بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی

گروه مکانیک

عنوان پایان‌نامه:

شبیه‌سازی عددی‌پدیده کاویتاسیون حول هیدروفویل دوبعدی و سه بعدی با استفاده از مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل بازسازی سطح‌نسبت حجمی سیال

مولف:

امیرپویان ظهیری

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی‌هوا وفضا گرایش جلوبرندگی

استاد راهنما:

دکتر احسان روحی گلخطمی

دکتر محمود پسندیده فرد

آذر ۱۳۹۱

تائیدیه

گواهی‌می‌شودکه‌این‌پایان‌نامه‌تاکنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده است و تمامی مطالب آن به جز مواردی که نام مرجع آورده شده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

دانشجو: امیرپویان ظهیری امضاء تاریخ

استادراهنمای اول: دکتر احسان روحی گلخطمی امضاء تاریخ

استاد راهنمای دوم: دکتر محمود پسندیده فرد امضاء تاریخ

بسمه تعالي

دانشگاه فردوسي مشهد

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

جلسه دفاع از پایان نامه آقای**امیرپویان ظهیری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته**مهندسی هوا و فضا** گرایش **جلوبرندگی** در ساعت ..... روز ...../...../.....در محل.....دانشکده مهندسی با حضور امضا کنندگان ذیل تشکیل گردید. پساز بررسی های لازم، هیأت داوران پایان نامه نامبرده را با نمرهبه عدد ..... به حروف ..... و با **درجه** ..... مورد تأیید قرار داد.

عنوان رساله

شبیه‌سازی عددی پدیده کاویتاسیون حول هیدروفویل دوبعدی و سه بعدی با استفاده از مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل بازسازی سطح نسبت حجمی سیال

هیئت داوران امضا

- **داور: دکتر محسن کهرم**

استاد گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- **داور و نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر محمد پسندیده فرد**

دانشیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- **استاد راهنمای اول: دکتر احسان روحی گلخطمی**

استادیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- **استاد راهنمای دوم: دکتر محمود پسندیده فرد**

دانشیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- **مدیر گروه: دکتر حمید نیازمند**

استاد گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

سپاس‌گذاری

در اتمام این پایان‌نامه لازم است سپاس‌گذاری خود را نسبت به اساتید راهنمای ارجمندم جناب آقای دکتر احسان روحی و جناب آقای دکتر محمود پسندیده فرد که با درایت، حوصله و صرف وقت فراوان اینجانب را در انجام پایان نامه‌ی حاضر مشاوره و یاری نمودند بیان دارم. بدون شک بدون حمایت‌ها و راهنمایی‌های ایشان، انجام موفقیت آمیز مراحل مختلف رساله حاضر میسر نبود.

همچنین از زحمات خانواده بخصوص پدر و مادر عزیزم که همواره من را پشتیبانی و یاری کردند سپاس‌گذاری می‌کنم.

چکیده فارسی

بسمه تعالی

مشخصات پایان نامه تحصیلی مقطع کارشناسی ارشد

دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان پایان نامه: شبیه‌سازی عددی‌پدیده کاویتاسیون حول هیدروفویل دوبعدی و سه بعدی با استفاده از مدل آشفتگی شبیه-سازی گردابه‌های بزرگ و مدل بازسازی سطحنسبت حجمی سیال

نام نویسنده: امیرپویان ظهیری

نام استاد راهنما: دکتر احسان روحی گلخطمی

نام استاد مشاور: دکتر محمود پسندیده فرد

دانشکده: مهندسی	گروه: مکانیک	رشته تحصیلی: مهندسی هوا و فضا گرایش جلوبرندگی
تاریخ تصویب:		**تاریخ دفاع:۲۲ /۱۳۹۱/۹**
مقطع تحصیلی:کارشناسی ارشد	**●دکتری** ○	**تعداد صفحات: ۱۲۴**

چکیده پایان نامه:

هدف از تحقیق حاضر مدلسازی جریان تراکم ناپذیر کاویتاسیونی بر روی هندسه دو بعدی و سه بعدی هیدروفویل Clark-Y با استفاده از روش نسبت حجمی سیال (VOF) و مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) می‌باشد. ابزار انجام تحقیق حاضر بسته نرم افزاری مرجع باز اپن فم (OpenFOAM) می‌باشد. مدل زیر شبکه‌ای استفاده شده در روش LESاز نوع تک-معادله‌ای "گردابه‌ای-لزجتی" می‌باشد و جریان کاویتاسیونی به صورت یک مخلوط دوفازی واحد و همگن در نظر گرفته شده است. یک معادله‌ی انتقال که شامل مدل‌های انتقال جرم مناسب برای شبیه‌سازی فرآیند تبخیر و میعان می‌باشد نیز همراه با معادلاتLES حل می‌شود. از روش نسبت حجمی سیال به عنوان ابزار حل عددی معادله انتقال فوق برای بازسازی سطح مشترک استفاده شده است. از دو مدل انتقال جرم کانز و ساویر برای شبیه‌سازی فرآیند کاویتاسیون استفاده شده و نتایج این دو مدل با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و اعتبارسنجی شده است. توانایی مدل عددی حاضر و برتری مدل LESنسبت به مدل‌های RANSدر شبیه‌سازی مکانیزم‌های مختلف جریان کاویتاسیونی برای رژیم‌های ابری و سوپرکاویتاسیون بررسی گردید. با استفاده از الگوریتم غیر دائمی (گذرا) برای حل جریان مشخص شد که مدل آشفتگی LESتوانایی بالایی در نشان دادن ماهیت ناپایای جریان کاویتاسیونی و همچنین شکل و دینامیک رشد و کنده شدن کاویتاسیون ابری دارا می‌باشد. همچنین مدل عددی حاضر ضرایب هیدرودینامیکی را با دقت بالایی پیش‌بینی می‌نماید. افزایش فشار ناگهانی ناشی از فروریختن حباب‌های کاویتی در پایین دست لبه‌ی حمله نیز در مدل‌سازی مشاهده می‌شود. با کاهش عدد کاویتاسیون به تدریج کاویتی پایدار شده و مکانیزم کنده شدن ضعیف می‌شود. با توجه به ماهیت سه‌بعدی مدل آشفتگی LES، شبیه‌سازی عددی به حالت سه‌بعدی نیز گسترش یافته و رفتار سه‌بعدی کاویتاسیون نیز نشان داده شده است. با توجه به درنظر گرفتن اثرات سه‌بعدی و گسترش و تغییرات دامنه‌ی فشار در جهت عمود بر صفحه‌ی هیدروفویل، نوسانات شدید موجود در نمودار ضرایب هیدرودینامیکی که در حالت دوبعدی به وجود می‌آمد از بین رفت و نمودار ضرایب هیدرودینامیکی به حالت واقعی که در نتایج آزمایشگاهی موجود است نزدیکتر گردید.

کلید واژه:

کاویتاسیون

هیدروفویل

مدل LES

مدل VOF

امضای استاد راهنما:.....

تاریخ:.....

چکیده انگلیسي

بسمه تعالي

Graduate Studies Thesis Information
FerdowsiUniversity of Mashhad

Title of Dissertation:Numerical simulation of cavitating flows around 2D and 3D hydrofoil using LES turbulence model and VOF interface reconstruction technique

Author: Amir-Pooyan Zahiri
Supervisor: Dr. Ehsan Roohi
Advisor: Dr. Mahmoud Pasandidehfard

Faculty: Engineering	**Department:** Mechanical Engineering	**Specialization:**Aerospase Engineering - Propultion
Approval Date:	**Defence Date:**	
M.Sc. ● **Ph.D.**○	**Number of Pages:** 124	

Abstract:

In the current study, incompressible cavitating flow is simulated over Clark-Y hydrofoil using Volume of Fluid (VOF) technique and Large Eddy Simulation (LES) turbulence model. The OpenFOAM package, which is an open source software, is employed in the simulation process of this study. The LES is based on an One Equation Eddy and Viscosity approach for the sub-grid term. We considered the flow as a single fluid, two-phase mixture. A transport equation model for the local volume fraction of vapor is solved together with the LES equations, and a finite rate mass transfer model is used for the vaporization and condensation processes. The interface region is reconstructed by using VOF model and solving the transport equation. Sauer and Kunz models are used as our mass transfer models and the results are validated using the experimental results reported in the literature. The ability of the current numerical model and advantage of the LES turbulence model (in contrast to the RANS approaches) is investigated in simulating different mechanisms of the cavitating flow for the supercavitation and cloud cavitation regimes. Using a transient algorithm for solving the problem proved that the LES model has a strong ability in capturing the unsteady behaviors of the cavitating flow and could illustrate the dynamic of growth and shedding presses of cloud cavitation regime. The hydrodynamic coefficients are predicted with a high accuracy in the current simulation. The collapse pulses which are the results of the sudden condensation of vapor bobbles are captured after the leading edge of the hydrofoil. The cavity gets steady and the growth and shedding processes disappears while the cavitation number reduces to the smaller amounts. The current simulation is extended to the three dimensional condition due to the three directional nature of the LES model and the three dimensional behaviors. Unsuitable fluctuations observed in the hydrodynamic coefficient curves of two dimensional results gets smeared and our results become closer to experimental curve because of considering the variations of pressure in the third direction.

Signature of Supervisor:……

Date:……

Key Words:

1. Cavitation
2. Hydrofoil
3. LES Model
4. VOF Model

Ferdowsi University of Mashhad

Department of Mechanical Engineering

Title:

Numerical simulation of cavitating flows around 2D and 3D hydrofoil using LES turbulence model and VOF interface reconstruction technique

By:

Amirpooyan Zahiri

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Master of Science in Aerospase Engineering

Supervisor:

Dr. Ehsan Roohi

Dr. Mahmoud pasandidehfard

Desember, 2012

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱ پدیده‌ی کاویتاسیون ۱

۱-۲ معرفی کلی پایان نامه ۲

۱-۳ روش‌های بررسی کاویتاسیون ۴

۱-۳-۱ تحقیقات آزمایشگاهی و تجربی ۵

۱-۳-۲ روش‌های تحلیلی ۷

۱-۳-۳ روش‌های عددی ۸

فصل دوم: مطالعه‌ی کاویتاسیون و روش نسبت حجمی سیال ۱۱

۲-۱ عدد کاویتاسیون ۱۱

۲-۲ رژیم‌های کاویتاسیون ۱۲

۲-۳ جت بازگشتی ۱۷

۲-۴ اثر آشفتگی جریان ۱۹

۲-۵ مروری بر توسعه‌ی روش‌های شبیه‌سازی جریان کاویتاسیونی روی هیدروفویل‌ها ۲۰

۲-۶ دورنمای مطالعاتی روش‌های عددی برای جریان‌های دارای سطح آزاد و روش نسبت حجمی سیال (VOF) ۲۴

۲-۷ مدل‌های مبتنی بر معادله‌ی انتقال ۳۵

۲-۷-۱ معادله انتقال ۳۵

۲-۷-۲ مدل عددی انتقال جرم کاویتاسیون ۳۶

۲-۷-۳ حل معادله‌ی انتقال ۳۷

فصل سوم: مدل‌های حاکم ۳۹

۳-۱ مدل‌سازی محاسباتی جریان ۳۹

۳-۲ روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای مدل کردن جریان آشفته ۴۰

۳-۲-۱ روش معمول برای شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ ۴۵

۳-۲-۲ روش عددی برای گسسته‌سازی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ ۴۹

۳-۳ فرآیند محاسباتی ۵۲

۳-۳-۱ روش گسسته‌سازی معادلات در اپن فم ۵۳

۳-۳-۲ گسسته‌سازی به روش حجم محدود ۵۴

۳-۳-۳ گسسته‌سازی دامنه‌ی حل ۵۵

۳-۳-۴ گسسته‌سازی معادلات انتقال [۸۱] ۵۶

۳-۳-۵ مشتقات مکانی ۵۷

۳-۳-۶ کنترل گام‌های زمانی قابل تطبیق [۸۱] ۵۷

۳-۳-۷ زیر سیکل‌های زمانی ۵۹

۳-۳-۸ شرایط مرزی و اولیه ۶۰

۳-۳-۹ فرآیند حل ۶۳

۳-۳-۱۰ الگوریتم پیزو برای جریان گذرا ۶۳

۳-۳-۱۱ حل دستگاه معادلات خطی ۶۴

۳-۴ معادلات حاکم بر روش VOF ۶۵

۳-۵ اعتبارسنجی روش نسبت حجمی(VOF) ۷۰

۳-۵-۱ انتقال یک قطره‌ی مربعی در یک میدان سرعت مایل ۷۰

۳-۵-۲ دوران دادن یک قطره‌ی دایروی شکافدار ۷۲

۳-۵-۳ کشیدن یک قطره‌ی دایروی در یک جریان برشی ۷۳

۳-۵-۴ متراکم نمودن سطح مشترک با افزایش ثابت تراکمی C_γ ۷۴

۳-۶ مدل‌های انتقال جرم ۷۶

فصل چهارم: نتایج ۷۸

۴-۱ شرایط شبیه‌سازی ۷۸

۴-۲ استقلال از شبکه ۷۹

۴-۳ نتایج شبیه‌سازی در رژیم کاویتاسیون ابری (σ = ۰/۸) ۸۲

۴-۴ رژیم سوپرکاویتاسیون (σ = ۰/۴) ۹۸

۴-۵ گسترش شبیه‌سازی به حالت سه‌بعدی ۱۰۷

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهاد ۱۲۱

۵-۱ نتیجه‌گیری ۱۲۱

۵-۲ ارائه‌ی پیشنهادات ۱۲۳

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۱) نمونه یک تونل آب مدرن در دانشگاه دلف، هلند. A) نمای سه‌بعدی، B) مقطع تونل شامل دو کانال با مقطع دایروی و دو کانال با مقطع مستطیلی، C) نمای نزدیک مقطع آزمایش کاویتاسیون تونل به همراه یک هیدروفویل در داخل آن. ۶

شکل (۱-۲) یک نمونه استخر دینامیکی (دانشگاه پنسیلوانیا) . ۷

شکل (۲-۱) کاویتاسیون اولیه روی هیدروفویل صفحه تخت (جهت جریان از سمت راست به چپ) ۱۳

شکل (۲-۲) کاویتاسیون صفحه‌ای روی هیدروفویل نیمه مسطح- نیمه دایروی (جهت جریان از سمت چپ به راست، زاویه حمله ۶°) ۱۳

شکل (۲-۳) روند غیردائمی کاویتاسیون ابری روی هیدروفویل نیمه مسطح- نیمه دایروی، به روند جدایش کاویتی و شکل‌گیری مجدد آن توجه شود (جهت جریان از سمت چپ به راست، $\sigma = ۱$، زاویه حمله ۳°، سرعت جریان $۶\ m/s$)۱۵

شکل (۲-۴) رژیم‌های کاویتاسیون بر روی هیدروفویل نیمه مسطح- نیمه دایروی، ناحیه ناپایداری تناوبی (Periodic Zone) در شکل مشخص شده است. ۱۶

شکل (۲-۵) سوپرکاویتاسیون روی هیدروفویل NACA0015 (زاویه حمله۸°، جهت جریان از سمت چپ به راست). ۱۷

شکل (۲-۶) جت بازگشتی روی مرز انتهایی کاویتی(جهت جریان از سمت چپ به راست.) ۱۸

شکل (۲-۷) تاثیر جت بازگشتی روی اجسام با چند ناحیه مجزا برای ایجاد کاویتاسیون، جت بازگشتی از اتصال دو ناحیه کاویتی جلوگیری می‌کند (جهت جریان از سمت چپ به راست) ۱۹

شکل(۲-۸): تغییر شکل و اعوجاج شبکه‌ی متحرک در محل سطح مشترک از اسکاردوویلی و زالسکی[۴۵] ۲۵

شکل(۲-۹): شمایی از روش نشانگر سلولی(MAC) ۲۶

شکل(۲-۱۰): شمایی از روش معیار- سطح(LS) و روش نسبت حجمی سیال (VOF) ۲۷

شکل(۲-۱۱): بازسازی سطح مشترک به روش‌های SLIC و PLIC در حوزه‌ی مدل‌های هندسی سطح ۲۹

شکل(۳- ۱) : گسسته‌سازی دامنه‌ی حل در دو سلول همسایه ۵۵

شکل(۳- ۲) : یک شرط مرزی ورودی خروجی ترکیبی ۶۱

شکل(۳- ۳) : حرکت قطره‌ی مربعی داخل میدان سرعت مایل در اعداد کورانت مختلف ۷۱

شکل(۳- ۴) : دوران دادن یک قطره‌ی دایروی شکافدار ۷۲

شکل(۳- ۵) : کشیدن یک قطره‌ی دایروی در یک جریان برشی ۷۳

شکل(۳- ۶) : متراکم نمودن سطح مشترک با افزایش ثابت تراکمی C_γ ۷۴

شکل(۳- ۷) : تغییرات شکل سطح مشترک در زمان‌های مختلف ۷۵

شکل(۴-۱) دامنه‌ی محاسبتای جریان و شرایط مرزی مشابه تونل آب ۷۹

شکل(۴-۲) بررسی اثر چهار شبکه‌ی مختلف بر روی نمودار فشار میانگین بر روی سطح هیدروفویل ۸۱

شکل(۴-۳) شبکه‌ی سازمان‌یافته در نواحی اطراف هیدروفویل ۸۱

شکل(۴-۴) نمودار توزیع چگالی میانگین گیری شده بر روی سطح بالایی هیدروفویل و در عدد کاویتاسیون ۰/۸ ۸۳

شکل(۴-۵) نمودار ضریب فشار بر روی سطح هیدروفویل ۸۳

شکل(۴-۶) نمودار توزیع ضریب برا بر حسب زمان برای یک دوره‌ی تناوب ۸۵

شکل (۴-۷) شکل و دینامیک کاویتاسیون ابری (سمت چپ) و کانتور فشار آن (سمت راست) حاصل از شبیه‌سازی عددی انجام شده با استفاده از مدل اغتشاشی LES و به همراه مدل VOF و با استفاده از مدل‌های انتقال جرم کانز و ساویر در رژیم کاویتاسیونی ابری با عدد کاویتاسیون برابر با ۰/۸ به همراه نتایج آزمایشگاهی از مرجع[۳] ۸۹

شکل(۴-۸) دینامیک کاویتاسیون (چپ) و کانتورهای فشار (راست) که با استفاده از مدل اغتشاشی استاندارد K-ε و مدل انتقال جرمی ساویر و در رژیم کاویتاسیون ابری با عدد کاویتاسیون برابر با ۰/۸ ۹۶

شکل(۴-۹) نمودار مقایسه‌ی ضخامتکاویتاسیوندرموقعیتهای مکانیمختلفبرحسبزمان، میان نتایج عددی و آزمایشگاهی، در یک دوره‌ی زمانی و برای رژیم کاویتاسیون ابری با استفاده از مدل کانز ۹۷

شکل (۴-۱۰) نمودار توزیع چگالی بر روی سطح بالایی هیدروفویل با استفاده از مدل‌های انتقال جرمی کانز وساویر و مدل اغتشاشی LESدر رژیم سوپر کاویتاسین با عدد کاویتاسیونی برابر با ۰/۴ ۹۹

شکل (۴-۱۱) نمودار توزیع ضریب فشار بر روی سطح بالایی و پایینی هیدروفویل با استفاده از مدل‌های انتقال جرمی کانز وساویر و مدل اغتشاشی LESدر رژیم سوپر کاویتاسین با عدد کاویتاسیونی برابر با ۰/۴ ۹۹

شکل (۴-۱۲) سمت راست جریان سوپرکاویتاسیونی شبیه‌سازی شده(شکل بالایی با استفاده از مدل ساویر و وسط با استفاده از مدل کانز) و شکل بدست آمده از تونل آب[۳] (شکل پایین)، شکل‌های سمت راست کانتورهای فشار می‌باشند(شکل بالا مدل ساویر و وسطی مدل کانز)، عدد کاویتاسیونی برابر ۰/۴ است ۱۰۰

شکل(۴-۱۳) نمودار مقایسه‌ی ضخامت کاویتاسیون در موقعیت‌های مکانی مختلف بر حسب زمان، میان نتایج عددی و آزمایشگاهی، در یک دوره‌ی زمانی و برای رژیم سوپر کاویتاسیون (σ = ۰/۴) با استفاده از مدل کانز ۱۰۲
شکل (۴-۱۴) نمودار توزیع چگالی بر روی سطح بالایی هیدروفویل با استفاده از مدل‌های انتقال جرمی کانز وساویر و مدل اغتشاشی LESدر رژیم سوپر کاویتاسیون با عدد کاویتاسیونی برابر با ۰/۲۸ ۱۰۵
شکل (۴-۱۵) نمودار توزیع ضریب فشار بر روی سطح بالایی و پایینی هیدروفویل با استفاده از مدل‌های انتقال جرمی کانز وساویر و مدل اغتشاشی LESدر رژیم سوپر کاویتاسین با عدد کاویتاسیونی برابر با ۰/۲۸ ۱۰۵
شکل (۴-۱۶) کانتور فشار و شکل کاویتاسیونبرایجریانسوپرکاویتاسیونی شبیه‌سازی شده(شکل بالایی با استفاده از مدل ساویر و پایین با استفاده از مدل کانز) و برای عدد کاویتاسیونی برابر ۰/۲۸است ۱۰۶
شکل(۴-۱۷) دامنه‌ی محاسباتی جریان و شرایط مرزی مشابه حالت شبیه‌سازی دوبعدی ۱۰۷
شکل(۴-۱۸) شبکه‌ی محاسباتی گسترش یافته دارای ۲/۸ میلیون سلول ۱۰۹
شکل(۴-۱۹) شبکه‌ی محاسباتی گسترش یافته دارای ۲/۸ میلیون سلول در نزدیک لبه‌ی حمله و شبکه‌ی لایه‌ی مرزی۱۰۹
شکل(۴-۲۰) شکل کاویتاسیون در حال رشد بر روی هیدروفویل در حالت سه‌بعدی و در رژیم کاویتاسیون ابری ۱۱۰
شکل(۴-۲۱) کامل شدن فرآیند رشد کاویتاسیون در حالت سه‌بعدی و در رژیم کاویتاسیون ابری ۱۱۱
شکل(۴-۲۲) شروع ناپایداری کاویتی در حالت سه‌بعدی و در رژیم کاویتاسیون ابری ۱۱۲
شکل(۴-۲۳) شکل کنده شدن کاویتاسیون در حالت سه‌بعدی و در رژیم کاویتاسیون ابری ۱۱۳
شکل(۳-۲۴) دینامیک و شکل کاویتاسیون در حالت سه‌بعدی و در رژیم کاویتاسیون ابری ۱۱۴
شکل(۴-۲۵) نمودار فشار روی سطح هیدروفویل در حالت سه‌بعدی و در یک مقطع میانی از اسپن ۱۱۶
شکل(۴-۲۶) نمودار فشار روی سطح هیدروفویل در حالت سه‌بعدی و در مقطع انتهایی از اسپن ۱۱۶
شکل(۴-۲۷) نودار ضریب برا در سه دورهی تکرار برای ای حال سه‌بعدی و رژیم کاویتاسیونی ابری ۱۱۷
شکل(۴-۲۸): نمودار ضریب پسا در سه دوره‌ی تکرار برای حالت سه‌بعدی و رژیم کاویتاسیونی ابری ۱۱۸
شکل(۴-۲۹) نمودار فشار برای سه مقطع عرضی بر روی سطح هیدروفویل ۱۱۹

فهرست جداول

جدول(۴-۱) فاصله‌ی نقطه‌ی شروع کاویتاسیون از لبه‌ی حمله برای دو مدل کانز و ساویر به همراه مقدار بدست آمده در آزمایشگاه ۸۴

جدول(۴-۲) مقادیر میانگین گیری شده‌ی ضرایب برا برای دومدل کانز و ساویر به همراه مقدار بدست آمده از آزمایش۸۵

جدول(۴-۳) مقادیر میانگین‌گیری شده‌ی ضرایب پسا برای دومدل کانز و ساویر به همراه مقدار بدست آمده از آزمایش۸۶

جدول(۴-۴) مقادیر میانگین گیری شده‌ی ضرایب برا برای دومدل کانز و ساویر به همراه مقدار بدست آمده از آزمایش در رژیم سوپرکاویتاسیون با عدد کاویتاسیون ۰/۴ ۱۰۳

جدول(۴-۵) مقادیر میانگین گیری شده‌ی ضرایب پسا برای دومدل کانز و ساویر به همراه مقدار بدست آمده از آزمایش در رژیم سوپرکاویتاسیون با عدد کاویتاسیون ۰/۴ ۱۰۳

جدول (۴-۶): ضرایب هیدرودینامیکی میانگین‌گیری شده در حالت سه‌بعدی و با مدل کانز ۱۱۸

جدول (۴-۷): ضخامت کاویتی بدست آمده در مقاطع عرضی به فاصله‌ی ۰/۲ طول کورد از لبه‌ی حمله روی هیدروفویل در حالت شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی ۱۲۰

جدول (۴-۸): ضخامت کاویتی بدست آمده در مقاطع عرضی به فاصله‌ی ۰/۴ طول کورد از لبه‌ی حمله روی هیدروفویل در حالت شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی ۱۲۰

جدول (۴-۹): ضخامت کاویتی بدست آمده در مقاطع عرضی به فاصله‌ی ۰/۶ طول کورد از لبه‌ی حمله روی هیدروفویل در حالت شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی ۱۲۰

نمادها

$\mathbf{b}$	بردار شار زیر شبکه‌ای
$\mathbf{B}$	تانسور تنش‌های زیر شبکه‌ای
c	طول وتر هیدروفویل
C_{dest}	ضریب میعان
C_D	ضریب پسا
C_L	ضریب برا
Co	عدد کورانت
Co_o	عدد کورانت محلی
C_{prod}	ضریب تبخیر
C_p	ضریب فشار
C_v	ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت
d	ضخامت کاویتـی
|d|	اندازه‌ی شبکه
d_{Nuc}	قطر اولیه‌ی حباب ها بر واحد حجم
$\mathbf{D}$	تانسور نرخ کشش
e	انرژی داخلی
f	متغیر دلخواه
$\bar{f}$	مولفه‌ی شبکه‌ای یک متغیر
$\acute{f}$	مولفه‌ی زیرشبکه‌ای یک متغیر
$\mathbf{f}$	نیروی حجمی
$\widetilde{f}$	متغیر فیلتر شده برای جریان‌های با چگالی متغیر
$f"$	متغیر زیرشبکه‌ای برای جریان‌های با چگالی متغیر
G	تابع فیلتر
h	بردار انتقال حرارت
K	انرژی جنبشی زیر شبکه‌ای
K_k	انتشار زیر شبکه‌ای
l_{cavity}	طول کاویتی
$\mathbf{L}$	گرادیان سرعت
$\dot{m}$	چشمه انتقال جرم
$\dot{m}^+$	نرخ تولید بخار
$\dot{m}^-$	نرخ چگالش بخار
$\boldsymbol{n_w}$	بردار یکه‌ی عمود بر سطح مشترک دو فاز

تعداد اولیه‌ی حباب ها بر واحد حجم	n_0
فشار	p
فشار محیط	p_∞
فشار داخل حباب	P_B
فشار در پایین دست جریان	P_D
فشار مایع	P_l
فشار در بالادست	P_U
فشار بخار	p_V
شعاع حباب	R_b
تانسور تنش‌های لزج	$\mathbf{S}$
بردارهای نرمال برسطح در مرکز هندسی	$\mathbf{S_f}$
درجه‌ی حرارت	T
دمای مرجع	T_0
زمان	t
تانسور تنش لزجی	$\mathbf{T}$
سرعت	v

نمادهای یونانی

عدد کاویتاسیون	σ
چگالی سیال	ρ
زاویه حمله	α
عرض فیلتر	Δ
مقیاس کولموگروف	λ_k
لزجت گردابه‌های زیر شبکه‌ای	μ_k
نسبت حجمی	γ
لزجت	μ

زیرنویس‌ها

کمیت زیرشبکه‌ای	k
اندازه‌ی شبکه	Δ
کمیت محلی	o
سطح سلول	f
کمیت دلخواه	ϕ
مرکز سلول	P
سلول همسایه	N
مقدار بیشینه	max
فشار کلی	tot
فشار دینامیکی	dyn
سطح مشترک	w
فاز بخار	v
فاز مایع	l

بالانویس‌ها

ترانهاده‌ی ماتریس	T
نشانگر گام زمانی	n

علائم اختصاری

ASM	مدل تنش جبری (Algebraic Stress Model)
CBC	معیار بسته بودن همرفتی (Convection Boundedness Criterion)
CICSAM	طرح ردیابی سطح فشاری برای شبکه های دلخواه (Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes)
CFD	دینامیک سیالات محاسباتی (Computational Fluid Dynamic)
CSF	مدل نیروی پیوسته‌ی سطحی (Continuum Surface Force)
CSS	مدل تنش پیوسته‌ی سطح (Continuum Surface Stress)
DD	گسسته‌سازی تفاضلی مرتبه‌ی یک پایین‌دست (Downwind)
DIC	پیش شرط قطرمبنای ناقص چلوسکی (Diagonal-based Incomplete Cholesky)
DILU	پیش شرط کننده‌ی بالاتر-پایین‌تر قطرمبنای ناقص (Diagonal-based Incomplete Lower-Upper)
DSM	مدل‌های تفاضل تنشی (Differential Stress Models)
DSMG	روش دینامیکی اسموگورینسکی (Dynamic Smagorinsky model)
HRIC	طرح ردیابی سطح مشترک با دقت بالا (HighResolution Interface Capturing)
LDV	سرعت‌سنجی بر مبنای روش داپلر-لیزر (Laser Doppler Velocimetry)
LES	مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (Larg Eddy Simmulation)
LS	روش معیار- سطح (Level-Set)
MAC	روش نشانگر سلولی (Marker And Cell)
NVD	دیاگرام با متغیر بی‌بعد شده (Normalized Variable Diagram)
OEEVM	مدل گردابه‌ای-لزجتی تک معادله‌ای (One Equation Eddy-Viscosity Model)
PBiCG	حلگر گرادیانی پیش شرط شده‌ی غیر مزدوج (Preconditioned Bi-Conjugate Gradient)
PCG	حلگر گرادیانی پیش‌شرط شده‌ی مزدوج (Preconditioned Conjugate Gradient)
PIV	روش اندازه گیری تصویری سرعت (Particle Image Velocimetry)
PLIC	روش محاسبه‌ی سطح مشترک تکه‌ای خطی (Linear Interface Calculation Piecewis)
RANS	روش‌های ناویر استوکس میانگین رینولدز (Reynolds Averaged Navier-Stocks Method)
SLIC	محاسبه‌ی سطح مشترک با روش خط ساده (Simple Line Interface Calculation)
SMG	مدل اسموگورینسکی (Smagorinsky Model)
SGS	مقیاس زیرشبکه‌ای (Subgrid Scale)
SSM	مدل‌های مقیاس-تشابهی (Scale-Similarity Models)
UD	بالادست (Upwind)
VOF	روش نسبت حجمی سیال (Volume of Fluid)

فصل اول

مقدمه