طراحی کنترل کننده غیرخطی مد لغزشی و H_∞ غیرخطی برای پایدارسازی حرکات چرخشی رول شناور در حال سکون مجهز به عملگر ژایرو

حامد حقیقی[1*]، محمدرضا جاهد مطلق[2]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲- دانشیار، دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

برای پایدارسازی شناور در سرعت‌های بسیار پایین یا در حال سکون از دو عملگر مخازن فعال و ژایروهای پایدارساز استفاده می‌شود. اما با توجه به محدودیت فرکانس‌های کاری مخازن فعال، استفاده از ژایروها پیشنهاد می‌گردد. با توجه به اهمیت اثرات غیرخطی مانند چسبندگی و نیروهای هیدرودینامیکی، در این مقاله مدلی غیرخطی توأم با عملگر ژایرو استفاده شده است. با توجه به خصوصیات امواج واقعی دریا، اغتشاش حاصل از امواج به صورت عدم قطعیت غیر پارامتری می‌باشد. لذا از کنترل کننده غیرخطی مد لغزشی برای رسیدن به یک سیستم مقاوم در برابر اغتشاش امواج استفاده شده است. همچنین کنترل کننده H_∞ غیرخطی برای محدودسازی هرچه بیشتر اثر اغتشاش بر ورودی طراحی شده است. کنترل کننده مد لغزشی انرژی کنترلی بیشتری مصرف می‌کند در عوض عملکرد میراکنندگی آن بیشتر است. کنترل کننده H_∞ غیرخطی انرژی کنترلی پایین‌تری مصرف می‌کند و در عوض عملکرد میراکنندگی آن نسبت به حالت قبل کمتر است. ایده اصلی مدل استفاده شده در این مقاله از مرجعی گرفته شده است که در آن تخمین داده‌های مربوط به مدل از روی یک شناور واقعی با عملگر ژایروی موسوم به هالکون انجام شده است. با اعمال کنترل کننده‌های غیرخطی طراحی شده، عملکرد میراکنندگی در گستره وسیعی از شرایط دریایی افزایش یافته است. علاوه بر این در مقاله حاضر اثرات غیرخطی در مدل لحاظ شده است. شبیه‌سازی‌های نهایی بر مبنای تحلیل-های طیف موج، کارایی کنترل کننده‌ها را برای سیستمی مقاوم با پایداری مجانبی در مقابل امواج دریا نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: کنترل کننده مد لغزشی، کنترل کننده H_∞ غیرخطی، رول شناور، ژایرو، پایدارسازی

Nonlinear Sliding Mode Controller and Nonlinear H infinity Controller Design for Roll Stabilisation of Ship with Gyro

H. Haghighi[1], M. R. Jahed-Motlagh[2]

1-Graduated Master of Science student, Electrical Engineering Department, Iran University of Science and Technology
2-Associate Professor, Electrical Engineering Department, Iran University of Science and Technology

Abstract

For stabilization of zero speed ships active anti roll tanks and gyro stabilizers are used. Because of anti roll tank limitations on working frequencies gyro stabilizers are proposed. A nonlinear model for ship is used to simulate hydrodynamic forces. Wave's disturbances are

* نویسنده مسئول مقاله: hd_haghighi@elec.iust.ac.ir

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.4.5]

considered as non-parametric uncertainty. A sliding mode controller is used for roll stabilizing. A nonlinear h infinity controller is designed to reduce the disturbance effects on the ship. The designed sliding mode controller uses more control energy from h infinity controller. Instead roll reduction of the sliding mode controller is grater from the other one. The main concept of the used model in this article was taken from an authority that ship model data estimated from real ship with Halcyon gyro actuator. Roll reduction increases by applying designed controllers in wide range of sea states. In addition nonlinear effects intended in this article. Simulation results based on Jonswap wave spectrum demonstrates the performance of robust system in confrontation with wave perturbations.
Keywords: Sliding mode controller, Nonlinear H infinity controller, Ship roll, Gyro, Stabilisation

۱- مقدمه

کنترل چرخش‌های دریایی به دلیل کاربردهای آن مانند مسافرت، حمل و نقل کالا، نقشه برداری دریایی، بازدید از سیستم‌های کابل‌کشی زیر دریا، تاسیس ایستگاه‌های استخراج نفت، استفاده از تجهیزات خاصی مانند ردیاب‌های ماهواره و موشک، تجهیزات عکس برداری و بسیاری کاربردهای دیگر به یک زمینه فعال طی دو دهه اخیر تبدیل شده است[۱].

کاهش چرخش‌های حول محور رول در شناورها یکی از مباحث بسیار مهم محسوب می‌شود، چرا که شتاب محوری باعث ایجاد وقفه در کار خدمه می‌گردد. این امر باعث افزایش مدت زمان لازم برای انجام یک مأموریت یا عملیات گشته و در بعضی موارد ممکن است موجب توقف کامل عملیات شود. وجود این مسئله در کشتی‌های نظامی غیر قابل قبول خواهد بود. شتاب قائم ناشی از حرکت رول باعث می‌شود که شناور بالا و پایین رفته و در نتیجه باعث دریازدگی خدمه و مسافران شود که نتیجه آن ناراحتی خواهد بود. ضمن اینکه این حرکات ممکن است موجب آسیب دیدن محموله‌هایی مانند میوه شود. حرکات رول با زوایای بزرگ، کارکرد تجهیزات نصب شده بر روی شناور را محدود می‌سازد. این مشکل برای بهبود عملکرد شناورهای نظامی از قبیل کارکرد سلاح روی شناور، عملیات اجرای حمله، جمع آوری یگان و ردیابی بسیار مهم است.

به طور کلی مطالعه دینامیک شناور را می‌توان در دو دسته طبقه‌بندی نمود:

۱ - مد مانور، که به بررسی حرکت کشتی در غیاب اثر امواج (آب‌های آرام) می‌پردازد. تغییرات جهت حرکت، توقف و ... از مسائل مورد بررسی این مد می‌باشند.

۲ - مد دریامانی، که حرکت چرخشی کشتی را در اثر نیروهای ناشی از امواج دریایی در سرعت ثابت بررسی می‌کند.

عملگرهای مورد استفاده در مد دریامانی به دو دسته تجهیزات خارجی و داخلی تقسیم می‌شوند. تجهیزات خارجی، گشتاورها و نیروهای کنترل حرکتی را در قسمت بیرون شناور طوری ایجاد می‌کنند که با برهم-کنش‌های هیدرودینامیکی مقابله نمایند. باله‌های ثابت کف ناو، باله‌های کناری فعال و باله‌های عقبی نمونه-هایی از این تجهیزات خارجی هستند. در حالی که نیروها و گشتاورهای تولیدی توسط تجهیزات داخلی به طور کلی در قسمت داخلی بدنه شناور ایفای نقش می-کنند. اساس کار اغلب سیستم‌های داخلی جابه‌جایی وزن برای تولید نیروهای پایدارساز می‌باشد. مخازن مایع فعال، ژایروهای پایدارساز نیز نمونه‌هایی از این سیستم‌ها هستند[۲].

بنابراین برای پایدارسازی شناور در مقابله با امواج دو حالت متصور است:

الف- شناور با توجه به کاربرد آن بیشتر در حال حرکت است و مطلوب مسئله، کاهش چرخش‌های نامطلوب آن در سرعت غیر صفر است. شناورهای نفت کش، باربر، ناوهای جنگنده و یا کشتی‌های مسافرتی نمونه‌ای از این شناورها هستند. عملگرهایی که برای این نوع شناورها استفاده می‌شوند، به عملگرهای خارجی معروفند، مانند باله‌های فعال کناری و عقبی.

ب- شناورهایی که پایدارسازی آن‌ها در سرعت‌های بسیار پایین و در حال سکون مد نظر است. شناورهای تفریحی، کشتی‌های صید، شناورهای تصویربردار از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.4.5]

عمق دریا، شناورهای شناسایی، ناوهای هواپیمابر و کشتی‌های ردیاب پرتاب موشک و ماهواره که ناسا نیز نمونه‌ای از آن‌ها را مورد استفاده قرار داده است[۳]، در این گروه قرار می‌گیرند.

برای حالت الف روش‌های مختلفی در منابع به کار گرفته شده است. در [۴] از دو عملگر باله‌های فعال و باله عقبی به صورت همزمان استفاده شده و با تعریف سه تابع تبدیل خطی برای حالت‌های مختلف، مقایسه ای بین روش تناسبی انتگرالی مشتقی و کنترل مد لغزشی انجام گرفته است. در [۵] با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامتری از کنترل کننده ساختار متغیر به همراه عملگر باله‌های فعال کناری استفاده شده که این کنترل کننده برای رسیدن به یک سیستم مقاوم در برابر امواج به کار رفته است. [۶] با روش جدول بندی بهره -که یکی از روش‌های کنترل تطبیقی می‌باشد- شناوری را که عملگر آن متشکل از باله‌های کناری یا عقبی است بررسی نموده و [۷] ضمن پیاده سازی روش فوق، مقایسه‌ای نیز با روش H_∞ خطی انجام داده است. در [۸] از روش کنترل کننده پیش‌بین برای عملگرهای باله‌های کناری استفاده شده است. [۹] پایدارسازی را با استفاده از روش هوشمند شبکه‌های عصبی برای یک مدل غیرخطی ارائه داده است. در نهایت [۱۰] مروری بر روش‌های پایدارسازی به کمک باله‌های فعال کناری دارد.

در مورد حالت ب که پایدارسازی در حالت سکون انجام می‌گیرد از دو عملگر مخازن فعال و ژایروهای پایدارساز استفاده می‌شود. در [۱۱] روش‌های بهبود پایدارسازی به کمک مخازن فعال مورد بحث قرار گرفته است. [۱۲] از ترکیب روش‌های تطبیقی و عصبی برای پایدارسازی با استفاده از مخازن فعال بهره گرفته است. [۱۳] روی مدل‌سازی غیرخطی با استفاده از مخازن فعال تمرکز ویژه ای نموده است. اما اشکال عمده استفاده از مخازن فعال، محدود بودن فرکانس‌های کاری و شرایط دریایی است. کارهای مختلفی از چند دهه گذشته روی پایدارسازی با استفاده از ژایروها انجام شده است ولی عمدتاً ژایروهای قدیمی با توجه به حجم و وزن بالا، کمتر مورد توجه واقع شده‌اند. با پیشرفت تکنولوژی طراحی و ساخت، با کوچک‌تر شدن حجم و وزن ژایروها توجه بیشتری به این حوزه معطوف شده است. در [۲] پس از بررسی‌های نیروی ژیروسکوپی به بررسی نحوه عملکرد ژایروهای پایدارساز با دو چرخ گردان پرداخته و یک نمونه آزمایشگاهی آن پیاده‌سازی شده است. همچنین در این زمینه اختراعاتی نیز ثبت شده است. [۱۴] نمونه‌ای از یک ژایروی پایدارساز برای یک قایق دست‌ساز کوچک می‌باشد. [۱۵] با استفاده از دو دینامیک توأم شده، پایدارساز ژیروسکوپی را برای پایدارسازی حرکات چرخشی یک شناور واقعی استفاده کرده است.

علاوه بر حالت‌های الف و ب، مراجعی وجود دارند که بر پایدارسازی شناور در حالت کلی تکیه کرده و عملگر خاصی را لحاظ نکرده‌اند. [۱۶] با در نظر گرفتن مدل کلی غیرخطی، با استفاده از روش لیاپانوف اقدام به پایدارسازی نموده است. در [۱۷] از روش تطبیقی برای پایدارسازی همان مدل استفاده شده است. [۱۸] با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل از روش تطبیقی لغزشی برای پایدارسازی استفاده کرده است.

در این مقاله برای منظور کردن اثرات غیرخطی، مانند چسبندگی و نیروهای هیدرودینامیکی، از مدل غیرخطی رول شناور استفاده شده است. همچنین با توجه به اینکه هدف، پایدارسازی شناورهای کم تحرک و یا در حال سکون است، مدل یک عملگر ژیروسکوپی - به همراه مدل شناور- مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اینکه اغتشاش وارده از امواج دریا به صورت عدم قطعیت غیر پارامتری است برای مقاوم نمودن سیستم در شرایط مختلف دریایی، کنترل کننده غیر خطی مد لغزشی طراحی شده است. در نهایت استفاده از کنترل کننده H_∞ غیرخطی برای محدود کردن هرچه بیشتر اثر اغتشاش بر خروجی طراحی گردیده است. شبیه سازی‌های نهایی بر مبنای تحلیل‌های طیف موج Jonswap برای نشان دادن کارایی سیستم در شرایط واقعی و فرکانس‌های مختلف دریایی آورده شده است و مقایسه دو کنترل کننده طراحی شده به همراه پیشنهادات تشکیل دهنده مطالب پایانی است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.4.5]

۲- تشریح مسئله

روش‌های مختلفی برای مدل سازی شناورها با توجه به عملگر مورد استفاده وجود دارد. ایده اصلی مدل استفاده شده در این مقاله از [۱۵] گرفته شده است که در آن تخمین داده‌های مربوط به مدل از روی یک شناور واقعی با عملگر ژایروی موسوم به هالکون انجام شده است. مشخصات شناور و عملگر مورد استفاده به ترتیب درجدول ۱ و
جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱ - پارامترهای مربوط به شناور[۱۵]

عنوان	مقدار	واحد
طول بین دو عمود[۱]	۵۱/۵	m
جرم جابجایی[۲]	۳۶۴۰۰۰	Kg
ارتفاع نقطه تعادل عرضی[۳]	۱	m
شعاع چرخش دوران حول نقطه ثقل[۴]	۳/۰۵	m
میرایی رول[۵]	۰/۱۱۴	-
فرکانس طبیعی رول[۶]	۶/۷۶	s

جدول ۲ - پارامترهای مربوط به عملگر[۱۵]

عنوان	مقدار	واحد
کل جرم یک واحد[۷]	۱۳/۶	$tonne$

تفاوت مدل استفاده شده در این مقاله با مدل [۱۵] در این است که در مقاله حاضر از مدل غیر خطی [۱۹] به جای مدل خطی [۱۵] استفاده شده است. مدل مورد استفاده به صورت دو دینامیک توأم شده می‌باشد. گشتاور ایجاد شده توسط ژایرو در این سیستم با گشتاوری که توسط امواج دریا حول محور رول ایجاد می‌گردد مقابله می‌نماید. این نیروی ژیروسکوپی با سرعت چرخش چرخ گردان ژایرو نیز در ارتباط است.

$$\ddot{\phi} + (2\mu_1\dot{\phi} + \mu_3\dot{\phi}^3) + (\omega_0^2\phi + \alpha_3\phi^3 + \alpha_5\phi^5) = \tau_\omega - 2K_g\dot{\alpha} \quad (۱)$$

$$I_g\ddot{\alpha} + B_g\dot{\alpha} + C_g\alpha = K_g\dot{\phi} + \tau_p \quad (۲)$$

معادله (۱) دینامیک حرکات چرخشی شناور را نمایش می‌دهد[۲۰] و معادله (۲) دینامیک مربوط به ژایرو می‌باشد[۲۱]. پارامترهای مربوط به دستگاه معادلات (۱) و (۲) در جدول ۳ آورده می‌شود:

جدول ۳ - پارامترهای مربوط به دستگاه معادلات (۱) و (۲)

نماد	توضیح	نماد	توضیح
ϕ	زاویه چرخش حول محور رول شناور	τ_ω	گشتاور حاصل از تحریک امواج
α	زاویه چرخش ژایرو حول یاتاقان	τ_p	گشتاور کنترلی به یاتاقان ژایرو
α_i	ضرایب غیرخطی	μ_1	ضریب میرایی خطی
μ_3	ضریب میرایی غیرخطی	I_g	گشتاور اینرسی یکی از چرخ گردان‌ها حول محور یاتاقان
C_g	ضریب بازگشت (فنریت)	B_g	ضریب میرایی حاصل از اصطکاک در محور یاتاقان
K_g	گشتاور زاویه‌ای چرخشی		

در حقیقت گشتاور کنترلی وارد شده (τ_p) زاویه یاتاقان ژایرو را تنظیم می‌نماید تا با توجه به توأم سازی دینامیکی ایجاد شده بین ژایرو و شناور، گشتاور حاصل از چرخ گردان ژایرو با گشتاور گردشی ایجاد شده توسط امواج دریا (τ_ω) مقابله نماید.

۳- محدودیت روش‌های خطی

در طراحی کنترل کننده روش‌های خطی از دیر باز مورد توجه بوده‌اند. اما علیرغم طراحی و پیاده‌سازی آسان و بعضاً کم هزینه این روش‌ها گاهاً با محدودیت-هایی مواجه هستند. در این بخش محدودیت‌های روش خطی در مورد مسئله حاضر مورد بررسی قرار می‌گیرد. نقاط تعادل سیستم (۱) و (۲) از متحد با صفر قرار دادن معادلات فضای حالت سیستم (۳) بدست می-آیند.

$$\begin{cases} \dot{x_1} = x_2 \\ \dot{x_2} = \{-(2\mu_1 x_2 + \mu_3 x_2^3) \\ -(\omega_0^2 x_1 + \alpha_3 x_1^3 + \alpha_5 x_1^5) \\ -2K_g x_4 + \tau_\omega\} \\ \dot{x_3} = x_4 \\ \dot{x_4} = \frac{1}{I_g}\{-B_g x_4 - C_g x_3 \\ +K_g x_2 + \tau_p\} \end{cases} \quad (۳)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.4.5]

جدول ۴- مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل[۱۹]

عنوان	مقدار
μ_1	0.75
μ_3	0.5
α_3	$-1.402\omega_0^2$
α_5	$0.271\omega_0^2$
ω_0	5.278 rad
K_g	1.0
$\omega_{\text{spin of gyro}}$	327 rad/s

لذا با توجه به مقادیر جدول ۴:

$$x_1 = \begin{cases} 0 \\ \pm 0.92 \\ \pm 2.07 \end{cases}, \quad x_2 = 0, x_3 = 0, x_4 = 0 \tag{۴}$$

با توجه به این که متغیر x_1 همان زاویه رول شناور است لذا نقاط تعادل بیان شده بر حسب رادیان هستند. در صورتی که متغیرها بر حسب درجه بیان شوند:

$$x_1 = \begin{cases} 0 \\ \pm 52.95 \\ \pm 119.07 \end{cases}, \quad x_2 = 0, x_3 = 0, x_4 = 0 \tag{۵}$$

در مسئله حاضر هدف پایدارسازی شناور در مبدأ مختصات است.

ابتدا سیستم (۳) حول نقطه تعادل مبدأ خطی می‌شود، بنابراین:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\omega_0^2 & -2\mu_1 & 0 & -2K_g \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{K_g}{I_g} & -\frac{C_g}{I_g} & -\frac{B_g}{I_g} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tau_\omega + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{I_g} \end{bmatrix} \tau_p \tag{۶}$$

که اگر دستگاه معادلات (۶) به صورت معادلات دیفرانسیل بازنویسی شود:

$$\ddot{\phi} + 2\mu_1 \dot{\phi} + \omega_0^2 \phi = \tau_\omega - 2K_g \dot{\alpha} \tag{۷}$$

$$I_g \ddot{\alpha} + B_g \dot{\alpha} + C_g \alpha = K_g \dot{\phi} + \tau_p \tag{۸}$$

برای کاهش حرکات حول محور رول در شناور تابع حساسیت به صورت معادله (۹) تعریف شده است.

$$S(s) \triangleq \frac{\phi_{cl}(s)}{\phi_{ol}(s)} \tag{۹}$$

که در رابطه بالا $\phi_{cl}(s)$ و $\phi_{ol}(s)$ به ترتیب تبدیل لاپلاس زاویه رول در حالت حلقه بسته و حلقه باز هستند. برای سنجش عملکرد میراکنندگی، معیار زیر تعریف شده است.

$$RR(\omega) = 1 - |S(j\omega)| = \frac{|\phi_{ol}(j\omega)| - |\phi_{cl}(j\omega)|}{|\phi_{ol}(j\omega)|} \tag{۱۰}$$

بعلاوه برای پاسخ فرکانسی رول حلقه بسته و حلقه باز برای امواج دریا معادلات (۱۱) و (۱۲) آورده شده است.

$$H_{ol}(s) = \frac{\phi_{ol}(s)}{\tau_\omega(s)} \tag{۱۱}$$

$$H_{cl}(s) = \frac{\phi_{cl}(s)}{\tau_\omega(s)} \tag{۱۲}$$

برای عملکرد میرا کردن حرکات چرخشی رول رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$RR(\omega) = (1 - \frac{|H_{cl}(j\omega)|}{|H_{ol}(j\omega)|}) \tag{۱۳}$$

باید توجه نمود که $H_{ol}(j\omega)$ تنها بستگی به ساختار شناور دارد.

حال باید برای τ_p قانون کنترلی مناسب بدست آید. طوری که سیستم با اغتشاش حاصل از امواج دریا (τ_ω) مقابله نماید. فرض می‌شود قانون کنترل به صورت زیر باشد:

$$\tau_p = -K_a \alpha - K_r \dot{\alpha} \tag{۱۴}$$

لازم به ذکر است که مزیت تعریف کنترل کننده به صورت (۱۴) عدم نیاز به سنسور تشخیص چرخش‌های رول است[۲۱].

بنابراین با در نظر گرفتن قانون کنترل به صورت (۱۴)،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.4.5]

معادله (۱۵) برای $H_{cl}(s)$ بدست می‌آید.

$$H_{cl}(s)=\frac{\phi_{cl}(s)}{\tau_{\omega}(s)}=\frac{I_g s^2+\acute{B}_g s+\acute{C}_g}{(s^2+2\mu_1 s+\omega_0^2)(I_g s^2+\acute{B}_g s+\acute{C}_g)} \quad (۱۵)$$

$$\begin{cases}\acute{B}_g=B_g+K_r\\ \acute{C}_g=C_g+K_a\end{cases} \quad (۱۶)$$

با توجه به معادله (۱۴) K_a و K_r پارامترهای طراحی کنترل کننده هستند.

تابع تبدیل از زاویه رول به زاویه چرخش ژایرو حول یاتاقان -که سیگنال کنترلی توسط این چرخش اعمال می‌شود- به صورت معادله زیر است.

$$G(s)=\frac{\alpha(s)}{\phi(s)}=\frac{K_g s}{I_g s^2+\acute{B}_g s+\acute{C}_g} \quad (۱۷)$$

حال برای اینکه قطب‌های حلقه بسته تابع تبدیل بالا سمت راست محور $j\omega$ قرار گیرد.

$$p_{1,2}=-\frac{\acute{B}_g}{I_g}\pm\sqrt{\left(\frac{\acute{B}_g}{Ig}\right)^2-\frac{\acute{C}_g}{I_g}} \quad (۱۸)$$

شرط (۱۹) بدست می‌آید.

$$\left(\frac{\acute{B}_g}{Ig}\right)^2>4\frac{\acute{C}_g}{I_g} \quad (۱۹)$$

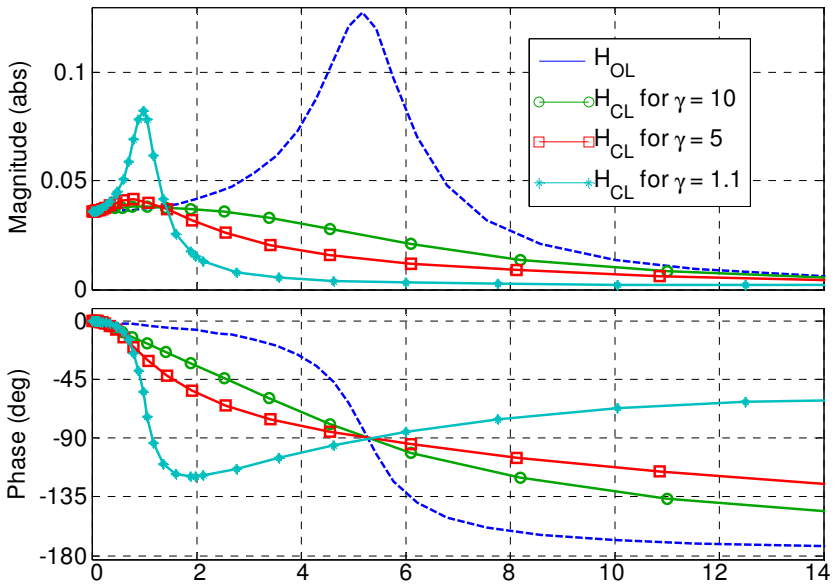
رابطه (۲۰) از معادله (۱۹) بازنویسی شده است.

$$\acute{B}_g>\sqrt{4\frac{\acute{C}_g}{I_g}} \quad (۲۰)$$

باید توجه شود که برای شبیه سازی یک پارامتر طراحی به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

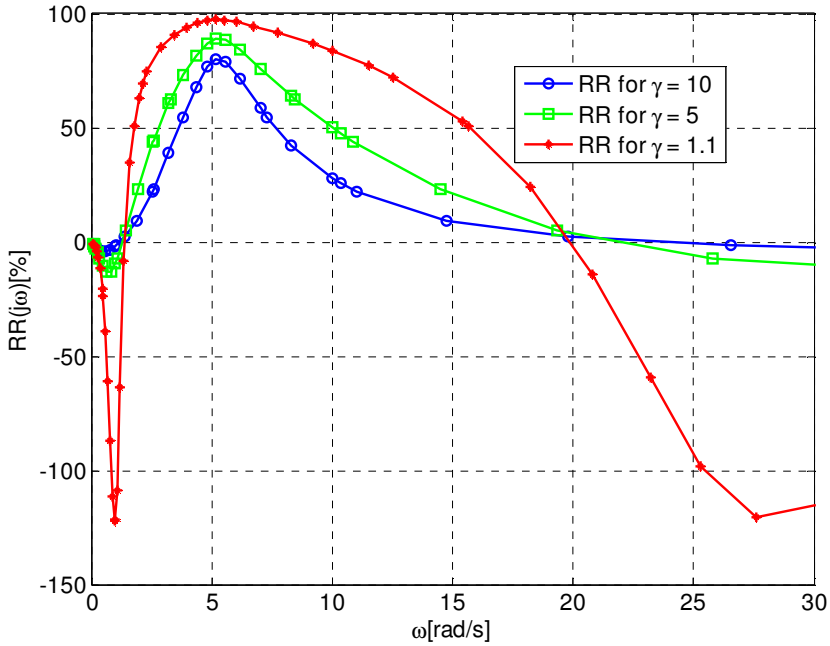
$$\acute{B}_g=\gamma\sqrt{4\frac{\acute{C}_g}{I_g}},\ \gamma>1 \quad (۲۱)$$

شکل ۱ شبیه سازی به ازای $\gamma=1.1,2,10$ را برای $H_{cl}(j\omega)$ نشان می‌دهد در ضمن نموداری که با علامت (--) مشخص شده است نشان دهنده $H_{ol}(j\omega)$ است. اما برای اینکه بتوان عملکرد کنترل کننده طراحی شده را مشاهده نمود، باید نمودار $RR(\omega)$ مطالعه شود. شکل ۲ نشان دهنده عملکرد میراکنندگی در فرکانس‌های مختلف است. یعنی در شرایط مختلف دریایی کنترل کننده به چه میزان حرکات چرخشی حول محور رول شناور را میرا می‌کند.



شکل ۱- نمودار بود $H_{cl}(j\omega)$ به ازای مقادیر مختلف $\gamma=1.1,2,10$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.4.5]



شکل ۲- عملکرد میرایی تعریف شده در معادله (۱۳) برای مقادیر مختلف $\gamma = 1.1, 2, 10$ به ازای فرکانس‌های مختلف دریایی

با توجه به آنچه که در شکل ۲ می‌توان مشاهده کرد با افزایش بهره کنترل کننده میزان عملکرد سیستم در فرکانس غالب کاهش میابد. همچنین مطابق شکل ۲ در برخی فرکانس‌ها عملکرد منفی است و حتی به پایین‌تر از ۱۰۰٪ نیز رسیده است. مفهوم منفی شدن عملکرد میرایی تقویت حرکات چرخشی نامطلوب شناور است. البته این محدودیت در کنترل کننده‌های خطی با بهره ثابت در مدل‌های غیرخطی از شناورها به وجود می‌آید. و نتیجه منطقی این است که این شناور با این ساختار به ازای فرکانس‌های خاصی از امواج قابل استفاده می‌باشد. برای رسیدن به کنترل کننده مقاوم که بتواند در شرایط مختلف (فرکانس‌های) دریایی پایدارسازی را انجام دهد کنترل کننده‌های غیرخطی پیشنهاد می‌گردد. در بخش بعد کنترل کننده‌های مد لغزشی و H_∞ برای این منظور طراحی خواهد گردید.

۴- طراحی کنترل کننده غیرخطی مد لغزشی برای پایدارسازی حرکات رول

چنانچه در بخش قبل به آن اشاره گردید، هدف طراحی کنترل کننده‌ای است که شناور را در مقابل امواج دریا با فرکانس‌های مختلف مقاوم نماید. به این منظور از کنترل کننده مد لغزشی استفاده خواهد شد.

با در نظر گرفتن دستگاه معادلات (۱) و (۲) و گرفتن تبدیل لاپلاس از طرفین رابطه (۲) و قرار دادن آن در لاپلاس رابطه (۱) فرم فضای حالت (۲۲) بدست می‌آید.

$$\begin{cases} \dot{x_1} = x_2 \\ \dot{x_2} = x_3 \\ \dot{x_3} = x_4 \\ \dot{x_4} = \frac{1}{I_g}\begin{cases} -x_4\left(2\mu_1 I_g + 3\mu_3 I_g x_2^2 + B_g\right) \\ -x_3\begin{pmatrix} \omega_0^2 I_g + 3\alpha_3 I_g x_1^2 + 5\alpha_5 I_g x_1^4 \\ +2\mu_1 B_g + 3\mu_3 B_g x_2^2 + C_g + 2K_g^2 \end{pmatrix} \\ -x_2\begin{pmatrix} 6\mu_3 I_g x_3^2 + \omega_0^2 B_g + 3\alpha_3 B_g x_1^2 \\ +5\alpha_5 B_g x_1^4 + 2\mu_1 C_g \end{pmatrix} \\ -x_1\left(6\alpha_3 I_g x_2^2 + \omega_0^2 C_g\right) \\ \begin{pmatrix} 20\alpha_5 I_g x_2^2 x_1^3 + \mu_3 C_g x_2^3 + \alpha_3 C_g x_1^3 \\ +\alpha_5 C_g x_1^5 \end{pmatrix} \\ +\left(I_g \dot{\tau_\omega} + B_g \tau_\omega + C_g \tau_\omega\right) - 2K_g \tau_p \end{cases} \end{cases} \quad (۲۲)$$

در دستگاه معادلات (۲۲) حالت‌ها عبارتند از:

$$x_1 = \phi, x_2 = \dot{\phi}, x_3 = \ddot{\phi}, x_4 = \dddot{\phi} \quad (۲۳)$$

لذا با توجه به مقادیر جدول ۴ نقاط تعادل دستگاه معادلات در (۴) و (۵) نشان داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.4.5]

ورودی کنترل در دستگاه معادلات (۲۲) τ_p و اغتشاش τ_ω می‌باشد.

$$U = \tau_p \, , d = \tau_\omega \qquad (۲۴)$$

دستگاه معادلات (۲۲) را می‌توان به صورت معادله (۲۵) در نظر گرفت.

$$\dot{X} = f(x, d, \dot{d}, \ddot{d}) + b\dot{U} \qquad (۲۵)$$

که در آن:

$$f(x, d, \dot{d}, \ddot{d}) = f(x) + f(d, \dot{d}, \ddot{d}) \qquad (۲۶)$$

در معادله (۲۶) جمله اول تابعی از حالت‌ها و جمله دوم تابعی از اغتشاش می‌باشد. نکته‌ای که در مورد اغتشاشات ناشی از امواج وجود دارد این است که می‌توان برای آن کران در نظر گرفت[۲۲]. لذا در اینجا با اغتشاش همانند یک تابع غیرخطی برخورد خواهد شد.
سطح لغزش به صورت معادله (۲۷) برای دستگاه معادلات (۲۲) تعریف می‌گردد که x_d در اینجا برای رسیدن به پایداری، صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \tilde{x}, \lambda > 0, \tilde{x} = x - x_d \qquad (۲۷)$$

$$S = x_4 + 3x_3\lambda + 3x_2\lambda^2 + x_1\lambda^3 \qquad (۲۸)$$

بنابراین قانون کنترل حاصله به صورت معادله (۲۹) خواهد بود.

$$\dot{U} = b^{-1}\left[\dot{\hat{U}} - Ksgn(S)\right] \qquad (۲۹)$$

که پارامتر b^{-1} به صورت (۳۰) خواهد بود.

$$b^{-1} = -\frac{I_g}{2K_g} \qquad (۳۰)$$

ترم $\dot{\hat{U}}$ در معادله (۲۹) به صورت معادله (۳۱) در نظر گرفته می‌شود.

$$\dot{\hat{U}} = -\hat{f} + f(x) \qquad (۳۱)$$

ترم $\hat{f}$ در معادله (۳۱) را میانگین کمترین و بیشترین مقدار $f(x, d, \dot{d}, \ddot{d})$ از معادله (۲۶) در نظر گرفته می‌شود.

$$\hat{f} = \frac{f(x, d, \dot{d}, \ddot{d})_{min} + f(x, d, \dot{d}, \ddot{d})_{max}}{2} \qquad (۳۲)$$

با توجه به خصوصیتی که موج دارد، میانگین آن صفر است، لذا $\hat{f} = 0$ خواهد شد.
برای تضمین پایداری مجانبی شرط لغزش به صورت معادله (۳۳) خواهد بود[۲۳].

$$\frac{1}{2}.\frac{d}{dt}s^2 \le -\eta|s| \qquad (۳۳)$$

و در نهایت برای ارضای شرط فوق K به صورت معادله (۳۴) در نظر گرفته می‌شود.

$$K \ge F + \eta \, , \eta > 0 \qquad (۳۴)$$

در معادله فوق F به صورت زیر تعریف می‌گردد که کران بالای ترم غیر خطی $f(d, \dot{d}, \ddot{d})$ است.

$$\left|\hat{f} - f\right| \le F \qquad (۳۵)$$

تا اینجا سیستم کنترل شد ولی سیگنال کنترلی دارای لرزش است. برای حل این مشکل از تابعی نسبتاً نرم‌تر از تابع علامت استفاده خواهد شد[۴].

$$sgn(S) = \frac{S}{|S| + \epsilon} \; where \; 0 < \epsilon \qquad (۳۶)$$

باید توجه داشت قانون کنترل برای $\dot{U}$ طراحی شده است لذا برای اعمال به سیستم باید یک‌بار از آن انتگرال گرفته شود.

۵- طراحی کنترل کننده $\mathbf{H}_\infty$ غیرخطی برای پایدارسازی حرکات رول

دلیل استفاده از کنترل کننده H_∞ غیرخطی این است که بتوان علاوه بر دست‌یابی به سیستمی مقاوم در برابر اغتشاشات محیطی از جمله امواج دریا با فرکانس‌های مختلف، رسیدن به سیستمی است که با توجه به نرم H_∞ نسبت اغتشاش به خروجی تا حد ممکن در یک باند محدودی نگه داشته شود. چنانکه در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.4.5]

رابطه زیر نشان داده شده است اگر Z را بردار خروجی و d را اغتشاش در نظر بگیریم. γ نسبت اغتشاش به ورودی خواهد بود.

$$\int_0^T Z^T(s)Z(s)ds \le \gamma^2 \int_0^T d^2(s)ds \qquad (۳۷)$$

اگرچه روش H_∞ غیرخطی یک کنترل کننده زیر بهینه به دست می‌دهد ولی با دقت و توجه به طراحی ممکن است به یک کنترل کننده بهینه دست یافت.
با توجه به دستگاه معادلات (۲۲) برای شروع طراحی کنترل کننده H_∞ غیرخطی، ابتدا سیستم به فرم زیر بازنویسی می‌شود.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A\big(x(t)\big) + B_1\big(x(t)\big)d(t) \\ &\quad + B_2\big(x(t)\big)u(t) \\ y(t) &= C_1x(t) + D_{12}d(t)\end{aligned} \qquad (۳۸)$$

۵-۱- کنترل کننده مرتبه اول

با توجه به دستگاه معادلات (۲۲) برای بدست آوردن کنترل کننده مرتبه اول باید سری تیلور مرتبه اول تمامی ماتریس‌های بالا در نقطه تعادل محاسبه شود. مثلاً برای $A^{[1]}$ در صورتی که نام سطرهای آن $f_i\,, i = 1,2,3,4$ باشد، برای هرکدام از سطرها باید عبارت (۳۹) را محاسبه گردد.

$$\left.\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right|_{x_j=0} \,, j = 1,2,3,4 \qquad (۳۹)$$

برای ماتریس‌های B_1 و B_2 نیز عملیات به طور مشابه خواهد بود.

$$A^{[1]T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{\omega_0^2 C_g}{I_g} \\ 1 & 0 & 0 & \frac{\left(-\omega_0^2 B_g - 2\mu_1 C_g\right)}{I_g} \\ 0 & 1 & 0 & \frac{-\omega_0^2 I_g - 2\mu_1 B_g - C_g - 2K_g^2}{I_g} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{-2\mu_1 I_g - B_g}{I_g} \end{bmatrix} \qquad (۴۰)$$

$$B_1^{[1]} = \begin{bmatrix}0\\0\\0\\1\end{bmatrix}, B_2^{[1]} = \begin{bmatrix}0\\0\\0\\-\frac{2K_g}{I_g}\end{bmatrix}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix}\beta_1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \beta_2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \beta_3 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \beta_4\end{bmatrix}, D_{21} = \begin{bmatrix}0\\0\\0\\\omega_u\end{bmatrix}$$

باید توجه شود که در رابطه (۴۰) بالانویس $[1]$ نشان دهنده مرتبه اول کنترل کننده است. همچنین ω_u در حقیقت تعیین کننده انرژی کنترلی است و از پارامترهای طراحی محسوب می‌گردد. در طراحی مرتبه اول کنترل کننده H_∞ غیرخطی باید دقت کرد که معادله‌ای که قرار است حل شود، همان معادله ریکاتی (۴۱) خواهد بود ولی از مرتبه دوم به بالا معادله‌ای که حل می‌شود معادله همیلتون-ژاکوبی-ایساکس است.

$$\begin{aligned}&A^TX + XA \\ &- X[B_1, B_2]\begin{bmatrix}-\gamma^2 I & 0\\ 0 & I\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}B_1^T\\B_2^T\end{bmatrix}X \\ &+ C^TC = 0\end{aligned} \qquad (۴۱)$$

با حل معادله (۴۱) در صورتی که مقدار باند γ درست انتخاب شده باشد، حل یکتایی از X بدست می‌آید.
همچنین در این طراحی تابع انرژی رابطه (۴۲) که مشابه تابع لیاپانوف است به صورت زیر پیشنهاد داده می‌شود. باید توجه شود، در مرحله اول جملات با توان-های بزرگ‌تر از ۳ حضور ندارند.

$$V^{[2]} = x^TXx \qquad (۴۲)$$

که مشتق آن عبارتست از:

$$V_{x1}^{[2]} = 2Xx \qquad (۴۳)$$

بنابراین قانون کنترل به صورت معادله (۴۴) به دست می‌آید.

$$u^{[1]} = -\frac{1}{2}D^{-1}B_2^{[1]T}V_{x1}^{[2]} \qquad (۴۴)$$

که ضرایب حالت‌ها در حقیقت بهره‌های کنترلی خواهند بود.
باید توجه داشت در هر مرحله از طراحی کنترل کننده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.4.5]

غیرخطی H_∞ تابع ورودی و تابع اغتشاش مرحله قبل استفاده می‌شود. تابع اغتشاش به صورت (۴۵) قابل محاسبه است.

$$d^{[1]} = \frac{1}{2}\gamma^{-2}B_1^{[1]T}V_{x1}^{[2]} \quad (۴۵)$$

توجه شود که این تابع به لحاظ مفهومی نشان دهنده بدترین اغتشاشی است که تابع همیلتونین را بیشترین مقدار خواهد کرد. چنانکه در مورد $\mathrm{u}^{[1]}$ نیز مقداری از ورودی است که تابع همیلتونین را کمترین مقدار خواهد کرد.

۵-۲- کنترل کننده مرتبه دوم

برای طراحی این کنترل کننده بار دیگر باید سری تیلور مرتبه دوم محاسبه شود، یعنی برای $A^{[2]}$ باید عبارت‌های $\frac{\partial\left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right)}{\partial x_k}, (k,j) = 1,2,3,4$ در نقاط تعادل محاسبه گردد. در مورد دستگاه معادلات (۲۲) با توجه به ساختار کنترل کننده تمامی جملات صفر شدند و لذا کنترل کننده مرتبه دوم با کنترل کننده مرتبه اول یکسان خواهد بود. این امر نشان دهنده این است که با توجه به ساختار سیستم، کنترل کننده مرتبه اول تا مرتبه دوم دقت دارد.

۵-۳- کنترل کننده مرتبه سوم و مراتب بالاتر

برای طراحی کنترل کننده مرتبه سوم نیز باید سری تیلور مرتبه سوم برای تمامی ماتریس‌های بالا محاسبه شود. که در نهایت عبارت (۴۶) برای $A^{[3]}$ بدست می‌آید.

$$A^{[3]} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \left\{\begin{matrix} -\alpha_3 C_g x_1^3 - 3\alpha_3 B_g x_1^2 x_2 \dots \\ \dots - 3\alpha_3 I_g x_1^2 x_3 - 6\alpha_3 I_g x_1 x_2^2 \\ \dots - \mu_3 C_g x_2^3 - 3\mu_3 I_g x_2^2 x_4 \\ \dots - 6\mu_3 I_g x_2 x_3^2 \end{matrix}\right\} \end{bmatrix} \quad (۴۶)$$

رابطه $V^{[4]}$ نیز از رابطه (۴۷) قابل محاسبه است.

$$V(x) = \frac{1}{2}X^T P X + V^{[3+]}(x) \quad (۴۷)$$

در نهایت برای بدست آوردن کنترل کننده‌های مرتبه ۳ و مرتبه‌های بالاتر از روابط کلی زیر به صورت الگوریتم کامپیوتری می‌توان استفاده نمود.

$$\begin{aligned} &V_x(x)^{[2]T}A(x)^{[k]} + \cdots \\ &+ V_x(x)^{[k+1]T}A(x)^{[1]} \\ &- 2u^{[1]T}Du^{[k]} - \cdots - 2u^{[k]T}Du^{[1]} \\ &+ x^T C_1^T C_1 x \\ &+ 2\gamma^2\left\{d^{[1]T}d^{[k]} + \cdots + d^{[k]T}d^{[1]}\right\} \end{aligned} \quad (۴۸)$$

باید توجه شود که در رابطه فوق $V_x(x)^{[k]}$ مشتق تابعی است که تمامی ترکیبات مختلف از حالت‌های سیستم با مرتبه [k] خواهد بود.

همچنین برای سیگنال‌های کنترل و اغتشاش‌های مرتبه [k] روابط (۴۹) و (۵۰) آورده می‌شود[۲۴].

$$\begin{aligned} u^{[k]} &= -\frac{1}{2}D^{-1}\left\{B_2^{[1]T}V_x(x)^{[k+1]} + \cdots\right. \\ &\left. + B_2(x)^{[k]T}V_x(x)^{[2]}\right\} \end{aligned} \quad (۴۹)$$

و

$$\begin{aligned} d^{[k]} = \frac{1}{2}\gamma^{-2}\left\{B_1^{[1]T}V_x(x)^{[k+1]} + \cdots\right. \\ \left. + B_1(x)^{[k]T}V_x(x)^{[2]}\right\} \end{aligned} \quad (۵۰)$$

و در پایان باید توجه شود که برای اعمال هرکدام از کنترل کننده‌ها باید آن را با کنترل کننده مرحله قبل جمع کرد. یعنی مثلاً کنترل کننده مرتبه سوم به این صورت خواهد بود.

$$u^{[3]} = u^{[3]} + u^{[2]} + u^{[1]} \quad (۵۱)$$

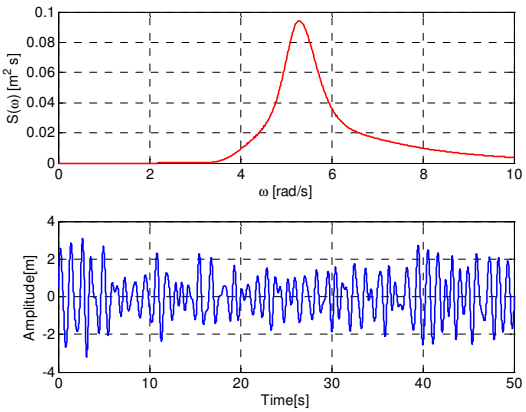
تا اینجا کنترل کننده H_∞ غیرخطی زیر بهینه طراحی گردید، ولی برای اینکه به یک کنترل کننده بهینه برسیم باید روشی پیشنهاد شود که ما را در انتخاب γ و همچنین مقادیر ماتریس C_1 و همچنین ضریب انرژی کنترلی ω_u کمک کند.

۶ - نتایج شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی از طیف موج Jonswap که برای

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.4.5]

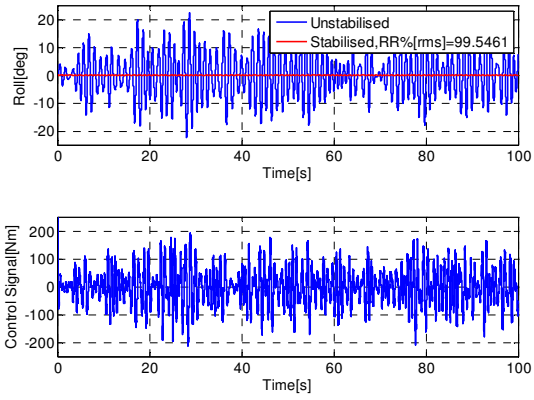
نمایش امواج دریا در شرایط واقعی است استفاده شده است[۲۵]. شرایط دریایی مفروض دارای ویژگی‌های ذیل می‌باشد. ارتفاع امواج ۲ متر، فرکانس غالب امواج ۵,۲۸ رادیان بر ثانیه و زاویه برخورد امواج به شناور ۶۰ درجه، سرعت شناور صفر گره دریایی. یعنی شناور در حال سکون است. شکل ۳ طیف مذکور را به همراه سری زمانی آن نشان می‌دهد.



شکل ۳- الف: طیف موج Jonswap، ب: سری زمانی موج مربوطه

۶-۱- نتایج شبیه‌سازی برای کنترل کننده مد لغزشی

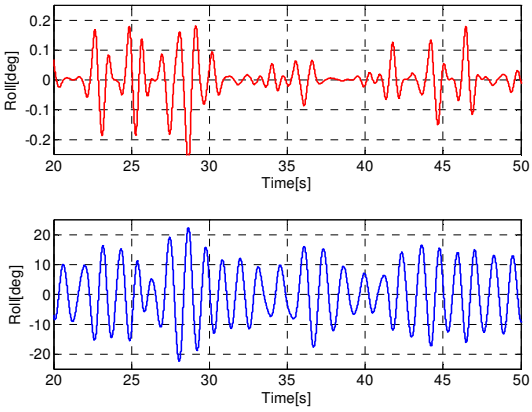
شکل ۴ زاویه رول شناور را قبل از پایدارسازی و پس از آن نشان می‌دهد. سیگنال کنترلی اعمال شده پس از حذف لرزش نیز در همان شکل نشان داده شده است.



شکل ۴- الف: زاویه رول شناور قبل و بعد از پایدارسازی توسط کنترل کننده مد لغزشی، ب: سیگنال کنترلی پس از حذف لرزش. مشخصات شبیه‌سازی:

$\mathrm{Hs[m]} = 2, \omega_0\left[\frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}}\right] = 5.28, \mathrm{speed}\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right] = 0, \mathrm{Enc\ Angle[deg]} = 60$

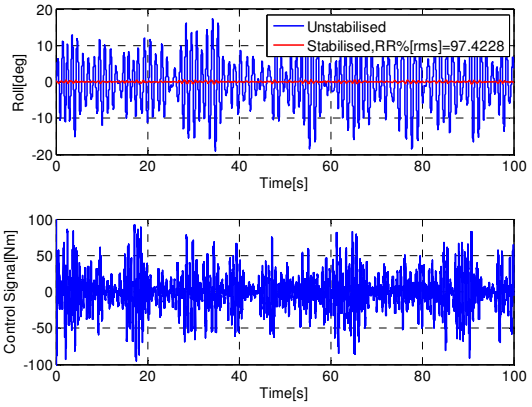
چنانکه در بالای شکل ۴ - الف نشان داده شده است میزان عملکرد میراکنندگی کنترل کننده مد لغزشی ۹۹,۵۴٪ است که عملکرد بسیار خوبی محسوب می‌شود. **شکل ۵** - الف به منظور نمایش بهتر زوایای رول از نمای نزدیک‌تر در بازه زمانی کمتر نمایش داده شده است.



شکل ۵-زوایای رول شناور از نمای نزدیک‌تر، الف: بعد از. ب: قبل از پایدارسازی

۶-۲- نتایج شبیه‌سازی برای کنترل کننده H_∞ غیرخطی

شکل ۶ نیز در شرایطی مشابه با کنترل کننده مد لغزشی ترسیم شده است. چنانکه شکل ۶ - الف نشان می‌دهد میزان میراکنندگی کنترل کننده اخیر کمتر از کنترل کننده مد لغزشی است اما در عوض انرژی کنترلی صرف شده نیز کمتر است.

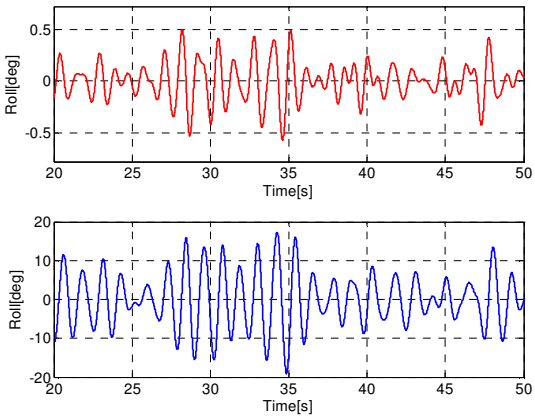


شکل ۶- الف: زاویه رول شناور قبل و بعد از پایدارسازی غیرخطی، ب: سیگنال کنترلی H_∞توسط کنترل کننده اعمال شده. مشخصات شبیه‌سازی:

$\mathrm{Hs[m]} = 2, \omega_0\left[\frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}}\right] = 5.28, \mathrm{speed}\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right] = 0, \mathrm{Enc\ Angle[deg]} = 60$

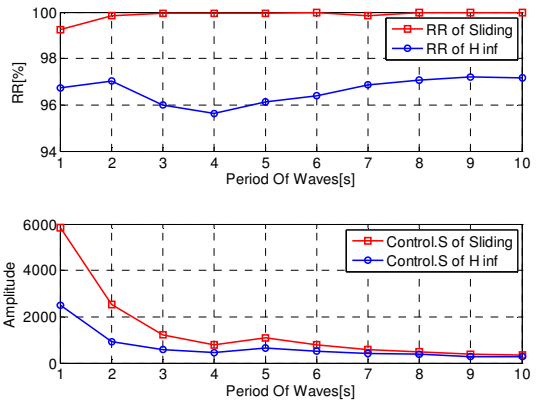
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.4.5]

شکل ۷ نمای نزدیک‌تری از زوایای رول را نمایش می‌دهد.



شکل ۷- زوایای رول شناور از نمای نزدیک‌تر، الف: بعد از پایدارسازی. ب: قبل از پایدارسازی

به منظور مقایسه بین کارکرد این دو کنترل کننده، شبیه‌سازی‌ها در فرکانس(زمان تناوب)های مختلف انجام شده است. حاصل کار برای میزان میراکنندگی هر یک از کنترل کننده‌ها به همراه انرژی کنترلی در معیار RMS در شکل ۸ قابل مشاهده است.



شکل ۸- مقایسه عملکرد دو کنترل کننده طراحی شده، الف: عملکرد میراکنندگی، ب: انرژی کنترلی مصرف شده.

چنانکه از شکل ۸ - الف مشاهده می‌گردد عملکرد میراکنندگی کنترل کننده مد لغزشی چند درصد از کنترل کننده H_∞ غیرخطی بیشتر است اما انرژی کنترل صرف شده مطابق شکل ۸ – ب در کنترل کننده H_∞ غیرخطی بسیار پایین‌تر از کنترل کننده مد لغزشی است.

۷- نتیجه‌گیری

کاربرد ژایروهای پایدارساز قدیمی به دلیل وزن و ابعاد بالای آن‌ها بحث برانگیز بوده است. امروزه با پیشرفت‌هایی که در زمینه‌های مختلف تکنولوژی ایجاد شده است استفاده از این تجهیزات را برای پایدار سازی حرکات چرخشی شناورها مورد توجه قرار داده است. مهم‌ترین مزیت ژایروها پایدارسازی حرکات چرخشی شناور در سرعت‌های پایین و در حال سکون به خوبی سرعت‌های بالا است.

در این مقاله کنترل کننده غیرخطی مد لغزشی و H_∞ غیرخطی برای فائق آمدن به حرکات نامطلوب چرخشی شناور طراحی گردید. کنترل کننده‌های پیشنهاد شده مقاوم است و عملکرد پایداری در مقابله با چرخش‌های نامطلوب حول محور رول در شرایط مختلف دریایی را داراست. اما با توجه به اینکه کنترل کننده مد لغزشی به صورت پویا عمل می‌کند لذا عملکرد میراکنندگی آن کمی بیشتر از کنترل کننده H_∞ غیرخطی است. در عوض میزان انرژی کنترلی مصرفی آن نیز بیشتر است. بنابراین در صورتی که میزان انرژی مصرفی کم و پیچیدگی کمتری از سیستم کنترلی انتظار داشته باشیم کنترل کننده H_∞ غیرخطی می‌تواند گزینه مناسبی باشد. شناورهای شناسایی بدون سرنشین که انرژی مصرفی یکی از موارد مهم طراحی آن‌هاست می‌تواند مثالی برای کاربرد این کنترل کننده باشد. ولی در صورتی که بالا بودن میزان عملکرد میراکنندگی در فرکانس‌های مختلف نسبت به مصرف انرژی و پیچیدگی پیاده‌سازی کنترل کننده اهمیت زیادی داشته باشد کنترل کننده مد لغزشی برای این سیستم پیشنهاد می‌گردد. شناورهای ردیابی ناسا نیز نمونه‌ای از این سیستم‌ها هستند.

کلید واژگان

1-Length between perpendiculars
2-Displacement mass
3-Transverse metacentric height
4-Roll radius of gyration about CG
5-Non-dim. Roll damping
6-Roll natural period
7-Total Unit Mass

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.4.5]

۸- مراجع

1-Perez, T., (2005), Ship motion control course keeping and roll stabilisation using rudder and fins: Springer.

2-Townsend, N., Murphy, A. and Shenoi, R., (2007), A new active gyrostabiliser system for ride control of marine vehicles, Ocean Engineering, vol. 34 ,pp. 1607-1617.

3-Nasa Administration, (2006), Shuttle launch imagery from land, air and water: Nasa.

4-Koshkouei , A. J., Burnham, K. J. and Law, Y., (2007), A comparative study between sliding mode and proportional integrative derivative controllers for ship roll stabilisation, IET Control Theory & Applications, vol. 1, p. 1266.

5-Yang. Y., Jiang, B., (2004), Variable structure robust fin control for ship roll stabilization with actuator system, In Proceeding of the 2004 American Control Conference, Boston. Massachusetts.

6-Tanguy, H., Lebret, G., (2004), Fin rudder roll stabilisation of ships: a gain scheduling control methodology, in Proceeding of the 2004 American Control Conference, Boston. Massachusetts.

7-Chéreau, V., Tanguy, H. and Lebret, G., (2005), Interpolated versus polytopic gain scheduling control laws for fin/rudder roll stabilisation of ships, in IEEE Conference on Decision and Control, Spain.

8-Perez, T., Goodwin, G.C., (2008), Constrained predictive control of ship fin stabilizers to prevent dynamic stall, Control Engineering Practice, vol. 16, pp. 482–494.

9-Do, K.D., Pan, J. (2001), Nonlinear robust fin roll stabilisation of surface ships using neural networks, in Conference on Decision and Control, Orlando, Florida USA.

10-Lee., S.K., Surendrana, S. and Kim, S.Y., (2007), Studies on an algorithm to control the roll motion using active fins, Ocean Engineering, vol. 34, pp. 542–551.

11-Greji, A.R., Moaleji, R., (2007), On the development of ship anti-roll tanks, Ocean Engineering, vol. 34, pp.103-121.

12-Xuejing, Y., Xiren, Z. and Xiuyan, P., (2007), Adaptive neural-net control system for ship roll stabilization, In Control Applications, 2007. CCA 2007. IEEE International Conference on, pp. 735-740.

13-Neves, M.A.S., Merino, J.A., Rodriguez, C.A.,(2009), A nonlinear model of parametric rolling stabilization by anti-roll tanks, Ocean Engineering, vol. 36, pp. 1048-1059.

14-Akers, R. H., (2005), Gyrostabilizer for small boats, Portland, ME (US) Patent.

15-Steinmann, P., Perez, T., (2009), Analysis of ship roll gyrostabiliser control, presented at the Proceedings of the 8th IFAC International Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft., Guarujá (SP), Brazil.

16-Boroujeni, E.A., Dadras, S., and Momeni, H.R., (2009), A nonlinear controller for marine vehicle: Control roll motion of ship, 2009 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, ISSST 2009, pp. 209-212.

17-Boroujeni, E.A., Dadras, S. and Momeni, H.R., (2009), An adaptive controller for a class of nonlinear systems, presented at the 41st Southeastern Symposium on System Theory, Tullahoma, TN, USA.

18-Momeni, H.R., Boroujeni E.A., (2008), Adaptive sliding mode control for roll motions of ships, presented at the International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, Korea.

19-Burger, W., Corbet, A.G., (1966), Ship Stabilizers: Pergamon Press Ltd.

20-Zaher, A.A., (2007), Nonlinear control of systems with multiple equilibria and unknown sinusoidal disturbance, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, vol. 12, pp. 1518-1533.

21-Steinmann, P., Perez, T., (2009), Analysis of ship roll gyrostabiliser control, presented at the Proceedings of the 8th IFAC International Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft., Guarujá (SP), Brazil.

22-Perez, T., Fossen, T.I., (2007), Tutorial on modelling and simulation of marine system dynamics, presented at the IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems (CAMS), Bol, Croatia.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.4.5]

23-Slotine, J., (1991), Applied nonlinear control: Prentice-Hall.

24-Sinha, P.K., Pechev, A.N., (2004), Nonlinear h inf controllers for electromagnetic suspension systems, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 49.

25-Perez, T,. Fossen, T,. (2004-2009). www.marinecontrol.org .

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.4.5]