طراحی سیستم کنترل برای میرایی حرکت هیو شناور اثرسطحی با استفاده از روش رگولاتور مربعی خطی

احسان اسماعیلیان[۱*]، بهزاد فرزانگان[۲] ، حمید ملکی‌زاده[۳]، حسن قاسمی[۴]، منوچهر فدوی[۵]، محمدباقر منهاج[۶]

[۱] کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی دریا دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ *ehsanesmaelian@aut.ac.ir*
[۲] دکتری، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ *b.farzanegan@aut.ac.ir*
[۳] دکتری، مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ *h.malekizadeh@srbiau.ac.ir*
[۴] استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ *gasemi@aut.ac.ir*
[۵] استادیار، دانشکده مهندسی دریا دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ *fadavie@aut.ac.ir*
[۶] استاد، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ *Menhaj@aut.ac.ir*

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۰۸

کلمات کلیدی:
شناور اثرسطحی
حرکت هیو
روش رگولاتور مربعی خطی
توربین باد

چکیده

در این مقاله، هدف کاهش حرکت بین شناور اثرسطحی و توربین باد برای انتقال ایمن تجهیزات و اشخاص از شناور به توربین باد می‌باشد. شناورهایی با این کاربرد نقش مهمی در بهره‌برداری و نگهداری توربین‌های باد دارند. برای این منظور، سیستم کنترل رگولاتور مربعی خطی[۱] برای میرایی حرکت هیو شناور اثرسطحی طراحی شده است. برای بررسی قابلیت سیستم کنترل طراحی‌شده، نتایج برای سه وضعیت دریایی شامل امواج منظم با فرکانس بالا، امواج منظم با دامنه بزرگ و موج نامنظم ارزیابی شده است. در تمامی شرایط دریایی ارزیابی‌شده، سیستم کنترل کنترل رگولاتور مربعی خطی قادر به میرایی بیش از ۹۵ درصد حرکت هیو بود. در هریک از شرایط نتایج با سیستم کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر مقایسه شد. همچنین، به‌منظور اعتبارسنجی، نتایج با روش کنترلی تناسبی-مشتق گیر مقایسه شد. نتایج نشان داد که روش کنترلی رگولاتور مربعی خطی یک روش کارآمد برای کنترل حرکت هیو است و نسبت به روش کنترلی تناسبی-مشتق گیر ، دارای زمان نشست کمتر و درصد میرایی بیشتری می‌باشد.

Control System Design for a Surface Effect Ship by Linear-Quadratic Regulator Method

Ehsan Esmailian[1*], Behzad Farzanegan[2], Hamid Malekizadeh[3], Hassan Ghassmi[1], Manouchehr Fadavi Ardestani[1], Mohammad Bagher Menhaj[2]

[1] Department of Marine Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
[2] Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
[3] Department of Electrical Engineering, SRBIU, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 28 Aug. 2016
Accepted: 26 Feb. 2017

Keywords:
Surface effect ship
Heave
LQR Control System

ABSTRACT

In this paper, the main goal is to reduce the heave motion between a surface effect ship (SES) and a wind turbine in order to safely transfer equipment and person to SES. For this purpose, an LQR control system is designed to damp the vertical motion of the surface effect ship in critical sea states including high-frequency and high amplitude regular waves as well as high frequency irregular waves. The simulation results show the high quality of the system control in the studied sea condition. A comparative analysis of LQR and PID approaches demonstrate the high performance of the new designed control system. The proposed controller outperforms the traditional PD.

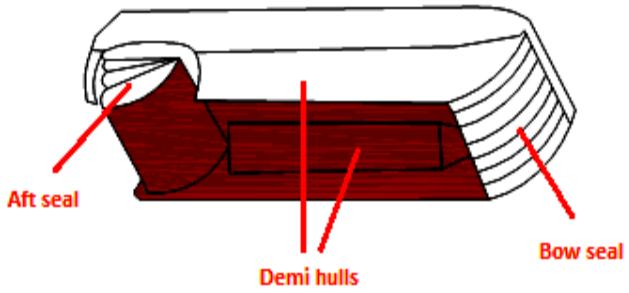
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.8.4]

۱- مقدمه

ایده‌ی اصلی شناورهای اثر سطحی ترکیبی از هاورکرافت و کاتاماران می‌باشد. شناور اثر سطحی شناوری است که بخشی بزرگی از نیروی لیفت در آن توسط یک یا چند بالشتک تحمل می‌شود. این در حالی است که در یک شناور جابجایی تمام لیفت ناشی از نیروهای بویانسی و هیدرودینامیکی است. نیروی لیفتی که توسط بالشتک هوا تحمل می‌شود، حدود ۸۰ درصد شناور اثر سطحی است و بقیه‌ی این نیرو توسط بدنه‌های کناری تحمل می‌شود. شناور اثرسطحی دارای بالشتک هوا در زیر عرشه‌ی خود است. بالشتک‌هایی در جلو و در عقب شناور، مانع از خروج هوا می‌شوند و بخش‌هایی از شناور با استفاده از فشار هوای زیر بدنه از آب خارج می‌گردد و باعث کاهش آبخور شناور می‌شود و در زمان حرکت سرعت بیشتری را تأمین می‌نماید (شکل ۱).

برای سیستم های دریایی سیستم‌های کنترلی مختلف ارائه شده است[۱]. حرکت هیو به‌طور کامل در [۲،۳،۴] بررسی شده است. برلی کنترل از سیستم لوور[۳] متشکل از دو شیر در جلوی بالشتک هوا استفاده شده است [۵]. با باز و بسته شدن شیرها، جریان هوای داخل بالشتک کنترل می‌شد، طوری که باعث میرایی حرکت هیو شود. در آنجا از سه سنسور فشار و یک سنسور شتاب استفاده شد. با فیلتر مناسب سیگنال خروجی از واحد اندازه‌گیری و در نظر گرفتن مدل ریاضی، سیستم کنترل سیگنال مناسب برای سیستم لوور را شناسایی می‌کند.

برای برای مقابله با نیروهای خارجی مربوط به توربین باد و رمپ سیستم کنترلی ارائه شد[۶]. سیستم کنترل پیشنهادی قادر به میرایی ۶۸ درصد حرکت هیو بود. یکی از بهترین کارهایی در رابطه با میرایی حرکت هیو شناورهای اثرسطحی استفاده از سیستم کنترل تطبیقی برای انتقال بار در شرایط دریایی معتدل از طریق رمپ بین شناور LMSR و شناور اثرسطحی بوده است[۷]. سیستم کنترل پیشنهادشده دارای نتایج خوب بود، ولی پاسخگوی تمامی نیروهای خارجی وارد بر شناور نبود. با این‌وجود، سیستم کنترل مطرح‌شده در شرایط دریایی طوفانی به علت محدودیت در مساحت لوور نتایج خوبی نداشت. همچنین، این سیستم کنترل برای میرایی حرکت پیچ استفاده شد[۸]. این سیستم کنترلی برای کاهش اثرات دو مد رزونانسی مختلف بالشتک هوا پیشنهاد شد[۹]. یک سیستم کنترلی برای میرایی مد حرکتی دو فرکانس یک کاتاماران بالشتک دار طراحی شد که نتایج خوبی برای فرکانس‌های رزونانسی کوچک داشت [۱۰].



شکل ۱ - نمای کلی از شناور اثرسطحی همراه با شماتیک جریان ورودی هوا.

در این مقاله نیز هدف میرایی حرکت هیو بین شناور اثرسطحی و توربین باد است (شکل ۲). بر اساس گزارش آژانس محیط‌زیست اروپا، پیش‌بینی می‌شود نصب توربین باد در سال ۲۰۲۰ افزایش قابل‌ملاحظه‌ای داشته باشد[۱۴]. به دلیل اینکه توربین‌های باد نیاز به بازبینی و نگهداری دارند. راه‌حل اقتصادی برای یک مزرعه توربین باد افزایش قابلیت دسترسی به توربین‌های باد است. شناور اثرسطحی درصورتی‌که دارای سیستم کنترل مناسب باشد امکان دسترسی آسان اشخاص و انتقال تجهیزات به توربین باد را فراهم می‌کند[۱۵]. از بارزترین کارهای انجام‌شده در این زمینه روش PD است. در این مقاله از روش LQR که یک کنترل بهینه است، برای این منظور استفاده می‌شود. در این سیستم کنترل ضریب بهره، سیستم را به‌صورت بهینه تعیین می‌کند تا عملکرد کنترلر بهینه گردد[۱۳].

این مقاله به‌صورت زیر ساختار یافته است. در بخش ۱، مدل ریاضی سیستم مطرح می‌شود. در بخش ۲ قانون سیستم کنترل ارائه می‌شود. شبیه‌سازی عددی برای سیستم کنترل طراحی‌شده در سه شرایط موج منظم با فرکانس بالا، دامنه بزرگ و موج نامنظم به ترتیب در بخش‌های ۳ ارائه می‌شود. در بخش ۴ اعتبارسنجی نتایج انجام می‌شود. درنهایت در بخش ۵ نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

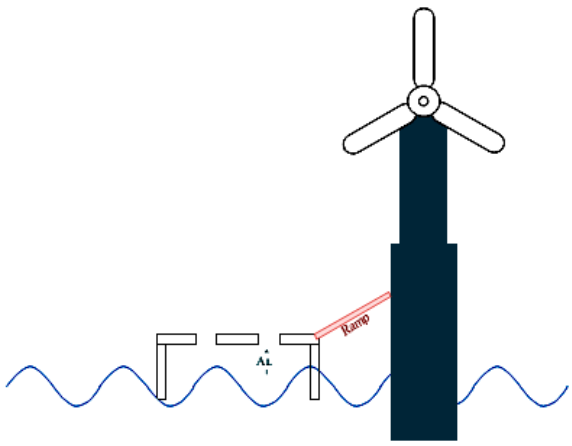
۱- مدل ریاضی

در این بخش، مدل ریاضی برای حرکت هیو ارائه می‌شود. بر طبق [۱]، مدل ریاضی برای حرکت هیو را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

$$(m+A_{33})\ddot{\zeta}_3(t)+B_{33}\dot{\zeta}_3(t)+C_{33}\zeta_3(t)-A_C P_C=F_3^e(t) \quad (۱)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.8.4]



شکل۲ - شناور اثرسطحی در انتقال به یک توربین باد از طریق رمپ.

که در آن ζ، A_c، P_C به ترتیب معرف حرکت هیو، مساحت بالشتک و فشار اتمسفر می‌باشد. برای یک موج فرکانس تنها، نیروی خارجی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_3^e(\mathrm{t}) = \mathrm{K}_3^e \sin(\omega_e\, \mathrm{t} + \phi) \qquad (۲)$$

که در آن

$$\mathrm{K}_3^e = 2ge^{kd}\frac{\sin(\frac{\mathrm{KL}}{2})}{\frac{\mathrm{KL}}{2}}(\mathrm{C}_{33} - \omega\omega_e\, \mathrm{A}_{33} + \phi) \qquad (۳)$$

L و D به ترتیب آبخور و طول بدنه‌های کناری می‌باشد. معادله پیوستگی برای جریان هوای داخل بالشتک را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$q_{in}(\mathrm{t}) - \mathrm{q}_{out}(\mathrm{t}) = \frac{d}{dt}(\rho_c(\mathrm{t})\,\mathrm{V}_c(\mathrm{t})) \qquad (۴)$$

بر اساس شرط آدیاباتیک، رابطه‌ی بین فشار و چگالی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\rho_c(\mathrm{t}) = \frac{\rho_{c0}}{P_{c0}^{1/\gamma}}(P_c(\mathrm{t}))^{1/\gamma} \qquad (۵)$$

که در آن γ گرمای ویژه هوا، ρ_c چگالی هوا در فشار تعادلی است. مشتق زمانی معادله (۴) به‌صورت زیر می‌باشد

$$\dot{\rho}_c(\mathrm{t}) = \frac{\rho_{c0}}{\gamma P_{c0}^{1/\gamma}}(P_c(\mathrm{t}))^{1/\gamma - 1}\dot{P}_c(\mathrm{t}) \qquad (۶)$$

حجم بالشتک هوا هم به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_c(\mathrm{t}) = A_c(h_0 + \zeta_3(\mathrm{t})) - V_0(\mathrm{t}) \qquad (۷)$$

که در آن h_o ارتفاع بالشتک هوا برای هوای داخل بالشتک می‌باشد. بر اساس [۱۰]، برای یک موج فرکانس تنها معادله‌ی زیر ارائه می‌شود

$$V_0(\mathrm{t}) = K_0 \sin(\omega_e(\mathrm{t}) + \phi) \qquad (۸)$$

و برای شرایط موج روبرو K_o می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود

$$K_0 = A_c g \sin(\mathrm{KL}/2)/(\mathrm{KL}/2) \qquad (۹)$$

مشخصات فن هم با توجه به رابطه‌ی زیر مشخص می‌شود

$$q_{in}(\mathrm{t}) = \rho_c(\mathrm{t})\,\mathrm{c}_n\,(\mathrm{Q}_0 + \left.\frac{\partial Q}{\partial P}\right|_{P_{c0}}(P_c(\mathrm{t}) - P_{c0}) \qquad (۱۰)$$

که در آن P_C، C_n به ترتیب فشار اتمسفر، ضریب روزنه می‌باشد. ضریب روزنه بین ۰٫۶۱ تا ۱ می‌باشد [۱۰] . برای جریان هوای خروجی از بالشتک نیز داریم:

$$q_{out}(\mathrm{t}) = \rho_c(\mathrm{t})\,\mathrm{c}_n\sqrt{\frac{2(P_c(\mathrm{t}) - P_{c0})}{\rho_{c0}}}A_l \qquad (۱۱)$$

مساحت لوور هم به‌عنوان ورودی سیستم کنترل در نظر گرفته می‌شود

$$K_1\dot{\mu}_u(t) + K_3\mu_u(t) + \rho_{c0}A_c\dot{\eta}_3(\mathrm{t}) = \mathrm{K}_2\,\Delta A_L(\mathrm{t}) + \rho_{c0}\dot{V}_0(\mathrm{t}) \qquad (۱۲)$$

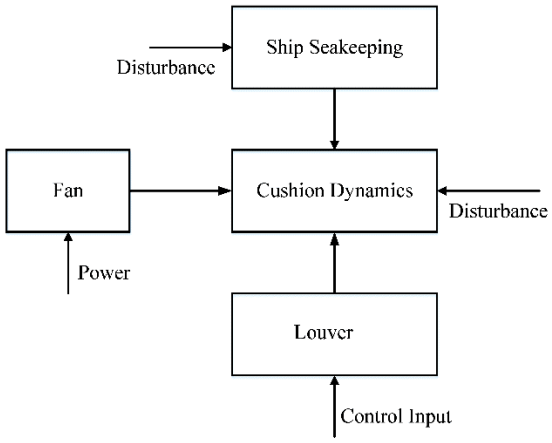
که در آن

$$K_1 = \frac{\rho_{c0}h_0A_c}{\gamma(1 + \frac{P_a}{P_0})}$$

$$K_3 = \frac{\rho_{c0}}{2}(\mathrm{Q}_0 - 2P_0q\left.\frac{\partial Q_{in}}{\partial P}\right|_0) \qquad (۱۳)$$

۲- طراحی سیستم کنترل LQR

در اینجا از روش LQR برای طراحی سیستم کنترل برای شناور اثرسطحی استفاده می‌شود. در شکل ۳ شماتیک عملکرد سیستم کنترل برای شناور نمایش داده‌شده است.



شکل ۳ - شماتیک عملکرد سیستم کنترل.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.8.4]

لوور به‌عنوان ورودی سیستم کنترل، وظیفه میرایی حرکت هیو را در حضور اغتشاش ناشی از موج وارد به بالشتک و شناور بر عهده دارد. همچنین، هوای داخل بالشتک از طریق فن تأمین می‌شود.

طراحی کنترل‌کننده بر پایه رگولاتور مربعی خطی در مسائل بهینه‌سازی به‌طور گسترده مورداستفاده قرار گرفته است. فرض می‌کنیم تمامی متغیرهای حالت سیستم تحت بررسی برای فیدبک سیستم در دسترس باشند. برای طراحی کنترل‌کننده LQR لازم است مجموعه‌ای از حالت‌های سیستم که کنترل‌پذیر می‌باشند را در نظر بگیریم.

در حالت کلی فرض کنید معادلات فضای حالت به‌صورت زیر تعریف گردد[۱۳]:

$$\dot{x} = Ax + Bu \qquad (۱۴)$$

که در آن بردار متغیرهای حالت دارای ابعاد n و بردار ورودی دارای ابعاد m می‌باشد. A ماتریس حالت‌های سیستم که یک ماتریس مربعی با رتبه n و ماتریس B ماتریس ورودی است. از این‌رو، شرط کنترل‌پذیری سیستم، کنترل‌پذیری جفت‌های (A,B) می‌باشد. در روش LQR ، شاخص عملکرد را برای مینیمم کردن یک متغیر کاهش می‌دهیم. رسیدن به مقدار مینیمم آن متغیر به معنی پایان الگوریتم خواهد بود. برای طراحی کنترل‌کننده شاخص عملکرد (J) به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt \qquad (۱۵)$$

که در آن Q یک ماتریس نیمه معین مثبت به‌عنوان ماتریس وزنی حالت و دارای رتبه کامل n مربعی می‌باشد و R یک ماتریس معین مثبت به‌عنوان ماتریس وزنی کنترل سیستم و دارای رتبه کامل m مربعی می‌باشد. مقادیر این ماتریس‌ها به متغیرهای حالت و ورودی سیستم وابسته می‌باشد. ازاین‌رو مهم‌ترین مسئله در طراحی کنترل‌کننده LQR، تنظیم دقیق این دو ماتریس برای رسیدن به یک نقطه بهینه و مینیمم سازی شاخص عملکرد می‌باشد.

مسئله رگولاتور بهینه خطی مربعی در حقیقت پیدا کردن یک قانون کنترلی بهینه برای ورودی u می‌باشد تا شاخص عملکرد را بر اساس ماتریس‌های Q و R مینیمم نماید. از این‌رو، قانون کنترلی حلقه بسته بهینه به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$u^* = -Kx \qquad (۱۶)$$

که در آن K ماتریس بهره بهینه فیدبک برای سیستم می‌باشد که با انتخاب و تنظیم آن قطب‌های سیستم حلقه بسته به‌گونه‌ای تنظیم می‌گردند تا شاخص عملکرد سیستم بهینه و مینیمم شود. در حقیقت ماتریس بهره کنترلی، به ماتریس‌های A، B، Q، R وابسته می‌باشد. دو معادله اصلی وجود دارد که هدف آن‌ها محاسبه این بهره کنترلی می‌باشد و P در حقیقت یک ماتریس مثبت معین متقارن می‌باشد، که از حل معادله ریکاتی زیر محاسبه می‌شود:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \qquad (۱۷)$$

بنابراین ماتریس بهره K به‌صورت زیر می‌تواند مورداستفاده قرار گیرد:

$$K = R^{-1}B^T P \qquad (۱۸)$$

با جایگذاری معادله (۱۶) در معادله (۱۴) داریم:

$$\dot{x} = Ax - BKx = (A - BK)x \qquad (۱۹)$$

حال اگر مقادیر ویژه ماتریس A-BK دارای قسمت حقیقی منفی باشند، آنگاه حتماً یک ماتریس P مثبت برای حل معادله ریکاتی وجود دارد. پس از حل معادله ریکاتی، و جایگزینی نتیجه در معادله (۱۸)، ماتریس بهره کنترل فیدبک بهینه، K، بدست می‌آید.

۳- شبیه‌سازی

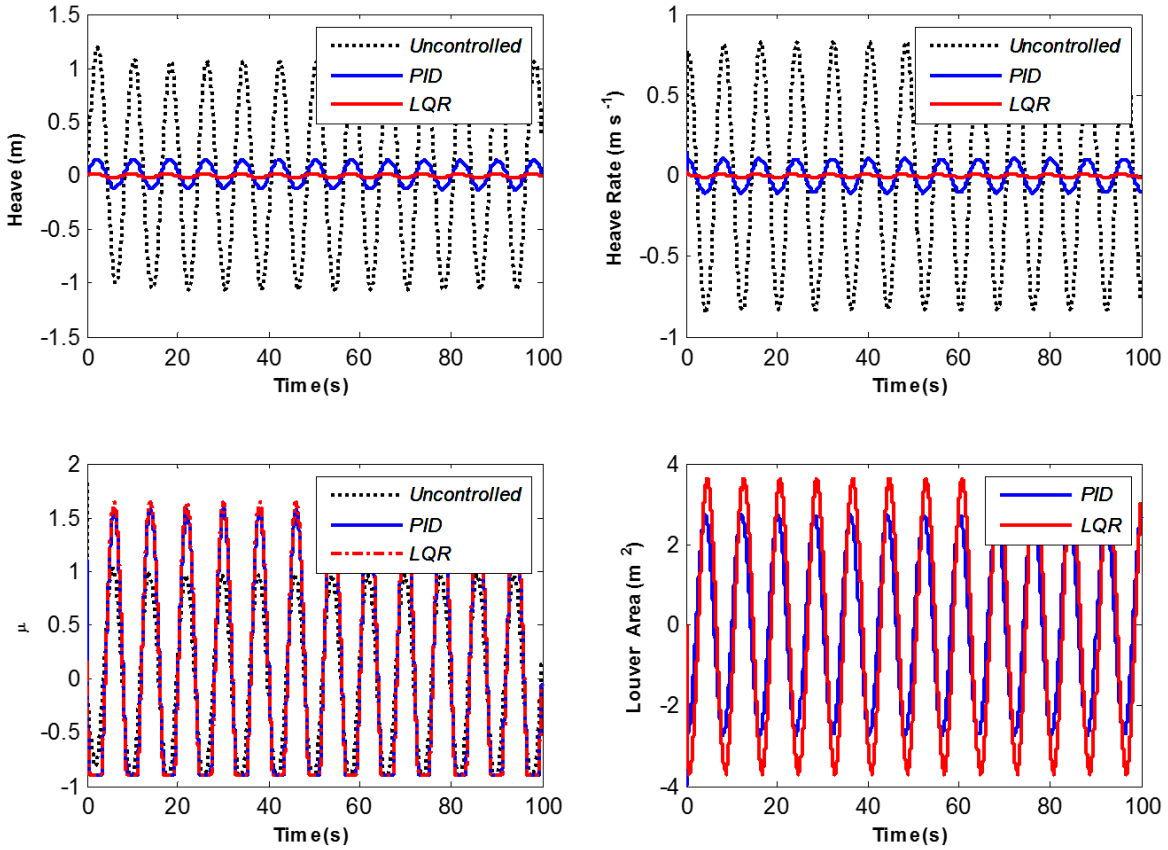
برای شبیه‌سازی سیستم و استفاده در قانون کنترل بهینه، از سیمولینک نرم‌افزار متلب استفاده شد. ابتدا شبیه‌سازی سیستم شناور اثرسطحی در محیط سیمولینک انجام می‌شود. پارامترهای موردنیاز شناور برای شبیه‌سازی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- پارامترهای شناور [۱۷] در دو وضعیت دریایی مختلف

متغیر	تعریف	موج با دامنه بزرگ	موج با فرکانس بزرگ
m	جرم شناور	۹۲۰۰ $[kg]$	۹۰۰۰ $[kg]$
A_{33}	ضریب جرم افزوده حرکت هیو	۰,۱۹۴×۱۰^۵	۰,۲۷۳×۱۰^۵
B_{33}	ضریب میرایی حرکت هیو	۰,۲۳۵×۱۰^۵	۰,۲۷۳×۱۰^۵
C_{33}	ضریب بازگرداننده حرکت هیو	۳۳۰۰۰۰	۳۳۰۰۰۰
A_C	مساحت بالشتک	۱۶۰ $[m^2]$	۱۶۰ $[m^2]$
h_0	ارتفاع آب داخل بالشتک	۰,۵ $[m]$	۰,۵ $[m]$
L	طول بالشتک	۲۰ $[m]$	۲۰ $[m]$
P_0	فشار اولیه یا فشار تعادلی	۲۴۰۰ $[pa]$	۲۴۰۰ $[pa]$
C_n	ضریب روزنه	۰,۶۱	۰,۶۱
ρ_{C0}	چگالی اولیه	۱,۲۳	۱,۲۳
P_a	فشار اتمسفر	$[pa]$ ۱,۰۱×۱۰^۵	۱,۰۱×۱۰^۵ $[pa]$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.8.4]



شکل ۴ - منحنی حرکت هیو. نتایج برای زمان روشن و خاموش بودن سیستم کنترل LQR ارائه شده است.

۴-۱پیاده‌سازی سیستم کنترل در موج منظم با دامنه بزرگ

در این قسمت شبیه‌سازی برای موج منظم با فرکانس $\omega_w = 0.785\, rad/s$ و دامنه موج $1m$ انجام می‌شود. در چنین وضعیتی شناورهای معمولی که برای بازبینی توربین باد و انتقال بار در دریا طراحی شده‌اند و دارای سیستم کنترل نیستند، به خاطر ارتفاع بزرگ موج، قادر به انجام هیچ‌گونه مأموریتی نمی‌باشند. در این قسمت نتایج برای حرکت هیو و نرخ هیو، بدون لحاظ سیستم کنترل و با همچنین با لحاظ سیستم کنترل با یکدیگر مقایسه می-شوند.

۴-۱-۱ حرکت هیو

در شکل ۴ نتایج مربوط به حرکت هیو مشاهده می‌شود. در حالتی که سیستم کنترل خاموش است، نیروی تحریک باعث ایجاد حرکت هیو ۰/۹۳ متر در شناور شده است و نتایج بعد از زمان ۱۰۰ ثانیه و نسبت میرایی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مقدار هیو و درصد میرایی توسط سیستم کنترل LQR.

سیستم کنترل	خاموش	LQR
هیو (متر)	۰,۹۳	۰,۰۱۵
درصد میرایی	-	۹۸

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، سیستم کنترل LQR با ۹۸ درصد میرایی حرکت هیو، عملکرد خیلی خوبی دارد.

۴-۱-۲ نرخ هیو

همچنین مشاهده می شود، در حالتی که سیستم کنترل خاموش است، نیروی تحریک باعث ایجاد نرخ هیو ۰/۷۳ متر بر ثانیه در شناور شده است و نتایج بعد از زمان ۱۰۰ ثانیه و نسبت میرایی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مقدار نرخ هیو و درصد میرایی توسط سیستم کنترل LQR.

سیستم کنترل	خاموش	LQR
نرخ هیو (متر بر ثانیه)	۰/۷۳	۰/۰۱۱
درصد میرایی	-	۹۸

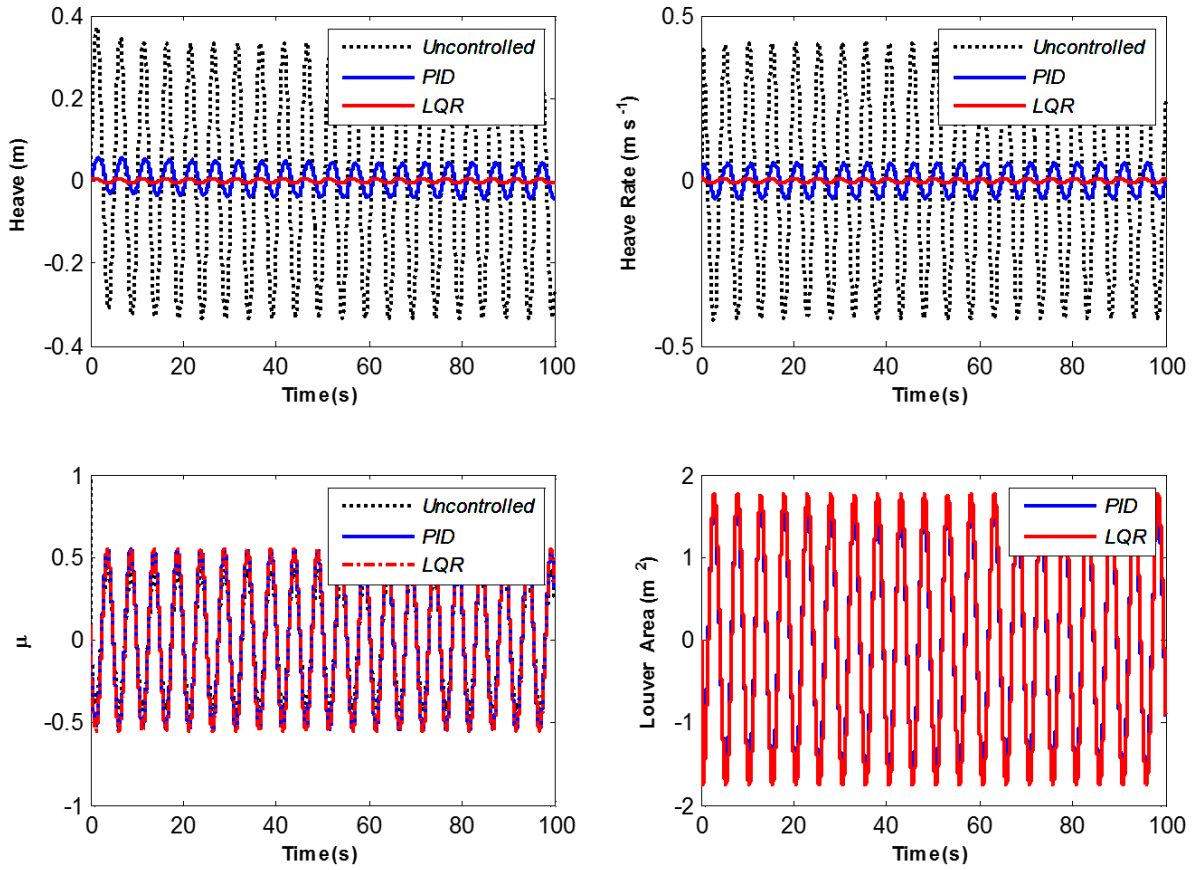
همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، سیستم کنترل LQR با ۹۸ درصد میرایی نرخ هیو، عملکرد خیلی خوبی در میرایی دارد.

همچنین، ضریب فشار یکنواخت بی‌بعد به‌صورت زیر تعریف می‌شود و معرف تغییرات فشار در داخل بالشتک است

$$\mu = \frac{P_u - P_0}{P_0} \qquad (۲۰)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.8.4]



شکل ۵ - منحنی حرکت هیو. نتایج برای زمان روشن و خاموش بودن سیستم کنترل LQR ارائه شده است.

که در آن P_u فشار اضافی ناشی از تغییر شرایط بالشتک به خاطر وجود اغتشاش است. P_o فشار اولیه بالشتک است

همچنین مساحت لوور[۴] به عنوان به عنوان ورودی سیستم کنترل در نظر گرفته می شود. در اینجا، حداکثر مساحت لوور ۰/۱۵ مساحت عرشه در نظر گرفته شده است.

۴-۲ شبیه‌سازی سیستم کنترل در موج منظم با فرکانس بالا

در این قسمت شبیه‌سازی برای موج منظم با $\omega_w = ۱٫۲۵\ rad/s$ و دامنه موج $۰٫۵\ m$ انجام می‌شود. در این وضعیت اگرچه ارتفاع موج نسبت به شرایط موج منظم در شبیه‌سازی قبل، کوچک‌تر است، ولی فرکانس آن بزرگ‌تر است و فرکانس بالای امواج باعث افزایش نیروهای اینرسی وارد بر شناور و شتاب‌ها می‌شود. پارامترهای موردنیاز شناور در این حالت، در جدول ۱ ارائه شده است.

۴-۲-۱ حرکت هیو

در شکل ۵ نتایج مربوط به حرکت هیو مشاهده می‌شود. در حالتی که سیستم کنترل خاموش است، نیروی تحریک باعث ایجاد حرکت هیو ۰/۳۴ متر در شناور شده است و نتایج بعد از زمان ۱۰۰ ثانیه و نسبت میرایی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- مقدار هیو و درصد میرایی توسط سیستم کنترل LQR.

سیستم کنترل	خاموش	LQR
هیو (متر)	۰/۳۴	۰/۰۰۵
درصد میرایی	-	۹۸

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، سیستم کنترل LQR با ۹۸ درصد میرایی، عملکرد خیلی خوبی دارد.

۴-۲-۲ نرخ هیو

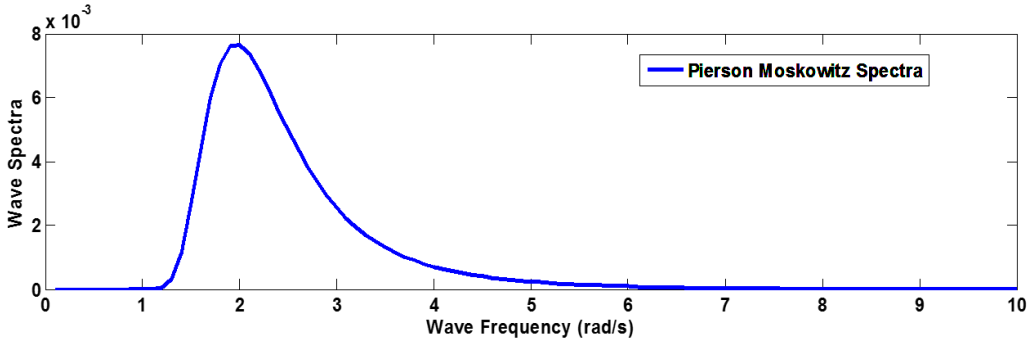
در شکل ۵ نتایج مربوط به نرخ هیو مشاهده می‌شود. در حالتی که سیستم کنترل خاموش است، نیروی تحریک باعث ایجاد نرخ هیو ۰/۴ متر بر ثانیه در شناور شده است و نتایج بعد از زمان ۱۰۰ ثانیه و نسبت میرایی در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- مقدار نرخ هیو و درصد میرایی توسط سیستم کنترل LQR.

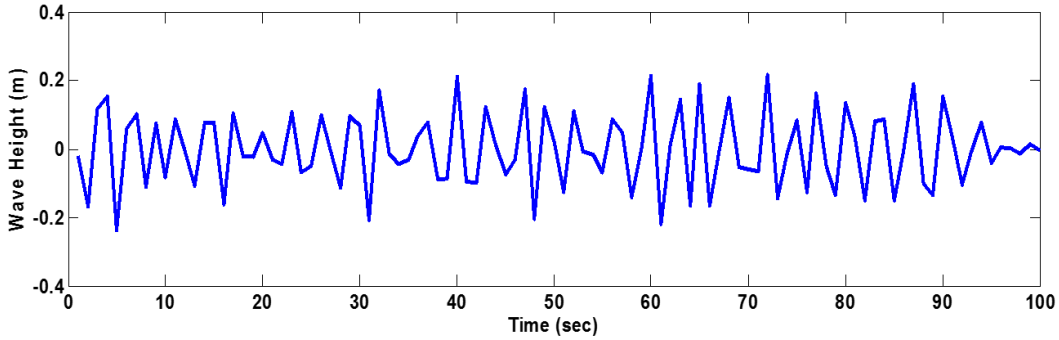
سیستم کنترل	خاموش	LQR
نرخ هیو (متر بر ثانیه)	۰/۴	۰/۰۰۷
درصد میرایی	-	۹۸

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، سیستم کنترل LQR با ۹۸ درصد میرایی نرخ هیو، عملکرد خیلی خوبی دارد.

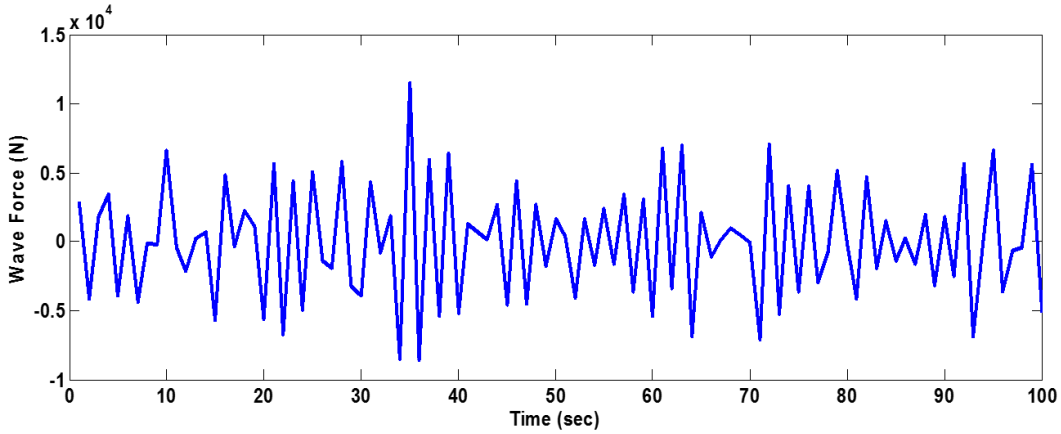
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.8.4]



شکل ۶ - نمودار طیف پیرسون- موسکویچ برحسب فرکانس موج برای $U_{19.5} = 5ms^{-1}$.



شکل ۷ - نمودار ارتفاع موج نامنظم مربوط به طیف پیرسون موسکویچ.



شکل ۸ - نیروی وارد بر شناور ناشی از موج.

۳-۴ عملکرد سیستم کنترل در موج نامنظم

در عمل ارتفاع موج برای یک موج دوبعدی در جهت x را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\zeta = \sum_{j=1}^{N} A_i \sin(\omega_i t - k_i x + \varepsilon_i) \qquad (۲۱)$$

که در آن زاویه‌ی فاز، ε_j، به‌صورت یکنواخت بین ۰ تا ۲π تغییر می‌کند. رابطه‌ی بین طیف موج و ارتفاع را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\frac{1}{2}A_j^2 = S(\omega_j)\Delta\omega \qquad (۲۲)$$

که در آن $\Delta\omega$ فاصله‌ی فرکانسی و یک عدد ثابت است. رابطه‌ی بالا در اصل رابطه‌ی بین حوزه‌ی زمان و حوزه‌ی فرکانس است. در اینجا از طیف پیرسون- موسکویچ به‌صورت زیر استفاده می‌شود:

$$S_p(\omega) = \frac{8.1\times10^{-3} g^2}{\omega^5} \exp\left[-\beta\left(\frac{\omega_o}{\omega}\right)^4\right] \qquad (۲۳)$$

که در آن $\omega_o = g/U_{19.5}$ فرکانس پیک طیف و $\beta = ۱٫۲۵$ است. همچنین، $U_{۱۹٫۵} = ۵\ m/s$ در نظر گرفته می‌شود که متناظر با شرایط دریایی۳ [۵] بر اساس جدول بیوفورت[۶] می‌باشد[۲۶]. در شکل ۶ نمودار طیف ارائه شده است. ارتفاع موج مربوط به طیف برای محدوده فرکانسی ۰ تا ۳ رادیان بر ثانیه در شکل ۷ ارائه شده است. همچنین،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.8.4]

نیروی اغتشاش ناشی از موج که منجر به حرکت هیو شده است در شکل ۸ مشاهده می‌شود. برای محاسبه نیروی ناشی از موج از معادله (۲) استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی موج را به ۱۰۰ مؤلفه تقسیم می‌کنیم و هر فرکانس را از ۰ تا ۳ رادیان بر ثانیه با فاصله فرکانسی ۰/۰۳ بدست می‌آید. برای موج سینوسی و با استفاده از روش مستطیلی برای حل مساحت انتگرال به دست می‌آید:

$$A_i = 2\sqrt{S(\omega_0 + 0.03i)0.03} \qquad (۲۴)$$

که در آن $i = 1,\ldots,100$. فاز موج ε_i به‌صورت تصادفی بین ε_i و 2π می‌باشد. از مقادیر جدول ۱ برای محاسبه پارامترهای شناور استفاده شد. فرض شد که شناور در فرکانس‌های بالا حرکت می‌کند. ازاین‌رو، می‌توان ضرایب میرایی و جرم افزوده را ثابت در نظر گرفت[۱۰]. این فرض در عمل یک فرض منطقی است چراکه برای اینکه اثر موج بر روی عملکرد شناور اثرسطحی را بتوان کنترل نمود بایستی موج نسبت به طول شناور دارای فرکانس نسبتاً بالا و درنتیجه دوره تناوب کوچک‌تر باشد تا به سطح داخل بالشتک نفوذ پیدا کند و بتوان با استفاده از تغییر مساحت لوور حرکت هیو را کنترل نمود.

۴-۳-۱ حرکت هیو

در شکل ۹ نتایج مربوط به حرکت هیو مشاهده می‌شود. در حالتی که سیستم کنترل خاموش است، نیروی تحریک باعث ایجاد حرکت هیو ۰/۱۳ متر در شناور شده است و نتایج بعد از زمان ۹۷ ثانیه و نسبت میرایی در جدول ۶ ارائه شده است.

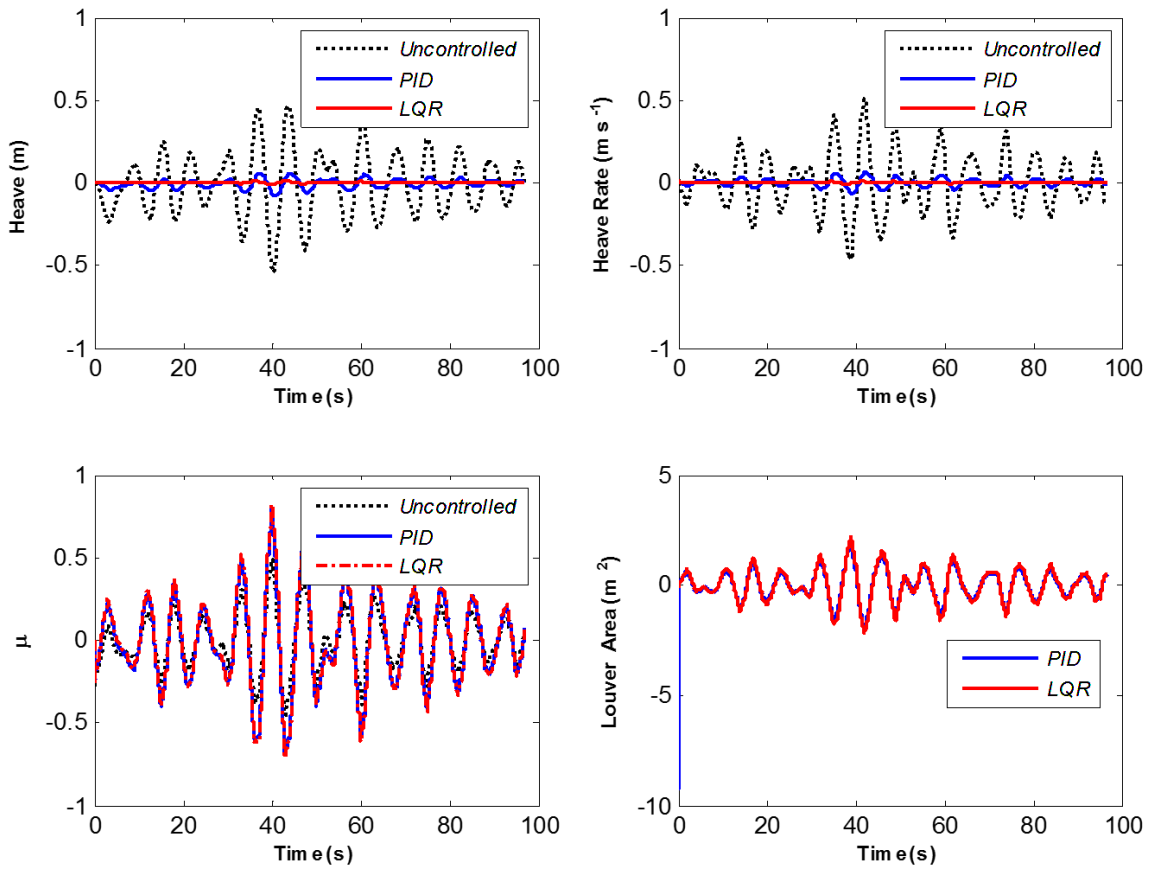
جدول ۶- مقدار هیو و درصد میرایی توسط سیستم کنترل LQR.

سیستم کنترل	خاموش	LQR
هیو (متر)	۰/۱۳	۰/۰۰۱۷
درصد میرایی	-	۹۸/۷

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، سیستم کنترل LQR با ۹۸/۷ درصد میرایی حرکت هیو عملکرد خیلی خوبی دارد.

۴-۳-۲ نرخ هیو

در شکل ۹ نتایج مربوط به حرکت هیو مشاهده می‌شود. در حالتی که سیستم کنترل خاموش است، نیروی تحریک باعث ایجاد نرخ هیو ۰/۱۸ متر بر ثانیه در شناور شده است و نتایج بعد از زمان ۹۷ ثانیه و نسبت میرایی در جدول ۷ ارائه شده است.



شکل ۹ - منحنی حرکت هیو. نتایج برای زمان روشن و خاموش بودن سیستم کنترل LQR ارائه شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.8.4]

جدول ۷- مقدار نرخ هیو و درصد میرایی توسط سیستم کنترل LQR.

سیستم کنترل	خاموش	LQR
نرخ هیو (متر بر ثانیه)	۰/۱۸	۰/۰۰۲
درصد میرایی	-	۹۸/۸

همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، سیستم کنترل LQR با ۹۸/۶ درصد میرایی نرخ هیو، عملکرد خیلی خوبی دارد.

۵- اعتبارسنجی

برای این منظور از سیستم کنترل PD ارائه شده در مرجع [۱۸] استفاده می‌شود. برای این منظور، موج منظم به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\zeta = A\ \sin(\omega t - kx + \varepsilon) \tag{۲۵}$$

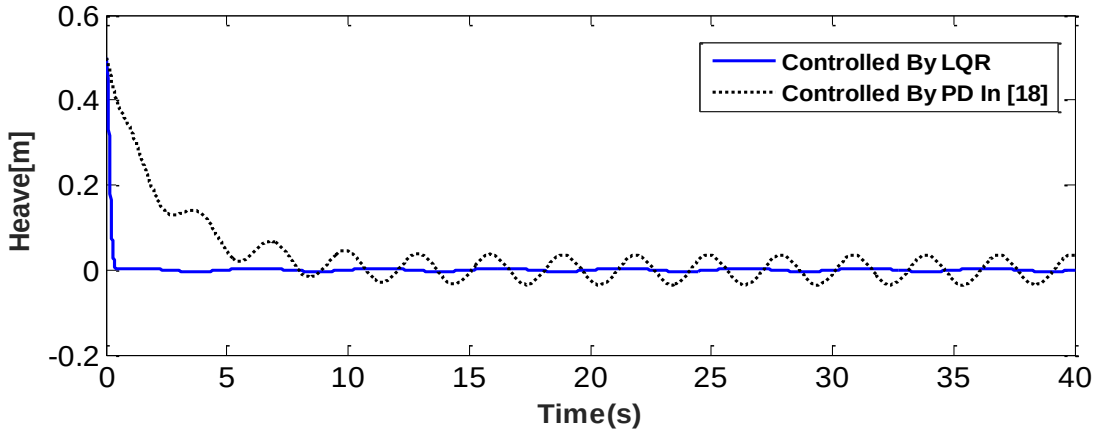
که در آن A، k، ε به ترتیب دامنه، عدد و فاز موج می‌باشد. شبیه‌سازی برای یک موج منظم دلخواه با ارتفاع $H = 2m$ و فرکانس $\omega = 2\pi/3$ انجام می‌شود.

۵-۱ نرخ هیو

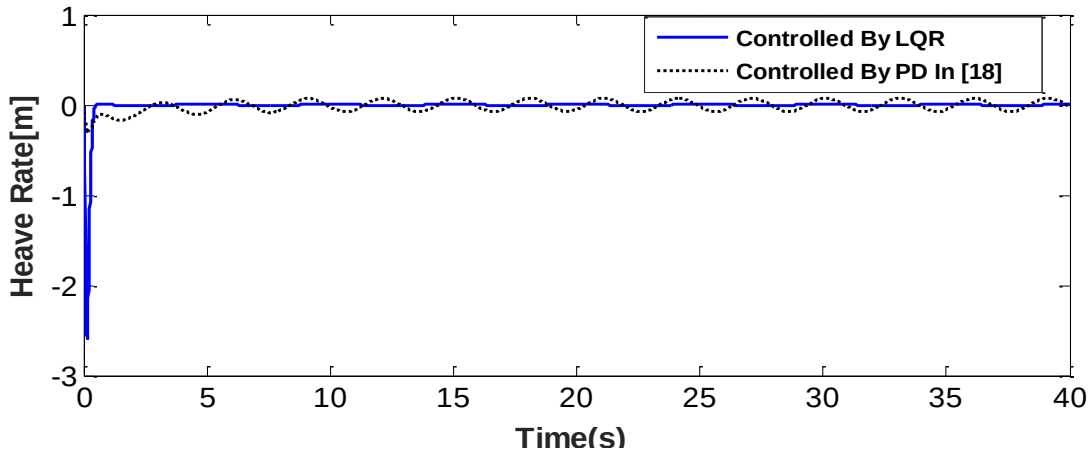
در شکل ۱۰ نتایج مربوط به نرخ هیو مشاهده می‌شود. این نمودار نیز نشان‌دهنده این است که نرخ هیو بعد از فعال شدن سیستم کنترل به مقدار قابل‌توجهی کاهش یافته است و مقدار حرکت هیو را تقریباً به صفر تغییر می‌دهد. همچنین، همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، روش LQR دارای زمان نشست کمتری نسبت به روش PD است.

۵-۲ حرکت هیو

در شکل ۱۱ نتایج مربوط به حرکت هیو مشاهده می‌شود. در حالتی که سیستم کنترل خاموش است، نیروی تحریک باعث ایجاد حرکت هیو حدود ۰/۵ متر در شناور می‌شود. نمودار حرکت هیو برای سیستم کنترل PD و LQR به‌صورت شکل ۱۱ است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، سیستم کنترل LQR عملکرد بهتری دارد مقدار حرکت هیو را تقریباً به صفر تغییر می‌دهد. همچنین، روش LQR دارای زمان نشست کمتری نسبت به روش PD است



شکل ۱۰ - منحنی حرکت هیو نسبت به زمان برای سیستم کنترل LQR و سیستم کنترل PD طراحی‌شده در [۱۸].



شکل ۱۱ - منحنی حرکت نرخ هیو نسبت به زمان برای سیستم کنترل LQR و سیستم کنترل PD طراحی‌شده در [۱۸].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.8.4]

در ضمن، بر اساس نتایج ریسانن[۷] تمام اطلاعات سیستم در متغیرهای حالت و بردار حالت موجود است و هر آنچه از خروجی و مشتقات آن بدست می‌آید، در متغیرهای حالت نیز یافت می‌شود و هر آنچه نتوان با متغیرهای حالت انجام داد با هیچ روش دیگری نمی‌توان انجام داد [۱۶]. ریسانن نشان داد با فیدبک متغیرهای حالت به‌جای فیدبک خروجی و مشتقات آن می‌توان ەشرط کنترل‌پذیری سیستم آن را پایدار کرد و به هر معادله مشخصه مطلوب حلقه بسته-ای دست پیدا کرد. ازاین‌رو، ازآنجاکه در سیستم کنترل رگولاتور مربعی خطی از متغیرهای حالت برای فیدبک گرفتن استفاده می-شود، نسبت به روش سیستم کنترل PD ارائه شده در مرجع[۱۸] که در آن از خروجی فیدبک گرفته می‌شود، برتری دارد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم کنترل LQR برای میرایی حرکت هیو شناور اثرسطحی برای انتقال ایمن افراد به توربین باد طراحی شد. نتایج شبیه‌سازی برای شرایط موج نامنظم و موج منظم با دامنه بزرگ و موج منظم با فرکانس بالا به دست آمد. در تمامی این شرایط، سیستم کنترل LQR دارای میرایی بیش از ۹۵ درصد بود. همچنین، نتایج برای سیستم کنترل PID نیز ارائه شد و در نمامی موارد سیستم کنترل LQR دارای عملکرد بهتری نسبت به روش PID بود. در انتها برای اعتبارسنجی نتایج، سیستم کنترل LQR با سیستم کنترل PD مقایسه شد. نتایج نشان داد که روش کنترلی LQR نسبت به PD از قوام و سرعت بالاتری برخوردار بوده و توانسته است به‌خوبی حرکت هیو را میرا کند. همچنین، با توجه به عملکرد خوب سیستم کنترل، می‌توان این ادعا را کرد که محدود به حرکت هیو نیست و می‌تواند برای هر وضعیتی که در آن میرایی حرکت در موج مدنظر باشد استفاده شود.

کلید واژگان

1- LQR (Linear-Quadratic Regulator)
2- Propotional- derivative system control
3- Louver
4- Louver Area
5- Seastate
6- Beaufort
7- Rissanen

مراجع

1- T. I. Fossen, (1994), *Guidance and control of ocean vehicles*: John Wiley & Sons Inc.
2- P. Kaplan and S. Davis, (1978), *System analysis techniques for designing ride control system for SES craft in waves*, in 5th Ship Contr. Syst. Symp..
3- A. Sorensen, S. Steen, and O. Faltinsen, (1993), *SES dynamics in the vertical plane*.
4- O. M. Faltinsen, (2005), *Hydrodynamics of high-speed marine vehicles*: Cambridge university press,.
5- A. Sørensen, (1993), *Modelling and Control of SES Dynamics in the Vertical Plane*, in Dr. Ing. Thesis, ed: Department of Engineering Cybernetics, the Norwegien Institute of Technology.
6- Ø. F. Auestad, J. T. Gravdahl, A. J. Sørensen, and T. H. Espeland, (2014), *Motion Compensation System for a Free Floating Surface Effect Ship*.
7- H. I. Basturk and M. Krstic, (2013), *Adaptive wave cancelation by acceleration feedback for ramp-connected air cushion-actuated surface effect ships*, Automatica, vol. 49, pp. 2591-2602.
8- H. Basturk, B. Rosenthal, and M. Krstic, (2015), *Pitch Control Design for Tandem Lifting Body Catamaran by Aft Lifting Body Actuation*, Control Systems Technology, IEEE Transactions on, vol. 23, pp. 700-707.
9- D. Bertin, S. Bittanti, and S. M. Savaresi, (2000), *Decoupled cushion control in ride control systems for air cushion catamarans*, Control Engineering Practice, vol. 8, pp. 191-203.
10- A. J. Sørensen and O. Egeland, (1995), *Design of ride control system for surface effect ships using dissipative control*,= Automatica, vol. 31, pp. 183-199.
11- Ø. F. Auestad, (2012), *Heave Control System For A Surface Effect Ship*.
12- N. Salvesen, E. Tuck, and O. Faltinsen, (1970), *Ship motions and sea loads*, Trans. SNAME, vol. 78, pp. 250-287,.
13- A. H. O. Ahmed, (2012), *Optimal Speed Control for Direct Current Motors Using Linear Quadratic Regulator*, Journal of Science and Technology, vol. 13.
14- EWEA Deep water (2013) - *the next step for offshore wind energy*, Tech. rep., European Wind Enery Association.
15- Auestad, Øyvind F., et al., (2015), *Boarding control system for improved accessibility to offshore wind turbines: Full-scale testing*. Control Engineering Practice 45: 207-218.
16- J. Rissanen, (1960), *Control system synthesis by analogue computer based on the 'genaalizcd hear feedback' concept*, presented at the Int Seminar on Analog Computation Applied to the Study of Chemical Recesses, Brussels, Belgium.
17- Sodeland, Per Sondre, (2015), *Combined Dynamic Positioning and Optimal Wave Frequency Motion Damping of Surface Effect Ship*.
18- Auestad, Øyvind, Jan Tommy Gravdahl, Asgeir Soerensen, and Trygve Halvorsen Espeland, (2013), *Simulator and control system design for a free floating surface effect ship at zero vessel speed*, In Intelligent Autonomous Vehicles, vol. 8, no. 1, pp. 67-72.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.8.4]