

# مروری بر مطالعات عددی و تجربی در حوزه هیدرودینامیک

## پروانه‌های نیمه‌مغروق

محمود سالاری<sup>۱</sup>، علیرضا اسفندیار<sup>۲</sup>، امین نجفی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام)، m.salari@gmail.com

<sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام)

<sup>۳</sup>دکتر، مهندسی دریایی، دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام)

(تاریخ دریافت: ۹۶/۴/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۵/۴)

### چکیده

پروانه‌ی نیمه‌مغروق یک ابتکار بدیع و نو در زمینه‌ی شناورهای تندرو است که به علت سرعت بالای آنها و مقاومتی که در برابر پدیده‌ی مخرب کاویتاسیون دارند در سال‌های اخیر مورد توجه طراحان قرار گرفته است. طراحان می‌بایست در طراحی هیدرودینامیکی این نوع پروانه‌ها، پارامترهایی همچون قدرت مانورپذیری بالا، پایداری شناور، سرعت دورانی بالای پروانه را که همگی مورد علاقه‌ی صاحبان و کاربران شناورهای تندرو می‌باشد، مدنظر قرار دهند. به این دلیل، در زمینه‌ی طراحی این نوع پروانه‌ها، کارهای تحقیقاتی تجربی و عددی زیادی انجام گرفته است. هدف این تحقیق، مروری کلی بر تحقیقات پیشین صورت‌گرفته در زمینه‌ی طراحی و تحلیل‌های هیدرودینامیکی پروانه‌های نیمه‌مغروق می‌باشد که به صورت تئوری یا عددی انجام گرفته یا به صورت تست تجربی بوده است.

### واژه‌های کلیدی

پروانه‌ی نیمه‌مغروق، شناورهای تندرو، یافته‌های تجربی، شبیه‌سازی‌های عددی.

## A Review on Experimental and Numerical Investigations on Hydrodynamics of Surface-Piercing Propellers

Mahmoud Salari<sup>1</sup>, Alireza Esfandyar<sup>2</sup> and Amin Najafi<sup>3</sup>

1. Associate Professor, Imam Hosein University, m.salari@gmail.com

2. M. Sc. Student, Imam Hosein University

3. Ph. D. , Imam Hosein University

(Submitted: 2017/July/9; Accepted: 2017/July/26)

### Abstract

Surface-piercing propellers can be considered as an innovative for development of the high-speed marine vessels. They have attracted the attention of designers in recent years due to their high efficiency at sea-surface conditions and their resistance to destructive phenomena of cavitation. Designers of these propellers need to reconsider some special parameters such as high maneuverability, vessel stability, higher speeds of propeller, which are of interest to owners and users. Duo to their importance role in propulsion system of high speed vessels, numerous experimental and numerical works had been done on the design of these propellers. The main objective of this research is to review the recent researches on hydrodynamics of surface piercing propellers, either theoretically or numerically, or empirically.

### Keywords

Surface-Piercing Propellers, High-Speed Boats, Experimental Investigations, Numerical Simulations

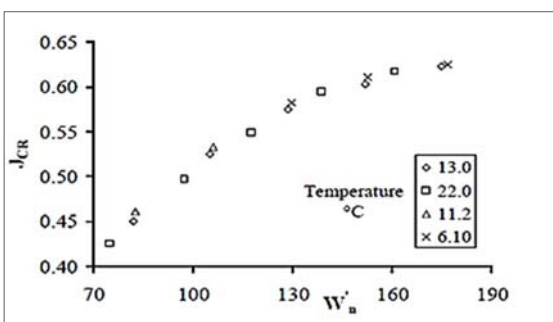
پروانه‌های نیمه‌مغروق نوع خاصی از پروانه‌های سوپرکاویتاسیونی هستند که به دلیل مزایای متعدد آنها از جمله سرعت بالا، جایگزینی پدیده‌ی کاویتاسیون با هواده‌ی و کاهش اصطحکاک و خوردگی سطح پره، قابلیت مانور بالای آنها، پایداری در سرعت بالا، استفاده از آنها با قطر بزرگ‌تر به علت عدم محدودیت در فاصله‌ی نوک پره با بدنه یا آب‌خور شناور، کاهش درگ ملحقات پروانه، کاهش نویز و ارتعاشات و همچنین زمان اسکی، مورد توجه طراحان شناورهای تندرو در صنایع نظامی و کشتی‌سازی قرار گرفته است. در پروانه‌های سطحی، عمق فرورفتگی از سطح آزاد تا خط مرکزی شفت حتی تا صفر می‌تواند کاهش پیدا کند، یعنی نیمی از پروانه به طور کامل در آب و نیمه‌ی دیگر به طور کامل خارج از آب قرار می‌گیرد. پره‌های این پروانه به گونه‌ای طراحی می‌شود که بخش پُرفشار آنها به طور کامل خیس و بخش کم‌فشار آنها به صورت خشک می‌باشد. همه‌ی این مزایای متعدد این نوع پروانه‌ها باعث شده است تا علیرغم هزینه‌ی بالای ساخت آنها، کارهای تجربی بسیاری در این زمینه صورت بگیرد. همچنین، با وجود سختی‌های شبیه‌سازی این نوع پروانه‌ها که از جمله‌ی آنها می‌توان به دوفازی بودن آنها، هندسه‌ی خاص و پیچیده‌ی این نوع پروانه‌ها، تعداد شبکه‌ی مش‌بندی زیاد آنها و زمان‌بر بودن مشاهده‌ی نتایج اشاره کرد، کارهای عددی بسیاری صورت گرفته است. هدف همه‌ی این پژوهش‌ها درک رفتار پروانه‌ی نیمه‌مغروق و جریان اطراف آن و یافتن عوامل تأثیرگذار بر روی این پروانه می‌باشد. از این رو، هدف ما در این پژوهش، مروری بر مهم‌ترین کارهای تجربی و عددی انجام‌گرفته در این زمینه است.

## ۲- کارهای تجربی

داده‌های هیدرودینامیکی پروانه‌های نیمه‌مغروق عموماً از نتایج تست مدل بوده و کمتر پیش می‌آید که داده‌های آنها از نتایج تست پروانه در مقیاس اصلی باشد. داده‌های موجود به دو دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند: داده‌هایی که پروانه را در حالت کلی بررسی و تست کردند و نیروها و گشتاورهای میانگین را به دست آورده‌اند و عموماً نیروها را در حالت پایا ارائه کرده‌اند. و حالتی که

یک پره را تست می‌کنند و رفتار دینامیکی پره‌ها را تعیین می‌کنند.

نخستین مطالعات روی تأثیر عدد وبر توسط شیبایا<sup>۱</sup> در سال ۱۹۵۳ انجام شد [۱]. بر طبق مطالعات او کشش سطحی زمانی تأثیر دارد که پروانه تقریباً به طور کامل هواده‌ی شده باشد. در حقیقت هواده‌ی کامل، پدیده‌ی کاملاً تصادفی است که در مقدار مشخصی از ضریب پیشروی به نام ضریب پیشروی بحرانی  $JCR$  رخ می‌دهد. شیبایا رابطه‌ی بین عدد وبر و ضریب پیشروی بحرانی برای یک پروانه پیدا کرد (شکل ۱). این رابطه نشان داد که تأثیر عدد وبر تقریباً برای  $W_n > 180$  از بین می‌رود. از این لحاظ اگر تست‌های مدل در اعداد وبر بالاتر از ۱۸۰ انجام شوند، می‌توانند برای پیش‌بینی رفتار پروانه‌ها مورد استفاده قرار گیرند.



شکل (۱): رابطه‌ی عدد وبر و ضریب پیشروی بحرانی [۱].

در سال ۱۹۶۸، هادلر<sup>۲</sup> و هکر<sup>۳</sup> یک سری اطلاعات جامع در مورد پروانه‌های نیمه‌مغروق ارائه دادند [۲]. آنها دو ناحیه‌ی نیمه‌هواده‌ی شده و کاملاً هواده‌ی شده را در پروانه‌ی نیمه‌مغروق شناسایی کردند و بیان کردند که در ناحیه‌ی نیمه‌هواده‌ی شده حباب‌ها فقط در لبه‌ی فرار پره شکل می‌گیرند و به علت نسبت لیفت به درگ بالا، این نوع پروانه‌ها ذاتاً دارای راندمان بالاتری می‌باشد. ولی در حالت کاملاً هواده‌ی شده، حباب‌ها تمام سطح پره را می‌پوشانند و در این حالت، راندمان به شدت افت کرده و حتی کمتر از یک پروانه‌ی مغروق می‌شود. همچنین، آنها با بررسی ناحیه‌ی گذرا به این نتیجه رسیدند که در اثر عدم پایداری، پروانه و شفت دچار ارتعاشات زیادی

<sup>1</sup>Shiba  
<sup>2</sup>Hadler  
<sup>3</sup>Hecher

می‌شوند. اما ذکر این نکته لازم است که پروانه‌ی مورد بررسی آن دو، دارای تعداد پره کم بوده که همین نیز باعث ایجاد ارتعاش می‌شود. در سال ۱۹۸۸، شاوزونگ<sup>۱</sup> و هنگشون<sup>۲</sup> فویل‌هایی با مقاطع مختلفی را تست کردند و در نهایت نتایج آنها مؤید نتایج هادلر و هکر در تست تجربی بود [۳].

هکر یک سری تست‌های دیگر را بر روی یک پروانه‌ی هشت‌پره‌ای با هدف تعیین اثرات زاویه‌ی ریک پروانه و زاویه‌ی عمودی شفت بر عملکرد پروانه، انجام داد [۴]. نتیجه‌ی این تحقیق بیانگر این بود که مهم‌ترین عامل در ایجاد نیروی عمودی در پروانه، عمق غوطه‌وری است، با افزایش عمق غوطه‌وری از ۳۰٪ به ۵۰٪، نیروی عمودی تا پنج برابر می‌تواند افزایش یابد. این در صورتی است که نیروی تراست فقط می‌تواند تا دو برابر افزایش یابد.

در سال ۱۹۷۲ کروپا<sup>۳</sup> در مورد تعمیم نتایج تست مدل به پروانه‌ی اصلی تحقیقاتی انجام داد [۵]. او عدد فرود که به عنوان یک پارامتر مؤثر در تعمیم نتایج پروانه‌ی نیمه‌مغروق است را معرفی کرد. همچنین، او بیان کرد که عددهای رینولدز و وبر اعداد بی‌بعد مهم دیگر در این زمینه می‌باشند. از دیگر نتیجه‌گیری‌های این تحقیق این است که عدد کاپیتاسیون میان تست مدل و حالت واقعی باید برابر باشد. البته، این حالت زمانی صحیح است که حباب‌ها کاملاً با هوا پُر شده باشند و در واقع حباب‌های دیگری وجود دارند که فشار داخلی آنها برابر با فشار هوا نیست.

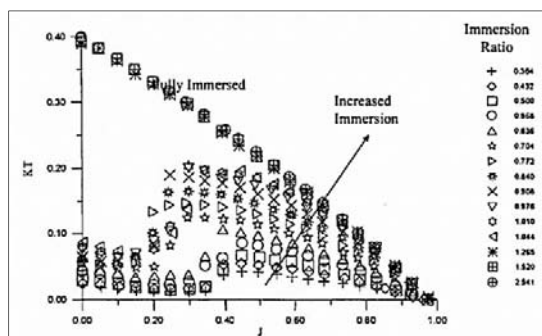
آلیسون<sup>۴</sup> در سال ۱۹۷۸، جامع‌ترین روند طراحی پروانه را با بررسی اطلاعات مورد نیاز برای طراحی پروانه، در مقاله‌ی خود ارائه داده است [۶]. وی در کار خود به تطابق موتور و بدنه پرداخته و تأکید می‌کند که پروانه در حالت مغروق با توجه به شرایط هامپ و در حالت نیمه‌مغروق با توجه به شرایط بیشینه سرعت طراحی شود.

در سال ۱۹۹۲ میلادی، کروپا در مقاله‌ای اثرات زاویه‌ی عمودی شفت بر عملکرد پروانه را بر روی پروانه‌ی

هفت‌پره‌ای مورد بررسی قرار داد و بیان کرد که افزایش زاویه‌ی عمودی شفت باعث اُفت راندمان می‌شود [۷].

رز<sup>۵</sup> و کروپا در سال ۱۹۹۱ [۸] و همچنین رز و همکارانش در سال ۱۹۹۲ [۹] تست‌هایی برای اندازه‌گیری نیروهای تراست، عمودی و افقی و گشتاورهای پروانه انجام دادند. رز و کروپا با انجام تست‌های خود در تونل کاپیتاسیون دانشگاه برلین می‌توانستند فشار را کاهش داده تا به عدد کاپیتاسیون ۰/۲ یعنی مقدار عدد کاپیتاسیون متناظر با شرایط عملکرد پروانه‌ی واقعی برسند. آنها دریافتند که در اعماق غوطه‌وری بالا، نسبت نیروی عمودی به نیروی تراست در حدود ۰/۶ بوده و با کاهش عمق غوطه‌وری این نسبت کاهش می‌یابد. آنها نظراتی درباره‌ی نحوه‌ی طراحی شفت و یاتاقان‌های آنها ارائه دادند که حتی در سال ۱۹۷۷، رادجکیک از نتایج آنها استفاده کرد و منحنی‌هایی را برای طراحی سیستم رانش ارائه داد [۱۰].

فراندو<sup>۶</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۲ اثرات عمق غوطه‌وری و زاویه‌ی شفت را بر روی عملکرد پروانه مورد بررسی قرار دادند و همچنین، تأثیر گام پروانه و تعداد پره را بررسی کردند [۱۱]. فراندو و اسکاماردلا در سال ۱۹۹۶ اثر عمق غوطه‌وری بر عملکرد پروانه‌ی نیمه‌مغروق را بررسی کردند [۱۲]. آنها اثر عمق غوطه‌وری بر ضریب تراست را ارائه دادند که در شکل ۲ ملاحظه می‌فرمایید.



شکل (۲): اثر عمق غوطه‌وری بر ضریب تراست به نقل از فراندو و اسکاماردلا [۱۲].

الافسون<sup>۷</sup> در سال ۱۹۹۳ به طراحی پروانه‌ای به نام B-841 پرداخت و یکی از پره‌های این پروانه را بر روی

<sup>5</sup>Rose

<sup>6</sup>Ferrando

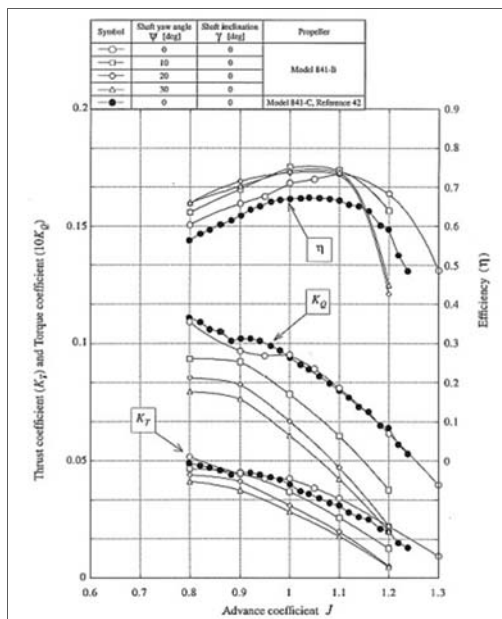
<sup>7</sup>Oloffson

<sup>1</sup>Shaozong

<sup>2</sup>Hengshun

<sup>3</sup>Kruppa

<sup>4</sup>Allison

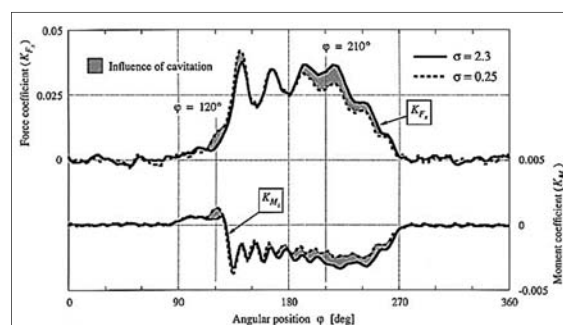


شکل (۴): اثر تغییر زاویه‌ی افقی شفت بر عملکرد هیدرودینامیکی پروانه‌ی B-841 [۱۴].

در سال ۱۹۹۵ کلر<sup>۱</sup> در یک پژوهش کاربردی، عملکرد یک پره از پروانه‌ی نیمه‌مغروق با اندازه‌ی واقعی را در دریا بررسی کرد [۱۵]. او از یک پروانه‌ی نیمه‌مغروق با گام متغیر و چندین کرنش‌سنج استفاده نمود تا تنش پروانه را اندازه‌گیری نماید. او از نتایج اندازه‌گیری‌هایش، اطلاعاتی در خصوص بارگذاری خستگی سیستم ارائه کرد. در سال ۱۹۹۸ کامن<sup>۲</sup> با برشمردن مزایا و معایب پروانه‌ی نیمه‌مغروق با تکیه بر تجربیات شخصی خود، بیان می‌کند که ارتعاشات جزو ویژگی‌های ذاتی پروانه نیست و این به خاطر عدم هم‌محوری مناسب شفت می‌باشد [۱۶]. او در نهایت مشکل این نوع پروانه‌ها را عبور از نقطه‌ی هامپ و همچنین زمانی می‌داند که پروانه کاملاً در حالت مغروق بوده و نیمه‌ی بالایی آن شدیداً در ویک عمل می‌کند.

دایسون<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۰، چهار پروانه‌ی سطح‌رو را با بررسی نیروها و گشتاورهای کلی و همچنین گذرای اعمال‌شده به آنان بیان می‌کند که نیروهای افقی و عمودی در شرایط عملکردی متفاوت پروانه به ترتیب در حدود ۲۷ و ۴۷ درصد نیروی تراست بودند. چهار پروانه

هاب منعطفی نصب نمود تا بتواند نیروها و گشتاورهای اعمالی به آن را ثبت نماید [۱۳]. او آزمایش‌های متعددی بر روی این پروانه انجام داد و به بررسی عدد کویتاسیون بر روی این پروانه‌ی نیمه‌مغروق پرداخت. در نتیجه‌گیری این تحقیق بیان شده است که کاهش عدد کویتاسیون باعث ایجاد دو پدیده متفاوت می‌شود: یکی اینکه نیروی وارد بر پره هنگام ورود آب افزایش می‌یابد و دیگر اینکه هنگام خروج پره از آب این نیرو کاهش می‌یابد. اثرات کاهش عدد کویتاسیون بر عملکرد هیدرودینامیکی پروانه B-841 در یک دور چرخش پروانه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۳): اثر تغییر عدد کویتاسیون بر عملکرد هیدرودینامیکی پروانه [۱۳].

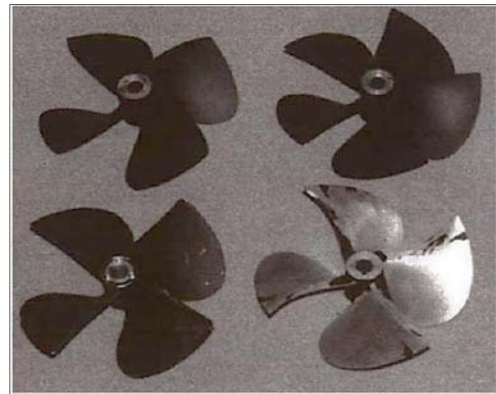
در سال ۱۹۹۶ الافسون در تحقیق دیگری به بررسی تأثیر عدد فرود بر عملکرد پروانه‌ی نیمه‌مغروق پرداخت [۱۴]. وی در تحقیق خود بیان کرد که در اعداد فرود بالاتر از ۴، اثر این عدد بی‌بعد کم‌رنگ می‌شود. او همچنین با بررسی ویژگی‌های ارتعاشی پروانه، عدد فرود را بر روی ویژگی‌های ارتعاشی تأثیرگذار می‌داند. الافسون با بررسی تأثیر زاویه‌ی شفت بر روی عملکرد پروانه بیان می‌کند که راندمان با تغییر زاویه شفت، تغییر می‌کند. نمونه‌ای از نتایج الافسون در خصوص اثر زاویه‌ی افقی شفت بر عملکرد پروانه در شکل ۴ ارائه شده است.

<sup>1</sup>Keller

<sup>2</sup>Kamen

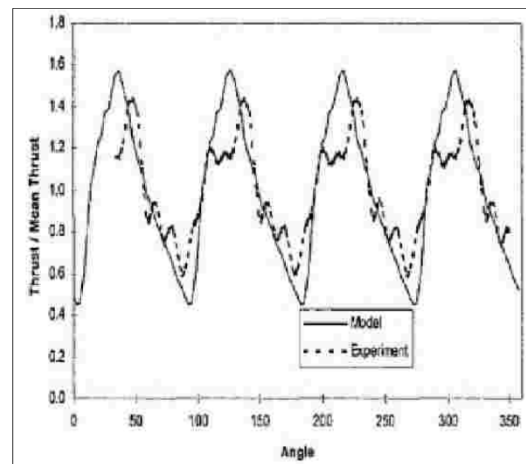
<sup>3</sup>Dyson

مورد بررسی دایسون در شکل ۵ نشان داده شده است [۱۷].

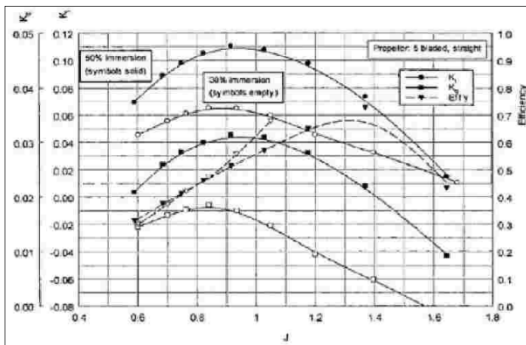


شکل (۵): پروانه‌های مورد بررسی توسط دایسون [۱۷].

دایسون همچنین اثر تعداد پره بر عملکرد پروانه را نیز مورد بررسی قرار داده و از خروجی کار تجربی خود به عنوان ورودی مدل المان محدود استفاده کرد. در نهایت، یک مدل بارگذاری گذار را برای پروانه نیمه‌مغروق توسعه داد و با نتایج تجربی مقایسه کرد که در شکل ۶ نشان داده شده است. او از این مدل برای بررسی اثر هندسه بر نیروهای تحریک استفاده کرد. نمونه‌ای از نتایج وی در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل (۶): مقایسه‌ی مدل توسعه‌داده‌شده با نتایج تجربی [۱۷].



شکل (۷): اثر عمق غوطه‌وری بر عملکرد پروانه‌ی نیمه‌مغروق [۱۷].

پیترسون<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۵ نیز همانند کلر از یک پروانه‌ی واقعی استفاده کرد و در پایان‌نامه‌ی خود بیان کرد که با تغییر زاویه‌ی شفت نسبت به مسیر حرکت شناور می‌توان راندمان آن را بین ۳٪ تا ۵٪ افزایش داد [۱۸].

تست‌های انجام‌گرفته بر روی مدل واقعی در دریا نشان‌دهنده‌ی آن است که هنگام مانور شناور و انجام تست دایره، قدرت گشتاور مورد نیاز پروانه تا ۱۰۰٪ برای پروانه بیرونی (با فرض دو پروانه بودن شناور، پروانه‌ای که از مرکز دایره دورتر است) و ۵۰٪ برای پروانه داخلی افزایش می‌یابد [۱۹]. به همین منظور باید راهکاری را به منظور حفظ عملکرد هیدرودینامیکی پروانه و جلوگیری از ایجاد خسارت سازه‌ای به آن پیشنهاد داد [۲۰].

### ۳- بررسی‌های تحلیلی و عددی

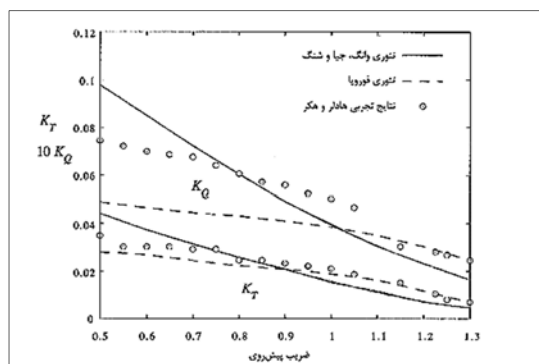
در حال حاضر، روش‌های تئوریکی که برای تحلیل پروانه‌های نیمه‌مغروق استفاده می‌شوند را می‌توان به چهار قسمت کلی تقسیم‌بندی کرد: روش المان پره و خط برآ، روش ورتکس-لیتس، روش المان مرزی و روش دینامیک سیالات محاسباتی.

به منظور اینکه اثرات عمق غوطه‌وری در محاسبات در نظر گرفته شود، اوپرمت تئوری خطوط برآ را گسترش داد [۲۱]. وی از چند فرض برای ساده‌سازی حل خود استفاده کرد. اول اینکه او فرض کرد که پروانه تحت بارگذاری اندکی قرار گرفته است و هیچگونه هواده‌ی به پروانه یا ویک آن ایجاد نمی‌شود. دوم اینکه او با استفاده از روش تصاویر فرض کرد که سطح آزاد یک صفحه افقی

<sup>۱</sup>Peterson

کرد. وی در مقاله‌ی خود اطلاعات جدید و مهمی را برای فهم عملکرد پروانه در ناحیه‌ی گذرا و تغییرات نیروها در هر دور گردش ارائه داد. نتایجی که فورویا در ناحیه‌ی هوادهی کامل به دست آورده بود، مطابقت خوبی با نتایج مرجع تجربی داشت. اما در ضرایب پیشروی پایین‌تر، ضریب گشتاور دقت قابل قبولی نداشت. وی دلیل این امر را اثرات غیرخطی جریان، ضخامت حباب‌های روی پره و ضخامت خود پره و همچنین، سرعت القایی نسبتاً بالا می‌دانست.

کیو وانگ، ژو و شنگ در سال ۱۹۹۰، پروانه‌ی نیمه‌مغروق را در نزدیکی سطح آزاد و در زمانی که هوادهی رخ می‌دهد، بررسی کردند [۲۸]. آنها برای حالت نیمه‌هوادهی شده یک روش کاملاً سه‌بعدی برای پروانه‌ی نیمه‌مغروق ۴۰۰۲ در عمق غوطه‌وری ۳۳٪ توسعه دادند. این محققان برای تحلیل خود از روشی مشابه روش وانگ، که در قبل توضیح داده شد، استفاده کردند. به این صورت که از یک سری منبع برای نشان دادن ضخامت پره و حباب‌ها، ورتکس‌ها برای لیفت و تصویری از پره‌ها برای اعمال شرط مرزی سطح آزاد استفاده نمودند. البته، ذکر این نکته لازم است که هنگام رخداد هوادهی، از ضخامت پره چشم‌پوشی می‌شد. آنها در کار خود بیان کردند که نزدیکی عملکرد پروانه‌ی مغروق در مجاورت سطح آزاد، تأثیر چشم‌گیری بر نیروهای اعمالی و جریان دارد. نتایج کیووانگ و همکارانش در چندین مورد تطابق مطلوبی با نتایج تجربی داشتند. آنها مقایسه‌ای بین روش خود و فورویا و نتایج تجربی انجام دادند که در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل (۸): مقایسه‌ی نتایج کیو وانگ و همکارانش [۲۸] با فورویا [۲۷].

تخت است. وی نتایج خود را با نتایج تجربی گوتچی [۲۲] مقایسه کرد که دارای تطابق خوبی بود ولی در مورد ضریب گشتاور هیچ مقایسه‌ای انجام نداد.

در سال ۱۹۶۱ یگورو<sup>۱</sup> و سادونیکو<sup>۲</sup> یکی از اولین تحلیل‌های تئوری را به روش المان پره و خط برآ که مبتنی بر تئوری هیدروفویل دوبعدی‌ای که در آن از اندرکنش‌های پره مجاور، کاپیتاسیون و ورتکس ویک صرف‌نظر شده بود ارائه دادند [۲۳].

مدتی بعد چندین محقق از روش خط برآیی که در آن پروانه‌ها به یک سری از خطوط برآ تبدیل شده بود، استفاده کردند.

در سال ۱۹۷۲ وانگ<sup>۳</sup> تئوری فویل را برای حالتی که یک فویل هوادهی‌شده‌ی دوبعدی به صورت عمودی وارد آب با عمقی بی‌نهایت می‌شود را تعمیم داد [۲۴]. او فرض کرد فویل به محض اینکه وارد آب می‌شود، حباب‌های هوا تشکیل شود. همچنین، وانگ تلاش زیادی برای تعمیم تئوری فویل کلاسیک به فویلی با سطح مقطع خمیده انجام داد. او دریافت که ضریب پیشروی در بارگذاری مقطع تأثیر گذاشته و با افزایش آن، نیروها نیز افزایش می‌یابد.

در سال ۱۹۸۴ فورویا<sup>۴</sup> تئوری‌های وانگ را برای یک پروانه‌ی نیمه‌مغروق در جریانی سه‌بعدی، توسعه داد [۲۶]. او در ابتدا تئوری وانگ را برای یک فویل دوبعدی استفاده کرد و نیروی لیفت وارد بر فویل را تعیین نمود. این نیروی لیفت سپس میدان فشار را تغییر می‌داد و سرعت‌های القایی جریان به وجود آمده، زاویه برخورد را تغییر می‌داد. بعد از این مجدداً تئوری وانگ اعمال می‌شد و محاسبات با استفاده از این شرایط جدید یک‌بار دیگر انجام می‌شد. این حلقه‌ی حل تا جایی ادامه می‌یافت که معیار همگرایی ارضا شود.

در سال ۱۹۸۵ فورویا بار دیگر تئوری وانگ را توسعه داد تا با استفاده از آن، مقاطع فویل‌شکل در پره‌هایی که تحت هوادهی بودند را بتواند ارزیابی کند [۲۷]. او با انتگرال‌گیری بر روی کل پره و با در نظر گرفتن سطح خیس‌شده‌ی هر پره، ضرایب تراست و گشتاور را محاسبه

<sup>1</sup>Yegorov

<sup>2</sup>Sadovnikov

<sup>3</sup>Wang

<sup>4</sup>Furuya

وانگ و همکارانش روش سطح برآ را برای تحلیل فویل سه‌بعدی کاملاً هوادهی‌شده توسعه دادند [۲۹]. در روش آنها جریان از لبه‌ی حمله و فرار پره جدا شده و باعث ایجاد حباب‌هایی روی سطح مکش شده و هوادهی از اتمسفر ایجاد می‌شود که همانند روش فورویا فرض شده بود. مقایسه‌ی نتایج آنها با نتایج مراجع موجود نشان می‌داد که روش وانگ و همکارانش برای پروانه MAU4 – 60 که هادلر و هکر استفاده نمودند، تطابق خوبی داشته، اما با نتایج عددی فورویا در پروانه ۴۰۰۲ تطابق مناسبی وجود نداشت.

پژوهش و تحقیقاتی که پیش‌تر بررسی شدند فقط گشتاور و تراست را که از لیفت و درگ مقاطع پره محاسبه می‌شدند، مورد بررسی قرار داده بودند.

وروس<sup>۱</sup>، در سال ۱۹۹۱ میلادی نیروهای افقی و عمودی و همچنین، ممان‌های ناشی از آنها را در نظر گرفت [۳۰]. او با استفاده از تئوری‌های پروانه، نیروهای سیکلی را مورد بررسی قرار داد. همچنین، وی با استفاده از سری فوریه بیان کرد که هارمونیک اول نیروی لیفت پره، نیروی پایای افقی و عمودی پره می‌باشد. همچنین، او دریافت که زاویه‌ی ریک منفی، اثر زیادی بر روی نیروی عمودی و گشتاور حول محور افقی دارد، ولی زاویه‌ی اسکيو اثر چندانی بر نیروهای پروانه ندارد. وی در کار خود بیان کرد که زاویه افقی و عمودی شفت نسبت به جریان، نیروهای افقی را می‌تواند تا ۵۰٪ افزایش دهد. در کاری وانگ و همکارانش در سال ۱۹۹۰ از روش ورتکس-لتیس سه‌بعدی گذرا برای بررسی پروانه در حالت کاملاً هوادهی‌شده استفاده کردند [۳۱]. این روش فرض می‌کند که پره‌ها متشکل از یک سری سطوح برآ باشند که در نتیجه می‌توان اثرات تغییرات هندسه را در امتداد کورد نیز در محاسبات اعمال کرد.

کودو<sup>۲</sup> و اوکون<sup>۳</sup> [۳۲] و همچنین کودو و کیناس<sup>۴</sup> [۳۳] به ترتیب در سال‌های ۱۹۹۴ و ۱۹۹۵ برای تحلیل از روش سه‌بعدی ورتکس-لتیس استفاده کردند. این روش تمامی محاسبات را برای یک پروانه‌ی مغروق انجام داده و به منظور تعیین رفتار پروانه در حالت نیمه‌مغروق در عمق

غوطه‌وری مورد نظر پروانه ضرب می‌شود. در این صورت فقط می‌توان مقادیر میانگین نیروهای اعمالی به پروانه را محاسبه کرده و از اثرات ورود و خروج از آب صرف نظر می‌شود.

در سال ۱۹۷۸ کروین و لی کد ورتکس-لتیسی برای تحلیل پروانه‌های معمولی ارائه دادند [۳۴]. لی و همکارانش این کد را به حالت سه‌بعدی ارائه داده و نامش را *MPUF – 3A* گذاشتند [۳۵]. در سال‌های بعد لی [۳۶]، بر سلین [۳۷] و کوسال [۳۸] این کد را تکمیل‌تر کردند. از آن جایی که مبنای نگارش کد *MPUF – 3A* روش ورتکس-لتیس است، این کد محاسبات را برای پروانه‌ی نیمه‌مغروق در حالت غوطه‌وری کامل انجام می‌دهد و نیروها و گشتاورها را به صورت میانگین ارائه می‌دهد. در نتیجه، برای محاسبه‌ی نیرو و گشتاور در عمق غوطه‌وری مختلف باید نتایج را در آن ضرب کرد.

در سال ۱۹۹۵ سوینا<sup>۵</sup> و کیناس یکی از اولین کاربردهای روش المان مرزی را برای هیدروفویل در هنگام ورود به آب ارائه دادند [۳۹]. این روش نسبت به روش ورتکس-لتیس دقیق‌تر بوده و توانایی بهتری در تحلیل جزئیات جریان در لبه‌ی حمله و نوک پره دارد. این محققان روش المان مرزی دوبعدی با زمان پیشرو را برای تحلیل جریان اطراف هیدروفویل نیمه‌مغروق کاملاً هوادهی‌شده توسعه دادند. ذکر این نکته ضروری است که این روش فقط مورد هیدروفویل به آب را مورد بررسی قرار می‌دهد و خروج هیدروفویل را بررسی نمی‌کند.

پیش از کار یانگ<sup>۶</sup> که روش المان مرزی سه‌بعدی و بر مبنای پتانسیل پایین را برای تحلیل غیرخطی کاویتاسیون صفحه‌ای گذرا در پروانه‌ی مغروق و نیمه‌مغروق توسعه داده بود [۴۰]، روش‌های المان مرزی تنها می‌توانستند رفتار نیمه‌کاویتاسیونی را در پروانه‌های نیمه‌مغروق تخمین بزنند. وی نتایج خود را با نتایج تجربی الافسون مقایسه کرد که نمونه‌ای از آن در شکل ۹ ارائه شده است.

یانگ دریافت که کاهش عدد کاویتاسیون باعث کاهش ضرایب تراست و گشتاور می‌شود. بنابراین، با افزایش درگ ناشی از لبه‌ی فرار ضخیم، راندمان نیز کاهش می‌یابد. یانگ در مقاله‌ای که در سال ۲۰۰۹ ارائه

<sup>1</sup>Vorus

<sup>2</sup>Kudo

<sup>3</sup>Ukon

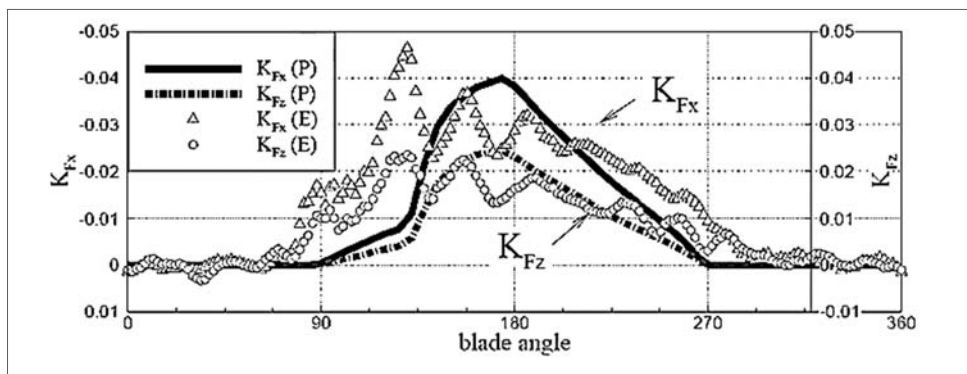
<sup>4</sup>Kinnas

<sup>5</sup>Savineau

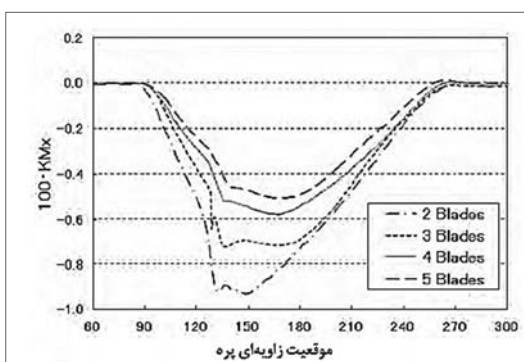
<sup>6</sup>Young

روش المان مرزی قابلیت پیش‌بینی جریان پیچیده‌ی سه‌بعدی اطراف لبه‌ی حمله و نوک پره را داراست.

داد [۴۱]، بیان می‌کند که مزیت روش‌های المان مرزی نسبت به روش‌های ورتکس-لتیس و خط برآ این است که



شکل (۹): مقایسه‌ی روش المان مرزی یانگ [۴۰]، با نتایج تجربی الفسون.

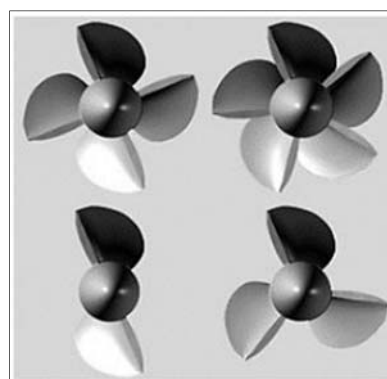


شکل (۱۱): ضریب گشتاور برای پروانه‌های مختلف [۴۲].

به منظور ارزیابی عملکرد گذرای پروانه سطح‌رو، کاپوننتو<sup>۲</sup> از نرم‌افزاری تجاری به نام کومت که بر پایه‌ی *RANS* است، استفاده کرد [۴۳]. این نرم‌افزار بر پایه‌ی دینامیک سیالات محاسباتی بوده و جریان سیال را به شکل دوفازی تحلیل می‌کند. معادلات انتگرالی جرم و مومنتوم به روش حجم محدود و با استفاده از الگوریتم سیمپل حل می‌شود. همچنین، مدل توربولانسی مورد استفاده، مدل  $k - \epsilon$  استاندارد بوده است. وی در نتایج خود بیشینه فشار اعمالی به پره را هنگام ورود به آب و در قسمت لبه‌ی حمله بیان می‌کند.

در یک تحقیق کاربردی یانگ و کیناس برای یک پروانه‌ی نیمه‌مغروق از نوع *Spp 841 - B* از طریق روش المان مرزی، نیروهای هیدرودینامیکی و هواده‌ی پروانه را بررسی کرده‌اند. روش مورد استفاده *negative image* بوده و سپس، با استفاده از دو روش المان مرزی و روش المان محدود به بررسی و

در سال ۲۰۱۳ میلادی، همی<sup>۱</sup> برای تحلیل و شبیه‌سازی پروانه مورد استفاده الفسون از دو روش ورتکس-لتیس و دینامیک سیالات محاسباتی استفاده کرد [۴۲]. وی در تخمین ضرایب تراست و گشتاور حدوداً ۳۰٪ اختلاف نسبت به مراجع مشاهده می‌کند که در توجیه آن بیان می‌کند که محیط کاری پروانه دوفازی می‌باشد و علاوه بر آب، هوا نیز در این محیط حضور دارد. همچنین، ایشان در قسمتی از کار خود به بررسی تأثیر تعداد پره بر روی پارامترهای ضرایب تراست، گشتاور و راندمان پروانه‌ی نیمه‌مغروق پرداخته است که بیان می‌کند که تعداد پره در پروانه‌ی نیمه‌مغروق، مهم‌تر از پروانه‌ی مغروق می‌باشد. پروانه‌های مورد بررسی وی و همچنین، ضریب گشتاور حول محور شفت مربوط به هر یک به ترتیب در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ آورده شده‌اند.

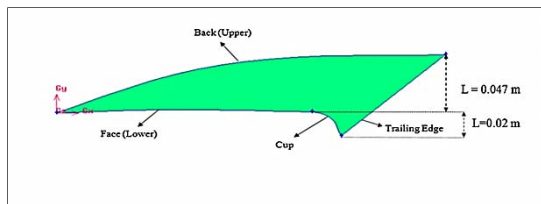


شکل (۱۰): پروانه با پره‌های مختلف [۴۲].

<sup>2</sup>Caponnetto

<sup>1</sup>Heimei





شکل (۱۲): حالت فنجان‌ی شکل پره پروانه‌ی نیمه‌مغروق [۴۷].

همچنین، در کار تقریباً مشابه دیگری قاسمی و یاری در سال ۲۰۱۶ به بررسی مدل‌سازی عددی پروانه‌ی نیمه‌مغروق با استفاده از روش المان مرزی پرداخته‌اند؛ به طوری که اثر هیدرودینامیکی و هواده‌ی را در ضرایب پیشروی مختلف محاسبه کرده‌اند. در ادامه، مقادیر به‌دست‌آمده از روش *BEM* را با نتایج تجربی مقایسه کرده‌اند. در نهایت، نویسندگان نتیجه گرفته‌اند که تیغه‌ی فنجان‌ی شکل همان طور که در کار قبلی ذکر شد، تأثیر به‌سزایی در فشار استاتیک داشته و از پاشش آب به هوا جلوگیری می‌کند [۴۸].

در تحقیق دیگری قاسمی و یاری در سال ۲۰۱۶ به بررسی یک مقطع دو بُعدی پروانه‌ی نیمه‌مغروق با زوایای مختلف و در اعداد وبر متفاوت پرداخته‌اند و اثرات این دو پارامتر هیدرودینامیکی را بر روی هواده‌ی و پاشش آب با استفاده از روش *RANS* بررسی کرده‌اند. این تحقیق بیان می‌کند زمانی که عدد وبر افزایش می‌یابد، توزیع فشار نیز به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین، بیان می‌کند که نیروی وارد بر تیغه پره در حالتی که اثرات کشش سطحی در نظر گرفته می‌شود، ۲۰ برابر بیش‌تر از زمانی است که اثرات کشش سطحی صرف‌نظر می‌شود [۴۹].

سیف و همکارانش در سال ۲۰۱۶ تأثیر عمق غوطه‌وری‌های مختلف ( $I = 35\%, 50\%, 75\%, 100\%$ ) با زوایای انحراف شافت مختلف ( $\psi = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ ) را بر روی پروانه‌ی نیمه‌مغروق از نوع *Spp 841 - B* با استفاده از روش *URANS* بررسی کرده‌اند و بیان می‌کنند که با افزایش عمق غوطه‌وری ضرایب تراست ( $K_T$ ) و گشتاور ( $K_Q$ ) نیز افزایش و راندمان کاهش می‌یابد. همچنین، در توافق با نتایج الفسون نیز به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش زاویه شافت، راندمان نیز افزایش می‌یابد [۵۰].

پیش‌بینی تأثیرات هیدرواستاتیکی پرداخته‌اند. نویسندگان بیان می‌دارند که نتایج خوبی در مقایسه با نتایج تجربی به دست آورده‌اند و همچنین، نتایج با استفاده از این روش به سرعت همگرا می‌شود، اما با این حال در سرعت دورانی زیاد اختلافاتی در عملکرد تیغه‌ی پروانه وجود دارد که در ادامه بیان می‌کنند این اختلاف‌ها را می‌توان به عدم توانایی روش *BEM* در پیش‌بینی اثرات ارتعاش پروانه و اسپری آب نسبت داد که برای این اشکال نویسندگان دیگری از کوپل دو روش *BEM* و *FEM* استفاده کرده‌اند. در نهایت باید بیان کرد که هدف نهایی این پژوهش توسعه یک ابزار قوی و قابل اعتماد برای پیش‌بینی عملکرد هیدرودینامیک و هیدرواستاتیک پروانه *SPP* بوده است [۴۴].

در سال ۲۰۰۹ کالیفانو<sup>۱</sup> و استین<sup>۲</sup> به تجزیه و تحلیل هواده‌ی پروانه‌ی نیمه‌مغروق به کمک آزمایش تجربی شیب (۱۹۵۳) [۱] و کوشان<sup>۳</sup> (۲۰۰۶) [۴۵] پرداخته‌اند. برای این کار از کد فلونت و مدل *RANS* با استفاده از مدل توربولانسی  $SST K - \omega$  برای حل جریان دوفازی ویسکوز و تراکم‌ناپذیر استفاده کرده‌اند و بیان می‌کنند که در مورد ضریب تراست توافق خوبی با نتایج تجربی دارند، ولی ضریب گشتاور دارای خطا است [۴۶].

قاسمی و یاری در سال ۲۰۱۶ به بررسی جریان‌های هواده‌ی، توزیع فشار و نیروهای وارد بر پروانه‌ی نیمه‌مغروق *Spp 841 - B* پرداخته است که نتایج خود را با نتایج تجربی الفسون مقایسه کرده‌اند. به گفته‌ی نویسندگان نتایج عددی در توافق خوبی با اندازه‌گیری‌های تجربی به ویژه در ضریب پیشروی بالا است. در این مقاله، به طور ویژه به بررسی تأثیر فنجان‌ی شکل<sup>۴</sup> پره در پروانه‌ی نیمه‌مغروق پرداخته شده و بیان می‌کند که تأثیر به‌سزایی بر روی فشار و نیروهای وارد شده دارد. همچنین، بیان می‌کند که بدون حالت فنجان‌ی شکل رانش کمتر و راندمان پایین‌تر خواهد بود. در شکل ۱۲ حالت فنجان‌ی شکل پره پروانه‌ی نیمه‌مغروق که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است را مشاهده می‌کنید [۴۷].

<sup>1</sup>Califano

<sup>2</sup>Steen

<sup>3</sup>Koushan

<sup>4</sup>Cupped

جوانمردی و قدیمی در سال ۲۰۱۷ به بررسی عددی پروانه‌ی نیمه‌مغروق از لحاظ هیدروالاستیکی و هیدرودینامیکی با استفاده از معادلات *Rans* و الاستیکی خطی پرداخته‌اند. در این پژوهش رفتار جریان اطراف پروانه، فشار وارد بر سطح پروانه و همچنین، تنش ایجادشده روی آن، در زوایا و دوره‌های مختلف و حتی در حالت مغروق نیز مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در آخر بعد از بررسی‌های به عمل آمده میزان خطای تراست و گشتاور پروانه در ضریب پیشروی‌های مختلف کمتر از ۱۰٪ گزارش شده است [۵۱].

در پژوهش‌هایی که در داخل کشور انجام شده است، حوزه‌ی عددی حجم بیش‌تری را به خود اختصاص داده و استفاده از روش‌های المان مرزی و دینامیک سیالات محاسباتی میان پژوهشگران ایرانی رایج می‌باشد که در ادامه به بیان مهم‌ترین تحقیقات انجام گرفته شده در حوزه پروانه‌ی نیمه‌مغروق در داخل کشور پرداخته می‌شود.

قاسمی و همکارانش در سال ۱۳۸۸ با استفاده از روش المان مرزی به محاسبه توزیع فشار هیدرودینامیک روی سطوح پره‌های یک نوع پروانه‌ی نیمه‌مغروق می‌پردازند. نتایج این تحلیل نشان می‌دهند که بیش‌ترین تنش در سطوح جلویی پره ایجادشده و با افزایش زاویه اسکینو میزان تنش افزایش می‌یابد [۵۲].

در تحقیق دیگری قاسمی و همکارانش در سال ۱۳۸۸ این‌بار با استفاده از روش عددی دینامیک سیالات محاسباتی به تحلیل یک پروانه مغروق و نیمه‌مغروق با پروفیل سطح مقطع مشخص می‌پردازند و بیان می‌کنند که طبق نتایج به دست آمده در سرعت‌های بالا بیش‌ترین راندمان مربوط به پروانه‌ی نیمه‌مغروق می‌باشد [۵۳].

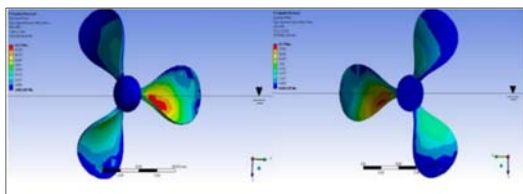
در کار تقریباً مشابه دیگری قاسمی و همکارانش در سال ۱۳۸۸ به بررسی اجمالی روش المان مرزی به منظور تحلیل یک پروانه‌ی نیمه‌مغروق پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق بیانگر این نکته است که بهترین بازده برای پروانه به نظر می‌رسد که در عمق غوطه‌وری ۴۰٪ رخ می‌دهد. همچنین، نتیجه شده است که در زاویه پره ۹۰° با سطح آب بیش‌ترین فشار وارده بر سطح پره را داراست. در انتهای پژوهش آمده است که با افزایش گام به قطر  $P/D$ ، ضرایب تراست و گشتاور در یک ضریب پیشروی ثابت اضافه می‌شود [۵۴].

در سال ۱۳۸۸ معماریان و همکاران به طراحی پروانه‌های نیمه‌مغروق مختلفی برای یک شناور تندرو به منظور رساندن شناور به سرعت ۵۰، ۶۰ و ۷۰ گره دریایی پرداخته‌اند تا بهترین آنها از نقطه نظرات مختلف انتخاب گردد. سری مدنظر نویسنده، خصوصیات هیدرودینامیکی پروانه را به صورت فرمول تجربی ارائه کرده است. در آخر نویسنده بیان می‌کند که با فرض داده‌های ورودی مختلف برای بعضی ضرایب و با روش سعی و خطا، سعی شده است تا بهترین شرایط کاری برای عملکرد پروانه تعیین شود [۵۵].

سیف و همکارانش در سال ۱۳۸۸ به تعیین دور پروانه در آزمایش‌های مدل به همراه بررسی‌هایی بر روی اعداد فرود، کاویتاسیون و ضریب پیشروی می‌پردازند و بیان می‌کنند که برابری این اعداد در مدل و نمونه واقعی امکان‌پذیر نیست. در نهایت دور مورد نیاز تست مدل پروانه‌ی نیمه‌مغروق با اعمال شرط عدد فرود و دو شرط مختلف بر روی عدد ویر در قالب یک نمودار برای نسبت تشابه‌های مختلف ارائه کرده‌اند [۵۶].

همچنین، قاسمی و همکارانش بار دیگر در سال ۱۳۸۸ به بررسی عملکرد هیدرودینامیکی پروانه‌های نیمه‌مغروق با استفاده از روش المان مرزی می‌پردازند. در این نوشتار، با استفاده از داده‌های حاصل از نتایج تجربی موجود نسبت به تعیین شرایط گذرا اقدام و با کمک روش المان مرزی به بررسی دو نوع پروانه‌ی *SPP101* و *SPP102* پرداختند. در آخر به این نتیجه می‌رسند که روش المان مرزی با شرایط مرزی تعریف‌شده در مقایسه با نتایج تجربی رضایت‌بخش بوده است. همچنین، بیان می‌کنند که با کاهش نسبت گام، ضریب پیشروی بحرانی کاهش و اثر سطح آزاد کمتر می‌شود، و از فاز هواده‌ی جزئی به فاز هواده‌ی کامل تغییر می‌یابد. در این تحقیق، ضرایب هیدرودینامیکی پروانه‌ی *SPP101* با نتایج تجربی مقایسه شده و بیان شده است که بیش‌ترین کارایی این نوع پروانه در محدوده‌ی ۰/۷ نتیجه می‌شود. در مورد پروانه‌ی *SPP102* نتیجه‌گیری شده است که کارایی این پروانه کم‌تر از پروانه‌ی سه‌پره‌ای است. به گفته‌ی نویسنده به نظر می‌رسد علت این موضوع زاویه‌ی اسکینو زیاد و تعداد پره‌های بیش‌تر باشد. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ المان‌بندی استفاده‌شده در دو نوع پروانه *SPP101* و *SPP102* را مشاهده می‌کنید [۵۷].

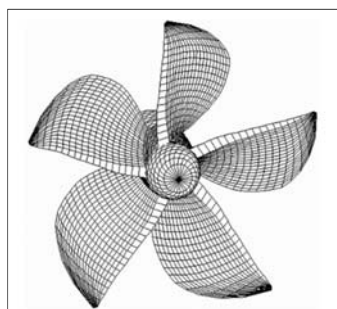
در کار خود به محاسبه‌ی تنش‌ها، تغییر شکل‌ها و مدهای ارتعاشاتی پرداختند. نمایی از تنش ون میزز محاسبه‌شده در این پایان‌نامه‌ی ارشد برای عمق غوطه‌وری ۵۷ درصد در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



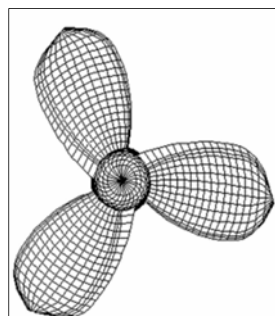
شکل (۱۵): کانتورهای تنش ون میزز برای سطح فشار و مکش پروانه [۶۰].

قاسمی و یاری در سال ۱۳۹۳ به بررسی فیزیک رفتار جریان اطراف مقطع دو بُعدی از پروانه‌ی نیمه‌مغروق با استفاده از روش حجم محدود-دوفازی پرداخته‌اند. تغییرات ضخامت ناحیه‌ی هواده‌ی و رژیم‌های هواده‌ی از ورود مقطع به آب تا خروج از آب از مهم‌ترین پارامترهایی می‌باشند که در این مطالعه به آنها پرداخته شده است. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده در دورهای بالای  $rpm$  ۱۵۰۰ پس از ورود مقطع دو بُعدی به آب سریعاً از ناحیه‌ی هواده‌ی گذرا گذشته و وارد ناحیه‌ی کاملاً هواده‌ی شده می‌شود. در دورهای بالا یک ناحیه‌ی کاملاً هواده‌ی شده‌ی پایدار با ضخامت ناحیه‌ی هواده‌ی مشخص وجود دارد که تأثیر به‌سزایی بر تغییرات نیرو می‌گذارد [۶۱].

ذبیح‌زاده روشن و سیف در سال ۱۳۹۴ به بررسی برخی پارامترهای هیدرودینامیکی پروانه‌ی نیمه‌مغروق در دو زمینه‌ی سیالاتی و جامداتی پرداختند. در بررسی‌های سیالاتی، فشار، نیرو و گشتاور اعمالی به پره‌های پروانه در حالات مختلف انجام گرفته و در بررسی‌های جامداتی، از این فشارها و نیروها برای محاسبه‌ی تنش‌ها و تغییر شکل‌ها استفاده کرده‌اند. در این پژوهش، مشخص گردیده که با افزایش عمق غوطه‌وری، نیرو و گشتاور اعمالی به پروانه افزایش یافته و راندمان آب آزاد کاهش و میزان تغییر شکل بیشینه‌ی پروانه کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش عمق غوطه‌وری، ماهیت نوسانی نیروهای اعمالی به پروانه کاهش یافته و احتمال مشکلات ناشی از خستگی کم‌تر می‌شود. همچنین، به گفته‌ی نویسنده مشاهده گردید که حتی با افزایش عمق غوطه‌وری به



شکل (۱۳): پروانه‌ی نوع SPP102 [۵۷].



شکل (۱۴): پروانه‌ی نوع SPP101 [۵۷].

در سال ۱۳۹۰ قاسمی و همکارانش از روش المان مرزی برای طراحی و تحلیل هیدرودینامیکی پروانه‌ی زیردریایی کلاس متوسط استفاده کرده و در ادامه تأثیر زاویه‌ی اسکيو بر عملکرد هیدرودینامیکی را بررسی کرده‌اند. این بررسی نخست شامل تحلیل عملکردی یک پروانه پنج‌پره‌ای در سرعت‌های دورانی ثابت و سرعت‌های جریان مختلف و تعیین گشتاور، تراست و راندمان پروانه می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر راندمان حداکثر ۰/۶ برای پروانه و سرعت حداکثر ۳/۶ گره‌ی دریایی برای زیردریایی است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد با افزایش زاویه‌ی اسکيو دامنه‌ی تغییرات گشتاور و تراست در یک سیکل دوران کاهش یافته که تأثیر زیادی بر کاهش ارتعاشات بدنه‌ی شناور ناشی از پروانه دارد [۵۸].

در سال ۱۳۹۱ رضانی و همکارانش در کار جالبی به بررسی علت شکست یک پروانه‌ی نیمه‌مغروق برنزی با انجام شکست‌انگاری بر روی آن پرداختند [۵۹]. آنها در کار خود بیان کردند که شکست از نوع خستگی بوده و علت آن جوشکاری غیراصولی می‌باشد.

شهرکی و سیف در سال ۱۳۹۳ با استفاده از روش مرجع چرخان، پروانه را در دو عمق غوطه‌وری ۵۰ و ۱۲۰ درصد مورد بررسی هیدرودینامیکی قرار دادند [۶۰]. آنها

ضرایب بر حسب تغییرات عمق غوطه‌وری برای پروانه‌ی مذکور، با بیان ریاضی نشان داده شده است [۶۵].

اسپو در کاری در سال ۱۳۹۵ یک نمونه پروانه‌ی نیمه‌مغروق با استفاده از هندسه‌ی مدل *SPP 841 - B* طراحی می‌کند و سپس در عمق‌های ۰/۵ و ۰/۴ برابر قطر پروانه از سطح آب در محیط دوفازی آب و هوا با استفاده از روش *MRF* به تحلیل هیدرودینامیکی می‌پردازد و نقطه عملکرد پروانه را با حداکثر بازده مشخص می‌کند و در نهایت با نتایج تجربی الفسون مقایسه می‌کند. نتایجی که از پژوهش خود به دست می‌آورد به این شکل بیان می‌کند که با افزایش سطح تماس پروانه در آب نیروهای رو به جلو و ضریب گشتاور افزایش می‌یابد، همچنین، بیان می‌کند که حداکثر بازده در ضریب پیشرو ۱/۱ اتفاق می‌افتد و حداکثر ضریب نیروی رو به جلو و گشتاور برای این نوع پروانه در ضریب پیشروی حدود ۰/۹ رخ می‌دهد [۶۶].

در کار دیگری سری و همکارش در سال ۱۳۹۵ با استفاده از یک کد بومی ساخت هندسه سه‌بعدی پروانه مدل *SPP 841 - B* و همچنین، شبکه‌بندی‌های مختلف در نرم‌افزارهای گمبیت و انسیس به صورت ساختاریافته و غیرساختاریافته به مقایسه روش خود با نتایج تجربی الفسون می‌پردازد. وی در کار خود بیان می‌کند که این مقایسه دارای خطای زیر ۷ درصد می‌باشد [۶۷].

#### ۴- نتیجه‌گیری

به طور کلی، اگر بخواهیم مهم‌ترین پژوهش‌های تجربی را ذکر کنیم در چهار پژوهش مهم، پروانه‌ی نیمه‌مغروق مورد بررسی قرار داده شده است که مبنای بسیاری از پژوهش‌های تجربی و عددی دیگر می‌باشد. در جدول ۱، خلاصه‌ای از این چهار پژوهش تجربی ارائه شده است.

۱۰۰٪، سهم تولید نیرو در پره بالایی کمتر از بقیه‌ی پره‌ها می‌باشد که علت این امر این است که پره بالایی سهم اندکی در تولید نیرو داشته و بیش‌تر عامل ایجاد درگ است [۶۲].

در کار دیگری قاسمی و یاری در سال ۱۳۹۴ به بررسی رفتار جریان سیال حول پروانه‌ی نیمه‌مغروق با در نظر گرفتن اثر پارامتر هوادهی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی بر پایه‌ی *RANS* پرداختند. در این کار، نحوه‌ی شکل‌گیری، رشد و توسعه ناحیه‌ی هوادهی حول پروانه‌ی نیمه‌مغروق از نوع *SPP 841 - B* از لحظه ورود به آب تا خروج آن مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. ضرایب هیدرودینامیکی نیرو-ممان و فرم ناحیه‌ی هوادهی در مقادیر مختلف از ضرایب پیشروی و در مقدار مشخص عدد فرود و عدد کواپتاسیون ارائه شده است که بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش رشد، توسعه و افزایش ضخامت هوادهی نزدیک نوک پره و بیش‌ترین مقدار بوده است [۶۳].

سیدی و همکاران در سال ۱۳۹۴ به طراحی یک تونل آب سطح آزاد به منظور تست پروانه‌های نیمه‌مغروق پرداختند که در آن مراحل ساخت تونل کواپتاسیون سطح آزاد آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرودینامیک، آکوستیک و پیشران‌ش دریایی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل و نحوه‌ی محاسبات بخش‌های مختلف آن از جمله زانویی، نازل، محفظه‌ی آرامش، مقطع تست، دیفیوزر و چگونگی محاسبه‌ی اُفت‌های فشار و انتخاب پمپ مناسب ارائه شده است [۶۴].

اکبری و همکاران در سال ۱۳۹۵ به بررسی ضرایب هیدرودینامیکی پروانه‌ی نیمه‌مغروق در عمق‌های مختلف غوطه‌وری و بر پایه‌ی نتایج تجربی آزمایشگاهی پرداختند. در این مقاله، ساخت مدل پروانه و تست در حوضچه کشش آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس (توسط دینامومتر اپن واتر)، تماماً بر اساس معیارهای *ITTC* انجام گرفته شده است و در انتها روابط میان تغییرات

جدول (۱): خلاصه‌ی مهم‌ترین پژوهش‌های تجربی پیشین.

پژوهشگر	سال	نوع پژوهش	دستاورد
هادلر و هکر	۱۹۶۸	تجربی	یکی از اولین و جامع‌ترین بررسی‌های انجام شده در زمینه‌ی پروانه‌های نیمه‌مغروق

بررسی چند پروانه‌ی نیمه‌مغروق با گام‌های متفاوت در عوق غوطه‌وری و زوایای عمودی شفت مختلف و موفقیت در کاهش عدد کاویتاسیون	تجربی	۱۹۹۱- ۱۹۹۳	رز و همکارانش
بررسی پروانه‌ی نیمه‌مغروق در عوق غوطه‌وری و زوایای عمودی شفت متفاوت	تجربی	۱۹۹۶	فراندو و اسکاماردلا
بررسی کامل پروانه‌ی نیمه‌مغروق در حالات مختلف و ارائه‌ی نتایج مربوط به حالت گذرای پره	تجربی	۱۹۹۶	الافسون

همچنین، خلاصه‌ای از مهم‌ترین پژوهش‌های عددی برتر و پیشگام در زمینه‌ی پروانه‌های نیمه‌مغروق در جدول ۲ ارائه شده است.

در بین این چهار پژوهش تجربی ذکر شده، تحقیق الافسون در بین پژوهشگران از محبوبیت و اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است؛ به طوری که حجم بسیاری از تحقیقات داخلی و خارجی انجام گرفته، مرتبط با این پژوهش می‌باشد.

جدول (۲): خلاصه‌ی مهم‌ترین پژوهش‌های عددی پیشین.

دستاوردها	نوع پژوهش	سال	پژوهشگر
یکی از اولین تحلیل‌های تئوری مبتنی بر تئوری هیدروفویل	تئوری خط برآ	۱۹۶۱	یگورو و سادونیکو
تعمیم روش‌های موجود برای در نظر گرفتن هوادهی و جریان سه‌بعدی	تئوری خط برآ	۱۹۸۵	فورویا
تحلیل فویل سه‌بعدی کاملاً هوادهی شده که به سطح آب برخورد می‌کند	تئوری خط برآ	۱۹۹۲	وانگ و همکارانش
بررسی ماهیت نوسانی و گذرای نیروها و گشتاورهای وارد شده به پره‌ها	تئوری خط برآ	۱۹۹۱	وروس
ارائه‌ی اولین کاربردهای روش المان مرزی برای تحلیل جریان اطراف هیدروفویل نیمه‌مغروق و کاملاً هوادهی شده	المان مرزی	۱۹۹۵	ساوینا و کیناس
ارائه‌ی بررسی‌های متعدد از پروانه‌ی نیمه‌مغروق و همچنین بررسی سازه‌ای این پروانه‌ها	المان مرزی	۲۰۰۳	یانگ
استفاده از کد تجاری کومت بر پایه‌ی رنس و بررسی جریان دوفازی به همراه در نظر گرفتن سطح آزاد	دینامیک سیالات محاسباتی	۱۹۹۳	کاپونتو
ارائه‌ی بررسی‌های متعدد از پروانه‌ی نیمه‌مغروق و همچنین بررسی سازه‌ای این پروانه‌ها	المان مرزی	۲۰۱۶	قاسمی

می‌توان به نیاز به پایگاه داده‌های گسترده‌تر از پروانه سطح‌رو، شناخت قوانین تعمیم نتایج تست مدل به پروانه‌ی واقعی، بررسی اندرکنش بدنه و پروانه‌ی سطح‌رو، بررسی سیستم رانش از نقطه نظر خستگی، بررسی دقیق اثر پارامترهای مؤثر بر روی پروانه‌ی نیمه‌مغروق مانند پارامترهای بی‌بعد، زوایای شفت، خصوصاً زاویه‌ی افقی شفت و ... اشاره کرد که نمونه‌های این موارد مبنای کار پژوهش‌های آینده محققان خواهد بود.

همان طور که در این پژوهش ملاحظه شد، محققان در تحلیل عددی پروانه‌های نیمه‌مغروق علاقه‌ی زیادی به روش المان مرزی دارند و برخلاف آن از روش حجم محدود بسیار کم استفاده شده است؛ به طوری که تاکنون هیچگونه تحقیق جامعی در زمینه پروانه‌ی نیمه‌مغروق با استفاده از روش حجم محدود انجام نشده است. نهایتاً می‌توان بیان کرد که مجموعه‌ی پژوهش‌های گذشته نشان دادند که هنوز نکات زیادی برای شناخت بهتر پروانه‌های نیمه‌مغروق وجود دارد. از جمله‌ی آنها

- [14] Olofsson, N., "Force and flow characteristics of a partially submerged propeller," Chalmers university of technology, 1996.
- [15] Keller, M., "Full-scale measurements on a ventilated propeller," Proc. FAST 95, Lubeck-travermunde, Germany, Vol. 2, pp. 991-1002, 1995.
- [16] Kamen, P., "Surface piercing propellers," [www.well.com/user/pk/SPAproboat.html](http://www.well.com/user/pk/SPAproboat.html) (from Professional Boatbuilder Magazine), 1998.
- [17] Dyson, P. K., "The modelling, testing and design of a surface piercing propeller drive," PhD Thesis; University of PLYMOUTH, 2000.
- [18] Peterson, D., "Surface piercing propeller performance," MSc Thesis. Naval Postgraduate School, 2005.
- [19] Viviani, M., Podenzana, B. C., Mauro, S., Cerruti, M., Guadalupi, D., Menna, A., "Analysis of asymmetrical shaft power increase during tight manoeuvre," 9th International conference on high performance marine vehicles (FAST), Shanghai, China, 2007.
- [20] Coraddu, A., Dubbioso, G., Mauro, S., Viviani, M., "Experimental investigation of asymmetrical propeller 129 behavior of twin screw ships during manoeuvres," In Proc. of int. conf. on marine simulation and ship maneuverability MARSIM2012, Singapore, 2012.
- [21] Oberembt, H., "Zur bestimmung der instationären flügel kräfte bei einem propeller mit aus dem wasser herausschlagenden flügeln," University of Hamburg, 1968.
- [22] Gutsche, F., "Einfluss der Tauchung auf Schub und Wirkungsgrad von Schiffspropellern Schiffbauforschung," Vol. 6, No. 516, pp. 256-277, 1967.
- [23] Yegorov, I., Sadovnikov, Y., "Effect of instability on hydrodynamic characteristics of a propeller cutting the water surface," Sudostroyenige 1, pp. 15-17, 1961.
- [24] Wang, D. P., "Water entry and exit of a full ventilated foil," Journal of Ship Research; Vol. 21, pp. 44-68, 1977.
- [25] Wang, D. P., "Oblique water entry and exit of a fully ventilated foil," Journal of Ship Research; Vol. 23, pp. 43-54, 1972.
- [26] Furuya, O., "A performance prediction theory for partially submerged ventilated propellers," 15th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, 1984.

- [1] Shiba, H., "Air-drawing of marine propellers," Report of transportation technical research institute, 9, 1-320, 1953.
- [2] Hadler, J. B. and Hecker, R., "Performance of partially submerged propellers," In The 7th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, 1968.
- [3] Shaozong, L. and Hengshun, Z., "An experimental study on the performance of partially submerged propeller," Int'l High Performance Vehicle Conference, Shanghai, China, CSNAME, 1988.
- [4] Hecker, R., "Experimental performance of a partially submerged propeller in inclined flow," (No. Paper F), 1973.
- [5] Kruppa, C. F. L., "Testing of partially submerged propellers," Proc 13<sup>th</sup> ITTC Report of Cavitation Cttee, Berlin & Hamburg, Appendix V, y 1, 1972.
- [6] Allison, J., "Propellers for high-performance craft. marine technology," Vol. 15, No. 4, pp. 335-380, 1978.
- [7] Kruppa, C. F. L., "Testing surface piercing propellers," Marine Workshops on Advance Vessel Station Keeping, Propulsor-hull interaction & Nautical Simulators, Wageningen, 1992.
- [8] Rose, J. C. and Kruppa, C. F. L., "Methodical series model test results," Proc FAST'91, Trondheim, Norway, v2, 1991.
- [9] Rose, J., Kruppa, C. F. L., and Koushan, K., "Surface piercing propellers -propeller/hull interaction, proceedings," FAST 93, December, Yokohama, Japan, pp. 867-881, 1993.
- [10] Radojic, D. and Matic, D., "Regression analysis of surface piercing propeller series," Nav & HSMV Intl Conf, Naples, 1997.
- [11] Ferrando m., Scamarella A., Bose, N., Lui, P., and Veitch, B., "Performance of a family of surface piercing propellers," Royal Institute for Naval Architects (RINA), 2002.
- [12] Ferrando, M., and Scamardella, A., "Surface piercing propellers: testingmethodologies, results analysis and comments on open water characteristics," 1996.
- [13] Olofsson, N., "A contribution on the performance of partially submerged propellers," Proc FAST '93, Yokohama, Japan, Vol. 1, pp. 765-776, 1993.

design of cavitating propeller blades," Master's Thesis, UT Austin, Department of Civil Engineering, also, UT Ocean Engineering, Report 99-1, 1999.

[39] Savineau, C., and Kinnas, S., "A numerical formulation applicable to surface piercing hydrofoils and propellers," In 24th American Towing Tank Conference, Texas A&M University, College Station, TX, 1995.

[40] Young, Y. L., "Numerical modeling of super cavitations and surface-piercing propellers," PhD Thesis. The University of Texas at Austin, 2002.

[41] Young, Y., and Savander, B., "Transient hydroelastic analysis of surface piercing propellers," In: The Seventh International Symposium on Cavitation, CAV2009, Ann Arbor, MI, USA, 2009.

[42] Heimei, K., "Numerical analysis of unsteady open water characteristic of surface piercing propeller," 3rd International Symposium on Marine Propulsors. Tasmania, Australia, 2013.

[43] Caponnetto, M., "RANSE simulations of surface piercing propellers," In: NuTTS 2003, Sixth Numerical Towing Tank Symposium, Roma, Italy, 2003.

[44] Young, Y., and S. Kinnas. "Numerical analysis of surface-piercing propellers." In 2003 Propeller and Shaft Symposium, pp. 4-1. 2003.

[45] Koushan, K., "Dynamics of ventilated propeller blade loading on thrusters," In World Maritime. Technology Conference - WMTC'06, 2006.

[46] Califano, A., and Steen, S., "Analysis of different propeller ventilation mechanisms by means of RANS simulations," In First International Symposium on Marine Propulsors, Trondheim, Norway, 2009.

[47] Yari, E., and Ghassemi, H., "Numerical analysis of surface piercing propeller in unsteady conditions and cupped effect on ventilation pattern of blade cross-section," Journal of Marine Science and Technology, Vol. 21, No. 3, pp. 501-516, 2016.

[48] Yari, E., and Ghassemi, H., "Hydrodynamic analysis of the surface-piercing propeller in unsteady open water condition using boundary element method," International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 22-37, 2016.

[27] Furuya, O., "A performance prediction theory for partially submerged ventilated propellers," Journal of Fluid Mechanics; Vol. 151, pp. 311-335, 1985.

[28] Wang, G., Zhu, X., and Sheng, Z., "Hydrodynamic forces of a three dimensional fully ventilated foil entering water," Journal of Hydrodynamics, Vol. 5, No. 2, 1990.

[29] Wang, G. Q., Jia, D. S., and Sheng, Z. B., "Study on propeller characteristics near water surface," Proc 2nd Symp on Propeller & Cavitation, Hangzhon, China, pp. 161-168, 1992.

[30] Vorus, W. S., "Forces on surface-piercing propellers with inclination," Journal of Ship Research, Vol. 35, No. 3, pp. 210-218, 1991.

[31] Wang, G., Jia, D., and Sheng, Z., "Hydrodynamic performance of partially submerged ventilated propeller," Shipbuilding of China 2, 1990.

[32] Kudo, T., and Ukon, Y., "Calculation of supercavitating propeller performance using a vortex-latticemethod," In Second International Symposium on Cavitation, pp. 403-408, Tokyo, Japan, 1994.

[33] Kudo, T., and Kinnas, S., "Application of vortex/source lattice method on supercavitating propellers," In 24th American Towing Tank Conference, College Station, TX, 1995.

[34] Kerwin, J., and Lee, C. S., "Prediction of steady and unsteady marine propeller performance by numerical lifting-surface theory," Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers 86, pp. 218-253, 1978.

[35] Lee, H., Gu, H., Kakar, K., and Kinnas, S., MPUF-3A (Version 2. 0) User's Manual and Documentation, Technical Report No. 01-5, Ocean Engineering Group, UT Austin, 2001.

[36] Lee, C. S., "Prediction of steady and unsteady performance of marine propellers with or without cavitation by numerical lifting surface theory," Ph.D. Thesis, M. I. T., Department of Ocean Engineering, 1979.

[37] Breslin, J., Van Houten, R., Kerwin, J., and Johnsson, C. A., "Theoretical and experimental propeller-induced hull pressures arising from intermittent blade cavitation, loading, and thickness," Transactions of SNAME 90, 1982.

[38] Kosal, E., "Improvements and enhancements in the numerical analysis and

[۵۸] قاسمی، حسن، شمسی، رضا، «بررسی و تحلیل هیدرودینامیکی پروانه‌ی زیردریایی تحت اثرات زاویه اسکيو»، سیزدهمین همایش ملی صنایع دریایی ایران، جزیره کیش، انجمن مهندسی دریایی ایران، ۱۳۹۰.

[۵۹] رضانی، مجتبی، رضوانی‌فر، علی، گلیانی، مهدی، سیدی‌نسب، سیدمهدی، «مطالعه و بررسی دلایل شکست پروانه‌ی نیمه‌مغروق مورد کاربرد در شناور تندرو»، چهاردهمین همایش صنایع دریایی، تهران، انجمن مهندسی دریایی ایران، ۱۳۹۱.

[۶۰] شهرکی، فاطمه، سیف، محمدسعید، «تحلیل هیدرواستیک پروانه‌ی نیمه‌مغروق». پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی شریف. شهریور ۱۳۹۳.

[۶۱] یاری، احسان، قاسمی، حسن، «آنالیز پارامتر هوادهی در تحلیل جریان حول هیدروفویل نیمه‌مغروق»، شانزدهمین همایش صنایع دریایی، بندرعباس، انجمن مهندسی دریایی ایران، ۱۳۹۳.

[۶۲] ذبیح‌زاده روشن، سعید، سیف، محمدسعید، «تحلیل هیدرودینامیک پروانه‌ی نیمه‌مغروق»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی شریف. پاییز ۱۳۹۴.

[۶۳] یاری، احسان، قاسمی، حسن، «بررسی رفتارپدیده‌ی هوادهی - کویتاسیون بر روی پروانه‌ی نیمه‌مغروق تحت شرایط آب آزاد»، هفدهمین همایش صنایع دریایی، جزیره کیش، انجمن مهندسی دریایی ایران، ۱۳۹۴.

[۶۴] دنیوی‌زاده، نگین، شفقت، روزبه، سیدی سیدمصطفی، «توسعه الگوریتم طراح‌ی پروانه‌ی نیمه‌مغروق»، هفدهمین همایش صنایع دریایی، جزیره کیش، انجمن مهندسی دریایی ایران، ۱۳۹۴.

[۶۵] علی‌اکبری، تقی، حداد، تکتیم، کربلایی، اکبرمحمد، مقدس آهنگری، علی‌اصغر، «بررسی ضرایب هیدرودینامیکی پروانه‌ی نیمه‌مغروق در عمق‌های مختلف غوطه‌وری»، هجدهمین همایش صنایع دریایی، جزیره کیش، انجمن مهندسی دریایی ایران، ۱۳۹۵.

[۶۶] اسپو، محسن، «بررسی دقت شبیه‌سازی عددی پروانه‌ی نیمه‌مغروق به روش  $MRF$  به منظور تخمین ضرایب هیدرودینامیکی مؤثر»، هجدهمین همایش صنایع دریایی، جزیره کیش، انجمن مهندسی دریایی ایران، ۱۳۹۵.

[۶۷] سری، حمید، جمشیدی، بهروز، «تحلیل هیدرودینامیکی شناور پروانه‌ی نیمه‌مغروق  $B - ۸۴۱$ »، هجدهمین همایش صنایع دریایی، جزیره کیش، انجمن مهندسی دریایی ایران، ۱۳۹۵.

[49] Yari, E., and Ghassemi, H., "Numerical study of surface tension effect on the hydrodynamic modeling of the partially submerged propeller's blade section," Journal of Mechanics, pp. 1-12, 2016.

[50] Alimirzazadeh, S., Roshan, S. Z., and Seif, M. S., "Unsteady RANS simulation of a surface piercing propeller in oblique flow," Applied Ocean Research, Vol. 56, pp. 79-91, 2016.

[51] Javanmardi, N., and Ghadimi, P., "Hydroelastic analysis of a semi-submerged propeller using simultaneous solution of Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and linear elasticity equations," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 1475090217691864, 2017.

[۵۲] بابایی، لادن، سعیدکیاست، مهدی، قاسمی، حسن، «بررسی سازه‌ای پروانه‌ی نیمه‌مغروق با در نظر گرفتن نیروهای تحریک هیدرودینامیکی»، یازدهمین همایش ملی صنایع دریایی ایران، جزیره کیش، انجمن مهندسی دریایی ایران، ۱۳۸۸.

[۵۳] قاسمی، حسن، یاری، احسان، طاهری‌نسب، محسن، «بررسی عددی عملکرد هیدرودینامیکی پروانه‌ی سطحی در دو حالت کاملاً مغروق و نیمه‌مغروق»، یازدهمین همایش ملی صنایع دریایی ایران، جزیره کیش، انجمن مهندسی دریایی ایران، ۱۳۸۸.

[۵۴] قصاب‌زاده، مرتضی، قاسمی، حسن، نظری، ابوالفضل، «استفاده از روش المان مرزی در تحلیل هیدرودینامیکی پروانه‌ی نیمه‌مغروق»، یازدهمین همایش ملی صنایع دریایی ایران، جزیره کیش، انجمن مهندسی دریایی ایران، ۱۳۸۸.

[۵۵] معماریان، حمیدرضا، زراعتگر، حمید، بخشنده‌رستمی، علی، «طراحی پروانه‌ی نیمه‌مغروق برای یک شناور تندرو»، یازدهمین همایش ملی صنایع دریایی ایران، جزیره کیش، انجمن مهندسی دریایی ایران، ۱۳۸۸.

[۵۶] عزیزی ینگجه، مرتضی، سیف، محمدسعید، مهدیقلی، حمید، «تعیین دور پروانه در آزمایش‌های مدل پروانه‌ی نیمه‌مغروق»، یازدهمین همایش ملی صنایع دریایی ایران، جزیره کیش، انجمن مهندسی دریایی ایران، ۱۳۸۸.

[۵۷] قاسمی، حسن، نظری، ابوالفضل، قصاب‌زاده مرتضی، «عملکرد هیدرودینامیکی پروانه‌های نیمه‌مغروق»، مهندسی مکانیک شریف، دوره ۳-۲۶، شماره ۱، ۱۳۸۸.