

# طراحی سیستم کنترل برای میرایی حرکت هیو شناور اثر سطحی با استفاده از روش رگولاتور مربعی خطی

احسان اسماعیلیان<sup>۱\*</sup>، بهزاد فرزنانگان<sup>۲</sup>، حمید ملکی زاده<sup>۳</sup>، حسن قاسمی<sup>۴</sup>، منوچهر فدوی<sup>۵</sup>، محمدباقر منهج<sup>۶</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی دریا دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ [ehsanmaelian@aut.ac.ir](mailto:ehsanmaelian@aut.ac.ir)

<sup>۲</sup> دکتری، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ [b.farzanegan@aut.ac.ir](mailto:b.farzanegan@aut.ac.ir)

<sup>۳</sup> دکتری، مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ [h.malekizadeh@srbiu.ac.ir](mailto:h.malekizadeh@srbiu.ac.ir)

<sup>۴</sup> استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ [gasemi@aut.ac.ir](mailto:gasemi@aut.ac.ir)

<sup>۵</sup> استادیار، دانشکده مهندسی دریا دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ [fadavie@aut.ac.ir](mailto:fadavie@aut.ac.ir)

<sup>۶</sup> استاد، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ [Menhaj@aut.ac.ir](mailto:Menhaj@aut.ac.ir)

## چکیده

## اطلاعات مقاله

در این مقاله، هدف کاهش حرکت بین شناور اثر سطحی و توربین باد برای انتقال ایمن تجهیزات و اشخاص از شناور به توربین باد می باشد. شناورهایی با این کاربرد نقش مهمی در بهره برداری و نگهداری توربین های باد دارند. برای این منظور، سیستم کنترل رگولاتور مربعی خطی<sup>۱</sup> برای میرایی حرکت هیو شناور اثر سطحی طراحی شده است. برای بررسی قابلیت سیستم کنترل طراحی شده، 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 ارزیابی شده، سیستم 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، به منظور 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 می باشد.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۰۸

کلمات کلیدی:

شناور اثر سطحی

حرکت هیو

روش رگولاتور مربعی خطی

توربین باد

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

Ehsan Esmailian<sup>1\*</sup>, Behzad Farzanegan<sup>2</sup>, Hamid Malekizadeh<sup>3</sup>, Hassan Ghassmi<sup>1</sup>, Manouchehr Fadavi Ardestani<sup>1</sup>, Mohammad Bagher Menhaj<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Marine Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup> 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

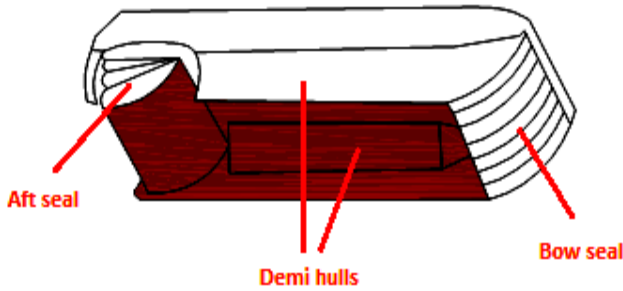
In this paper, the main goal is to reduce the heave motion between a surface effect ship (SES) and a wind turbine in order to safely transfer equipment and person to SES. For this purpose, an LQR control system is designed to damp the vertical motion of the surface effect ship in critical sea states 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.

## 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 سیستم‌های دریایی سیستم‌های کنترلی مختلف ارائه شده است [۱]. حرکت هیو به‌طور کامل در [۲،۳،۴] بررسی شده است. برلی کنترل از سیستم لوور<sup>۳</sup> متشکل از دو شیر در جلوی بالشتک هوا استفاده شده است [۵]. با باز و بسته شدن شیرها، جریان هوای داخل بالشتک کنترل می‌شود، 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 پیشنهادی دارای نتایج خوب بود، ولی پاسخگوی تمامی نیروهای خارجی وارد بر شناور نبود. با این وجود، سیستم کنترل مطرح شده 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 در صورتی که دارای سیستم کنترل مناسب باشد امکان دسترسی آسان اشخاص و انتقال تجهیزات به توربین باد را فراهم می‌کند [۱۵].

از بارزترین کارهای انجام شده 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 به صورت بهینه تعیین می‌کند تا عملکرد کنترلر بهینه گردد [۱۳].

این مقاله به صورت 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 طراحی شده 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. در نهایت 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 به صورت زیر بیان نمود:

$$(m + A_{33})\ddot{\zeta}_3(t) + B_{33}\dot{\zeta}_3(t) + C_{33}\zeta_3(t) - A_C P_C = F_3^e(t) \quad (1)$$

$$V_0(t) = K_0 \sin(\omega_e(t) + \phi) \quad (8)$$

و برای شرایط موج روبرو  $K_0$  می‌تواند به صورت زیر بیان شود

$$K_0 = A_c g \sin(KL/2)/(KL/2) \quad (9)$$

مشخصات فن هم با توجه به رابطه‌ی زیر مشخص می‌شود

$$q_{in}(t) = \rho_c(t) c_n(Q_0 + \left. \frac{\partial Q}{\partial P} \right|_{P_{c0}}) (P_c(t) - P_{c0}) \quad (10)$$

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:

$$q_{out}(t) = \rho_c(t) c_n \sqrt{\frac{2(P_c(t) - P_{c0})}{\rho_{c0}}} A_l \quad (11)$$

مساحت لوور هم به عنوان ورودی سیستم کنترل در نظر گرفته می‌شود

$$K_1 \dot{\mu}_u(t) + K_3 \mu_u(t) + \rho_{c0} A_c \dot{\eta}_3(t) = K_2 \Delta A_L(t) + \rho_{c0} \dot{V}_0(t) \quad (12)$$

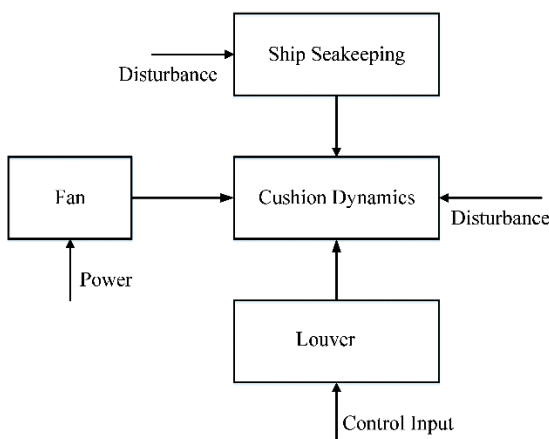
که در آن

$$K_1 = \frac{\rho_{c0} h_0 A_c}{\gamma(1 + \frac{P_a}{P_0})} \quad (13)$$

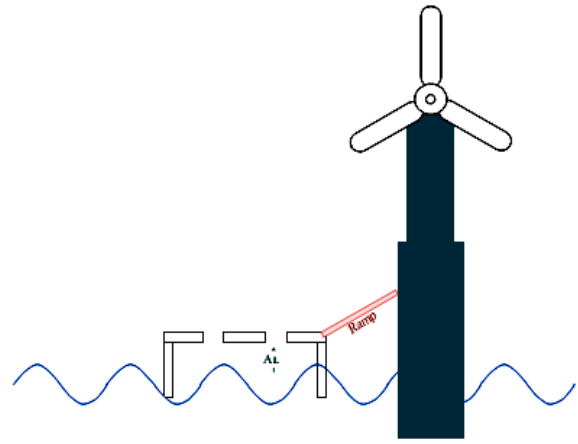
$$K_3 = \frac{\rho_{c0}}{2} (Q_0 - 2P_0 q \left. \frac{\partial Q_{in}}{\partial P} \right|_0)$$

## 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 داده شده است.



شکل ۳ - شماتیک عملکرد سیستم کنترل.



شکل ۲ - شناور اثرسطحی در انتقال به یک توربین باد از طریق رمپ.

که در آن  $P_c$ ،  $A_c$ ،  $\zeta_3$  به ترتیب معرف حرکت هیو، مساحت بالشتک و فشار اتمسفر می‌باشد. برای یک موج فرکانس تنها، نیروی خارجی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_3^e(t) = K_3^e \sin(\omega_e t + \phi) \quad (2)$$

که در آن

$$K_3^e = 2ge^{kd} \frac{\sin(\frac{KL}{2})}{\frac{KL}{2}} (C_{33} - \omega \omega_e A_{33} + \phi) \quad (3)$$

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

$$q_{in}(t) - q_{out}(t) = \frac{d}{dt} (\rho_c(t) V_c(t)) \quad (4)$$

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

$$\rho_c(t) = \frac{\rho_{c0}}{P_{c0}^{1/\gamma}} (P_c(t))^{1/\gamma} \quad (5)$$

که در آن  $\gamma$  گرمای ویژه هوا،  $\rho_c$  چگالی هوا در فشار تعادلی است. مشتق زمانی معادله (۴) به صورت زیر می‌باشد

$$\dot{\rho}_c(t) = \frac{\rho_{c0}}{\gamma P_{c0}^{1/\gamma}} (P_c(t))^{1/\gamma-1} \dot{P}_c(t) \quad (6)$$

حجم بالشتک هوا هم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_c(t) = A_c (h_0 + \zeta_3(t)) - V_0(t) \quad (7)$$

که در آن  $h_0$  ارتفاع بالشتک هوا برای هوای داخل بالشتک می‌باشد. بر اساس [۱۰]، برای یک موج فرکانس تنها معادله‌ی زیر ارائه می‌شود

می باشد و P در حقیقت یک ماتریس مثبت معین متقارن می باشد، که از حل معادله ریکاتی زیر محاسبه می شود:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (17)$$

بنابراین ماتریس بهره K به صورت زیر می تواند مورد استفاده قرار گیرد:

$$K = R^{-1}B^T P \quad (18)$$

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

$$\dot{x} = Ax - BKx = (A - BK)x \quad (19)$$

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 می آید.

### ۳- شبیه سازی

برای شبیه سازی سیستم و استفاده در قانون کنترل بهینه، از سیمولینک نرم افزار متلب استفاده شد. ابتدا شبیه سازی سیستم شناور اترسطحی در محیط سیمولینک انجام می شود. پارامترهای مورد نیاز شناور برای شبیه سازی 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	$۰.۱۹۴ \times ۱۰^۵$	$۰.۲۷۳ \times ۱۰^۵$
$B_{33}$	ضریب میرایی حرکت هیو	$۰.۲۳۵ \times ۱۰^۵$	$۰.۲۷۳ \times ۱۰^۵$
$C_{33}$	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
$\rho_{C0}$	چگالی اولیه	۱.۲۳	۱.۲۳
$P_a$	فشار اتمسفر	$[pa]$ $۱.۰۱ \times ۱۰^۵$	$[pa]$ $۱.۰۱ \times ۱۰^۵$

لوور به عنوان 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 می شود.

طراحی کنترل کننده بر پایه رگولاتور مربعی خطی در مسائل بهینه سازی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. فرض می کنیم تمامی متغیرهای حالت سیستم تحت بررسی برای فیدبک سیستم در دسترس باشند. برای طراحی کنترل کننده LQR لازم است مجموعه ای از حالت های سیستم که کنترل پذیر می باشند را در نظر بگیریم.

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

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (14)$$

که در آن بردار متغیرهای حالت دارای ابعاد n و بردار ورودی دارای ابعاد m می باشد. A ماتریس حالت های سیستم که یک ماتریس مربعی با رتبه n و ماتریس B ماتریس ورودی است. از این رو، شرط کنترل پذیری سیستم، کنترل پذیری جفت های (A, B) می باشد. در روش LQR، شاخص عملکرد را برای مینیمم کردن یک متغیر کاهش می دهیم. رسیدن به مقدار مینیمم آن متغیر به معنی پایان الگوریتم خواهد بود. برای طراحی کنترل کننده شاخص عملکرد (J) به صورت زیر تعریف می گردد:

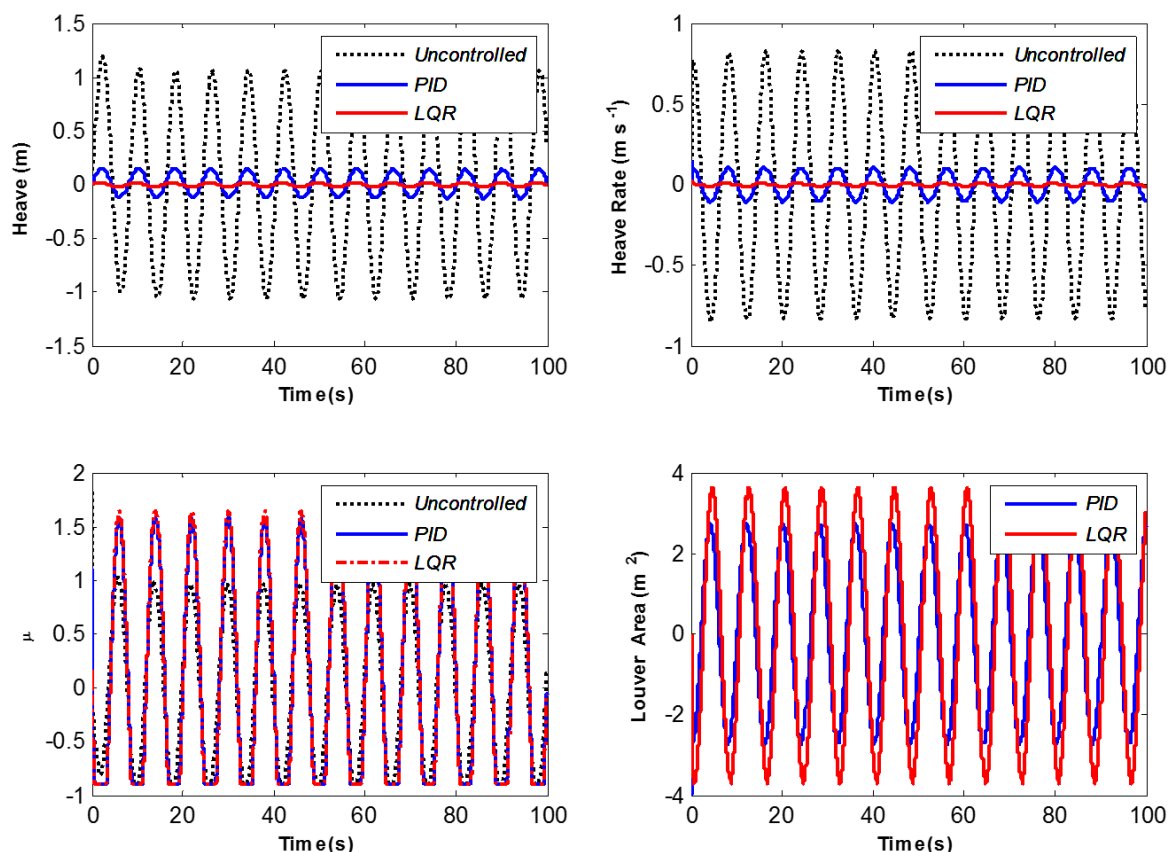
$$J = \int_0^{\infty} (x^T Qx + u^T Ru) dt \quad (15)$$

که در آن Q یک ماتریس نیمه معین مثبت به عنوان ماتریس وزنی حالت و دارای رتبه کامل n مربعی می باشد و R یک ماتریس معین مثبت به عنوان ماتریس وزنی کنترل سیستم و دارای رتبه کامل m مربعی می باشد. مقادیر این ماتریس ها به متغیرهای حالت و ورودی سیستم وابسته می باشد. از این رو مهم ترین مسئله در طراحی کنترل کننده LQR، تنظیم دقیق این دو ماتریس برای رسیدن به یک نقطه بهینه و مینیمم سازی شاخص عملکرد می باشد.

مسئله رگولاتور بهینه خطی مربعی در حقیقت پیدا کردن یک قانون کنترلی بهینه برای ورودی u می باشد تا شاخص عملکرد را بر اساس ماتریس های Q و R مینیمم نماید. از این رو، قانون کنترلی حلقه بسته بهینه به صورت زیر تعریف می گردد:

$$u^* = -Kx \quad (16)$$

که در آن K ماتریس بهره بهینه فیدبک برای سیستم می باشد که با انتخاب و تنظیم آن قطب های سیستم حلقه بسته به گونه ای تنظیم می گردند تا شاخص عملکرد سیستم بهینه و مینیمم شود. در حقیقت ماتریس بهره کنترلی، به ماتریس های A, B, Q, R وابسته می باشد. دو معادله اصلی وجود دارد که هدف آن ها محاسبه این بهره کنترلی



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

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 می‌شود، در حالتی که سیستم کنترل خاموش است، نیروی تحریک باعث ایجاد نرخ هیو  $0/73$  متر بر ثانیه در شناور شده است و نتایج بعد از زمان  $100$  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)	$0/73$	$0/11$
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 به صورت زیر تعریف می‌شود و معرف تغییرات فشار در داخل بالشک است

$$\mu = \frac{P_u - P_0}{P_0} \quad (20)$$

#### ۴-۱-۳ پیاده‌سازی سیستم کنترل در موج منظم با دامنه بزرگ

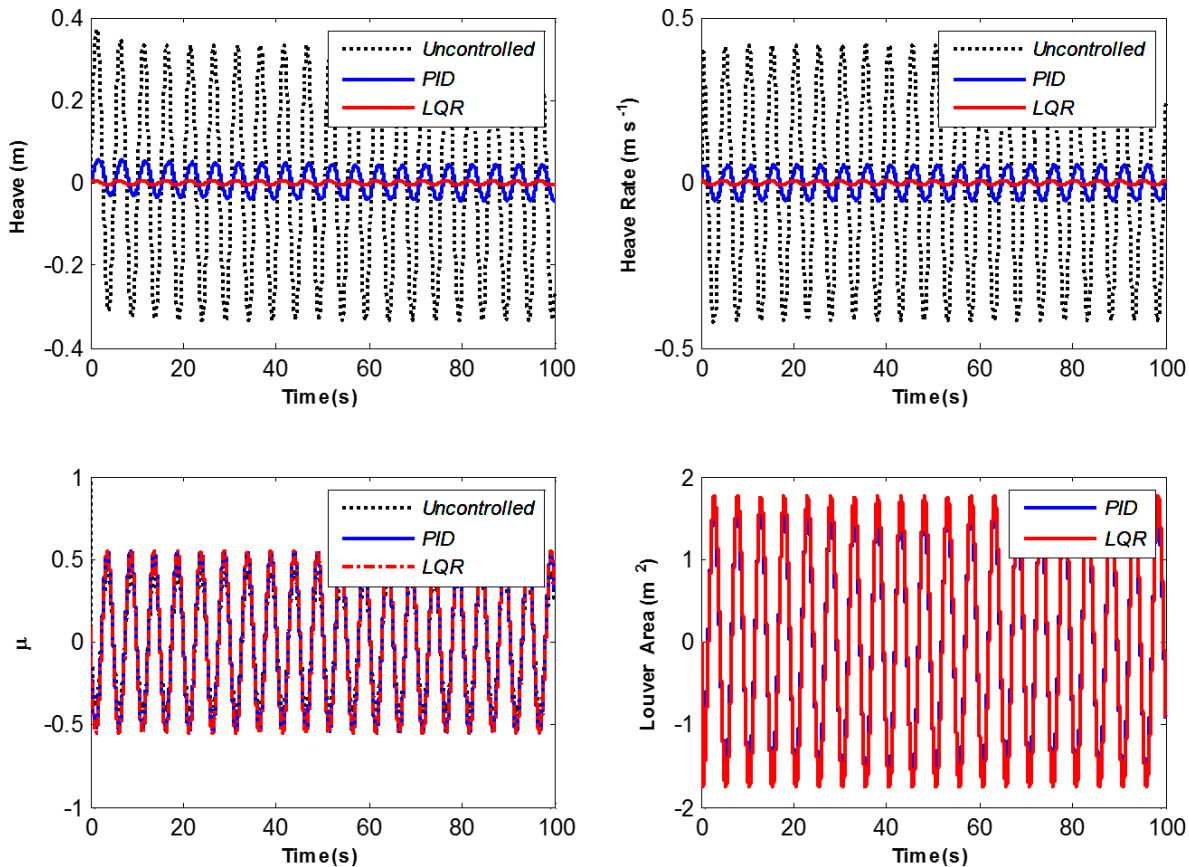
در این قسمت شبیه‌سازی برای موج منظم با فرکانس  $\omega_w = 0785 \text{ rad/s}$  و دامنه موج  $1m$  انجام می‌شود. در چنین وضعیتی شناورهای معمولی که برای بازیابی توربین باد و انتقال بار در دریا طراحی شده‌اند و دارای سیستم کنترل نیستند، به خاطر ارتفاع بزرگ موج، قادر به انجام هیچ‌گونه مأموریتی نمی‌باشند. در این قسمت نتایج برای حرکت هیو و نرخ هیو، بدون لحاظ سیستم کنترل و با همچنین با لحاظ سیستم کنترل با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

#### ۴-۱-۴ 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  $0/93$  متر در شناور شده است و نتایج بعد از زمان  $100$  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)	$0/93$	$0/15$
درصد میرایی	-	۹۸



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

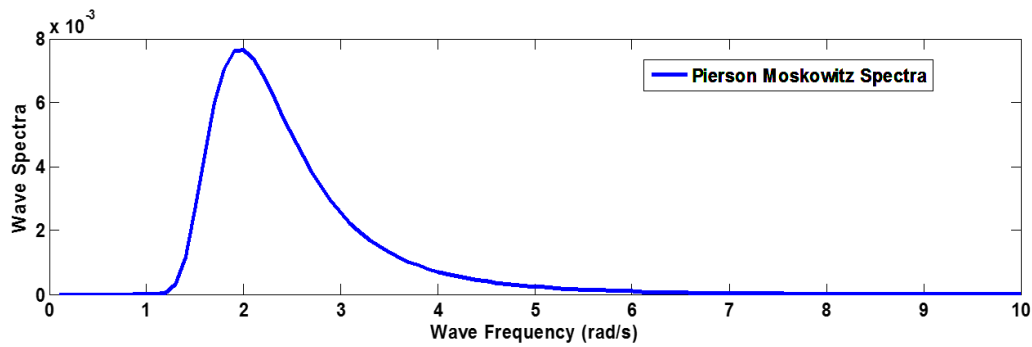
که در آن فشار اضافی ناشی از تغییر شرایط بالشتک به خاطر وجود اغتشاش است.  $P_o$  فشار اولیه بالشتک است همچنین مساحت لوور<sup>۴</sup> به عنوان به عنوان ورودی سیستم کنترل در نظر گرفته می‌شود. در اینجا، حداکثر مساحت لوور ۰/۱۵ مساحت عرشه در نظر گرفته شده است.

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

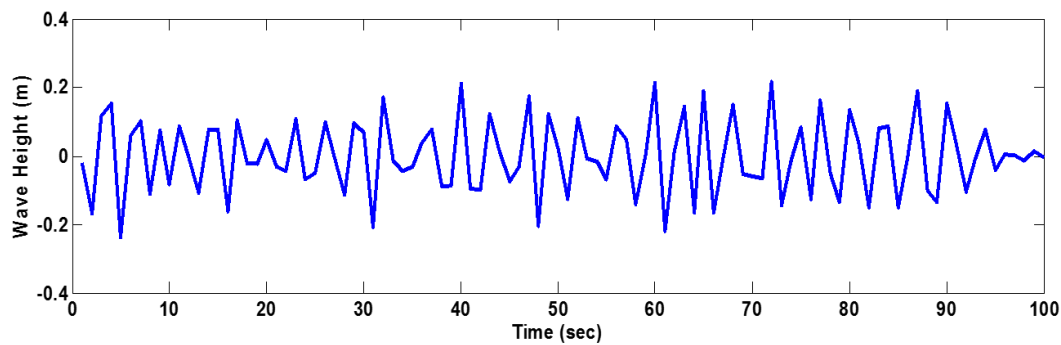
در این قسمت شبیه‌سازی برای موج منظم با  $\omega_w = 1.25 \text{ rad/s}$  و دامنه موج  $0.5 \text{ m}$  انجام می‌شود. در این وضعیت اگرچه ارتفاع موج نسبت به شرایط موج منظم در شبیه‌سازی قبل، کوچک‌تر است، ولی فرکانس آن بزرگ‌تر است و فرکانس بالای امواج باعث افزایش نیروهای اینرسی وارد بر شناور و شتابها می‌شود. پارامترهای موردنیاز شناور در این حالت، در جدول ۱ ارائه شده است.

#### ۴-۲-۱ حرکت هیو

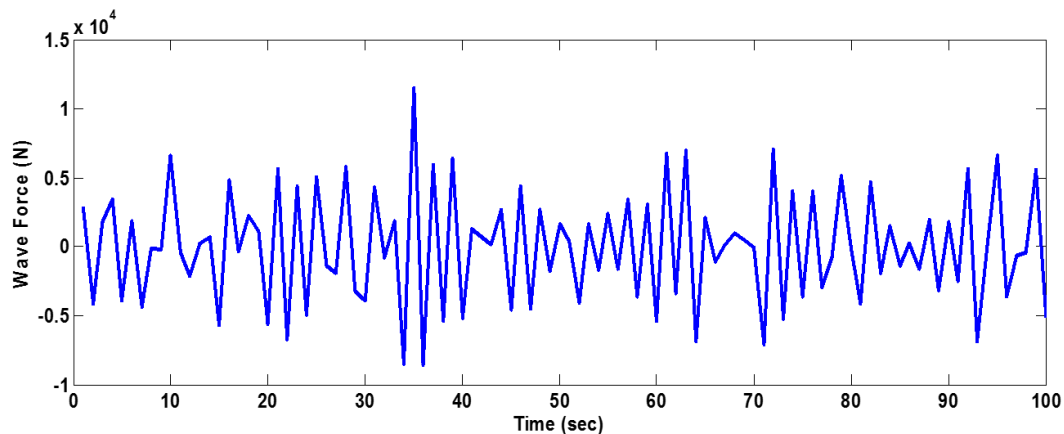
در شکل ۵ نتایج مربوط به حرکت هیو مشاهده می‌شود. در حالی که سیستم کنترل خاموش است، نیروی تحریک باعث ایجاد حرکت هیو ۰/۳۴ متر در شناور شده است و نتایج بعد از زمان ۱۰۰ ثانیه و نسبت میرایی در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۶ - نمودار طیف پیرسون- موسکوویچ بر حسب فرکانس موج برای  $U_{19.5} = 5 \text{ ms}^{-1}$ .



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



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 به صورت زیر نوشت:

$$\zeta = \sum_{j=1}^N A_j \sin(\omega_j t - k_j x + \varepsilon_j) \quad (21)$$

که در آن زاویه فاز،  $\varepsilon_j$ ، به صورت یکنواخت بین  $0$  تا  $2\pi$  تغییر می‌کند. رابطه‌ی بین طیف موج و ارتفاع را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{1}{2} A_j^2 = S(\omega_j) \Delta \omega \quad (22)$$

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- موسکوویچ به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$S_p(\omega) = \frac{8.1 \times 10^{-3} g^2}{\omega^5} \exp \left[ -\beta \left( \frac{\omega_o}{\omega} \right)^4 \right] \quad (23)$$

که در آن  $\omega_o = g/U_{19.5}$  فرکانس پیک طیف و  $\beta = 1.25$  است. همچنین،  $U_{19.5} = 5 \text{ m/s}$  در نظر گرفته می‌شود که متناظر با شرایط دریایی ۳ بر اساس جدول بیوفورت<sup>۶</sup> می‌باشد [۲۶]. در شکل ۶ نمودار طیف ارائه شده است. ارتفاع موج مربوط به طیف برای محدوده فرکانسی  $0$  تا  $3$  رادیان بر ثانیه در شکل ۷ ارائه شده است. همچنین،

#### ۴-۳-۱ حرکت هیو

در شکل ۹ نتایج مربوط به حرکت هیو مشاهده می‌شود. در حالی 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.

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

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

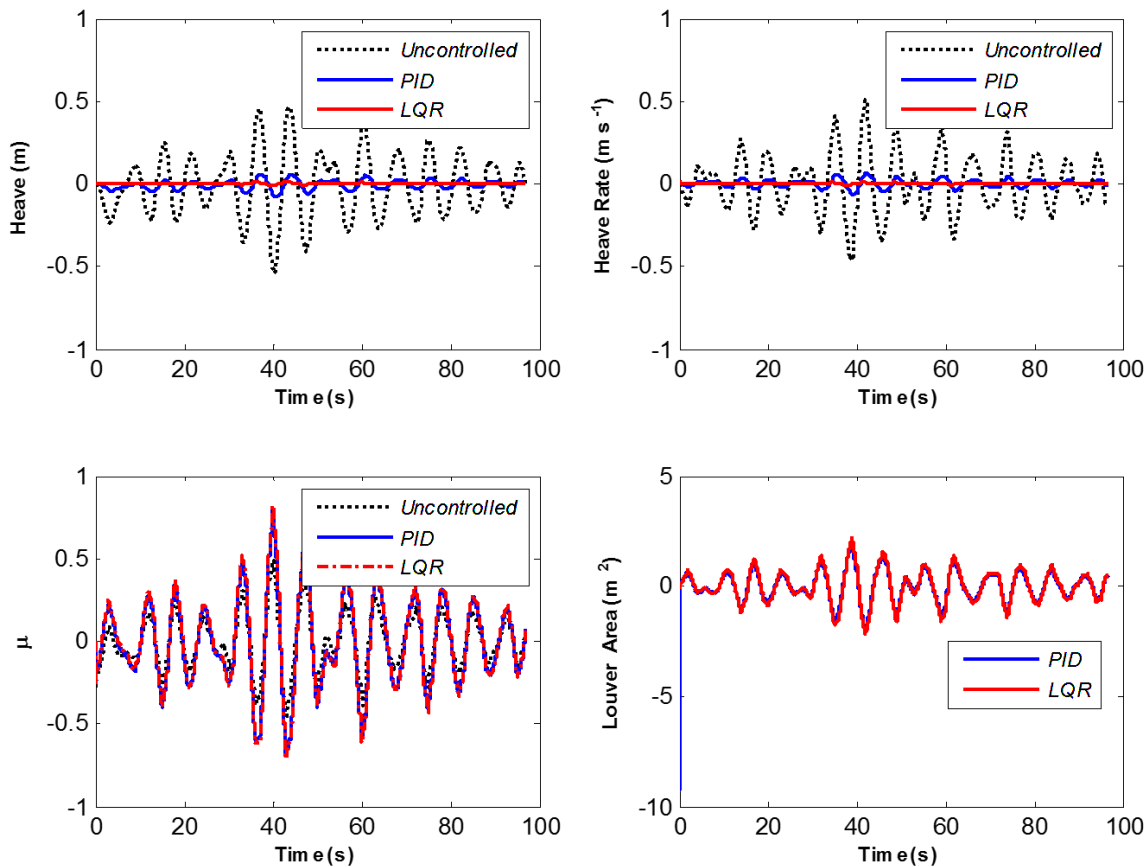
#### ۴-۳-۲ نرخ هیو

در شکل ۹ نتایج مربوط به حرکت هیو مشاهده می‌شود. در حالی 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.

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:

$$A_i = 2\sqrt{S(\omega_0 + 0.03i)0.03} \quad (24)$$

که در آن  $i = 1, \dots, 100$ . فاز موج  $\varepsilon_i$  به صورت تصادفی بین  $\varepsilon_i$  و  $2\pi$  می‌باشد. از مقادیر جدول ۱ برای محاسبه پارامترهای شناور استفاده شد. فرض شد که شناور در فرکانس‌های بالا حرکت می‌کند. از این رو، 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 در نتیجه 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.



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

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

همان طور 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 به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\zeta = A \sin(\omega t - kx + \varepsilon) \quad (25)$$

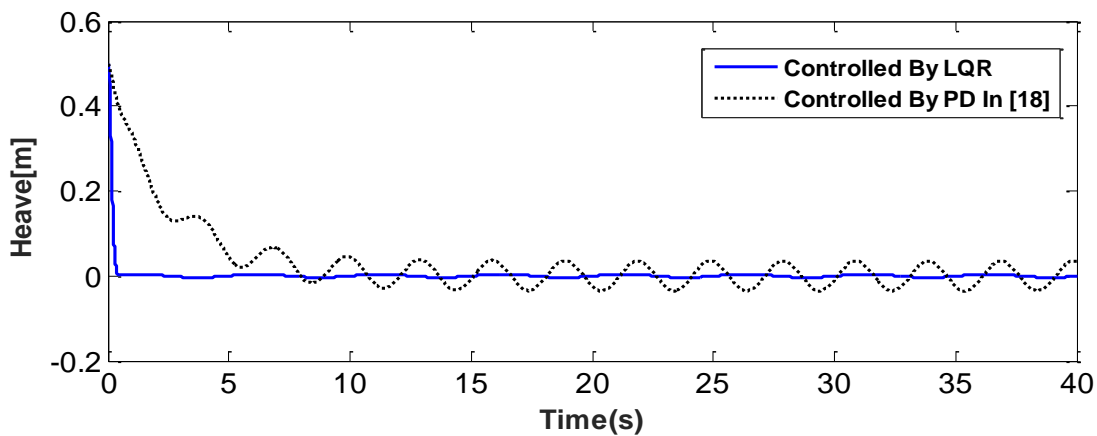
که در آن  $A$ ،  $k$ ،  $\varepsilon$  به ترتیب دامنه، عدد و فاز موج می‌باشد. شبیه‌سازی برای یک موج منظم دلخواه با ارتفاع  $H = 2m$  و فرکانس  $\omega = 2\pi/3$  انجام می‌شود.

#### ۵-۱ نرخ هیو

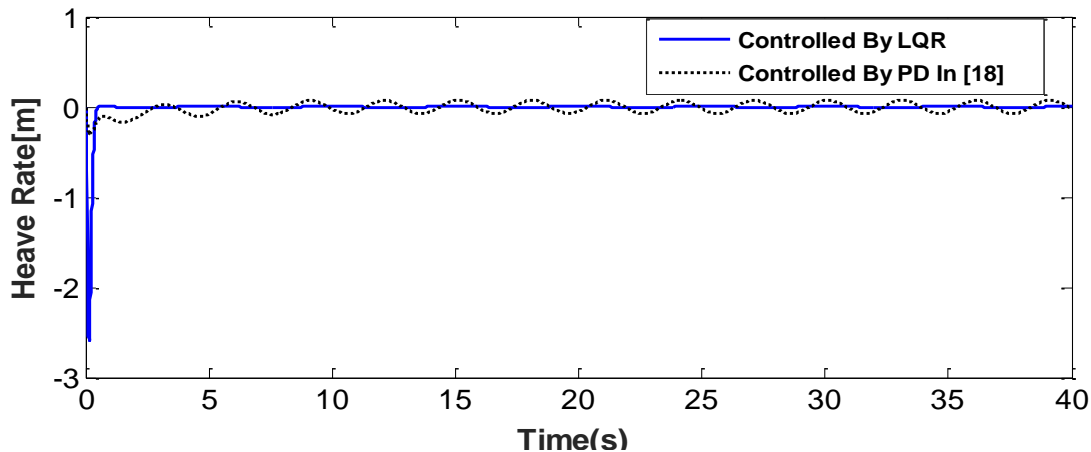
در شکل ۱۰ نتایج مربوط به نرخ هیو مشاهده می‌شود. این نمودار نیز نشان‌دهنده این است که نرخ هیو بعد از فعال شدن سیستم کنترل به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است و مقدار حرکت هیو را تقریباً به صفر تغییر می‌دهد. همچنین، همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، روش LQR دارای زمان نشست کمتری نسبت به روش PD است.

#### ۵-۲ حرکت هیو

در شکل ۱۱ نتایج مربوط به حرکت هیو مشاهده می‌شود. در حالی 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 به صورت شکل ۱۱ است. همان طور 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 طراحی شده در [۱۸].



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

- 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 Norwegian 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 Energy 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 'generalized hear feedback' concept*, presented at the Int Seminar on Analog Computation Applied to the Study of Chemical Reactions, 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.

در ضمن، بر اساس نتایج ریسانن<sup>۶</sup> 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 به جای فیدبک خروجی و مشتقات آن می‌توان به شرط کنترل پذیری سیستم آن را پایدار کرد و به هر معادله مشخصه مطلوب حلقه بسته-ای دست پیدا کرد. از این رو، از آنجاکه در سیستم کنترل رگولاتور مربعی خطی از متغیرهای حالت برای فیدبک گرفتن استفاده می‌شود، 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 تمامی 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 به خوبی 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- Proportional- 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*.