

ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir

مدلسازی شتابگیری شناور پلنینگ در حوزه زمان و کنترل بهینه آن برای رسیدن به سرعت نهایی در حداقل زمان ممکن

مرتضى عزيزى ينگجه¹، حميد مهديقلى^{2*}، محمد سعيد سيف³

1- دانشجوی دکترای، مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3-استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی mehdi@sharif.edu ،11365-9567

چکیدہ	اطلاعات مقاله
تنظیم درست زاویه تریم شناور پلنینگ در فاز شتابگیری برای عبور آسان از قله مقاومت از اهمیت ویژهای برخوردار است. افزون بر آن، در موارد	مقاله پژوهشی کامل
خاصی مانند شناورهای مسابقهای یا برخی کاربردهای نظامی، هدف رسیدن به سرعت نهایی در حداقل زمان ممکن است. این مقاله ضمن	دریافت: 05 خرداد 1394 120 م 120
معرفی کاربرد جدیدی برای تئوری کنترل بهینه در حوزه کنترل شناورهای پلنینگ سعی دارد به این پرسش پاسخ دهد که در طول شتابگیری	پذیرش: 31 تیر 1394 ایند
شناور پلنینگ زاویه اعمال شده به سیستم رانش یا یک المان کنترلی همچون تریمتب چگونه باید تغییر یابند تا زمان رسیدن به یک سرعت	ارائه در سایت: 10 ابان 1394 بروی ارتباعی
مشخص کمینه شود. برای پاسخ به این پرسش نیازمند یک مدل دینامیکی از شناور برای فاز شتابگیری آن هستیم. در این تحقیق چنین مدلی بر	کلید واژگان: شدار از با
اساس روش های تئوری و تجربی موجود برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی و آیرودینامیکی، سیستم رانش و المان کنترلی بر بدنه ارائه می	ساور پلیینک تربیتی
شود. کل مجموعه سیستم رانش شامل موتور، سیستم درایو و پروانه به نحو سادهشدهای مدل شدهاند. در ادامه، مسئله کنترل بهینه معرفی و	تریم تب کنترل بهینه
نحوه حل آن توضيح داده شده است. در نهايت نتايج حل مسئله براي يک شناور پلنينگ تک بدنه و يک کاتاماران مسابقه اي ارائه شدهاند.	قاعده مينيمم پونترايگن

Modeling the forward accelerated motion of planing craft and its optimal control to minimize the time to reach final speed

Mortaza Azizi Yengejeh, Hamid Mehdigholi*, Mohammad Saeed Seif

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. * P.O.B. 11365-9567, Tehran, Iran, mehdi@sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 26 May 2015 Accepted 22 July 2015 Available Online 01 November 2015

Keywords: planning craft trim tab optimal control Pontryagin Minimum Principle

ABSTRACT

It is of crucial importance to adjust the trim angle properly during the forward acceleration of a planning craft in cases such as sport competitions and military missions. In these applications, the goal of trim adjustment is to reach the final cruising speed as soon as possible. Present study tries to answer this question: How should the angles of the drive system and/or a control element be changed during acceleration phase in order for the craft to reach its final speed in the minimum possible time? This is an optimal control problem with the drive and control element angles as its control variables. To solve such problem, a 3-DOF dynamic model is developed based on the theoretical and empirical methods. Both propeller operation and the engine are taken into account for the propulsion system. Then, the solution algorithm of time-optimal control problem is explained according to an indirect method. Results for a planning mono-hull with two different weight distributions show a similarity in trend between the optimal solution for control variables and the hull instantaneous trim angle. As the second case study, the solution for an aerodynamiccally alleviated racing catamaran is presented.

کنیم (چنانچه تا آخر این نوشته فرض شده است) نیرو و ممانهای
هیدرودینامیکی تابعی از سرعت، زاویه تریم و آبخور شناور خواهند بود.
سویتسکی و براون [1] حرکت شناورهای پلنینگ معمول در فاز
شتابگیری را در آب آرام بر حسب عدد فرود عرضی $C_v = u/\sqrt{gB_T}$ شتاب
گرانش و B _T عرض پاشنه در صفحه آبخور) چنین تقسیمبندی میکنند:
1- از حالت سکون تا عدد فرود عرضی 0/5 شناور پلنینگ همچون شناور جابجایی
عمل میکند و میتوان نیروی لیفت کل را برابر نیروی بویانسی در نظر گرفت.
البته سویتسکی [2] نشان داد که در اعداد فرود عرضی کمتر از 1، نیروی لیفت

1- مقدمه

شکل خاص بدنههای پلنینگ¹ موجب میشود با افزایش سرعت شناور نیروی لیفت هیدرودینامیکی نسبت به نیروی بویانسی به طرز قابل توجهی افزایش یابد. افزایش نیرو و ممان هیدرودینامیکی به طور کلی منجر به افزایش تدریجی زاویه تریم شناور و کاهش آبخور میشود که سهم نیروهای بویانسی را بیش از پیش کاهش خواهد داد. اگر خود را تنها به درجات آزادی هیو² و پیچ³ مقید

1- Planing

2- Heave 3- Pitch

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Azizi Yengejeh, H. Mehdigholi, M.S. Seif, Modeling the forward accelerated motion of planing craft and its optimal control to minimize the time to reach final speed, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 263-274, 2015 (In Persian)

کل ممکن است حتی اندکی کمتر از نیروی بویانسی صرف (در همان زاویه تریم) باشد. در انتهای این مد پاشنه تخت کاملاً در معرض هواست [1]. 2- در اعداد فرود عرضی بین 5/0 و 5/1 نیروی لیفت هیدرودینامیکی به تدریج ظاهر شده و بخشی از وزن را تحمل میکند. در این حالت فرایند پلنینگ که همراه با کاهش آبخور و افزایش زاویه تریم است شروع میشود. 3- در اعداد فرود عرضی بالاتر از 5/1 نیروی لیفت هیدرودینامیکی و ممان آن به اندازه کافی بزرگ شده است به نحوی که برخاستگی مرکز جرم و فزایش زاویه تریم، دماغه را از آب خارج میکنند و جدایش کامل جریان در فرود عرضی حدوداً بین 2 و 3 معمولاً به مقدار بیشینهای رسیده و دوباره کاهش پیدا میکند. شناور در این نقطه یک قله را در مقاومت تجربه میکند. عبور از این قله برای ادامه افزایش سرعت شناور حیاتی است. با افزایش بیشتر سرعت، مقاومت شناور دوباره روند صعودی خواهد داشت تا با توجه به نیروی رانش موجود سرعت شناور به یک سرعت را با توجه به نیروی

باید توجه داشت ورود و خروج دماغه به آب در حین فرایند شتابگیری شناور پلنینگ شدیداً وابسته به زاویه تریم و آبخور اولیه شناور میباشد. معیاری که معمولاً برای اطمینان از خارج بودن دماغه از آب لحاظ میشود معیاری که معمولاً برای اطمینان از خارج بودن دماغه از آب لحاظ میشود $L_K > L_K$ که معمولاً برای اطمینان از خارج بودن دماغه از آب لحاظ میشود کیل¹ و L_K که معمولاً برای شناوری کیل¹ و L_K آبخور اولیه) است [1،3]. با معیار L_K **>** L_K مثلاً برای شناوری از سری62 با نسبت طول به عرض 2 و زاویه ددرایز² 12/5 در *LCG کم*تر از حدوداً 38% L_K دماغه هیچگاه در آب فرو نرفته است اما برای همین شناور در *LCG ح*دوداً 50% L_K ، دماغه غیر از محدوده باریکی اطراف عدد فرود حجمی 3 همواره در آب بوده است [1].

تنظیم مناسب زاویه تریم شناور نقش بسزایی در فرایند فوق از شروع حرکت تا رسیدن به سرعت ماکزیمم دارد. زاویه تریم نامناسب که در ساده-ترین حالت ممکن است در اثر تغییرات موقت میزان بار و توزیع آن بر روی شناور اتفاق بیفتد ممکن است امکان پلنینگ و افزایش سرعت یا حتی عبور از قله مقاومت را از شناور سلب کند و در سرعت های بالاتر منجر به ناپایداری هایی مانند پورپویزینگ³ شود.

اما زاویه تریم شناور چگونه کنترل می شود؟ برای تنظیم زاویه تریم شناور ممان مورد نیاز را، می توان به وسیله تغییر مستقیم زاویه نیروی رانش نسبت به افق یا به صورت غیر مستقیم توسط یک المان جانبی مانند تریم تب، هیدروفویل یا اینتر سپتور⁴ ایجاد کرد.



چنین مکانیزمهایی برای تغییر زاویه تریم، در شناورهای تندرو کوچک و متوسط مجهز به سیستم رانش پروانه مغروق، نیمهمغروق یا واترجت به وفور یافت میشوند. در سیستم رانشی که نیروی تراست⁵ آن توسط پروانه تامین میشود چنین مکانیزمی برای کنترل مستقیم جهت نیروی تراست در چیدمان بیرونی⁶ (شکل 1-الف) برای موتور، اغلب وجود دارد. برای چیدمان درونی موتور نیز اگر از یک سیستم درایو پاشنهای⁷ (شکل 1-ب) یا سطحی (شکل 1-ج) استفاده شود امکان تغییر زاویه نیروی تراست نسبت به افق فراهم خواهد بود. استفاده از مکانیزمهای فوق برای تنظیم مستقیم زاویه نیروی تراست به تنهایی یا به همراه سایر المانهای جانبی ذکر شده امکان کنترل بهتر فرایند پلنینگ و سپس رسیدن به سرعت بیشینه را توسط هدایتگر شناور فراهم میکنند. امروزه سیستمهای کنترل اتوماتیک نیز برای تنظیم زاویه تریم با الگوی تعریف شده توسط کاربر مورد استفاده قرار می

نحوه کنترل مناسب زاویه تریم از شناوری به شناور دیگر و در یک شناور با تغییر شرایط (همچون افزایش یا کاهش بار و توزیع آن) متفاوت بوده و به صورت تجربی حاصل می شود. دستورالعمل کلی این است که قبل از پلنینگ باید زاویه تریم شناور را تا جای ممکن پایین آورد. چنین حالتی در زوایای مثبت تراست (جهت آن به سمت بالا) و در کنترل توسط المانی چون تریم-تب در زوایای انحراف⁸ بالا اتفاق می افتد. پس از پلنینگ و عبور از قله مقاومت باید به تدریج زاویه تریم شناور را کاهش داد. برای این منظور زاویه نیروی تراست را باید کاهش داده و به مقادیر منفی (جهت نیروی تراست به سمت پایین) رساند یا از زوایای انحراف کمتر برای تریمتب استفاده کرد. در این صورت دماغه شناور بالا آمده و آبخور شناور به تدريج كمتر مى شود تا سرعت به راحتی افزایش یابد. افزایش زاویه تریم شناور تا رسیدن به شروع حرکات پورپویزینگ می تواند ادامه داشته باشد. چنانچه ذکر شد اگر کنترل زاویه تریم شناور به درستی انجام نگیرد علاوه بر اینکه رسیدن به پلنینگ و سرعت ماکزیمم ممکن است با مشکل مواجه شود کلاً در طول حرکت شناور کارایی پایین آمده و مصرف سوخت بالاتر خواهد رفت. تنظیم درست زاویه تریم شناور در موارد خاص مانند شناورهای مسابقهای یا نظامی که سرعت عمل و زمان، نقش حیاتی دارند بیشتر اهمیت پیدا می کند. در چنین مواردی هدف از کنترل زاویه تریم چیزی فراتر از موارد فوق است: شتاب حداکثر یا رسیدن به سرعت ماکزیمم در حداقل زمان ممکن. در این راستا تحقیق حاضر سعی دارد به این پرسش پاسخ دهد که زوایای اعمال شده به سیستم رانش و تریم-تب شناور پلنینگ (به ترتیب $arphi_{_{P}}$ و $arphi_{_{T}}$ را در حین شتابگیری آن از حالت سکون چگونه باید تغییر داد تا در حداقل زمان ممکن به سرعت نهایی برسد و این زمان در حالت ایدهال چقدر است. در واقع ما با مطرح کردن این پرسش به دنبال جواب بهینه برای یک مسئله کنترلی با تابع هدف زمان میباشیم چیزی که موضوع دسته خاصی از مسائل در تئوری کنترل بهینه است. در این

- 1- Keel 2- Deadrise
- 3-Porpoising
- 4- Interceptor

تحقیق سوال فوق الذکر برای اولین بار در چهارچوب یک مسئله کنترل بهینه طرح و فرموله شده و برای نمونههایی از شناورهای پلنینگ تک بدنه و کاتاماران پاسخ داده می شود.

کاربرد دانش کنترل بهینه در حوزه کنترل حرکت شناورها به چند دهه قبل برمی گردد. فوزن در دو کتاب خود [۴،5] کاربردهایی از تئوری کنترل بهینه در مانور و حفظ مسیر، کاهش حرکات رول و نیز تثبیت موقعیت

- 5- Thrust6- Outboard7- Sterndrive
- 8- Deflection

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11



دینامیکی کشتیها و سازههای دریایی را ذکر کرده است. در مورد شناورهای تندرو افرادی همچون کیم و یاماتو [۶،7] و بای و کیم [8] از این تئوری برای کنترل حرکات شناورهای مجهز به هیدروفویل مغروق استفاده کردهاند. افرادی دیگری مانند الساوانوس و همکاران [9] و میلاندری [10] از این تئوری برای مینیمم کردن حرکات هیو و پیچ یک کاتاماران پرسرعت با کنترل فعال دو هیدروفویل جلو و عقب در امواج بهره بردهاند. سالاریه و قربانی [11] یک روش کنترل بهینه مستقیم را برای بهینه کردن مسیر حرکت یک شناور پلنینگ در صفحه عرضی به کار بردهاند. ژی و سان [21] از کنترل بهینه تریمتب برای بهبود خواص پایداری شناور پلنینگ استفاده کردهاند. کریمی و همکاران [13] از کنترل بهینه پیاده شده بر روی از کنترل بهینه تریمتب برای میود خواص پایداری شناور پلنینگ استفاده کردهاند. کریمی و همکاران [13] از کنترل بهینه پیاده شده بر روی

چنانچه از تحقیقات فوق مشخص می شود کاربرد کنترل بهینه به مسائل مشخص و استانداردی در حوزه مانور و دریامانی شناورها محدود می شود. تحقیق حاضر در واقع گامی است در جهت معرفی کاربرد جدیدی از تئوری کنترل بهینه که در حوزه بهبود عملکرد شناورهای تندرو طرح می شود. پرورش بیشتر چنین ایدهای نهایتاً می تواند در عمل به طراحی و ساخت یک سیستم کنترلی هوشمند برای تنظیم بهینه موقعیت حرکتی شناورهای پلنینگ با اهداف تعریف شده از ابتدای شروع به حرکت تا رسیدن به سرعت مورد نظر و پس از آن، در شرایط مختلف بار گذاری و محیطی منجر شود.

بار عمده حل مسئله، تهیه یک مدل وابسته به زمان برای فاز شتاب گیری شناور است. در ادامه به این مدل می پردازیم.

2- تهیه مدل دینامیکی

رسالت اصلی ما در این بخش، ارائه مدلهایی برای محاسبه نیروها و ممان وارد از طرف سیال آب، هوا، سیستم رانش و المان کنترلی به بدنه است. با داشتن این مدلها از روی قانون دوم نیوتن میتوان معادلات حرکت را در سه درجه آزادی مورد مطالعه به دست آورد. گام بعدی حل این معادلات دیفرانسیل غیرخطی در حوزه زمان است که در این بخش به آن نیز اشاره خواهد شد.

2-1- مدل نیروها و ممان هیدرودینامیکی وارد بر بدنه

در اینجا سهم هیدرودینامیکی نیروها و ممان از روش سویتسکی حساب می شود و سهم آیرودینامیکی که خود شامل بخش وارد بر قسمت فوقانی شناور و بخش ناشی از جریان هوا زیر بدنه های کاتاماران است به صورت مجزا لحاظ خواهد شد.

محور مختصات را مطابق شکل 2 در سطح آب آرام و متصل به زمین در نظر می گیریم. کلیه کمیت ها و معادلات در این دستگاه مختصات اینرسی بیان می شوند. در این قسمت نیروها و ممان هیدرودینامیکی که شامل



شکل 2 دستگاه مختصات مورد استفاده ، برخی تعاریف هندسی و مولفههای نیرویی وارد از طرف سیال آب به بدنه

$$F_{3\rm Hydro} = 0.5 C_{LR} \rho u^2 B_T^2$$
 (2)

 $C_{L\beta} = C_{L0} - 0.0065\beta \ C_{L0}^{0.6} \tag{3}$

$$C_{L0} = \left(\frac{180x_5}{\pi}\right)^{1.1} (0.012\lambda_m^{0.5} + 0.0055\frac{\lambda_m^{2.5}}{C_v^2})$$
(4)

$$\lambda_m = \frac{0.5(L_K + L_C)}{B_T} + 0.03$$
(5)

$$L_{P} = \lambda_{m} B_{T} \left[0.75 - (5.21 \frac{C_{v}^{2}}{\lambda_{m}^{2}} + 2.39)^{-1} \right]$$
(6)

در این روابط C_{L0} ضریب لیفت، ρ چگالی آب ، u سرعت شناور، C_{L0} ضریب لیفت برای زاویه ددرایز صفر، β زاویه ددرایز بر حسب درجه، mنسبت طول خیس شده متوسط به عرض شناور، L_c طول خیس شده چاین، LCG فاصله مرکز جرم تا پاشنه در راستای خط کیل، VCGفاصله مرکز جرم تا خط کیل و مرکز جرم تا پاشنه در راستای خط کیل، N_c فاصله مرکز جرم تا خط کیل و مرکز جرم تا پاشنه در راستای خط کیل، VCGفاصله مرکز جرم تا خط کیل و مرکز جرم تا پاشنه در راستای خط کیل، VCGفاصله مرکز جرم تا خط کیل و میتوان آن را بر حسب β میباشند. M برحسب J_R برحسب I_r میتوان آن را بر حسب x_5 و x_5 به صورت زیر تخمین زد [14]. (7)

$$L_{C} = L_{K} - \frac{\tan x_{5} \sin x_{5}}{\left[x_{5}(1 + \frac{z_{max}}{x})\right]}$$
(8)

(9)

$$\frac{z_{\text{max}}}{V_t} = -2 \times 10^{-6} \beta^3 - 7 \times 10^{-5} \beta^2 - 10^{-3} \beta + 0.575$$

روابط سویتسکی در محدوده زاویه تریم 2 تا 15 درجه و $\lambda_m < 4$ اعتبار دارند. از طرف دیگر این روابط اگر چه در محدوده وسیعی از عدد فرود عرضی (13) کاربرد دارند اما با فرض خارج بودن کامل دماغه از آب به دست آمدهاند. بر مبنای این روابط سویتسکی در سال 1964روش مشخصی را برای محاسبه توان مورد نیاز و کارایی شناور ارائه داده است.

سویتسکی و همکاران در تحقیق اخیر خود [3] اثر درگ ویسکوز ناشی از جت اسپری را همچون مقاومت هوا بر روی مقاومت کل شناور لحاظ کردند و دقت مقادیر محاسبه شده برای مقاومت شناور پلنینگ-که غالباً کمتر از مقادیر اندازه گیری شده توسط آزمایش های متعدد بود- را بهبود دادند. ایشان با محاسبه مقاومت از روش جدید بر روی شناورهای مختلف که دادههای

مقاومتی ناشی از جت اسپری
$$R_{JS}$$
 و مقاوت هوا R_{Air} ممکن است تا حدود
مقاومتی ناشی از جت اسپری R_{JS} و مقاوت هوا R_{Air} ممکن است تا حدود
20% مقاومت کل نیز افزایش یابد. در تحقیق حاضر اثر جت اسپری و مقاومت
هوا همچون مرجع [3] لحاظ شده است. با محاسبه درگ ویسکوز F_V در
ناحیه فشار از روابط تجربی موجود مانند ITTC-57 نیروی مقاومت و ممان
ناحیه فشار از روابط تجربی موجود مانند 1TTC-57 نیروی مقاومت و ممان
پیچ حول مرکز جرم با توجه به شکل 2 از روابط زیر به دست خواهند آمد. h_V
پیچ حول مرکز جرم با توجه به شکل 2 از روابط زیر به دست خواهند آمد. $h_V = VCG - 0.25 \frac{B_T}{\tan\beta}$ لا از روابط نیر به دست خواهند آمد. $h_V = VCG - 0.25 \frac{B_T}{\tan\beta}$ لا از روابط زیر به دست خواهند آمد. $h_V = VCG - 0.25 \frac{B_T}{\tan\beta}$ لا از روابط نشده است.
(10)

مقاومت F_{5Hydro} ليفت F_{3Hydro} و ممان پيچ F_{5Hydro} حول مرکز جرم می باشند به صورت توابعی به شکل رابطه (1) در نظر گرفته می شوند. (1) $F_{iHydro} = f_{iHydro}(u, x_3, x_5) i = 1,3,5$ (1) در ورودی این توابع چنانچه در شکل 2 نشان داده شده است x_3 مختصات قائم مرکز جرم شناور از سطح آب آرام، x_5 زاویه تریم لحظهای شناور بر حسب رادیان و u سرعت پیشروی شناور در جهت x می باشند. در سرعت پیشروی ثابت u، سویتسکی [2] برای محاسبه نیروی لیفت وارد از طرف آب بر بدنه منشوری (با زاویه ددرایز ثابت) و فاصله طولی مرکز فشار تا پاشنه L_P روابط تجربی زیر را ارائه کرده است.

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

www.SID.ir

$$F_{\rm 5Hydro} = \frac{\left(F_{\rm 3Hydro} + F_V \sin x_5\right)}{\cos x} \times \left(L_P - LCG\right) - F_V h_V \tag{11}$$

برای حالتی که دماغه هنوز کاملاً از آب خارج نشده سویتسکی و براون [1] رابطهای رگراسیونی برای محاسبه مقاومت در محدوده فرود حجمی 1 تا 2 ارائه کردهاند. استفاده از این رابطه در اینجا (برای شناورهای مورد بررسی) موجب ناپیوستگی در مقاومت و وضعیت حرکتی¹ شناور هنگام تبدیل به روش سویتسکی[2] برای $L_K < LWL$ می شد لذا در این تحقیق از آن استفاده نشده و فرض شده است طول شناور و موقعیت LCGبه گونهای است که در زمان شتابگیری، دماغه همواره بیرون از آب می باشد.

باید توجه داشت روش سویتسکی که در اینجا به کار رفته است بیشتر به عنوان روشی برای استفاده در حالت پلنینگ با چاین خیس شناخته می شود اما در اینجا با لحاظ تغییرات عرض خیس شده برای حالت چاین خشک نیز استفاده شده است. در مقایسه ای که پاین [15] در مورد رابطه سویتسکی برای لیفت دینامیکی در حالت چاین خشک (با لحاظ تغییرات عرض خیس شده) با تئوری خود - که آن در توافق رضایتبخشی با برخی داده تجربی محدود بوده- انجام داده به طور كلى اختلاف، قابل توجه بوده است اما براى زاويه ددرايز 10 تا 15 و زاويه تريم 4 تا 10 درجه اين اختلاف به حداقل رسیده و حدوداً کمتر از 15% است.

در مورد کاتامارانهای پلنینگ مستقیماً نمی توان از روابط تجربی فوق استفاده کرد. در این راستا لیو و وانگ [16] با وارد کردن پارامتر A، به معادلات سویتسکی اثر هیدرودینامیکی نیم بدنه ها بر هم را لحاظ کردند تا با استفاده از همان عرض آبخور واقعی BT (شامل عرض تونل میان نیم بدنه ها) بتوان از شکل عمومی تر معادلات (4) و (6) به صورت زیر استفاده کرد. بنابراین در استفاده از این روابط λ_m و λ_r اساس $B_{\mathcal{T}}$ و نیروی لیفت از همان رابطه (2) محاسبه می شوند.

$$C_{L0} = \left(180 \frac{x_5}{\pi}\right)^{1.1} r_i^{1.5} (0.012 \frac{\lambda_m^{0.5}}{A_i} + 0.0055 \frac{A_i \lambda_m^{2.5}}{C_v^2 r_i})$$
(12)

$$L_P = \lambda_m B_T \left\{ \mathbf{0.75} - \left[\mathbf{5.21} \frac{C_v^2 r_i}{(A_i \lambda_m)^2} + \mathbf{2.39} \right] \right\}$$
(13)

ri نسبت مجموع عرض دو نیمبدنه به عرض واقعی شناور است. Ai که در حالت تئوري عددي بين 1 و1/4 است به عواملي چون سرعت، زاويه تريم و طول خیس شده وابسته است.

در مدل هیدرودینامیکی و محاسبه نیروهای وارد از طرف سیال از ترم-های نیرویی ناشی از شتاب و سرعت شناور در درجات آزادی هیو و پیچ به دلیل اهمیت کم برای مقصدمان صرف نظر کردهایم. در این تحقیق همچنین حرکت شتابدار تنها در جهت پیشروی شناور در نظر گرفته شده و جرم افزوده در اثر شتاب در این راستا (a₁₁) در معادلات لحاظ شده می شود. در مورد فوق، جرم افزوده از نسبت مقاومت افزوده (نسبت به حالت سرعت ثابت) به شتاب جسم در آن سرعت به دست میآید و معیاری از بزرگی اثرات شتاب از این جهت است. مقدار محاسبه شده برای این کمیت در تحقیق

شناورهای پلنینگ تک بدنه وجود دارد. در مورد کاتامارانهای پلنینگ به دلیل امکان جریان هوا از تونل میان نیمبدنهها و فشار مثبت آیرودینامیکی در این تونل نقش نیروهای آیرودینامیکی افزون تر می شود. به طور خاص در کاتاماران های فوق سریع و مسابقهای (شکل 3) با بهینهسازی شکل آيروديناميكي سازه فوقاني و تونل ميان دو نيمبدنه از اثر باله نزديک سطح² برای ایجاد لیفت اضافه استفاده می شود. در چنین شناورهایی، با اتخاذ چنین تدابیری سهم نیروی لیفت آیرودینامیکی حتی از لیفت هیدرودینامیکی ممکن است فراتر رود و در سرعت نامی، 30 تا 80 درصد وزن کل شناور توسط نيروي آيروديناميكي تحمل مي شود [18].

نیروها و ممان آیرودینامیکی وارد بر قسمت خارج از آب بدنه بستگی به شکل دماغه و سازه فوقانی دارد. این بخش از نیروها و ممان آیرودینامیکی در اینجا به صورت ساده با محاسبه تقریبی سطح خشک بدنه از روی وضعیت حرکتی شناور و در نظر گرفتن ضرایب لیفت و درگ و ممان مناسب برای این قسمتها محاسبه میشود. برای بخش مربوط به فشار آیرودینامیکی در تونل کاتامارانها از مدلی یک بعدی مبتنی بر یک تئوری اثر سطحی [19] که در ادامه به آن اشاره می کنیم استفاده شده است. در نهایت برایند نیروها و ممان به صورت توابعی به شکل رابطه (14) در نظر گرفته می شوند.

(14)

 $F_{iAero} = f_{iAero}(u, x_3, x_5) i = 1,3,5$ با لحاظ فرض شبهپایا چنانکه در مورد نیروهای هیدرودینامیکی نیز وجود داشت در هر گام زمانی باید جریان به صورت پایا حل شود. در این حالت معادله پیوستگی برای جریان زیر باله تخت با صفحات کناری (شکل 4) به صورت رابطه (15) خواهد بود و میتوان از حل این معادله، سرعت جریان پایا زیر باله را بر حسب فاصله طولی، $u_s(x)$ به دست آورد. زیرنویس s برای کمیتها به مقدار پایا اشاره دارد. سپس از رابطه برنولی (16) میتوان توزیع فشار نسبی زیر باله را حساب کرد. در رابطه (15) تابع sign به منظور اعمال جهت صحیح جریان نشتی از زیر تونل به بیرون یا از بیرون به داخل زمانی که به ترتیب فشار زیر تونل بیشتر یا کمتر از فشار اطراف است اضافه شده است. در این روابط ho_a چگالی هوا، U_s سرعت شبه پایای شناور و L_s عرض باله است. محور مختصات برای این معادلات و سایر توابع و کمیتهای هندسی طبق شكل 4 است. فرض مى شود سطح اوليه آب بدون تغيير باقى بماند.



شکل3 کاربرد کاتاماران های پلنینگ در شناورهای مسابقه ای



2- Wing In Ground Effect

تجربی کاتایاما و ایکدا [17] برای بدنه پلنینگ مورد آزمایش حدوداً 0/06 جرم آن بوده است که در اینجا نیز از این عدد استفاده شده است.

2-2- مدل نيروها و ممان آيروديناميكي وارد بر بدنه در شناورهای پلنینگ به دلیل افزایش سرعت که توام با کاهش سطح آبخور و ایجاد زاویه تریم هست سهم نیروهای آیرودینامیکی به طرز قابل توجهی ممكن است بالاتر رود. بخشي از اين نيروها به قسمت خارج از آب بدنه شامل دماغه و سینه خشک و همچنین سازه فوقانی مربوط میشود که در

1- Running Attitude

266

www.SID.ir

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11



شکل5 منحنی های عملکردی یک نمونه پروانه و موتور در حالت بار کامل

از تاثیر تغییرات زاویه محور پروانه بر عملکرد آن در اینجا صرف نظر می شود. برای محاسبه نیروی تراست از منحنی گشتاور تحویلی از طرف موتور و منحنیهای عملکردی آب باز پروانه (با اعمال تصحیحات مربوطه برای لحاظ کردن اثر ویک بدنه) استفاده شده است. لازم به ذکر است که دور پروانه در حین شتابگیری شناور ثابت نبوده و در ضمن الگوریتم محاسبه تراست تعیین می شود.

باید توجه داشت زمانی که سیستم رانش کار میکند به خاطر تغییر توزیع فشار در عقب بدنه، معمولاً شناور مقاومت بیشتری را تجربه میکند [14]. این اثر با ضریبی به نام کسر تراست t_p^3 بیان میشود. در این تحقیق به دلیل شتاب رو به جلوی شناور این ضریب با تقسیم F_{1Hydro} به $(1 - t_p)$ به دلیل شده است. t_p^3 در اینجا 0/08 انتخاب شده است.

الگوریتم محاسبه نیروی تراست در زیر آمده است.

1- ابتدا منحنی گشتاور ورودی به پروانه بر حسب دور با اعمال نسبت تبدیل η_E یربکس به منحنی گشتاور موتور و لحاظ یک بازده مکانیکی برای درایو η_E (در اینجا برابر 95%) به دست آمده است. فرض شده است در طول شتابگیری قایق، موتور در حالت دریچه سوخت کاملاً باز کار می کند.

2- منحنی گشتاور مورد نیاز پروانه از روی منحنی K_Q آن (شکل 5) به دست آمده است. در واقع در هر دور، ضریب پیشروی از رابطه (21) محاسبه و مقدار K_Q معادل در منحنی عملکردی آب باز پروانه از رابطه (22) به گشتاور تبدیل K_Q

$$\frac{d}{dx}[h_s(x)u_s(x)] + \frac{2d_s(x)}{L_s} \operatorname{sign}\left(U_s^2 - u_s^2(x)\right) \sqrt{U_s^2 - u_s^2(x)} = 0, u_s(0) = -U_s$$
(15)

$$p_s(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}\rho_a \times \left[U_s^2 - u_s^2(\mathbf{x})\right]$$
(16)

با محاسبه درگ فشاری و مرکز اثر آن از طریق انتگرال گیری از توزیع فشار زیر باله (در اینجا سقف تونل) و لحاظ ضریب درگ اصطکاکی از روابط تجربی می توان ضرایب درگ M_z را به دست آورد. سپس نیروها و ممان آیرودینامیکی از روابط زیر به دست می آیند:

$$F_{1\text{Aero}} = -0.5\rho_a U_s^2 (S_w C_x + S_{xa,\text{hull}} C_{xa,\text{hull}})$$
(17)

$$F_{3Aero} = \mathbf{0.5}\rho_a U_s^2 (S_w C_y + S_{ya,hull} C_{ya,hull})$$
(18)

$$F_{5Aero} = \mathbf{0.5}\rho_a U_s^2 L_x (S_w M_z + S_{za,hull} M_{za,hull})$$
(19)

 $S_w=L_sL_x$ در معادلات فوق سطح موثر باله است. جمله دوم در سمت راست $S_w=L_sL_x$ روابط فوق برای وارد کردن سهم قسمت بیرون از آب شناور شامل دماغه و سازه فوقانی از نیروها و ممان آیرودینامیکی و کلاً اثراتی که در جمله اول دیده نشده اضافه شده است. برای مثال در این جمله است. $S_{xa,hull}$ سطح موثر و $C_{xa,hull}$ ضریب درگ برای محاسبه مقاومت هوا بدین منظور است.

در صورتی که قسمت پشتی باله با سطح آب تماس پیداکند (برخورد سقف تونل بین دو نیم بدنه با سطح آب) به دلیل انسداد جریان هوا از دیدگاه سیالاتی حالت سکون¹ پیش میآید و سرعت هوا نسبت به شناور در طول کانال صفر خواهد شد. در این حالت نیروی هیدرودینامیکی وارد بر بخش خیس باله همانند بدنهای با زاویه ددرایز صفر و طول خیسشده آن طبق مرجع [2] محاسبه میشود. برای قسمت خشک باله در حالت انسداد جریان، سرعت جریان هوا در طول کانال صفر و فشار هوا برابر فشار سکون خواهد بود.

2-3-2 مدل نیروها و ممان وارد از طرف سیستم رانش به بدنه سعی شده است در این قسمت کل مجموعه سیستم رانش شامل موتور، درایو و پروانه به نحو ساده شده ای مدل شوند. منحنیهای عملکردی آب باز² پروانه شامل ضریب تراست K_{T} ، ضریب گشتاور K_{0} و بازده η بر حسب ضریب شامل ضریب تراست K_{T} ، ضریب گشتاور در از در بازده η بر حسب ضریب شامل خریب در از کامل در شامل خریب داده شده اند. از یک درایو پاشنهای با قابلیت تغییر زاویه نیروی تراست نیراست از می از می موتور به پروانه استفاده شده است.

هدف ما در این قسمت به دست آوردن توابع f_{iP} در رابطه (20) بر حسب متغیرهای $u \cdot x_5 \cdot x_3$ و φ_P میباشد. F_{5P} و $F_{3P} \cdot F_{1P}$ حسب نیروی افقی، نیروی قائم و ممان پیچ وارد از طرف سیستم رانش به بدنه هستند. علاوه بر نیروی تراست ناشی از پروانه، نیروی وارد بر درایو نیز در نظر گرفته شده است. نیروی F_{1P} شامل مولفه افقی نیروی تراست پروانه منهای مقاومت قسمت زیر آب از درایو، نیروی F_{3P} شامل مجموع مولفه قائم نیروی تراست F_{5P} پروانه و نیروی لیفت وارد از طرف آب به درایو در اثر اعمال زاویه به آن و ممان تمام این نیروها حول مرکز جرم شناور می باشد. 🖌 تعداد مجموعه موتور و درایو به کار رفته به عنوان سیستم رانش شناور است. (20) $N_P F_{iP} = f_{iP}(u_1 x_{3i} x_{5i} \varphi_P) i = 1,3,5$ راویه کنترلی اعمال شده به درایو سیستم رانش نسبت به بدنه (مثبت در $arphi_P$ خلاف جهت عقربه ساعت) است. در اینجا از تاثیر عمق آب بر عملکرد پروانه صرف نظر می شود لذا کمیت x_3 که به آبخور شناور مرتبط می شود در محاسبات وارد نمی شود و $arphi_P$ + x_5 به عنوان زاویه محور پروانه (یا راستای اثر نيروى تراست) نسبت به جهت پيشروى شناور براى به دست آوردن مولفههای افقی و قائم نیروی تراست به کار میرود.

شده است. در این روابط D _{prop} قطر پروانه و n دور لحظهای آن بر ثانیه است.
ضریب \overline{w} کسر ویک متوسط 4 بدنه در صفحه پروانه است که مقدار تقریبی آن
در اینجا 0/04 لحاظ شده است [20]. $\eta_{_R}$ نیز بازده چرخشی است که به
دلیل عدم یکنواخت بودن جریان ورودی به پروانه (نسبت به شرایط آب باز)
به کار میرود. مقدار $\eta_{_R}$ در اینجا 1/05 انتخاب شده است [14].
3- محل تقاطع دو منحنی به دست آمده در مرحله 1 و 2 برای محاسبه دور
پروانه در آن سرعت پیشروی شناور به کار رفته است.

3- Thrust Deduction4- Average Wake Fraction

1-Stagnation

2- Open Water

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11

www.SID.ir



$$F_{2D} = F_{2A} + T_D \sin(\varphi_D + x_c)$$

$$F_{3P} = F_{3A} + T_{P} \sin(\varphi_{P} + x_{5})$$
(25)

$$F_{5P} = T_{P} \cos(\varphi_{P} + x_{5}) L_{zP} - F_{3A} L_{xA} - T_{P} \sin(\varphi_{P} + x_{5}) L_{xP}$$
(26)

تریم شناور و زاویه اعمال شده به درایو در هر لحظه تعیین میشوند.

2-4- مدل نیروها و ممان وارد از طرف المان کنترلی به بدنه

برای مثال اگر تریم تب به عنوان المان کنترلی انتخاب شود از روابط تجربی براون [23] که برای محاسبه درگ F_{1T} ، لیفت F_{3T} و نیز ممان F_{5T} اضافه (23) براون شده بر بدنه منشوری (نسبت به حالت بدون تریم تب) در سرعت و زاویه انحراف ثابت φ_T ارائه شدهاند می توان استفاده کرد. در این صورت مدل نیرویی المان کنترلی توابعی به صورت رابطه (27) می باشد. (27)

$N_T F_{iT} = f_{iT} (u, x_5, \varphi_T) i = 1,3,5$

در رابطه فوق N_T تعداد تریم $تب به کار رفته است. <math>F_{1T}$ ، F_{3T} و F_{5T} پس از تبديل واحد به سيستم SI از روابط (28) تا (30) به دست مى آيند. در اين روابط B عرض صفحه برا یا L_T ، $0.5 \frac{B_T}{\cos\beta}$ روابط B عرض صفحه برا یا شناور (شکل6) و σ نسبت عرض تریم تب به عرض صفحه برا می باشند. این روابط که برای L_T ی تا 10% طول خیس شده متوسط، زوایای $arphi_T$ و x_5 صفر (تا به ترتيب 15 و 10 درجه و اعداد فرود عرضي 2 تا 7 اعتبار سنجي شدهاند در اینجا با تقریب برای اعداد فرود پایین تر نیز به کار رفتهاند.

2-5- الگوريتم حل مدل ديناميكي در حوزه زمان

با داشتن نیروها و ممانهای به دست آمده از بخش های قبل می توان معادلات حرکت جسم صلب برای بدنه را با یک رویکرد شبه پایا در حوزه زمان حل کرده و از روی قانون دوم نیوتن در سه درجه آزادی مورد مطالعه شتاب، سرعت و جابجاییها را به دست آورد. شبهیایا بدین معنی که در هرگام زمانی وضعیت بدنه را پایا و سرعت پیشروی آن را ثابت در نظر می گیریم تا بتوانیم از مدلهای مذکور نیروها را حساب کنیم. زیرا چنانچه ذکر شد کلیه مدلهای نیرویی در شرایط پایا بهدست آمدهاند. به عبارت دیگر اگرچه حرکات شناور وابسته به زمان بوده و به وسیله حل معادلات حرکت در حوزه زمان تعیین میشوند اما در هر گام زمانی کوچک وضعیت پایا است. به عنوان فرض مهم



در شکل7 برای نمونه منحنی گشتاور تحویلی Q_e به یک پروانه از طرف موتور و گیربکس بر حسب دور پروانه به همراه منحنیهای گشتاور مورد نیاز پروانه در سرعتهای مختلف شناور رسم شده است. چنانچه ذکر شد محل تقاطع این منحنیها با منحنی Q_e ، دور پروانه را در آن سرعت پیشروی به دست میدهد. چنین روشی برای پیدا کردن دور پروانه در طول شتابگیری شناور با فرض چشم پوشی از اثرات دینامیکی در سیستم رانش بوده است یعنی فرض شده است ممان اینرسی موجود در مجموعه سیستم رانش به اندازه کافی کوچک هست تا دور پروانه بلافاصله به مقدار شبه پایای به دست آمده از روش فوق برسد. نیروی وارد از طرف اب به سیستم درایو که در متون دریایی بیشتر با عنوان مقاومت ملحقات شناخته می شود از روش ارائه شده در مرجع [22] محاسبه شده است. در این مرجع روشی برای محاسبه نیروی افقی و قائم وارد از طرف آب به سیستم درایو مشابهی برحسب سرعت شناور و زاویه اعمال شده به درایو ارائه و نتایج توسط آزمایشهایی با مقیاس کامل صحه گذاری شده است. در این روش درگ پوستهای برای قسمتهای مختلف درایو به طور $(\varphi_P + x_5)$ برای قسمت برجسته پشت پروانه با توجه به زاویه لحظهای آن

مجزا حساب شده و با هم جمع می شوند. درگ فشاری و نیروی لیفت تنها

1- Thrust Identity

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

www.SID.ir

 $0 = f_{5Hydro}(u, x_3, x_5) + f_{5Aero}(u, x_3, x_5) + f_{5P}(u, x_3, x_5, \varphi_P)$ $+ f_{5T}(u, x_3, x_5, \varphi_T)$ $= \bar{f}_5(u, x_3, x_5, \varphi_P, \varphi_T)$ (33)

تعاریف انجام شده برای توابع $(x_3, y_7, \varphi_P, \varphi_T)$ بعداً مورد استفاده قرار می گیرند. باید توجه داشت که در روابط فوق $\varphi = \varphi$ پارامترهای کنترلی ما می باشند که در هر گام زمانی از روی قانون کنترلی تعیین می شوند. بنابراین می توان آنها را در هر گام زمانی، معلوم در نظر گرفت. در گام زمانی نخست حل مسئله با یک مقدار اولیه برای u آغاز می شود. با نوشتن ترم مشتق در معادله (31) به صورت تفاضل محدود به معادله (34) می رسیم.¹u و¹⁺¹ به ترتیب سرعت شناور در ابتدا و انتهای گام زمانی i می باشند.¹u از شرط اولیه یا گام زمانی قبل معلوم است. حال اگر در معادلات (32) و (33) برای سرعت و جابجایی ها¹⁺¹ u^{i+1} و¹⁺¹ x_3 ⁱ⁺¹ u^{i+1} سه معادله غیرخطی برای این متغیرها به دست می آید که می توان آن را از روشی معادله غیرخطی برای این متغیرها به دست می آید که می توان آن را از روشی مثل نیوتن حل کرد. رویه فوق در گام های زمانی بعد تکرار می شود.

 $u^{i+1} - u^{i} = \Delta t / (m + a_{11}) [f_{1Hydro}(u^{i+1}, x_{3}^{i+1}, x_{5}^{i+1})$ $+ f_{1Aero}(u^{i+1}, x_{3}^{i+1}, x_{5}^{i+1})$ $+ f_{1P}(u^{i+1}, x_{3}^{i+1}, x_{5}^{i+1}, \varphi_{P})$ $+ f_{1T}(u^{i+1}, x_{3}^{i+1}, x_{5}^{i+1}, \varphi_{T})]$ (34)

2-6- مقایسه نتایج مدل با داده های تجربی

در این قسمت برای اینکه هم مدل هیدرودینامیکی و آیرودینامیکی مورد ارزیابی قرار گیرند از اندازه گیری های وارد و همکاران [24] بر روی یک کاتاماران مسابقهای در ابعاد واقعی با مشخصات ارائه شده در جدول 1 استفاده شده است. در این مرجع نتایج اندازه گیریها بر روی وضعیت حرکتی در آب آرام و سه سرعت ثابت ارائه شده است. در جدول 2 مقایسهای میان نتایج حاصل از مدل حاضر و نتایج این مرجع با همان نیرهای وارد از طرف سیستم رانش صورت گرفته است. چنانچه ملاحظه می شود اگر چه به طور كلى همخوانى بين نتايج وجود دارد اما در برخى حالتها اختلاف نتايج قابل توجه است که با توجه به استفاده از مدلهای ساده شده و در نظر نگرفتن جزئیات هندسه واقعی شناور در این محاسبات، دور از انتظار نیست. البته شیوه اندازه گیری و خطاهای مربوطه را نیز به خصوص اینکه در محیط آزمایشگاه انجام نگرفته نباید از نظر دور داشت. در خود مرجع [24] نیز به مشکل بودن اندازه گیری زاویه تریم و طول خیس شده و تغییرات زیاد در طول خیس شده در اثر تغییرات کوچک در زاویه تریم اشاره شده است. به هر حال این دادهها جزء معدود دادههای تجربی قابل دسترس و استفاده برای این کاتامارانها میباشند و در صورت وجود دادههای تجربی بیشتر ارزیابی دقیق-ترى مىتوان انجام داد.

3 - مسئله کنترل بهینه و رویه حل آن

با توجه به توضیحات ارائه شده در مقدمه مقاله در واقع مسئله ما یک مسئله کنترل بهینه است. در این شاخه از علم کنترل، هدف، کنترل یک یا چند متغیر کنترلی در یک مدل دینامیکی از یک وضعیت یا حالت اولیه تا رسیدن به حالت نهایی است به نحوی که ضمن ارضاء بعضی قیود فیزیکی، یک شاخص یا تابع هزینه مینیمم شود. حالت مدل دینامیکی توسط متغیرهای حالت که در اینجا (1) $x_3(t) = (t)_2 x$ هستند مشخص می شود. بنابراین مرتبه مدل یا تعداد متغیرهای حالت در اینجا 3 است. ما این متغیرها را به صورت یکجا با بردار حالت $T[(t)_2 x_3(t) x_3(t)] = (t) X$ نشان می دهیم. در این بخش بالانویس T علامت ترانهاده است. قیدها ممکن است بر روی متغیر-های حالت یا متغیرهای کنترلی اعمال شوند. لازم نیست حالت شناور در نقطه ابتدایی و انتهایی یا همان شرایط مرزی مدل دینامیکی به صورت کامل مشخص شوند.

مطالعه	جدول 1 مشخصات كاتاماران مسابقه اي مورد
2×0/96 m	عرض آبخور موثر در پاشنه
10/36 m	طول کل
2/29 m	LCG
0/85 m	VCG
5361/6 kg	جرم کل
13درجه	زاویه ددرایز بیرونی
0/419 m	قطر پروانه
7/77 m	طول سازه فوقانی باله ای شکل
2/27 m	عرض سازه فوقانی باله ای شکل
0/32 m	فاصله لبه پشتی باله تا خط کیل در پاشنه
5 درجه	زاویه حمله سازه باله نسبت به خط کیل بدنه ها

یج مدل حاضر یا دادہ ھای تجربے مرجع [24]	حدول 2 مقابسه نتار
---	--------------------

<i>d</i> ₀(m)	<i>L_K</i> (m)	زاويه تريم (درجه)	مرجع	سرعت (نات)
0/14	2/5	4/1	مطالعه حاضر	61
0/1	3/41	3/7	مرجع[24]	01
0/17	2/2	3/9	مطالعه حاضر	60
0/15	2/13	4/6	مرجع[24]	09
0/19	1/7	4/2	مطالعه حاضر	70
0/2	1/37	5/1	_{مرجع} [24]	70

مثلاً در مسئله ما حالت اولیه از روی زاویه تریم و آبخور شناور در یک سرعت اولیه تعیین میشود و برای نقطه نهایی تنها قید بر روی سرعت شناور است که باید به مقدار ماکزیمم معلوم برسد و متغیرهای x_3 و x_5 در این نقطه آزاد هستند. در اینجا متغیرهای کنترلی $(t) \varphi_P (t) \varphi_P$ میباشند که به صورت یکجا با بردار $U(t) = [\varphi_P(t) \varphi_T(t)]^{\eta}$ میباشند که به مورت مربوط به محدوده تغییرات این متغیرهای کنترلی با توجه به مکانیزمهای مربوطه $(\varphi_{T,\min} \leq \varphi_T(t) \leq \varphi_{T,\max}, \varphi_{P,\min} \leq \varphi_P(t))$ است. مربوطه $(\varphi_{T,\min} \leq \varphi_T(t) \leq \varphi_{T,\max}, \varphi_{P,\min} \leq \varphi_P(t))$ است. تابع هزینه یا شاخص کارایی I^1 در حالت کلی به شکل زیر در نظر گرفته میشود:

(35)

 $PI = S(X(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} V(X(t), U(t), t) dt$

در این رابطه ترم اول تابع هزینه نهایی و ترم دوم ترم انتگرالی نامیده می شود. هدف ما مینیمم کردن زمان از یک حالت اولیه برای شناور پلنینگ تا رسیدن آن به حالت نهایی است. در مسائل کنترلی زمان بهینه مانند این، معمولاً توابع کرا صفر وVرا ثابت و برابر 1 در نظر می گیرند (همچون مورد ما). اگر چه بعضاً تابع *S* را برابر **با** وVرا برابر صفر گرفته اند [25].

در بخش های قبلی مقاله مدل دینامیکی غیرخطی یا پلنت² این مسئله -که در نهایت منجر به دستگاه معادلات (31) تا (33) شد- به روشنی توصیف شد. نهایتاً میتوان آن را به صورت رابطه زیر بیان کرد. $[\dot{u}(t) \mathbf{0} \mathbf{0}]^{\mathrm{T}} = f(X(t), U(t), t)$ $= \frac{1}{(m + a_{11})} \begin{bmatrix} \bar{f}_1(u, x_3, x_5, \varphi_P, \varphi_T) \\ \bar{f}_3(u, x_3, x_5, \varphi_P, \varphi_T) \\ \bar{f}_5(u, x_3, x_5, \varphi_P, \varphi_T) \end{bmatrix}$ $= \begin{bmatrix} f_1(u, x_3, x_5, \varphi_P, \varphi_T) \\ f_3(u, x_3, x_5, \varphi_P, \varphi_T) \\ f_5(u, x_3, x_5, \varphi_P, \varphi_T) \end{bmatrix}$ (36) relevance in the second se

Performance Index
 Plant

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

www.SID.ir

زمان نیست اما ممکن است در شرایط دیگری، زمان، مستقیماً در معادلات ظاهر شود. مثلاً اگر مسئله کنترل بهینه در موج هارمونیک حل شود نیروهای وارد از سیال مستقیماً تابعی از زمان خواهند بود. t به این دلیل جزو آر گومانهای تابع f آورده شده است. نهایتا، مسئله را می توان به صورت رابطه زیر بیان کرد:

يافتن مينيمم :
$$PI = \int_{t_0}^{t_f} dt = t_f - t_0$$

 $[u(t) \ 0 \ 0]^T = f(X(t), U(t), t)$
 $X_0 (t_0) = [u_0 x_{03} x_{05}]^T$
 $X_f (t_f) = [u_f x_{3f} x_{5f}]^T$
 $X_f (t_f) = [u_f x_{3f} x_{5f}]^T$
 $\vdots x_{3f}, x_{5f}, t_f$
 $\varphi_{P,\min} \le \varphi_P(t) \le \varphi_{P,\max}, \varphi_{T,\min} \le \varphi_T(t) \le \varphi_{T,\max}$ (37)
 $ar, g = 0$

حل مسئله از t_0 تا t_f تعیین شوند. در صورتی که کنترل تنها روی یکی از متغیرهای $arphi_P$ یا $arphi_T$ انجام گیرد متغیر دیگر با یک عبارت تساوی قید می-خور د.

3-1- الگوريتم حل مسئله كنترل بهينه زمان

برای حل مسئله فوق روشهای متنوعی در کنترل بهینه توسعه یافته است. از آن جمله روشهای غیرمستقیم¹ می باشند که بر مبنای حساب تغییرات² و فرمولاسيون لاگرانژين³ يا هميلتونين⁴ دستگاه معادلات ديفرانسيلي شامل معادلات حالت و هم حالت⁵ در آنها تشکیل داده و مسئله کنترل بهینه را به حل این دستگاه معادله دیفرانسیل در قالب یک مسئله مقدار مرزی تبدیل میکنند. معادلات همحالت برای پیدا کردن متغیرهای همحالت که در نقش ضرایب لاگرانژ هستند اضافه می شوند. در روش های مستقیم با نحوی گسستهسازی و تخمین سیگنال کنترلی یا حالت سیستم در مسیر بهینه به صورت پارامتریزه شده (با یک سری پارامتر محدود)، مسئله کنترلی به حل یک مسئله بهینهسازی غیرخطی تبدیل میشود. در اینجا از روشی غيرمستقيم طبق مرجع [26] استفاده شده است. اين روش ضمن ارائه يک قانون کنترلی بهینه (U*(t) چنانچه ذکر شد منجر به یک مسئله مقدار مرزی دو نقطهای خواهد شد. دستگاه معادلات حاصل در کل شامل N (تعداد متغیرهای حالت) معادله مربوط به مدل دینامیکی و N معادله مربوط به متغیرهای همحالت خواهد بود. در اینجا با توجه به زیاد نبودن تعداد متغیرهایی که باید شرایط مرزی را ارضا کنند از روشی ساده برای حل مسئله مقدار مرزی استفاده شده است.

3-2- حل مسئله كنترل بهينه از روش حساب تغييرات

دستورالعمل زير بر قاعده مينيمم پونترايگن⁶ و معادله اويلر -لاگرانژ در حساب تغییرات استوار است که شرط لازم برای جواب مسائل کنترل بهینه را در اختیار ما قرار داده و رویهای برای حل این مسائل و یافتن مقادیر بهینه متغیرهای برداری، *U****(t)**، *U****(t)** و *X**(t) ارائه می کنند. ما در اینجا این رویه را برای استخراج معادلات مربوط به مسئله خود به کار می گیریم. با مدل دینامیکی و قیود فیزیکی مطرح شده متغیرهای حالت، همحالت و کنترلی در واقع توابعی از زمانند اما دراینجا برای اختصار این وابستگی نشان داده نمىشود.

$$L(X, U, \lambda, t) = \mathbf{1} + \lambda^{\mathrm{T}}(f(X, U, t) - [\dot{u} \mathbf{0} \mathbf{0}])$$

$$= \mathbf{1} - \lambda_{1}\dot{u} + \sum_{i=1,3,5} \lambda_{i} f_{i}(u, x_{3}, x_{5}, \varphi_{P}, \varphi_{T}) \quad (38)$$

$$H(X, U, \lambda, t) = L(X, U, t) + \lambda^{\mathrm{T}}\dot{X}$$

= 1 +
$$\sum_{i=1,3,5} \lambda_i f_i (u, x_3, x_5, \varphi_P, \varphi_T)$$
 (39)

هستند. $\lambda = [\lambda_1 \lambda_3 \lambda_5]$ ها مولفه های بردار هم حالت به صورت $\lambda_1 \lambda_3 \lambda_5$

ا بر حسب $X^*(t)$ به نحوی که تابع همیلتونین فوق با $U^*(t)$ یافتن $U^*(t)$ با $U^*(t)$ لحاظ قیود فیزیکی مسئله، مینیمم شود به عبارت دیگر همیلتونین را تنها تابعی از Uگرفته و به جای X و λ به ترتیب X^* و λ قرار میدهیم سپس مقدار U^* مینیمم کننده همیلتونین را با لحاظ قیود فیزیکی مسئله حساب مي كنيم. در واقع مقدار اين تابع به ازاي * U از تمام مقادير ممكن به ازاي ساير U ها در محدوده قابل قبول برای آنها کوچکتر است. یا :

$$H(X^{*}(t), U^{*}(t), \lambda^{*}(t), t) \leq H(X^{*}(t), U(t), \lambda^{*}(t), t)$$

$$\rightarrow \sum_{i=1,3,5} \lambda_{i}^{*} f_{i}(u^{*}, x_{3}^{*}, x_{5}^{*}, \varphi_{P}^{*}, \varphi_{T}^{*}) \leq \sum_{i=1,3,5} \lambda_{i}^{*} f_{i}(u^{*}, x_{3}^{*}, x_{5}^{*}, \varphi_{P}, \varphi_{T})$$
(40)

این همان قاعده مینیمم پونترایگن است که قانون کنترلی بهینه را در اختیار ما قرار میدهد. ممکن است مقدار مینیمم فوق در هر لحظه در مقادیر مرزی تعیین شده در قید فیزیکی برای (U(t) اتفاق بیفتد. به خصوص زمانی که همیلتونین تابعی خطی از متغیر کنترلی (U(t) باشد مقدار بهینه متغیر کنترلی (*U**(*t*) تنها در حد بالا و پایین مشخص شده در قید فیزیکی برای آن اتفاق می افتد و ما به اصطلاح یک کنترل بنگ - بنگ⁷ داریم که متغیر کنترلی روی مقدار ماکزیمم و مینیمم تعیین شده سوئیچ می شود. 3- حل معادلات حالت و هم حالت که از روابط زیر به دست می آیند:

$$(\partial L/\partial \lambda)_* - \frac{d}{dt} (\partial L/\partial \dot{\lambda})_* = 0$$

$$(41)$$

$$(\partial L/\partial X)_* - \frac{d}{dt} (\partial L/\partial \dot{X})_* = 0$$

$$(42)$$

$$(42)$$

$$(42)$$

$$f_1(u^*, x_3^*, x_5^*, \varphi_P^*, \varphi_T^*) - \dot{u}^* = \mathbf{0}$$

$$f_3(u^*, x_3^*, x_5^*, \varphi_P^*, \varphi_T^*) = \mathbf{0}$$

$$f_{5}(u^{*}, x_{3}^{*}, x_{5}^{*}, \varphi_{P}^{*}, \varphi_{T}^{*}) = \mathbf{0}$$

$$\sum_{i=1,3,5} \lambda_i^* f_{iu}(u^*, x_3^*, x_5^*, \varphi_P^*, \varphi_T^*) + \dot{\lambda}_1^* = \mathbf{0}$$
(46)
$$\sum_{i=1,3,5} \lambda_i^* f_{ix_3}(u^*, x_3^*, x_5^*, \varphi_P^*, \varphi_T^*) = \mathbf{0}$$
(47)
$$\sum_{i=1,3,5} \lambda_i^* f_{ix_5}(u^*, x_3^*, x_5^*, \varphi_P^*, \varphi_T^*) = \mathbf{0}$$
(48)

و شرط اوليه زير:

(43)

(44)

(45)

$$[u^* x_3^* x_5^*]^T]_{t_0} = [u_0 x_{03} x_{05}]^T, [\varphi_P^* \varphi_T^*]^T]_{t_0} = [\varphi_{P0} \varphi_{T0}]^T$$
(49)
(49)

7- Bang-Bang

i=1,3,5

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

- 1- Indirect Methods
- 2- Variational Calculus
- 3- Lagrangian
- 4- Hamiltonian
- 5- Costate
- 6- Pontryagin Minimum Principle

270

در روابط بعدی مشتقات پارهای نسبت به $x_3 e_x e_x e_x$ هستند. این مشتقات به صورت عددی حساب می شوند. از مجموع معادلات حالت و هم حالت (43) تا (48) دو معادله (43) و (46)، معادله دیفرانسیل مرتبه اول برای متغیرهای u^* و $_1^* k$ و بقیه معادله جبری غیرخطی هستند. مجموعه این معادلات به همراه شروط مرزی (49) و (50) یک مسئله مقدار مرزی را تعریف می کنند اما مسئله اساسی وجود $\phi_p^* e_x^* q_x$ مجهول در این معادلات است. با توجه به توصیف توابع i در بخش تهیه مدل دینامیکی نمی توان $\phi_p^* e_x^*$ ارضاء کننده شرط (40) را به طور صریح بر حسب $u^* x_3$, z_3 , $i h_3$, $k e_3$, به دست آورد لذا معادلات حالت و هم حالت باید به صورت همزمان با شرط (40) با یک رویه معادلات حالت و هم حالت باین رویه عددی اشاره می شود.

برای حل مسئله مقدار مرزی فوق از روش پرتاب یگانه ¹ استفاده شده است. به این ترتیب که مسئله با شرط مرزی (49) درنقطه ابتدایی و یک حدس اولیه برای λ_1^* در ابتدای گام زمانی اول شروع می شود. سپس λ_1^* و λ_1^* از حل دستگاه معادلات (47) و (48) که بر حسب این متغیرها خطی است $arphi_P^*$ محاسبه می شوند. این مقادیر λ_i^* با توجه به رابطه (40) برای محاسبه - الحاظ قيود فيزيكي مينيمم ϕ_T^* ى كه هميلتونين را در اين گام زماني با لحاظ قيود فيزيكي مينيمم ϕ_T^* کنند به کار می روند. برای محاسبه مینیمم از الگوریتم مجموعه فعال² در نرم افزار متلب s استفاده شده است. مقادیر محاسبه شده برای φ_{P}^{*} و φ_{T}^{*} در این گام زمانی برای حل معادلات حالت و یافتن $x_{5}^{*} \cdot u_{5}^{*} \cdot x_{5}^{*}$ و x_{5}^{*} در انتهای این گام زمانی به کار میروند. در نهایت صورت گسسته شدهای از معادله (46) به همراه مقادیر به روز شده متغیرهای کنترلی و حالت به منظور یافتن λ_1^* برای گام زمانی بعد و تکرار رویه فوق در آن، مورد استفاده قرار می گیرد. مسئله تا رسیدن به سرعت ماکزیمم تعیین شده $(u^* = u_{\max})$ ادامه پیدا میکند. اگر در این نقطه شرط دیگر در معادله (50) با خطای قابل قبول ارضا نشد کل مسئله از اول با مقدار اولیه دیگری برای λ_1^* تکرار میشود تا در نهایت این شرط مرزی ارضاء شود. در این هنگام حل مسئله به اتمام رسیده و مقادیر محاسبه شده برای متغیرهای کنترلی و حالت بر حسب زمان مقادیر بهینه می باشند. در حدس اولیه برای تکرار جدید می توان از الگوریتم های پیدا کردن ریشه، برای همگرایی سریعتر استفاده کرد. گام زمانی مسئله 0/05 ثانیه در نظر گرفته شده و کاهش بیشتر آن تاثیر قابل توجهی در جوابها نداشته است.

3-3- حل مسئله کنترل بهینه برای یک شناور تک بدنه

در اینجا مسئله کنترل بهینه زمان را برای یک شناور پلنینگ تک بدنه که مشخصات بدنه منشوری آن طبق جدول 3 است حل می کنیم. برای سیستم رانش یک جفت مجموعه موتور و درایو پاشنهای با مشخصات عملکردیی مطابق شکل 5 در نظر گرفته شده است. نسبت تبدیل جعبه دنده داخل درایو φ_P می باشد. قطر پروانه و مشخصات تریمتب نیز در جدول 3 آمده است.

بدون تریم تب به همراه تغییرات مقاومت کل و زاویه تریم شناور در دو LCG و 2/1 و 2/2 متر تا رسیدن به سرعت 50kn نشان داده شدهاند. در مورد مقاومت باید به محور مختصات قائم در سمت راست نمودارها مراجعه کرد. چنانچه مشاهده میشود اقتضای مسئله زمان بهینه، نگه داشتن زاویه سیستم رانش در ابتدای حرکت شناور در مقدار ماکزیمم 5+ درجه و سپس کاهش تدریجی آن تا 2- درجه میباشد.

زمان لازم برای نگه داشتن زاویه سیستم رانش در مقدار ماکزیمم 5+ درجه بستگی به قله مقاومت و زاویه تریم دارد. قله مقاومت و زاویه تریم تقریباً همزمان اتفاق میافتند. با *LCG* بیشتر شناور قله را سریعتر رد کرده است لذا کاهش زاویه بهینه برای سیستم رانش زودتر آغاز شده است. از طرف دیگر افزایش *LCG* باعث کاهش مقاومت قله و زاویه تریم قله شده و شناور در مدت زمان کمتری به سرعت 50kn رسیده است. در 50k 217 و 32/8 متر شناور به ترتیب در 37/95 و 33/25 ثانیه به سرعت 50kn رسیده است.

φ_T و φ_P و متغیرہ روی متغیرهای φ_P و -3-3

در این قسمت شناور دارای سیستم رانشی با قابلیت کنترل زاویه تراست و همچنین المان کنترلی تریمتب بوده و کنترل همزمان روی هر دو زاویه مربوطه انجام شده است.



بین10- و 5 و $arphi_{T}$ بین 0 و 15 درجه قابل تغییرند.
مسئله در دو حالت کنترل تکمتغیره روی متغیر $arphi_P$ و یا دومتغیره بر روی
هر دو متغیر $arphi_P$ و $arphi_T$ حل شده است. در هر یک از حالتها دو 2 $arphi_T$ و
3/2 متر در نظر گرفته شده تا اثر توزیع وزن نیز مورد مطالعه قرار گیرد.
$arphi_P$ -3-1-نتایج کنترل تک متغیرہ روی متغیر $arphi_P$
در شکل 8 جواب مسئله برای تغییرات زاویه بهینه سیستم رانش در حالت

1- Single Shooting Method 2- Active set 3- MATLAB

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11

www.SID.ir

در شکل 9 جواب مسئله شامل تغییرات زمانی زاویه بهینه سیستم رانش و تریم تب به همراه زاویه تریم شناور و مقاومت کل آن در طول شتابگیری شناور تا رسیدن به سرعت 50kn در همان دو *LCG* نشان داده شده است. سعی شده است نمودارها با قالب، مقیاس و محدوده یکسانی با نمودارهای شکل 8 رسم شوند تا کار مقایسه راحت ر باشد. اضافه شدن تریم تب روند تغییرات بهینه زاویه نیروی رانش را تقریباً تغییر نداده است. در این شکل روند نزولی زاویه بهینه تریم تب اندکی بعد از زاویه نیروی رانش آغاز شده و تا 50kn درجه ادامه داشته است. با کنترل دومتغیره، زمان رسیدن به سرعت 50kn در *LCG* و 217 متر به ترتیب تا 2017 و 2018 ثانیه رسیده است.

E - 4 - d مسئله کنترل بهینه برای یک شناور کاتاماران مسابقه ای در این بخش شناور کاتاماران مسابقه ای مورد استفاده در مرجع [24] به عنوان مطالعه موردی برای حالت حضور لیفت آیرودینامیکی در نظر گرفته میشود و فاز شتابگیری آن با امکان کنترل بهینه زاویه تراست φ_{p} جهت مینیمم کردن زمان رسیدن تا 100 نات بررسی و قانون کنترلی بهینه برای این متغیر کنترلی به صورت 5° این متغیر کنترلی به صورت $5^{\circ} - 20$

بررسی معادلات نشان میدهد که مشتق نیروهای هیدرودینامیکی در دو نقطه جدا شدن سقف تونل از سطح آب و خشک شدن چاین در طول شتابگیری ناپیوسته است. در چنین مواردی طبق قاعده بهینگی¹ در کنترل بهینه [26] میتوان مسئله را به چند مسئله کوچکتر شکست و جواب بهینه را جدا جدا به دست آورد. جواب به دست آمده همان جواب مسئله اصلی خواهد بود. بدین ترتیب در اینجا حل مسئله را به سه بازه زیر تقسیم میکنیم:

1- از ابتدای شروع حرکت تا جدا شدن سقف تونل از سطح آب
 2- از لحظه جدا شدن سقف تونل از سطح آب تا خشک شدن چاین
 3- از لحظه خشک شدن چاین تا رسیدن به سرعت نهایی



در شکل10 نتیجه به دست آمده بدین ترتیب برای قانون کنترلی بهینه برای متغیر کنترلی φ_P به همراه تغییرات زاویه تریم و مقاومت شناور نشان داده شده است. در واقع اگر بخواهیم شناور در حداقل زمان ممکن به سرعت 110 $arphi_P^*$ نات برسد زاویه نیروی تراست باید طبق الگوی نشان داده شده برای تغییر یابد. سه بازه مذکور با خطوط قائم در شکل مشخص شدهاند. سقف تونل در ثانیه 3/3 از آب جدا شده و چاین خشک در ثانیه 6/15 اتفاق افتاده است. $arphi_{P}^{*}$ تا ثانیه 1/6 اندکی قبل از زاویه تریم مینیمم در حد ماکزیمم ثابت مانده سپس سیر نزولی سریعی داشته است. جواب بهینه برای متغیر کنترلی در مرز اول و دوم بازههای فوق به خاطر ناپیوستگی مشتقات در دو طرف پرشهایی داشته و هر بار روند نزولی آن کندتر شده است. φ_p^* در کل حدود 8 درجه کاهش می یابد. زاویه تریم روند تغییرات پیچیده تری را نسبت به شناورهای معمول طی کرده و در لحظه جدا شدن سقف تونل از آب و وقوع چاین خشک یک قله و قعر را تجربه کرده است. مقاومت کل که با محور قائم در سمت راست شکل نشان داده شده روندی کاملاً صعودی داشته است. نمودارها حاکی از رفتار متفاوت این شناورها نسبت به شناورهای پلنینگ تک ىدنە است.

در شکل 11 سرعت و شتاب رو به جلوی شناور به ترتیب با محور قائم سمت راست و چپ نشان داده شدهاند. شناور شتاب بالایی را (چند برابر شناور تک بدنه) در ابتدای حرکت تجربه و پس از یک قله به اندازه $7m/s^2$ همزمان با کاهش ϕ_p^* و افزایش سریعتر مقاومت روندی نزولی را طی کرده است. شتاب متوسط تا رسیدن به سرعت نهایی $4/05m/s^2$ بوده است.

در شکل 12 نیروی لیفت هیدرودینامیکی وآیرودینامیکی نسبت به وزن شناور نشان داده شدهاند. سهم لیفت هیدرودینامیکی در سرعت نهایی به 46% وزن و سهم لیفت آیرودینامیکی 45% وزن رسیده و سهم لیفت ناشی از سیستم رانش 9% وزن بوده است.









1- Principle of Optimality

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

272



4- نتيجه گيري

هدف این مطالعه ارائه قوانین کنترلی برای زوایای اعمال شده به سیستم رانش و المان کنترلی همچون تریمتب به منظور مینیمم کردن زمان لازم برای رسیدن به یک سرعت مشخص برای شناور پلنینگ بود. برای این منظور مدلی بر اساس ترکیبی از روش های تئوری و تجربی برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی و آیرودینامیکی وارد بر بدنه، سیستم رانش و المان کنترلی ارائه شد تا حرکات شناور در فاز شتابگیری مدل شود. سپس الگوریتم حل مسئله کنترل بهینه از روشی مبتنی بر قاعده مینیمم پونترایگن تشریح شد.

به عنوان مطالعه موردی، مسئله کنترلی فوق ابتدا برای یک شناور تک بدنه با سرعت نهایی 50 نات حل شد. برای این شناور کنترل در حالتهای تکمتغیره (زاویه نیروی تراست) و دو متغیره (زاویه نیروی تراست و زاویه تریم تب) و با دو *LCG* متفاوت انجام شد. جوابهای به دست آمده در مورد این شناور نشان داد زاویه بهینه سیستم رانش یا تریمتب تا زمانی که قیود فیزیکی تعریف شده اجازه میدهند روند مشابهی را با زاویه تریم شناور دنبال میکند. یعنی حدوداً زمانی که زاویه تریم ماکزیمم میشود زاویه اعمالی به سیستم رانش و تریم تب نیز باید ماکزیمم باشد. با توجه به وجود حد بالا برای زوایای کنترلی به دلیل قید فیزیکی، این زوایا باید در یک محدوده زمانی اطراف زاویه تریم ماکزیمم (معمولاً از نقطه شروع حرکت) در مقدار بیشینه مجاز ثابت بمانند. سپس با کاهش زاویه تریم در سرعتهای بالاتر این زوایای کنترلی نیز به تدریج کاهش یابند. آهنگ کاهش این زوایا و مقدار نهایی آنها بستگی به شرایط مسئله دارد.

جواب بهینه برای متغیرهای کنترلی در حالت کنترل تکمتغیره و دومتغیره برای زاویه نیروی رانش تفاوت چندانی نشان نداد. تاثیر LCG بر روی مشخصههای عملکردی شناور (مانند زاویه تریم و مقاومت قله) قابل توجه بود و در LCG بزرگتر زمان رسیدن شناور به سرعت ماکزیمم، کمتر بود.

در ادامه، مسئله کنترلی برای یک کاتاماران مسابقهای با لیفت

همخوانی دارد که برای شتابگیری سریعتر قبل از پلن کردن شناور زاویه سیستم رانش و تریمتب را در بیشترین مقدار ممکن قرار میدهند و با عبور از قله مقاومت و پلن کردن شناور به تدریج آن را کاهش میدهند [27].

5- فهرست علائم

A_i	ضريب تداخل هيدروديناميكي
<i>a</i> ₁₁	جرم افزوده در جهت حرکت شناور (kg)
B_T	عرض شناور در صفحه آبخور (m)
В	عرض شناور (m)
C_{L0}	ضریب لیفت هیدرودینامیکی در زاویه ددرایز صفر
$C_{L\beta}$	$oldsymbol{eta}$ ضریب لیفت هیدرودینامیکی در زاویه ددرایز
C_{v}	ضريب سرعت
C_x	ضریب درگ آیرودینامیکی تونل کاتاماران
$C_{xa,hull}$	ضریب درگ آیرودینامیکی بدنه کاتامارن
C_y	ضريب ليفت آيروديناميكي تونل كاتاماران
d_0	فاصله هوایی از سطح آب در انتهای تونل کاتاماران
$D_{\rm prop}$	قطر پروانه (m)
F_{iA}	برایند نیروهای وارد بر درایو (N)
F_{iAero}	برایند نیروهای آیرودینامیکی (N)
$F_{i\mathrm{Hydro}}$	برایند نیروهای هیدرودینامیکی (N)
F_{iP}	برایند نیروها از طرف سیستم رانش (N)
F_{iT}	برایند نیروها از طرف تریم تب (N)
F_V	نیروی ویسکوز هیدرودینامیکی(N)
g	شتاب گرانشی (m/s ²)
h_0	ارتفاع تونل کاتاماران در پاشنه (m)
h_v	بازوی گشتاور نیروی ویسکوز حول مرکز جرم (m)
h_s	ارتفاع سقف تونل كاتاماران از سطح آب (m)
Κο	ضریب گشتاور پروانه در حالت آب آزاد
Kτ	ضریب تراست پروانه در حالت آب آزاد
L_C	طول خیس شده چاین (m)
L_K	طول خیس شدہ کیل (m)
L_P	فاصله مرکز فشار هیدرو دینامیکی از پاشنه (m)
L_T	طول تریم تب (m)
L_s	عرض تونل کاتاماران (m)
L_x	طول تونل کاتاماران (m)
LCG	فاصله طولی مرکز جرم تا پاشنه (m)
LWL	طول خیس شده آبخور (m)
M_z	گشتاور پیچ آیرودینامیکی تونل حول مرکز جرم

دور پروانه در ثانیه (1/s)	Ν	آیرودینامیکی حل و سیگنال کنترلی بهینه برای متغیر کنترلی زاویه نیروی
تعداد پروانه	N_P	تراست به منظور رسیدن شناور به سرعت 110 نات در حداقل زمان ممکن
تعداد تریم تب	N_T	تعیین شد. این مسئله در بازه های سه گانه در طول شتابگیری شامل قبل
شاخص كارايي مسئله كنترل بهينه	PI	از جدا شدن سقف تونل از سطح آب، قبل از وقوع چاین خشک و قبل از
گشتاور موتور (Nm)	Q_e	رسیدن به سرعت نهایی حل شد و نتایج حاکی از متفاوت بودن روند تغییرات
نسبت مجموع عرض دو نیمبدنه به عرض کاتاماران	r_i	مشخصههای عملکردی مانند زاویه تریم و مقاومت نسبت به شناورهای
مقاومت هوا روی بدنه مونوهال (N)	$R_{\rm Air}$	پلنينگ معمول بود.
مقاومت ناشی از اسپری (N)	R_{JS}	روند اشاره شده برای تغییر بهینه زوایای اعمال شده به سیستم رانش و
سطح سقف تونل كاتاماران (m ²)	S_w	تریمتب برای شناورهای فوق با تجربه به دست آمده توسط هدایتگر شناورها

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

www.SID.ir

مدلسازی شتابگیری شناور پلنینگ در حوزه زمان و کنترل بهینه آن برای رسیدن به سرعت نهایی در حداقل زمان ممکن

- [6] S.H. Kim, H. Yamoto, An Experimental Study of the Longitudinal Motion Control of a Fully Submerged Hydrofoil Model in Following Seas, *OceanEngineering*, Vol. 31, pp. 523 -537, 2004.
- [7] S.H. Kim, H. Yamoto, On the Design of a Longitudinal Motion Control System of a Fully- Submerged Hydrofoil craft based on the Optimal Preview System, *Ocean Engineering*, Vol. 31, pp. 1637 -1657, 2004.
- [8] J. Bai, Y. Kim, Control of the vertical motion of a hydrofoil vessel, *Ships and Offshore Structures*, Vol. 5, No. 3, pp.189-198, 2010.
- [9] P.D.S. Clavounos, B. Thomas, T. Ulusoy, Optimal Ship Maneuvering and Seakeeping by Linear Quadratic Gaussian Regulatros, *26th Symposium on Naval Hydrodynamics Rome*, Italy, 2006.
- [10] G.S. Milandri , *Seakeeping Control of HYSUCATs*, Masters Thesis, University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa, 2006.
- [11] H. Salarieh, M.T. Ghorbani, Trajectory optimization for a high speed planing boat based on Gauss pseudospectral method, *2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA)*, pp.195-200, Shiraz, Iran, 2011.
- [12] H. Xi, J. Sun, Feedback stabilization of high-speed planing vessels by a controllable transom flap, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.31, No. 2, pp. 421-431, 2006.
- [13] M.H. Karimi, M.S. Seif, M.A. Abbaspoor, study on vertical motions of highspeed planing boats with automatically controlled stern interceptors in calm water and head waves, *Ships and Offshore Structures*, Vol. 10, No. 3, pp. 335-348, 2015.
- [14] O. M. Faltinsen, Hydrodynamics of high-speed marine vehicles, Cambridge University Press, New York, pp. 342-383, 2005.
- [15] P.R. Payne, Contribution to planing Theory, *Ocean Engineering*, Vol. 22, No. 7, pp. 699-729,1995.
- [16] C.Y. Liu, C.T. Wang, Interference effect of catamaran planing hulls, *Journal of Hydronautics*, Vol.13, No. 1, pp. 31-32, 1979.
- [17] T. Katayama, Y. Ikeda, Characteristics of hydrodynamic forces acting on rapidly accelerated planing craft from rest, *Proceedings of the Fourth International Conference on Hydrodynamics*, Vol. 1, pp. 235-240, Yokohama, Japan, 2000.
- [18] M. Collu , Dynamics of marine vehicles with aerodynamic surfaces, PhD Thesis, Cranfield University, 2008.
- [19] K.V. Rozhdestvensky, *Aerodynamics of a lifting system in extreme ground effect*, Springer Science & Business Media, pp. 95-112, 2000.
- [20] D. L. Blount, D. L. Fox, Small-craft power prediction, *Marine Technology*, Vol. 13, No. 1, pp. 14-45, 1976.
- [21] ITTC (International Towing Tank Conference), Recommended Procedures and Guidelines, *1978 ITTC Performance Prediction Method*, Report No.7.5- 02-03- 01.4, 2011.
- [22] J.O. Scherer, S. K. R. Patil, Hydrodynamics of Surface-Piercing Outboard and Sterndrive Propulsion Systems, *11th International Conference on Fast Sea Transportation FAST 2011*, Honolulu, Hawaii, USA, 2011.
- [23] P. W. Brown, An experimental and theoretical study of planing surfaces with trim flaps, *Davidson Laboratory Letter Report* 1463, 1971.
- [24] T.M. Ward, H.F. Goelzer, P.M. Cook, Design and performance of the ram wing planing craft KUDU II, *AIAA/SNAME Advanced Marine Vehicles Conference*,San Diego,California,USA, 1978.
- [25] D. G. Stechert, On the use of the calculus of variations in trajectory optimization problems, *united states air force project RAND*,RM-3793-PR,1963.
- [26] D. S. Naidu, Optimal control systems, CRC Press, pp. 249-288, 2003.
- [27] W. Steptoe, Trim your boat, *Club Marine magazine*, Vol. 19, No. 2, pp. 51-60, 2004.

سطح بدنه کاتاماران در معرض هوا در جهت x (m²) $S_{xa,hull}$ ضريب كسر تراست t_P تراست یروانه (N) T_P سرعت پایای شناور در مدل آیرودینامیکی (m/s) U_s سرعت پیشروی شناور (m/s) и سرعت پایای جریان در مدل آیرودینامیکی (m/s) u_s بردار متغيرهای کنترلی U ارتفاع مركز جرم از خط كيل (m) VCG ارتفاع مركز جرم شناور از سطح آب (m) x_3 زاویه تریم لحظهای (rad) x_5 بردار حالت Χ پارامتر مورد نیاز برای محاسبه طول خیس چاین $z_{\rm max}/V_t$ علائم يوناني زاویه سقف تونل کاتاماران نسبت به خط کیل (deg) α زاویه ددرایز (deg) β بازده آب باز يروانه η بازده مكانيكي براي درايو η_E بازده چرخشی پروانه η_R نسبت طول خيس شده متوسط λ_m ضرايب همحالت λ_i بردار هم حالت λ چگالی آب (kg/m³) ρ چگالی هوا (kg/m³) ρ_a نسبت عرض تريم تب به عرض صفحه پلنينگ σ زاویه کنترلی درایو (deg) φ_P زاویه کنترلی تریم تب (deg) φ_T

ضریب کسر ویک متوسط 👜

بالانويسها

* مقدار بهینه کمیت

6- مراجع

- D. Savitsky, P. W. Brown, Procedures for hydrodynamic evaluation of planing hulls in smooth and rough water, *Marine Technology*, Vol.13, No. 4, pp. 381-400,1976.
- [2] D. Savitsky, Hydrodynamic design of planing hulls, *Marine Technology*, Vol.1, No. 1, pp.71-95, 1964.
- [3] D. Savitsky, M. F. Delorme, and R. Datla, Inclusion of whisker spray drag in performance prediction method for high-speed planing hulls, *Marine Technology*, Vol. 44, No. 1,, pp. 35-56, 2007.
- [4] T.I. Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley & Sons Ltd, ISBN 0-471-94113-1, 1994.
- [5] T.I. Fossen, Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control.

John Wiley & Sons, 2011.

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11