۱.....
- شکل (۴-۳۷) مقایسه نمودار جابجایی مراحل مختلف جدول ۴-۳. ۷۲.....
- شکل (۴-۳۸) مقایسه ضریب نیروی درگ در خروج استوانه از آب برای مراحل مختلف جدول ۴-۳. ۷۲.....
- شکل (۴-۳۹) تغییر شکل سطح آزاد در خروج استوانه از آب (مرحله ۱) اثر عمق رها سازی. ۷۴.....
- شکل (۴-۴۰) تغییر شکل سطح آزاد در خروج استوانه از آب (مرحله ۲) اثر عمق رها سازی. ۷۵.....
- شکل (۴-۴۱) تغییر شکل سطح آزاد در خروج استوانه از آب (مرحله ۳) اثر عمق رها سازی. ۷۵.....
- شکل (۴-۴۲) تغییر شکل سطح آزاد در خروج استوانه از آب (مرحله ۴) اثر عمق رها سازی. ۷۶.....
- شکل (۴-۴۳) مقایسه نمودار سرعت (مراحل جدول ۴-۳). ۷۶.....
- شکل (۴-۴۴) مقایسه جابجایی مرکز استوانه (مراحل جدول ۴-۳). ۷۷.....
- شکل (۴-۴۵) جابجایی مرکز استوانه نسبت به سطح آزاد (مراحل جدول ۴-۳). ۷۷.....
- شکل (۴-۴۶) ضریب نیروی درگ در خروج استوانه از آب (مراحل جدول ۴-۳). ۷۸.....
- شکل (۴-۴۷) حرکت استوانه به روش (LRM). ۷۹.....
- شکل (۴-۴۸) شرایط مرزی خروج از آب استوانه. ۷۹.....
- شکل (۴-۴۹) تغییر شکل سطح آزاد در خروج و ورود استوانه به آب با روش (LRM). ۸۱.....

- شکل (۴-۵۰) تغییرات سرعت استوانه به روش (LRM)..... ۸۲
- شکل (۴-۵۱) جابجایی مرکز استوانه نسبت به سطح آزاد به روش (LRM)..... ۸۲
- شکل (۴-۵۲) ضریب نیروی درگ در خروج از آب استوانه به روش (LRM)..... ۸۲
- شکل (۴-۵۳) تغییرات سرعت در خروج مایل استوانه از آب با زاویه ۳۰ درجه..... ۸۴
- شکل (۴-۵۴) تغییرات سرعت در خروج مایل استوانه از آب با زاویه ۴۵ درجه..... ۸۴
- شکل (۴-۵۵) خروج مایل استوانه از آب با زاویه ۳۰ درجه..... ۸۵
- شکل (۴-۵۶) خروج مایل استوانه از آب با زاویه ۴۵ درجه..... ۸۶
- شکل (۴-۵۷) شرایط مرزی برخورد استوانه با آب..... ۸۷
- شکل (۴-۵۸) تغییرات سرعت استوانه از زمان رها سازی در هوا تا پس از برخورد به آب..... ۸۸
- شکل (۴-۵۹) مقایسه حرکت شبکه دینامیکی حول استوانه..... ۹۰
- شکل (۴-۶۰) تغییر شکل سطح آزاد در برخورد استوانه به آب..... ۹۱
- شکل (۴-۶۱) کانتور فشار استاتیک (PA) در برخورد با آب استوانه..... ۹۱



# مقدمه

این فصل شامل آشنایی با تاریخچه و کاربرد جریان-  
های دوفازی درپدیده خروج از آب و بیان هدف از  
انجام این پایان نامه می‌باشد.

تغییر فاز در مسائل هیدرودینامیکی و در هنگام طراحی بسیاری از پروژه‌های صنعتی مانند خروج موشک شلیک شده از یک زیر دریایی از آب، نشستن یک قایق پرنده بر روی آب و همچنین سازه‌های فراساحلی کاربرد دارد. بررسی پدیده خروج از آب به دلیل تغییر نیروهای وارده بر روی جسم و به علت متفاوت بودن چگالی آب و هوا دارای اهمیت است. با تغییر نیروها و گشتاورها، سرعت جسم هنگام خروج از آب تغییر کرده و امکان تغییر مسیر جسم در حین خروج از آب وجود دارد. در این حالت، جریان اطراف جسم ماهیت دوفازی غیر قابل تراکم دارد و به دلیل پیچیدگی زیاد، حل تحلیلی معادلات پیچیده حاکم بر آن حتی با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده ممکن نیست. اگر چه انجام آزمایش، مطمئن ترین راه برای بررسی شرایط خروج از آب جسم مورد نظر می باشد، اما هزینه بالا و محدودیت در اندازه‌گیری کمیت‌های مختلف با جزئیات مربوط به آن مسیر تحقیقات را به سوی استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پیش می برد.

شبه سازی خروج از آب یک جسم را می‌توان به سه بخش اصلی تقسیم کرد: حل معادلات اساسی حاکم بر سیال شامل معادلات ناویر- استوکس و پیوستگی، مدل‌سازی سطح آزاد و حل معادلات حرکت جسم صلب. روش‌های مختلفی برای حل همزمان و غیر همزمان معادلات ناویر- استوکس و پیوستگی با استفاده از روش حجم محدود وجود دارد. چون هزینه محاسباتی روش‌های حل همزمان بسیار بالاست، حل غیر همزمان معادلات مذکور بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. رویکرد های مختلفی در این زمینه وجود دارد که می توان آنها را به دو دسته اصلی: رویکرد تخمین- اصلاح (مانند SIMPLE و PISO) و رویکرد گام جزئی تقسیم کرد. زیر مسئله مهم دیگر مدل سطح آزاد است و روش‌های اصلی مدل کردن آن عبارتند از: روش های ردیابی سطح آزاد<sup>۱</sup> (تعقیب سطح آزاد) و روش های ردیابی حجم<sup>۲</sup> (تسخیر سطح آزاد).

## ۱-۱- هدف

هدف از انجام این پایان نامه بررسی ضرائب نیروی فشاری و لزجی و تاثیر پارامترهای مختلف بر خروج یک جسم از فاز با چگالی بالاتر به فاز رقیق‌تر می‌باشد. در این پروژه بررسی خروج از آب در دو حالت سرعت ثابت و خروج از آب با سرعت متغیر انجام می‌گیرد که خروج مطلوب نزدیک شدن به نتایج آزمایشگاهی شبه سازی با سرعت متغیر می‌باشد. عوامل مورد بررسی بر روی ضرائب نیروی فشاری و لزجی بر روی جسم متقارن محوری هنگام خروج از آب شامل نحوه شبکه بندی مناسب (شرط عدم وابستگی حل به تعداد نقاط شبکه)، بررسی اثر شبکه سازمان یافته و شبکه

<sup>۱</sup> Interface Tracking Methods

<sup>۲</sup> Volume Tracking Methods (Interface Capturing Method)

غیرسازمان یافته، تاثیر استفاده از شبکه دینامیکی بر روی حل مسئله و بهبود جواب در مقایسه با شبکه ثابت، بررسی اثر حل سه بعدی، بررسی اثر جرم و اینرسی، نیروی محوری و اثر عمق اولیه جسم، می باشد. در انجام این پایان نامه ابتدا خروج از آب یک جسم متقارن محوری با سرعت ثابت بررسی و سپس با کمک گرفتن از معادلات دینامیکی جسم صلب و اضافه کردن آن به حل جریان خروج از آب با سرعت متغیر بررسی می شود. در ادامه به شبیه سازی خروج از آب جسم متقارن محوری در حالت سه بعدی پرداخته می شود که پس از اعتبارسنجی نتایج آن خروج از آب یک جسم متقارن محوری با پروفیلی مشابه موشک بررسی می شود.

## ۱-۲- تاریخچه

در بررسی پدیده خروج از آب که می توان آن را ادامه تحقیقات حاصل از بررسی اثر برخورد یک جسم با آب دانست باید به بیان مختصری از پدیده برخورد پرداخت. یکی از مهمترین اثرات جریان دو فازی که ضربه هیدرودینامیکی<sup>۱</sup> می باشد اولین بار توسط فون کارمن<sup>۲</sup> در سال (۱۹۲۹) مورد مطالعه قرار گرفت. کارمن یک روش تحلیلی با استفاده از تئوری اندازه حرکت و روش جرم مجازی برای پیش بینی ضربه وارد بر هواپیمای آب نشین ارائه نمود [۱]، کارمن در این تحقیق با فرض غیر لزج، غیر چرخشی و تراکم ناپذیر بودن سیال و بدون در نظر گرفتن اثر نیروی جاذبه و کشش سطحی، رابطه ای برای محاسبه نیروی وارده به یک گوشه هنگام ورود به آب 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 در می آید، در نظر گرفت. امروزه پدیده اسلمینگ به عنوان یک نیروی بسیار مهم در طراحی تمام شناورهای سرعت بالا مطرح می باشد که خود یکی از بحرانی ترین پدیده ها در مهندسی سازه دریایی و طراحی شناور می باشد. این نیرو باید همواره به عنوان ترکیبی از مکانیک سازه و هیدرودینامیک تحلیل شود. از جمله اثرات مخرب این نیرو، کاهش سرعت شناور و ایجاد لرزش در بدنه شناور می باشد. روش های سنتی خاصی برای تعیین آستانه شروع اسلمینگ وجود دارد که هیچکدام از این روش ها شکل سازه را برای تعیین مرز اسلمینگ مورد توجه قرار نمی دهند. از سال (۱۹۸۵) روش های عددی برای در نظر گرفتن همه عوامل موثر در پدیده برخورد و همچنین بدست آوردن نتایج بهتر مورد توجه قرار گرفته اند.

نیک سرشت و مرادی [۲]، ضربه هیدرودینامیکی حاصل از ورود یک گوشه به آب با حل جریان دو فازی و بر اساس روش حجم محدود محاسبه نموده اند. بدین منظور سرعت برخورد را ثابت و

<sup>۱</sup> Slamming

<sup>۲</sup> Von Karman

زاویه موضعی بین سطح آب و جسم<sup>۱</sup> را تغییر داده و نتایج حاصله را بصورت روابطی بین ضریب نیروی اسلمینگ<sup>۲</sup> و زاویه برخورد ارائه نمودند. همچنین در کار انجام گرفته دیگری توسط نیک سرشت و همکاران [۳]، نیروی برخورد با آب وارد بر یک گوشه با سرعت متغیر مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور یک زیر برنامه نوشته شده است که ورودی آن نیروهای برخورد با آب از تکرار قبل، یعنی بعد از تمام شدن محاسبات با سرعت ثابت می باشد و سپس معادله نیرو- سرعت<sup>۳</sup> نوشته شده حل می گردد و تغییرات سرعت جدید با زمان محاسبه و برای حل معادلات حرکت در تکرار جدید بکار می روند و عملاً در تکرار جدید در هر گام زمانی به جای سرعت ثابت سرعت محاسبه شده در زیر برنامه بکار می رود.

پدیده خروج از آب استوانه با سرعت ثابت را هم به صورت شبهه سازی عددی و هم بصورت آزمایشگاهی در سال (۱۹۸۸)، مارتین گرینهو<sup>۴</sup> برای اولین بار مورد مطالعه قرار داد [۴]. گرینهو در بررسی عددی خود سیال را غیرلزج فرض کرد و سپس به پیش بینی تغییر شکل های غیرخطی به وجود آمده در پدیده خروج و ورود به آب با استفاده از روش عددی وینجی<sup>۵</sup> و بریویگ<sup>۶</sup> [۴] پرداخت. مقایسه جواب های روش گرینهو با جواب های حاصل از تئوری ابتدایی پدیده برخورد، توافق خوبی را در بعضی موارد نشان می دهد. وی همچنین عکس هایی را در آزمایشگاه از پدیده ورود و خروج به آب تهیه کرده و در انتها به مقایسه و تحلیل نتایج حاصل پرداخته است. با گذشت زمان و پیشرفت توان سخت افزاری و نرم افزاری کامپیوترها پدیده خروج از آب در حالات دشوارتر مانند سرعت متغیر به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت.

بیشتر تحقیقات در مورد مسئله ورود و خروج از آب با سرعت متغیر به سال های اخیر مربوط می شود که از این جمله می توان به تحقیقات پریک و جنسون<sup>۷</sup> در سال (۲۰۰۵) اشاره کرد که مسئله ورود به آب یک استوانه را با سرعت متغیر و خروج از آب یک استوانه را با سرعت ثابت شبهه سازی و در آن به مقایسه نتایج حاصل از ضرائب فشار و نیروی درگ در آزمایش و نتایج حاصل از دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته اند [۵]. پریک در روش خود با استفاده از کدی که بر اساس روش حجم

<sup>۱</sup> Deadrise Angle

<sup>۲</sup> Slamming Force Coefficient ( $C_s = \frac{F}{0.5\rho U_{\infty}^2 A}$ )

<sup>۳</sup>  $V = \int_0^t \left(\frac{F}{m} - g\right) dt + V_0$

<sup>۴</sup> Martin Greenhow

<sup>۵</sup> Vinje

<sup>۶</sup> Brevig

<sup>۷</sup> Peric, M. Jensen, G



محدود برای حل معادلات حاکم و روش حجم سیال (VOF) برای شبه سازی سطح آزاد کار می‌کرد با استفاده از الگوریتم (SIMPLE) به بررسی ورود و خروج از آب یک استوانه برای سیال لزج پرداخت. وی در تحقیق خود برای بررسی مسئله ورود به آب، استوانه را از ارتفاع مشخصی رها نموده تا بصورت سقوط آزاد بر روی سطح آب برخورد نماید، علاوه بر این برای حالت خروج از آب، یک استوانه ساکن را از عمق مشخصی پایین سطح آزاد آب با سرعت ثابت به بیرون حرکت داد. از جدید ترین کارهای انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیقات گرکو و میوزی<sup>۱</sup> در سال (۲۰۰۹) اشاره نمود که در آن هر دو پدیده خروج و ورود به آب یک استوانه با سرعت متغیر بصورت آزمایشگاهی و شبه سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است [۶]. گرکو با استفاده از کدی که بر اساس روش تنظیم سطح<sup>۲</sup> برای شبه سازی سطح آزاد نوشته بود سقوط آزاد استوانه‌ای از ارتفاع مشخص و برخورد آن به سطح آزاد آب را شبه سازی نمود. وی همچنین حرکت استوانه‌ای که از عمق مشخص زیر سطح آزاد رها و بوسیله نیروی شناوری سرعت گرفته و از آب خارج می‌شد را مورد بررسی قرار داد. گرکو معادلات حاکم را بر روی شبکه کارترین جابجا شده با تقریب مرتبه دوم برای زمان و مکان گسسته کرد. وی جواب‌های بدست آمده از کد عددی را که در شرایط یکسان با نتایج آزمایشگاهی برای همان استوانه شبه سازی شده بود مقایسه کرد که توافق خوبی بین دو روش مشاهده نمود. یکی از کارهای جالب انجام شده مربوط به تحقیقات پنگژی لین<sup>۳</sup> در سال (۲۰۰۷) است که با استفاده از شبکه ثابت به شبه سازی یک جسم متحرک در جریان سطح آزاد پرداخته است [۷]، لین در تحقیق خود برای شبه سازی جسم از روش (PCT)<sup>۴</sup>، برای دنبال کردن جسم از روش لاگرانژی و برای سیال اطراف جسم از روش اویلری استفاده کرد. وی با استفاده از روش فوق به شبه سازی ورود استوانه به آب، خروج استوانه از آب، غرق شدن جسم غوطه‌ور نزدیک به سطح آزاد و حرکت افقی جسمی بیضوی در زیر سطح آزاد پرداخت. یکی دیگر از کارهای انجام شده جالب مربوط به ورود و خروج یک گوه متحرک در تماس با سطح آزاد آب می‌باشد که توسط کیان و کاسون<sup>۵</sup> در سال (۲۰۰۶) انجام شده است [۸].

<sup>۱</sup> Greco, M. Miozzi, M

<sup>۲</sup> Level Set

<sup>۳</sup> Pengzhi, Lin

<sup>۴</sup> Partial Cell Treatment

<sup>۵</sup> Qian, L. Causon, D. M



هدف اين بخش معرفى معادلات حاكم بر تحليل جريان دوفازى مورد بررسى در اين پايان نامه مى-  
باشد.

قوانین حاکم بر جریان یک سیال تراکم ناپذیر لزج توسط معادله پیوستگی و سه معادله ممنتوم در جهات محورهای سه گانه مختصات که به معادله ناویر-استوکس معروف هستند، بیان می شوند. این معادلات در واقع بیانگر بقاء جرم و ممنتوم به بیان ریاضی می باشند. براساس دیدگاه اولری، چنانچه جزء کوچک سیال به عنوان حجم کنترل ثابت در فضای محاسباتی در نظر گرفته شود، در این صورت نیروهای وارده بر آن و اصل بقاء جرم در این سلول به صورت معادلات مشتق جزئی نمایان می شوند. در این پروژه به دلیل دوفازی بودن و استفاده از شبکه دینامیکی نیاز به کوپل معادلات فوق با معادله سطح آزاد و معادلات دینامیکی جسم صلب می باشد.

## ۱-۲- معادله بقاء جرم

معادله بقاء جرم یا پیوستگی از اهمیت بنیادینی برخوردار است و در تمام میدانهای جریان بدون توجه به اینکه چه فرضهای ساده کننده ای در نظر گرفته شده باشد صادق خواهد بود. این قانون بیانگر این است که نرخ زمانی کل تغییر جرم در واحد حجم برابر با صفر است. معادله پیوستگی برای جریان تراکم ناپذیر (چگالی ثابت) برابر با.

$$\nabla \cdot \vec{U} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1-2)$$

## ۲-۲- معادله بقاء ممنتوم ( معادلات ناویر-استوکس )

قبل از سال (۱۹۰۴) علم مکانیک سیالات در دو شاخه جدا رشد کرده بود. شاخه اول هیدرودینامیک تئوری و شاخه دوم هیدرودینامیک تجربی بودند، شاخه اول مبتنی بر معادلات اوپلر (۱۷۵۵) بود که در آن اثرات لزجت نادیده فرض شده بود (برای جریان پایدار و غیرقابل تراکم روی یک خط جریان معادله اوپلر به معادله برنولی ختم می شود). شاخه دوم بر مشاهدات تجربی استوار بود و به علت در نظر گرفتن اثرات لزجت سیال با نتایج هیدرودینامیک تئوری در موارد زیادی مانند محاسبه نیروی درگ یا محاسبه افت فشار در لوله ها و کانالها تفاوت زیادی داشت. سالها بعد از معادله اوپلر، معادلات ناویر-استوکس (۱۸۲۷-۱۸۴۵) ارائه شد که در آن اثرات لزجت در نظر گرفته می شد. این معادلات برای اولین بار با توجه به تحقیقات انجام شده پیرامون مدل مولکولی، توسط مهندس فرانسوی ناویه<sup>۱</sup> بدست آمد، که بعداً توسط استوکس<sup>۲</sup> به شکل امروزی تبدیل شد اما به دلیل مشکل بودن حل، معادلات ناویر-استوکس بجز در چند مورد خاص حل نشد و عملاً از همان معادله اوپلر استفاده می شد. با توجه به مشکلات زیاد پیش رو برای حل معادلات ناویر-استوکس، در سال (۱۹۰۴)

<sup>۱</sup> Louis Marie Henri (1785 – 1839)

<sup>۲</sup> George Gabriel (1819 – 1903)

پرانتل آلمانی در مقاله‌ای تحت عنوان (حرکت سیال با اصطکاک جزئی<sup>۱</sup>) نشان داد که چگونه نادیده گرفتن اثر لزجت در تجزیه و تحلیل جریان واقعی، حتی با مقادیر بسیار کوچک لزجت می‌تواند اختلاف بزرگی را ایجاد کند که نشانگر ضعف معادله اوپلر بوده وی بدین ترتیب به منظور استفاده از معادلات ناویر-استوکس اعلام کرد که جریان سیال به دو ناحیه قابل تقسیم است. ناحیه اول که ناحیه کنار دیواره است و اثرات لزجت در آن بسیار مهم می‌باشد را ناحیه لایه مرزی (*Boundary Layer*) نامید و ناحیه دوم را که می‌توان در آن از اثرات لزجت چشم‌پوشی کرد را (*Potential Flow*) نامید. مزیت کار پرانتل این بود که بواسطه نازک بودن لایه مرزی، معادلات ناویر-استوکس در لایه مرزی ساده شده و مابقی جریان را با همان معادلات اوپلر تحلیل کرد، بدین ترتیب با تقسیم جریان به ناحیه لزج و غیرلزج پایه علم آئرودینامیک بنا نهاده شد.

رابطه‌ای که بین میدان تنش و تغییر شکل میدان در اثر تغییر مکانی و زمانی سرعت وجود دارد بیان کننده قانون بقاء ممنتوم می‌باشد. معادلات ناویر-استوکس در واقع بیان کننده پایستار بودن ممنتوم به بیان ریاضی می‌باشند. اگر  $\vec{U}$  میدان بردار سرعت،  $\rho$  چگالی،  $P$  فشار،  $\mu$  لزجت و  $n$  بردار واحد عمود بر سطح تماس باشند آنگاه معادله ناویر-استوکس به صورت زیر نوشته می‌شود [۹]، [۱۰].

$$\partial_t(\rho\vec{U}) + \nabla \cdot (\rho\vec{U}\otimes\vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu\bar{D}) + \rho\vec{g} \quad (۲-۲)$$

که در آن  $D$  نرخ تانسور کرنش با مولفه‌های زیر می‌باشد.

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (۳-۲)$$

با استفاده از مجموعه متغیرهای بدون بعد (۲-۴) می‌توان معادلات فوق را بی‌بعد کرد.

$$x = \frac{x}{L}, \quad y = \frac{y}{L}, \quad u = \frac{U_1}{U_\infty}, \quad v = \frac{U_2}{U_\infty}, \quad w = \frac{U_3}{U_\infty} \quad (۴-۲)$$

$$p = \frac{p-p_\infty}{\rho_l U_\infty^2}, \quad \mu^* = \frac{\mu}{\mu_l}, \quad \tau = \left( \frac{U_\infty}{L} \right) t, \quad Re = \frac{\rho_l U_\infty L}{\mu_l}$$

<sup>۱</sup> Fluid motion with very small friction