

## محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی سکان با شبیه‌سازی آزمایش کشش استاتیکی

مولود آریان مرام، احمد حاجیوند\*، اعتمادالدین رابعی غلامی

گروه مهندسی کشتی سازی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۲۱

شناسه دیجیتال (DOI): [10.22113/jmst.2017.92715.2038](https://doi.org/10.22113/jmst.2017.92715.2038)

### چکیده

بررسی مانورپذیری در طراحی هیدرودینامیکی کشتی از اهمیت زیادی برخوردار است. در مراحل اولیه طراحی با کمک مدل‌های ریاضی می‌توان مانور شناور را پیش‌بینی نمود. برای شبیه‌سازی مانور شناور باید ضرایب هیدرودینامیکی بدنه و سکان در این مدل‌های ریاضی تعیین شود. با انجام آزمایش‌های مانور کپتیو یا روابط تجربی می‌توان این ضرایب را به دست آورد. روابط تجربی موجود معمولاً مربوط به شناورهای تک سکان هستند و برای شناورهای مجهز به دو سکان باید از روش‌های عددی یا آزمایشگاهی استفاده کرد. در این مقاله با شبیه‌سازی آزمایش کشش استاتیکی بدنه در محیط دینامیک سیالات محاسباتی در زوایای مختلف، ضرایب هیدرودینامیکی خطی و غیرخطی سکان محاسبه می‌شود. توزیع فشار در زوایای مختلف حمله استخراج و تأثیر زاویه حمله بر نیروی عرضی مطالعه شده است. همچنین توزیع میدان سرعت اطراف سکان در پاشنه کشتی جهت بررسی پدیده جدایی جریان در زوایای برخورد بالا استخراج شده است. مقایسه ضرایب هیدرودینامیکی بدست آمده با داده‌های آزمایشگاهی موجود، نشان دهنده دقت قابل قبول نتایج است.

**واژگان کلیدی:** مانور، ضرایب هیدرودینامیکی سکان، ضرایب میرایی خطی و غیر خطی، دینامیک سیالات محاسباتی

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: [hajivand@kmsu.ac.ir](mailto:hajivand@kmsu.ac.ir)

## ۱. مقدمه

قابلیت کنترل و مانورپذیری کشتی شامل حفظ مسیر، تغییر مسیر و تغییر سرعت همواره در طراحی کشتی به ویژه کشتی‌های نظامی از اهمیت بالایی برخوردار است. طی مسیر دریانوردی در مسیری هموار و در نتیجه کاهش مصرف سوخت و زمان سفر، کاهش احتمال برخورد با دیگر شناورها و موانع و در نتیجه کاهش احتمال آلودگی محیط دریا، افزایش قابلیت انجام عملیات‌های مختلف برای شناورهای نظامی از مزایای یک کشتی با مانورپذیری مناسب است.

همانند دیگر بخش‌های طراحی شناور، مانورپذیری یک شناور باید در مراحل اولیه طراحی نیز مورد بررسی قرار گیرد. بررسی پایداری دینامیکی شناور، طراحی سکان و شبیه‌سازی آزمایش‌های استاندارد مانور آزاد از مهم‌ترین اقداماتی است که در مراحل مقدماتی طراحی کشتی باید انجام گردد. مدل‌های ریاضی متنوعی برای شبیه‌سازی آزمایش‌های مانور وجود دارد که به سه دسته کلی مدل‌های ضرایب هیدرودینامیکی، مدل‌های پیمانه‌ای و مدل‌های پاسخی تقسیم می‌شوند. متداولترین مدل ریاضی در شبیه‌سازی مانور کشتی، مدل‌های ضرایب هیدرودینامیکی است. این مدل‌ها بر مبنای بسط نیروهای هیدرودینامیکی بدنه و سکان با شرایط اولیه معلوم محاسبه می‌گردد. در این مدل نیروهای هیدرودینامیکی سرج<sup>۱</sup>، سوی<sup>۲</sup> و ممان یاو<sup>۳</sup> با استفاده از بسط تیلور به صورت تابعی از مشخصات سینماتیک کشتی حول شرایط اولیه معلوم بیان می‌شوند. ضرایب بسط تیلور در این

توابع مشتقات هیدرودینامیکی یا ضرایب هیدرودینامیکی هستند که برای حل معادلات حرکت کشتی در صفحه افق باید این ضرایب را تعیین کرد.

روش‌های تعیین ضرایب هیدرودینامیکی بدنه و سکان، آزمایش مانور کپتیو، روابط تجربی، روش‌های تحلیلی و عددی هستند. عدم امکان آزمایش مانور کپتیو<sup>۴</sup> در مراحل اولیه طراحی مقدماتی، هزینه و زمان بالای انجام این آزمایش‌ها و اثرات قابل توجه مدل‌سازی بر نتایج از معایب انجام آزمایش مانور کپتیو است. روابط تجربی که عموماً از نتایج آزمایش مانور شناورهای قدیمی به‌دست آمده‌اند برای شناورهای امروزی دقت کافی ندارند و همچنین در بیشتر آنها تنها ضرایب خطی قابل محاسبه است. روش‌های تحلیل بر مبنای حل جریان پتانسیل اطراف بدنه کشتی به‌دست آمده و اثرات دمپینگ ناشی از لزجت را در نظر نمی‌گیرند. شبیه‌سازی آزمایش‌های مانور کپتیو با حل معادلات دقیق حاکم بر جریان سیال بهترین گزینه برای استخراج ضرایب هیدرودینامیکی خطی و غیرخطی بدنه و سکان است. قابلیت استفاده برای شناور با ابعاد اصلی، در نظر گرفتن اثرات لزجت، قابلیت استفاده در مراحل اولیه طراحی، هزینه و زمان کمتر، قابلیت مطالعه رفتار سیال در اطراف بدنه در زمان شبیه‌سازی از مزایای این روش است.

تحقیقات محدودی جهت محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی یک شناور دریایی با وجود سطح آزاد انجام شده است که پروفیسور استرن و همکاران (Stern et al. (2008)) این تحقیقات را مرور کرده‌اند. در ۲۰۱۲ سپمنسون و همکاران (Simonsen et al. (2012)) آزمایش کشش مورب را با نرم‌افزار استارسی‌سی‌ام‌پلاس

<sup>1</sup> Surge

<sup>2</sup> Sway

<sup>3</sup> Yaw

<sup>4</sup> Captive

شناور نسبت به صفحه OXZ و اینکه مختصه

$$\begin{aligned} m(\dot{u} - rv - x_G r^2) &= X_T \\ m(\dot{v} + ur - x_G \dot{r}) &= Y_T \\ I_z \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) &= N_T \end{aligned} \quad (1)$$

عرضی مرکز جرم برابر صفر است معادلات حرکت کشتی به صورت معادلات (۱) بیان می‌شود.

که در آن  $m$  جرم شناور و  $I_z$  به ممان اینرسی شناور نسبت به محور  $z$  است.  $x_G$  موقعیت طولی مرکز جرم شناور را بیان می‌کند.  $u$  و  $v$  به ترتیب نشان‌دهنده سرعت‌های سرچ، سوای و  $\dot{v}$  و  $\dot{u}$  به ترتیب نشان‌دهنده شتاب سرچ و سوای است.  $r$  نشان‌دهنده سرعت یاو و  $\dot{r}$  نشان‌دهنده شتاب یاو است. در معادلات **Error! Reference source**

**(not found)**،  $X_T$  و  $Y_T$  به ترتیب برآیند نیروهای وارد به شناور در جهت‌های سرچ، سوای هستند و  $N_T$  برآیند ممان‌های وارد به شناور نسبت به محور  $z$  است.

با مدل‌سازی ریاضی نیروهای  $X_T$ ،  $Y_T$  و ممان  $N_T$  و حل معادله **Error! Reference source not**

**found** (۲) می‌توان مانور پذیری یک شناور را در مرحله طراحی بررسی نمود. در شرایط آب آرام این نیروها شامل نیروهای هیدرودینامیکی و نیروهای تولید شده توسط سطوح کنترلی و تراسترها است.

$$\begin{aligned} X_T &= X + X_C \\ Y_T &= Y + Y_C \\ N_T &= N + N_C \end{aligned} \quad (2)$$

نیروهای هیدرودینامیکی خود شامل دو بخش وابسته به شتاب، نیروهای جرم افزوده، و نیروهای وابسته به سرعت، نیروهای میرایی، است. این نیروها توسط مدل‌های ریاضی تخمین‌زده می‌شوند. روابط آبکویتز که از نوع مدل‌های ضرایب هیدرودینامیکی است متداول‌ترین روش برای بیان

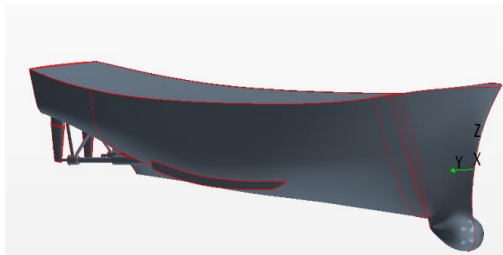
شبیه‌سازی کرده‌اند و ضرایب خطی و غیرخطی وابسته به سرعت عرضی را محاسبه نموده‌اند. حاجیوند و همکاران (Hajivand et al., 2015) ضرایب هیدرودینامیکی خطی و غیرخطی وابسته به سرعت عرضی برای یک شناور نظامی را با شبیه‌سازی آزمایش کشش مورب در نرم‌افزار اپن-فوم محاسبه کردند. آن‌ها (Hajivand et al. (2015)) همچنین ضرایب هیدرودینامیکی وابسته به سرعت و شتاب عرضی و دورانی را با شبیه‌سازی آزمایش‌های حرکت کشش مورب و دینامیکی در نرم‌افزار استارسی‌سی‌ام‌پلاس محاسبه نمودند.

با توجه به اهمیت فراوان نیروی سکان در بحث مانورپذیری شناور در این مقاله با شبیه‌سازی تست کشش استاتیکی در زاویای مختلف سکان علاوه بر مطالعه رفتار جریان در پاشنه شناور و سکان، ضرایب هیدرودینامیکی خطی و غیرخطی سکان برای یک شناور نظامی مجهز به دو سکان محاسبه شده است و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است که دقت بالای محاسبات مشاهده می‌شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

برای بررسی مانور یک شناور دریایی معادلات حرکت آن در صفحه افق و در سه درجه آزادی سرچ، اسوی و یاو و در دستگاه مختصات متصل بیان می‌شود. دستگاه مختصات متصل به بدنه OXYZ، با توجه به اینکه تقریباً تمام وسایل دریایی تقارن عرضی دارند، به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که صفحه OXZ بر صفحه تقارن بدنه منطبق گردد. در دستگاه مختصات OXYZ، محور OZ محور عمودی بوده و به سمت پایین مثبت، محور OX محور طولی و در جهت جلوی شناور مثبت و محور OY محور عرضی و در جهت راست مثبت در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تقارن هندسی بدنه

برای اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی آزمایش های کپتیو در محیط دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه سازی ها بر روی مدل یک شناور نظامی به نام دی تی ام بی<sup>۱</sup> ۵۵۱۲ انجام شده است. آزمایش های بیان شده بر روی این شناور یا مدل های دیگر آن با مقیاس متفاوت در آزمایشگاه انجام شده است و داده های آزمایشگاهی و ضرایب هیدرودینامیکی محاسبه شده به منظور استفاده در معتبر سازی شبیه سازی های عددی در دسترس قرار گرفته است. تصویر این شناور در (شکل ۱) و مشخصات آن در (جدول ۱) مشاهده می شود.



شکل ۱: بدنه شناور دی تی ام بی ۵۵۱۲

جدول ۱: مشخصات هندسی بدنه مدل دی تی ام بی ۵۵۱۲ ( <a href="http://www.simman2008.dk/">http://www.simman2008.dk/</a> )		
طول	۳/۰۴۸	متر
عرض	۰/۴۱۰	متر
آبخور	۰/۱۳۶	متر
جابجایی	۰/۰۸۶	مترمکعب
مساحت سطح خیس	۱/۳۷۱	مترمربع
ضریب ظرافت	۰/۵۰۶	[-]

نیروهای هیدرودینامیکی است. در این مدل نیروهای هیدرودینامیکی بر اساس مشخصات سینماتیکی حرکت کشتی بسط داده می شوند.

$$\begin{aligned}
 X &= X_u u + X_{uu} u^2 + X_{uuu} u^3 + X_{vv} v^2 + X_{vvv} v^3 + X_{rr} r^2 + \\
 &X_{rv} vr + \dots + X_{vuu} v^2 u + X_{rvu} r^2 u + \dots \\
 Y &= Y_e + Y_u u + Y_{uu} u^2 + Y_v v + Y_r r + Y_{vv} v^2 + Y_{rr} r^2 + \\
 &Y_{ur} ur + Y_{uv} uv^2 + Y_{ru} ru^2 + \dots \\
 N &= N_e + N_u u + N_{uu} u^2 + N_v v + N_r r + N_{vv} v^2 + N_{rr} r^2 + \\
 &N_{ur} ur + N_{uv} uv^2 + N_{ru} ru^2 + \dots
 \end{aligned} \quad (3)$$

ضرایب سمت راست معادلات (۳) ضرایب هیدرودینامیکی نامیده می شوند. که با شبیه سازی آزمایش های مکانیزم حرکت صفحه ای به دست می آیند (Hajivand A, 1394).

نیروهای ناشی از سطوح کنترلی و تراسترها شامل  $X_C$ ،  $Y_C$  و  $N_C$  که به تعداد، نوع و موقعیت این المانها بستگی دارد. در مانور دور زدن نیروهای کنترلی ناشی از نیروی طولی، عرضی و ممان یاو ایجاد شده توسط سکان در نظر گرفته شده است. اگر نیروهای کنترلی به صورت  $X_R$ ،  $Y_R$ ،  $N_R$  در نظر گرفته شوند با استفاده از بسط تیلور مؤلفه های این نیرو به صورت

$$\begin{aligned}
 X_R &= X_{\delta\delta} \delta^2 \\
 Y_R &= Y_{\delta} \delta + Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 \\
 N_R &= N_{\delta} \delta + N_{\delta\delta\delta} \delta^3
 \end{aligned} \quad (4)$$

بیان می شوند. در این روابط  $\delta$  زاویه انحراف سکان و ضرایب سمت راست، ضرایب هیدرودینامیکی سکان است. هدف این مقاله محاسبه این ضرایب با استفاده از شبیه سازی آزمایش کشش استاتیکی سکان است.

معرفی مدل

<sup>1</sup> David Taylor Model Basin (DTMB)

معادله فرارفت به صورت (۶) به دست می آید (Rusche, 2002).

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot cU + \nabla \cdot (c(1-c)U_a) = 0 \quad (6)$$

که  $U_a$  میدان سرعت متناسب برای فشرده کردن سطح آزاد است. برای محاسبه مشخصات در سطح آزاد معادله انتقال برای کسر حجمی حل می شود و چگالی و لزجت سیال به صورت

$$\rho = \rho_{air}c + \rho_{water}(1-c) \quad (7)$$

$$\mu = \mu_{air}c + \mu_{water}(1-c)$$

محاسبه می شوند (Hirt et al., 1981). مدل اغتشاشی جامعی برای تمام مسائل مکانیک سیالات وجود ندارد. مدل  $k-\varepsilon$  کاربرد فراوانی در هیدرودینامیک دریایی دارند و برای مدل سازی اثرات اغتشاش جریان اطراف بدنه بررسی شده است (Larsson, 2010). در واقع، مدل دو معادله- $k-\varepsilon$  متداول ترین مدل اغتشاشی است که در آن تنش رینولدز به صورت یک لزجت ادی اضافی که مشخصه جریان است در نظر گرفته می شود که به صورت

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

بیان می شود. که  $k$  انرژی جنبشی اغتشاشی بر واحد جرم،  $\square$  نرخ میرایی انرژی جنبشی بر واحد جرم و  $C_\mu$  یک ثابت بدون بعد با مقدار متداول ۰/۰۹ است. انرژی جنبشی اغتشاشی و نرخ میرایی آن از حل معادلات انتقال به دست آمده می-آیند (Mohammadi et al., 1994).

برای حل معادلات ناویر استوکس با روش متوسط زمانی نرم افزارهای متعددی وجود دارد. شبیه سازیها با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات

شناور مدل مجهز به بیلج کیل، سیستم شفت و براکت و دو سکان است. مساحت هر کدام از سکانها برابر ۰/۱۸۷ متر مربع و از نوع سکان اسپید<sup>۱</sup> است که دارای یک بخش ثابت و یک بخش متحرک است (شکل ۲).



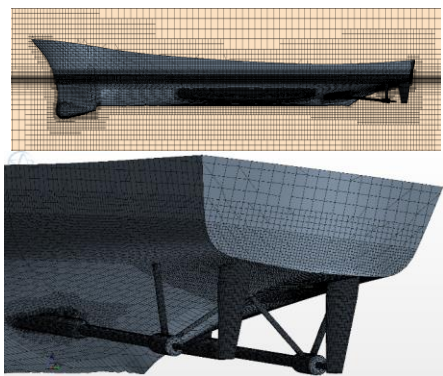
شکل ۲: سکان شناور DTMB 5415

برای شبیه سازی آزمایش کشش استاتیکی سکان مدل ریاضی جریان سیال در اطراف بدنه با در نظر گرفتن لزجت ناپایا در اطراف بدنه و حل معادله ناویر-استوکس بدست می آید. در بیشتر موارد جریان اطراف یک شناور یک جریان مغشوش و روش حل جریان مغشوش اطراف بدنه شناور، روش متوسط زمانی ناویر استوکس است. معادلات متوسط زمانی ناویر استوکس به صورت معادلات (۵) می باشند (Ubbink, 1997)

$$\begin{aligned} \nabla \cdot U &= 0 \\ \frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) &= \\ -\nabla p^* - g \cdot R \nabla \rho + \nabla U \cdot \nabla \mu_{eff} + \sigma \kappa \nabla c \end{aligned} \quad (5)$$

که  $U$  بردار سرعت سیال،  $\rho$  چگالی سیال،  $\mu_{eff}$  لزجت مؤثر سیال که می توان آن را به صورت  $\mu_{eff} = \mu + \rho \nu_{turb}$  بیان کرد ( $\mu$  لزجت دینامیک و  $\nu_{turb}$  لزجت سینماتیک اغتشاش)،  $p^*$  فشار،  $g$  بردار شتاب گرانش،  $R$  بردار موقعیت،  $\sigma$  اثر کشش سطحی،  $\kappa$  انحناى سطح آزاد است. علاوه بر این  $c$  کسر حجمی است که به صورت نسبت حجم هوا به حجم کل در هر سلول تعریف می شود و از حل

<sup>۱</sup> Spade



شکل ۴: شبکه بندی بدنه و محدوده محاسباتی

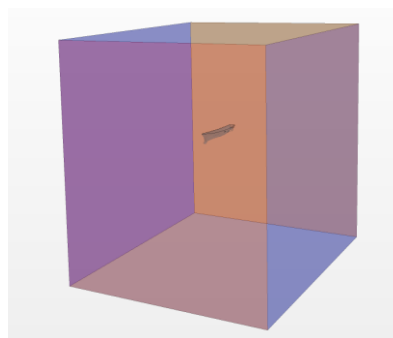
برای انتخاب شبکه بهینه به گونه‌ای که نتایج مستقل از تغییرات شبکه باشد نیاز است که مطالعه شبکه برای یک حالت خاص انجام شود. در این مقاله از نتایج نهایی مطالعه شبکه برای شبیه سازی آزمایش کشش مورب شناور دی تی ام بی ۵۵۱۲ در مقاله (Hajivand et al. (2015)) توسط مولف استفاده شده است.

### ۳. نتایج

آزمایش کشش استاتیکی سکان برای زوایای مختلف (۲۰، ۱۶، ۱۲، ۱۱، ۱۰، ۹، ۶، ۲، ۰، ۳۰ درجه) سکان شبیه سازی شده است. با توجه به تقارن بدنه و سکان حول صفحه O-XZ شبیه سازی‌ها برای یک جهت انجام شده و برای بررسی اثر تقارن نتایج آزمایش برای زاویه ۹ درجه در جهت مخالف نیز انجام شده است. در هر آزمایش مقادیر نیروی طولی، عرضی و ممان عمودی وارد به بدنه و سکان پس از همگرایی نتایج محاسبه شده است. از آنجا که تغییرات نیروی طولی بر حسب زاویه سکان تابعی مرتبه دوم و تغییرات نیروی عرضی و ممان عمودی بر حسب زاویه سکان تابعی مرتبه سوم است برای در نظر گرفتن اثرات غیرخطی و بررسی احتمال وقوع جدایش جریان آزمایش کشش استاتیکی سکان تا زاویه ۳۰ درجه شبیه سازی شده است.

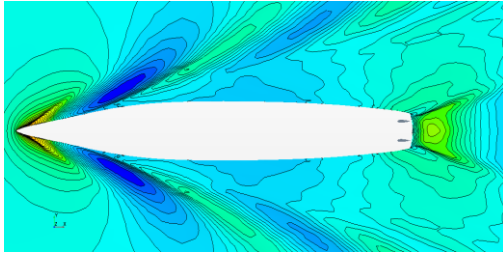
محاسباتی STAR-CCM+ نسخه ۱۱/۰۴ انجام شده است.

معادلات متوسط زمانی، سطح آزاد و اغتشاش با در نظر گرفتن شرایط مرزی و اولیه مناسب با استفاده از روش حجم محدود حل می‌شوند. محدوده محاسباتی مورداستفاده برای شبیه سازی آزمایش‌های حرکت صفحه‌ای دینامیکی و بازوی دوار یکسان در نظر گرفته خواهد شد. فاصله مرزهای ورودی و خروجی از مرکز مدل به ترتیب برابر ۱،۵ و ۳ برابر طول مدل در نظر گرفته شده‌اند. مرزهای کناری در فاصله ۲،۵ برابر طول مدل و مرز بالا و پایین محدوده محاسباتی به ترتیب در فاصله ۱ و ۲ برابری طول مدل تعریف شده‌اند (شکل ۳).

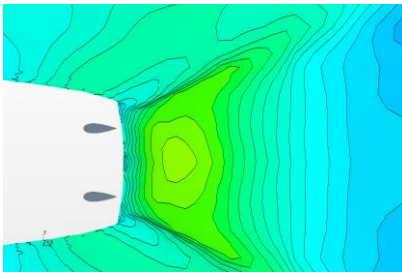


شکل ۳: محدوده محاسباتی

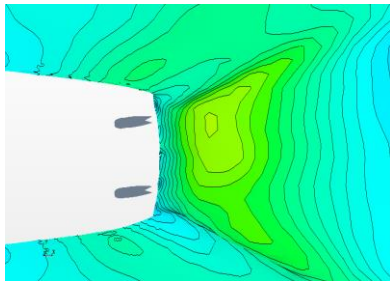
برای شبکه بندی محدوده محاسباتی از روش ساختار نیافته تریمر استفاده شده است. با کمک این روش شبکه‌ای با کیفیت بالا و کمترین عدم تقارن ایجاد خواهد شد (STAR-CCM+ user guide, 2013). در محدوده‌ای از سطح آزاد که احتمال تشکیل موج وجود دارد شبکه محاسباتی با کوچک تر کردن ابعاد شبکه بندی اصلاح گردیده است (شکل ۴). در نهایت برای افزایش دقت نتایج تعداد شبکه بندی حدود  $2 \times 10^6$  در نظر گرفته شده است.



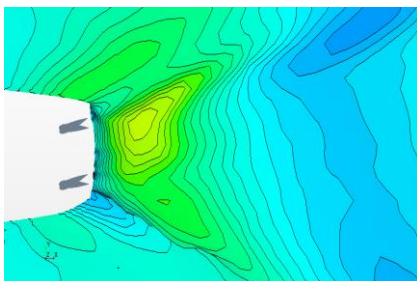
شکل ۶: الگوی موج اطراف بدنه



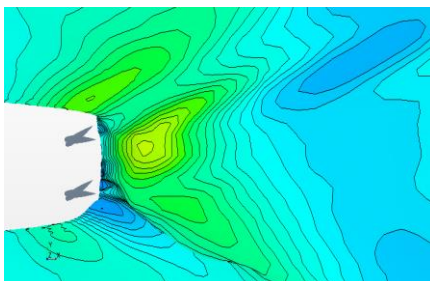
شکل ۷: الگوی موج اطراف پاشنه در ۰ درجه



شکل ۸: الگوی موج اطراف پاشنه در ۱۰ درجه

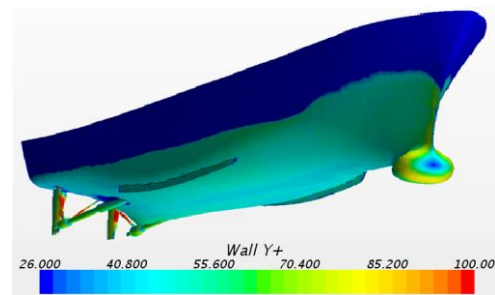


شکل ۹: الگوی موج اطراف پاشنه در ۲۰ درجه



شکل ۱۰: الگوی موج اطراف پاشنه در ۳۰ درجه

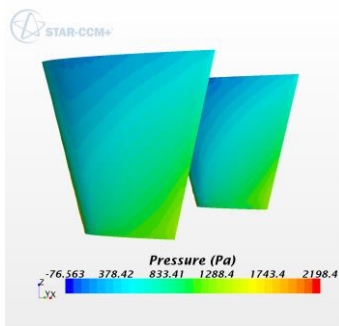
برای افزایش دقت محاسبات در ناحیه لایه مرزی از ایده اصلاح شبکه لایه منشوری استفاده شده است. جریان مغشوش در این ناحیه با توابع دیواره تخمین زده می‌شود. این توابع بر مبنای روابط تجربی به دست آمده‌اند. برای قابل قبول بودن استفاده از این توابع، همان‌گونه که قبلاً بیان شد باید کمیت بی بعد  $y^+$  بین ۳۰ تا ۱۰۰ باشد. در توزیع این کمیت روی سطح بدنه مدل نشان داده شده است.

شکل ۵: توزیع  $y^+$  روی بدنه شناور

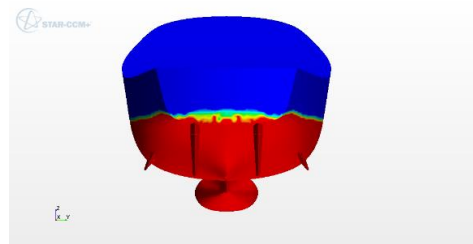
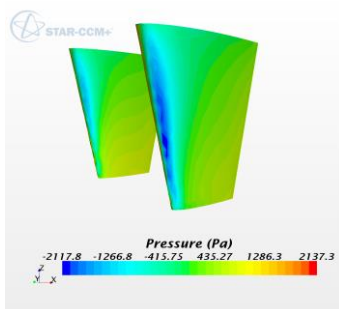
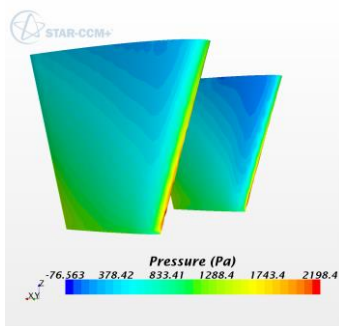
در (شکل ۶) الگوی موج اطراف بدنه در زاویه سکان صفر درجه آورده شده است. سپس در (شکل‌های ۷ تا ۱۰) الگوی موج در اطراف پاشنه شناور در زوایای سکان ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه ارائه شده است تا اثر زاویه حمله سکان بر ویک پاشنه دیده شود. در این اشکال به خوبی دیده می‌شود که زاویه حمله سکان باعث انحراف الگوی موج به سمت جهت چرخش سکان می‌شود. برای درک بهتر اثر سکان بر الگوی موج اطراف پاشنه، توزیع کسر حجمی روی بدنه در چهار زاویه بالا از (شکل ۱۱ تا ۱۴) ارائه شده است. نتیجه گرفته می‌شود که موج اطراف پاشنه مدل، در صفر درجه متقارن است در صورتی که در دیگر زوایای سکان، جهت انتشار موج به سمت چرخش سکان تمایل پیدا می‌کند و هرچه میزان چرخش سکان بیشتر باشد، این تغییرات بیشتر می‌شود.

سکان یکسان نیست و فشار در جهت چرخش سکان، بیشتر است که این اختلاف فشار عامل ایجاد نیروی عرضی سکان است.

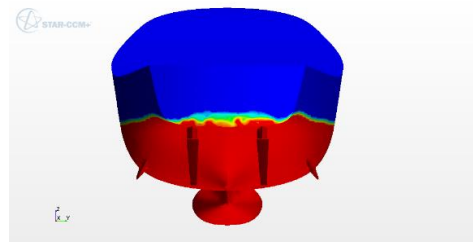
برای درک بیشتر اختلاف فشار دو طرف سکان در شکل ۱۷ توزیع فشار دو سمت سکان (در موقعیت میانه ارتفاع سکان) در طول کورد برای زوایای حمله ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه ارائه شده است. مشاهده می شود بیشترین اختلاف فشار مربوط به لبه ابتدایی سکان است و با حرکت به سمت لبه انتهایی فشار سطح بالایی و پایینی سکان به هم نزدیک می شود و در خروج از سکان فشار دو سمت برابر می شود (شرط کوتا). همچنین قابل مشاهده است که با افزایش زاویه حمله اختلاف فشار دو سمت افزایش پیدا می کند.



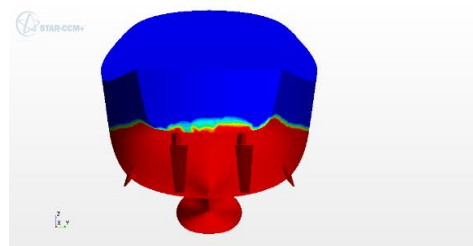
شکل ۱۵: توزیع فشار بر روی سکان در ۰ درجه



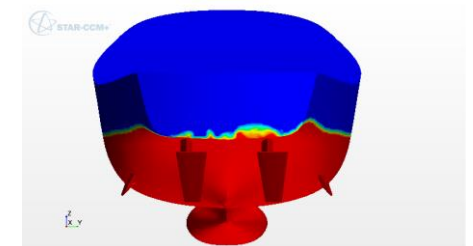
شکل ۱۱: کسر حجمی اطراف پاشنه در ۰ درجه



شکل ۱۲: کسر حجمی اطراف پاشنه در ۱۰ درجه



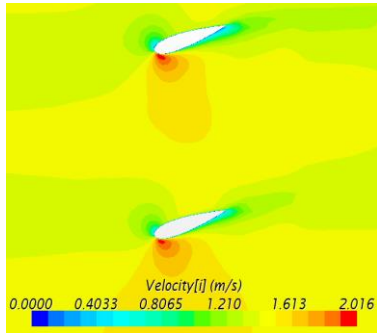
شکل ۱۳: کسر حجمی اطراف پاشنه در ۲۰ درجه



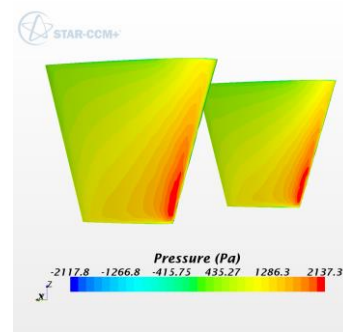
شکل ۱۴: کسر حجمی اطراف پاشنه در ۳۰ درجه

نیروی ناشی از سیال وارد به سکان به توزیع فشار روی بدنه سکان بستگی دارد. در شکل های ۱۵ و ۱۶ توزیع فشار روی دو سکان شناور در زوایای حمله ۰ و ۳۰ درجه آورده شده است. توزیع فشار در صفر درجه در دو سمت سکان با توجه به تقارن جریان در دو سمت یکسان است در حالی که در زاویه ۳۰ درجه، توزیع فشار در دو سمت

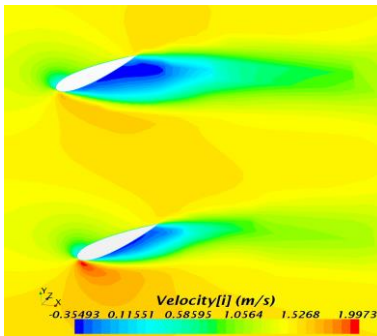




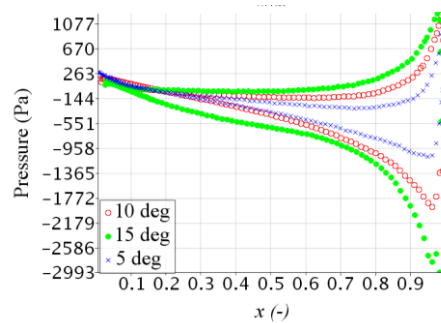
شکل ۱۹: پدیده جدایش جریان در ۱۶ درجه



شکل ۱۶: توزیع فشار بر روی سکان در ۳۰ درجه

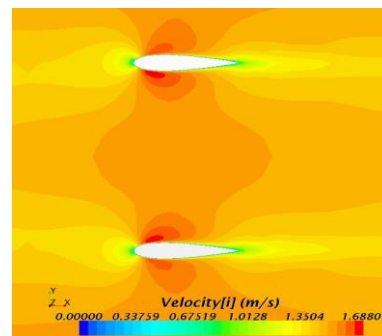


شکل ۲۰: پدیده جدایش جریان در ۳۰ درجه



شکل ۱۷: توزیع فشار بر روی سکان در زوایای مختلف

در شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ احتمال وقوع پدیده جدایش در اطراف سکان بررسی شده است. مشاهده می‌شود در زاویه ۰ درجه هیچگونه جدایشی رخ نمی‌دهد و از زاویه ۱۶ درجه جدایش جریان شروع شده و در زاویه ۳۰ درجه که ماکزیمم زاویه سکان است به وضوح این پدیده قابل رویت است.



شکل ۱۸: پدیده جدایش جریان در ۰ درجه

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی سکان و نیز مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی (EFD) برای بررسی دقت نتایج، مقادیر نیروهای طولی و عرضی و ممان یاو با استفاده از روابط (۹) بی بعد می‌شوند. (Hajivand et al.(2015))

$$X' = \frac{F_x}{0.5 \rho u^2 T L_{PP}}$$

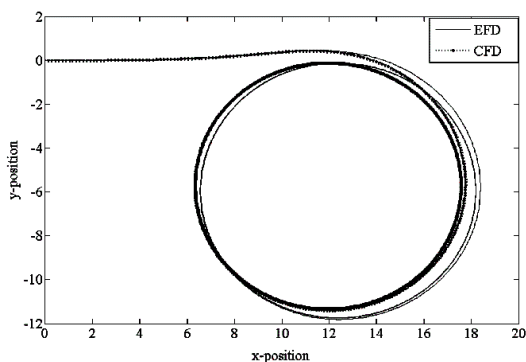
$$Y' = \frac{F_y}{0.5 \rho u^2 T L_{PP}}$$

$$N' = \frac{M_z}{0.5 \rho u^2 T L_{PP}^2} \quad (9)$$

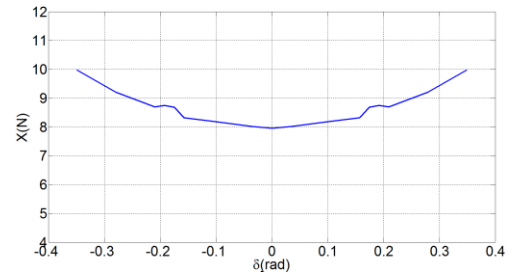
در (شکل‌های ۲۲ تا ۲۴) نتایج عددی مقایسه شده‌ی نرم‌افزاری با آزمایشگاهی ارائه شده است، که با بررسی این مقایسه می‌توان به دقت قابل قبول نتایج حاصل پی‌برد.

برای شبیه سازی مانور شناور علاوه بر ضرایب هیدرودینامیکی سکان به ضرایب هیدرودینامیکی بدنه نیاز است که از نتایج آزمایشگاهی که در (جدول ۳) آورده شده است، استفاده می گردد. با جایگذاری ضرایب هیدرودینامیکی در معادلات مانور و حل عددی معادلات با روش انتگرال گیری عددی آزمایش دوران شناور دی تی ام بی ۵۵۱۲ برای زاویه سکان ۳۵ درجه و عدد فرود ۰/۲۸ شبیه سازی شده است. مسیر حرکت شناور در (شکل ۲۵) و تغییر سرعت پیشروی و سرعت دورانی شناور در (شکل ۲۶) مشاهده می گردد. جدول (۳) ضرایب هیدرودینامیکی بدنه (Yoon,2009)

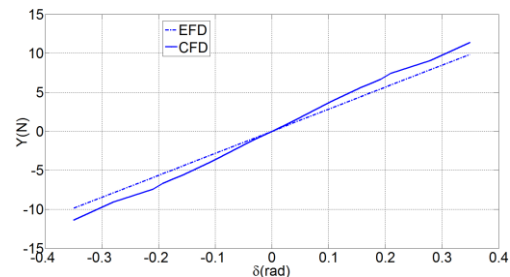
ضرایب	مقدار
$X_{\dot{u}}$	-۰/۰۰۸۷
$X_{\dot{u}\dot{u}}$	-۰/۰۲۰۵
$X_{\dot{r}\dot{r}}$	-۰/۰۱۹۰
$X_{\dot{v}\dot{v}}$	-۰/۱۴۲۱
$X_{\dot{v}\dot{r}}$	-۰/۰۳۰۰
$X_{\dot{v}\dot{v}\dot{u}}$	-۰/۰۹۰۳
$X_{\dot{r}\dot{r}\dot{u}}$	-۰/۰۰۹۴
$Y_{\dot{r}\dot{r}\dot{r}}$	-۱/۳۶۸۳
$Y_{\dot{v}\dot{u}}$	-۰/۰۲۴۲
$Y_{\dot{v}\dot{v}\dot{r}}$	-۱/۷۰۶۷
$N_{\dot{r}\dot{r}\dot{r}}$	-۰/۴۰۱۱
$N_{\dot{v}\dot{u}}$	-۰/۰۳۹۷
$N_{\dot{v}\dot{v}\dot{r}}$	-۰/۵۵۱۲



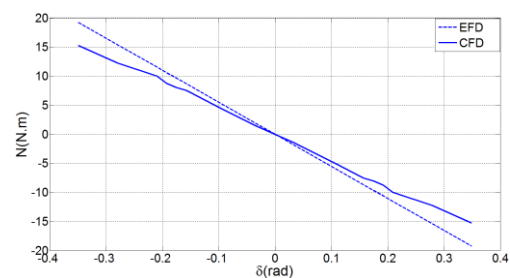
شکل ۲۴ مسیر حرکت شناور دی تی ام بی در مانور دوران



شکل ۲۱: نمودار نیروی طولی بر حسب زاویه حمله سکان



شکل ۲۲: نمودار مقایسه‌ی نیروی عرضی نرم افزاری و آزمایشگاهی



شکل ۲۳: نمودار مقایسه‌ی ممان یاء نرم افزاری و آزمایشگاهی

با استفاده از معادلات توابع چندجمله‌ای بدست آمده مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی سکان محاسبه می شوند.

جدول ۲: مقدار ضرایب هیدرودینامیکی سکان

ضرایب	مقدار
$X_{\delta\delta}$	-۰/۰۰۰۲
$Y_{\delta}$	-۰/۰۰۰۲
$Y_{\delta\delta\delta}$	۰/۰۰۰۲
$N_{\delta}$	-۰/۰۷۷۳
$N_{\delta\delta\delta}$	۰/۰۷۷۵

of Ship Research, Vol. 55, No. 2, , pp. 135–147. 2011.

Simonsen, C.D., Otzen, J.F., Klimt, C., Larsen, N.L. and Stern, F.; “Maneuvering predictions in the early design phase using CFD generated PMM data”. 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, Gothenburg, Sweden, 26-31 August 2012.

Hajivand, A., Mousavizadegan, S.H.; Virtual maneuvering test in CFD media in presence of free surface. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 7(3). Pp 540-558. 2015

Hajivand, A., Mousavizadegan, S.H., 2015. Virtual simulation of maneuvering captive tests for a surface vessel. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 7(5). Pp623-640

Hajivand A. 1394. Development of a nonlinear numerical model for ship maneuvering in regular wave. Ph. D. Thesis. Maritime Engineering Department, Amirkabir university Of Technology. Iran.

<http://www.simman2008.dk/>

Ubbink, O. 1997. Numerical prediction of two fluid systems with sharp interface. Ph. D thesis. Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science .

Rusche, H. 2002. Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fraction. Ph. D thesis. Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science.

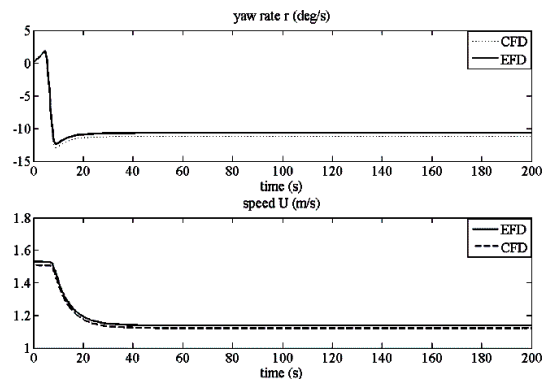
Hirt, C.W. and Nichols, B.D.;” Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries”. Journal of Computational Physics, 39, pp.201-225. 1981 .

Larsson, L. Hoyte C. Raven.; “Principles of Naval Architecture: Ship Resistance & Flow”. SNAME, 2010 .

Mohammadi, B., & Pironneau, O.; “Analysis of the K-epsilon turbulence model.” Masson, Saint-Jean-de-Monts, France, 1994.

STAR-CCM+ user guide, 2013

Hajivand A and Mousavizadegan H. 2015. Virtual simulation of maneuvering captive tests for a surface vessel.



شکل ۲۵ تغییر سرعت یاو (شکل بالا) و سرعت پیشروی (شکل پایین) در مانور دوران

### جمع بندی و نتیجه گیری

محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی شناور با شبیه سازی مانورهای کپتیو در محیط دینامیک سیالات محاسباتی، امکان پیش بینی دقیق مانور در مراحل ابتدایی طراحی در آب آرام را ایجاد می کند. برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی غیرخطی باید آزمایش کشش استاتیکی سکان را در زوایای حمله سکان بیش از ۱۲ درجه شبیه سازی کرد تا نمودار نیروی هیدرودینامیکی سکان-زاویه حمله سکان از حالت خطی خارج شود.

نیروی عرضی و ممان یاو تابعی فرد نسبت به تغییرات زاویه سکان است و منحنی مرتبه سوم تطابق قابل قبولی با نتایج دارد. تغییرات نیروی عرضی بر حسب زاویه سکان در ربع اول و سوم و تغییرات ممان یاو در ربع دوم و چهارم محورهای مختصات است، و همچنین نیروی طولی وارد به شناور تابعی زوج نسبت به تغییرات سکان است و منحنی مرتبه دوم تطابق قابل قبولی با نتایج دارد.

### منابع

Stern F. Agdrup K. Kim S Y. Hochbaum A C. Rhee K P. Quadvlieg F. Perdon P. Hino T. Broglia R. Gorski J.; “Experience from SIMMAN 2008—The First Workshop on Verification and Validation of Ship Maneuvering Simulation Methods”. Journal

Yoon, H.S. 2009. Phase-averaged stereo-PIV Flow Field and Force/moment/motion measurements for Surface combatant in PMM maneuver. Ph. D thesis. The University of Iowa.

---

## Calculation of rudder hydrodynamic coefficients by simulation of static towing test

---

Moloud Aryan Maram, Ahmad Hajivand\*, Etemaadodin Rabei Gholami

Department of Naval Architect, Faculty of Marine Engineering, Khoramshahr Marine Science and Technology University, Iran

---

(DOI): [10.22113/jmst.2017.92715.2038](https://doi.org/10.22113/jmst.2017.92715.2038)

---

### Abstract

Maneuverability is an important quality of marine vehicles. It should be controlled during various design stages and at the end of building the vessels. It has influences on efficiency and safety of ship. Maneuvering of a ship is investigated based on its course keeping, course changing and speed changing abilities. Hydrodynamic coefficients of ship and rudder should be derived to simulate maneuvering tests. These coefficients can be obtained by using captive model test and empirical formula. Accuracy of rudder hydrodynamic coefficients is important to calculate rudder force as the most influence force in ship maneuver, precisely. Empirical formula usually is correspond to single rudder ships and for twin rudder ships numerical or experimental method are used. In this paper, by using numerical method and simulation of static towing test in computational fluid hydrodynamic environment for different angles, linear and nonlinear rudder hydrodynamic coefficients are calculated. Also, fluid velocity field around rudder is obtained to investigate separation for high rudder angle. The comparison of simulated results with the available experimental shows a very good agreement among them.

**Keywords:** Maneuver, Rudder hydrodynamic coefficients, linear and nonlinear damping coefficient, Computational fluid dynamic.

---

### List of tables & figures

---

Figure 1. DTMB 5415 hull

Figure 2. DTMB 5415 rudder

Figure 3. Computational domain

Figure 4. Hull and domain discretization

Figure 5.  $y^+$  distribution on hull body

Figure 6. Wave pattern around hull

Figure 7. Wave pattern around stern at 0 degree

Figure 8. Wave pattern around stern at 10 degree

Figure 9. Wave pattern around stern at 20 degree

Figure 10. Wave pattern around stern at 30 degree

Figure 11. Volume fraction around stern at 0 degree.

---

\*Corresponding author, E-mail: [hajivand@kmsu.ac.ir](mailto:hajivand@kmsu.ac.ir)

- Figure 12. Volume fraction around stern at 10 degree.  
Figure 13. Volume fraction around stern at 20 degree.  
Figure 14. Volume fraction around stern at 30 degree.  
Figure 15. Pressure distribution on rudder at 0 degree  
Figure 16. Pressure distribution on rudder at 30 degree  
Figure 17. Pressure distribution plot on rudder at 0 different conditions  
Figure 18. Flow separation at 0 degree  
Figure 19. Flow separation at 16 degree  
Figure 20. Flow separation at 30 degree  
Figure 21. Longitudinal force vs. rudder angle  
Figure 22. CFD and EFD transverse force comparison  
Figure 23. CFD and EFD yaw moment comparison  
Figure 24. Ship trajectory in turning maneuver  
Figure 25. Yaw velocity changes (up) and advance velocity (down) in turning  
Table 1. DTMB 5415 hull characteristics  
Table 2. Rudder hydrodynamic coefficients  
Table 3. hull hydrodynamic coefficients (Yoon 2009)