نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۴۹، شماره ۱، سال ۱۳۹۶، صفحات ۵۱ تا ۶۶
DOI: 10.22060/mej.2016.662

آنالیز عددی پروانه نیمه مغروق در حالت آب آزاد با استفاده از توسعه روش المان مرزی بر پایه پتانسیل

احسان یاری، حسن قاسمی*

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده: با توجه به اینکه الگوریتم طراحی پروانه نیمه‌مغروق تحت تاثیر پارامترهای هندسی و فیزیکی زیادی است، بنابراین نیاز به ارائه روش مناسب و ابزار محاسباتی است که با در نظرگرفتن اثر تغییر کلیه پارامترها، به تحلیل جریان بر روی پروانه بپردازد. هدف اصلی از مطالعه حاضرتوسعه روش المان مرزی برپایه پتانسیل برای تحلیل پروانه نیمه‌مغروق در حالت ناپایا، تحت شرایط آب آزاد است. به کمک مفهوم مشتق مادی و با استفاده از شرط مرزی سینماتیکی، قابلیت بررسی رشد، توسعه و تغییرات ضخامت ناحیه هوادهی-کاویتاسیونی در هر دو راستای کورد و شعاعی پره به‌صورت ناپایا در محدوده گسترده‌ای از ضرایب پیشروی سرعت ایجاد شده است. بر اساس نتایج استخراج‌شده، در ضرایب پیشروی سرعت بالا انطباق بسیار خوبی بین مقادیر به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی در مقایسه با داده‌های تجربی و مشاهدات هوادهی وجود دارد. با کاهش ضریب پیشروی سرعت از میزان این انطباق کاسته می‌شود. در ضرایب پیشروی پایین ($J<$۰/۴) به علت ریزش شدید گردابه‌ای(طبق نتایج تجربی) نوسان لبه فرار سطح هوادهی بر روی سطح دنباله پروانه تاثیرگذار بوده و سبب ایجاد ناپایداری می‌شود. اما در ضرایب پیشروی بالا ($J>$۰/۴) انطباق ضرایب هیدرودینامیکی نیرو- ممان و بازدهی پروانه در مقایسه با نتایج تجربی مطلوب بوده و در محدوده دقت مناسبی می‌باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴ مرداد ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۵ آبان ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۵ آذر ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۷ بهمن ۱۳۹۴

کلمات کلیدی:
پروانه نیمه مغروق
روش المان مرزی
شکل هوادهی

۱- مقدمه

سیستم رانش پروانه‌ای نیمه‌مغروق جزو سیستم‌های رانش جدید دریایی است که به علت کاربرد زیاد درشناورهای سبک و تندرو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شناورهای مجهز به پروانه نیمه‌مغروق قابلیت حرکت در آب‌های کم‌عمق، عمیق وحتی آب‌های گل آلود را دارند. دانش طراحی و تحلیل پروانه نیمه‌مغروق به علت مواجه شدن با پارامترهای هندسی و هیدرودینامیکی مختلف مانند پروفیل سطح مقطع پره، پدیده کاویتاسیون-هوادهی، اثر سطح آزاد و جریان چندفازی بسیار پیچیده و سخت است. لبه انتهایی مقطع پره (فنجانی)، تاثیر بسزایی در رفتار جریان پروانه نیمه‌مغروق را داراست. در شکل ۱ هندسه یک نمونه پروانه نیمه‌مغروق در یک آبخور مشخص نشان داده شده است.

هندسه پروانه نیمه‌مغروق، از نظر ظاهری متفاوت با هندسه پروانه‌های متداول است. مقطع پره اغلب به گونه‌ای طراحی می‌شود که دارای لبه ابتدایی[1] نوک تیز و لبه انتهایی یا لبه فرار[2] ضخیم و پله‌دار است. لبه تیز ابتدایی با زاویه ورودی کم طراحی شده و توپی پروانه و ریشه پره در مقابل بارهای زیاد خارج از مرکز و تناوبی وارده، مقاوم شده‌اند. در گذشته به علت عدم پیشرفت قدرت پردازش سیستم‌های نرم‌افزاری بیشتر مطالعات صورت‌گرفته بر روی پروانه‌های نیمه‌مغروق بر پایه آزمون تجربی استوار

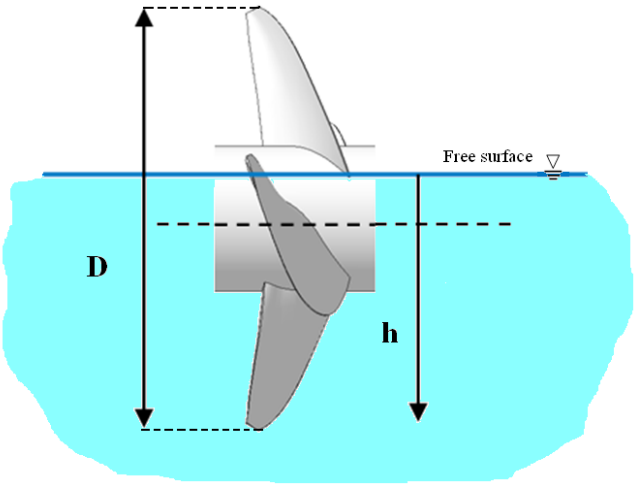


Fig. 1. Surface piercing propeller

شکل ۱: نمای چپ استخر

بوده است که به عنوان نمونه می‌توان به تحقیقات شیبا[3] [۱]، هادلر و هکر[4] [۲]، هکر [۳]، راینز[5] [۴]، رز و کروپا[6] [۵]، کروپا [۶]، رز و همکاران [۷] و وانگ[7] [۸] اشاره نمود. تمرکز کلیه این تحقیقات بر روی تعیین متوسط پیش‌برنده، گشتاور، ممان‌های خمشی و نیروهای جانبی بوده است. اولین

1 Leading edge
2 Trailing edge

3 Shiba
4 Hadler and Hecker
5 Rains
6 Rose and Kruppa
7 Wang

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: gasemi@aut.ac.ir

فعالیت‌های مربوط به مدلسازی عددی پروانه‌های نیمه‌مغروق توسط اوبرمت[1] با استفاده از روش عددی تئوری خطوط بالابر و بدون در نظر گرفتن پارامترهای هوادهی و تغییرات دنباله انجام شده است [۹]. فورویا[2] به مدلسازی پروانه نیمه‌مغروق با استفاده از روش عددی تئوری خطوط بالابر با در نظر گرفتن اثر پارامتر هوادهی پرداخته است. در این تحقیق محل شروع ناحیه هوادهی از لبه ابتدایی پره و به‌صورت کامل لحاظ شده و برای مدلسازی سطح آزاد از روش تصویرکردن استفاده شده است [۱۰]. در ادامه وانگ با در نظر گرفتن تئوری ورود دوبعدی به آب و ترکیب با روش عددی تئوری خطوط بالابر به محاسبه پیش‌برنده و گشتاور پروانه پرداخت [۱۱]. کاپننتو[3] برای اولین بار تحلیل یک نمونه پروانه نیمه‌مغروق چهارپره‌ای را با استفاده از روش RANS انجام داده است و در یک دور عملکرد پروانه پارامترهای نیرویی به‌دست‌آمده را با داده‌های موجود از المان مرزی و آزمون مقایسه کرده است [۱۲]. درسال‌های اخیر فعالیت‌های متمرکز و هدفمندی بر روی مطالعه پارامتر هوادهی و اثر آن بر روی پروانه‌های نزدیک سطح در دانشگاه NTNU نروژ انجام شده است که می‌توان به شبیه‌سازی مکانیزم هوادهی در پروانه‌های دریایی در حالت کاملاً مغروق به روش RANS توسط کالیفانو و استین[4] اشاره نمود [۱۳]. در ادامه کوزلوسکا[5] و همکاران به مطالعه تجربی پدیده هوادهی بر روی یک نمونه پروانه استاندارد چهارپره‌ای پرداختند و در پایان نتایج حاصل از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی مطابق با شرایط آزمون شبیه‌سازی‌شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. کلیه حالات مورد بررسی مربوط به پروانه‌های کاملاً مغروق است [۱۴]. همچنین کوشن[6] و همکاران به بررسی آزمون پدیده هوادهی یک نمونه پروانه تکی در آب راکد به همراه موج پرداخته و هدف اولیه از انجام تحقیق مقایسه داده‌های تجربی و نتایج دینامیک سیالات محاسباتی عنوان شده است. در این آزمایش پارامترهای مختلفی مانند میزان غوطه‌وری، وجود و نبود موج و غیره در دو حالت پروانه با و بدون اثر هوادهی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵]. از جمله فعالیت‌های تجربی منحصربفردی که در زمینه آزمون پروانه‌های نیمه‌مغروق انجام شده است، بررسی تاثیر عدد وبر بر روی پروانه‌های نیمه‌مغروق توسط فراندو و ویویانی[7] می‌باشد. بر اساس این تحقیق در اعداد وبر بالاتر از عدد وبر بحرانی تاثیر پارامتر کشش سطحی بر عملکرد پروانه‌های نیمه‌مغروق قابل‌صرف‌نظرکردن می‌باشد [۱۶]. اخیراً هیمی[8] آنالیز عددی پروانه نیمه‌مغروق در حالت ناپایا و تحت شرایط آب آزاد را با استفاده از روش RANS انجام داده است. داده‌های به‌دست‌آمده با نتایج آزمون تجربی مقایسه و اعتبارسنجی شده است. بر اساس نتیجه‌گیری انجام‌شده داده‌های محلی انطباق خوبی با داده‌های تجربی ندارند [۱۷].

با توجه به اینکه مولفه‌های هندسی و پارامترهای جریانی زیادی در تعیین عملکرد پروانه نیمه‌مغروق دخیل می‌باشند، بنابراین استفاده از روش‌های مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی مانند حجم محدود، تفاضل محدود و غیره نیازمند صرف زمان و هزینه زیادی است که در عمل مقرون به صرفه نیست. از سوی دیگر برخی محدودیت‌هایی که در نرم‌افزارهای تجاری وجود دارد مانند بررسی تاثیر پدیده‌های کاویتاسیون، هوادهی و کشش سطحی به‌طور همزمان امکان‌پذیر نیست. علاوه بر این برای تحلیل پروانه نیمه‌مغروق با دور و سرعت ورودی مشخص، با توجه به سرعت دورانی بالای پروانه نیاز به گام زمانی بسیار کوچک بوده و نتایج باید پس از چند دور چرخش پروانه استخراج شود. بنابراین در بررسی عملکرد پروانه در چندین قطر، نسبت سطح گسترش‌یافته، مقطع پره، نسبت هاب، توزیع زاویه ریک، توزیع زاویه اسکیو، سرعت زاویه‌ای، سرعت ورودی، نسبت غوطه‌وری و غیره عملاً استفاده از روش‌هایی مانند دینامیک سیالات محاسباتی مقرون به صرفه نبوده و بنابراین روش‌هایی مانند المان مرزی پیشنهاد می‌گردد. با توجه به اینکه سرعت دورانی پروانه نیمه‌مغروق معمولاً بالا می‌باشد، بنابراین عدد رینولدز مربوطه بسیار زیاد و رفتار جریان سیال به جریان ایده‌آل (جریان پتانسیل) نزدیک می‌گردد. در ادامه این بخش تاریخچه کاربرد و توسعه روش المان مرزی برای تحلیل پروانه‌های دریایی با در نظر گرفتن پدیده‌های هوادهی و کاویتاسیون ارائه شده است.

کاربرد روش المان مرزی بر پایه سرعت اولین بار توسط هولمن[9] برای تحلیل جریان کاویتاسیونی بر روی هیدروفیل دوبعدی انجام شده است که در آن سطح هوادهی طی یک فرآیند حل تکراری تا ارضای کامل شرایط مرزی دینامیکی و سینماتیکی با فرض مجهول‌بودن عدد کاویتاسیون ادامه یافته است [۱۸]. مدتی بعد روش المان مرزی دوبعدی بر پایه پتانسیل توسط کیناس[10]–فاین[11] [۱۹] و لی[12] [۲۰] انجام گرفت. همزمان پلون[13] و روو[14] [۲۱] جریان سوپر کاویتاسیون روی هیدروفویل سه‌بعدی را با استفاده از روش المان مرزی بر پایه سرعت محاسبه کردند و پلون و پلت[15] [۲۲] روشی مشابه را برای کاویتاسیون جزیی[16] توسعه دادند. اولین کاربرد روش المان مرزی برای تحلیل جریان خیس[17] حول پروانه توسط هس[18] و والارزو[19] [۲۳] با استفاده از روش المان مرزی بر پایه سرعت و همچنین توسط لی با استفاده از روش المان مرزی بر پایه پتانسیل انجام شده است. بررسی‌های پیشرفته‌ای

1 Oberembt
2 Furuya
3 Caponnetto
4 Califano and Steen
5 Kozlowska
6 Koushan
7 Ferrando and viviani
8 Himei

9 Uhlman
10 Kinnas
11 Fine
12 Lee
13 Pellone
14 Rowe
15 Pellat
16 Partial Cavitation
17 Wet Flow
18 Hess
19 Valarezo

در دهه۹۰ میلادی برای کاربرد روش المان مرزی برای جریان روی پروانه توسط دانشگاه ام–آی–تی[1] انجام شده که از آن جمله می‌توان به بررسی جریان خیس بر روی پروانه در حالت پایا توسط لی، بررسی جریان خیس بر روی پروانه در حالت ناپایا توسط هسین[2] [۲۴] و بررسی جریان کاویتاسیونی ناپایا بر روی پروانه توسط فاین [۲۵] اشاره نمود. همچنین کارهای مشابهی در این راستا توسط کیم[3] [۲۶] و لی [۲۷] صورت گرفته است. کار جدید فاین سپس توسط کیناس و فاین پیگیری شد [۲۸] و یک سری توسعه‌ها و تکمیل نرم‌افزاری و سخت‌افزاری مربوط به کاربرد المان مرزی برای جریان کاویتاسیونی–هوادهی روی پروانه‌ها انجام شد که از آن جمله می‌توان به تحلیل پروانه‌های نیمه‌مغروق توسط یانگ[4] و همکاران [۲۹] اشاره نمود.

درتحقیق حاضر هدف توسعه روش المان مرزی بر پایه پتانسیل برای تحلیل پروانه نیمه‌مغروق با در نظرگرفتن اثر جریان عرضی می‌باشد. تحلیل جریان عرضی و مدلسازی و استخراج تابع تغییرات ضخامت ناحیه هوادهی به‌صورت دوبعدی از جمله نوآوری‌های انجام‌شده در مطالعه حاضر است. به عبارت دیگر در تحقیقات انجام‌گرفته بر روی پروانه‌های معمولی (کاملاً مغروق) و پروانه نیمه‌مغروق با استفاده از روش المان مرزی به منظور استخراج ناحیه کاویتاسیونی – هوادهی، تغییرات ضخامت ناحیه هوادهی–کاویتاسیونی فقط در راستای طول کورد در نظر گرفته شده است. در حالیکه در این مقاله تغییرات ضخامت در راستای طول کورد و راستای شعاعی پره در نظر گرفته شده است. علاوه بر این دنباله تشکیل شده از گردابه‌های لبه انتهایی پره (ویک پروانه) به صورت گذرا در نظر گرفته شده است. مدلسازی دنباله به صورت ناپایا تاثیر بسزایی بر روی نتایج عملکردی پروانه نیمه‌مغروق دارد. حال آنکه در فعالیت‌های عددی انجام‌شده با استفاده از روش‌های عددی تئوری خطوط بالابر، سطوح بالابر و روش پنل دنباله به‌صورت کامل در نظر گرفته شده است. برای اعتبارسنجی نتایج عددی، مدلسازی هندسی و تحلیل المان مرزی پروانه اولفسون[5] [۳۰] انجام شده و با نتایج تجربی مربوطه مقایسه شده است.

۲- هوادهی در پروانه

در پروانه‌های کاملاً مغروق اگر فشار استاتیکی در نقطه‌ای درون میدان جریان از فشار بخار سیال در دمای مورد نظر کمتر شود، حباب‌های بخار در داخل جریان سیال تشکیل می‌گردد که به این پدیده کاویتاسیون گفته می‌شود. حباب‌های تشکیل شده پس از رسیدن به نواحی پر فشار یا در نزدیکی دیواره‌های جامد متلاشی می‌شوند. در پروانه‌های نیمه‌مغروق به دلیل امکان دستیابی به اتمسفر در نواحی کم‌فشار علاوه بر پدیده کاویتاسیون، پدیده هوادهی نیز رخ می‌دهد. پدیده هوادهی بسیار مشابه پدیده کاویتاسیون است.

1 MIT
2 Hsin
3 Kim
4 Young
5 Olofsson

در واقع پدیده هوادهی زمانی اتفاق می‌افتد که سطح هوا یا گازهای خروجی روی سطح پره گسترده شده و امتداد یابند. باید توجه نمود که فشار روی سطح هوادهی‌شده ثابت است اما با فشار بخار متفاوت است. بنابراین سطح هوادهی‌شده می‌تواند همانند سطح یک حباب، اما با فشاری متفاوت با فشار بخار، در نظر گرفته شود. با توجه به شرایط عملکردی پروانه نیمه‌مغروق، سه نوع رژیم جریانی برای جریان آب ورودی به پره‌ی پروانه نیمه‌مغروق وجود دارد که نوع رژیم بستگی به مقدار ضریب پیشروی (J) دارد. این ضریب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J = \frac{V_0}{nD} \qquad (۱)$$

که V_0 سرعت جریان ورودی به پروانه، n سرعت زاویه‌ای پروانه و D قطر پروانه می‌باشد.

زیادبودن ضریب پیشروی به معنی عملکرد در نیروی کم و سرعت زیاد است، در حالی که کم‌بودن ضریب پیشروی به معنی عملکرد در نیروی زیاد و سرعت پایین است. در ضرایب پیشروی بالا، جریان آب در سطح جلو و پشت پره بدون اینکه از سطح پره جدا شوند، روی سطح آن جریان می‌یابند. همان‌طور که در شکل ۲–الف مشاهده می‌شود این رژیم جریانی هوادهی پایه[6] نامیده می‌شود. اگر مقطع صفحه نازک‌تر باشد، قبل از لبه‌ی انتهایی، درمحل بیشترین ضخامت در طول خط کورد هوادهی آغاز می‌شود. در ضرایب پیشروی کم، حباب بخار در لبه‌ی جلوی پره قبل از رسیدن به انتهای طول خط کورد تشکیل می‌شود که این حالت را کاویتاسیون جزیی گویند. در این رژیم بازدهی پروانه کاهش می‌یابد که به علت تشکیل حباب و ترکیدن آن و ایجاد ناپایداری روی سطح پروانه است. زمانی که ضرایب پیشروی باز هم کاهش می‌یابند، حباب ایجادشده در لبه‌ی جلویی پره، روی تمامی‌سطح پشتی پره گسترش می‌یابد و در نهایت با رسیدن به سطح آزاد، به اتمسفر ختم می‌شود. این رژیم، رژیم کاملا هوادهی‌شده[7] نامیده می‌شود. (شکل ۲–ب)

در ادامه در شکل ۳–الف موقعیت سطح آزاد و موقعیت پروانه در یک دور چرخش نشان داده شده است. شکل ۳–ب میزان بار روی یک پره پروانه را در یک دور چرخش پره، از لحظه ورود به آب تا لحظه خروج از سطح آزاد نشان می‌دهد. مطابق شکل بیشترین میزان پیش‌برنده تولیدی مربوط به موقعیت پره در ناحیه کاملاً هوادهی‌شده می‌باشد. به علت برخورد پره با سطح آب در لحظه ورود و همچنین خروج از سطح آزاد در لحظه خروج مقداری آب به داخل هوا پرتاب و اسپری می‌شود که سبب کاهش راندمان پروانه نیمه‌مغروق می‌گردد. با طراحی بهینه شکل فنجانی انتهایی مقطع پره پروانه، تلفات ناشی از اسپری آب به هوا کاهش یافته و بنابراین راندمان و میزان پیش‌برنده تولیدی افزایش می‌یابد. در سطح مشترک ناحیه کاملاً هوادهی و ناحیه ورودی پره، ناحیه گذرا قرار می‌گیرد که مطابق شکل

6 Base Ventilation
7 Fully Ventilated

میزان پیش‌برنده بالایی را تولید می‌کند. به علت وجود ناپایداری جریان در ناحیه گذرا مدلسازی عددی آن مشکل بوده و تحت تاثیر پارامترهای جریانی مختلفی است.

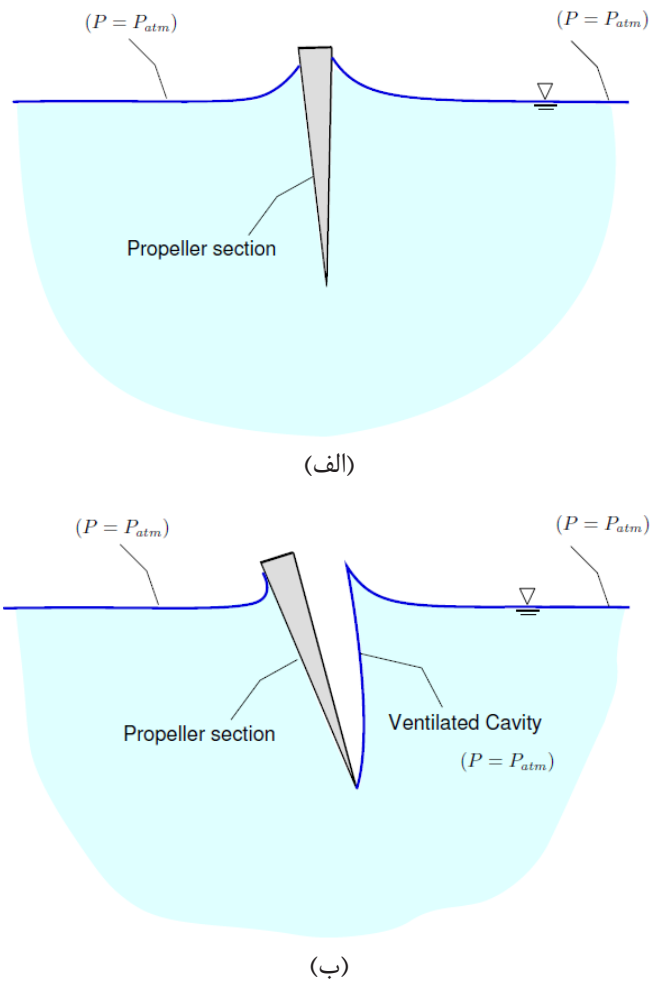
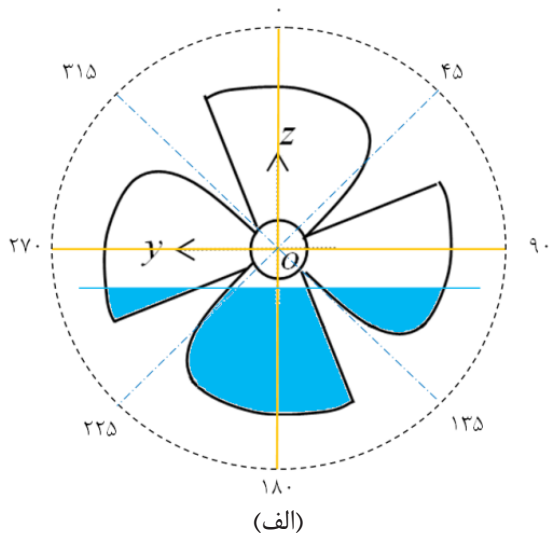


Fig. 2. a) Base ventilation b) Fully ventilated

شکل ۲: الف) رژیم هوادهی پایه ب) رژیم کاملا هوادهی‌شده



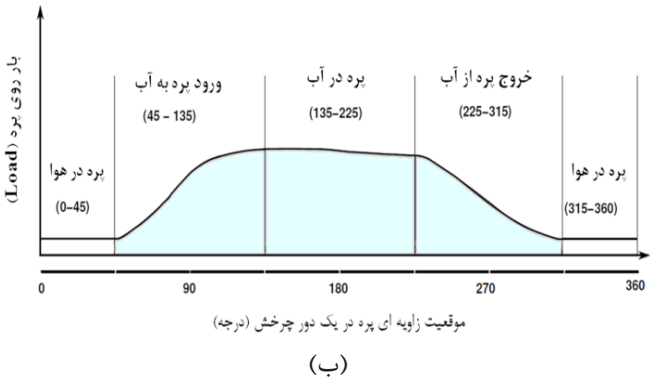


Fig. 3. a) Free surface level and surface piercing propeller b) Loading on the propeller blades in a revolution

شکل ۳: الف) موقعیت سطح آزاد و پروانه نیمه مغروق، ب) بار روی پره پروانه در یک دور چرخش [۳۰]

منحنی عملکرد پروانه نیمه‌مغروق بر حسب ضریب پیشروی از لحاظ پدیده هوادهی به سه ناحیه مجزا تقسیم می‌گردد. مطابق شکل ۴ رفتار ضرایب هیدرودینامیکی پروانه نیمه مغروق در ناحیه هوادهی جزیی مشابه پروانه‌های معمولی[1] می‌باشد، اما در ناحیه گذرا و کاملاً هوادهی‌شده رفتار کاملاً غیر خطی دارند که مستلزم تحلیل دقیق پروانه تحت شرایط مرزی مربوطه می باشد.

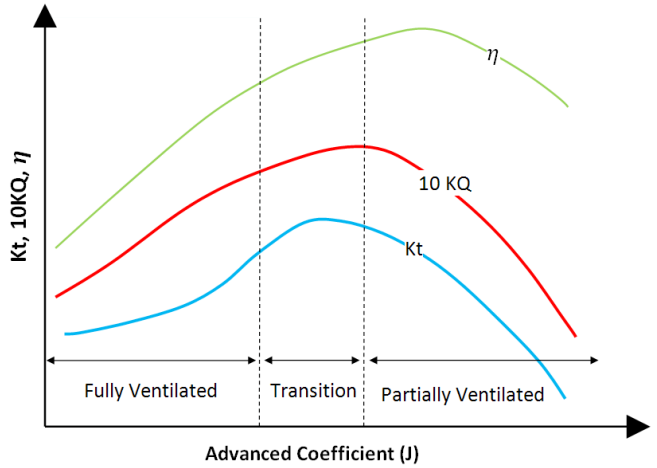


Fig. 4. Schematic of surface piercing propeller performance coefficients versus advance ratio

شکل ٤: شماتیک ضرایب عملکردی پروانه نیمه مغروق بر حسب ضریب پیشروی [۳۰]

۳- شرح مسئله

روش المان مرزی بر پایه پتانسیل قادر به تحلیل جریان بر روی اجسام با سطح بالابر[2] و یا غیر بالابر با جریان ورودی یکنواخت یا غیر یکنواخت در حالت پایا و ناپایا است. این اجسام می‌توانند حرکاتی به‌صورت جابجایی انتقالی یا دورانی داشته باشند و به عنوان مثال پروانه، هیدروفویل، توپی یا

1 Conventional propellers
2 Lifting surface

هاب[1]، سکان، نگهدارنده‌ها[2] و غیره باشند. مطابق شکل ۵، Ω به عنوان میدان جریان خارجی حول جسم و $S=\partial\Omega$ به عنوان مرز جسم در نظر گرفته شده است. یک دستگاه مختصات کلی، دستگاه مختصات کارتزین اینرسی، ثابت در فضا تعریف و با $X=(X,Y,Z)$ نشان داده شده است. دستگاه مختصات محلی متصل به جسم، در حالت کارتزین به‌صورت $x=(x,y,z)$ و در حالت استوانه‌ای به‌صورت (x,r,θ) مطابق با دستگاه مختصات نیرویی استاندارد $ITTC$ (کنفرانس بین المللی حوضچه کشش)تعریف‌شده است. در دستگاه مختصات محلی x محور مثبت به‌سمت قسمت پایین‌دست پروانه، y محور مثبت به‌سمت پورت[3] و z محور عمود بر صفحه شامل x و y است. دردستگاه مختصات استوانه‌ای محلی $r=\sqrt{y^2+z^2}$ و $\theta=\tan^{-1}(\frac{-y}{z})$ می‌باشند که می‌توانند به‌همراه جسم جابجا شده یا بچرخند. معادلات با توجه به دستگاه مختصات متصل به جسم به‌دست آمده است. برای پروانه دستگاه مختصات راستگرد و برای چرخش در برای عقربه‌های ساعت فرض شده است. سرعت زاویه‌ای پروانه ثابت بوده و با $\vec{\omega}$ نشان داده شده است. در حالت کلی برای تحلیل جریان حول جسم، مرز جسم به سه ناحیه سطح خیس جسم S_B، سطح هوادهی S_v و سطح دنباله[4] S_w تقسیم می‌شود.

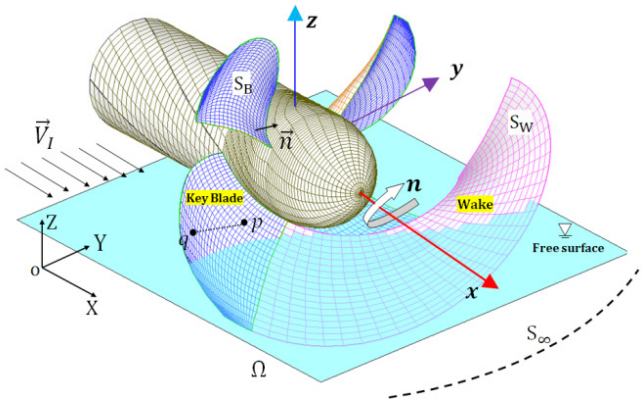


Fig. 5. Schematic of 3D coordinate around surface piercing propeller and for rotation

شکل ۵: شماتیک دستگاه مختصات سه‌بعدی کلی حول پروانه نیمه‌مغروق و برای چرخش

٤- معادلات حاکم بر جریان حل

با فرض اینکه جریان در میدان حل خارجی حول جسم و سطح هوادهی به اندازه کافی و موثر غیر لزج[5]، تراکم‌ناپذیر و غیر چرخشی[6] باشد، در این حالت سرعت اغتشاشی[7] در کلیه میدان حل به استثنای سطوح ناپیوسته میدان سرعت (که تشکیل دنباله سطح بالابر از جسم را می‌دهند) غیر چرخشی می‌باشد. به عبارت دیگر برای استفاده از معادله لاپلاس برای مدل کردن جریان سیال حول پروانه باید جریان در کلیه نقاط میدان به‌جز یک سری نقاط ناپیوستگی (که دنباله پروانه جایگزین آنها می‌شود) غیرچرخشی باشد. در حالت جریان ورودی غیریکنواخت مانند حالت لزج یا جریان دنباله پشت شناور فرض بر این است‌که قسمت چرخشی سرعت اغتشاشی بهمراه ورتیسیته اغتشاشی[8] مربوط به سیال در میدان سرعت V_w (که در متون هیدرودینامیک شناور به عنوان دنباله موثر[9] کشتی شناخته شده است) در نظر گرفته شده است. بنابراین با در نظر گرفتن این حالت هر سه فرض بالا برقرار شده و می‌توان از معادله لاپلاس استفاده نمود. با در نظر گرفتن فرض غیرچرخشی‌بودن سیال می‌توان گفت سرعت اغتشاشی برابر با گرادیان پتانسیل اغتشاشی است. برای جریان سیال تراکم‌ناپذیر، معادله پیوستگی $\Delta.V(x,t)=0$ به‌صورت معادله لاپلاس خواهد بود:

$$\nabla^2\varphi(x,t)=0 \qquad (۲)$$

سرعت کل در هر نقطه از میدان سیال، Ω، برابر با جمع سرعت اغتشاشی و سرعت غیر اغتشاشی می باشد.

$$\boldsymbol{V}(x,t)=\boldsymbol{V}_0(x,t)+\nabla\varphi(x,t) \qquad (۳)$$

برای جریان سیال تراکم ناپذیر، غیر لزج و غیر چرخشی معادلات ممنتوم ناویر- استوکس به‌صورت معادله برنولی خلاصه می‌شوند. در دستگاه مختصات متصل به جسم معادله برنولی به‌صورت زیر استخراج می‌گردد:

$$\frac{\partial\phi}{\partial t}+\frac{p}{\rho}+\frac{|\boldsymbol{V}|^2}{2}+gz=\frac{p_{ref}}{\rho}+\frac{|\boldsymbol{V}_0|^2}{2} \qquad (۴)$$

در معادله (۴) p فشار، ρ چگالی سیال و p_{ref} فشار مرجع سیال است. برای پروانه فشار مرجع فشار ناحیه بسیار دور از بالادست[10] پروانه در راستای شفت پروانه می‌باشد و با استفاده از قانون هیدرواستاتیک $p_{ref}=p_{atm}+\rho g z_{atm}$ به‌دست می‌آید (P_{atm} فشار اتمسفر در ارتفاع z می‌باشد). در ادامه پارامتر مهم و بی‌بعد ضریب فشار[11] به‌صورت زیر تعریف می شود:

$$C_p=\frac{p-p_{ref}}{0.5\rho V_{ref}^2} \qquad (۵)$$

در رابطه(۵) V_{ref} سرعت مرجع بوده و معمولاً برابر با $|V_0|$ سرعت جریان ورودی می‌باشد. برای پروانه سرعت مرجع معمولاً میزان سرعت ورودی یا مقدار nD در نظر گرفته می‌شود. معادله دینامیکی (۴) را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{2}{V_{ref}^2}\frac{\partial\phi}{\partial t}+\frac{|\boldsymbol{V}|^2-|\boldsymbol{V}_0|^2}{V_{ref}^2}+\frac{2gz}{V_{ref}^2}=-C_p \qquad (۶)$$

1 Hub
2 Struts
3 Port
4 Wake surface
5 Inviscid
6 rrotational
7 Perturbation velocity
8 Perturbation vorticity
9 Effective Wake
10 Upstream
11 Pressure Coefficient

۵- شرایط مرزی

برای حل معادله لاپلاس، طبق معادله (۲)، درجریان خارجی حول پروانه باید شرایط مرزی برای هر یک از المان های سطحی تعریف شوند. بر حسب نوع شرایط مرزی، المان‌های سطحی[1] به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: الف)سطح جسم (S_B) که سطح خیس جسم بدون هوادهی می‌باشد، ب) سطح هوادهی (S_V) که سطحی از جسم است که هوادهی رخ داده باشد، ج) سطح دنباله (S_W) که دنباله لایه‌ای پشت اجسام بالابر می باشد و در انتها سطح در بینهایت (S_∞) که معرف سطح بینهایت می‌باشد.

۵- ۱- سطح جسم

در بخش سطح خیس جسم برای ارضا شدن شرط مرزی (صفر بودن مولفه سرعت عمود بر المان) می‌توان از شرط مرزی نیومن استفاده نمود. در نواحی خیس مقدار پتانسیل کل، جمع پتانسیل اغتشاشی و پتانسیل ناشی از جریان ورودی برابر صفر بوده و بنابراین شرط نیومن به‌صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \boldsymbol{n}} = -\boldsymbol{V}_0 . \boldsymbol{n} \qquad (۷)$$

n بردار عمود هر المان به سمت بیرون می باشد.

۵- ۲- سطح هوادهی

سطح هوادهی ، S_V، در حالت کلی عبارت است از:

$$S_3 = \eta(S_1, S_2, t) \qquad (۸)$$

که در آن η ضخامت هوادهی دردستگاه مختصات غیر متعامد محلی و S_3 نشان‌دهنده سطح هوادهی می‌باشد. سطح هوادهی مجهول بوده و اصلاح آن با توجه به معادله (۹) برای عمود بر سطح المان انجام می‌پذیرد. برای تعیین سطح هوادهی مجهول باید بررسی دو شرط مرزی سینماتیکی و دینامیکی انجام شود. با فرض اینکه تابع $F(S_1,S_2,S_3,t)=S_3-\eta(S_1,S_2,t)$ معادله سطح هوادهی باشد، شرط مرزی سینماتیکی مطابق معادله (۹) استخراج می‌گردد:

$$\frac{D}{Dt}[F(S_1,S_2,S_3,t)] = (\frac{\partial}{\partial t} + V.\nabla)[S_3 - \eta(S_1,S_2,t)] = 0 \qquad (۹)$$

شرط مرزی دینامیکی یکسان بودن فشار روی سطح هوادهی با فشار اتمسفر را بیان می‌کند:

$$P = P_{atm} \qquad (۱۰)$$

۵- ۳- سطح دنباله

سطح دنباله یک لایه گردابه با ضخامت صفر، چسبیده به جسم و دربرگیرنده تمامی گردابه‌های جاری‌شده توسط جسم می‌باشد. سطح بالایی و سطح پایینی دنباله بترتیب با علامت + و – مشخص شده‌اند. سطح دنباله باید شرایط مرزی سینماتیکی و دینامیکی را ارضا کند. برای ارضای شرط مرزی سینماتیکی دنباله گردابه S_W باید به‌صورت یک سطح از بخار سیال باشد. اگر V_n نشان‌دهنده سرعت سطح دنباله در برای عمود باشد، شرط مرزی سینماتیکی برای جریان پایا و ناپایا عبارت است از:

$$\boldsymbol{V}^+ . \boldsymbol{n} = \boldsymbol{V}^- . \boldsymbol{n} = \boldsymbol{V}_m . \boldsymbol{n} = \mathrm{V}_n \qquad (۱۱)$$

$V_m = \frac{1}{2}(V^+ + V^-)$ سرعت متوسط سیال است. بر اساس شرط مرزی دینامیکی اختلاف فشار در دو طرف سطح دنباله S_W برابر صفر است.

۵- ۴- سطح در بینهایت

در سطح مرز در بینهایت، S_∞، آشفتگی ناشی از سطوح جسم و هوادهی باید به سمت صفر میل کنند.

$$\boldsymbol{V}^+ . \boldsymbol{n} = \boldsymbol{V}^- . \boldsymbol{n} = \boldsymbol{V}_m . \boldsymbol{n} = V_n \qquad (۱۲)$$

۵- ۵- شرط مرزی سطح آزاد

برای اعمال اثر سطح آزاد از روش تصویرسازی[2] استفاده شده است. تصویر مقطع پره پروانه و سطح هوادهی با استفاده از توزیع چاه و دوقطبی ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

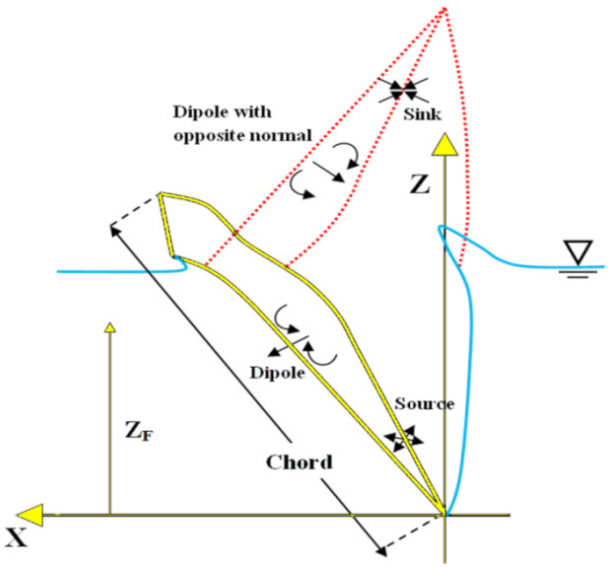


Fig. 6. Potential distribution on two-dimensional cross-section of blade, ventilation surface and their images.

شکل ٦: توزیع پتانسیل اغتشاشی بر روی مقطع دوبعدی پره، سطح هوادهی و تصویر آنها

شرایط مرزی سینماتیکی و دینامیکی بر روی سطح آزاد مطابق ذیل بیان می‌گردند:

1 Surface Element

2 Image method

$$\phi_x \varsigma_x + \phi_y \varsigma_y - \phi_z = 0 \quad at \quad z = \varsigma$$

$$g\varsigma + \frac{1}{2}(\nabla\phi \cdot \nabla\phi - V^2) = 0 \quad at \quad z = \varsigma \tag{۱۳}$$

$$\nabla\phi \cdot \nabla\left[\frac{1}{2}(\nabla\phi \cdot \nabla\phi)\right] + g\phi_z = 0 \quad at \quad z = \varsigma \tag{۱۴}$$

با قرار دادن معادله (۱۴) در (۱۳) و بسط سری تیلور حول ϕ رابطه مرتبه اول سطح آزاد بصورت زیر استخراج می‌شود:

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}(x,y,z,t) + g\frac{\partial\phi}{\partial y}(x,y,z,t) = 0 \quad at \quad z = 0 \tag{۱۵}$$

در تحقیق حاضر فرض بر این است که عدد فرود اکیداً صعودی است. این فرض صحیح می‌باشد، زیرا محدوده عملکرد پروانه‌های نیمه‌مغروق در سرعت‌های خیلی بالا می‌باشد. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات تجربی شیبا [۱] نشان می‌دهد که تاثیر عدد فرود برای اعداد فرود بزرگتر از ۲ قابل‌صرف‌نظر است. با در نظر گرفتن اینکه با افزایش سرعت، عدد فرود به سمت بی‌نهایت میل می‌کند آنگاه شرط مرزی سطح آزاد به‌صورت ذیل خلاصه می‌شود:

$$\phi(x,y,z,t) = 0 \quad at \quad z = z_{Freesurface} \tag{۱۶}$$

۶- هوادهی - کاویتاسیون

کاهش فشار استاتیکی روی سطح پره تا میزان فشار بخار در دمای ثابت، سبب گسیختگی مولکول‌های سیال و وقوع پدیده کاویتاسیون می‌گردد. در صورتی که پروانه نزدیک سطح آزاد بوده و یا مانند پروانه نیمه‌مغروق سطح آزاد را قطع کند، در این صورت قابلیت جایگزینی پدیده کاویتاسیون با پدیده هوادهی وجود دارد. در پروانه‌های نیمه‌مغروق در ضرایب پیشروی پایین (ناحیه کاملاً هوادهی)، بر روی سطح پشتی پره به صورت کامل پدیده هوادهی رخ می‌دهد و در عمل پدیده کاویتاسیون به طور کامل حذف می‌گردد. اما در ضرایب پیشروی بالا (ناحیه هوادهی جزیی) هوادهی فقط بر روی بخشی از سطح پره تشکیل می‌شود و بنابراین بر روی سطح خیس پره (در صورت کاهش فشار تا سطح فشار بخار در دمای عملکردی) امکان وقوع پدیده کاویتاسیون وجود دارد که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌است. علاوه بر این در ناحیه ورودی پره پروانه نیمه‌مغروق به آب نیز امکان وقوع پدیده کاویتاسیون جزیی وجود دارد اما با توجه به نتایج تجربی موجود بسیار گذرا می‌باشد.

در ادامه این بخش شرایط مرزی دینامیکی و سینماتیکی برای تحلیل جریان هوادهی-کاویتاسیون بر روی سطح پروانه نیمه‌مغروق مورد بررسی قرار گرفته است.

۶- ۱- شرط مرزی سینماتیکی

در هوادهی-کاویتاسیون شرط مرزی سینماتیکی با استفاده از مفهوم مشتق مادی[1] در دستگاه مختصات غیر محلی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$A\frac{\partial\phi}{\partial S_1} + B\frac{\partial\phi}{\partial S_2} = C(V_{S_3} - \frac{\partial\eta}{\partial t}) \quad on\ S_V\ or\ S_C \tag{۱۷}$$

معادله (۱۷) یک معادله دیفرانسیل جزیی خطی برای η می‌باشد. حاصل این معادله مقادیر مربوط به ضخامت (ارتفاع) هوادهی (η) یا ضخامت کاویتاسیون می‌باشد.

۶- ۲- شرط مرزی دینامیکی

شرط مرزی دینامیکی با توجه به معادلات (۶) و (۱۰) به‌صورت معادله (۱۸) بیان می شود:

$$|V|^2 = V_{ref}^2\sigma + |V_0|^2 - 2gz - 2\frac{\partial\phi}{\partial t} \quad on\ S_V\ or\ S_C \tag{۱۸}$$

این معادله در دستگاه مختصات غیر متعامد به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$[\frac{1}{|\boldsymbol{t}_1 \times \boldsymbol{t}_2|}(V_{S_1} - (\boldsymbol{t}_1 . \boldsymbol{t}_2)V_{S_2})]^2 + V_{S_2}^2 + V_{S_3}^2 = V_{ref}^2\sigma + |\boldsymbol{V}_0|^2 - 2gz - 2\frac{\partial\varphi}{\partial t} \tag{۱۹}$$

شرط مرزی دینامیکی روی ϕ (بدلیل وجود جمله‌های مرتبه دوم در مشتقات سه بعدی پتانسیل اغتشاشی) خطی نیست. شرط مرزی دینامیکی را می‌توان به شرط مرزی دیریکله روی ϕ تغییر داد. بنابراین برای محاسبه V_{S_1} از رابطه زیر به‌دست می آید:

$$V_{S_1} = V_{S_2}\cos\theta + \sin\theta \left(\sqrt{V_{ref}^2\sigma + |\boldsymbol{V}_0|^2 - 2gz - 2\frac{\partial\varphi}{\partial t} - V_{S_2}^2 - V_{S_3}^2}\right) \tag{۲۰}$$

با انتگرال‌گیری در راستای S_1 از نقطه جدایش جریان، $S_{10}=S_0$ و با توجه به مقدار پتانسیل ϕ_0 رابطه زیر ϕ برای به‌دست می‌آید:

$$\phi = \phi_0 + \int_{S_{10}}^{S_1}[V_{S_2}\cos\theta + \sin\theta\sqrt{V_{ref}^2\sigma + |V_0|^2 - 2gz - 2\frac{\partial\varphi}{\partial t} - V_{S_2}^2 - V_{S_3}^2} - V_0 . t_1]ds_1 \quad on\ S_V\ or\ S_C \tag{۲۱}$$

1 Material Derivative

۶- ۳- معادلات انتگرالی

پتانسیل سرعت ϕ در هر نقطه x در دامنه سیال Ω با استفاده از انتگرال کلاسیک نشان داده‌شده در زیر بر اساس معادله مشخصه سوم گرین[1] به‌دست می‌آید که با استفاده از رابطه پتانسیل مربوط به مورینو[2] [۳۱] می‌تواند به‌صورت زیر نوشته شود:

$$2\pi\varphi(x,t)=\int_{S_B+S_C+S_Y}\left[\varphi_q\frac{\partial G(p;q)}{\partial n_q}-G(p;q)\frac{\partial\varphi_q(t)}{\partial n_q}\right]ds+\int_{S_W}\left[\Delta\varphi(t)\frac{\partial G(p;q)}{\partial n_q}\right]ds \quad (۲۲)$$

در رابطه فوق p نقطه میدانی، q نقطه تکین، n_q بردار نرمال و $G(p;q)$ تابع گرین بوده و به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$G(p;q)=\frac{1}{r(p;q)}+\frac{1}{r'(p;q)}$$

$$r(p;q)=\sqrt{(x-\varsigma)^2+(y-\eta)^2+(z-\xi)^2} \quad (۲۳)$$

$$r'(p;q)=\sqrt{(x-\varsigma)^2+(y-\eta)^2+(z+\xi)^2}$$

۶- ۴- گسسته‌سازی معادلات

در حالت کلی تعداد کل المان‌ها (هوادهی، کاویتاسیون و سطح خیس پره) باتعداد المان‌های جسم برابر است. فرم گسسته‌شده معادله انتگرالی (۲۲) برای حل جریان تحت هوادهی-کاویتاسیون بر روی سطح پروانه نیمه‌مغروق مطابق ذیل می‌باشد:

$$\sum_{K=1}^{Z}\left[\sum_{j=1}^{N_j}\left[\begin{array}{l}\sum_{i=1}^{i_d-1}D_{nij}(t)\phi_{ij}(t)+\sum_{i=i_d}^{i_r}D_{nij}(t)\phi_{ij}(t)\\+\sum_{i=i_r+1}^{i_w-1}D_{nij}(t)\phi_{ij}(t)+\sum_{i=i_w}^{N_i}D_{nij}(t)\varphi_{ij}(t)\\-\sum_{i=1}^{i_d-1}D'_{nij}(t)\phi_{ij}(t)-\sum_{i=i_d}^{i_r}D'_{nij}(t)\phi_{ij}(t)\\-\sum_{i=i_r+1}^{i_w-1}D'_{nij}(t)\phi_{ij}(t)-\sum_{i=i_w}^{N_i}D'_{nij}(t)\varphi_{ij}(t)\end{array}\right]+\sum_{i=1}^{N_{wj}}(W_{nj}(t)\Delta t_j(t))-\sum_{i=1}^{N_{wj}}(W'_{nj}(t)\Delta t_j(t))\right]=$$

$$\sum_{K=1}^{Z}\left[\sum_{j=1}^{N_j}\left[\begin{array}{l}\sum_{i=1}^{i_d-1}S_{nij}(t)(\frac{\partial\varphi}{\partial n})_{ij}(t)+\sum_{i=i_d}^{i_r}S_{nij}(t)(\frac{\partial\varphi}{\partial n})_{ij}\\+\sum_{i=i_r+1}^{i_w-1}S_{nij}(t)(\frac{\partial\varphi}{\partial n})_{ij}(t)+\sum_{i=i_w}^{N_i}S_{nij}(t)(\frac{\partial\varphi}{\partial n})_{ij}\\-\sum_{i=1}^{i_d-1}S'_{nij}(t)(\frac{\partial\varphi}{\partial n})_{ij}(t)-\sum_{i=i_d}^{i_r}S'_{nij}(t)(\frac{\partial\varphi}{\partial n})_{ij}\\-\sum_{i=i_r+1}^{i_w-1}S'_{nij}(t)(\frac{\partial\varphi}{\partial n})_{ij}(t)-\sum_{i=i_w}^{N_i}S'_{nij}(t)(\frac{\partial\varphi}{\partial n})_{ij}\end{array}\right]\right] \quad (۲۴)$$

$$n=1,\ldots,N_{total}$$

z تعداد سطح‌های مورد تحلیل، N_i تعداد تقسیمات در راستای طول کورد پره، N_j تعداد تقسیمات در راستای شعاعی پره، i_d اندیس مربوط به شماره المانی در راستای طول کورد که در آن المان کاویتاسیون شروع شده است، i_r اندیس مربوط به شماره المانی در راستای طول کورد که در آن المان سطح کاواک بسته می‌شود، i_w اندیس مربوط به شماره المانی در راستای طول کورد که در آن المان هوادهی (جدایش[3] جریان ناشی از هوادهی) رخ داده است، D ماتریس مربوط به دوقطبی[4]ها و S ماتریس مربوط به چشمه[5]ها می‌باشد. با توجه به فرم گسسته شده معادله (۲۴)، دستگاه جبری معادلات خطی تشکیل شده و به‌کمک روش حل تکراری گوس[6] ماتریس مقادیر مجهول استخراج شده است.

۶- ۵- ضریب اصطکاک لزج

در این مطالعه ضریب اصطکاک پوسته‌ای برای هر مقطع از پروانه در راستای شعاعی استخراج شده است. معمولاً مهمترین پارامترهایی که بر روی C_f تاثیر می‌گذارند، ضخامت بیشینه پروفیل مقطع و عدد بی‌بعد رینولدز محلی می‌باشند که همانگونه که مشاهده می‌گردد در روابط تجربی گنجانده شده است.

$$\theta=Arc\tan(\frac{V_A}{2\pi nC_{Profile}}) \text{ ، } \varphi=\frac{1}{2}(\Psi+\theta) \quad (۲۵)$$

$$V=V_A Sin(\varphi)+2\pi nC_{profile}Cos(\varphi) \text{ ،}$$

$$\mathrm{Re}=\frac{C_{profile}V}{\upsilon} \quad (۲۶)$$

$$C_f=(1+\frac{t_{\max}}{C_{profile}})\frac{0.075}{[\log_{10}(\mathrm{Re})-2]^2}(1-0.869\log_{10}(\mathrm{Re}))(P/D-0.1) \quad (۲۷)$$

1 Green third identity
2 Morino

3 Detachment Point
4 Doublet
5 Source
6 Iterative Gauss Solution Method

در روابط فوق Ψ زاویه شفت پروانه نسبت به سطح آزاد و θ زاویه گام هیدرودینامیکی است. همچنین $C_{profile}$ اندازه کورد پره در هر مقطع شعاعی و t_{max} بیشینه ضخامت مقطع پره در راستای طول کورد، در هر مقطع شعاعی می‌باشد.

با توجه به اینکه سرعت دورانی و خطی در پروانه نیمه‌مغروق بسیار بالاست، بنابراین عدد رینولدز در عمل بسیار بزرگ بوده و میزان تاثیر مولفه لزج بر روی نتایج انتگرالی بسیار کم است. از طرفی با استفاده از رابطه تجربی (۲۷)، محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی برای پروانه نیمه‌مغروق انجام شده و این میزان خطا نیز کاهش می‌یابد.

در شکل ۷ فلوچارت تحلیل پروانه نیمه‌مغروق نشان داده شده است. مطابق الگوریتم حل، موارد نوآوری در مقاله حاضر با رنگ قرمز مشخص شده است.

۷- اعتبارسنجی نتایج عددی و داده‌های تجربی

در این بخش نتایج تحلیل عددی جریان خیس و هوادهی‌شده حول پروانه مدل اولفسون [۳۰] و اعتبارسنجی نتایج عددی با داده‌ها و مشاهدات تجربی ارائه شده است. ابتدا برای بررسی شرط استقلال شبکه، تغییرات تعداد المان‌ها در دو راستای طول کورد و راستای شعاعی مورد بررسی قرار گرفته است. حداقل تعداد المان‌های مورد نیاز در راستای طول کورد و راستای شعاعی باید بگونه‌ای باشند که نتایج با تغییر تعداد المان‌ها دچار تغییرات نشوند. بررسی استقلال شبکه در تحلیل پروانه در حالت خیس و هوادهی بسیار موثر است. در ادامه استخراج نتایج مربوط به تحلیل جریان هوادهی‌شده بر روی پروانه مدل اولفسون انجام شده است. داده‌های عددی پروانه تحت شرایط هوادهی به‌دست‌آمده و با داده‌های تجربی مورد بررسی و اعتبارسنجی قرار گرفته است. از جمله عوامل بسیار مهم در مدل کردن پروانه، داشتن اطلاعات هندسی کافی از پروانه موردنظر می‌باشد. در جدول ۱ مشخصات هندسی مربوط به پروانه مدل اولفسون 841-B گفته شده است.

جدول ۱: اطلاعات هندسی پروانه 841-B

Table 1. Geometric dimensions of 841-B propeller.

مشخصه	نماد	مقدار
قطر (میلی‌متر)	D	۲۵۰
قطر هاب (میلی‌متر)	d	۸۵
گام در شعاع ۰/۷ (میلی‌متر)	P	۳۱۰
نسبت هاب به قطر	d/D	۰/۳۴
نسبت گام به قطر در شعاع ۰/۷	P/D	۱/۲۴
نسبت سطح گسترش یافته	A_E/A_0	۰/۵۸
تعداد پره‌ها	Z	۴
جهت چرخش		راستگرد

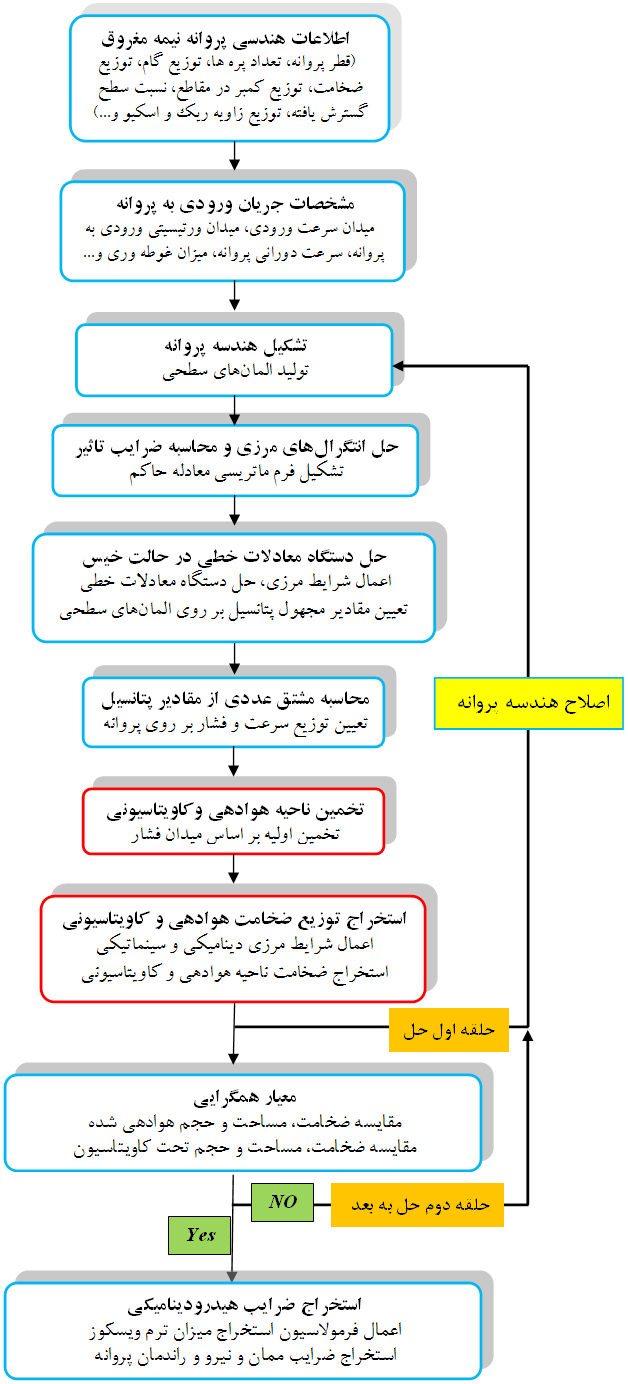


Fig. 7. The flowchart of ventilation-cavitation flow around surface piercing propeller

شکل ۷: فلوچارت حل جریان هوادهی - کاویتاسیون حول پروانه نیمه‌مغروق

نحوه تولید شبکه و دنباله، پارامترهای موثری بر نتایج حاصل از تحلیل پروانه می‌باشند. با توجه به اینکه گرادیان فشار در لبه‌های مرزی پره یعنی لبه ورودی پره به آب، لبه انتهایی پره و مقاطع ریشه[1] و نوک[2] پره بسیار شدید می‌باشند، بنابراین برای بهتر مدل کردن جریان حول پروانه با استفاده

1 Root
2 Tip

از المان های چهارضلعی سعی شده است در راستای طول کورد و راستای شعاعی از شبکه مناسب استفاده شود. شکل ۸ هندسه واقعی پروانه مدل اولفسون 841-B و هندسه سه‌بعدی مدل‌شده برای تحلیل در کد المان مرزی را نشان می‌دهد.

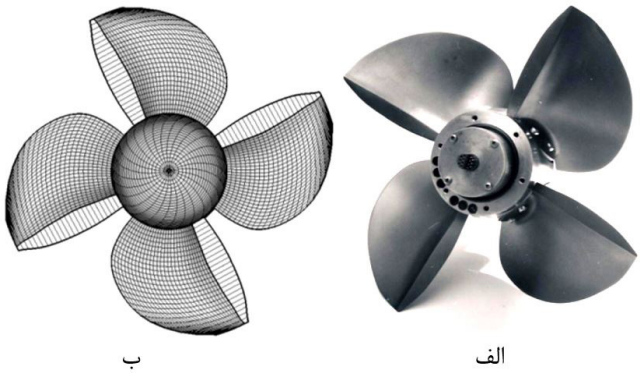


Fig. 8. a) Real geometry of surface piercing propeller
b) Model geometry of surface piercing propeller

شکل ۸: الف)هندسه واقعی و ب)هندسه مدل شده، پروانه نیمه مغروق [۳۰]

۷- ۱- بررسی شرط استقلال از شبکه

برای تحلیل جریان حول پروانه ابتدا نیاز به تولید شبکه مناسب است. زیرا نوع شبکه به‌کاربرده شده، نوع المان‌ها و تعداد المان‌ها تاثیر بسزایی در درستی جواب‌ها دارند. پس از تولید هندسه یکی از مهمترین موارد، بررسی شرط استقلال[1] شبکه می‌باشد. شرط استقلال شبکه یعنی دستیابی به شبکه‌ای مناسب که با ریزشدن شبکه و افزایش تعداد المان‌ها، نتایج دچار تغییرات محسوسی نشوند. در تحقیق حاضر تغییر تعداد المان‌ها در راستای کورد و راستای شعاعی پروانه برای دستیابی به تعداد المان‌های مناسب صورت گرفته است. ابتدا در شکل ۹ با تغییر اندازه المان‌ها بر روی پره اصلی همگرایی ضریب پیش‌برنده (نتایج انتگرالی) در یک دور چرخش پره با افزایش تعداد المان مشاهده می‌گردد. سپس با توجه به اینکه تحلیل پروانه نیمه‌مغروق در حالت ناپایا است، بنابراین مطابق شکل ۱۰ تغییرات ضریب پیش‌برنده پره اصلی در تحلیل عددی با گام‌های زمانی (زاویه‌ای) مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد المان‌های شبکه نتایج به مقدار معینی همگرا شده و عملاً از ۹۵۴ المان به بعد تغییر محسوسی در مقادیرضریب پیش‌برنده دیده نمی‌شود.

برای بررسی دقیق‌تر شرط استقلال از شبکه نتایج عددی به‌دست‌آمده، نمودار ضریب فشار(نتایج محلی) بر روی مقاطع شعاعی مختلف پره (r/R) با افزایش تعداد المان‌ها استخراج و در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این نتایج مربوط به ضریب پیشروی J=۰/۴ و در موقعیت زاویه‌ای ۹۰ درجه می‌باشد. در این حالت سطح پشتی پره کاملاً تحت هوادهی بوده و توزیع ضریب فشار بر روی سطح آن صفر است، بنابراین از ارائه آن صرف‌نظر شده و فقط ضریب فشار بر روی سطح جلویی پره در مقاطع مختلف و تعداد المان‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است.

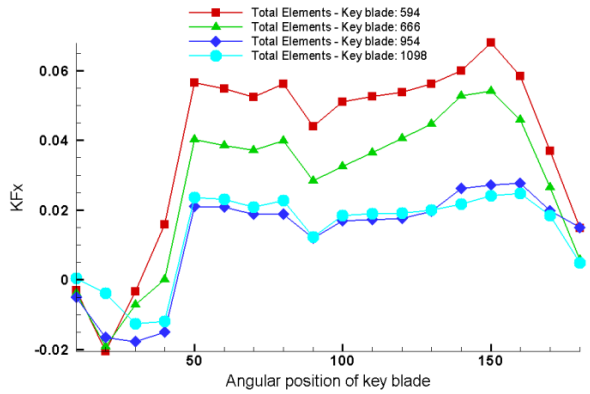


Fig. 9. Thrust coefficient variation of key blade in one revolution (from water entry until exit) versus advance ratio in different elements.

شکل ۹: تغییرات ضریب پیش‌برنده پره اصلی در یک دور چرخش (از ورود به آب تا خروج) بر حسب ضریب پیشروی در تعداد مختلف المان‌ها

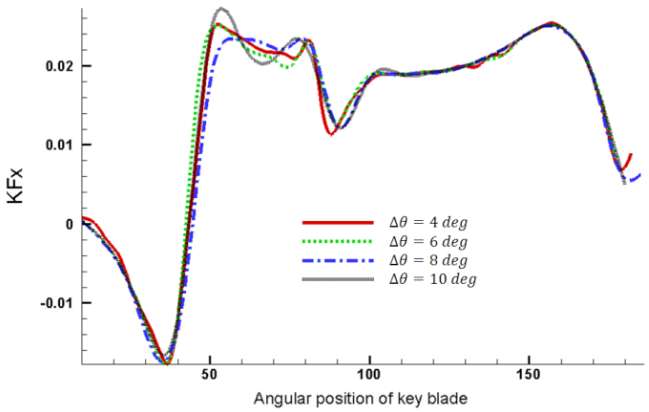
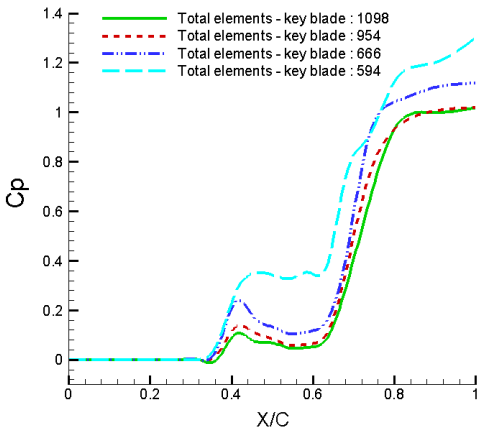


Fig. 10. Thrust coefficient variation of key blade in one revolution (from water entry until exit) versus advance ratio in different time steps.

شکل ۱۰: تغییرات ضریب پیش‌برنده پره اصلی در یک دور چرخش (از ورود به آب تا خروج) بر حسب ضریب پیشروی درگام‌های زمانی مختلف



r/R=۰/۳

1 Mesh Independency

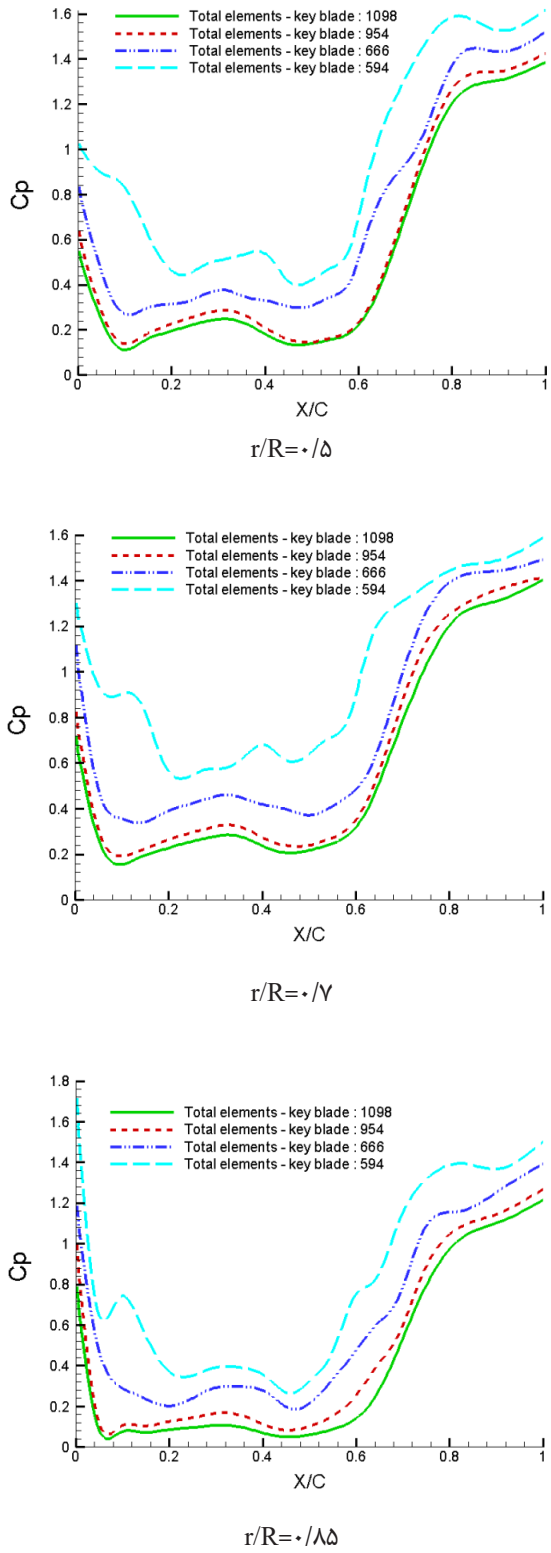


Fig. 11. Pressure coefficient variation in chordwise direction around radial cross section of key blade at *j*=0.4 and angular position *θ*=90 from water entry.

شکل ۱۱: تغییرات ضریب فشار در راستای طول کورد در مقاطع شعاعی مختلف پره اصلی در ضریب پیشروی *J*=۰/۴ و موقعیت زاویه‌ای ۹۰ درجه نسبت به لحظه ورود به آب

۷- ۲- نتایج تحلیل بر روی پروانه اولفسون مدل 841-B

در شکل ۱۲ ضریب پیش‌برنده، ضریب گشتاور[1] و راندمان هیدرودینامیکی حاصل از تحلیل عددی پروانه نیمه‌مغروق 841-B در مقایسه با داده‌های تجربی مورد بررسی و اعتبارسنجی قرار گرفته‌اند. مطابق شکل‌های ۱۲-الف، ۱۲-ب و ۱۲-ج در ضرایب پیشروی[2] بالا تطابق خوبی بین نتایج عددی به‌دست‌آمده با داده‌های تجربی وجود دارد. البته علاوه بر پارامتر کاویتاسیون درضرایب پیشروی پایین تاثیر پارامتر لزجت افزایش می‌یابد، که طبق داده های تجربی شیبا [۱] میزان این تاثیر بین ۱ الی ۳ درصد در پروانه های نیمه‌مغروق بوده و برای جلوگیری از این میزان خطا جمله‌های لزج اصلاحی به معادله اضافه شده‌اند که تا حدودی زیادی خطا را بهبود بخشیده است.

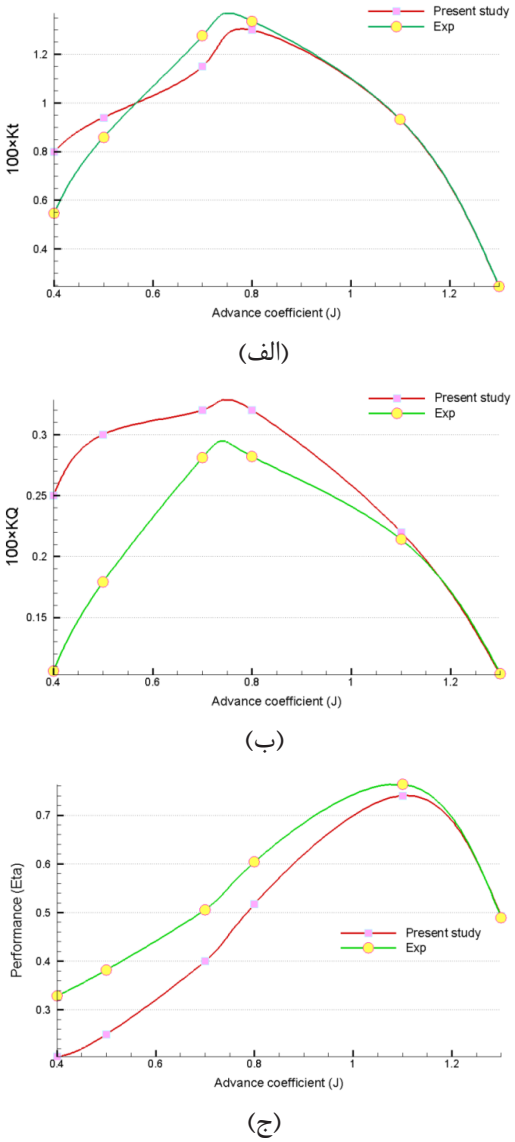


Fig. 12. a) Thrust coefficient b) Torque coefficient and c) performance versus advance ratio compare with experimental data of 841-B propeller.

شکل ۱۲: الف)ضریب پیش‌برنده، ب)ضریب گشتاور و ج)راندمان بر حسب ضریب پیشروی در مقایسه با داده های تجربی پروانه مدل 841-B

1 Torque Coefficient(KQ)
2 Advanced Coefficient (J=V/nD)

در شکل ۱۳ درصد خطای مربوط به ضرایب پیش‌برنده، گشتاور و راندمان بدست آمده از تحقیق حاضر و نتایج تجربی مربوط به پروانه مدل 841-B مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود درصد خطاها در ضرایب پیش‌برنده و گشتاور در محدوده وسیعی از ضریب پیشروی کمتر از ۱۰درصد بوده و با افزایش ضریب پیشروی میزان خطا به‌شدت کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش ضریب پیشروی میزان تاثیرپذیری شکل دنباله پشت پروانه از پارامترهای جریانی مانند گام هیدرودینامیکی کاهش یافته و پایداری در حل افزایش می‌یابد. اما در ضرایب پیشروی کم ریزش گردابه‌ها در نواحی نزدیک به پره سبب افزایش ناپایداری و افزایش خطا می‌گردد.

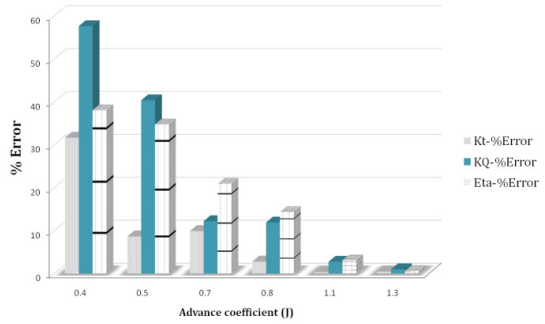


Fig. 13. Error percentage of thrust coefficient, torque coefficient and performance versus advance ratio.

شکل ۱۳: درصد خطا ضریب تراست، ضریب گشتاور و راندمان بر حسب ضریب پیشروی.

در شکل‌های ۱۴ الی ۱۶ تغییرات ضرایب مولفه‌های نیرو/ممان در ضرایب پیشروی مختلف در مقایسه با نتایج تجربی در یک دور چرخش پره اصلی پروانه نیمه‌مغروق نشان داده شده است. در تحلیل هیدرودینامیکی جریان سیال حول یک پروانه، مولفه عمود بر سطح از جریان ورودی، برای هر المان، به عنوان شرط مرزی ورودی تعریف می‌شود. خروجی‌ها، سرعت‌های القایی هستند که البته بر مبنای شرط سرعت صفر در راستای عمود بر سطح، فقط نیاز به محاسبه مولفه مماسی سرعت‌های القایی است. همانگونه که مشاهده می‌شود در لحظه ورود پره به آب به علت اثر ضربه و کوبش پره به آب میزان جهشی در ضریب پیش‌برنده مشاهده می‌گردد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده با افزایش ضریب پیشروی انطباق بیشتری قابل‌مشاهده می‌باشد.

در شکل ۱۷ کانتور ناحیه هوادهی بر روی سطح پره اصلی پروانه در ضریب پیشروی J=۱/۲ در سه موقعیت زاویه‌ای مختلف در مقایسه با مشاهدات تجربی نشان داده شده است. مطابق شکل انطباق خوبی بین نتایج محلی فرم هوادهی با مشاهدات تجربی در ضریب پیشروی بالا(J=۱/۲) مشاهده می‌گردد.

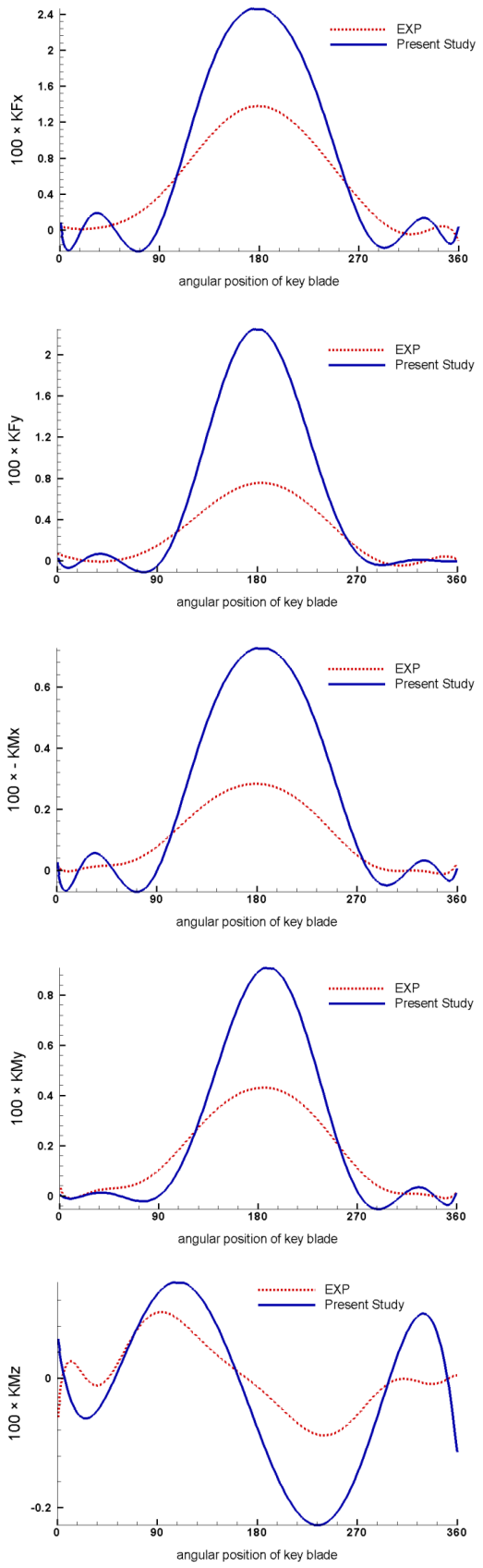


Fig. 14. Variation of force-moments components coefficients of key blade at J=0.4 in a revolution.

شکل ۱۴: تغییرات ضرایب مولفه‌های نیرو-ممان پره اصلی پروانه نیمه مغروق در یک دور چرخش در ضریب پیشروی J=۰/۴

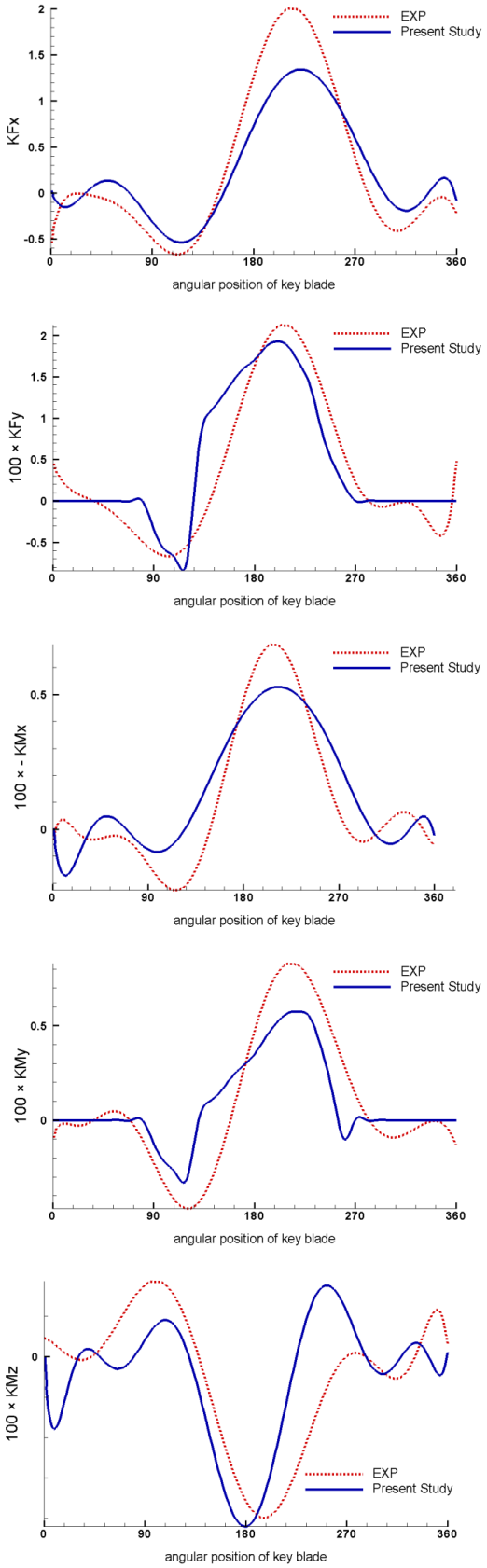


Fig. 16. Variation of force-moments components coefficients of key blade at *J*=1.3 in a revolution.

شکل ۱۶: تغییرات ضرایب مولفه‌های نیرو-ممان پره اصلی پروانه نیمه مغروق در یک دور چرخش در ضریب پیشروی *J*=۱/۳

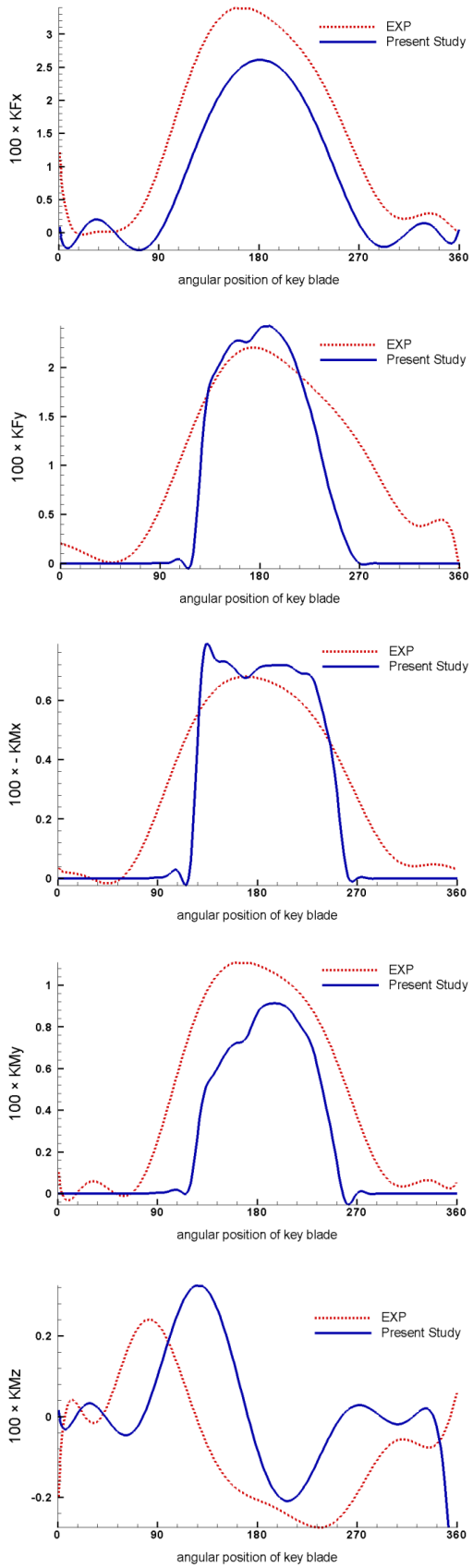
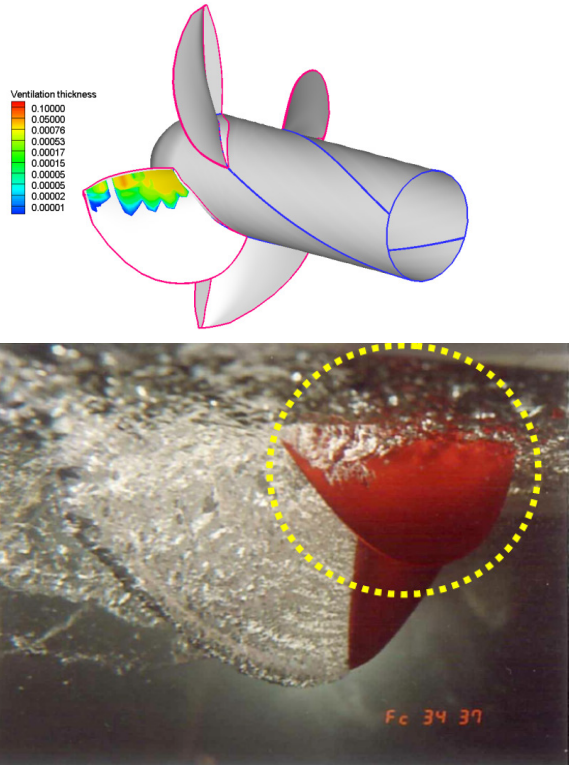
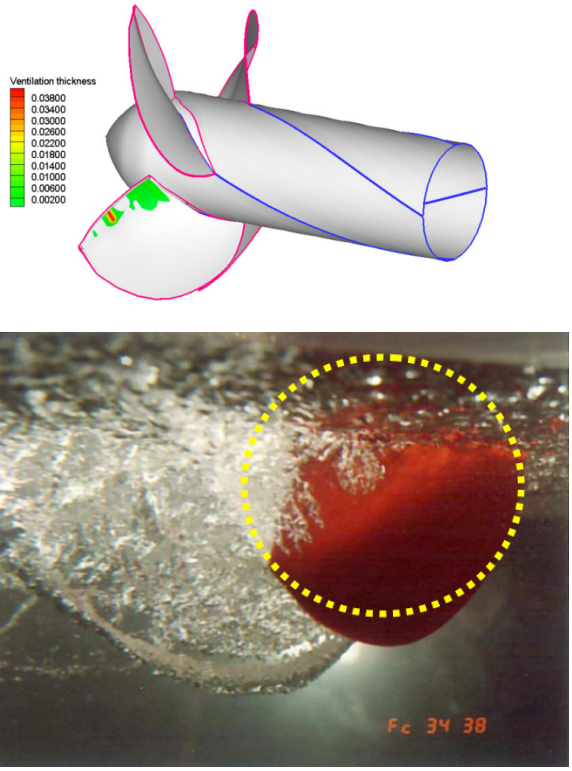


Fig. 15. Variation of force-moments components coefficients of key blade at *J*=0.7 in a revolution.

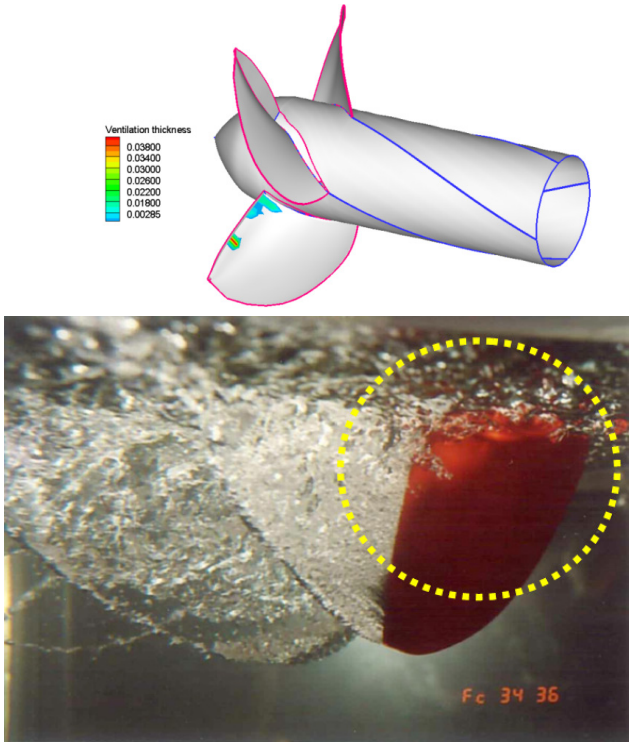
شکل ۱۵: تغییرات ضرایب مولفه‌های نیرو-ممان پره اصلی پروانه نیمه مغروق در یک دور چرخش در ضریب پیشروی *J*=۰/۷



θ=120 *deg*



θ=150 *deg*



θ=180 *deg*

Fig. 17. Comparison between computational ventilation contour and corresponding experimental data.

شکل ۱۷: مقایسه کانتور هوادهی شبیه‌سازی‌شده با مشاهدات تجربی [۳۰] در J=۱/۲ و F_n =۲

۸- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر مدلسازی جریان حول پروانه نیمه‌مغروق با استفاده از توسعه روش المان مرزی بر پایه پتانسیل مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی پدیده هوادهی-کاویتاسیون بر روی سطح پروانه نیمه‌مغروق و اعمال تاثیر جریان عرضی از جمله پارامترهای مهمی می‌باشند که در این تحقیق به آنها پرداخته شده است. بر اساس مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی نتایج ذیل قابل ارائه هستند:

- با مقایسه مولفه‌های ممان- نیرو در ضرایب پیشروی مختلف، مشاهده می‌گردد که انطباق خوبی بین داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی اولفسون [۳۰] در ضرایب پیشروی بالا وجود دارد که با کاهش ضریب پیشروی این میزان به علت عملکرد پروانه در شرایط کارکردی سنگین و افزایش تاثیر ناپایداری جریان بر روی سطح پره، کاهش می‌یابد.
- در پروانه نیمه‌مغروق عدد کاویتاسیون در ضرایب پیشروی بالا تاثیرگذار است، اما با کاهش ضریب پیشروی در عمل سطح پشتی پره به ناحیه کاملاً هوادهی توسعه‌یافته و با مدلسازی همزمان هوادهی و کاویتاسیون (در تحقیق حاضر) عملاً تغییری در مقادیر نتایج محلی (فشار) و انتگرالی(نیرو - ممان) نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن کاویتاسیون مشاهده نمی‌گردد.

- در ضرایب پیشروی خیلی‌کم ناپایداری در حل به‌واسطه تغییرات سطح هوادهی نزدیک لبه انتهایی پره افزایش یافته و برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر توسعه مدلسازی ناحیه هوادهی بر روی سطح دنباله پیشنهاد می‌گردد.

منابع

[1] Shiba, H., "Air-drawing of marine propellers". *Technical Report* 9, Transportation Technical Research Institute, 1953.

[2] Hadler, J. and R. Hecker, "Performance of partially submerged propellers". *7th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics*, Rome, Italy, 1968.

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

[4] Rains, D. A., "*Semi-submerged propellers for monohull displacement ships*". *Propeller '81 Symposium*, 15–40, Virginia Beach, VA. Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1981.

[5] Rose, J. C. and C. F. L. Kruppa, "Surface piercing propellers – methodical series model test results". *FAST'91*, Norway, 1991.

[6] Kruppa, C. F. L., "Testing surface piercing propellers". *Hydrodynamics :Computations, Model Tests, and Reality*, 107–113, 1992.

[7] Rose, J. C., C. F. L. Kruppa, and K. Koushan, "Surface piercing propellers - propeller/hull interaction". *FAST'93*, 867–881, Japan, 1993.

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

[9] Oberembt, H., "*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, 1968.

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

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

[12] Caponnetto, M., "*RANSE Simulations of Surface Piercing Propellers*". Rolla Research, 2002.

[13] Califano, A. and S. Steen., " Analysis of different propeller ventilation mechanisms by means of RANS simulations ". *First International Symposium on Marine Propulsors*, smp'09, rondheim, Norway, June, 2009.

[14] Kozlowska, A. M., K. Wöckner, S. Steen, T. Rung, K. Koushan and S. Spence, "Numerical and Experimental Study of Propeller Ventilation". *First International Symposium on Marine Propulsors*, smp'09, rondheim, Norway, June, 2009.

[15] Koushan, K., S. Spence and L. Savio, " 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, 2011.

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

[17] Himei, K., "Numerical Analysis of Unsteady Open Water Characteristics of Surface Piercing Propeller". *Third International Symposium on Marine Propulsors,* smp'13, Launceston, Tasmania, Australia, 292-297, 2013.

[18] Uhlman., " The Surface Singularity Method applied to Partially Cavitating Hydrofoils, *Journal of Ship Research*, 2.31 (1987): 107–124.

[19] Kinnasand Fine, S., " Non-linear Analysis of the Flow Around Partially or Super-Cavitating Hydrofoils by a Potential Based Panel Method " , *IABEM90 Proceedings*, Rome, Italy, 1990.

[20] Lee, Y. G. Kim, " A Potential Based Panel Method for the Analysis of Two-Dimensional Super or Partially Cavitating Hydrofoil , *Journal of Ship Research*, 2.36 (1992).

[21] Pellone and Rowe, " Supercavitating Hydrofoils in Nonlinear Theory ", *Proceedings of the 3rd International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics,* Paris, France, 1981.

[22] Lemonnier, H., and Rowe, "Another Approach in Modelling Cavitating Flows" , *Journal of Fluid Mechanics*, 195 (1988): 557–580.

[23] Hess and Valarezo, " Calculation of Steady Flow about Propeller using a Surface Panel Method ", *AIAA Journal of Propulsion Power*, 1985.

[24] Hsin, " *Development and Analysis of Panel Methods for Propellers in Unsteady Flow* ", PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology - MIT, September, 1990.

[25] Fine, " *Non-linear Analysis of Cavitating Propellers in*

Nonuniform Flow ", PhD thesis,Massachusetts Institute of Technology - MIT, October, 1992.

[26] Kim, Lee and Suh, " Surface Panel Method for Prediction of Flow around 3D Steady or Unsteady Cavitating Hydrofoil", *Proceedings of the 2nd International Symposium on Cavitation* , April, 1994.

[27] Kim and Lee., " Prediction of Unsteady Performance on Marine Propellers with Cavitation using a Surface Panel Method ", *Proceedings of the 21st Symposium on Naval Hydrodynamics*, June, 1996.

[28] Kinnas, S. and Fine, " Nonlinear Boundary Element Method for the Analysis of Unsteady Propeller Sheet Cavitation ", *Proceedings of the 19th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Seoul, Korea, 717–737, August, 1992.

[29] Young and S. Kinnas., "BEM Technique for the Modeling of Supercavitating and Surface-Piercing Propeller Flows", *24th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Fukuoka, Japan, July, 2002.

[30] Olofsson, N., " *Force and flow characteristics of a PSP*". PhD thesis, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1996.

[31] Morino, L., and C. Kuo, " Subsonic Potential Aerodynamics for Complex Configurations: AGeneral Theory", *AIAA Journal*, 12.2 (1974): 191–197, February.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

Yari, E. and Ghassemi, H., "Partially Submerged Propeller Analysis in Open Water Condition Using the Development of Boundary Element Method Based on Potential" *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(1) (2017) 51-66.

DOI: 10.22060/mej.2016.662