

## شبهه سازی و محاسبه مقاومت موج سازی اطراف کره

سید امیر گلچین<sup>۱</sup>، سید حسین موسوی زادگان<sup>۱\*</sup>

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

کد مقاله: ۱۰۱۷

---

### چکیده

یکی از زمینه‌های بسیار مهم در اقتصاد دریانوردی مساله مصرف بهینه سوخت و انرژی می‌باشد. شناخت عوامل موثر در رخداد یک پدیده گامی اساسی در راستای نیل به کنترل و تحت اختیار درآوردن آن است. از جمله عوامل موثر در مصرف سوخت یک شناور، مقاومت موج‌سازی می‌باشد. این مقاومت در طراحی پروانه و انتخاب موتور مناسب کاملاً تاثیرگذار است بگونه‌ای که عدم تخمین مناسب آن موجب پایین آمدن راندمان کارکردی پروانه و موتور می‌شود و به تبع آن مصرف انرژی و سوخت بیشتر را در پی دارد. در این مقاله با توجه به اهمیت دلایل ذکر شده به محاسبه عددی مقاومت موج سازی پرداخته شده است. در اینجا با فرض غیرویسکوز و غیرقابل تراکم بودن سیال و غیرچرخشی بودن جریان، معادله لاپلاس به عنوان معادله حاکم در نظر گرفته شده است. به منظور محاسبه عددی مقاومت موج سازی تابع گرین جریان پایدار حل گردیده است. روش عددی مورد استفاده المان مرزی مستقیم در حالت سه بعدی می‌باشد. در انتها نیز نتایج حاصل از محاسبات عددی مساله با نتایج حاصل از حل تحلیلی آن مقایسه شده و نزدیکی مقادیر نشان داده شده است.

**کلمات کلیدی:** مقاومت موج سازی، تابع گرین، روش المان مرزی، طراحی

---

## مقدمه

در زمان دریانوردی در مسیرهای دریایی، مقاومت نسبت به آبهای آرام و قدرت و نیروی لازم برای رانش کشتی افزایش می‌یابد. در یک شیوه طراحی قدیمی، مقادیر مقاومت در مسیرهای دریایی به صورت نسبی و در مقایسه با آبهای آرام محاسبه می‌شود. در این شیوه حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد بر مقادیر مقاومت در آبهای آرام می‌افزایند و آن را به مسیرهای دریانوردی نسبت می‌دهند. امروزه محاسبه دقیق مقاومت کشتی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار شده است بگونه‌ای که این موضوع مورد توجه هر دو گروه سازندگان و خریداران کشتی قرار دارد زیرا این عامل به صورت مستقیم در انتخاب موتور و سیستم رانش کشتی، پارامترهای عملکردی کشتی مانند سرعت و میزان مصرف سوخت موثر است [۱].

در طول نیم قرن گذشته جهش‌ها و پیشرفت‌های بسیار زیادی در زمینه مصرف سوخت کشتی‌ها صورت گرفته است. این موضوع در دهه‌ی هفتاد و هشتاد میلادی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفت. آژانس بین‌المللی انرژی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۷ اطلاعاتی در زمینه چگالی مصرف انرژی در کشتی‌ها منتشر نمود. آن گزارش میزان مصرف جهانی انرژی کشتیرانی از سال ۱۹۷۳ تا سال ۱۹۸۴ مورد بررسی قرار گرفته بود. این بررسی‌ها بینانگر کاهش ۳۵ درصدی مصرف سوخت در سال‌های اخیر است. عمده کاهش در اواسط دهه‌ی هفتاد میلادی زمانی که قیمت نفت به یکباره دچار تلاطم شد دیده می‌شود؛ در واقع می‌توان گفت در آن زمان خیز بلندی در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی در امور حمل و نقل دریایی برداشته شد [۲]. محاسبه مقاومت موج‌سازی در مسیر دریانوردی یک مساله بسیار مهم از لحاظ اقتصادی برای صاحبان کشتی می‌باشد. تاثیر این پارامتر را می‌توان در نوع موتور انتخاب شده، مصرف سوخت و زمان دریانوردی برای یک مالک پر اهمیت دانست. در واقع طراحان کشتی مقاومت موج‌سازی در مسیر دریانوردی را باید به عنوان یک مساله مهم در همان مراحل اولیه در نظر بگیرند. بطور معمول روش محاسبه مقاومت در مسیر دریانوردی بر اساس مقاومت در آبهای آرام انجام می‌شود و این روش تاثیرات موجود در مسیر را در نظر نمی‌گیرد. چنانچه مقاومت در آبهای آرام برای تخمین قدرت لازم مورد استفاده قرار گیرد، مقدار مشخصه‌ای از مقاومت در آبهای آرام به عنوان تاثیر محیط، به آن اضافه می‌شود. طراحان این عامل را به عنوان ضریب مارچین دریا<sup>۲</sup> به عنوان استاندارد، به صورتی مستقل از رفتار واقعی کشتی در دریا به مقدار مقاومت در آب‌های آرام اضافه می‌کنند. این ضریب را که بر اساس مراحل طراحی کشتی و مطابق با نظر سازنده و یا صاحب کشتی می‌باشد و بر اساس تجربه یا مقایسه کشتی‌های مشابه در مسیر دریایی مورد نظر تعیین می‌شود و مقدار آن در حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد قدرت کشتی در آبهای آرام است. باید

1-IEA

2-Sea Margin Factor

دقت داشت که می‌توان با استفاده از روش‌های تجربی موجود و یا انجام تست‌های مختلف، این ضریب را به صورت دقیق‌تر تعیین نمود.

در هر حال محاسبه دقیق مقاومت موج سازی این امکان را به طراحان می‌دهد که در انتخاب سیستم رانش (مانند موتور) و همچنین طراحی پروانه به صورت دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت عمل نمایند [۳]. سرعت یک عامل بسیار مهم و تاثیرگذار در مصرف سوخت می‌باشد، وضوح این تاثیر برای عوامل اجرایی یک شناور کاملاً مشهود است. زمانی که یک وسیله دریایی توسط پروانه به جلو رانده می‌شود، مقدار بسیار زیادی از انرژی صرف ایجاد امواج در کناره‌ها و در پشت آن می‌شود. انرژی که صرف ایجاد این امواج می‌شود مقاومت موج‌سازی نامیده می‌شود. با افزایش سرعت پیشروی، میزان موج‌های ایجاد شده در اطراف نیز افزایش می‌یابد. از دیدگاه اقتصادی می‌توان به مساله افزایش سرعت از نگاه سوخت پرداخت؛ زمانی که سرعت نسبت به یک حالت مبدا دوبرابر شود، مصرف سوخت بسیار بیشتر از دو برابر خواهد شد. باید دقت داشت هنگامی که سرعت افزایش می‌یابد، تنها عامل موثر در مصرف سوخت، افزایش میزان امواج ایجاد شده در اطراف بدنه نمی‌باشد بلکه با افزایش سرعت، کارکرد موتور نیز از حالت بهینه خارج می‌شود، این موضوع زمانی بیشتر خود را نشان می‌دهد که سرعت در موتور به تعداد دورهای در دقیقه بیشینه نزدیکتر شود [۴].

در این مقاله با اعمال فرضیات جریان پتانسیل، یعنی غیرویسکوز و غیرقابل تراکم بودن سیال و نیز غیرچرخشی بودن جریان، معادله لاپلاس به عنوان معادله حاکم، تحت شرایط مرزی سطوح مختلف حل شده است. این سطوح شامل سطح خیس شده جسم، سطح آزاد، سطح در کف محیط سیال و همچنین سطوح در فواصل دور می‌باشد. روش عددی مورد استفاده روش المان مرزی در حالت سه‌بعدی می‌باشد. در این روش از توزیع چشمه و دوقطبی روی سطح بدنه استفاده شده است و با در نظر گرفتن المان‌های مثلثی تخت و توزیع ثابت چشمه، دستگاه معادلات با استفاده از روش‌های مناسب و پربازده عددی حل شده است. در این مقاله تابع گرین جریان پایدار به صورت عددی حل شده است. این تابع شامل نقاط تکین بوده و لازم است با تغییر مسیرهای انتگرال‌گیری و تغییر متغیرهای مناسب این مشکل را رفع نمود. با حل عددی تابع گرین در حالت پایدار، توزیع پتانسیل در اطراف جسم قابل دستیابی است. پس از آن می‌توان با توجه به اینکه در تئوری پتانسیل، سرعت برابر با گرادیان پتانسیل می‌باشد به محاسبه سرعت و به تبع آن فشار، نیرو و در انتها مقاومت موج‌سازی پرداخت. لازم به ذکر است که کره‌ای با شعاع واحد به عنوان نمونه تحت مطالعه انتخاب شده است و نتایج حاصل از محاسبات برای کره نشان داده شده است. برای معتبرسازی، نتایج حاصل از محاسبات عددی با نتایج حاصل از حل تحلیلی مقاومت موج

سازی در اطراف کره مقایسه شده است بطوریکه این مقایسه نشان می‌دهد که نتایج حاصل از محاسبات عددی تا حد بسیار زیادی به نتایج حاصل از حل تحلیلی نزدیک است.

### شرایط مرزی

در حرکت جسم در آب چند فرض در نظر گرفته می‌شود: سیال غیرویسکوز و تراکم ناپذیر است و جریان غیرچرخشی می‌باشد، در ضمن از اثرات کشش سطحی در سطح آزاد نیز صرف‌نظر می‌شود. با توجه به این فرضیات می‌توان سرعت را گرادینان تابع پتانسیل در نظر گرفت، به عبارت دیگر رابطه‌ی  $(V(x, y, z, t) = \nabla\Phi(x, y, z, t))$  برقرار است. در موارد بسیاری جریان گذرنده از جسم را می‌توان به صورت ریاضی و با کمک معادلات لاپلاس مدل نمود. ایده‌آل فرض نمودن سیال واقعی، در مهندسی کاربردهای بسیاری در تحلیل جریان گذرنده از اجسام دارد. با توجه به فرضیات مساله، شرایط مرزی زیر برای تابع گرین در حالت حرکت پایدار برقرار است:

\* شرط مرزی در کل فضای سیال:

$$\nabla^2 G_s(x, y, z) = \delta(q - p)$$

\* شرط مرزی خطی شده سطح آزاد:

$$U^2 G_{sxx} + g G_{sz} = 0$$

\* شرط مرزی در کف:

$$\frac{\partial G_s}{\partial z} = 0 \quad z \rightarrow -\infty$$

\* شرط مرزی در فاصله دور دست:

$$\frac{\partial G_s}{\partial x} = 0 \quad x \rightarrow \infty$$

شرط مرزی روی سطح آزاد به صورت غیرخطی می‌باشد، اما در بسیاری از مسائل مرتبط با تئوری امواج آب، با فرض کوچک بودن دامنه نوسانات امواج در مقایسه با طول موج و همچنین کوچک بودن شیب سطح آزاد نسبت به مقدار واحد، از قسمت‌های مرتبه دوم صرف‌نظر می‌شود و شرط مرزی روی سطح آزاد را به صورت خطی در نظر می‌گیرند [۵]. شرط مرزی روی بدنه نیز هنگام اجرای روش عددی روی تابع گرین اعمال می‌گردد. باید دقت داشت که  $q$  بیانگر نقاط چشمه و  $p$  بیانگر نقاط محیط می‌باشد.

### فرمول بندی ریاضی

تابع پتانسیل در حالت سه‌بعدی برای یک چشمه با قدرت واحد، که در مسیر یک جریان یکنواخت با سرعت  $U$ ، پیشرونده در راستای  $x$  قرار گرفته است به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\phi = \phi_s(x, y, z) - Ux \quad (1)$$

بگونه‌ای که در این تابع پتانسیل  $\Phi_S$  تابع چشمه هاولوک می‌باشد. تابع گرین مناسب برای حرکت با سرعت یکنواخت به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$G_s(p, q) = -\frac{1}{r_s(p, q)} + \frac{1}{r'_s(p, q)} + eG_{sd}(p, q) + G_{ss}(p, q) \quad (2)$$

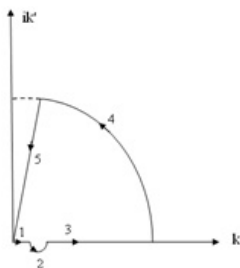
$$G_{sd}(p, q) = PV \frac{2}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\infty} \frac{k_0 \sec^2 t}{k - k_0 \sec^2 t} \times e^{k[(z+\zeta)+i(x-\xi)\cos t+i(y-\eta)\sin t]} dk dt \quad (3)$$

$$G_{ss}(p, q) = \text{Re} \left\{ 2i \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} k_0 \sec^2 t \times e^{k \sec^2 t [(z+\zeta)+i(x-\xi)\cos t+i(y-\eta)\sin t]} dt \right\} \quad (4)$$

$$r_s = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2} \quad (5)$$

$$r'_s = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+\zeta)^2} \quad (6)$$

در توابع انتگرالی بالا  $k_0 = g/U^2$  است و  $g$  شتاب گرانش زمین می‌باشد. سیستم مختصات انتخابی نیز یک سیستم مختصات راستگرد می‌باشد و مرکز آن روی سطح آب در حالت آرام قرار دارد. محور  $Z$ ، محور عمودی و راستای مثبت آن به سمت بالا در نظر گرفته شده است. به دلیل اینکه در روش توابع گرین، جریان حول یک جسم بر اساس نقاط چشمه و یا نقاط تکین با درجات بالاتر بیان می‌شود، محاسبه عددی  $\Phi_S$  و مشتقاتش در تئوری مقاومت موج از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. روش‌های مختلفی برای محاسبه این توابع بیان شده است. نقاط تکین در تابع تحت انتگرال  $G_{sd}$  را می‌توان در یک مسیر انتگرال‌گیری متفاوت، در صفحه اعداد مختلط رفع نمود، این مسیر در شکل (۱) نشان داده شده است. این صفحه متشکل از یک محور حقیقی مثبت، یک محور موهومی مثبت یا منفی و یک ربع دایره با شعاع  $R$  (مقدار این شعاع به سمت بی‌نهایت میل می‌کند) می‌باشد. بر روی محور حقیقی یک نیم‌دایره به شعاع  $r$  قرار دارد بطوریکه حد این شعاع به سمت صفر میل می‌کند و قطب  $k = k_0 \sec^2 t$  نیز در آن قرار دارد.



شکل ۱: مسیر انتگرال‌گیری جدید در صفحه اعداد مختلط

پس از انجام عملیات‌های ریاضی متوالی و انجام ساده سازی‌ها و تغییر متغیرهای متناسب، قسمت‌های انتگرالی مشتق تابع گرین در راستای X به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$G_{sx} = \frac{2k_0^2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{1+u^2} \operatorname{Im} \left[ \frac{1}{\zeta} - e^{\zeta} E_1(\zeta) \right] du - 4k_0^2 \int_A^B \sqrt{1+u^2} e^{-k_0|z+\zeta|(1+u^2)} \times \cos[k_0\sqrt{1+u^2}\{(x-\xi) + u(y-\eta)\}] du \quad (7)$$

حدود انتگرالی A و B با توجه به محدوده تغییرات برای y تعیین می‌شود، برای  $y - \eta > 0$  مقادیر  $A = -\infty$  و  $B = \infty$  و برای  $y - \eta < 0$  مقادیر  $A = -\frac{x-\xi}{y-\eta}$  و  $B = \frac{x-\xi}{y-\eta}$  می‌باشد [۶].

لازم به ذکر است مشتقات تابع گرین در سایر راستاها نیز قابل دستیابی است و در محاسبات از آنها استفاده می‌شود.

## روش عددی

حل تحلیلی جریان پتانسیل برای تعداد کمی از هندسه‌های ساده موجود است ولی برای اشکال مختلف ناگزیر به استفاده از حل عددی معادله لاپلاس است. روش‌های عددی که برای حل جریان سیال استفاده می‌شود به طور کلی به دو دسته معادلات انتگرالی و روش‌های مستقیم تقسیم می‌شود. مهمترین فایده و مزیت روش انتگرالی کاهش یک بعد از ابعاد مساله و تبدیل یک محیط نامحدود محاسباتی به یک محیط محدود می‌باشد. روش انتگرالی یک روش بسیار قوی و مناسب برای حل جریان پتانسیل ناشی می‌باشد. روش انتگرالی خود به طور کلی به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شود. یک راه حل عددی برای این روش‌های انتگرالی، المان مرزی می‌باشد که در این مقاله نیز از روش المان مرزی مستقیم در حالت سه بعدی استفاده شده است. معادله (۸) رابطه المان مرزی در حالت مستقیم را بیان می‌کند:

$$2\pi\phi(p) = \int_S \left\{ \phi(q) \frac{\partial}{\partial n_q} G(p, q) - G(p, q) \frac{\partial \phi(q)}{\partial n_q} \right\} ds_q \quad (8)$$

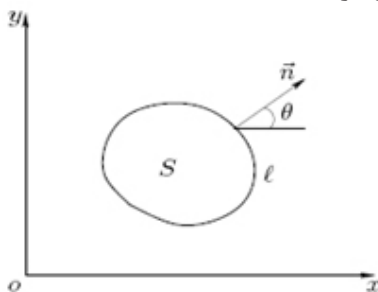
برای حل، معادله (۸) به یک سری معادلات جبری خطی تبدیل شده است که یک عمل معمول در روش‌های عددی می‌باشد، بدین ترتیب انتگرال به روی سطح S به چندین قسمت تقسیم می‌شود  $\int_S \{ \dots \} \approx \sum_{i=1}^N \int_{s_i} \{ \dots \}$  در این رابطه N تعداد تقسیمات می‌باشد و S اندازه سطح هریک از این تقسیمات است. در مورد هندسه چهار فرض اعمال شده است: بدنه با المان‌های مثلثی مدل شده است،

قدرت چشمه و دوقطبی ثابت است، المان‌ها به صورت خطی است و مرکز هریک از المان‌های مثلثی به عنوان نقطه مشخصه<sup>۱</sup> محسوب می‌شود. با اعمال این فرضیات معادله (۸) به شکل زیر قابل تغییر است.

$$\sum_{j=1}^{j=N} \phi_j \int_S \frac{\partial}{\partial n_q} G(p, q) ds_j - 2\pi\phi_i = \sum_{j=1}^N \frac{\partial \phi_j}{\partial n_j} \int_S G(p, q) ds_j \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

به عنوان نمونه در این مقاله یک کره مغروق مورد بررسی قرار گرفته شده است.

در این مقاله از تئوری دوم گرین در صفحه برای رفع تکینگی<sup>۲</sup> حاصل از قرار گرفتن نقاط چشمه و محیط بر روی یکدیگر استفاده شده است؛ شکل (۲) به صورت شماتیک اجزای این تئوری را نشان می‌دهد. بر اساس این تئوری انتگرال بر روی سطح به انتگرال بر روی خط تبدیل می‌شود،  $\int_S \frac{\partial \phi}{\partial x} dS = \int_l \phi \cos \theta dl$ . باید دقت داشت در این رابطه  $\theta$  زاویه میان سطح بسته  $S$  و محور  $x$  می‌باشد و  $l$  فضای بسته‌ای است که سطح  $S$  را دربر گرفته است.



شکل ۲: نمایی از اجزای تئوری گرین در صفحه

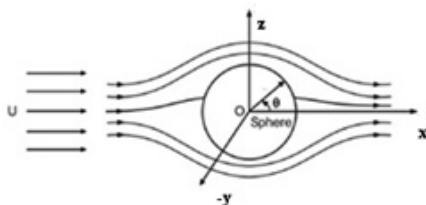
پس از تشکیل معادلات، با انتخاب روش‌های عددی حل مناسب [۷] می‌توان به محاسبه مقادیر مجهول پرداخت.

## نتایج

برای معتبرسازی نتایج حاصل از قسمت  $1/r$  تابع گرین، از حل تحلیلی آن استفاده شده است. بدین منظور کره‌ای در جریان یکنواخت با سرعت  $U$  در نظر گرفته شده است. در واقع جریان در اطراف یک کره را می‌توان از ترکیب یک جریان یکنواخت با یک دابلت سه‌بعدی مدل نمود و پتانسیل در اطراف کره برابر است با  $\phi = Ur \left(1 + \frac{a^3}{2r^3}\right)$  که  $U$  سرعت جریان یکنواخت و  $a$  شعاع کره و  $r$  نسبتی از شعاع کره

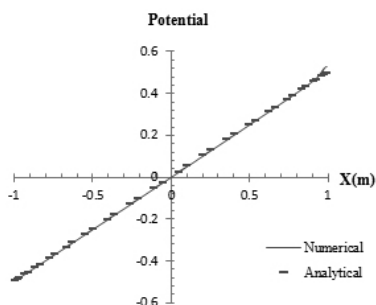
1-Nodal Point  
2-Singularity

می‌باشد که در صفحات پتانسیل ثابت با زاویه  $\theta$  قرار گرفته‌اند.



شکل ۳: مدلی از کره با در مقابل جریان یکنواخت با سرعت  $U$  [۸]

در شکل (۴) توزیع پتانسیل اغتشاشات ناشی از حرکت کره نسبت به محور  $x$ ، حاصل از حل عددی تابع  $1/r$  بر روی سطح کره‌ای با شعاع واحد نشان داده شده است.



شکل ۴: مقایسه حل تحلیلی و عددی تابع گرین  $1/r$  روی کره

نتایج حل عددی و حل تحلیلی تا حد بسیار زیادی نزدیکی دارند و اختلاف اندک میان آنها با افزایش تعداد تقسیمات هندسی روی کره کاهش می‌یابد.

وو و تیلور<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۸ به صورت تحلیلی به حل تابع گرین حرکت پایدار پرداختند و نتایج حاصل از آن را چاپ نمودند [۹]. در این مقاله نیز پس از ترکیب قسمت‌های مختلف تابع گرین حرکت پایدار درستی محاسبات با نتایج کار این دو نفر سنجیده شده است بطوریکه نزدیکی مقادیر دال بر درستی محاسبات می‌باشد.

با محاسبه گرادیان پتانسیل محاسبه شده برای حرکت یکنواخت بر روی جسم تحت مطالعه که در این مقاله کره‌ای با شعاع  $r_0$  می‌باشد (در محاسبات مقدار شعاع کره واحد در نظر گرفته شده است) و استفاده از رابطه برنولی، توزیع فشار در اطراف کره بدست آمده است. محاسبه فشار گامی دیگر در جهت نزدیکی به مقاومت موج‌سازی می‌باشد که با محاسبه نیرو و برآورد اختلاف نیرو در دوطرف جسم مقاومت موج‌سازی حاصل می‌گردد. برای بهتر نشان داده شدن نتایج، ضریب مقاومت موج‌سازی در این مقاله



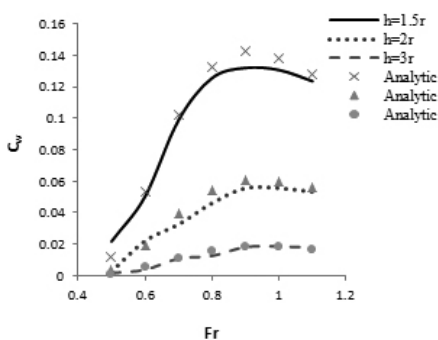
آورده شده است که به صورت  $C_w = R_w / \rho g \pi r^3$  تعریف می‌گردد.

در جدول (۱) نتایج حل عددی ضریب مقاومت موج سازی برای یک کره با شعاع  $r_0$  آورده شده است. باید دقت داشت که این نتایج برحسب عدد فرود است و عدد فرود تعریفی بر اساس  $h$  (فاصله مرکز کره از سطح آزاد) می‌باشد. محاسبات برای سه عمق مختلف انجام شده است.

جدول ۱: نتایج حل عددی ضریب مقاومت موج‌سازی

Fr	$h=1.5r_0$	$h=2r_0$	$h=3r_0$
0.5	0.0218	0.0025	0.0017
0.6	0.0503	0.0221	0.0038
0.7	0.0988	0.0325	0.0109
0.8	0.1255	0.0460	0.0126
0.9	0.1320	0.0556	0.0182
1.0	0.1307	0.0556	0.0186
1.1	0.1236	0.0532	0.0178
1.1	0.1236	0.0532	0.0178

به منظور مقایسه نتایج حاصل از حل عددی با نتایج حل تحلیلی، شکل (۵) رسم شده است. در این نمودار ضریب مقاومت موج سازی در سه عمق مختلف، برای حل تحلیلی و عددی بر حسب عدد فرود رسم شده است. عدد فرود بر حسب فاصله از سطح آزاد تعریف شده است.



شکل ۵: نمایش ضریب مقاومت موج‌سازی بر حسب عدد فرود

همانطور که از نمودار شکل (۵) مشخص است با افزایش فاصله از سطح آزاد، اثرات اغتشاشات ناشی از حرکت با سرعت یکنواخت کمتر دیده می‌شود. باید دقت داشت که این امر در مورد اجسام زیرسطحی می‌باشد و در مورد اجسام سطحی که در معرض امواج نیز قرار می‌گیرند این اثرات بسیار نمایان تر خواهد

بود. در محاسبات ضرایب هیدرودینامیکی شناورها، تاثیر جریان پایدار بر روی شرایط مرزی سطح آزاد و بر روی بدنه جسم کاملاً مشهود و موثر است.

### نتیجه گیری

از جمله عوامل موثر در مصرف سوخت و بهینه سازی انرژی، شناخت اصول حاکم بر طراحی وسیله مورد نظر می باشد. این اصل در صنعت دریایی و دریانوردی نیز کاملاً حکم فرماست. یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار در مصرف سوخت شناورها شناخت، طراحی و انتخاب دقیق سیستم رانش می باشد که این امر به صورت کاملاً مستقیم و صریح با شناخت دقیق اندازه مقاومت موج سازی شناور مرتبط است. با علم بر اهمیت این موضوع، در این مقاله به محاسبه عددی مقاومت موج سازی پرداخته شده است. به منظور معتبر سازی، نتایج حاصله با نتایج مربوط به حل تحلیلی مقایسه شده است و نشان داده شده است که نتایج محاسبات عددی تا حد بسیار زیادی به نتایج تحلیلی نزدیک است.

### مراجع

- [1]Liu, S., Papanikolaou, A., and Zaraphonitis, G. 2011. "Prediction of added resistance of ships in waves". Ocean Engineering , pp. 641-650.
- [2]Energy Conservation in IEA Countries, 1987. OECD, Paris.
- [3]Nabergoj, R., and Prpic-Oršic, J., 2007. "A Comparison of Different Methods for Added Resistance Prediction". 22nd IWWF, pp. 149-152. Plitvice.
- [4]Wilson, J., 1999. "Fuel and financial savings for operators of small fishing vessels". FAO Fisheries Technical Paper , 383.
- [5]Newman, J. N. ,1974. "The theory of ship motions". Advances in applied mechanics , pp. 221-283.
- [6]Shen, H. T., and Farell, C., 1977. "Numerical Calculation of the Wave Integrals in the Linearized Theory of Water Waves". Journal of Ship Research , 21, pp. 1-10.
- [7]Chapra, S., and Canale, R. P., 2006. Numerical Methods for Engineers. McGraw-Hill, Boston.
- [8]Mushtaq, M., Shah, N. A., and Muhammad, G., 2009. "Calculation of Flow Past A Sphere in the Vicinity of A Ground Using A Direct Boundary Element Method". Australian Journal of Basic and Applied Sciences , pp. 480-485.
- [9]Wu, G. X., and Eatock Taylor, R., 1988. "Radiation and Diffraction of Water Waves by a Submerged Sphere at Forward Speed". Jstor , 417, pp. 433-461.