



بررسی مشخصات موج و مقاومت موجی یک جسم زیرسطحی به همراه سطح کنترل در نزدیکی سطح آزاد

علی اکبر ملتانی شاهرخت^۱، محمود پسندیده فرد^{۲*} و محمد جواد مغربی^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶

چکیده

اجسام زیرسطحی در کاربردهای صنعتی دارای سطوح کنترل مختلفی برای پایداری، مانورپذیری، هدایت و کنترل می‌باشند. این سطوح کنترل، مشخصات هیدرودینامیکی جسم، شامل نیروهای مقاومت و شکل موج ایجاد شده ناشی از حرکت جسم، نزدیک سطح آزاد را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این مقاله، اثر یک سطح کنترل عمودی روی مشخصات هیدرودینامیکی یک جسم زیرسطحی، در نزدیکی سطح آزاد با استفاده از روش المان مرزی بررسی شده است. نتایج شامل مشخصات موج سطح آزاد، ضریب فشار و مقاومت موجی در بازه اعداد فرود ۰/۱ تا ۰/۵ و برای عمق‌های غوطه‌وری بی‌بعد ۱/۲۵، ۲/۲۵، ۳/۵ و ۴/۵ برای مدل ساده و مدل با سطح کنترل محاسبه شده‌اند. مقایسه نتایج روش المان مرزی و تجربی، اختلاف کمتر از ۳ درصدی نتایج برای حداکثر طول موج سطح آزاد و ۱۷ درصدی برای مقاومت موجی را نشان می‌دهد. نتایج پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که سطح کنترل موجب افزایش حدود ۱۳ درصدی حداکثر ارتفاع موج سطح آزاد و ۱۶ درصدی مقاومت موجی می‌شود. این افزایش، بواسطه برهم‌کنش بین مدل و سطح کنترل و همچنین نسبت مستقیم مقاومت موجی با ارتفاع موج سطح آزاد است.

کلمات کلیدی: روش المان مرزی؛ سطح آزاد؛ مشخصات موج؛ مقاومت موجی؛ سطح کنترل.

Investigation of Wave Characteristics and Wave Resistance of an Underwater vehicle with Control Surface Near the Free Surface

A.A. Moltani Shahrakht¹, M. Pasandideh Fard^{2*}, M.J. Maghrebi³

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., Ferdowsi Univ of Mashhad., Mashhad, Iran.

² Prof., Mech. Eng., Ferdowsi Univ of Mashhad., Mashhad, Iran.

³ Prof., Mech. Eng., Ferdowsi Univ of Mashhad., Mashhad, Iran.

Abstract

Underwater vehicles in industrial applications, have various control surfaces for stability, maneuverability, guidance and control. These control surfaces affect the body hydrodynamic characteristics, including the resistance forces and the form of the generated wave due to the motion of the vehicle near the free surface. In this paper the effect of a vertical control surface on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near free surface is studied using Boundary Element Method. Results, including characteristics of free surface wave, pressure coefficient and wave resistance are calculated for Froude numbers in the range of 0.1-0.5 and nondimensional submergence depths of 1.25, 2.25, 3.5 & 4.5 for the bare model and model with control surface. Comparing BEM and experimental results shows the discrepancy of less than 3% for maximum free surface wave height and 17% for wave resistance. Predicted results indicates that control surface causes an increase of about 13% in maximum free surface wave height and 16% in wave resistance. This increment is due to the interaction of the main body with control surface and also direct relation of wave resistance with free surface wave height.

Keywords: Boundary Element Method; Free Surface; Wave Characteristics; Wave Resistance; Control Surface

۱- مقدمه

با توجه به اهمیت و کاربرد روزافزون اجسام زیرسطحی^۱ در نواحی ساحلی و نزدیک سطح، همچون جستجو، اندازه‌گیری، اکتشاف و استخراج در اقیانوس‌ها و دریاها و پایش‌ها و مراقبت‌های محیطی، مطالعات گسترده‌ای در زمینه اثرات سطح آزاد بر مشخصات هیدرودینامیکی و دینامیک این اجسام در نزدیکی سطح آزاد صورت گرفته است؛ همچنین کنترل و مانورپذیری این اجسام، هنگامی که در محیط‌های نزدیک سطح آزاد عمل می‌کنند، بسیار بحرانی‌تر می‌شود، به طوری که ریسک بسیار بالایی در این شرایط برای افراد و خود جسم بواسطه برهم کنش بین سطح و جسم بوجود می‌آید؛ در نتیجه به منظور رسیدن به یک طراحی درست و ایمن و پیش‌بینی مانورپذیری اجسام زیرسطحی، درک درستی از هیدرودینامیک و دینامیک آن‌ها در نزدیک سطح آزاد نیاز است [1].

نیروهای پسای وارد بر یک جسم کاملاً مغروق در آب شامل نیروهای پسای اصطکاکی و فشاری می‌باشند؛ اما هنگامی که جسم به سطح آزاد نزدیک می‌شود، در نتیجه برهم‌کنش بین جسم و سطح آزاد، امواجی روی سطح آزاد تولید می‌شود که انرژی مورد نیاز برای تولید این امواج سطحی منجر به افزایش نیروی مقاومت جسم زیرسطحی می‌شود [2]. به نیروی مقاومت ناشی از امواج سطح آزاد نیروی مقاومت موجی^۲ گفته می‌شود.

تحقیقات گسترده‌ای از دیرباز تاکنون با استفاده از روش‌های تحلیلی، عددی و تجربی برای یافتن ضرایب هیدرودینامیکی اجسام زیرسطحی در نزدیکی سطح آزاد انجام شده است. در این میان دو روش عددی معمول برای پیش‌بینی و تحلیل جریان سیال حول یک جسم زیرسطحی در نزدیکی سطح آزاد، روش حجم سیال^۳ مبتنی بر معادلات رنژ^۴ و روش مبتنی بر تئوری جریان پتانسیل^۵ می‌باشند. مزیت روش جریان پتانسیل این است که از نظر محاسباتی بازدهی بسیار بالایی دارد و قابلیت رسیدن به جواب را در

مدت بسیار کمتری نسبت به روش حجم سیال فراهم می‌کند؛ اما کاربرد این روش نیازمند در نظر گرفتن فرضیاتی است. این روش فرض می‌کند، جریان، غیر قابل تراکم، غیر لزج، پایا و غیر چرخشی است. با توجه به این فرضیات، علیرغم این‌که این روش برای محاسبه نیروی مقاومت موجی و موج سطح آزاد دقت بالایی دارد، اما با این روش نمی‌توان نیروی مقاومت ناشی از لزجت سیال را بدست آورد؛ همچنین کاربرد این روش محدود به حالتی است که جسم زیرسطحی با سرعت ثابت در زاویه حمله صفر و مسیر مستقیم حرکت می‌کند [3].

در سال‌های اخیر محققین زیادی به بررسی مشخصات هیدرودینامیکی اجسام زیرسطحی متحرک در نزدیکی سطح آزاد، در عمق‌های غوطه‌وری و اعداد فرود مختلف با استفاده از حل عددی مبتنی بر معادلات رنژ و مدل‌های آشفتگی مختلف یک و دو معادله‌ای پرداخته‌اند. جاگادیش و مورالی [4] به بررسی اثر سطح آزاد بر ضرایب هیدرودینامیکی یک جسم متقارن محوری در اعداد رینولدز و زوایای حمله متفاوت در عمق‌های غوطه‌وری مختلف پرداختند. آن‌ها اثر تغییر مدل آشفتگی را با استفاده از دو مدل آشفتگی رینولدز بالا و یک مدل رینولدز پایین مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که مدل $K - \epsilon$ ریلایزبل^۶ در کنار روش حجم سیال^۷ بهترین عملکرد را در پیش‌بینی اثر سطح آزاد بر ضرایب هیدرودینامیکی مدل دارد. ویلسون هافندن [5] با استفاده از مدل آشفتگی $K - \omega SST$ و آزمایشات تجربی به بررسی تغییرات نیروی پسای یک جسم زیرسطحی، ناشی از اثر سطح آزاد، در عمق‌ها و اعداد فرود مختلف پرداخت. او نتیجه گرفت که در اعداد فرود پایین، اثر سطح آزاد روی نیروی مقاومت در نسبت‌های عمق غوطه‌وری به قطر بیشتر از دو ناچیز است. منصورزاده و جوانمرد [6] با استفاده مدل آشفتگی $K - \epsilon$ و نتایج تجربی نشان دادند که ضرایب پسا و برای یک جسم زیرسطحی در نزدیک سطح آزاد، تابعی از عدد فرود و عمق غوطه‌وری جسم می‌باشند. نعمت‌اللهی [7] با استفاده از روشی مشابه روش منصورزاده و جوانمرد، نشان داد که کاهش عمق غوطه‌وری جسم متقارن محوری منجر به

¹ UVs² Wave Making Resistance³ volume of Fluid (VoF)⁴ Reynolds-Averaged Navier-Stokes⁵ Potential Flow (PF)⁶ Realizable⁷ VOF Method

پایداری جسم افزایش می‌یابد که موجب کاهش قابلیت مانور آن می‌شود.

اگرچه با پیشرفت کامپیوترها در سال‌های اخیر، تمایل محققین به استفاده از حل عددی مبتنی بر معادلات رنر برای بررسی هیدودینامیک اجسام زیرسطحی در نزدیکی سطح آزاد، افزایش یافته است، اما همچنان هزینه محاسباتی مورد نیاز شامل سیستم‌های کامپیوتری و زمان بر بودن حل‌های فوق، توجیه لازم را برای استفاده از روش‌های مبتنی بر جریان پتانسیل فراهم می‌کند. عدم نیاز به سیستم‌های کامپیوتری پیشرفته و زمان لازم برای حل مسئله که صدها برابر کمتر از روش‌های مبتنی بر معادلات ناویر استوکس است، در کنار نتایج دقیقی که با استفاده از این روش با در نظر گرفتن فرضیات حاکم بر مسئله بدست می‌آید، موجب شده است که تمایل محققین به کاربرد این روش افزایش یابد.

از طرفی، با توجه به اینکه لزجت سیال، منجر به ایجاد مقاومت اصطکاکی می‌شود، با در نظر گرفتن فرض غیر لزج بودن جریان، روش‌های مبتنی بر جریان پتانسیل، قابلیت محاسبه نیروی مقاومت ناشی از لزجت سیال را ندارند؛ اما تشکیل موج سطح آزاد و وجود مقاومت موجی، تابع مستقیم وزن سیال روی جسم زیر سطح آزاد است [۱۳]؛ در نتیجه استفاده از روش‌های مبتنی بر تئوری جریان پتانسیل (غیر لزج) برای یافتن مقاومت موجی و موج سطح آزاد بسیار مناسب به نظر می‌رسد.

شروع تحقیقات بر روی مشخصات موج تولیدی توسط اجسام زیرسطحی مغروق با استفاده از تئوری جریان پتانسیل به اوایل قرن بیستم توسط لامپ بر می‌گردد [۱۴]. تمرکز کار ایشان روی ارتفاع موج تولید شده توسط یک سیلندر مغروق در عمق کم در سیال با عمق بی‌نهایت بود. نتایج کار لامپ به عنوان اولین تحقیق در این زمینه توسط فارل [۱۵] برای محاسبه نوسانات سطح آزاد، بواسطه برهم‌کنش با جسم زیرسطحی مورد استفاده قرار گرفت. هاولاک [۱۶-۱۸] ضرایب مقاومت موجسازی^۶ مربوط به کره، بیضی‌دوار^۷ پهن و کشیده و بیضی‌گون^۸ را به دست آورد و نشان داد، این

افزایش ضریب پسا می‌گردد و علاوه بر این اثر سطح آزاد در هر عمق غوطه‌وری جسم زیرسطحی با افزایش عدد رینولدز بیشتر می‌شود. سالاری و راوا [۸] با استفاده از مدل آشفتگی $K - \omega SST$ نشان دادند که علاوه بر ضریب پسای یک جسم زیرسطحی در نزدیکی سطح آزاد، ضرایب لیفت و گشتاور پیچشی آن نیز با کاهش عمق غوطه‌وری جسم افزایش می‌یابند. شریعتی و موسوی زادگان [۹] به بررسی مقاومت و شکل موج تولیدی سطح آزاد آب در اثر حرکت یک مدل زیرسطحی با انجام آزمایشات و محاسبات عددی پرداختند و تأثیرات متقابل بازو و جسم زیرسطحی را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی و تعیین کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اثر بازوی اتصال بر روی نیروی مقاومت، غیرخطی بوده و روش جمع آثار معتبر نمی‌باشد. مالی امیری [۱۰-۱۱] با استفاده از مدل آشفتگی تنش رینولدز نشان داد که افزایش نیروهای هیدروینامیکی با کاهش عمق غوطه‌وری را می‌توان ناشی از اثر تغییرات سطح آزاد بر توزیع فشار دینامیکی اطراف جسم زیرسطحی دانست. بر این اساس نقاط تقعر و تحدب سیستم موج تشکیل شده باعث تغییر توزیع فشار دینامیکی اطراف جسم زیرسطحی و تغییر نیروهای وارد بر جسم می‌گردند. مالی امیری [۱۰] با استفاده از همین روش نشان داد، برای یک جسم زیرسطحی در نزدیکی سطح آزاد، برهم‌کنش بین امواج ناشی از قسمت‌های جلویی^۱ و میانی جسم^۲ نسبت به برهم‌کنش بین امواج ناشی از قسمت‌های جلو و عقب جسم^۳ اثر غالب را بر ضرایب ضرایب پسا، برا و گشتاور پیچشی جسم دارد. مالی امیری [۱۲] همچنین با استفاده از مدل آشفتگی تنش رینولدز، به بررسی اثر سطح آزاد بر قابلیت مانور یک جسم متقارن محوری زیرسطحی، در یک صفحه افقی در نزدیکی سطح آزاد پرداخت. نتایج او نشان می‌دهد که رفتار نیروهای عرضی^۴ و گشتاور یاو^۵ ناشی از ناحیه انتهایی جسم، باعث کاهش شدید پایداری جسم در بیشتر عمق‌های غوطه‌وری می‌گردد؛ همچنین با نزدیک شدن جسم به سطح آزاد،

¹ Bow

² Aft Shoulder

³ Stern

⁴ Lateral Force

⁵ Yaw

⁶ Wave-Making Resistance

⁷ Spheroid

⁸ Ellipsoid

زیرسطحی متقارن محوری و سطح آزاد پرداخت. نتایج ایشان علاوه بر نشان دادن نوسانی بودن ضرایب مقاومت موجی، لیفت و گشتاور پیچشی با تغییر عدد فرود، بیان می‌کند که این ضرایب به طور مستقیم متأثر از طول موج ایجاد شده در سطح آزاد ناشی از حرکت جسم زیرسطحی می‌باشند.

در میان تحقیقات انجام شده در زمینه اثر سطح آزاد بر یک جسم زیرسطحی متحرک در نزدیکی سطح آزاد، تقریباً تاکنون مطالعه‌ای روی اثر سطوح کنترل بر مشخصات هیدرودینامیکی اجسام زیرسطحی در نزدیکی سطح آزاد انجام نشده است و مطالعات انجام شده محدود به بررسی اثر برهم‌کنش جسم و سطح آزاد روی ضرایب هیدرودینامیکی و دینامیکی جسم زیرسطحی و موج تشکیل شده روی سطح آزاد برای یک جسم ساده^۴ بدون در نظر گرفتن سطوح کنترل کنترل بوده است. این در حالی است که در کاربردهای صنعتی به دلیل وجود سیستم‌های هدایت و کنترل، نیاز به وجود سطوح کنترل مختلف امری لازم و اجتناب ناپذیر است؛ لذا با توجه به خلأ موجود در این زمینه، مهمترین نوآوری کار حاضر، بررسی اثر اضافه کردن یک سطح کنترل عمودی^۵ روی مقاومت موجی، و موج سطح آزاد یک مدل متقارن محوری (مدل استاندارد جوبرت^۶) با استفاده از روش المان مرزی مبتنی بر جریان پتانسیل است. مقاومت موجی، شکل و ارتفاع موج سطح آزاد و توزیع فشار بر روی جسم، در دو حالت بدون سطح کنترل و با وجود سطح کنترل بدست می‌آیند. محاسبات در عمق‌های مختلف برای حالت بدون سطح کنترل و با وجود سطح کنترل انجام می‌گیرد. به منظور بررسی اثر تغییر عمق غوطه‌وری جسم، پارامتر عمق بی‌بعد به صورت $H = \frac{h}{D}$ تعریف می‌شود که h عمق غوطه‌وری جسم و D حداکثر قطر جسم زیرسطحی می‌باشند. محاسبات برای جسم در حالت بدون سطح کنترل در عمق‌های بی‌بعد ۰/۲، ۱/۲۵، ۲/۲۵، ۳/۵ و ۴/۵ انجام می‌گیرد و در حالتی که سطح کنترل به جسم اضافه می‌گردد، به دلیل برخورد سطح کنترل با سطح آزاد در عمق بی‌بعد ۰/۲، تحلیل در همه عمق‌های بی‌بعد بالا به جز ۱/۰۲ انجام می‌شود. فرض می‌شود، سرعت

ضرایب رفتاری نوسانی با تغییر عدد فرود از خود نشان می‌دهند و با افزایش عمق به صورت نمایی کاهش می‌یابند. هس و اسمیت [۱۹] روش المان‌بندی سطح^۱ را برای اجسام کاملاً مغروق با استفاده از چشمه‌های رانکین^۲ ارائه کردند. در این روش جسم به پنل‌هایی که هر کدام تراکم چشمه یکنواختی دارند گسسته می‌شود. باتاچاریا [۲۰] روش هس و اسمیت را با روابط پتانسیل چشمه‌های هاولاک برای محاسبه مقاومت موجی ترکیب کرد. این مسئله نیومن-کلون^۳ نامیده می‌شود، شود، به طوری که شرط مرزی دقیق (نیومن) روی جسم را با شرط مرزی خطی (کلون) روی سطح آزاد ترکیب می‌کند. این دیدگاه در ادامه توسط نویسندگان مختلفی چون جوول [۲۱] و هانگ [۲۲] نیز مورد استفاده قرار گرفته است. فارل به تحلیل عددی جسم بیضی‌گون دوکی‌شکل در نسبت‌های طول به قطر متفاوت با استفاده از تئوری پتانسیل و روش نیومن-کلون پرداخت. وایلی [۲۳]، داکترز و بک [۲۴] و کروک [۲۵] نشان دادند، به یک جسم متقارن محوری با نسبت طول به قطر بالا که با سرعت ثابت و زاویه حمله صفر در نزدیکی سطح حرکت می‌کند، علاوه بر مقاومت موجی، نیروی لیفت و گشتاور پیچشی نیز وارد می‌شود. ایشان همچنین بیان کردند، همه نیروهای فوق با تغییر عدد فرود به صورت نوسانی تغییر می‌کنند.

حل مبتنی بر جریان پتانسیل، در سالیان اخیر نیز توسط محققین زیادی همچون بلیبساکیس [۲۶]، گورالی و داسون [۲۷]، آرزانیکیوف و کوتلنیکوف [۲۸]، بنوسیگیلیو [۲۹]، ساوت و آنانتاگریشنام [۳۰] و نابلس [۳۱] برای ارزیابی اثر سطح آزاد روی مشخصات هیدرودینامیکی اجسام متحرک با سرعت ثابت، در زاویه حمله صفر و مسیر مستقیم در نزدیکی سطح آزاد به کار گرفته شده است. نتایج حاصل از این تحقیقات روند مشابهی برای ضرایب هیدرودینامیکی با آنچه افرادی چون هاولاک، وایلی، داکترز و بک و کروک بدست آوردند، نشان می‌دهد. علاوه بر این موارد، داسون [۱] با استفاده از تست‌های تجربی به همراه مطالعه عددی (با استفاده از تئوری جریان پتانسیل) به بررسی اثر عمق، عدد فرود و نسبت طول به قطر روی برهم‌کنش بین یک جسم

⁴ Bare Hull

⁵ Sail

⁶ Joubert

¹ Panel Method

² Rankine

³ Neumann-Kelvin

فرضيات اساسى حاكم بر جريان پتانسيل، شامل فرض جريان غيرلزج، غيرقابل تراكم، غير چرخشى و پايامى باشند؛ همچنين کاربرد اين روش براى مسئله حاضر محدود به حالتى است كه جسم زيرسطحى با سرعت ثابت در زاويه حمله صفر و مسير مستقيم (بدون هيچ گونه مانور) حركت كند.

معادله لاپلاس معادله حاكم بر جريان‌هاى پتانسيل است. اگرچه امكان حل مستقيم اين معادله وجود دارد، اما به دليل هزينه محاسباتى بالا و پيچيدگى‌هاى حل عددى آن، از روش‌هاى جايگزين حل كامل معادله لاپلاس، مانند روش المان مرزى بر مبنائى تئورى گرین استفاده مى‌شود. در تئورى گرین، انتگرال حجمى پتانسيل به انتگرال سطحى روى مرزهاى حوزه حل تبديل مى‌شود. بر اين اساس، مطابق رابطه ۲ پتانسيلى تحت عنوان "پتانسيل اختلالى" تعريف مى‌شود كه پتانسيل جريان آزاد را از بقيه اجزائى پتانسيلى حوزه حل تفكيك مى‌كند.

$$\Phi = \Phi + U_{\infty}x \quad (2)$$

در رابطه (۲) $\Phi(x, y, z)$ پتانسيل كل^۲، $\Phi(x, y, z)$ پتانسيل اختلالى^۳ در هر نقطه از ميدان حل و عبارت $U_{\infty}x$ پتانسيل جريان آزاد مى‌باشند. با توجه به فرض غيرچرخشى بودن جريان سيال، پتانسيل كل از طريق رابطه (۳) تعريف مى‌شود.

$$U = \nabla\Phi \quad (3)$$

در اين رابطه $U = U(x, y, z)$ توزيع سرعت سه بعدى در ميدان حل است.

پتانسيل كل و پتانسيل اختلالى بايد معادله لاپلاس را در حوزه حل ارضا نمايند.

$$\nabla^2\Phi = \nabla^2\phi = 0 \quad (4)$$

با اعمال تئورى سوم گرین بر روى رابطه (۴) براى جسم و سطح آزاد در دامنه حل، رابطه انتگرالى زير براى پتانسيل اختلالى روى سطح جسم و سطح آزاد حاصل مى‌شود:

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \int_{S_b + S_{Fs}} \left(\phi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi}{\partial n} \right) ds \quad (5)$$

در رابطه فوق G تابع گرین $(G = \frac{1}{r})$ ، S_b و S_{Fs} به ترتيب مرزهاى جسم و سطح آزاد و n بردار يکه عمود بر سطح

جريان ثابت باشد و مقدار سرعت طورى انتخاب شده است كه عدد فرود جريان مطابق رابطه (۱) بين ۰/۱ تا ۰/۵ باشد.

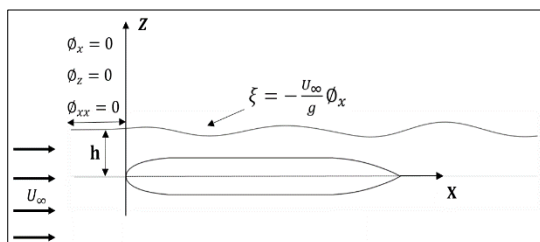
$$Fr_L = \frac{U_{\infty}}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

در اين رابطه U_{∞} سرعت جريان آزاد، $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$ شتاب گرانش و L طول جسم مى‌باشند. ارتفاع سطح کنترل در تحليل‌ها برابر ۱۴۰ ميليتر در نظر گرفته شده است. مدل زيرسطحى جوهرت و ابعاد آن در حالات با و بدون وجود سطح کنترل در شكل ۴-الف و ب نشان داده شده‌اند.

براى تحليل جريان حول جسم در نزديكى سطح آزاد، از يك روش تکرار مبتنى بر تئورى گرین^۱ استفاده مى‌شود. در اين روش، جسم و سطح آزاد به عنوان دو مسئله جدا در نظر گرفته مى‌شوند و سطح جسم و سطح آزاد با المان‌هاى شامل چشمه و دوگان تقريب زده مى‌شوند. سپس اثرات جسم و سطح آزاد روى يکديگر با مقادير پتانسيل القائى هر کدام روى ديگرى محاسبه مى‌شود. با حل عددى معادله انتگرال‌ها، مقادير مجهول پتانسيل‌هاى اختلالى روى سطح آزاد و جسم بدست مى‌آيد و در هر تکرار اصلاح مى‌شود تا مسئله همگرا شود.

۲- فرضيات مسئله و معادلات حاكم

شكل ۱ نماى دو بعدى يك جسم متقارن محورى زيرسطحى متحرك در نزديكى سطح آزاد (هندسه اصلى مسئله حاضر) را نشان ميدهد كه در معرض جريان ورودى يكنواخت با سرعت U_{∞} قرار گرفته است. سطح آزاد آرام در فاصله $z=h$ از محور جسم قرار گرفته است.



شكل ۱- نماى دوبعدى جسم زيرسطحى مغروق در نزديكى سطح آزاد و موج حاصل از حركت جسم

²Total Velocity Potential

³Perturbation Potential

¹Green's Theorem

جسم و سطح آزاد می‌باشند؛ همچنین $r = r_2 - r_1$ فاصله دو نقطه ۱ و ۲ در میدان حل است که اثر پتانسیل نقطه ۲ در نقطه ۱ احساس می‌شود [۳۵].

در مطالعه حاضر، یک روش المان مرزی بر پایه تکرار^۱ برای حل مسئله به کار می‌رود. این روش حل شامل دو قسمت می‌باشد: الف- قسمت مربوط به جسم که برای پتانسیل اختلالی مجهول روی سطح جسم حل می‌شود و ب- قسمت مربوط به سطح آزاد که برای پتانسیل اختلالی مجهول روی سطح آزاد حل می‌گردد. با استفاده از رابطه (۵) پتانسیل در میدان حل بواسطه اثر جسم ϕ_b و اثر سطح آزاد ϕ_{FS} به ترتیب طبق روابط (۶) و (۷) قابل بازنویسی می‌باشند.

$$\phi_b = \frac{1}{2\pi} \int_{S_b} \left(\phi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi}{\partial n} \right) ds \quad (6)$$

$$\phi_{FS} = \frac{1}{2\pi} \int_{S_{FS}} \left(\phi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi}{\partial n} \right) ds \quad (7)$$

با جایگذاری دو رابطه (۶) و (۷) در رابطه (۵) به ترتیب روابط (۸) و (۹) بدست می‌آیند.

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \int_{S_{FS}} \left(\phi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi}{\partial n} \right) ds + \phi_b \quad (8)$$

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \int_{S_b} \left(\phi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi}{\partial n} \right) ds + \phi_{FS} \quad (9)$$

معادلات انتگرالی (۸) و (۹) را می‌توان با یک روش المان مرزی بر پایه تکرار حل کرد. در این روش، پارامترهای ϕ_b و ϕ_{FS} در طول فرآیند تکرار به طور مداوم به‌روز می‌شوند. در طول فرآیند حل، جسم و سطح آزاد از طریق پتانسیل القا- شده روی هم با یکدیگر در ارتباط هستند. الگوریتم حل مسئله به‌صورت زیر می‌باشد:

الف- حل معادله (۹) با در نظر گرفتن مقدار اولیه صفر برای ϕ_{FS} .

ب- به دست آوردن پتانسیل اختلالی ناشی از جسم در میدان جریان (ϕ_b) با قراردادن مقادیر پتانسیل بدست آمده از قسمت الف در معادله (۶).

ج- حل معادله (۸) با قرار دادن مقادیر پتانسیل از مرحله الف و ϕ_b از مرحله ب و بدست آوردن مقادیر جدید پتانسیل اختلالی در میدان حل.

د- بدست آوردن مقدار جدید ϕ_{FS} از معادله (۷) با استفاده از مقادیر جدید پتانسیل اختلالی از قسمت ج.

ه- حل مجدد معادله (۹) با در نظر گرفتن مقدار جدید ϕ_{FS} .

و- تکرار مراحل بالا تا رسیدن به شرایط همگرایی حل به صورتی که اختلاف بین مقادیر پتانسیل حاصل از معادلات ۸ و ۹ ناچیز گردد.

۳- شرایط مرزی

شرایط مرزی زیر در معادلات ذکر شده در قسمت قبل باید توسط تابع پتانسیل ارضا شوند:

الف- شرط مرزی سینماتیکی بر روی سطح جسم: بر اساس شرط نفوذ ناپذیری سطح، جریان هیچ مولفه عمودی بر سطح جسم ندارد.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial n} = -\vec{U}_\infty \cdot \vec{n} \quad (10)$$

که \vec{n} بردار یکه نرمال بر سطح جسم است.

ب- شرط مرزی سینماتیکی سطح آزاد: این شرط بیان می‌کند که ذرات سیال می‌بایست سطح آزاد را دنبال کنند.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = U_\infty \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad z = h \quad (11)$$

در رابطه فوق x و z به ترتیب مختصات افقی و عمودی (مطابق شکل ۱) و $\xi(x, y)$ منحنی موج سطح آزاد می‌باشند.

ج- شرط مرزی دینامیکی سطح آزاد: طبق این شرط، می‌بایست فشار روی سطح آزاد برابر فشار اتمسفر باشد. با نوشتن معادله برنولی روی سطح آزاد و صرف نظر کردن از ترم‌های مرتبه دوم رابطه (۱۲) حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + k \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad z = h \quad (12)$$

که $k = g/U_\infty^2$ عدد موج در عمق بی‌نهایت آب است.

د- شرط مرزی انتشار^۲: به منظور جلوگیری از ایجاد موج در بالادست جریان، می‌بایست مشتق اول و دوم پتانسیل

² Radiation

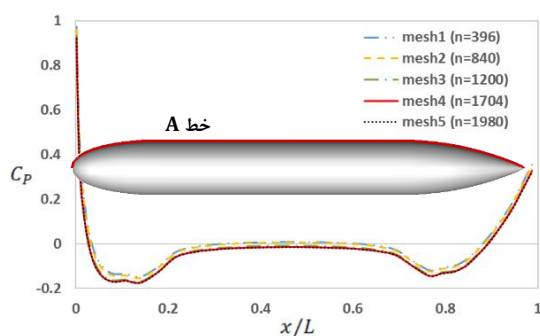
¹ Iterative BEM

بي بعد x/L در عدد فرود 0.3 و شرايطى كه جسم كاملاً مغروق^۱ است، براى بررسى استقلال از شبكه استفاده شده است. تغييرات ضريب فشار بر حسب x/L براى شبكه‌هاى مختلف در شكل ۲ ارائه شده است.

همانطور كه در شكل ۲ نشان داده شده است، با افزايش تعداد المان سطح جسم، مقدار ضريب فشار در هر نقطه روى خط A کاهش مي‌يابد. اما وقتى تعداد المان‌هاى سطح جسم از شبكه ۴ به شبكه ۵ افزايش مي‌يابد، توزيع ضريب فشار بدون تغيير مي‌ماند؛ لذا شبكه ۴ با تعداد 1704 المان براى جسم در همه شبكه‌سازي‌ها استفاده مي‌شود.

۴-۲- استقلال از شبكه سطح آزاد

براى بررسى استقلال از شبكه سطح آزاد، با توجه به وابستگى زياد موج سطح آزاد به شبكه سطح آزاد، حداكثر ارتفاع موج براى بررسى استقلال از شبكه سطح آزاد براى ۶ شبكه مختلف در عدد فرود 0.3 و در عمق بي بعد $1/0.2$ در خط مركزي جسم براى مدل جوبرت مورد بررسى قرار گرفته است. شبكه ۴ بدست آمده از قسمت قبل براى سطح جسم در اين قسمت نيز مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات شبكه‌هاى محاسباتى سطح آزاد در جدول ۱ آمده است. n_x تعداد المان‌هاى سطح آزاد در راستاى x ، n_y تعداد المان‌هاى سطح آزاد در راستاى y و n_{total} تعداد كل المان‌هاى سطح آزاد مي‌باشند. با توجه به شكل ۳، حداكثر ارتفاع موج سطح آزاد با افزايش تعداد المان‌هاى سطح از



شكل ۲- تغييرات ضريب فشار بر حسب پارامتر بي بعد طولى در عدد فرود 0.3 براى شبكه‌هاى مختلف جسم

اختلالى نسبت به جهت افق براى ناحيه بالادست جريان روى سطح آزاد برابر صفر باشد [۲۱].

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad x \rightarrow -\infty \quad (13)$$

جزئيات دليل استفاده از اين دو شرط مرزى در بالادست جريان در مراجع [۳۲-۳۳] به تفصيل مورد بحث قرار گرفته است. هيچ شرط مرزى براى جريان در پايين دست لازم نمى‌باشد.

براى اعمال شرط مرزى سطح آزاد (رابطه (۱۲)) عبارت $\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}$ را مي‌توان با عبارت‌هاى پتانسيل روى سطح آزاد با استفاده از طرح تفاضل محدود مرتبه چهارم داسون [۳۴] بدست آورد.

۴- گسسته سازى دامنه حل

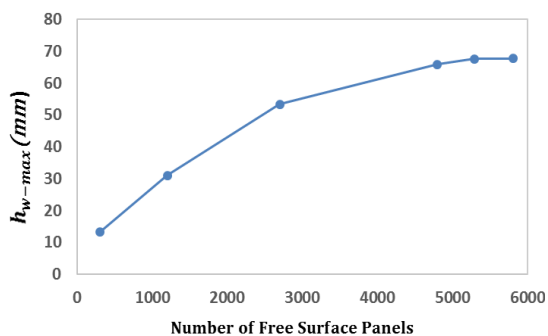
شرايط تقارن مسئله به ما اين امكان را مي‌دهد كه فقط نيمي از جسم و سطح آزاد مدل‌سازى شده شبكه‌بندي گردد (شكل‌هاى ۴ و ۵). طول سطح آزاد (در راستاى جريان) معادل شش برابر طول جسم (L) است. مقدار L در بالادست جسم براى گرفتن موجى است كه در بالادست لبه حمله جسم توليد مي‌شود و مقدار $4L$ در پايين دست جسم در نظر گرفته شده تا موج به ميزان كافي در پايين دست لبه فرار گسترش يابد. عرض سطح آزاد برابر $2L$ در نظر گرفته شده است تا موج توليدي ناشى از حركت جسم، نزديك سطح آزاد در نواحى انتهائى پايين دست جسم نيز خارج از دامنه سطح آزاد در راستاى عمود بر جريان قرار نگيرد [۱].

در كار حاضر براى شبكه بندي سطح جسم و سطح آزاد فقط سلول‌هاى چهاروجهى با نسبت طول به عرض تا حد امكان نزديك به يك استفاده شده است.

۴-۱- استقلال از شبكه جسم

براى استقلال از شبكه جسم، سطح مدل استاندارد جوبرت بدون سطح كنترل براى ۵ شبكه مختلف، شبكه‌بندي شده است. شبكه‌بندي جسم در نرم‌افزار گمببیت انجام مي‌گيرد و آنگاه جسم شبكه بندي شده براى تحليل در كد المان مرزى فراخوانى مي‌شود. ضريب فشار (C_p) بر حسب پارامتر طولى

^۱ Fully Submerged



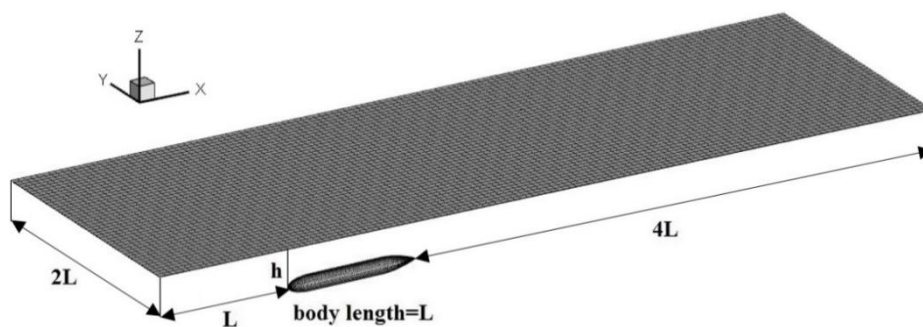
شکل ۳- حداکثر ارتفاع موج بر حسب تعداد المان‌های سطح آزاد در عمق بی بعد $1/0.2$ در عدد فرود 0.3

جدول ۱- مشخصات شبکه‌های سطح آزاد

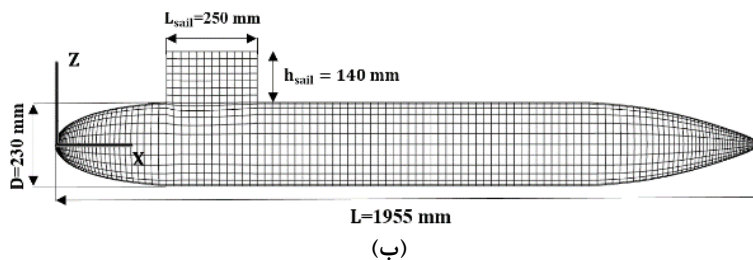
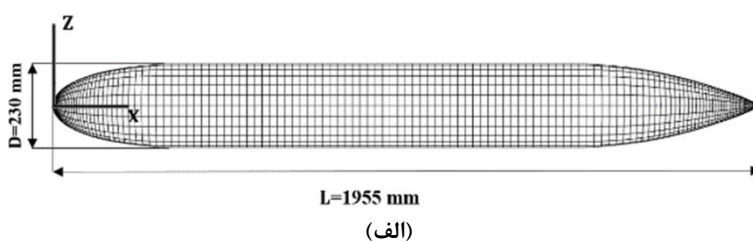
شماره شبکه	n_x	n_y	n_{total}
شبکه ۱	۳۰	۱۰	۳۰۰
شبکه ۲	۶۰	۲۰	۱۲۰۰
شبکه ۳	۹۰	۳۰	۲۷۰۰
شبکه ۴	۱۲۰	۴۰	۴۸۰۰
شبکه ۵	۱۲۶	۴۲	۵۲۹۲
شبکه ۶	۱۳۲	۴۴	۵۸۰۸

در نهایت با توجه به استقلال از شبکه جسم و سطح آزاد، هندسه شبکه‌بندی شده مرز جسم به همراه شبکه سطح آزاد در شکل ۴ و هندسه شبکه‌بندی شده مرز جسم در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

۵۲۹۲ به ۵۸۰۸ ثابت می‌ماند. با توجه به این موضوع، شبکه شماره ۵ با تعداد المان ۵۲۹۲ برای تمامی شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.



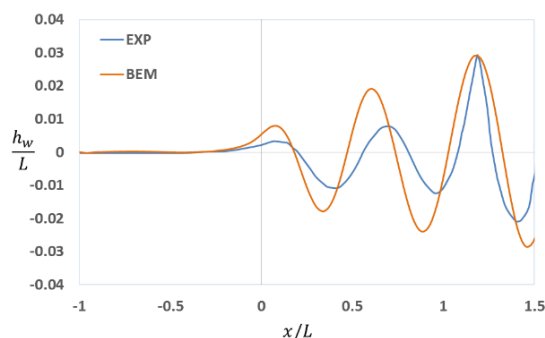
شکل ۴- هندسه شبکه‌بندی شده مرز جسم و سطح آزاد



شکل ۵- هندسه شبکه‌بندی شده جسم (الف) بدون سطح کنترل و (ب) با سطح کنترل

۱۹۵۵ ميليتر ($L=1955 \text{ mm}$) و قطر ۲۳۰ ميليتر ($D=230 \text{ mm}$) (شکل ۴-الف) انجام می‌گیرد که نتایج تجربی آن موجود است. برای اعتبارسنجی، نتایج روش المان مرزی با نتایج تجربی داسون [۱] مقایسه می‌گردند. مقایسه بین شکل موج سطح آزاد روش المان مرزی و نتایج تجربی داسون در عمق بی بعد $1/0.2$ و در عدد فرود 0.3 در فاصله عرضی بی بعد $1/26$ ($y/D=1.26$) از خط مرکزی جسم در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل محور طولی بیانگر فاصله طولی بی‌بعد از دماغه مدل است. با توجه به این که در تست‌های انجام شده توسط داسون، مدل با استفاده از یک استرات (نگه‌دارنده) که از بالا به کشندة حوضچه کشش متصل می‌شود نگاه داشته شده است، این استرات روی موج سطح آزاد در پایین دست خود اثر می‌گذارد؛ لذا فقط از نتایج تجربی موج سطح آزاد در ناحیه بالادست استرات ($x/L < 1.5$) برای اعتبارسنجی نتایج روش المان مرزی استفاده می‌شود.

با توجه به شکل ۷، روش المان مرزی در بازه طولی مشخص شده توانایی پیش‌بینی شکل موج را دارد. همچنین با توجه به نتایج جدول ۲، حداکثر ارتفاع موج (h_w/L) از روش‌های تجربی [۱] و المان مرزی تفاوت بسیار ناچیزی با هم دارند که نشان دهنده دقت روش المان مرزی در محاسبه موج سطح آزاد است. در جدول ۲ مقدار طول موج (λ/L) روش‌های تجربی، المان مرزی و مقدار حاصل بر مبنای تئوری امواج خطی ($\lambda/L=2\pi Fr^2$) نیز با هم مقایسه شده‌اند. مقدار طول موج از روش المان مرزی و نتیجه تجربی حدود ۸ درصد با هم اختلاف دارند. از عوامل اصلی این اختلاف، می‌توان



شکل ۷- مقایسه شکل موج سطح آزاد روش المان مرزی با نتایج تجربی داسون [۱] در عمق بی بعد $1/0.2$ در عدد فرود 0.3 برای مدل جوپرت

با توجه به استفاده از سلول‌های چهاروجهی با نسبت طول به عرض نزدیک به یک، شبکه استفاده شده برای سطح کنترل نیز مشابه شبکه سطح جسم انتخاب شده است.

۵- شرط همگرایی

در مسئله حاضر زمانی همگرایی برقرار می‌گردد که پارامتر همگرایی^۱ که برابر میانگین عددی مجموع تفاضل مقادیر پتانسیل برای همه المان‌های جسم و سطح آزاد از یک تکرار به تکرار بعد می‌باشد از مقدار $\epsilon = 10^{-5}$ کمتر گردد. ϵ معیار همگرایی است. پارامتر همگرایی در رابطه (۱۴) بیان شده است.

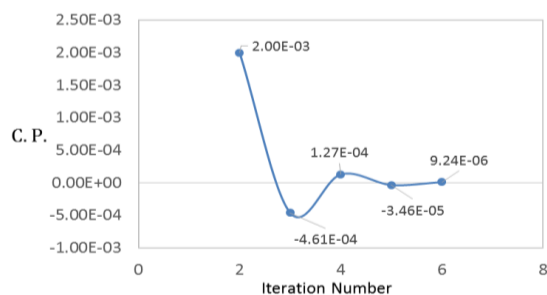
$$C.P. = \sum_{j=1}^N \left(\frac{\Phi_j - \Phi_{j-1}}{N} \right) \quad (14)$$

در رابطه فوق $C.P.$ پارامتر همگرایی، Φ_i پتانسیل المان در تکرار i ام، Φ_{i-1} پتانسیل المان در تکرار $i-1$ ام، N تعداد کل المان‌های جسم و سطح آزاد و Z شماره المان است.

شکل ۶ تغییر پارامتر همگرایی بر حسب شماره تکرار حل برای مدل جوپرت بدون سطح کنترل در عدد فرود 0.3 و عمق بی‌بعد $1/0.2$ را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، در تکرار ششم، پارامتر همگرایی از مقدار 10^{-5} کمتر شده و حل همگرا شده است.

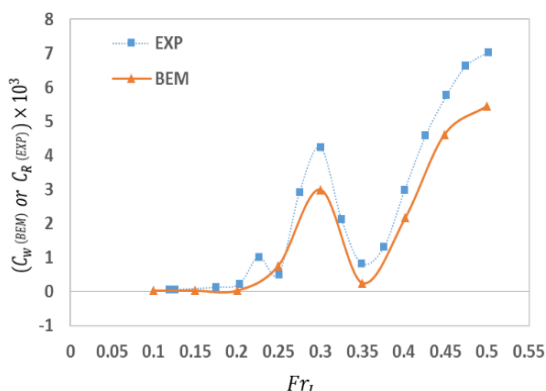
۶- اعتبارسنجی نتایج روش المان مرزی

در این قسمت اعتبارسنجی نتایج روش المان مرزی برای هندسه اصلی مسئله یعنی مدل استاندارد جوپرت با طول



شکل ۶- تغییر پارامتر همگرایی بر حسب شماره تکرار حل برای مدل جوپرت در عدد فرود 0.3 و عمق بی‌بعد $1/0.2$

^۱ Convergency Parameter (C.P.)



شکل ۸- مقایسه ضریب مقاومت موجی روش المان مرزی با نتایج تجربی ضریب مقاومت باقی مانده داسون [۱] در عمق بی بعد ۱/۰۲ در اعداد فرود مختلف برای مدل جوهرت

که اندیس x در عبارت C_x را می توان برای هر کدام از ضرایب مقاومت تعریف شده در روابط (۱۵) و (۱۶) به کار برد؛ همچنین در رابطه (۱۷) R_x مقاومت متناسب با ضریب C_x ، ρ چگالی سیال و S سطح خیس شده جسم می باشند.

در شکل ۸، نتایج تجربی مربوط به ضریب مقاومت باقی مانده، علاوه بر ضریب مقاومت موجی شامل ضریب مقاومت فشاری لزجی هم است، در نتیجه با توجه به فرضیات موجود در روش المان مرزی مبنی بر غیر لزج بودن جریان، ضریب مقاومت باقی مانده روش تجربی، مقدار بیشتری نسبت به ضریب مقاومت موجی بدست آمده توسط روش المان مرزی دارد. این موضوع دلیل اختلاف نتایج در شکل ۸ است.

برای نشان دادن دقت روش المان مرزی در محاسبه مقاومت موجی، ضریب پسای موجی برای یک جسم بیضی گون با طول واحد و نسبت طول به قطر ۵ در بازه اعداد فرود بین ۰/۳ تا ۰/۸ و در عمق بی بعد ۰/۸ با نتایج داکترز و بک [۲۴] مقایسه و در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج، دقت بالای روش حاضر در محاسبه مقاومت موجی را نشان می دهد.

۷- نتایج روش المان مرزی

پس از اعتبارسنجی نتایج روش المان مرزی، به بررسی اثر تغییر عمق غوطه وری جسم روی پارامترهای مختلف همچون ضریب پسای موجی، شکل موج، مشخصات موج، ضریب فشار

جدول ۲- مقایسه حداکثر ارتفاع موج و طول موج در عمق بی بعد ۱/۰۲ و در عدد فرود ۰/۳ برای مدل جوهرت

طول موج (λ/L)	حداکثر ارتفاع موج (hw/L)	تجربی [۱]
۰/۶۰۸۳	۰/۰۲۹۳	تجربی [۱]
۰/۵۵۵۹	۰/۰۲۸۹	روش المان مرزی
۰/۵۷۰۰	-	تئوری امواج خطی

به عدم در نظر گرفتن لزجت سیال در روش المان مرزی اشاره کرد.

به دلیل اینکه در تئوری خطی موج نیز لزجت سیال منظور نمی شود، اختلاف بین طول موج روش المان مرزی با نتیجه رابطه تئوری بسیار کمتر و حدود ۲ درصد است.

نتایج مربوطه به ضریب مقاومت موجی روش المان مرزی کار حاضر و نتایج تجربی ضریب مقاومت باقی مانده^۱ داسون [۱] در عمق بی بعد ۱/۰۲ و در اعداد فرود مختلف برای مدل جوهرت در شکل ۸ با هم مقایسه شده اند. می توان دلیل اصلی تفاوت موجود بین جواب های تجربی و روش المان مرزی را به صورت زیر بیان کرد:

مقدار مقاومت کلی قابل جداسازی به دو بخش مقاومت باقی مانده و مقاومت اصطکاکی است (رابطه (۱۵)) که در این رابطه C_T ضریب مقاومت کلی، C_R ضریب مقاومت باقی مانده و C_F ضریب مقاومت اصطکاکی است.

$$C_T = C_R + C_F \quad (15)$$

در رابطه فوق ضریب مقاومت باقی مانده را می توان به دو قسمت طبق رابطه (۱۶) جداسازی کرد که C_w ضریب مقاومت موجی و C_{vp} ضریب مقاومت فشاری لزجی^۲ است.

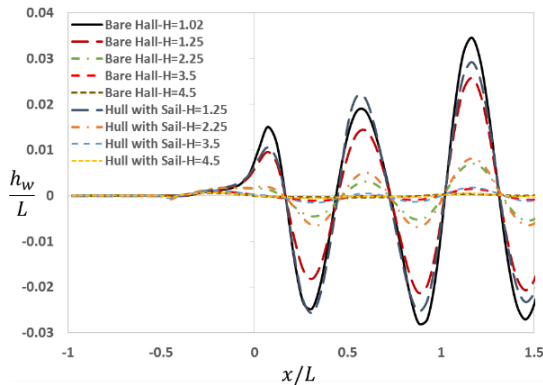
$$C_R = C_w + C_{vp} \quad (16)$$

ضرایب مقاومت به کار رفته در روابط فوق به صورت (۱۷) تعریف می شوند:

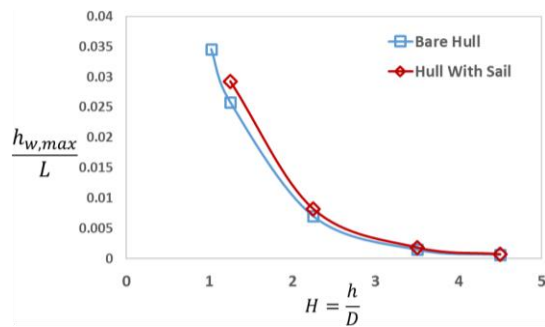
$$C_x = \frac{R_x}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 S} \quad (17)$$

¹ Residual Resistance Coefficient

² Viscous Pressure Resistance Coefficient



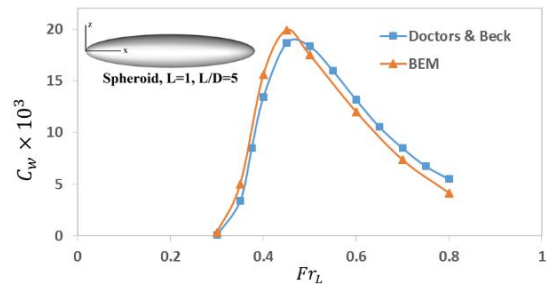
شکل ۱۰- تاثیر تغيير عمق بى بعد قرارگيرى جسم بر شکل- موج سطح آزاد روى خط مركزى جسم در عدد فرود ۰/۳



شکل ۱۱- تغييرات حداکثر ارتفاع موج سطح آزاد روى خط مركزى جسم با عمق بى بعد در عدد فرود ۰/۳

تغيير توزيع فشار روى جسم نيز مى شود (شکل ۱۵-ب) و با نزديکتر شدن مجموعه جسم و سطح کنترل به سطح آزاد، برهم کنش بين توزيع فشار و سيال روى جسم و سطح کنترل تا سطح آزاد، همانطور که قبلاً ذکر شد، باعث افزايش ارتفاع موج مى گردد. همچنين ديده مى شود که موج ناشى از حرکت جسم در نزديکى سطح آزاد، تقريباً در بالادست لبه حمله جسم شروع مى شود. شکل ۱۲ کانتور شکل موج سطح آزاد برای دو حالت الف-بدون سطح کنترل و ب-با سطح کنترل در عدد فرود ۰/۳ و عمق بى بعد ۱/۲۵ را نشان مى دهد. همانطور که از شکل ۱۲ مشخص مى شود، اضافه کردن سطح کنترل موجب افزايش توان موج و در نتيجه ارتفاع موج مى گردد؛ همچنين الگوى موج کلوين^۱ در هر دو حالت به-خوبى ديده مى شود.

^۱ Kelvin Wave Pattern



شکل ۹- مقايسه نتايج ضريب مقاومت موجى روش المان مرزى با نتايج داکترز و بک [۲۴] برای یک بیضی گون با نسبت طول به قطر ۵ در عمق بى بعد ۰/۸

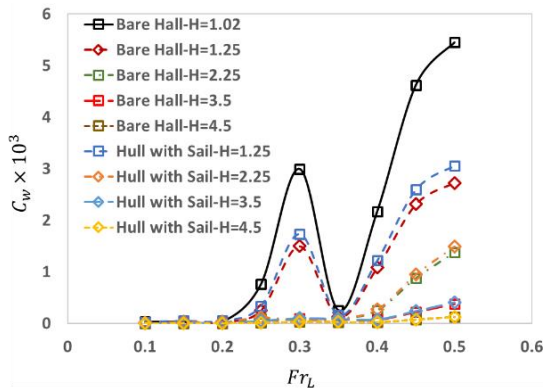
و توزيع فشار برای دو حالت با و بدون سطح کنترل برای مدل جوبرت پرداخته مى شود.

برهم کنش توزيع فشار ديناميكى جسم زیرسطحى و ستون آب موجود روى آن تا سطح آزاد، منجر به توليد امواج سطح آزاد مى گردد؛ لذا مى توان گفت، موج ايجاد شده در سطح آزاد تابع مستقيم وزن سيال روى جسم است، به طوری که هرچه عمق غوطه ورى جسم زيادتر باشد، ارتفاع ستون سيال روى جسم تا سطح آزاد نيز بيشتر بوده و انرژی بيشترى از قدرت امواج قبل از رسيدن به سطح آزاد مستهلك مى شود و در سطح آزاد موج با قدرت کمترى تشکيل مى شود؛ لذا با نزديک شدن جسم به سطح آزاد و کمتر شدن انرژی مستهلك شده در آب، ارتفاع موج تشکيل شده در سطح آزاد بيشتر مى شود. اين موضوع برای مدل جوبرت در شکل های ۱۰ و ۱۱ مشخص است.

مقايسه شکل موج سطح آزاد و مقدار حداکثر ارتفاع موج سطح آزاد روى خط مركزى جسم (خط $y=0$) برای عمق های مختلف در عدد فرود ۰/۳ برای حالات با و بدون سطح کنترل در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که در اين دو شکل مشاهده مى شود، با افزايش عمق غوطه ورى جسم، ارتفاع موج سطح آزاد کاهش مى يابد، به طوری که در عدد فرود ۰/۳، حداکثر ارتفاع بى بعد موج از ۰/۳۴ در عمق بى بعد ۱/۰۲ به ۰/۰۱ در عمق بى بعد ۳/۵ و حدود صفر در عمق بى بعد ۴/۵ مى رسد. همانطور که نتايج نشان مى دهند، در نواحى نزديکتر به سطح آزاد، اثر سطح کنترل روى افزايش ارتفاع موج بيشتر مى شود، به طوری که در عدد فرود ۰/۳ و عمق بى بعد ۱/۲۵ باعث افزايش حدود ۱۳ درصدی حداکثر ارتفاع موج مى شود. اضافه کردن سطح کنترل باعث

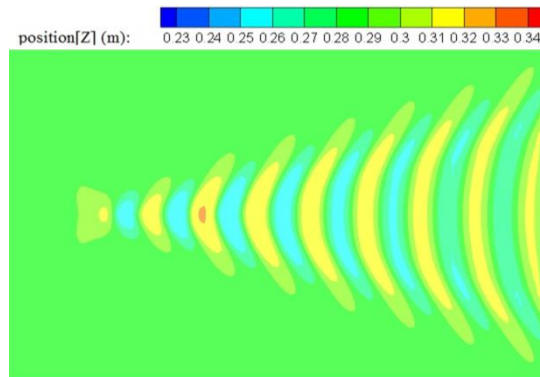
جدول ۳- مقایسه طول موج بی بعد برای عمق های مختلف در عدد فرود ۰/۳ روی خط مرکزی جسم

عمق بی بعد (H=h/D)	طول موج بی بعد	
	بدون سطح کنترل	با سطح کنترل
۱/۰۲	۰/۵۶۲	-
۱/۲۵	۰/۵۶۱	۰/۵۵۶
۲/۲۵	۰/۵۷۳	۰/۵۶۳
۳/۵	۰/۵۹۹	۰/۵۹۱
۴/۵	-	۰/۵۷۴
تنوری ($\lambda/L = 2\pi Fr^2$)	۰/۵۷	۰/۵۷

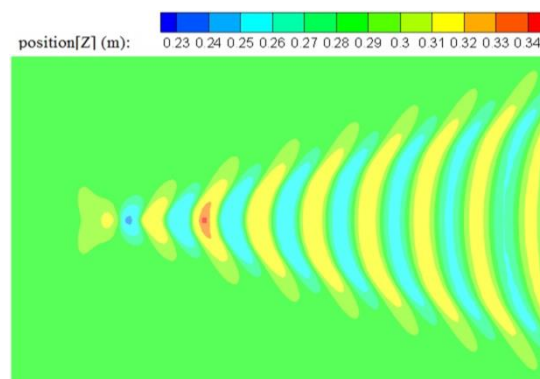


شکل ۱۳- تاثیر تغییر عمق بی بعد بر ضریب مقاومت موجی در اعداد فرود مختلف برای حالات با و بدون سطح کنترل

است که با دور شدن جسم از سطح آزاد و با کم شدن اثر موج، مقدار مقاومت موجی هم کم می‌شود. با توجه به این که انرژی موج با ارتفاع موج متناسب است [۱۰]، می‌توان برای بیان تغییرات انرژی موج و در نتیجه مقاومت موجی بر حسب عدد فرود، تغییرات حداکثر ارتفاع موج سطح آزاد را بررسی کرد. تغییرات حداکثر موج سطح آزاد بر حسب عدد فرود برای عمق بی‌بعد ۱/۲۵ و در هر دو حالت با و بدون سطح کنترل در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، الگوی تغییرات ضریب پسای موجی و ارتفاع موج نسبت به عدد فرود در ناحیه نزدیک به سطح آزاد شباهت زیادی با هم دارند و این نشان‌دهنده وابستگی ضریب پسای موجی به موج سطح آزاد است؛ لذا همانطور که در شکل ۱۴



(الف)



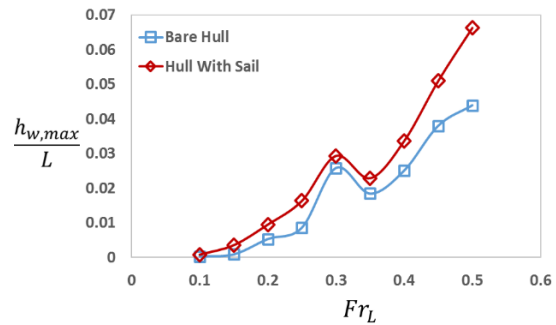
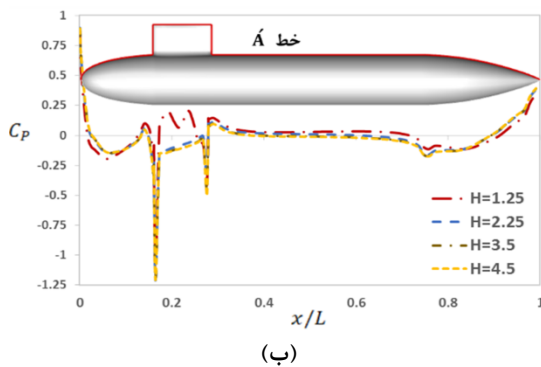
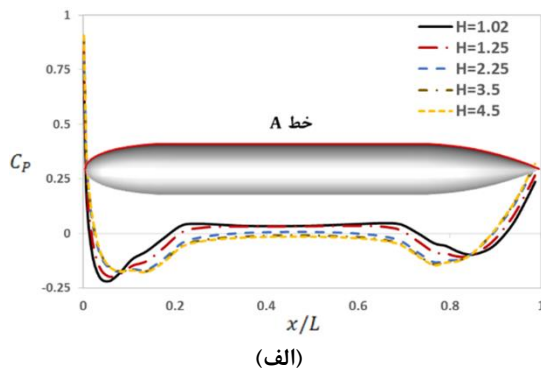
(ب)

شکل ۱۲- کانتور شکل موج سطح آزاد در عدد فرود ۰/۳ و عمق بی‌بعد ۱/۲۵ (الف) بدون سطح کنترل و (ب) با سطح کنترل

در جدول ۳ طول موج بی بعد برای عمق های مختلف روی خط مرکزی جسم در عدد فرود ۰/۳ در حالات با و بدون سطح کنترل، با هم و با مقدار بدست آمده از رابطه تنوری مقایسه شده‌اند.

مقایسه نتایج طول موج نشان می‌دهد که با افزایش عمق غوطه‌وری، طول موج تغییر نمی‌کند و همچنین تطابق بسیار خوبی بین نتایج روش المان مرزی با نتیجه تنوری وجود دارد.

نتایج مربوط به اثر تغییر عمق بی بعد قرارگیری جسم بر ضریب مقاومت موجی، در اعداد فرود مختلف برای دو حالت بدون سطح کنترل و با سطح کنترل در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۳، ضریب مقاومت موجی با افزایش عمق غوطه‌وری جسم، در همه اعداد فرود کاهش پیدا می‌کند. دلیل این موضوع، ویژگی‌های موج ایجاد شده در سطح آزاد



شکل ۱۴- حداکثر ارتفاع موج بر حسب عدد فرود در عمق بی بعد ۱/۲۵ برای حالات با و بدون سطح کنترل

اضافه کردن سطح کنترل باعث افزایش ارتفاع موج شده است، در شکل ۱۳ موجب افزایش پسای موجی نسبت به حالت بدون سطح کنترل می‌گردد. مطابق شکل‌های ۱۳ و ۱۴ در نواحی نزدیک سطح آزاد، ارتفاع موج و مقدار مقاومت موجی به صورت نوسانی با عدد فرود تغییر می‌کنند، به طوری که در این نمودارها نقاط حداکثر (تقعر) و حداقل (تحدب) دیده می‌شوند. نقاط حداکثر در این نمودارها نشان‌دهنده حالتی است که امواج تشکیل شده در نقاط متفاوت جسم همدیگر را تقویت و باعث تولید موج با ارتفاع بیشتر می‌شود؛ در نتیجه انرژی موج افزایش یافته و مقدار مقاومت موجی افزایش می‌یابد. در این نمودارها نقاط حداقل مربوط به حالتی است که امواج در نقاط مختلف جسم اثر همدیگر را خنثی کرده و عکس حالت قبل با کاهش مصرف انرژی موج باعث کاهش مقاومت موجی می‌شود. با افزایش عمق غوطه‌وری در عمق بی بعد ۲/۲۵، اثرات سطح آزاد کاهش پیدا کرده و نوسانات موجود در نمودارهای ارتفاع موج و مقاومت موجی نیز کم می‌شود.

نمودار تغییرات ضریب فشار بر حسب طول بی بعد روی خطوط A و A' در عمق‌های بی بعد مختلف و در عدد فرود ۰/۳ در شکل ۱۵- الف و ب به ترتیب برای دو حالت بدون سطح کنترل و با سطح کنترل نشان داده شده است. بر اساس شکل، مشخص است که برای هر دو حالت، با کاهش عمق، میزان افت فشار در امتداد این خطوط به واسطه افزایش مقاومت موجی افزایش می‌یابد؛ یعنی نزدیک سطح آزاد یک برهم‌کنش متقابل بین جسم زیرسطحی و سطح آزاد وجود دارد، به طوری که حرکت جسم باعث تولید امواج روی سطح آزاد شده و امواج تولیدی و در نتیجه مقاومت موجی ناشی از

شکل ۱۵- تغییرات ضریب فشار با طول بی بعد روی خطوط A و A'، الف) مدل بدون سطح کنترل و ب) مدل با سطح کنترل

آن بر توزیع فشار روی جسم اثر می‌گذارد. در شکل ۱۵-ب تغییرات ناگهانی فشار در لبه‌های حمله و فرار سطح کنترل ناشی از تغییرات زیاد سرعت در آن مناطق است.

۸- نتیجه‌گیری

مطالعات انجام شده در زمینه اثر سطح آزاد بر یک جسم زیرسطحی متحرک در نزدیکی سطح آزاد، محدود به بررسی اثر سطح آزاد روی مشخصات هیدرودینامیکی و دینامیکی اجسام زیرسطحی، بدون در نظر گرفتن سطح کنترل است. در کار حاضر اثر یک سطح کنترل عمودی روی مشخصات هیدرودینامیکی و موج سطح آزاد یک مدل متقارن محوری (مدل جوهرت)، با استفاده از روش المان مرزی به عنوان یک روش مبتنی بر جریان پتانسیل بررسی شده است. مقاومت موجی، شکل و ارتفاع موج سطح آزاد و توزیع فشار بر روی جسم متحرک در نزدیکی سطح آزاد در دو حالت با و بدون سطح کنترل در اعداد فرود و عمق‌های غوطه‌وری متفاوت

- diameter ratio on the near-surface operation of conventional submarines. PhD thesis, University of Tasmania, Hobart, Australia.
- [2] Saout O, Ananthakrishnan P (2011) Hydrodynamic and dynamic analysis to determine the directional stability of an underwater vehicle near a free surface. *Appl Ocean Res* 33: 158-167.
- [3] Amiri M M, Sphaier S H, Vitola MA, Esperança P T (2020) Viscosity effect on an underwater vehicle-free surface hydrodynamic interaction. *Appl Ocean Res* 104 (2020) 102365.
- [4] Jagadeesh P, Murali K (2010) RANS predictions of free surface effects on axisymmetric underwater body. *Eng Appl Comput Fluid Mech* 4 (2): 301-313.
- [5] Wilson-Haffenden S, Renilson M, Ranmuthugala D, Dawson E, et al (2010) An investigation into the wave making resistance of a submarine travelling below the free surface. *International Maritime Conference 2010: Maritime Industry-Challenges, Opportunities and Imperatives*, Sydney, Australia.
- [6] Mansoorzadeh S, Javanmard E (2014) An investigation of free surface effects on drag and lift coefficients of an autonomous underwater vehicle (auv) using computational and experimental fluid dynamics methods. *J Fluids Struct.* 51:161-171.
- [7] Nematollahi A, Dadvand A, Dawoodian M (2015) An axisymmetric underwater vehicle-free surface interaction: A numerical study. *Ocean Eng.* 96: 205-214.
- [8] Salari M, Rava A (2017) Numerical investigation of hydrodynamic flow over an auv moving in the water-surface vicinity considering the laminar-turbulent transition. *J Mar Sci Appl* 16(3): 298-304.
- [9] شریعتی س خ، موسوی زادگان س ح (۱۳۹۸) بررسی عددی و آزمایشگاهی حرکت یک شناور زیرسطحی در نزدیکی سطح آزاد. *نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر* ۳۶۴-۳۴۷ (۲): ۵۱.
- [10] Maali AA, Esperança PT, Vitola MA, Sphaier SH (2018) How does the free surface affect the hydrodynamics of a shallowly submerged submarine?. *Appl Ocean Res* 76(2018): 34-50.
- [11] Amiri MM, Sphaier SH, Vitola MA, Esperança PT (2019) URANS investigation of the interaction between the free surface and a shallowly submerged underwater vehicle at steady drift. *Appl Ocean Res* 84: 192-205.
- [12] Maali AA, Esperança PT, Vitola MA, Sphaier SH (2020) An initial evaluation of the free surface effect on the maneuverability of underwater vehicles. *Ocean Eng* 196(2020): 106851.
- بدست آمده است. مهم ترین یافته های تحقیق حاضر عبارتند از:
- مقایسه نتایج روش المان مرزی و نتایج تجربی، در حالت حداکثر ارتفاع موج سطح آزاد و در عمق بی بعد ۱/۰۲ خطایی کمتر از ۲ درصد و برای ضریب مقاومت موجی جسم بیضی گون، خطای متوسط حدود ۱۷ درصد در اعداد فرود مختلف، را نشان می دهد.
 - با افزایش عمق غوطه وری جسم، ارتفاع موج سطح آزاد کاهش می یابد، به طوری که در عدد فرود ۰/۳، حداکثر ارتفاع بی بعد موج از ۰/۳۴ در عمق بی بعد ۱/۰۲ به ۰/۰۱ در عمق بی بعد ۳/۵ و حدود صفر در عمق بی بعد ۴/۵ می رسد.
 - با نزدیک تر شدن مجموعه جسم و سطح کنترل به سطح آزاد، برهم کنش بین توزیع فشار و سیال روی جسم و سطح کنترل تا سطح آزاد، باعث افزایش ارتفاع موج می شود، به طوری که در عدد فرود ۰/۳ و عمق بی بعد ۱/۲۵، حداکثر ارتفاع موج حدود ۱۳ درصد افزایش می یابد.
 - با افزایش عمق غوطه وری، طول موج تغییر نمی کند و تطابق بسیار خوبی بین نتایج روش المان مرزی با نتیجه تئوری طول موج وجود دارد.
 - ضریب پسای موجی، وابستگی زیادی به موج سطح آزاد دارد. بنابراین در نواحی نزدیک به سطح آزاد که موج قویتری تشکیل می شود، مقدار ضریب پسا نیز بیشتر است.
 - اضافه کردن سطح کنترل موجب افزایش مقاومت موجی با کاهش عمق می گردد، به طوری که در عمق بی بعد ۱/۲۵ این موضوع باعث افزایش متوسط ۱۶ درصدی مقاومت موجی در بازه اعداد فرود بین ۰/۳ تا ۰/۵ می شود.
 - در نواحی نزدیک سطح آزاد، نمودارهای ارتفاع موج و مقدار مقاومت موجی به صورت نوسانی با عدد فرود تغییر می کنند.

۹- مراجع

- [1] Dawson E (2014) An investigation into the effects of submergence depth, speed and hull length-to-

- [26] Belibassakis K, Gerostathis TP, Politis C, Kaklis P, Ginnis A, Mourkogiannis D (2009) A novel bem-geometric method with application to the wavemaking resistance problem of bodies at constant speed. Intern. Maritime Association Mediterranean Conference. IMAM.
- [27] Gourlay T, Dawson, E (2014) A Havelock-source panel method for near-surface submarines. Journal of Ship Research, Society of Naval Architects and Marine Engineers, Virginia, USA.
- [28] Arzhannikov AV, Kotelnikov IA (2016) Excitation of ship waves by a submerged object: New solution to the classical problem. Phys Rev E 94(2): 023103.
- [29] Benusiglio A, Chevy F, Raphael E, Clanet C (2015) Wave drag on a submerged sphere. Phys Fluids 27(7): 072101.
- [30] Saout O, Ananthakrishnan P (2011) Hydrodynamic and dynamic analysis to determine the directional stability of an underwater vehicle near a free surface. Appl Ocean Res 33(2): 158-167.
- [31] Noblesse F, Huang F, Yang C (2017) The Neumann-Michell theory of ship waves. J Eng Math 79: 51-71.
- [32] Sclavounos PD, Nakos DE (1988) Stability analysis of panel methods for free surface flows with forward speed. 17th Symposium on Naval Hydrodynamics, Netherlands.
- [33] Bal S, Kinnas SA (2002) A Bem for the prediction of free surface effect on cavitating hydrofoils. Comput Mech 28(3): 260-274.
- [34] Dawson DW (1977) A practical computer method for solving shipwave problems. 2nd International Conference on Numerical ShipHydrodynamics.
- [۳۵] نوروزى م، پسندیده فرد م، جوارشکيان مح (۱۳۹۵) تحليل سه بعدى جريان همراه با کاویتاسيون حول پرتابه‌ها در زوایای حمله مختلف با استفاده از روش المان مرزى بر پایه پتانسيل. پایان نامه دکترى، دانشگاه فردوسى مشهد.
- [13] Kostyukov AA (1959) Theory of ship waves and wave resistance. Iowa City, Effective Communications Inc.
- [14] Lamb H (1913) On some cases of wave motion on deep water. Annali di Matematica 21: 237-250.
- [15] Farrel C (1973) On the Wave resistance of a submerged spheroid. J Ship Res 17: 1-11.
- [16] Havelock TH (1917) Some cases of wave motion due to a submerged obstacle. Proc R Soc Lond 93: 520-532.
- [17] Havelock TH (1931a) The wave resistance of a spheroid. Proc R Soc Lond 131: 275-285.
- [18] Havelock TH (1931b) The wave resistance of an ellipsoid. Proc R Soc Lond 132: 480-486.
- [19] Hess JL, Smith AMO (1964) Calculation of nonlifting potential flow about arbitrary three-dimensional bodies. J Ship Res 8(2): 22-44.
- [20] Bhattacharyya R (1965) Über die berechnung des wellenwiderstandes nach verschiedenen verfahren und vergleich mit einigen experimentellen ergebnissen. Inst. für Schiffbau der Universität Hamburg, Hamburg. (In German)
- [21] Guével P, Delhommeau G, Cordonnier JP (1977) Numerical solution of the Neumann-Kelvin problem by the method of singularities. 2nd International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Berkeley 107-123.
- [22] Hong YS (1983) Computation of nonlinear wave resistance. David W Taylor Naval Ship Research and Development Center, Bethesda, USA, 104-126.
- [23] Wigley WCS (1953) Water forces on submerged bodies in motion. Transactions, Institute of Naval Architects 95: 268-279.
- [24] Doctors L Beck R (1987) Convergence Properties of the Neumann-Kelvin Problem for a Submerged Body. J Ship Res 31: 227-234.
- [25] Crook TP (1994) An Initial assessment of free surface effects on submerged bodies. MSc Mechanical Engineering, Naval Postgraduate College. USA.