

تحلیل مانورینگ شناور های زیر سطحی

سجاد اردشیری^{۱*}

دانشگاه صنعتی امیر کبیر

میلاد نادری^۲

دانشگاه صنعتی مالک اشتر

کد مقاله: ۱۰۱۶

چکیده

از میان محاسبات هیدرودینامیکی که برای شناور انجام میشود، یکی از مهمترین محاسبات، انجام محاسبات مانورینگ جهت پیش بینی رفتار شناور با استفاده از عوامل کنترلی آن می باشد. تحلیل مانورینگ زیردریایی به دلیل شرایط خاص آن و بهره گیری از سطوح کنترلی برای حرکت در راستای عمودی که خاص این نوع شناور می باشد، از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مقاله ابتدا چند نوع از مانورهای زیردریایی بررسی شده و سپس با استفاده از نرم افزار پارامرین^۱ محاسبات مانورینگ مربوط به یک نمونه زیردریایی ارائه می گردد.

کلمات کلیدی: زیردریایی، مانورینگ، سطوح کنترلی

*Corresponding author

E-mail address: sajjad_ardeshiri@yahoo.com

1-Paramarine

مقدمه

هیدرودینامیک شناور از مجموعه رفتار شناور در دریا، شامل: مقاومت و فرم بدنه، پروانه و سیستم رانش، دینامیک شناور در موج و مانور شناور تشکیل می‌شود. هر یک از بخش‌های هیدرودینامیک کشتی به یک خصوصیت شناور می‌پردازد.

مانور را می‌توان مجموعه قابلیت‌های شناور جهت حرکت در مسیر مستقیم، تغییر مسیر حرکت، دور زدن، شتاب گرفتن، ترمز کردن و به عقب حرکت کردن دانست. با صرف نظر از قابلیت‌های کاپیتان و سیستم‌های ناوبری، پارامترهای زیر از مهمترین پارامترهای هدایت شناور می‌باشند.

- ابعاد اصلی شناور

- هندسه و فرم بدنه شناور

- سکان و دیگر سیستم کنترلی

- سیستم رانش شامل پروانه، شافت، گیربکس و موتور

زیردریایی دارای تعدادی مکانیزم برای کنترل هیدرودینامیکی عمق، بویانسی، جهت‌گیری^۱ و سرعت می‌باشد. در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌شود.

- مخازن بالاست اصلی

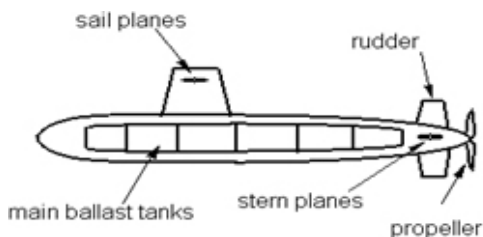
- مخازن بالاست فرعی

- هیدرو پلن‌های سینه

- هیدرو پلن‌های پاشنه

- مکانیزم پیشرانس

- سکان



شکل ۱: مکانیزم‌های کنترل هیدرودینامیکی زیردریایی

از مخازن بالاست اصلی برای کنترل بویانسی شناور استفاده می‌شود، به ویژه برای غوص و صعود

زیردریایی. اگر مخازن بالاست اصلی پر از آب شوند، زیردریایی دارای بویانسی منفی خواهد شد و غوص خواهد نمود و اگر در مخازن هوا دمیده شود، زیردریایی دارای بویانسی مثبت شده و صعود می‌کند. ممکن است هنگامی که مخازن بالاست اصلی پر از آب هستند و مخازن بالاست فرعی دارای مقدار آب تعیین شده می‌باشند، زیردریایی دارای بویانسی منفی باشد. مخازن بالاست فرعی برای ایجاد تغییرات کوچک در بویانسی و موقعیت زیردریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

هیدروپلن‌های روی برجک دارای رنج زاویه‌ای حدود ± 22 درجه و هیدروپلن‌های پاشنه دارای رنج زاویه‌ای حدود ± 27 درجه می‌باشند. این هیدروپلن‌ها به صورت ترکیبی یا جداگانه برای حفظ عمق زیردریایی استفاده می‌شوند. فاصله آنها از مرکز جرم شناور، ابزاری برای تغییر زاویه پیچ زیردریایی فراهم می‌کند. سکان نیز برای هدایت زیردریایی به چپ یا راست، با محدوده تغییرات زاویه‌ای ± 37 درجه می‌باشد.

در این مقاله ضمن بررسی مانورهای زیردریایی سعی بر این است که مانورهای بیان شده در استاندارد DEF [۱] به کمک نرم افزار برای زیردریایی نمونه اجرا گردد و نمودار ^۱ MLD طرح نیز استخراج گردد.

مانورهای زیردریایی در عمق مطابق با استاندارد DEF استرالیا

این استاندارد ملزومات کنترل و مانور زیردریایی را برای هر دو حالت عملکرد سطحی و کاملاً مغروق، ارائه می‌دهد که شامل موارد زیر است:

- vertical and directional stability ●
- depth and course keeping ●
- turning ●
- acceleration ●
- deceleration ●
- stopping ●
- diving ●
- surfacing ●
- propulsion ●
- emergency blow ●

این استاندارد مانورهای خاص عمق برای زیردریایی را بیان می‌کند. برای برخی از این مانورها آزمون‌هایی بیان گردیده که به عنوان زیرمجموعه آن مانور ارائه شده است. در ادامه مانورهایی که قابل انجام با نرم افزار پارامرین است بیان شده است، سپس با ارائه یک مدل زیردریایی مقادیر مورد نظر برای این مدل محاسبه و ارائه می‌شود.

توقف ناگهانی^۱

ملزومات زمان و مسافت طی شده حین توقف ناگهانی وابسته به مشخصات زیردریایی تغییر خواهد نمود. زیردریایی بایستی معیار مشخص شده در شرایط آب آرام^۲ را ارضا نماید. این ملزومات در مرحله طراحی از طریق شبیه‌سازی عددی و در حین آزمون‌های دریایی بوسیله مانور توقف ناگهانی بدست می‌آیند. آزمون توقف ناگهانی برای زیردریایی در حالت بار کامل انجام می‌گیرد.

آزمون توقف ناگهانی

زیردریایی در یک جهت ثابت و حداکثر سرعت روبه‌جلو^۳ قرار می‌گیرد.

۱- سیگنال "حداکثر به عقب"^۴ داده می‌شود.

۲- سطوح کنترل بایستی تا حد امکان برای حفظ جهت و مسیر مورد استفاده قرار گیرند.

اطلاعات زیر بایستی ثبت گردد و یا اینکه از داده‌های ثبت شده محاسبه گردد:

۱- گشتاور و تعداد دوران شافت در دقیقه، بلافاصله قبل از مرحله "Full Astern"

۲- گشتاور شافت، تعداد دوران آن در دقیقه، جهت و موقعیت شناور و زاویه سطوح کنترل در فواصل

زمانی ثابت در حین مانور

۳- زمان توقف شافت

۴- زمان شروع گردش شافت به سمت عقب

۵- زمان رسیدن به حداکثر تعداد دوران شافت به سمت عقب

۶- زمان توقف زیردریایی در دریا^۵

حفظ مسیر و توانایی مقابله با حرکت یاو^۶

زیردریایی بایستی قادر باشد که نرخ صفر حرکت یاو^۷ در آب آرام را، با زاویهٔ سکان کمتر از ۵ درجه،

1-Crash stop

2-calm conditions

3-full ahead

4-Full Astern

5-dead in the water

6-Course keeping and yaw checking ability

7-zero rate of yaw

حفظ کند. این ملزومات بوسیله مانور حلزونی مستقیم و معکوس^۱، که در ادامه شرح داده شده‌اند، بدست می‌آیند. البته در مرحله طراحی از طریق تست مدل و یا شبیه‌سازی عددی، و در حین آزمون‌های دریایی در دریای آرام با حداکثر باد ۵ گره انجام می‌گیرند. زیردریایی نیاز دارد که مسیر خود را با یک تلورانس معین حفظ کند. این تلورانس وابسته به مشخصات زیردریایی تغییر خواهد نمود.

قابلیت کنترل زیردریایی بایستی در مرحله طراحی از طریق تست مدل و یا شبیه‌سازی عددی و در حین آزمون‌های دریایی بوسیله انجام مانورهای بیشتری چون مانور زیگزاگ^۲ ۱۰-۱۰ و ۲۰-۲۰ بررسی گردد. در طی مانور زیگزاگ ۱۰-۱۰، که در ادامه شرح داده شده است، در اجرای اول به هر دو سمت راست و چپ، زاویه اورشوت^۳ اولیه نبایستی از ۱۰ درجه تجاوز کند. زاویه اورشوت ثانوی در مانور زیگزاگ ۱۰-۱۰ نبایستی بیش از ۱۵ درجه بزرگتر از زاویه اورشوت اولیه باشد. در طی مانور زیگزاگ ۲۰-۲۰، در اجرای اول به هر دو سمت راست و چپ، زاویه اورشوت اولیه نبایستی از ۲۰ درجه تجاوز کند.

مانور زیگزاگ

دو مانور زیگزاگ ۱۰-۱۰ و ۲۰-۲۰ بایستی انجام گردد.

- ۱- برای انجام مانور ۱۰-۱۰، سرعت کروز باید حفظ شده و زیردریایی در یک راستای ثابت قرار گیرد.
- ۱- سکان از مرکز تا ۱۰ درجه به راست، با حداکثر نرخ حرکت داده می‌شود و بایستی صبر کرد تا راستای زیردریایی از حالت اولیه تا ۱۰ درجه به راست تغییر نماید.
- ۲- سکان از ۱۰ درجه به راست با حداکثر نرخ تا ۱۰ درجه به چپ حرکت داده می‌شود و بایستی صبر کرد تا راستای زیردریایی از حالت اولیه تا ۱۰ درجه به چپ تغییر کند.
- ۳- در این مرحله سکان باید عکس مرحله قبل حرکت داده شود.
- ۴- هنگامی که شناور چهار مرتبه از راستای اولیه عبور کرد، زیردریایی را می‌بایست در یک راستای ثابت قرار داد.

مانور ۲۰-۲۰ کاملاً مشابه روش بالا انجام می‌گیرد با این تفاوت که تغییرات زاویه ۲۰ درجه بایستی بجای ۱۰ درجه صورت گیرد.

اثر سطوح کنترل در سرعت‌های مختلف را می‌توان با انجام مانورهای بیشتر در سرعت‌های مختلف، ارزیابی

1-Direct and Reverse Spiral Maneuver
2-zigzag maneuver
3-Overshoot angle

نمود. به عنوان نمونه می توان مانورهای زیگزاگ فوق الذکر را با جهت عکس زاویه سکان انجام داد.

اطلاعات زیر بایستی ثبت گردد و یا اینکه از داده‌های ثبت شده محاسبه گردد:

۱- زمان هنگامی که سطوح کنترل حرکت داده می‌شوند، شامل شروع و پایان حرکت واقعی سطوح

۲- مدت زمانی که سطوح کنترل در موقعیت خود ثابت نگه داشته می‌شوند.

۳- جهت زیردریایی در هر ۱۰ ثانیه

۴- نرخ تغییرات جهت

قطر تاکتیکی^۱

حداقل قطر تاکتیکی که برای زیردریایی در حالت مغروق مشخص خواهد شد، به ملزومات عملیاتی زیردریایی وابسته است. قطر تاکتیکی بایستی در حین آزمون‌های دریایی و با استفاده از مانور دور زدن^۲، که در ادامه شرح داده شده، بدست آید.

مانور دور زدن

تست دور زدن در حالت سطحی و مغروق بایستی در سرعت کروز و به هر دو سمت چپ و راست و با بیشترین زاویه سطوح کنترل انجام گردد. زمان، موقعیت و سرعت زیردریایی در زوایای ۱۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰، ۳۶۰ و ۴۵۰ درجه از تغییر جهت سر شناور و همچنین نرخ یاو ثابت، سرعت دور زدن ثابت و قطر دور زدن ثابت نیز بوسیله این مانور تعیین می‌گردند.

تست کامل بایستی تا ۷۲۰ درجه به سمت چپ و راست ادامه یابد. این مطلب ما را قادر می‌سازد تا هرگونه عدم تقارن و اصلاح مورد نیاز بدلیل انحراف ناشی از باد یا جریان (در صورت وجود در شرایط سطحی) را تشخیص دهیم.

برای انجام مانور:

۱- سرعت کروز می بایست حفظ شده و زیردریایی در یک جهت ثابت قرار گیرد (زاویه یاو صفر).

۲- سکان تا حداکثر زاویه و با ماکزیمم نرخ به سمت راست چرخانده شود و بایستی منتظر ماند تا جهت زیردریایی حداقل ۷۲۰ درجه تغییر کند.

۳- یک جهت ثابت برای زیردریایی باید در نظر گرفته شود و سرعت به حالت اولیه برگردانده شود.

۴- سکان تا حداکثر زاویه و با ماکزیمم نرخ به سمت چپ حرکت داده شود و باید منتظر ماند تا جهت زیردریایی حداقل ۷۲۰ درجه تغییر کند.

1-Tactical Diameter

2-Turning Circle Maneuver

۵- در این مرحله نیز باید یک جهت ثابت برای زیردریایی باید در نظر گرفته شود و سرعت به حالت اولیه برگردانده شود.

تنظیمات مربوط به پیشرانیش بایستی در حین تست تغییر کند. برای بررسی بیشتر مانور دور زدن، بایستی تست‌های اضافی در سرعت‌ها و زوایای سکان مختلف انجام گیرد. بعنوان نمونه سرعت‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصدی از حداکثر سرعت، و زوایای ۱۰ و ۲۰ درجه‌ای سکان.

اطلاعات زیر بایستی در حین آزمایش ثبت گردد و یا اینکه از داده‌های ثبت شده محاسبه گردد:

۱- زاویه سکان استفاده شده

۲- جهت زیردریایی در هر ۱۰ ثانیه

۳- نرخ تغییرات جهت

۴- زمان سپری شده^۱ برای اجرای^۲ مانور

۵- سرعت و موقعیت زیردریایی در فواصل مناسب

قفل سطوح کنترل عقب^۳

آزمون قفل سطوح کنترل بایستی بمنظور تایید و یا اصلاح نمودار MLD^۴ و روش های بازیابی شناور از حالت قفل سطوح کنترل، انجام گیرد.

آزمون قفل سطوح کنترل

این آزمون، پتانسیلی برای رساندن زیردریایی به نزدیکی حدود عملیاتی دارد. باید توجه داشت که در حین تمرین‌ها همیشه زیردریایی در بین نمودارهای MLD (با یک حاشیه امنیتی به منظور ایمنی بیشتر) باقی بماند. زوایای اختصاص داده شده به قفل سطوح کنترل و زمان تاخیر بایستی قبل از آزمون مورد موافقت قرار گیرد.

بمنظور انجام مانور:

۱- زیردریایی می بایست در بویانسی خنثی و بدون تریم^۵ در عمق عملیاتی برای آزمون قرار گیرد.

۲- یک سرعت، جهت و عمق مناسب و ثابت باید در نظر گرفته شود.

۳- سطوح کنترل عقب تا زاویه قفل برنامه‌ریزی شده چرخانده شود و اجرا ادامه یابد.

۴- هنگامی که زمان تاخیر مناسب بدست آمد، فرمان شروع بازیابی برنامه‌ریزی شده داده می‌شود.

1-Time elapsed

2-execution

3-Aft control surface jam

4-maneuvering limitation diagram

5-level trim

اقدامات مربوط به بازیابی در طول اجرا ادامه داده می شود.

۵- هنگامی که تغییر عمق متوقف شد و اطمینان از بازیابی حاصل شد، اجرا به پایان می رسد.

۶- این عملکرد برای موارد باقیمانده از غوص، صعود و یا قفل سکان ادامه داده می شود.

اطلاعات زیر بایستی ثبت گردد و یا اینکه از داده های ثبت شده محاسبه گردد:

۱- سرعت اولیه زیردریایی

۲- زمان سپری شده برای انجام مانور

۳- تعداد دور شافت

۴- عمق زیردریایی

۵- رول و پیچ زیردریایی

۶- غوص / صعود / زاویه سکان

۷- زوایای سطوح کنترل عقب

۸- زوایای هیدروپلن

الزامات استاندارد در خصوص مانور

در جدول ۱ با استفاده از استاندارد DEF و همچنین با استفاده از استاندارد^۱ IMO مقادیر محدوده مجاز که مبنای محاسبات قرار گرفته است ارائه خواهد شد. با بررسی استاندارد DEF مشخص شد که مقادیر ارائه شده برای محدوده مجاز این مانورها با مقادیر ارائه شده در استاندارد IMO یکسان می باشد. در مواردی که استاندارد DEF محدوده را مشخص نکرده است مقادیر ارائه شده در استاندارد IMO مبنای انجام محاسبات قرار گرفته است.

جدول ۱: الزامات استاندارد در خصوص مانور

نوع تست	پارامتر و مقدار	ماتور
دور زدن	Advance ≤ 4.5 LBP Tactical Diam ≤ 5 LBP	
زیگزنگ (10)	X ≤ 2.5 LBP at $\Psi = 10$ deg	
زیگزنگ (10)	1 st Overshoot angle $\leq \begin{cases} 10 & , \frac{L}{V} < 10 \text{ sec} \\ 20 & , \frac{L}{V} \geq 30 \text{ sec} \\ 5 + \frac{L}{2V} & , 10 < \frac{L}{V} < 30 \end{cases}$ 2 nd Overshoot angle $\leq 15^\circ + 1^\circ \text{ Overshoot angle}$ 1 st Overshoot angle $\leq 20^\circ$	سطح مسافت
زیگزنگ (20)	Track Reach ≤ 15 LBP	ایستادن اضطراری

مشخصات شناور نمونه

مشخصات شناور نمونه که که مانورینگ آن مورد بررسی قرار گرفته است در شکل ۲ نشان داده شده است و مشخصات آن به شرح جدول ۲ می باشد:



شکل ۲: شکل سه بعدی زیردریایی نمونه

اندازه	مشخصه
75	طول (متر)
8.2	قطر (متر)
3750	تناژ (تن)
27	فاصله طولی بالک سینه از وسط شناور (متر)
6	فاصله عمودی بالک سینه از کیل شناور (متر)
7/5	مساحت سطح بالک های سینه (متر مربع)
40	مساحت سطح بالک های پاشنه (متر مربع)
31/8	مساحت سطح سکان ها (متر مربع)

نتایج تست دور زدن استخراج شده برای شناور مدل

شکل ۳ نمودار مکان زیردریایی را در تست دور زدن برای سه جهت X و Y و Z نشان می‌دهد. با رسم موقعیت X و Y شناور در هر لحظه می‌توان مسیر دور زدن شناور را بدست آورد که در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با این نتایج مقادیر ذیل برای شناور بدست می‌آید:

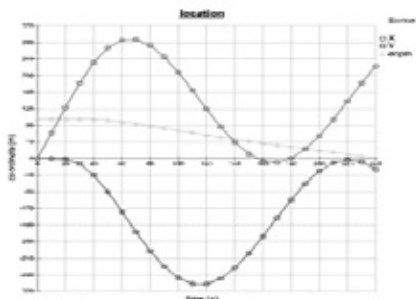
Advance=170m
LBP=75m
Standard: Advance \leq 4.5 LBP
170 \leq 337.5

Tactical Diam =300m
Standard: Tactical Diam. \leq 5 LBP
300m \leq 375m

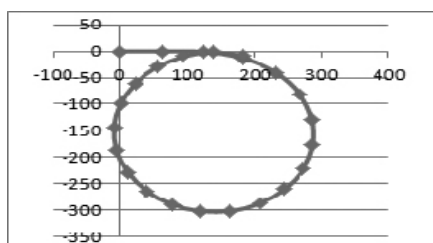
مطابق با نتایج بدست آمده با سطوح کنترلی طراحی شده در محدوده مقادیر مجاز برای تست دور زدن قرار می‌گیرند.

بررسی مانورهای حفظ مسیر و تغییر مسیر برای زیردریایی نمونه

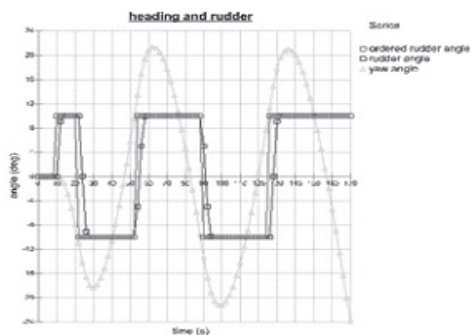
برای بررسی مانورهای فوق، این مانورها مطابق با دستورالعمل مراحل تست در نرم افزار برای زیردریایی نمونه شبیه سازی گردید که در شکل‌های ۵ تا ۷ مقادیر خروجی که جهت مقایسه با مقادیر مجاز استاندارد نیاز است ارائه شده است.



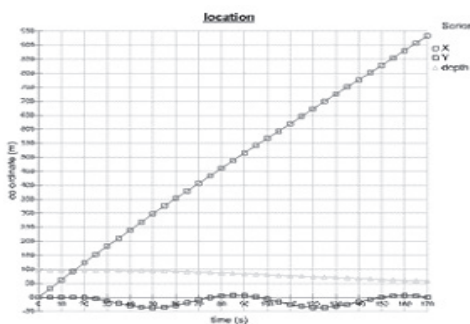
شکل ۳: مختصات محل قرارگیری شناور ضمن دور زدن



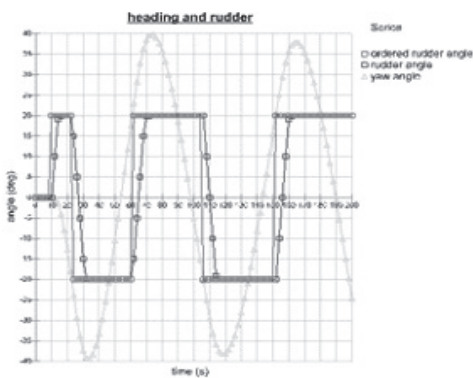
شکل ۴: منحنی دور زدن شناور با زاویه ۲۰ درجه سکان



شکل ۵: نمودار زیگزاگ (۱۰/۱۰) برای زیردریایی نمونه



شکل ۶: نمودار محل قرارگیری شناور در تست زیگزاگ (۱۰/۱۰)



شکل ۷: نمودار زیگزاگ (۲۰/۲۰) برای زیردریایی نمونه

مطابق با این شکل‌ها مقادیر قابل استخراج به قرار ذیل است:

At $\Psi=10$ deg : $X=130m$
 $2.5LBP=187.5m$
 $130m \leq 187.5$

پس مطابق با استاندارد شناور از نظر تغییر مسیر مشکلی ندارد.

(10/10)

1st Overshoot angle =8 degree

2st Overshoot angle =12 degree

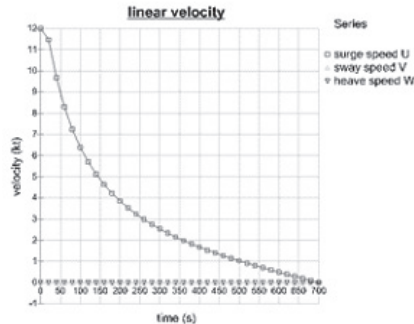
(20/20)

1st Overshoot angle =20 degree

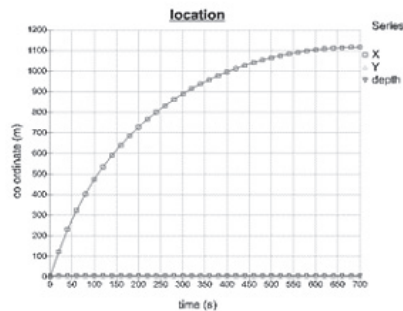
با توجه به آنکه $L/V=75/(12*0.514)=12.16$ از جدول ۱ مشاهده می‌شود که تمام الزامات استاندارد در خصوص حفظ مسیر شناور نیز ارضا شده است.

مانور ایستادن یا ترمز کردن

همانطور که قبلا هم اشاره شد برای بررسی مانور ایستادن شناور تست ایستادن اضطراری انجام می‌شود. مطابق شکل ۸ و ۹ دیده می‌شود که پس از زمان ۷۰۰ ثانیه از زمان تصمیم به توقف شناور که با سرعت ۱۲ نات حرکت می‌کرده است به سرعت صفر رسیده است که در همین مدت زمان مسافت ۱۱۰/۶ متر را طی می‌کند.



شکل ۸: سرعت شناور از لحظه تصمیم به توقف تا توقف کامل در مانور ایستادن



شکل ۹: موقعیت شناور از لحظه تصمیم به توقف تا توقف کامل در مانور ایستادن

با بررسی نمودار و در نظر گرفتن استاندارد به نتایج ذیل می‌رسیم:

Standard: Track Reach ≤ 15 LBP

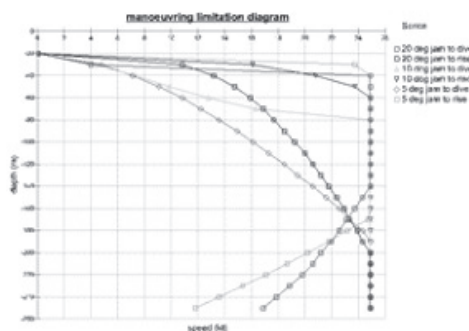
Track Reach=1108.6m

15 LBP=1125m

پس با توجه به مقادیر فوق محدوده ایستادن اضطراری شناور در محدوده مجاز از دیدگاه استاندارد قرار می‌گیرد.

آزمون قفل سطوح کنترل (نمودار MLD)

در شکل زیر نمودار MLD استخراج شده برای زیردریایی نمونه که بیانگر محدوده مجاز برای قفل شدگی بالک‌های شناور می‌باشد ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود حداکثر عمق مجاز عملکرد زیردریایی نمونه ۲۵۰ متر تعریف شده است. محدوده داخلی نمودارها نشان دهنده محدوده ایمن و قسمت خارجی آن نشان دهنده محدوده غیر ایمن می‌باشد.



شکل ۱۰: نمودار MLD برای یک نمونه زیردریایی

نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله ابتدا انواع مانورهای عملیاتی زیردریایی بیان شد. سپس معیارهای استاندارد در مورد این نوع مانورها ارائه گردید. با استفاده از نرم افزار پارامترهای مانورهای بیان شده در مورد یک نمونه زیردریایی شبیه سازی شد. با توجه به نتایج بدست آمده، ملاحظه گردید که زیردریایی نمونه قابلیت انجام مانورها را دارا می‌باشد.

مراجع

1) Australian Defence Force Maritime Materiel Requirements Set, Part 04 Submarine Hydrodynamics, Maneuvering and Control, August 2007.

- 2) Khac Duc Do, PhD. Jie Pan, PhD “Control of Ships and Underwater Vehicles”, School of Mechanical Engineering ,The University of Western Australia, 35 Stirling Highway Crawley, WA 6009 Australia.
- 3) Michael S. Triantafyllou. Franz S. Hover, “Maneuvering And Control Of Marine Vehicles”, Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts USA.
- 4) K.D. Do, Z.P. Jiang, and J. Pan, “Robust and adaptive path following for underactuated autonomous underwater vehicle,” *Ocean Engineering*, vol. 31, no. 16, pp. 1967–1997, 2004.
- 5) K. D. Do, Z. P. Jiang, and J. Pan, “Universal controllers for stabilization and tracking of underactuated ships,” *Systems and Control Letters*, vol. 47, no. 4, pp. 299–317, 2002.
- 6) H. Nijmeijer and A.J. van der Schaft, “Nonlinear Dynamical Control Systems,” New York: Springer, 1990.
- 7) G. Tao, *Adaptive Control Design and Analysis*. John Wiley & Sons, 2003.
- 8) R.W. Brockett, “Asymptotic stability and feedback stabilization,” in *Differential Geometric Control Theory* (R.W. Brockett, R.S. Millman, and H.J. Sussmann, eds.), pp. 181–191, Boston: Birkhauser, 1983.
- 9) E.M. Lewandowski, “The Dynamics of Marine Craft,” Singapore: World Scientific, 2004.
- 10) J.P. Hespanha, D. Liberzon, and A. Morse, “Logic based switching control of a nonholonomic system with parametric modeling uncertainty,” *Systems and Control Letters*, vol. 38, no. 3, pp. 167–177, 1999.