

## طراحی و ساخت یک مدل خودران جهت ارزیابی مانور شناورها در آبهای آزاد

محمدرضا فتاحی کازرونی<sup>۱</sup>، محمد سعید سیف<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>کارشناسی ارشد، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشگاه صنعتی شریف، mrfathi.k@gmail.com  
<sup>۲</sup>استاد، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشگاه صنعتی شریف، seif@sharif.edu

### چکیده

در مراحل طراحی کشتی قواعد مشخصی وجود دارد که طراحی مورد نظر باید با آنها مطابقت داشته باشد. از مهمترین این قوانین، آیین نامه‌های سازمان بین‌المللی دریانوردی، IMO، جهت مانورپذیری شناورها است. لذا ضروری است که از همان مراحل ابتدایی طراحی، مانورپذیری کشتی مد نظر قرار گرفته تا این الزامات تامین گردند. یکی از روشهای کارآمد در پیش‌بینی مانورپذیری شناورها تست مدل خودران است. به نحوی که مدلی از شناور واقعی تهیه شده و مجهز به انواع تجهیزات پیشبرنده و فرمان مشابه با شناور واقعی می‌گردد. تستهای مختلف مانور توسط این مدل انجام شده و نتایج مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در این مقاله روش ساخت مدل، اتوماسیون و تست خودران مدون گشته و نتایج مرتبط با یک مدل ۴/۶ متری از شناور کانتینربر ارائه شده است. تستهای مورد نیاز در دریاچه انجام شده و قابلیت‌های مانورپذیری شناور مورد بررسی قرار گرفته است.

**کلمات کلیدی:** مانور شناورها، تست مدل، مدل خودران، آب آزاد

### مقدمه

مانور شناورها موضوعی جدید در معماری کشتی محسوب می‌گردد. اولین فعالیت‌ها در زمینه مدلسازی مانور شناورها به زمان داویدسون بر می‌گردد که معادلات کامل مانور استخراج شده و وابستگی پیچیده توانایی دور زدن و حفظ مسیر در مانور نشان داده شده است. روابط داویدسون پایه و اساس تئوری‌های امروزی مانور می‌باشند [۱]. در دهه ۵۰ و ۶۰ با رونق مجدد کشتیرانی و افزایش سازه‌های شناورها و ورود کانتینررها به بازار حمل و نقل قابلیت‌های مانوردهی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این دوره دو تئوری اساسی ارائه شده است که همچنان بسیار پر کاربرد می‌باشند. تئوری آبکویتز<sup>۱</sup> و MMG<sup>۲</sup> که مشتمل بر برآورد نیروهای وارد بر کشتی به عنوان تابعی از مشخصات حرکتی شناور و انتگرال‌گیری از معادلات حرکت جهت بدست آوردن مسیر حرکت شناور در طی مانورهای معمول است [۲].

در سال‌های اخیر مدلسازی‌های ریاضی و تکنیک‌های تجربی در بررسی مانور شناورها پیشرفت‌های چشمگیری داشته است. روش‌های نوین در حل معادلات حرکت از دهه ۷۰ با معرفی پردازش‌گرهای با سرعت بالا مورد توجه قرار گرفته است. به طوری که از دهه ۷۰ شبیه‌سازی‌های کامپیوتری جایگزین تست‌ها با شناورهای واقعی شده است. در دهه هشتاد توسعه حلگرهای معادلات حرکت بر مبنای داده‌های جمع‌آوری شده از روش‌های تجربی از زمینه‌های فعال تحقیق بوده است. تست‌های مدل مقید و تست‌های مدل خودران در تحلیل مسائل غیرخطی مانور بانک اطلاعاتی مناسبی ایجاد می‌کند که از آن‌ها می‌توان در توسعه نرم افزار شبیه‌ساز مانور بهره‌جست. نمونه‌ای از یک مدل خودران برای بررسی مانور در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: نمونه مدل خودران در مرکز تحقیقات دریایی FASTPOD لهستان

<sup>۱</sup>Abkowitz

<sup>۲</sup>Maneuvering Models Group(Japan)

داده های ورودی شبیه سازی به طور معمول از تست های مدل مقید ، خودرانس و تست میدانی بدست می آید. در حال حاضر تحقیقات جهت بهبود مدل های ریاضی و تکنیک های تجربی در حال انجام می باشد.

قابلیت مانوردهی کشتی ها و پیش بینی رفتار حرکتی آن ها در مراحل اولیه طراحی حدوداً از پنجاه سال پیش در نتیجه سوانحی که برای شناورهای بزرگ رخ داد مورد توجه قرار گرفته است. در پی آن استانداردهای مانور توسط IMO تبیین شده است که معیاری برای عملیات مانوردهی شناورها محسوب می گردد[۳]. شبیه سازی دینامیک متحرکهای دریایی و به طور خاص مانور شناورها در سال های اخیر با بهره گیری از کامپیوترها امکان پذیر شده است. در برخی از این کدهای کامپیوتری از روش های عددی یا نتایج تجربی برای استخراج ضرایب هیدرودینامیکی بهره گرفته می شود. محققین مختلف موفق شده اند با استفاده از این روش ها به نتایجی دست یابند که تطابقی مناسب با نمونه های واقعی دارد. لذا شبیه سازی در حال حاضر با تقریب مناسب عملکرد مانور شناورها در آب آرام را مدل سازی می کند.

یکی از روشهای معمول و مناسب جهت بررسی مانور شناورها روشهای تجربی است. روشهای تجربی به طور کلی به سه دسته تست مدل مقید، تست مدل خودرانس و تست میدانی شناور در مقیاس واقعی تقسیم می گردند. روشهای تست مانور شناورها در دریای آزاد برای هر سه مورد مذکور به خوبی توسعه یافته است. لیکن تست های مانور تحت اثر شرایط محیطی حوضچه و کانال دسترسی بنادر تستهای معمولی محسوب نمی گردند و تجارب بین المللی در این خصوص نیز بسیار اندک است. لیکن از آنجا که مطالعات تجربی در زمینه مانور شناورها در آبهای بندری روش بسیار قدرتمندی محسوب می گردد و کیفیت مانور شناور را به خوبی مشخص می کند، در این مقاله روش تست تجربی بسیار موثر شناخته شده و جهت بررسی انواع پدیده های مورد نظر به روش تست تجربی ارجاع داده می شود. در همین راستا مطالعات مفصلی در خصوص نحوه تست صورت گرفته است که از نتایج آن جهت مدون کردن این رویکرد استفاده شده است.

روش های مختلف تست مدل برای بررسی قابلیت مانور و فرمان متحرک های دریایی ، در سطح دنیا توسعه داده شده است. لیکن آن چه که مورد توجه است بررسی مانور شناورها با استفاده از مدل خود رانش است که از جنبه های گوناگون محدودیت هایی که در انواع تست مدل های مقید وجود دارد را بر طرف می سازد. با استفاده از این روش ، در صورت مهیا شدن شرایط لازم امکان اندازه گیری مستقیم پارامترهای مختلف دخیل در مانور فراهم می گردد. تست مدل خودرانس از سه دیدگاه کلی قابل توجه خواهد است :

۱- به طور کلی در مراحل طراحی کشتی بیشتر توجه معطوف به مسئله تعادل و پایداری هیدرواستاتیکی شناور و طراحی فرم بدنه برای کاهش پسای وارد بر شناور در سرعت طراحی می باشد . لذا در بسیاری از موارد بهبود فرم هندسی بدنه ، پروانه و سکان از نظر افزایش قابلیت مانوردهی چندان مورد توجه نیست که اثرات آن بر سوانح دریایی و کندی عملیات بندری در بنادر پر ترافیک امروزی بسیار مشهود است . در نتیجه تست مدل خود رانش راهکاری کارآمد در خصوص پیش بینی رفتار شناور در طی مانور و بهبود فرم بدنه و تجهیزات کنترلی با تأکید بر قابلیت مانوردهی خواهد بود .

۲- تست مدل خودرانس منجر به یک بانک اطلاعاتی بسیار مناسب برای توسعه نرم افزارهای شبیه ساز مانور می شود که در سطوح تحقیقاتی ارزش فراوان داشته و از طرفی برای تربیت راهنمای کشتی<sup>۳</sup> و فرماندهان مجرب نیز می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۳- اثر شرایط محیطی بر مانور غیر قابل انکار بوده که در بسیاری از موارد امکان فراهم آوردن شرایط باد ، موج ، عمق آب، اثر ساحل و شناورهای مجاور در حوضچه های تست مدل با دشواری های فراوان همراه خواهد بود . معمولاً انجام تست با استفاده از مدل خودرانس تحت شرایط محیطی صرفه جویی بسیاری در هزینه و زمان ایجاد خواهد کرد.

## دینامیک کشتی

کشتی به عنوان یک جسم صلب در فضا دارای شش درجه آزادی حرکت است . سه درجه آزادی حرکت انتقالی و سه درجه آزادی حرکت دورانی می باشد. مطابق با شکل ۲ دستگاه مختصات راست گرد را در نظر بگیرید که مرکز آن در مرکز ثقل کشتی واقع شده است. درجات آزادی شناور به ترتیب عبارتند از :

الف ( درجات آزادی خطی

سرج<sup>۴</sup> : حرکت انتقالی در امتداد محور طولی

اسوی<sup>۵</sup> : حرکت انتقالی در امتداد محور جانبی

هیو<sup>۶</sup> : حرکت انتقالی در امتداد محور قائم

ب) درجات آزادی دورانی

رول<sup>۷</sup> : حرکت دورانی حول محور طولی

<sup>3</sup>pilot

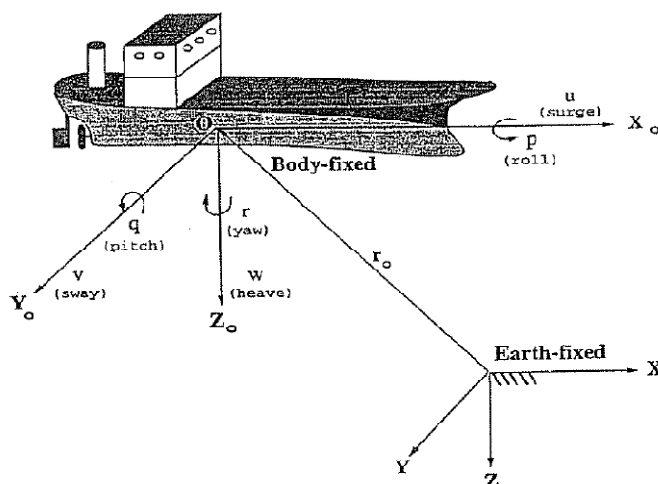
<sup>4</sup>surge

<sup>5</sup>sway

<sup>6</sup>heave

پیچ<sup>۸</sup>: حرکت دورانی حول محور جانبی

یاو<sup>۹</sup>: حرکت دورانی حول محور قائم



شکل ۲: حرکات کشتی

معمولا آن چه که در تحلیل مانور شناورها بر اهمیت است نیروهای وارد بر شناور در صفحه افق است. صفحه افق صفحه ایجاد شده توسط محورهای طولی و جانبی شناور می‌باشد. البته در برخی از موارد حرکات دیگر نیز در تحلیل مانور شناورها بر اهمیت است. به عنوان مثال در شناورهای تندرو مانور دور زدن معمولا توام با مقادیر قابل توجهی زاویه رول می‌باشد.

بنابر قوانین پایه‌ای علم دینامیک هر کدام از حرکات فوق الذکر بر اثر نیروها و ممان‌هایی که بر بدنه شناور وارد می‌گردند ایجاد می‌شود. برآیند کلیه نیروهای وارد بر شناور در جهت جانبی در اصطلاح نیروی اسوی و برآیند کلیه ممان‌های وارد بر شناور حول محور قائم را در اصطلاح ممان یاوینگ می‌گویند.

نیروها و ممان‌های وارد بر کشتی در حال مانور ناشی از چهار نوع نیرو است. این نیروها عبارتند از:

الف) نیروهای هیدرودینامیکی و اینرسی موثر بر بدنه و ملحقات، ناشی از سرعت و شتاب کشتی و کارکرد پروانه.

ب) نیروهای ناشی از ادوات کنترلی شناور شامل پروانه(ها)، تراستر(ها)، سکان(ها) و ...

ج) نیروهای محیطی ناشی از باد، امواج و جریانهای دریایی

د) نیروهای خارجی حاصل از یدک‌کشها

نیروهای هیدرودینامیکی را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم نمود. یک گروه نیروهایی که از سرعت بدنه نسبت به آب ناشی می‌شوند (نیروهای

میرا شونده<sup>۱۰</sup>) و گروه دیگر که از شتابهای بدنه در آب ناشی می‌شوند (نیروهای ناشی از جرم افزوده<sup>۱۱</sup>).

تأثیر سکان در چرخش کشتی بصورت غیر مستقیم است؛ بدین معنی که حرکت سکان باعث بوجود آمدن ممانی می‌شود که جهت کشتی را تغییر می‌دهد. بنابراین امتداد نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه از امتداد محور طولی بدنه خارج می‌شود و بعد از مدتی باعث بوجود آمدن حرکت جانبی می‌گردند. نیروهای اینرسی با این حرکت‌های جانبی مخالفت می‌کنند. اگر سکان در موقعیت ثابتی نگه داشته شود، به تدریج نیروهای هیدرودینامیکی و اینرسی با ممان سکان برابر می‌شوند و حالت چرخش دائمی آغاز می‌گردد.

در آبهای کم عمق یا محدود (دریاچه‌ها، داخل موج شکنها، رودخانه و ...) پدیده‌های پیچیده‌ای در حرکت کشتی‌ها تأثیر می‌گذارد. همچنین تأثیر متقابل حرکت کشتی‌ها بر یکدیگر، تحلیل نیروهای هیدرودینامیکی و اینرسی را بسیار پیچیده می‌سازد.

یک کشتی ممکن است در شرایط مختلف جوی مانند وجود باد، امواج و یا جریانهای دریایی در حال مانور باشد. تأثیر جریانهای دریایی معمولا در نیروهای هیدرودینامیکی ادغام می‌گردد و بررسی آن با در نظر گرفتن سرعت نسبی بین شناور و آب میسر است. البته مطالعه و بررسی در آبهای محدود احتیاج به محاسبات خیلی دقیق دارد. تأثیر باد و امواج معمولا بصورت نیروهای خارجی محسوب می‌شوند.

سرعت باد در حالت کلی غیر دائمی است و نیروها و ممان‌های ناشی از باد وابسته به زمان است. این نیروها در کل متناسب با مساحت بالای سطح آبخور کشتی و مربع سرعت نسبی بین کشتی و باد هستند. تریم شناور باعث تغییر در شکل غوطه‌ور بدنه می‌شود و بنابراین تأثیر مهمی در ضرائب معادلات حرکت دارد، مخصوصا هنگامیکه امواج با کشتی هم جهت باشند.

<sup>7</sup>roll

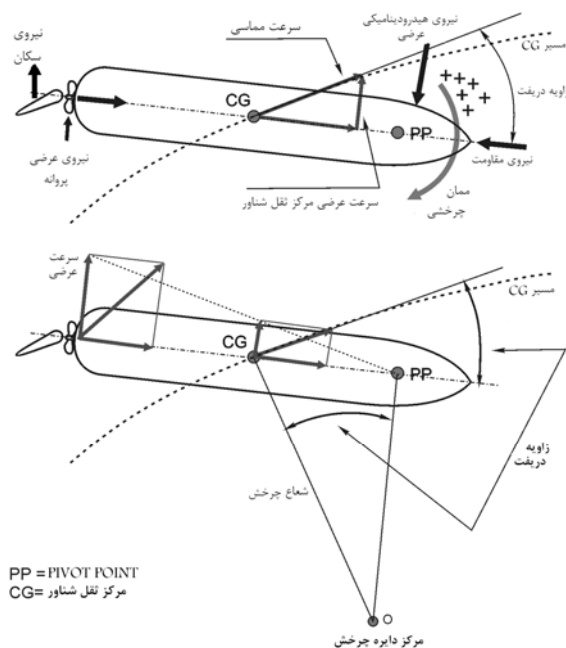
<sup>8</sup>pitch

<sup>9</sup>yaw

<sup>10</sup>Damping Forces

<sup>11</sup>Added Mass

در نهایت، یدک کش ها باعث ایجاد نیروهای موثری برای مانور شناور در سرعتهای پایین می‌شوند. نیروهای یدک‌کش ها از نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از مانور مجزا بوده و به عنوان نیروهای اضافی در نظر گرفته می‌شوند. هنگامی که شناور در حال چرخش است، نیروی مقاوم آب، نیروی سکان و نیروهای هیدرودینامیکی بر آن اعمال می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳: نیروهای اعمالی بر شناور در حال مانور

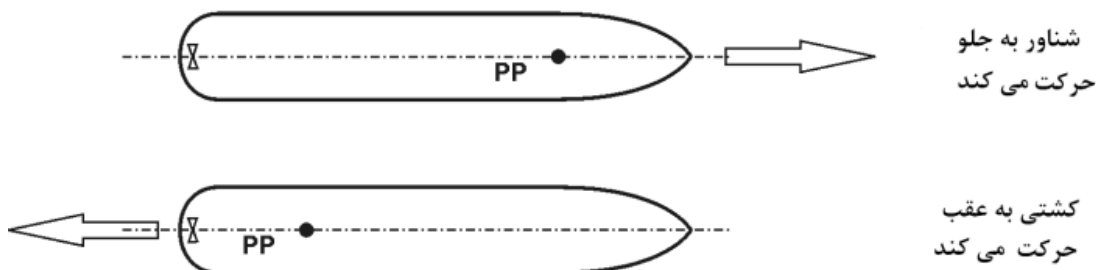
در این شکل شناور در امتداد مسیر منحنی نقطه چین با مرکزیت پاشنه چرخش<sup>۱۲</sup> در حال دور زدن است. با توجه به شکل ۳ می‌توان پارامترهای زیر را تعریف نمود:

**شعاع چرخش<sup>۱۳</sup>:** فاصله بین مرکز انحنای مسیر و مرکز جرم شناور شعاع چرخش نامیده می‌شود.

**زاویه دررفت<sup>۱۴</sup>:** زاویه بین خط مماس بر مسیر و محور طولی کشتی، زاویه دررفت نامیده می‌شود.

**پاشنه چرخش<sup>۱۵</sup>:** نقطه ای است که شناور حول آن نقطه چرخش خود را انجام می‌دهد و برآیند نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه شناور از آن می‌گذرد. به صورت هندسی نقطه تلاقی خطی که از مرکز دایره آبی چرخش به خط مرکزی شناور عمود می‌شود را پاشنه چرخش گویند. در این نقطه سرعت عرضی (اسوی) برای چرخش صفر است. برای افرادی که بر روی شناور هستند به نظر می‌رسد که شناور حول این نقطه در حال دوران است.

هنگامی که شناور هیچ حرکت رو به جلویی نداشته باشد نقطه پاشنه چرخش منطبق با مرکز جرم شناور است که تقریباً در وسط شناور قرار می‌گیرد. زمانیکه شناور حرکت رو به جلو دارد، پاشنه چرخش به سمت جلو حرکت می‌کند و هنگامیکه کشتی رو به عقب حرکت می‌کند، پاشنه چرخش به سمت پاشنه کشتی حرکت می‌کند (شکل ۴).



شکل ۴: نقطه پاشنه چرخش در حالتی که شناور به سمت جلو یا عقب حرکت می‌کند

اثرات مقیاس در تستهای مانورپذیری چندان شناخته شده نبوده و از طرف دیگر قابلیت مانورپذیری شناورها تا حد زیادی متأثر از خصوصیات

<sup>12</sup>Pivot Point  
<sup>13</sup> Turning Radius  
<sup>14</sup> Drift Angle  
<sup>15</sup> Pivot Point

پروانه و سکان است. به خصوص که وجود آثار محیطی نیز باعث تشدید این آثار می‌گردد. با توجه به محدودیت‌های تست در حوضچه کشش این امکان وجود دارد که بسیاری از پارامترهای موثر در پدیده به خوبی دیده نشود. محدودیت ابعاد حوضچه کشش باعث محدودیت در طول مدل‌های مورد بررسی شده و اثر مقیاس چشمگیرتر خواهد بود. از طرف دیگر در تست حوضچه کشش مدل الزاما در برخی از درجات آزادی مقید شده و شرایط تست با حالت واقعی اختلاف بسیار خواهند داشت. از طرف دیگر نحوه عملکرد پروانه و سکان نیز در حوضچه کشش چندان قابل بررسی نمی‌باشد.

جهت رفع این نقیصه و کاهش اثرات مقیاس می‌توان از تست مدل خودران<sup>۱۶</sup> جهت بررسی مانورپذیری استفاده نمود. به نحوی که یک مدل از شناور واقعی ساخته شده و انواع تجهیزات پروانه و سکان نیز در مقیاس مدل بر روی آن نصب می‌گردد. در صورت در اختیار داشتن حوضچه مناسب جهت انجام تست امکان مطالعه اثر شرایط محیطی بر مانور شناورها نیز با تست مدل خودران فراهم خواهد بود. علاوه بر این از آنجا که مدل‌های خودران بدلیل عدم محدودیت در نیروی کشنده دارای طول بزرگ هستند، نتایج حاصل از این مدل‌ها به شرایط واقعی نزدیک‌تر خواهد بود. در تست‌های مانور با مدل خودران، از پروانه جهت ایجاد سرعت دلخواه و ایجاد تراستی که این سرعت را تولید نماید و همچنین تولید افزایش سرعت جریان اطراف سکان مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقیاس فرود جهت سرعت شناور اعمال می‌شود. همچنین تجهیزات آشفته کننده جریان باید بر روی مدل شناور نصب شوند. که در این حالت یک لایه مرزی توسعه یافته و توزیع فشار تقریباً همسان با حالت اصلی در طول بدنه مدل ایجاد خواهد شد. معمولاً از اثرات مقیاس برای شناورهای تجاری که پروانه در ناحیه ویک بدنه قرار دارد و همچنین سکان در پشت پروانه قرار داده شده است، صرف‌نظر می‌شود. در بعضی اوقات بخصوص در سرعت‌های بالا که مقدار ضریب ویک نیز کم است برای جبران مقاومت اصطکاکی ایجاد شده در شناور از دستگاه رانش اضافی مثل فن بادی استفاده می‌شود. از آنجایی که سکان نصب شده در ویک پشت بدنه و پروانه در حالت بسیار آشفته و توربولانس قرار دارد، اثرات عدد رینولدز برای نیروهای اعمالی بر پروانه صرف‌نظر می‌شود. با این حال بعضی اوقات برای سکان نیز وسایل آشفته ساز نیز نصب می‌شود.

### انتخاب مدل برای ساخت

تهیه مدل و انجام تست های مانورپذیری توسط مدل شناور خودران مستلزم صرف وقت و هزینه های بسیار می باشد . لذا بهتر است که در همین مراحل اولیه یک مطالعه همه جانبه بر روی گزینه های مناسب صورت گرفته و شناور مورد نظر به نحوی انتخاب گردد که نتایج حاصل از تست‌های مدل و شبیه‌سازی های عددی مانور آن در دست بوده و امکان مقایسه نتایج فراهم گردد.

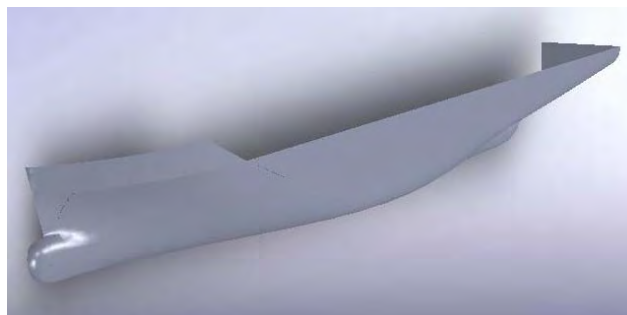
ساخت و تجهیز مدل شناور خودران نمونه از مزیت‌های تحقیقاتی و صنعتی بسیار برخوردار می باشد . هم اکنون در مرکز پژوهشی مهندسی دریا دانشگاه صنعتی شریف فعالیت های بسیاری در زمینه مدل‌سازی مانور شناورها به روش های عددی و دینامیک سیالات محاسباتی صورت گرفته و حتی نرم افزار کامپیوتری مربوطه نیز به حد قابل قبولی از توسعه یافتگی رسیده است . نتایج حاصل از تست مدل خودران می تواند منجر به یک بانک اطلاعاتی نمونه معیار گردد که از آن می توان جهت معتبرسازی نتایج حاصل از فعالیت های پژوهشی همسو استفاده نمود . از طرفی در ابعاد صنعتی نیز پیش گویی رفتار حرکتی کشتی در طی عملیات مانور در مراحل ابتدایی طراحی امری حیاتی است که در حال حاضر از طریق صرف بودجه‌های کلان و توسط پیمان کارهای خارجی تست‌های مورد نظر صورت می‌پذیرد . لذا تجهیز یک مدل خودران نمونه و مستندسازی روند تست های مورد نیاز، گامی متعالی در جهت بومی سازی تکنولوژی تلقی می گردد . به نحوی که با استفاده از تجارب بدست آمده در پروژه حاضر در آینده توانایی تجهیز مدل و اجرای تست های مانور برای شناورهای در دست ساخت ، حاصل خواهد گردید.

پیچیدگی موجود در عملیات میدانی دریایی و از طرف دیگر دشواری های عملکرد مدل کنترل از راه دور نیز دلیل دیگر بر لزوم بررسی دقیق مدل مورد نظر است که اگر در مراحل طراحی ابتدایی توجه لازم به خرج نرود ، هزینه ها ، زمان و نیروی انسانی دخیل بسیار در دسرساز خواهد شد . با توجه به موارد مذکور در فوق در نهایت یک شناور کانتینربر کره‌ای تحت نام KCS انتخاب شده است که اطلاعات کافی از مشخصات آن در سطح دنیا در دست بوده و در موسسات تحقیقاتی مختلف تست‌ها و شبیه‌سازی‌های متعددی در خصوص مانور آن انجام شده و نتایج حاصل قابل مقایسه خواهند بود. مشخصات اصلی مدل و شناور اصلی در جدول ۱ نشان داده شده است. شکل ۵ نیز نشان دهنده فرم بدنه شناور است.

<sup>16</sup> Free running model test

جدول ۱ : مشخصات مدل شناور کانتینربر جهت ساخت

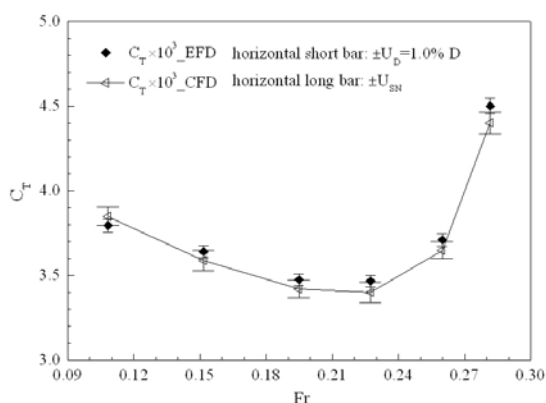
Scale	52.667
<b>Main particulars</b>	
Lpp (m)	4.3671
Bwl (m)	0.6114
D (m)	0.3608
T (m)	0.2051
Displacement (m <sup>3</sup> )	0.3562
CB	0.651
CM	0.984
LCB (%), fwd+	-1.48
<b>Rudder</b>	
Type	semi-balanced horn rudder
S of rudder (m <sup>2</sup> )	0.0415
Lat. area (m <sup>2</sup> )	0.0196
Turn rate (deg/s)	16.8
<b>Test condition</b>	
T (m)	0.205
Disp. (m <sup>3</sup> )	0.356
LCG (m)	2.119
GM (m)	0.011
ixx/B	0.40
izz/Lpp	0.25
<b>Service speed</b>	
U (m/s, full scale: kn)	1.701
Fn (based on Lpp)	0.26



شکل ۵ : فرم بدنه کانتینربر KCS

## طراحی مدل

منحنی ضریب مقاومت هیدرودینامیکی مبتنی بر تست های انجام شده در موسسه تحقیقاتی SVA آلمان برای مدل خودرانش کانتینربر مورد نظر مطابق با شکل زیر می باشد:



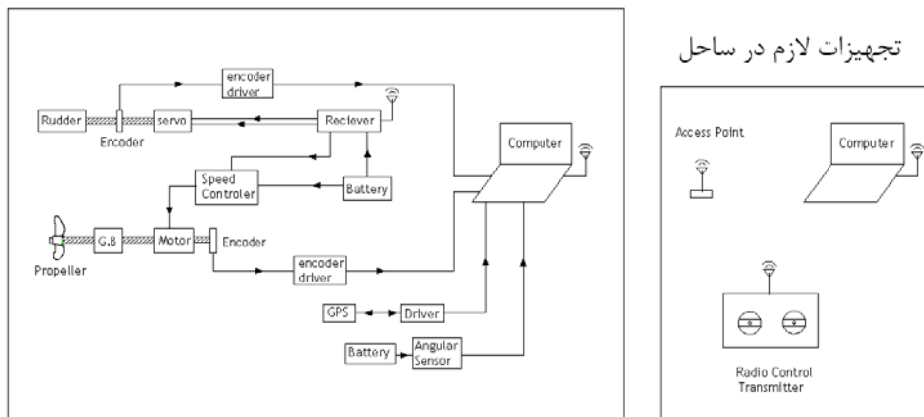
شکل ۶ : منحنی مقاومت شناور KCS

مطابق با این اطلاعات برای عدد فرود ۰/۲۶ مقدار مقاومت شناور برابر با ۱۸/۴۶ نیوتن بوده و با تخمین مقادیر فاکتور ویک و ضریب کاهش تراست ، و در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۱/۵ توان ۶۰ وات کفایت می کند که در انتخاب موتور باید مد نظر قرار گیرد. سکان مدل مورد نظر برای این شناور از نوع ایرفویل NACA0018 بوده و ماکزیموم ضریب گشتاور برای این فویل در زاویه ۲۲/۵ درجه رخ می دهد که با توجه به مشخصات ارائه شده برای سکان ماکزیموم گشتاور سکان مورد نیاز برابر با ۷ نیوتن-متر بوده ، سکان در حالت ماکزیموم سرعت دوران با سرعت ۱۶/۲ درجه بر ثانیه به زاویه ۳۵ درجه در سمت راست و چپ می رسد.

تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمایش مانور مدل شامل موارد زیر است.

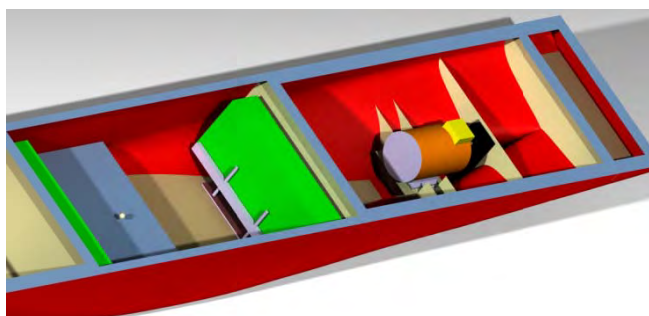
۱. سیستم رانش : موتور الکتریکی، کنترلر سرعت، جعبه دنده، پروانه، باتری.
  ۲. سیستم هدایت : دستگاه کنترل از راه دور، سکان و عملگر سکان.
  ۳. سیستم داده برداری : دورسنج شفت، زاویه سنج سکان، سنسور زاویه بدنه مدل، سیستم موقعیت یاب، سیستم ارتباطی بی سیم، رایانه.
- در شکل ۷ شمای کلی تجهیزات مورد نیاز برای راه اندازی یک سیستم تست کنترل از راه دور مانور و نحوه ارتباط آنها با یکدیگر دیده می-شود.

تجهیزاتی که بر روی مدل نصب می شود



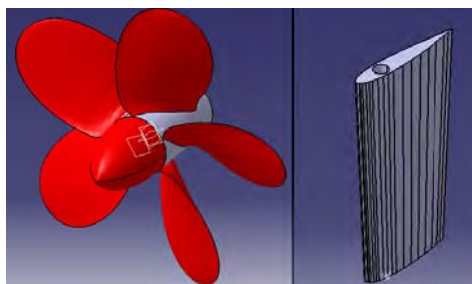
شکل ۷: طرح کلی تجهیزات مورد استفاده در تست کنترل از راه دور مانور شناور

پس از مشخص شدن تجهیزات جانمایی وسایل درون مدل مشخص شده و نقشه‌های جانمایی شناور مطابق با شکل ۸ تهیه شده است.



شکل ۸: جانمایی مدل خودرانش

علاوه بر این با توجه به مشخصات مورد نیاز مدل پروانه و سکان این شناور نیز مورد طراحی قرار گرفته و نقشه‌های ساخت آنها مطابق با شکل زیر تهیه شده است.



شکل ۹: نقشه‌های سه بعدی تهیه شده از پروانه و سکان

## ساخت

با توجه به مسئله مقاومت و استحکام مورد نیاز برای مدل و ضرورت کاهش وزن، مدل ۵ متری از جنس کامپوزیت ساخته شده است. شکل ۱۰ نشان دهنده مدل شناور پس از خروج از قالب در کارگاه کامپوزیت است.



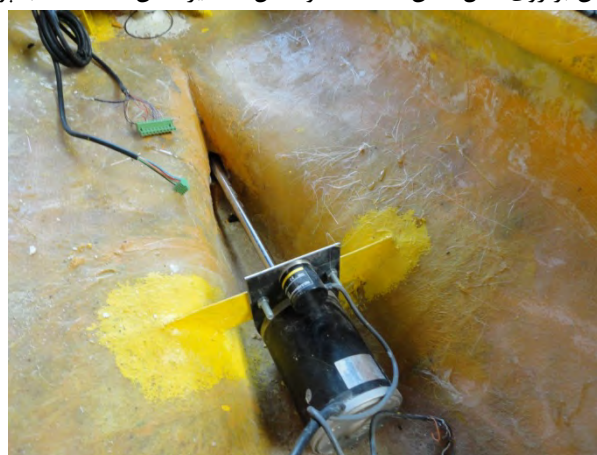
شکل ۱۰: مدل کامپوزیت پس از خروج از قالب

پروانه و سکان شناور نیز توسط ماشین CNC تراشیده شده است. پروانه از جنس برنج و سکان از جنس آلومینیوم ساخته شده است که در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



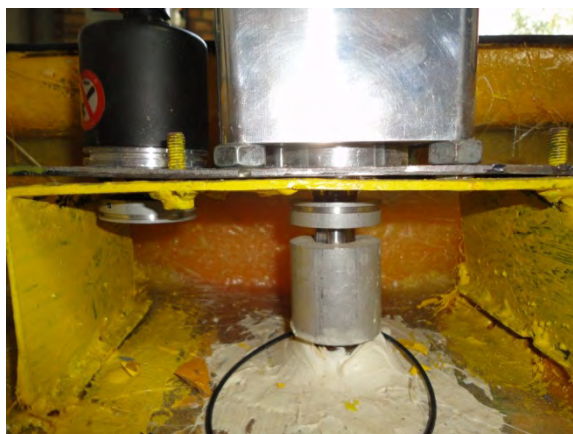
شکل ۱۱: پروانه برنجی ساخته شده توسط ماشین CNC

در نهایت تمامی تجهیزات تهیه شده و پروانه و سکان بر روی مدل نهایی مونتاژ شده اند. شکل ۱۲ نشان دهنده نصب موتور و شافت بر روی مدل می باشد. در شکل ۱۳ مونتاژ موتور سکان بر روی مدل نشان داده شده و شکل ۱۴ نیز نشان دهنده نصب پروانه و سکان بر روی مدل است.



شکل ۱۲: کوپل موتور و شافت پروانه





شکل ۱۳: کوپل موتور و شافت سکان



شکل ۱۴: نصب پروانه و سکان بر روی بدنه

#### به آب اندازی و تست

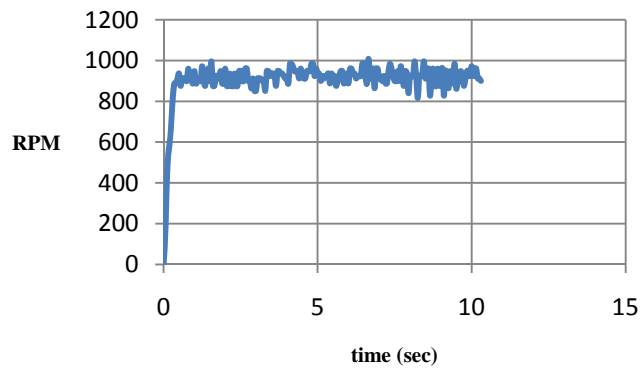
با توجه به این که بویانسی پاشنه شناور بزرگتر است این مدل از پاشنه بدرون آب انداخته می شود. در مرحله بعدی با توجه به محاسباتی که برای بالاست مدل و تعیین مرکز ثقل و ممان اینرسی در مرحله تعیین جانمایی صورت گرفته است، وزنه های بالاست جامد تهیه شده از جنس سرب در موقعیتهای از پیش تعیین شده قرار داده می شود. بالطبع در این بین تا حدی ناهماهنگی طراحی با مدل ساخته شده نیز وجود دارد که با جابجایی چند وزنه کوچک در طول و ارتفاع شناور مرکز ثقل مدل اصلاح می گردد. شرایط انجام تستها بدون هرگونه زاویه غلتش طولی بوده است. لیکن بدلیل آن که زاویه تریم باعث عملکرد بهتر پروانه شناور می شود، مدل با زاویه تریم در حد یک درجه با پاشنه بالاست شده است که از طرفی عملکرد پروانه بهبود یافته و از طرف دیگر این مقدار تریم اندک نیز اثر آنچنانی بر نتایج تستها نخواهد داشت. شکل ۱۵ نشان دهنده مدل بالاست شده درون آب است.



شکل ۱۵: مدل پس از به آب اندازی و بالاست

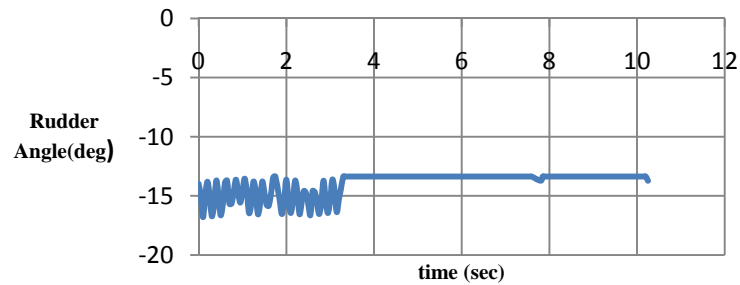
یکی از تستهایی که به طور معمول در بررسی مانورپذیری شناورها انجام می شود بررسی میزان اثرپذیری شناور از سکان است. در این تست شناور در مسیر مستقیم با سرعت ثابت حرکت کرده سپس به یکباره سکان شناور به زاویه دلخواه می رسد. سپس تغییرات زاویه یابینگ بر حسب زمان به ازای این زاویه سکان ثبت می گردد. به عنوان نمونه این تست با استفاده از مدل خودرانش تهیه شده انجام شده است. سرعت شناور ۱/۳ متر بر ثانیه و زاویه سکان مورد بررسی زاویه ۱۵ درجه به سمت راست بوده است. نتایج اندازه گیری شده در طی این تست در شکل های ۱۶ تا ۱۹ نشان داده

شده است. منحنی شکل ۱۶ نشان دهنده تغییرات دور موتور شناور در این تست است که در یک بازه زمانی بسیار کوتاه دور موتور به حداکثر مقدار خود رسیده و تقریباً ثابت شده است. شایان ذکر است که تستهای مانورپذیری در دور موتور ثابت انجام می‌شوند.



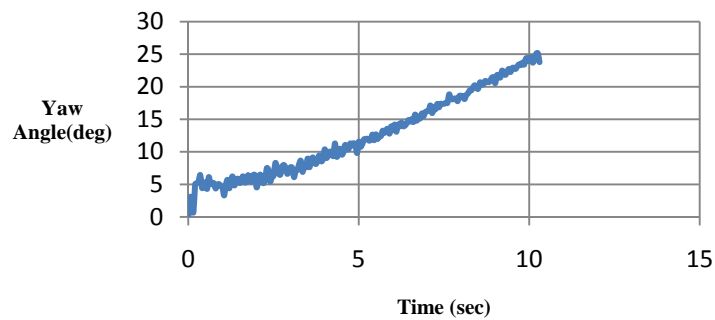
شکل ۱۶: تاریخچه زمانی تغییرات دور پروانه شناور

منحنی شکل ۱۷ نشان دهنده تاریخچه زمانی زاویه سکان شناور در طی این تست است که در حد امکان در یک زاویه ثابت نگه داشته شده است.

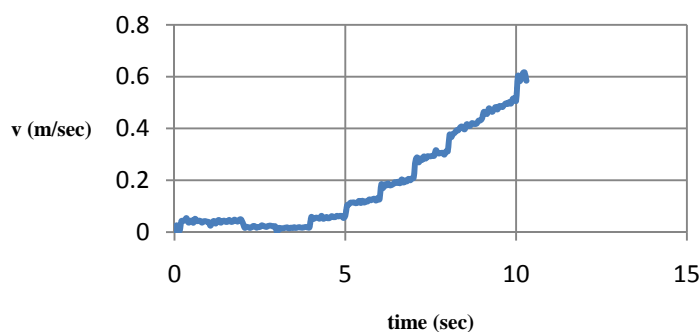


شکل ۱۷: تاریخچه زمانی زاویه سکان

همانطور که در شکل ۱۸ مشخص است پس از گذشت ۶/۲۵ ثانیه مقدار زاویه یاوینگ شناور با زاویه سکان آن برابر شده است که از آن به عنوان معیاری جهت بررسی مانورپذیری شناور استفاده می‌شود.

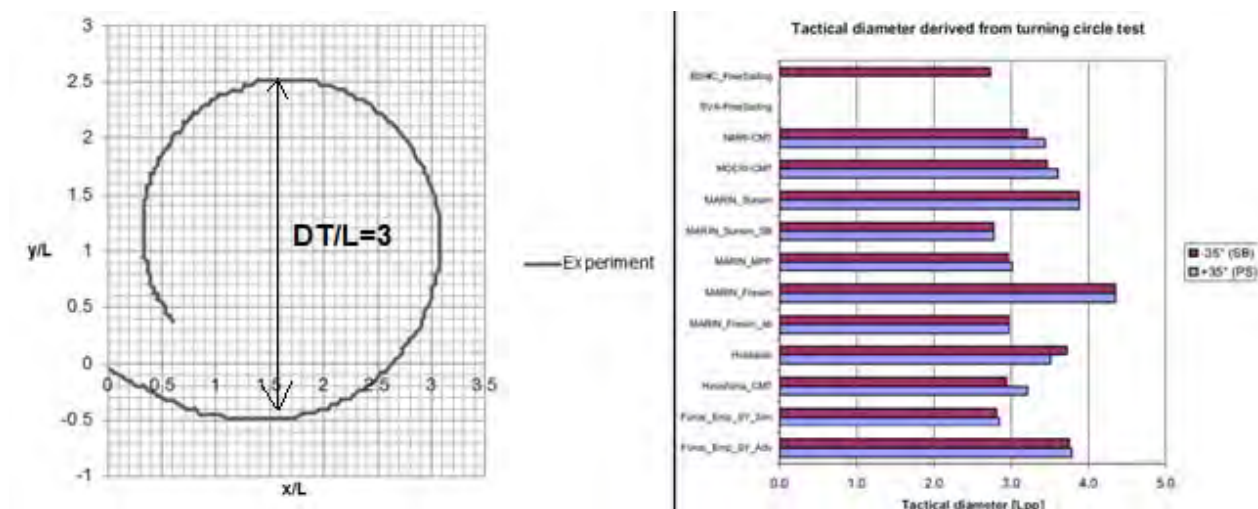


شکل ۱۸: تاریخچه زمانی زاویه یاوینگ



شکل ۱۹: تاریخچه زمانی سرعت حرکت اسوی شناور

جهت اعتبارسنجی نتایج تست و صحت‌سنجی روش ساخت مدل و روش انجام تست، تست مانور دور زدن با استفاده از مدل خودرانش به سمت چپ شناور با زاویه سکان ۳۵ درجه و در سرعت طراحی انجام شده و منحنی دور زدن شناور در شکل ۲۰ نشان داده شده است. قطر تاکتیکال در این تست تقریباً سه برابر طول شناور بوده است. نتایج با تستهای مشابه با مدلهای خودرانش و مقید در مراکز تحقیقاتی مختلف دنیا مقایسه شده که تطابق مناسبی از خود نشان داده است. به عنوان مثال قطر تاکتیکال این شناور تقریباً با تستهای انجام شده در مرکز MARIN یکسان است. متوسط قطر تاکتیکال در مراکز مختلف ۲/۹ برابر طول شناور بوده که با تستهای انجام شده در حد ۳/۳ درصد اختلاف دارد.



شکل ۲۰: سمت چپ- مانور دور زدن مدل تهیه شده در مرکز پژوهشی مهندسی دریا، سمت راست- قطر تاکتیکال تست مانور دور زدن اندازه-گیری شده در سایر مراکز پژوهشی جهان

### نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

تست مدل خودرانش جهت بررسی مانورپذیری موضوع این مقاله بوده است که در راستای آن یک مدل شناور کانتینربر ساخته شده و تجهیزات مورد نظر بر روی آن نصب شده و تستهای مربوطه در آب آزاد انجام گرفته است. با توجه به کارایی غیر قابل انکار این روش در پیش‌بینی مانور شناورها می‌توان در آینده روند شرح داده شده در این مقاله را برای شناورهای مختلف در دست طراحی اجرا نموده و اطلاعات با دقت مناسب از مانور شناور را در مرحله طراحی مفهومی کسب نمود. همچنین امکان بهینه‌سازی رفتار شناور با تغییر هندسه و ابعاد سکان و تجهیزات مرتبط با کنترل مسیر وجود خواهد داشت.

### مراجع

- [1] 'Simulation of ship maneuvering & course keeping with escort tugs', Y.Li, University of British Columbia, 2004
- [2] 'ITTC Recommended procedures & guidelines, Free running model test procedure', 2005

- [3] ‘ A nonlinear unified state-space model for ship maneuvering & control in a seaway’ T.I.Fossen, Journal of Bifurcation and Chaos,2005
- [4] “Modeling of ship-bank interaction forces” ,M.Vantorre, The ship in interaction with the waterway,2002
- [5] “ Maneuvering Technical Manual” H.Brix, Hamburg University Press, 1993
- [6] Varyani.K.S, et al “ New geometric Mathematical model to predict hydrodynamic interaction effects for overtaking maneuvers in simulation” , Journal of Marine Science &Technology,Japan, Vol 9,No 1, pp24-31,2003
- [7] “Principals of naval architecture” ,SNAME,1981
- [8] “Practical Ship Hydrodynamics”,V.Bertram, Butterworth-Heinmann, 1<sup>st</sup> edition,2000
- [9] “Det Norske Veritas rules” , 2011,DNV
- [۱۰] شبیه‌سازی مانور شناورها به روش دینامیک سیالات محاسباتی، ابراهیم جهانبخش، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۷
- [۱۱] طراحی و ساخت مدل شناور کنترل از راه دور جهت انجام آزمایشات مانورپذیری، جلال رفیعی شهرکی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۸
- [۱۲] شبیه‌سازی غیرخطی مانور شناورها، محمدرضا فتحی کازرونی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۰