تحلیل عددی جریان سیال حول مقطع پروانه نیمه مغروق با پروفیل لبه انتهایی خطی در اعداد وبر متفاوت

احسان یاری[۱*]، حسن قاسمی[۲]

[۱]دکتری مهندسی دریا-هیدرودینامیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان؛ ehsanyari11@gmail.com
[۲]استاد مهندسی دریا-هیدرودینامیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ gasemi@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۱۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۲

کلمات کلیدی:
عدد وبر
لبه انتهایی خطی
پروانه نیمه مغروق

چکیده

در این مطالعه تحلیل جریان حول مقطع دوبعدی پروانه نیمه مغروق با پروفیل لبه انتهایی خطی در اعداد وبر مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در اثر برخورد مقطع دوبعدی به سطح آب در بخش پشتی مقطع ناحیه هوادهی ایجاد می گردد که بشدت بر روی نتایج حاصل از تحلیل تاثیرگذار می باشد. شکل ناحیه هوادهی تابعی از پارامترهای مختلف هندسی و جریانی مقطع دوبعدی از پروانه نیمه مغروق می باشد. در این مقاله به طور خاص تاثیر پارامتر کشش سطحی و عدد وبر مورد بررسی قرار گرفته است. بر طبق داده های بدست آمده در اعداد وبر پایین پارامتر کشش سطحی سبب افزایش میزان بالاآمدگی سطح آب شده و قطرات آب در دنباله مقطع پره قابل مشاهده می باشند. در اعداد وبر بالاتر از عدد وبر بحرانی پارامتر کشش سطحی فقط سبب ریزش قطرات سیال در ناحیه ورودی می شود.

Numerical Investigation of Fluid Flow Around a Cross-Section of Surface Piercing Propeller with Linear Trailing Edge Profile in Various Weber Numbers

Ehsan Yari[1*], Hassan Ghassemi[2]

[1] *PhD of marine engineering-hydrodynamic, Maleke ashtar University of Technology, Esfahan, Iran*
[2] *Professor of marine engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 5 Jan. 2015
Accepted: 21 Feb. 2016

Keywords:
Weber number
Linear Trailing Edge
Surface Piercing Propeller

ABSTRACT

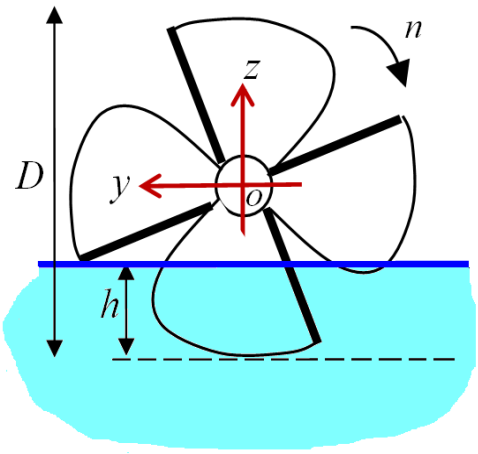
In this study, two-dimensional flow analysis around cross-section of the surface piercing propeller with a linear profile trailing edge is studied in different Weber numbers. Due to collision of the two-dimensional cross section with surface water, aeration zone is created on the suction side that is heavily impact on the results. The ventilation pattern is a function of the geometrical parameters. In this article, in particular, the effect of surface tension and the Weber number have been investigated. According to the obtained results at low Weber numbers, the surface tension effect increases the amount of water surface uplift, and water droplets are visible in the trailing edge of blade section. At Weber numbers higher than critical Weber number, surface tension effect will only cause loss of fluid droplets in the inlet region.

۱- مقدمه

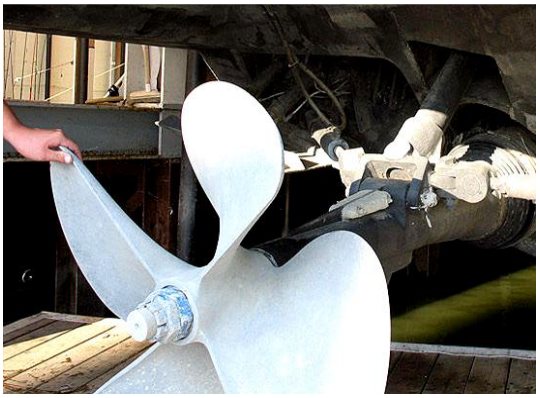
پروانه های نیمه مغروق غالباً به عنوان سیستم‌های رانش دریایی با راندمان بالا شناخته می‌شوند. پروفیل مقطع این پروانه‌های بگونه‌ای طراحی می‌شود که از رخ دادن پدیده کاویتاسیون بر روی سطح پروانه جلوگیری می‌کند. میزان درگ ناشی از ملحقات سیستم رانش مانند هاب و براکت و.. نیز به خاطر اینکه مقداری از سطح پروانه خارج از آب می‌باشد کاهش می‌یابد. اما با توجه به پیچیدگی های تئوری که در زمینه طراحی پروانه های نیمه مغروق وجود دارد این سیستم رانش هنوز به عنوان یک سیستم رانش متداول محسوب نمی‌شود. در شکل۱-الف هندسه یک نمونه پروانه نیمه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.2.7]

مغروق چهار پره‌ای در یک آبخور مشخص نشان داده شده است. لبه انتهایی مقطع پره که در شکل۱-ب مشخص می‌باشد، تاثیر بسزایی در رفتار جریان اطراف مقطع دوبعدی پره پروانه نیمه مغروق را داراست.



الف) شماتیک پروانه نیمه مغروق و موقعیت سطح آزاد



ب) هندسه واقعی یک نمونه پروانه نیمه مغروق

شکل۱- هندسه پروانه نیمه مغروق بصورت شماتیک و واقعی

هندسه پروانه‌نیمه مغروق، از نظر ظاهری متفاوت با هندسه پروانه‌های متداول است. مقطع پره اغلب به گونه‌ای طراحی می‌شود که دارای لبه ابتدایی[۱] نوک تیز و لبه انتهایی[۲] ضخیم و پله دار است. لبه تیز ابتدایی، با زاویه ورودی کم طراحی می‌شود. توپی پروانه و ریشه پره در مقابل بارهای زیاد خارج از مرکز و تناوبی وارده، مقاوم ساخته می‌شوند. در گذشته به علت عدم پیشرفت قدرت پردازش سیستم‌های نرم‌افزاری بیشتر مطالعات صورت گرفته بر روی پروانه‌های نیمه مغروق بر پایه تست تجربی استوار بوده است. تحقیقات تجربی زیادی صورت گرفته است که مهمترین آنها توسط شیبا [۱]، هادلر و هکر[۲]، هکر[۳]، راینز[۴]، رز و کروپا[۵]، کروپا[۶]،رز و همکاران [۷] و وانگ[۸] اشاره کرد. تمرکز کلیه این تحقیقات بر روی تعیین متوسط تراست، گشتاور، ممان های خمشی و نیروهای جانبی بوده است. اولین فعالیت‌های مربوط به مدلسازی عددی پروانه‌های نیمه مغروق توسط ابرمت با استفاده از روش عددی تئوری خطوط بالابر و بدون در نظر گرفتن پارامترهای هوادهی و تغییرات ویک انجام گرفته است[۹]. فوروپا به مدلسازی پروانه نیمه مغروق با استفاده از روش عددی تئوری خطوط بالابر بالابر و با در نظر گرفتن پارامتر هوادهی پرداخت. او همچنین از روش تصویر کردن جهت بررسی سطح آزاد بهره جست اما محل هوادهی را لبه ابتدایی و بصورت کامل لحاظ کرده بود[۱۰]. در ادامه وانگ با در نظر گرفتن تئوری ورود دو بعدی به آب و ترکیب با روش عددی تئوری خطوط بالابر به محاسبه تراست و گشتاور پروانه پرداخت[۱۱]. کوپنتو به تحلیل پروانه نیمه مغروق با استفاده از روش RANS پرداخته است و یک نمونه پروانه نیمه مغروق چهار پره ای در یک دور عملکرد پروانه مورد بررسی قرار گرفته است و پارامترهای نیرویی بدست آمده با داده های موجود از المان مرزی و تست مقایسه شده اند. [۱۲]. کالیفانو و استین با استفاده از شبیه سازی به روش RANS مکانیزم های هوادهی در پروانه های دریایی را در حالت کاملاً مغروق مورد بررسی قرار دادند[۱۳]. کازلوسکا و همکاران به مطالعه عددی و تجربی بر روی هوادهی پروانه های دریایی پرداختند. در این تحقیق برای یک نمونه پروانه استاندارد چهار پره ای نتایج تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی مطابق با شرایط تست شبیه سازی شده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. کلیه حالات مورد بررسی مربوط به پروانه های کاملاً مغروق می باشد[۱۴]. کوشن و همکاران به بررسی تست پدیده هوادهی یک نمونه پروانه تکی در آب راکد به-همراه موج پرداخته و هدف اولیه از انجام تحقیق را مقایسه داده-های تجربی و نتایج دینامیک سیالات محاسباتی عنوان کرده است. سپس پارامترهای مختلف میزان غوطه وری ، وجود و عدم وجود موج و... در دو حالت پروانه با هوادهی و در حالت غیر هوادهی مورد بررسی قرار داده است[۱۵]. فراندو و ویویانی به بررسی تاثیر عدد وبر بر روی پروانه های نیمه مغروق مدل تست اشل شده پرداخته-اند[۱۶]. هیمی آنالیز عددی پروانه نیمه مغروق در حالت ناپایا و در حالت آب آزاد را با استفاده از روش RANS[۳] انجام داد. در این تحقیق هندسه پروانه نیمه مغروق مربوط به اولفسون مورد تحلیل قرار گرفته است و داده های بدست آمده با نتایج تست تجربی مورد مقایسه و اعتبار سنجی قرا رگرفته است. بر اساس نتیجه گیری انجام شده داده های انتگرالی انطباق خوبی با داده های تجربی دارند اما داده های محلی اینگونه نمی باشند[۱۷].

در مطالعه حاضر آنالیز جریان حول مقطع دوبعدی پروانه نیمه مغروق با پروفیل لبه انتهایی خطی در اعداد وبر مختلف با استفاده از نرم‌افزار انسیس-فلوئنت بکمک مش متحرک[۴] مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. شکل، ضخامت و توسعه ناحیه هوادهی در سطح پشت پره پروانه نیمه مغروق یا سطح بالایی پروفیل دوبعدی مقطع پروانه نیمه مغروق تابعی از پارامترهای مختلفی می باشد که کشش سطحی سطح آب نیز یکی از این پارامترها می باشد. جهت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.2.7]

بررسی میزان تاثیر پذیری ناحیه هوادهی از کشش سطحی و به تبع آن عدد وبر مربوطه مقطع دوبعدی ازپره پروانه نیمه مغروق در شعاع معین و در دورهای مختلف با و بدون در نظر گرفتن پارامتر کشش سطحی مورد بررسی و محاسبه قرار گرفته است. در انتها پس از استخراج نتایج محلی و انتگرالی علاوه بر مطالعه تاثیر عدد وبر محدوده عدد وبر بحرانی نیز استخراج شده است.

۲- معادلات حاکم

با توجه به اینکه در مطالعه حاضرهدف مدلسازی جریان حول مقطع دوبعدی پره پروانه نیمه مغروق از لحظه ورود به آب تا زمان خارج شدن از سطح آب با در نظر گرفتن اثر پارامتر کشش سطحی می باشد، لذا جهت شبیه سازی جریان سیال از مدل دوفازی آب و هوا VOF[۵] شامل کشش سطحی و مدل RANS بر اساس روش حجم محدود استفاده شده است. در ادامه معادلات حاکم بر جریان سیال به همراه معرفی پارامترهای مختلف آمده است. فرم کلی معادله پیوستگی حاکم بر جریان سیال بصورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \qquad (۱)$$

معادله (۱) فرم کلی معادله پیوستگی می باشد. معادله ممنتوم در دستگاه مختصات اینرسی بصورت ذیل می باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u}\,\vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\rho \bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \qquad (۲)$$

که در معادله فوق p پارامتر فشار استاتیکی، $\bar{\tau}$ تانسور تنش و $\rho\vec{g}$ و $\vec{F}$ بترتیب نیروهای حجمی وارد بر جسم و نیروهای خارجی می‌باشند.

مدل استاندارد $k-\omega$ SST یک مدل تجربی بر اساس معادلات جابجایی مدل برای انرژی جنبشی اغتشاشی (k) و نرخ اضمحلال[۶] ویژه (ω) مورد استفاده قرار گرفته است[۱۸] . جهت استخراج کسر حجمی آب و هوا از مدل دوفازی VOF که شامل تاثیر پارامتر کشش سطحی در مرز هر دوفاز آب و هوا می باشد استفاده شده است. این مدل با در نظر گرفتن پارامتر ویژه برای زوایای تماس بین فازها و دیواره ها تقویت شده است. محاسبه مرز بین فازها با حل معادله پیوستگی برای کسر حجمی یک فاز یا چند فاز اجرا می شود. برای فاز معادله بصورت ذیل می باشد:

$$\frac{1}{\rho_q}\left[\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \overrightarrow{u_q}) = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^{n}(\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp})\right] \qquad (۳)$$

که $\dot{m}_{qp}$ انتقال جرم از فاز q به فاز p می باشد و $\dot{m}_{pq}$ انتقال جرم از فاز p به فاز q می باشد. S_{α_q} اندازه اش صفر می‌باشد.

معادله ممنتوم با استفاده از روش بالادست[۷] مرتبه دوم گسسته سازی و حل شده است. افت فشار در راستای سطوح وابسته به دو پارامتر کشش سطحی[۸] (σ) و خمیدگی سطح اندازه گیری شده در دو راستای R_1 و R_2 در دستگاه مختصات عمود بر هم می باشد.

$$p_2 - p_1 = \sigma\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \qquad (۴)$$

که p_1 و p_2 فشار سیالات دو طرف مرز مشترک می باشند. کشش سطحی همچنین می تواند بصورت جهش فشاری در راستای عرضی صفحه نوشته شود. نیروی روی سطح می تواند بصورت نیروی حجمی با استفاده از تئوری دیورژانس بیان شود. این نیروی حجمی می تواند به عنوان یک ترم چشمه به معادله ممنتوم اضافه گردد. که بصورت زیر می باشد[۲۰] :

$$F_{vol} = \sum_{i<j} \sigma_{ij} \frac{\alpha_i \rho_i \kappa_j \nabla \alpha_j + \alpha_j \rho_j \kappa_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \qquad (۵)$$

در مطالعه حاضر عدد وبر بصورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$W_n = \sqrt{\frac{n^2 D^3}{\kappa}} \qquad (۶)$$

که D، n و κ بترتیب قطر چرخش، سرعت دورانی[۹] و ضریب مویینگی جنبشی[۱۰] می باشد.

۳- مقطع دوبعدی پره پروانه نیمه مغروق

در جدول۱ مشخصات هندسی مقطع دوبعدی از پره پروانه نیمه مغروق نشان داده شده است. مطابق شکل سه بعدی و مقطع دوبعدی نشان داده شده از پروانه در جدول۱ پروفیل لبه انتهایی مقطع دوبعدی خطی در نظر گرفته شده است. پروانه نیز راستگرد می باشد که جهت چرخش در شکل نشان داده شده است. مختصات نقاط مقطع دوبعدی از پره به سه بخش مکش[۱۱]،فشاری[۱۲] و لبه انتهایی[۱۳] تقسیم شده است و در جدول۱ با توجه به دستگاه مختصات منطبق بر لبه ابتدایی مقطع ذکر شده است.

جدول۱- مشخصات هندسی مقطع دوبعدی از پره پروانه نیمه مغروق

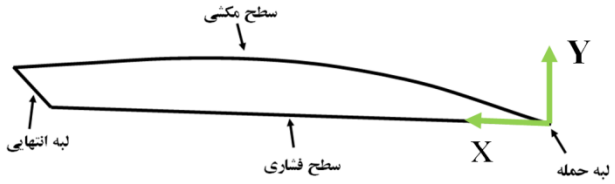
X(m)	Y_مکشی(m)	X(m)	Y_مکشی(m)
۰	۰		
۰/۰۱	۰/۰۰۳۳۲	۰/۱۱	۰/۰۲۱۶۸۷
۰/۰۲	۰/۰۰۶۴۸	۰/۱۲	۰/۰۲۱۶۸۳
۰/۰۳	۰/۰۰۹۴۲۷	۰/۱۳	۰/۰۲۱۳۸۵
۰/۰۴	۰/۰۱۲۱۱۶	۰/۱۴	۰/۰۲۰۸۳
۰/۰۵	۰/۰۱۴۵۱۲	۰/۱۵	۰/۰۲۰۰۶۲
۰/۰۶	۰/۰۱۶۵۸۵	۰/۱۶	۰/۰۱۹۱۳۴
۰/۰۷	۰/۰۱۸۳۱۵	۰/۱۷	۰/۰۱۸۱۰۸

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.2.7]

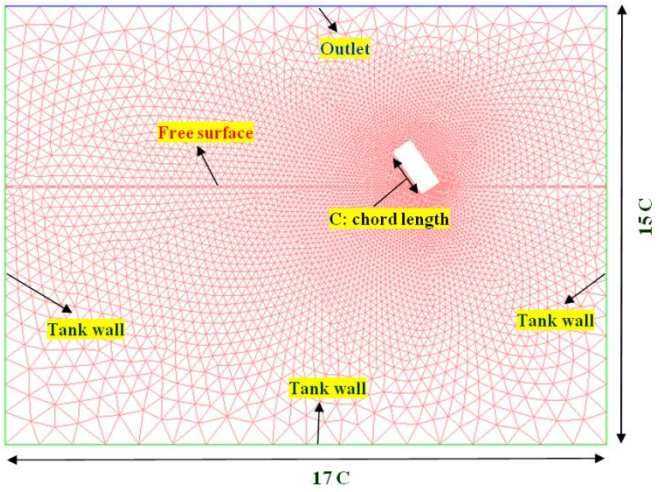
۰/۰۱۶۴۰۱	۰/۱۸	۰/۰۱۹۶۹	۰/۰۸
۰/۰۱۳۷۱۲	۰/۱۹	۰/۰۲۰۷۰۷	۰/۰۹
۰/۰۰۹۵۵	۰/۲۰	۰/۰۲۱۳۶۸	۰/۱۰

Y_لبه انتهایی(m)	X(m)	Y_فشاری(m)	X(m)
۰	۰/۱۹۰	۰	۰
۰/۰۰۱۹۱	۰/۱۹۲	۰	۰/۰۵
۰/۰۰۳۸۲	۰/۱۹۴	۰	۰/۱۰
۰/۰۰۵۷۳	۰/۱۹۶	۰	۰/۱۵
۰/۰۰۷۶۴	۰/۱۹۸	۰	۰/۱۹
۰/۰۰۹۵۵	۰/۲۰۰		

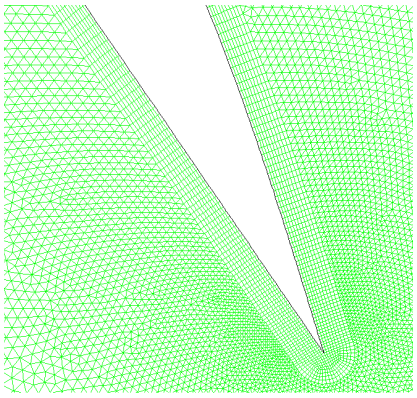


۳-۱- شبکه تولید شده و دامنه حل

با توجه به اینکه در مطالعه حاضر از روش مش دینامیکی جهت تحلیل جریان حول مقطع دوبعدی از پره پروانه نیمه مغروق استفاده شده است، لذا تولید شبکه اطراف جسم و در محدوده نزدیک به آن در دامنه حل از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می باشد. بنابراین جهت ارضای موارد فوق الذکر از یک دامنه حل کوچک نزدیک به جسم و یک دامنه حل بزرگتر حول دامنه حل اولی استفاده شده است. دامنه حل کوچکتر دارای ابعادی مطابق با ۱/۶ برابر اندازه کورد مقطع پره در راستای محور طولی و ۰/۸ برابر اندازه کورد مقطع پره در راستای محور عرضی می باشد. دامنه حل بزرگتر نیز دارای ابعاد ۱۷ برابر اندازه کورد مقطع پره در راستای محور X و ۱۵ برابر اندازه کورد مقطع پره در راستای محور Y می باشد. جهت مطالعه دقیق رفتار جریان در دامنه حل کوچکتر از شبکه هیبریدی استفاده شده است. بگونه‌ای که در نزدیکی سطح آزاد از شبکه سازمان یافته و حول جسم از لایه مرزی استفاده شده است. و در نواحی دورتر از جسم در دامنه حل کوچکتر و بزرگتر از شبکه بی سازمان استفاده شده است. با توجه به اینکه جریان دوفازی در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفته است لذا جهت افزایش پایداری در حل و دقت مطلوب در محدوده سطح آزاد از شبکه سازمان یافته استفاده شده است. در شکل۲ شبکه تولید شده حول مقطع دوبعدی پره نشان داده شده است. تعدادکل شبکه تولید شده حول جسم و در دامنه حل ۹۲۰۰۰ المان سطحی می باشد. فاصله اولین المان از سطح جسم در حدود ۰/۹ میلی متر می باشد. مقطع دوبعدی پره از مقطع شعاعی r=0.7R پروانه نیمه مغروق انتخاب شده است و شعاع چرخش مقطع دوبعدی پره ۰/۴ متر می باشد.



الف) شماتیک دامنه محاسباتی



ب) مقطع دوبعدی پره پروانه

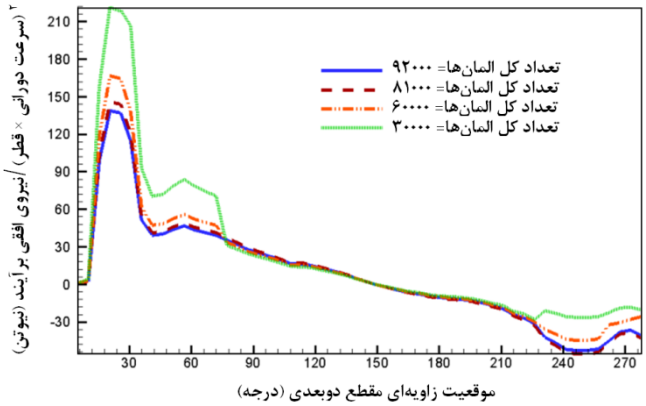
شکل۲- شبکه بی‌سازمان و لایه مرزی تولید شده

۴- همگرایی در حل

جهت بررسی شرط استقلال شبکه، شبیه سازی عددی در چهار حالت از مش انجام شده است:

- شبکه بزرگ در ناحیه بیرونی
- سه مرحله ریز نمودن شبکه بطور همزمان در ناحیه متحرک، سطح آزاد و ناحیه بیرونی

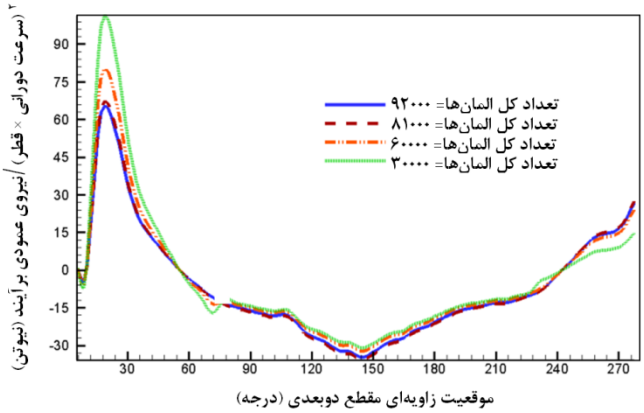
شکل۳ همگرایی نتایج نیرویی افقی و عمودی را بر روی مقطع دوبعدی پره در یک دور چرخش نشان می‌دهد. مطابق شکل با ریز کردن شبکه حل، همگرایی نتایج عددی بسرعت اتفاق می افتد.



الف) نیروی افقی برآیند

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.2.7]

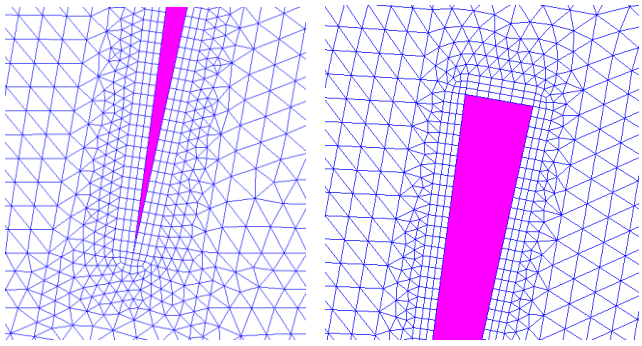


ب) نیروی عمودی برآیند

شکل۳- همگرایی نیروی افقی و عمودی بر روی سطح مقطع دوبعدی پره در یک دور چرخش در تعداد سلولهای محاسباتی مختلف

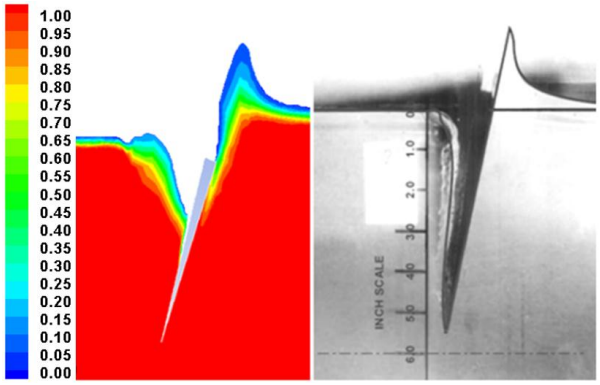
۵- اعتبارسنجی نتایج عددی با داده‌های تجربی

جهت بررسی اعتبار سنجی داده‌های عددی بدست آمده، از نتایج تجربی مربوط به یک مقطع گوه‌ای شکل انجام شده توسط ککس [۱۹] استفاده شده است. مقطع گوه‌ای شکل دارای طول کورد ۰/۰۴ متر و ارتفاع ۱۵ سانتی متر بوده و حول دایره ای با شعاع ۰/۱ متر می چرخد. سرعت دورانی مقطع گوه ای شکل حین چرخش $\omega=100$ رادیان بر ثانیه می‌باشد. در شکل۴ شبکه تولید شده حول مقطع دوبعدی جسم گوه ای شکل نشان داده شده است. مطابق شکل کلیه نکات ذکر شده جهت تولید شبکه حول مقطع دوبعدی پره در اینجا نیز رعایت شده و شبکه تولید شده مشابه شبکه تولید شده حول مقطع دوبعدی پره می باشد.



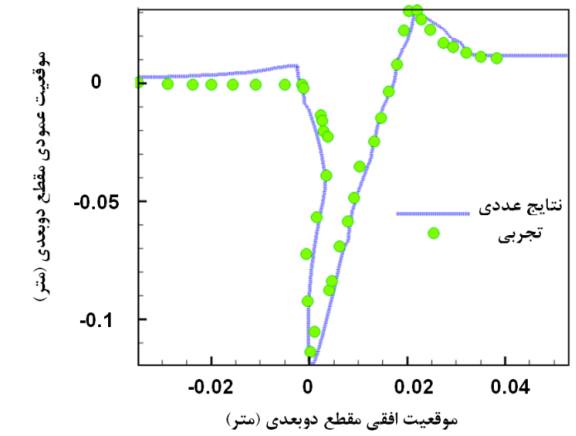
شکل۴- شبکه تولید شده حول جسم گوه ای شکل

در شکل ۵ توزیع کسر حجمی آب و هوا بدست آمده از تحلیل عددی با نتایج تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل انطباق خوبی بین توزیع بدست آمده از حل عددی و نتایج تجربی وجود دارد. میزان بالاآمدگی سطح آب از جمله پارامترهای بسیار مهمی می باشد که مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. در ادامه پروفیل ناحیه هوادهی بدست آمده از نتایج تحلیل عددی با در نظر گرفتن پارامتر کشش سطحی و داده‌های تجربی موجود حول مقطع گوه‌ای شکل نشان داده شده است. مطابق شکل انطباق بسیار خوبی بین داده های عددی و تجربی وجود دارد و تنها اختلاف ناچیزی در لبه ابتدایی مقطع گوه‌ای شکل مشاهده می‌گردد. که از عدم نوک تیز بودن مقطع جسم گوه‌ای شکل در واقعیت ناشی می‌شود.

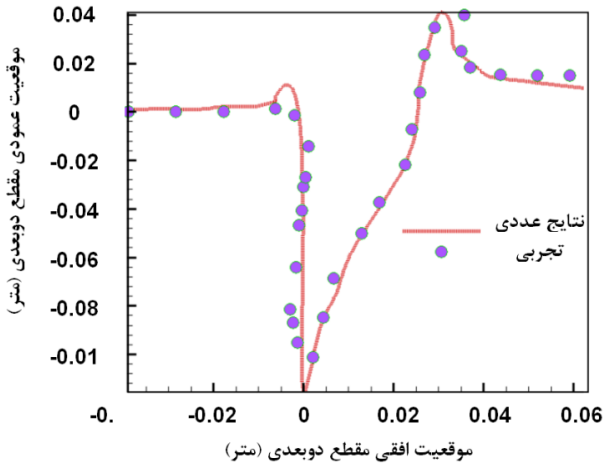


شکل۵- مقایسه توزیع کسر حجمی آب و هوا حول جسم گوه ای مطالعه حاضر با نتایج تجربی [۱۹]

درشکل۶ پروفیل ناحیه هوادهی جسم گوه‌ای شکل در زوایای مختلف ورودی به آب در مقایسه با نتایج تجربی نشان داده شده است. مطابق شکل با افزایش زاویه ورودی به آب، خطای بیشتری در سطح هوادهی مقطع گوه‌ای شکل و نزدیک به لبه جلویی مقطع گوه‌ای شکل مشاهده می‌گردد. زیرا به علت همزمانی پدیده‌های کاویتاسیون[۱۴] و هوادهی[۱۵] در سطح هوادهی مقطع گوه‌ای شکل، ریزش گردابه‌ها در سطح هوادهی رخ می‌دهد که ناشی از ضعف مدل توربولانسی در مدلسازی عددی می‌باشد.



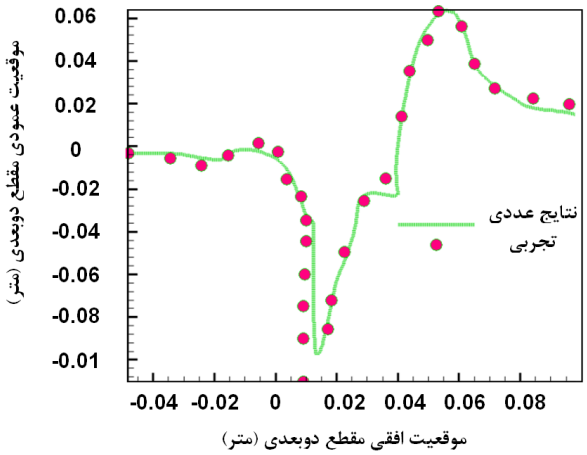
الف) زاویه ورودی به آب $\alpha = 6\ deg$



ب) زاویه ورودی به آب $\alpha = 8\ deg$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

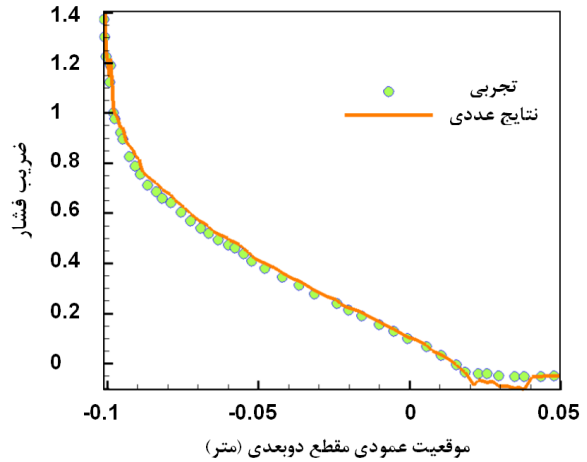
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.2.7]



ج) زاویه ورودی به آب $\alpha = 10\ deg$

شکل۶- پروفیل ناحیه هوادهی بدست آمده از نتایج عددی در مقایسه با نتایج تجربی [۱۹] در زوایای مختلف ورودی به آب جسم گوه‌ای

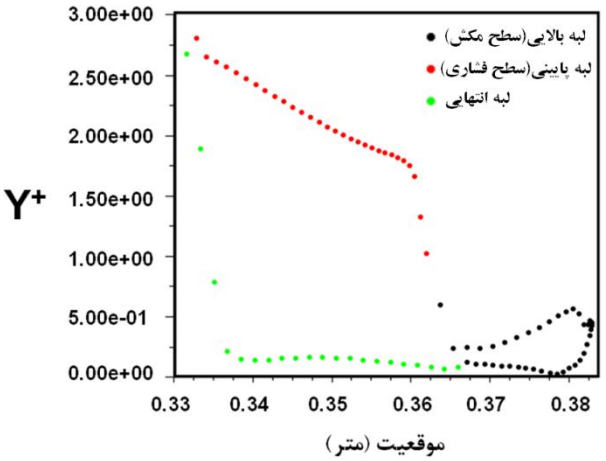
در شکل۷ نمودار ضریب فشار بر روی سطح خیس جسم گوه‌ای شکل حین ورود به آب در مقایسه با نتایج تجربی مشاهده می گردد. همانگونه که مشاهده می‌گردد انطباق بسیار خوبی بین داده-های عددی و نتایج تجربی وجود دارد. با پیشروی جسم به داخل آب میزان این انطباق افزایش می یابد.



شکل۷- نمودار ضریب فشار بر روی سطح خیس مقطع گ.ه‌ای شکل در مقایسه با نتایج تجربی [۱۹] در زاویه ورودی به آب $\alpha = 10\ deg$

۶- تغییرات y^+ نسبت به اجزای جسم

در مدل $k-wsst$ نیاز است که شبکه تا نزدیکی جسم جایی که قسمت لگاریتمی لایه‌مرزی آشفتگی محسوب می‌شود ادامه یابد. در این قسمت از لایه مرزی مغشوش مقدار y^+ بین مقادیر ۱ تا ۳۰ قرار دارد. بنابراین ارتفاع اولین سلول مجاور جسم بایستی به اندازه-ای باشد، که پس از حل عددی y^+ آن در محدوده فوق قرار گیرد. بهتر است مقدار آن نزدیک به حد پایینی این بازه قرار گیرد. محدوده y^+ اولین سلول مجاور جسم بایستی زیر ۳۰ قرار گیرد که البته مقدار آن بهتر است که نزدیک به یک باشد. ضخامت به کار رفته در اولین سلول مجاور جسم برابر ۰/۹ میلی متردرنظر گرفته شده‌است. کل محدوده حل شامل حدوداً ۹۲۰۰۰ سلول محاسباتی است. در شکل۸ نمودار تغییرات y^+ بر روی بدنه شناور زیرسطحی در سرعت مورد بررسی ارائه شده است.



شکل۸- نمودار تغییرات Y^+ بر روی سطح مقطع دوبعدی پره پروانه نیمه مغروق

۷- نتایج تحلیل عددی

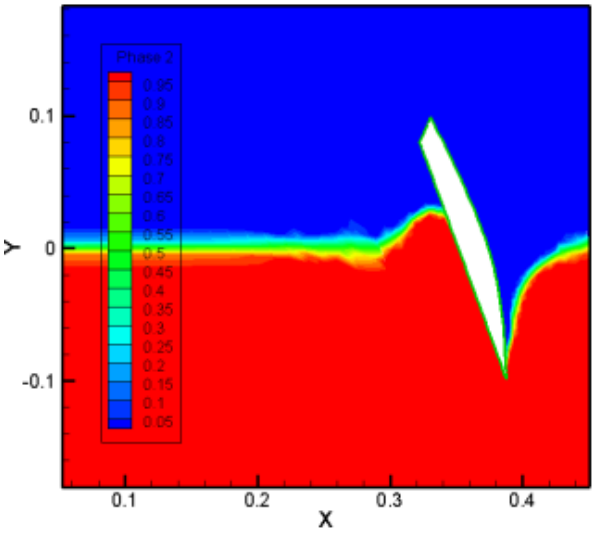
در این بخش نتایج تحلیل عددی مقطع دوبعدی پره پروانه نیمه مغروق در اعداد وبر مختلف جهت بررسی اثر پارامتر کشش سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت مطالعه تاثیر کشش سطحی آنالیز عددی جریان حول مقطع دوبعدی پره در سه عدد وبر Wn=16,170,8530 انجام شده است. در هر عدد وبر مشخص چرخش مقطع پره در یک مسیر دایره‌ای با شعاع ۰/۴ متر انجام گرفته است. با توجه به اینکه هدف اصلی از مطالعه حاضر بررسی تاثیر پارامتر کشش سطحی بر نتایج تحلیل مقطع دوبعدی پره می باشد، لذا در ادامه توزیع کسر حجمی آب و هوا در شرایط با و بدون تاثیر کشش سطحی در عدد وبر Wn=16 مورد بررسی قرار گرفته است و سپس پروفیل ناحیه هوادهی در اعدا وبر مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است. در انتها نتایج نیرویی بر روی مقطع دوبعدی در حالت مختلف مقایسه شده اند.

بیشترین تاثیر پارامتر کشش سطحی در لحظه ورود و خروج مقطع دوبعدی از سطح آب می باشد که البته لحظه ورود به آب از اهمیت بالاتری برخوردار می‌باشد. در شکل۹ توزیع کسر حجمی آب و هوا در موقعیت های مکانی مختلف از لحظه ورود به آب تا لحظه خروج از آب در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن تاثیر کشش سطحی در عدد وبر Wn=16 نشان داده شده است. مطابق شکل ۹-الف مشاهده می گردد که به علت تاثیر پارامتر کشش سطحی ضخامت ناحیه هوادهی کاهش یافته و پروفیل ناحیه هوادهی به صورت خطی توسعه می یابد در حالیکه در شکل ۹-ب که بدون اثر کشش سطحی می باشد در ناحیه پشت مقطع پروفیل ناحیه هوادهی به صورت سهموی در حال افزایش می باشد. علاوه بر این در مقایسه

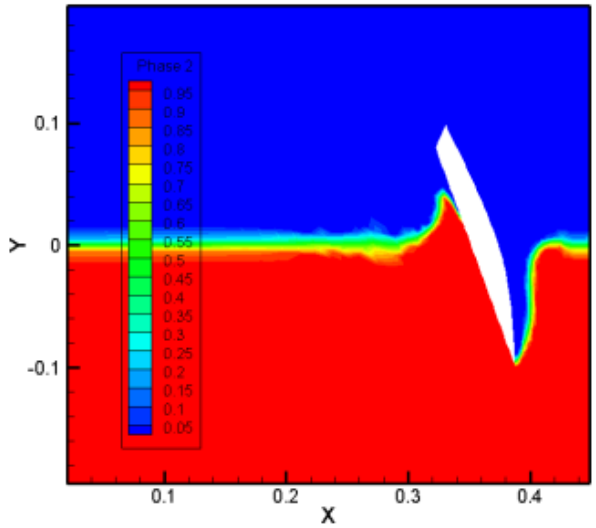
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.2.7]

سطح جلویی (بالایی) هر دو شکل ۹-الف و ۹-ب مشاهده می گردد که به علت تاثیر پارامتر کشش سطحی میزان بالاآمدگی در حالت تاثیر کشش سطحی کاهش یافته و جریان چسبیده به سطح بالایی جسم می باشد. لذا با تاثیر پارامتر کشش سطحی در اعداد وبر پایین مشاهده می گردد که ناحیه هوادهی فقط بر روی سطح پشتی مقطع تشکیل شده و به علت چسبندگی جریان به سطح جلویی مقطع دوبعدی جسم پرتاب جریان سیال به هوا و اتلاف انرژی حذف شده است.



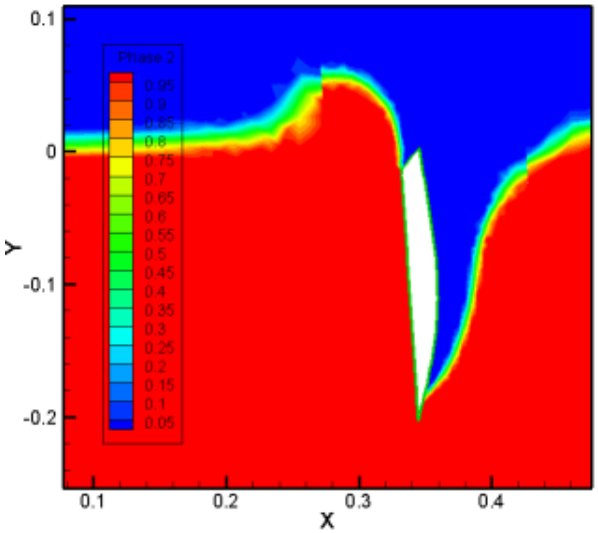
الف) با کشش سطحی



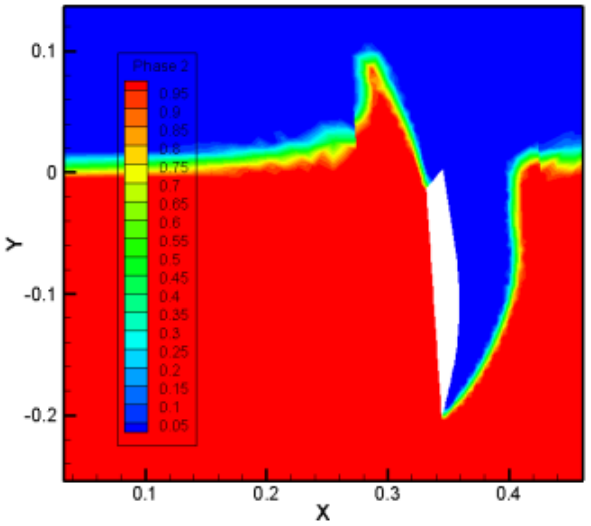
ب) بدون کشش سطحی

شکل۹- توزیع کسر حجمی آب و هوا در عدد وبر Wn=16 و موقعیت $\theta = 27$ درجه

با پیشروی و حرکت مقطع دوبعدی پره به داخل سیال مطابق شکل های ۱۰-الف و ۱۰-ب مشاهده می گردد که با در نظر گرفتن پارامتر کشش سطحی میزان بالاآمدگی یکباره سطح آب حذف شده و رشد ناحیه هوادهی اختلاف چشمگیری با حالت بدون تاثیر پارامتر کشش سطحی پیدا می کند. در ادامه در شکل ۱۱-الف و ۱۱-ب شاهد پرتاب سیال از لبه جلویی ناحیه هوادهی و ریزش قطرات سیال در لبه پشتی ناحیه هوادهی می باشیم که با تاثیر پارامتر کشش سطحی هر دو این پارامترها حذف می شوند.

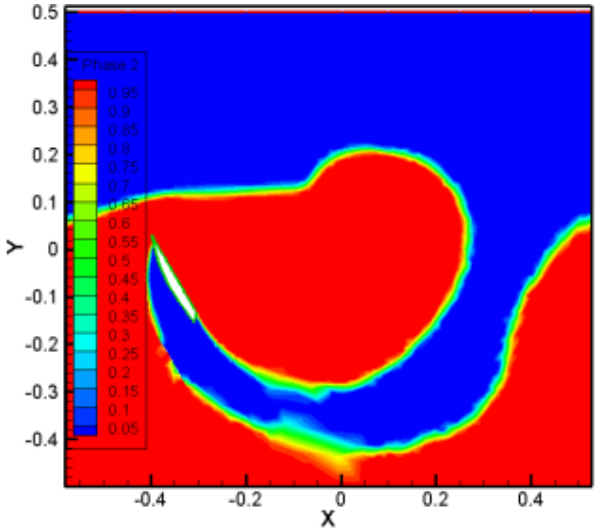


الف) با کشش سطحی



ب) بدون کشش سطحی

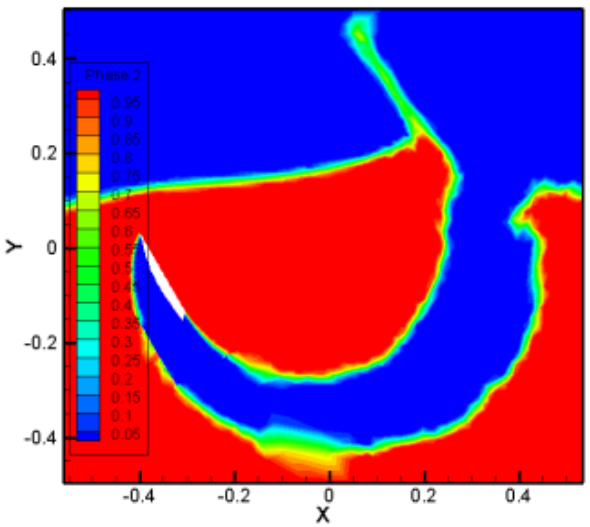
شکل۱۰- توزیع کسر حجمی آب و هوا در عدد وبر Wn=16 و موقعیت $\theta = 45$ درجه



الف) با کشش سطحی

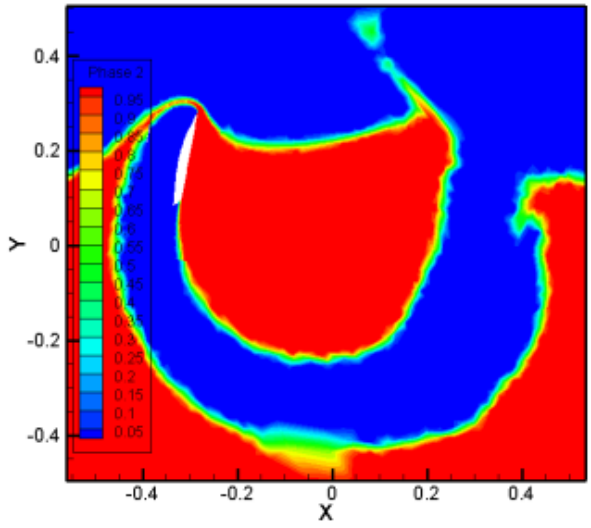
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.2.7]



ب) بدون کشش سطحی

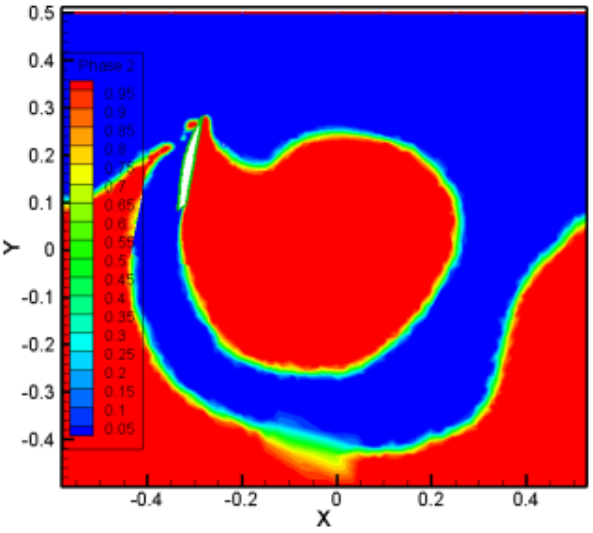
شکل۱۱- توزیع کسر حجمی آب و هوا در عدد وبر Wn=16 و موقعیت $\theta = 216\ deg$



ب) بدون کشش سطحی

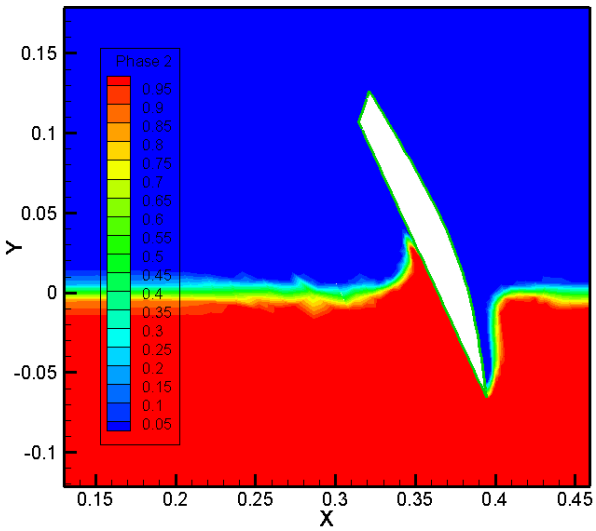
شکل۱۲- توزیع کسر حجمی آب و هوا در عدد وبر Wn=16 و موقعیت $\theta = 261\ deg$

مطابق شکل ۱۲-الف و ۱۲-ب هنگام خروج مقطع دوبعدی پره از سطح آب پروفیل ناحیه هوادهی بشدت تحت تاثیر پارامتر کشش سطحی و عدد وبر می‌باشد، بگونه ای که اختلاف بسیار زیادی بین ضخامت ناحیه هوادهی پشت مقطع دوبعدی وجود دارد. و در حالت تاثیر کشش سطحی شاهد کاهش شدید ضخامت ناحیه هوادهی نزدیک جسم می‌باشیم.



الف) با کشش سطحی

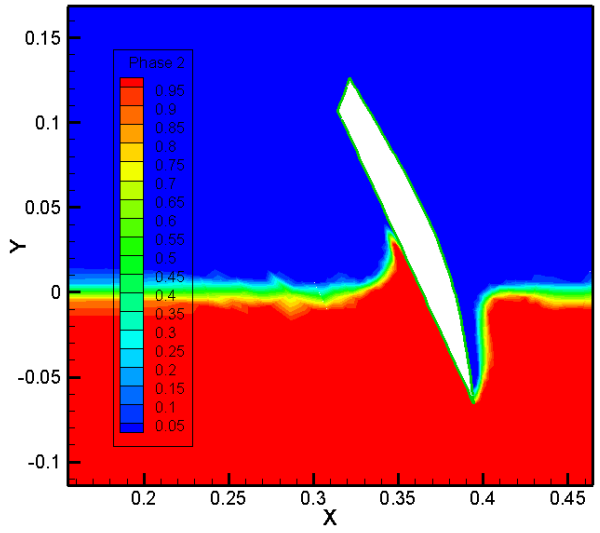
در شکل‌های ۱۳ الی ۱۵ توزیع کسر حجمی آب و هوا در تحلیل جریان حول مقطع دوبعدی پره در عدد وبر Wn=170 با و بدون در نظر گرفتن پارامتر کشش سطحی نشان داده شده است. مطابق نتایج بدست آمده در لحظه ورود به آب تاثیر پارامتر کشش سطحی بسیار کم بوده و فقط بر روی ریزش قطرات آب در ناحیه ورودی هنگام خروج مقطع دوبعدی پره از آب تاثیرگذار می باشد. و عملاً اختلاف در شکل و ضخامت ناحیه هوادهی بسیار کم می باشد. بر طبق بررسی های انجام گرفته Wn=170 کوچکترین عدد وبری می باشد که داده های بدست آمده از آن با در نظر گرفتن پارامتر کشش سطحی کمترین تغییرات را داشته اند. لذا می توان آنرا به عنوان عدد وبر بحرانی در نظر گرفت.



الف) با کشش سطحی

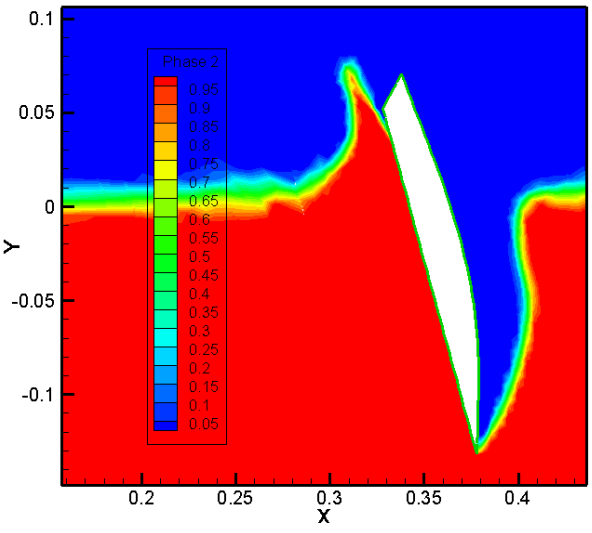
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.2.7]

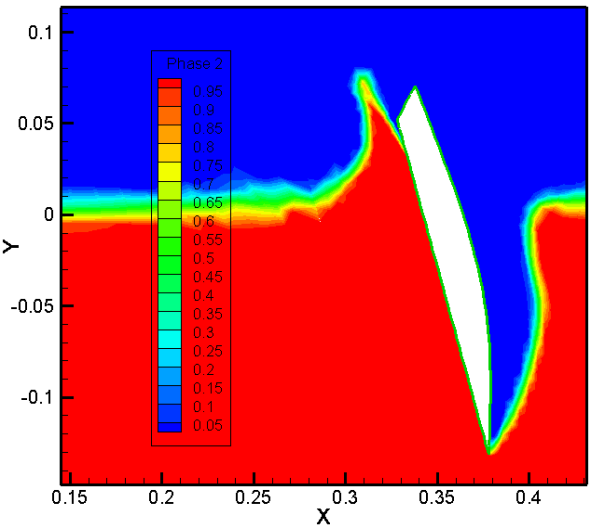


ب) بدون کشش سطحی

شکل۱۳- توزیع کسر حجمی آب و هوا در عدد وبر Wn=170 و موقعیت $\theta = 15\ deg$

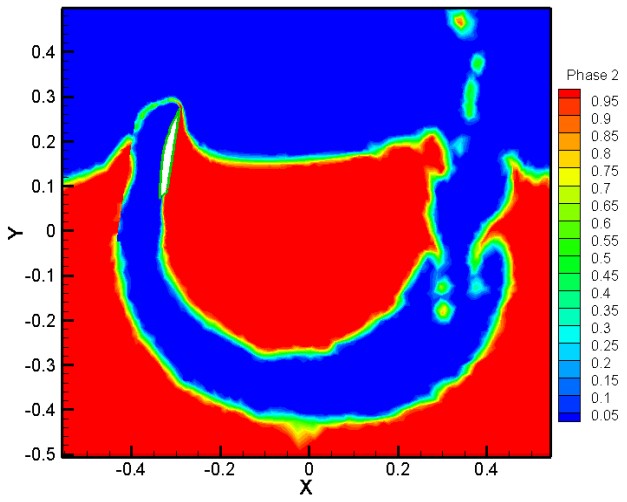


الف) با کشش سطحی

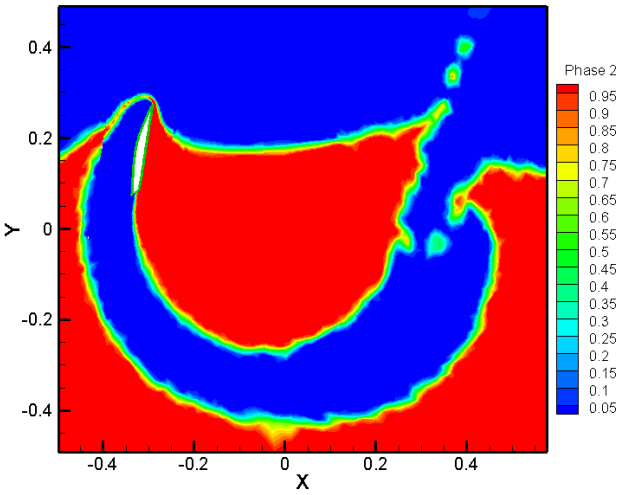


ب) بدون کشش سطحی

شکل۱۴- توزیع کسر حجمی آب و هوا در عدد وبر Wn=170 و موقعیت $\theta = 23\ deg$

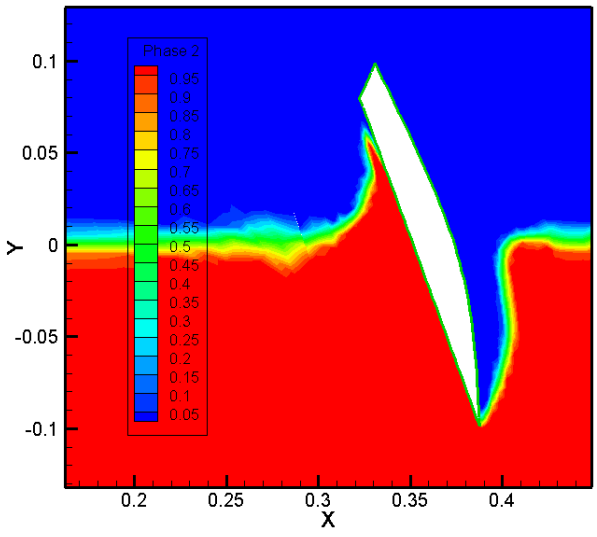


الف) با کشش سطحی



ب) بدون کشش سطحی

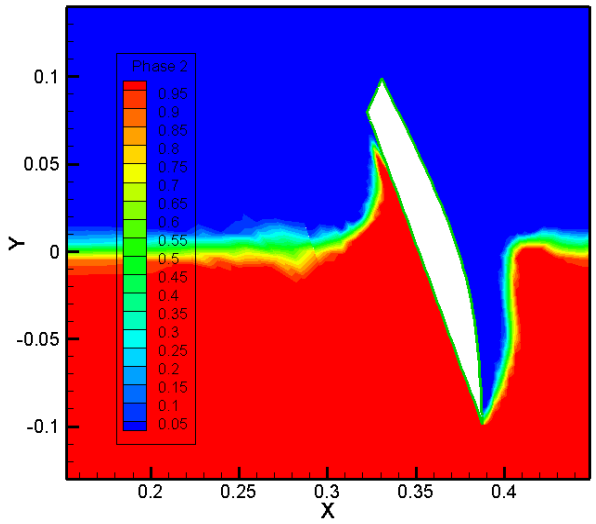
شکل۱۵- توزیع کسر حجمی آب و هوا در عدد وبر Wn=170 و موقعیت $\theta = 208\ deg$



الف) با کشش سطحی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

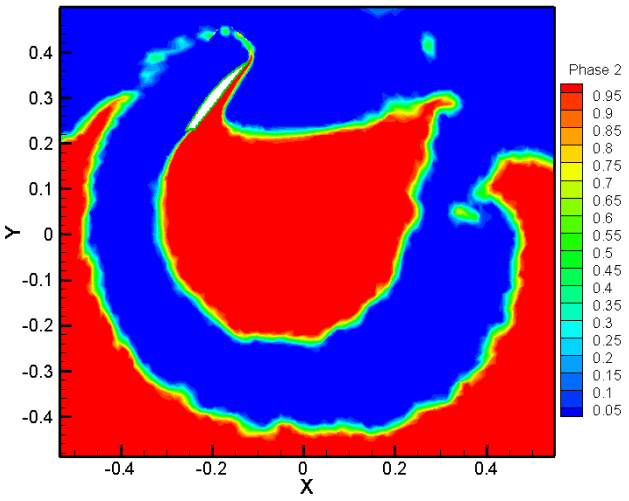
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.2.7]



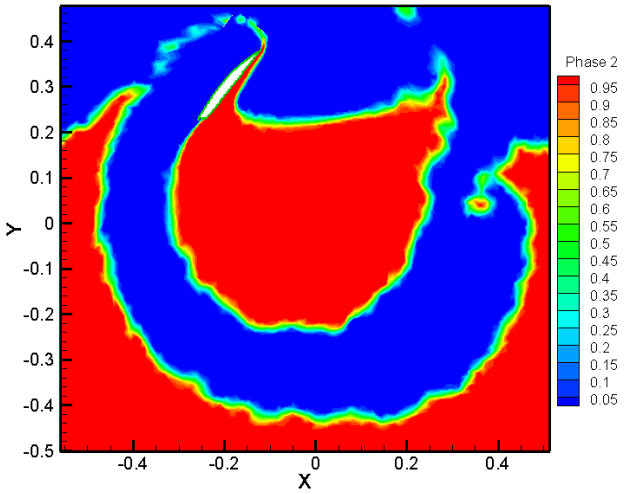
ب) بدون کشش سطحی

شکل۱۶- توزیع کسر حجمی آب و هوا در عدد وبر Wn=8530 و موقعیت $\theta = 18\ deg$

در شکل های ۱۶ و ۱۷ توزیع کسر حجمی در عدد وبر Wn=8530 با و بدون تاثیر پارامتر کشش سطحی نشان داده شده است. در این حالت نیز مشابه عدد وبر Wn=170 هیچگونه اختلافی مابین نتایج بدست آمده از تحلیل عددی با در نظر گرفتن پارامتر کشش سطحی و بدون تاثیر پارامتر کشش سطحی مشاهده نمی گردد. و لذا شکل و ضخامت ناحیه هوادهی در هر دو حالت مشابه می باشند.



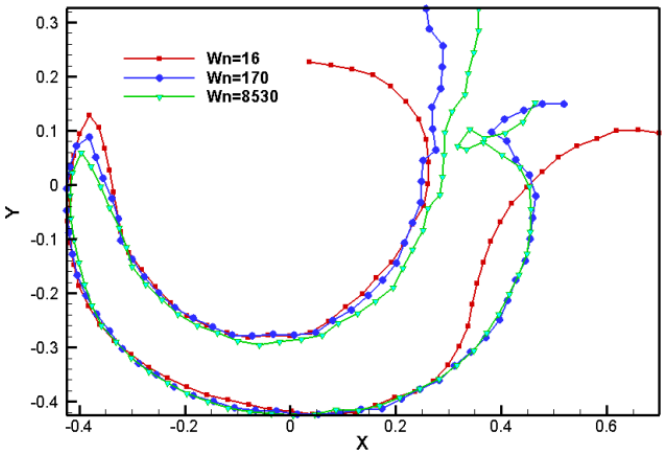
الف) با کشش سطحی



ب) بدون کشش سطحی

شکل۱۷- توزیع کسر حجمی آب و هوا در عدد وبر Wn=8530 و موقعیت $\theta = 176\ deg$

در شکل۱۸ شکل ناحیه هوادهی حول مقطع دوبعدی پره در اعداد وبر مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل مشاهده می‌گردد که در اعداد وبر پایین ضخامت ناحیه هوادهی در منطقه ورودی مقطع پره به آب کم بوده و با افزایش عدد وبر این میزان افزایش یافته و به سمت مقدار ثابتی همگرا می گردد. بگونه‌ای که در اعداد وبر Wn=170 و Wn=8530 اختلاف چندانی مشاهده نمی‌گردد. اما در سایر موقعیت های مربوط به مسیر حرکت جسم، شکل ناحیه هوادهی مشابه می باشد.

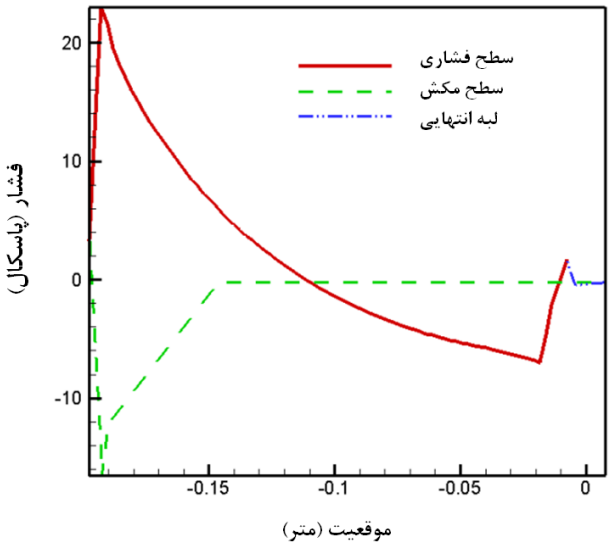


شکل۱۸- شکل ناحیه هوادهی مقطع دوبعدی پره در اعداد وبر مختلف

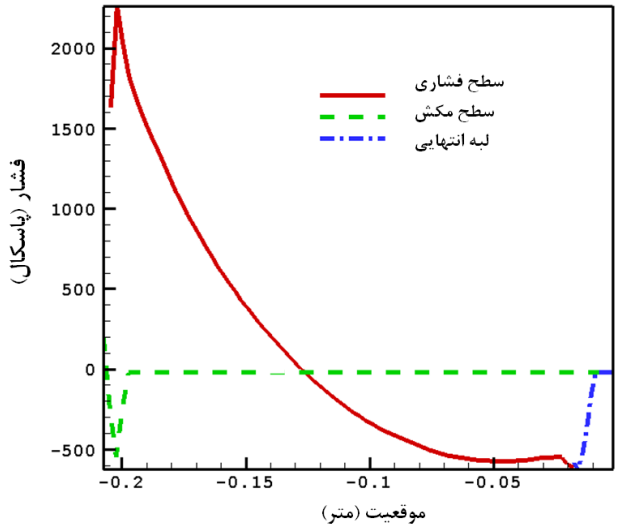
در شکل‌های ۱۹ الی ۲۱ نمودار فشار بر روی سطح جسم در موقعیت‌های متناظر نشان داده شده است. مطابق شکل با افزایش عدد وبر مشاهده می گردد که ناحیه پشتی زودتر به حالت کاملاً هوادهی شده رسیده است. سطح جلویی در هر سه حالت روند مشابهی را طی می کند. بر روی لبه انتهایی نیز با افزایش عدد وبر جریان ورودی از سطح جلویی زودتر جدا شده و ضخامت ناحیه هوادهی بیشتر افزایش می یابد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

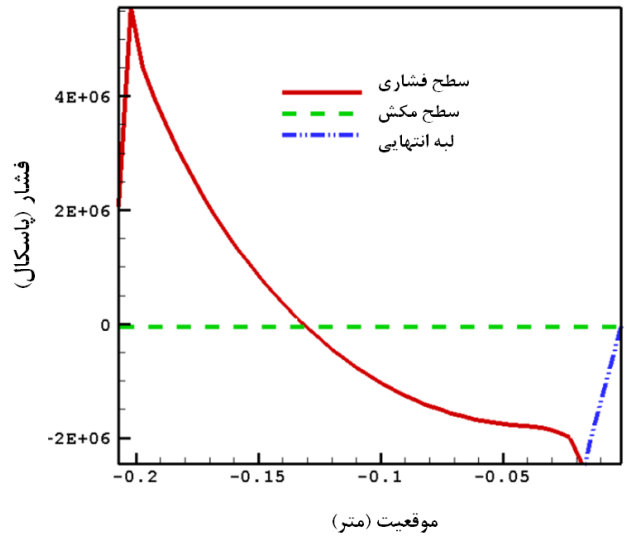
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.2.7]



شکل۱۹- نمودار فشار بر روی جسم(Wn=16 و $\theta = 90\ deg$)



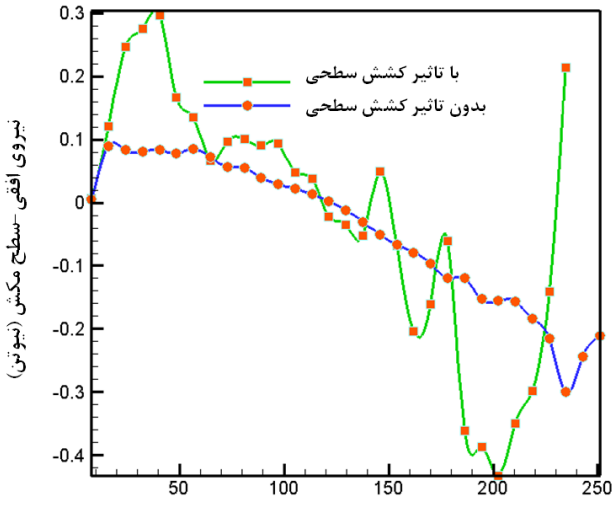
شکل۲۰- نمودار فشار بر روی جسم (Wn=170 و $\theta = 90\ deg$)



شکل۲۱- نمودار فشار بر روی جسم (Wn=8530 و $\theta = 90\ deg$)

در ادامه در شکل‌های ۲۲ الی ۲۴ نتایج انتگرالی نیرویی بر روی سطوح مقطع دوبعدی نشان داده شده است. در شکل ۲۲ و۲۳ نیروهای افقی و عمودی بر روی قسمت های مختلف مقطع دوبعدی در عدد وبر Wn=16 با و بدون تاثیر پارامتر کشش سطحی نشان داده شده اند. مطابق شکل ۲۲-الف نیروی افقی کل بر روی سطح مکش مقطع دو بعدی در موقعیت های مختلف مکانی از لحظه ورود تا لحظه خروج با و بدون در نظر گرفتن پارامتر کشش سطحی نشان داده شده است. افزایش نیرو در حالت تاثیر کشش سطحی در موقعیت‌های مختلف مشاهده می‌گردد که علت آن این است که به علت تاثیر کشش سطحی سیال در ناحیه نزدیکتری از سطح جسم قرار داشته و لذا نسبت به حالت بدون تاثیر کشش سطحی اندازه نیرویی افزایش می‌یابد. که این دلیل برای نیروی عمودی بر روی سطح مکش نیز صدق می‌کند.(شکل ۲۳-الف) مطابق شکل‌های ۲۲-ب و ۲۳-ب اندازه نیروهای افقی و عمودی بر روی سطح فشاری مقطع پره در حالات با و بدون تاثیر پارامتر کشش سطحی اختلاف چندانی با هم ندارند. زیرا بر روی سطح جلویی پره پدیده هوادهی رخ نداده و فقط به علت تاثیر پارامتر کشش سطحی تغییراتی جزیی وجود دارد.

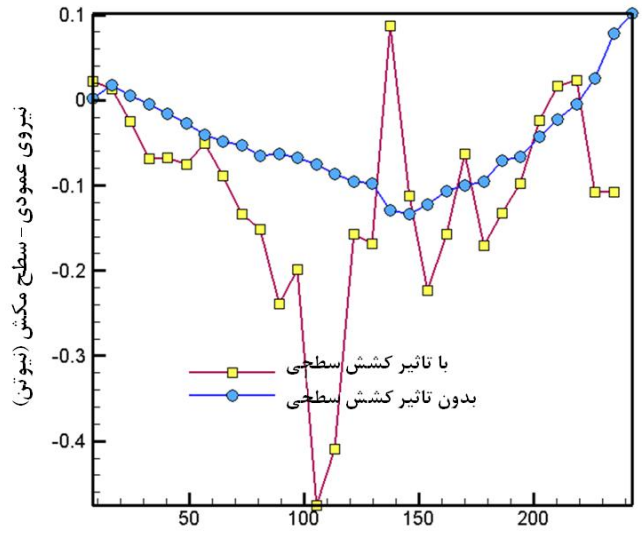
در شکل‌های ۲۲-ج و ۲۳-ج نیروهای افقی و عمودی بر روی لبه انتهایی مقطع دوبعدی پره نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد در حالت تاثیر کشش سطحی به علت اینکه سیال به سطح جسم چسبیده است، اندازه نیروهای افقی و عمودی در مقایسه با حالت بدون تاثیر پارامتر کشش سطحی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که کاهش میزان نیرو بر روی لبه انتهایی پره پارامتر مثبتی بوده و سبب افزایش راندمان پروانه می‌گردد. در شکل های ۲۲-د و ۲۳-د نمودارهای نیروی افقی و عمودی کل بر روی مقطع دوبعدی پره نشان داده شده است. مطابق شکل با در نظر گرفتن پارامتر کشش سطحی افزایش ۲۰ درصدی نیرو را در غالب نقاط مشاهده می‌کنیم که این میزان در نیروی عمودی بیشتر می‌باشد.



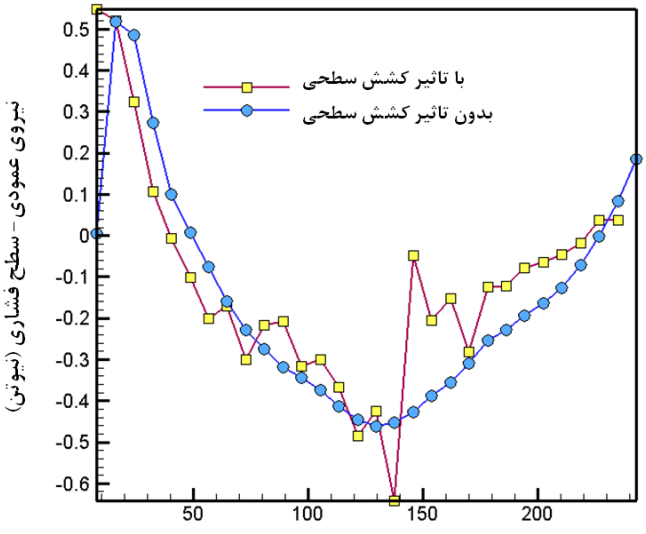
الف)سطح مکشی مقطع دوبعدی پره

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

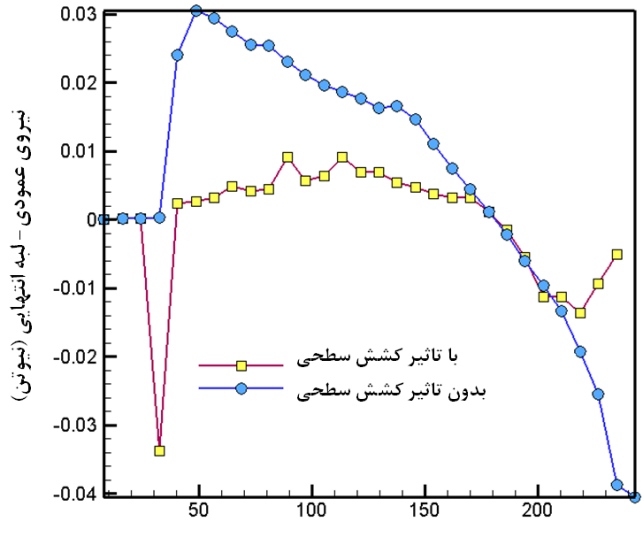
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.2.7]



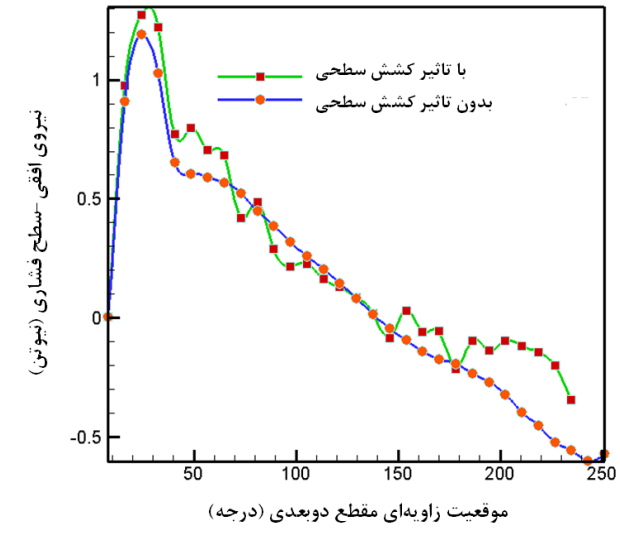
الف)سطح مکشی مقطع دوبعدی پره



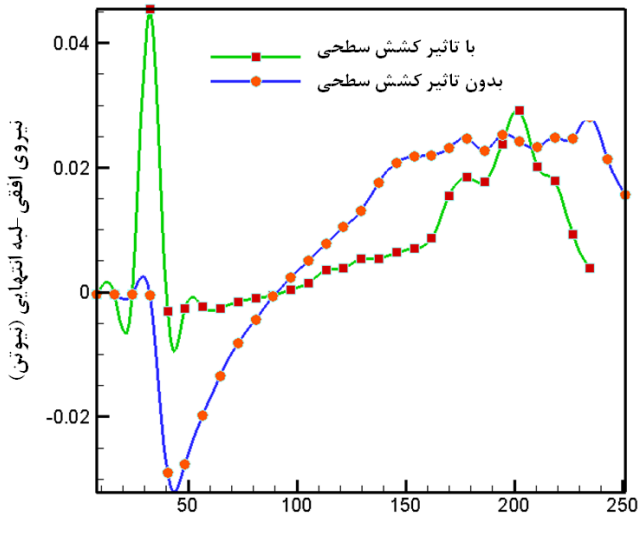
ب)سطح فشاری مقطع دوبعدی پره



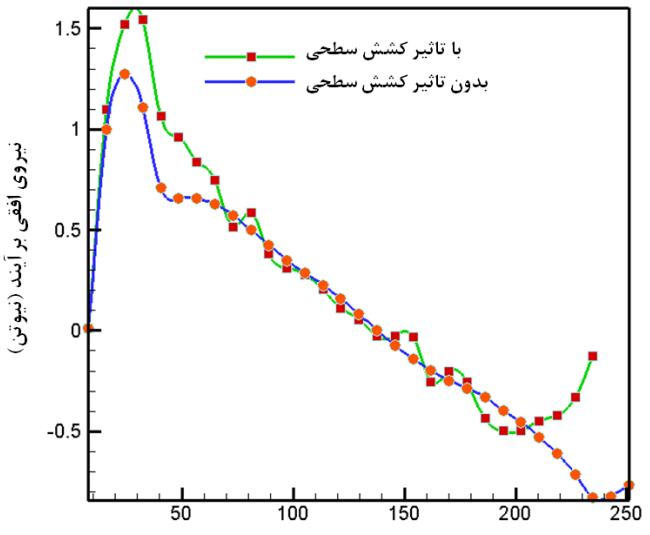
ج)لبه انتهایی مقطع دوبعدی پره



ب)سطح فشاری مقطع دوبعدی پره



ج)لبه انتهایی مقطع دوبعدی پره

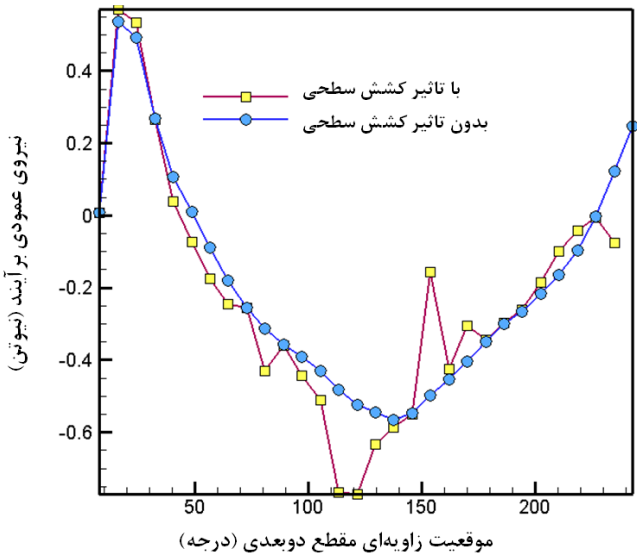


د)نیروی افقی برآیند کل مقطع دوبعدی پره

شکل۲۲- نمودار نیروی افقی بر حسب موقعیت مکانی در چرخش مقطع دوبعدی پره پروانه در Wn=16 با و بدون در نظر گرفتن پارامتر کشش سطحی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

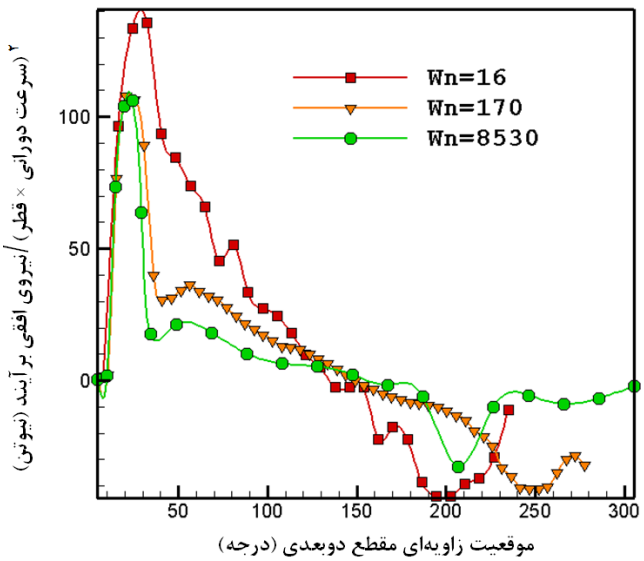
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.2.7]



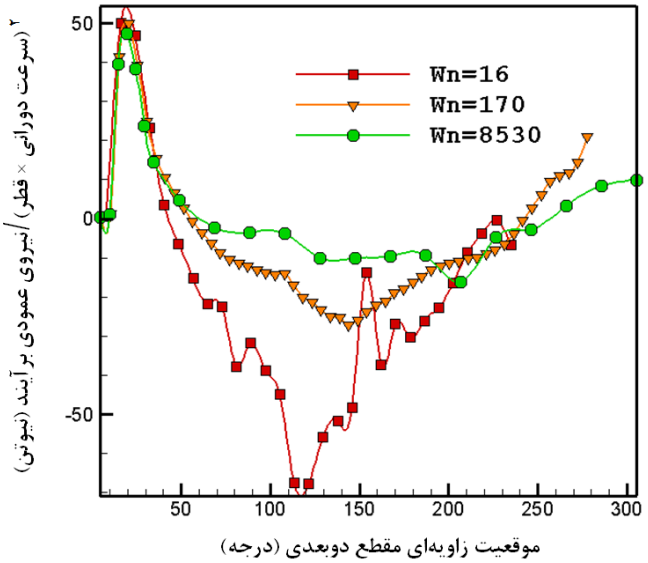
د)نیروی عمودی برآیند کل مقطع دوبعدی پره

شکل۲۳- نمودار نیروی عمودی بر حسب موقعیت مکانی در چرخش مقطع دوبعدی پره پروانه در Wn=16 با و بدون در نظر گرفتن پارامتر کشش سطحی

در شکل۲۴ نمودار نیروهای افقی و عمودی کل بی‌بعد شده با پارامتر $(nD)^2$ بر روی مقطع دوبعدی پره در اعداد وبر مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل با افزایش عدد وبر کاهش اندازه نیرو و همگرایی به یک مقدار مشخص مشاهده می‌گردد. به عبارت دیگر با افزایش عدد وبر عملاً پارامتر کشش سطحی بر روی نتایج بی‌تاثیر می‌باشد که این میزان از عدد وبر بحرانی به بعد اتفاق می افتد.



الف) نیروی افقی برآیند



ب) نیروی عمودی برآیند

شکل۲۴- نمودار نیروی عمودی و افقی کل بر حسب موقعیت مکانی در چرخش مقطع دوبعدی پره پروانه دراعداد وبر متفاوت

۸- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر تاثیر پارامتر کشش سطحی بر روی چرخش مقطع دوبعدی پره پروانه نیمه مغروق مورد آنالیز و بررسی قرار گرفته است. به منظور اعتبار سنجی داده‌های عددی از داده‌های تجربی موجود از هندسه جسم گوه‌ای شکل استفاده گردید که بر طبق نتایج بدست آمده انطباق بسیار خوبی بین داده‌های عددی و نتایج تجربی موجود وجود دارد. جهت بررسی تاثیر پارامتر کشش سطحی آنالیز جریان حول جسم در سه عدد وبر Wn=16,170,8530 انجام گردید که عدد وبر Wn=170 عدد وبر بحرانی بوده که پس از انجام چندین آنالیز جریان در اعداد وبر مختلف و سعی و خطا استخراج شده است. سپس نتایج در سه عدد وبر پایین، بحرانی و عدد وبر بالا مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در اعدا وبر کمتر از عدد وبر بحرانی شکل و ضخامت ناحیه هوادهی بشدت تحت تاثیر پارامتر کشش سطحی بوده و از حالت منحنی شکل فاصله گرفته و شبه خطی می‌شود. اما در اعداد بالاتر از عدد وبر بحرانی پارامتر کشش سطحی فقط بر روی ریزش قطرات سیال در ناحیه ورودی هنگام خروج مقطع پره از سطح آب تاثیر می‌گذارد. در مقایسه شکل ناحیه هوادهی بر حسب عدد وبر مشاهده می‌گردد که در اعداد وبر پایین ضخامت ناحیه هوادهی در منطقه ورودی جسم به آب کاهش یافته اما در سایر قسمت‌ها شکل ناحیه هوادهی تابع پارامتر کشش سطحی نمی باشد. مطابق داده های نیرویی بدست آمده مشاهده می‌گردد که در اعداد وبر پایین میزان نیروی کل افقی و عمودی بر روی مقطع دوبعدی جسم در حالت تاثیر کشش سطحی ۲۰ درصد بیشتر از حالت بدون تاثیر پارامتر کشش سطحی می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.2.7]

کلید واژگان

1. Leading Edge
2. Trailing Edge
3. Reynolds-averaged navier–stokes
4. Dynamic mesh
5. Volume of fluid
6. Dissipation rate
7. Upwind
8. Surface tension
9. Angular velocity
10. Kinematic capillary coefficient
11. Suction side
12. Pressure side
13. Trailing edge
14. Cavitation
15. Ventilation

منابع

1- Shiba, H. (1953), *Air-drawing of marine propellers*, Technical Report 9, Transportation Technical Research Institute.

2- Hadler, J. and Hecker, R. (1968), *Performance of partially submerged propellers,* in The 7th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, Italy.

3- Hecker, R. (1973*), Experimental performance of a partially submerged propeller in inclined flow*. Lake Buena Vista, FL. SNAME Spring Meeting.

4- Rains, D. A. (1981), *Semi-submerged propellers for monohull displacement ships*. In Propeller ’81 Symposium, pages pp. 15–40, Virginia Beach, VA. Society of Naval Architects and Marine Engineers.

5- Rose, J. C. and Kruppa, C. F. L. (1991), *Surface piercing propellers – methodical series model test results*. In FAST’91, Norway.

6- Kruppa, C. F. L. (1992), *Testing surface piercing propellers*. In Hydrodynamics: Computations, Model Tests, and Reality, pages pp. 107–113.

7- Rose, J. C., Kruppa, C. F. L., and Koushan, K. (1993), *Surface piercing propellers - propeller/hull interaction". In FAST’93, pages pp. 867–881, Japan.*

8- Wang, D. (1977), *Water entry and exit of a fully ventilated foil. Journal of Ship Research, 21:pp. 44–68.*

9- Oberembt, H. (1968), *Zur bestimmung der instation¨aren fl¨ugelkr¨afte bei einem propeller mit aus dem wasser herausschlagenden fl¨ugeln*. Technical report, Inst.f¨ur Schiffau der Universit¨at Hamburg, Bericht Nr. 247.

10- Furuya, O. (1985), *A performance prediction theory for partially submerged ventilated propellers*. Journal of Fluid Mechanics, 151:pp. 311–335.

11- Wang, D. (1979), Oblique *water entry and exit of a fully ventilated foil*. Journal of Ship Research, 23:pp. 43–54.

12- Mario Caponnetto. (2002), *RANSE Simulations of Surface Piercing Propellers*. Rolla Research.

13- Andrea Califano, Sverre Steen. (2009), Analysis *of different propeller ventilation mechanisms by means of RANS simulations*. First International Symposium on Marine Propulsors, smp’09, rondheim, Norway, June.

14- Anna M. Kozlowska, Katja Wöckner, Sverre Steen, Thomas Rung, Kourosh Koushan, Silas Spence.(2009), *Numerical and Experimental Study of Propeller Ventilation.* First International Symposium on Marine Propulsors, smp’09, rondheim, Norway, June.

15- Kourosh Koushan, Silas Spence, Luca Savio. (2011), *Ventilated Propeller Blade Loadings and Spindle Moment of a Thruster in Calm Water and Waves*. Second International Symposium on Marine Propulsors, smp’11, Hamburg, Germany, June.

16- M.Ferrando, M.Viviani, S.Crotti, P.cassella and Caldarella. (2006), *Influence of weber number on surface piercing propellers model test scaling*. Universita degli studi di Genova (DINAV), Genova, Italy, pp.667-676, 2006.

17- Kohei Himei (2013), *Numerical Analysis of Unsteady Open Water Characteristics of Surface Piercing Propeller*. Third International Symposium on Marine Propulsors smp’13, Launceston, Tasmania, Australia, 292-297.

18- D. C.Wilcox. (1998), *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries, Inc. La Canada, California.

19- Cox, B. D. (1971), *Hydrofoil theory for Vertical Water Entry*. PhD thesis, Department of Naval Architecture, Massachusetts Institute of Technology.

20- J. U. Brackbill, D. B. Kothe, and C. Zemach. (1992), *A Continuum Method for Modeling Surface Tension*. J.Comput. Phys. 100. 335–354.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.2.7]