

# پایداری و وسیله ابرحفره‌ساز در مود عمق با استفاده از روش تنظیم کننده خطی مجدوری (LQR) و تخمینگرهای EKF و UKF

طاهره جهانپور<sup>۱</sup>، سید محمد بزرگ<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، talisky1369@yahoo.com

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، bozorg@yazd.ac.ir

دریافت: 1396/2/24 ویرایش اول: 1396/5/23 پذیرش: 1396/6/14

**چکیده:** این مقاله به دو موضوع پایداری و وسایل ابر حفره ساز در مود عمق و تخمین متغیرهای حالت برای اجرای کنترل کننده طراحی شده می‌پردازد. ابتدا با بهره گیری از تئوری خطی سازی با پسخور، مدل غیر خطی، خطی سازی و سپس برای پایدار کردن مدل کنترل کننده ای بر مبنای روش LQR طراحی شده است. این روش نیاز به پسخور همه متغیرهای حالت دارد، در حالی که در عمل، اندازه گیری همه متغیرهای حالت ممکن نیست و لازمست داده های حسگرهای موجود با خروجی های مدل سیستم ترکیب کرد تا به تخمینی قابل قبول از مقدار متغیرهای حالت سیستم دست یافت. در این مقاله با ترکیب خروجی های مدل و داده های حسگرها با استفاده از فیلترهای EKF و UKF به تخمین متغیرهای حالت وسیله و استفاده از آنها در کنترل بهینه حرکت وسیله در مود عمق پرداخته شده است. در شبیه سازی های انجام شده با مدل غیر خطی سیستم نشان داده شده است که دو فیلتر توانایی تخمین مناسب متغیرهای حالت به منظور پایداری سیستم و رد اغتشاشات را دارد و هر یک از فیلترها در تخمین برخی از متغیرها بهتر عمل می کنند. در شبیه سازی عملکرد کنترل کننده های طراحی شده، نکات عملی مانند اشباع شدن عمل کننده ها و نحوه جبران آنها در نظر گرفته شده و توانایی کنترل کننده در پایداری وسیله نشان داده شده است.

**کلمات کلیدی:** روش تنظیم کننده خطی مجدوری، وسایل ابرحفره ساز، UKF، EKF.

## Stabilization of a Supercavitating Vehicle in Depth Mode using Linear Quadratic Regulator Method and EKF and UKF Estimators

Mohammad Bozorg, Tahere Jahanpour

**Abstract:** In this paper, two main subjects are dealt with: stabilization of supercavitating vehicles in depth mode and estimating the state variables of the vehicle in order to control the vehicle in this mode. Using the feedback linearization method, the model of the system is linearized and a linear quadratic regulator is designed for the system to stabilize it. This method needs to feedback all states of the system, while measuring all the states is practically infeasible. Then, it is needed to estimate some of the states using the model of the system and the sensor measurements. This is performed here using two well-known filters of EKF and UKF. Through simulations, it is shown that both filters can estimate the states of the system in the depth mode, stabilize the vehicle in this mode and reject the disturbances. It is observed that each filter can estimate some of the states more accurately. In simulations, the performances of the designed controllers are examined, practical issues like actuator saturation are taken into account and the ability of the controllers to stabilize the vehicle is demonstrated.

**Keywords:** Linear Quadratic Regulator, Supercavitating Vehicle, EKF, UKF.

## ۱- مقدمه

وقتی وسیله زیرآبی داخل آب حرکت می‌کند لایه‌ای از آب پیرامون بدنه به آن می‌چسبد و با لزجت خود نیروی اصطکاکی را ایجاد می‌کند که عامل کاهش سرعت در وسایل زیرآبی محسوب می‌شود. ابرحفره‌سازها<sup>۱</sup> با ایجاد حفره‌ی گازی توسط حفره‌ساز<sup>۲</sup> در پیرامون بدنه با کاهش نیروی اصطکاکی سرعت را می‌توانند تا  $80 m/s$  ارتقا دهند. در این وسایل تماس بیشتر قسمت‌های بدنه بجز حفره ساز در دماغه و بخشی از قسمت‌های خارجی بالک‌ها با محیط آبی قطع می‌شود و این دلیل کاهش نیروی اصطکاکی است. زمانی که قسمت انتهایی این وسایل از ناحیه حفره خارج می‌شود از طرف آب نیروی بزرگ بازگرداننده‌ای تحت عنوان نیروی صفحه‌ای<sup>۳</sup> به آن وارد می‌شود. این وسایل نسبت به وسایل زیرآبی معمولی به علت ماهیت غیرخطی نیروهای حفره‌ساز، بالک‌ها و صفحه‌های چالش-های بیشتری را در دینامیک و کنترل مطرح می‌کنند. بسته به شکل حفره-ساز، ابعاد و میزان غوطه‌وری بالک‌ها، بدنه می‌تواند به صورت ذاتی پایدار یا ناپایدار باشد. حتی اگر بدنه پایدار باشد زمانی که بدنه در تماس با آب است به علت وجود نیروی صفحه‌ای هیچگونه ضمانتی برای پایداری وسیله وجود ندارد. مدل دینامیکی این وسایل در [۱]، [۲]، [۳] و [۴] مطالعه شده است. در [۳] داده‌های تجربی گسترده‌ای برای توصیف نیروهای هیدرودینامیکی مرتبط با اشکال مختلف وسایل ابر حفره‌ساز ارائه شده است که ضرایب لیفت و درگ بصورت مقادیری در جدول فراهم شده‌اند. مدل‌های دیگر لیفت و درگ در [۱] وجود دارند. استخراج روابط حاکم بر حرکت در مود عمق<sup>۴</sup> در [۵] صورت گرفته است. همچنین کنترل کننده-ی پسخور با بهره‌گیری از حفره ساز و بالک‌ها به عنوان ورودی‌های کنترلی طراحی و مدل پایدار شده است. در [۶] برای هدایت و کنترل وسیله از روش برنامه‌ی پویا<sup>۵</sup> برای طرح ریزی مسیر استفاده شده است. در [۷] و [۸] قانون کلید زدن<sup>۶</sup> بین کنترل کننده‌های پسخور خطی‌ساز برای مدل‌های با نیروی صفحه‌ای و بدون این نیرو طراحی و مدل پایدار شده است. تحلیل دو تابعی با ضابطه‌ی عدد حفره در [۹]، [۱۰] و [۱۱] بررسی شده‌اند. در [۱۲] کنترل کننده‌های برگشت به عقب<sup>۷</sup> و دو کنترل کننده که پایداری مطلق<sup>۸</sup> را با در نظر گرفتن نیروی صفحه‌ای به عنوان قطاع محدود شده‌ی نامعینی‌ها فراهم می‌کنند طراحی شده است. در [۱۳] کنترل کننده مقاوم با در نظر گرفتن تأخیر زمانی در مدل، طراحی و کنترل کننده

در برابر نامعینی‌های پارامترهای مدل مقاوم شده است. در [۱۴] کنترل-کننده‌های LQR<sup>۹</sup> و برگشت به عقب پیشنهاد شده با فیلترهای انتگرالی طراحی و مقاوم بودن این دو کنترل کننده در برابر نامعینی پارامترها مقایسه شده است. در [۱۵] ضریب کارایی بالک‌ها نسبت به حفره ساز ثابت در نظر گرفته نشده است و یک قانون تطبیقی<sup>۱۰</sup> برای تخمین این پارامتر طراحی شده است. در [۱۶] از روش برگشت به عقب برای پایدارسازی یک وسیله ابرحفره ساز استفاده شده است. در [۱۷] سیستم به دو حلقه‌ی داخلی سریع و خارجی کند در زمینه‌ی پاسخ تقسیم بندی شده است و سپس از پسخور کنترلی در هر یک از حلقه‌های مجزا شده برای پایدارسازی مدهای فرکانسی بالا و پایین استفاده شده است.

در [۱۸] کنترل کننده‌های مود لغزشی<sup>۱۱</sup> و LPV-H<sub>∞</sub> با هدف مقاوم بودن کنترل کننده، طراحی شده است. همچنین با توجه به اینکه سرعت جانبی به صورت مستقیم قابل مشاهده نیست از مشاهده‌گری تحت عنوان بهره سریع<sup>۱۲</sup> برای تخمین آن استفاده شده است که در طراحی آن سایر متغیرهای اندازه‌گیری شده دقیق فرض شده‌اند.

در پژوهش‌هایی که در بالا به آنها اشاره شده است، فرض شده است که تمامی متغیرهای حالت بصورت دقیق در دسترس هستند و یا اینکه برخی از آنها بصورت دقیق قابل اندازه‌گیری هستند و از مشاهده‌گرهایی با مدلی ساده شده برای تخمین سایر متغیرها استفاده شده است. این کار باعث عدم مقاوم بودن تخمین‌گر در برابر نامعینی‌های مدل دینامیکی و نویز اندازه‌گیری شده و عدم کارایی کنترل کننده برای اجرا روی سیستم واقعی را به همراه دارد.

در این مقاله، ابتدا مدل غیرخطی با روش خطی‌سازی با پسخور، خطی و سپس از کنترل کننده LQR برای پایدارسازی حرکت وسیله در مود عمق استفاده شده است. برای تولید ورودی‌های کنترلی (زاویه چرخش حفره ساز و بالک‌ها) به منظور پایدارسازی حرکت وسیله در مود عمق، نیاز به پسخور همه متغیرهای حالت حرکتی وسیله شامل عمق، زاویه‌ی چرخش، سرعت جانبی و سرعت زاویه‌ای است، در حالی که همیشه اندازه‌گیری همه متغیرهای حالت ممکن نیست. از طرفی، با توجه به اغتشاشات و نامعینی‌ها در دینامیک وسیله نمی‌توان به معادلات دینامیکی استخراج شده بسنده کرد و متغیرهای حالت را با حل عددی معادلات دیفرانسیل در زمان جلو برد، زیرا این کار باعث انباشتگی خطاهای متغیرها می‌شود. از طرفی، در مود حرکتی عمق، در عمل اندازه‌گیری عمق، زاویه چرخش و سرعت زاویه‌ای ممکن است و اندازه‌گیری سرعت خطی جانبی وسیله، به دلیل

<sup>۱</sup> Absolute stability<sup>۹</sup> Linear Quadratic Regulator<sup>۱۰</sup> Adaptive law<sup>۱۱</sup> Sliding mode<sup>۱۲</sup> High gain observer<sup>۱</sup> Super cavitating<sup>۲</sup> Cavitator<sup>۳</sup> Planning force<sup>۴</sup> Depth mode<sup>۵</sup> Dynamic Planning<sup>۶</sup> Switching<sup>۷</sup> Back stepping

$$F_{bz} = m_v(\dot{w} - x_g \dot{q} - qV) \quad (1)$$

$$I_{yy} \dot{q} = M + m_v x_g (\dot{w} - qV) \quad (2)$$

که در معادله نیرو (۱)، عبارت و در معادله گشتاور (۲)، عبارت ناشی از قرار گرفتن مبدأ دستگاه X-Z در مرکز فشار حفره‌ساز است. روابط (۱) و (۲) را می‌توان بصورت ماتریسی زیر بازنویسی کرد.

$$\begin{bmatrix} m_v & -m_v x_g \\ -m_v x_g & I_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = qV \begin{bmatrix} m_v \\ -m_v x_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{bz} \\ M \end{bmatrix} \quad (3)$$

معادلات حرکت با استفاده از معادلات سینماتیکی زیر برای عمق (Z) و زاویه چرخش ( $\theta$ ) تکمیل میشوند:

$$\dot{z} = w \cos \theta - V \sin \theta \quad (4)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (5)$$

در رابطه (۳) جرم بدنه ( $m_v$ )، ممان اینرسی بدنه ( $I_{yy}$ ) و فاصله مرکز جرم بدنه تا حفره ساز ( $x_g$ )، بصورت زیر هستند:

$$m_v = \frac{7}{9} (\rho_w \pi) R^2 L \quad (6)$$

$$I_{yy} = I_{yy}(con) + I_{yy}(cy) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{11}{60} (\rho_w \pi) R^4 L + \frac{133}{405} (\rho_w \pi) R^2 L^3 \\ &x_g = \frac{-17}{28} L \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن چگالی آب،  $m$  نسبت چگالی بدنه به آب،  $R$  شعاع و  $L$  طول بدنه می‌باشند.

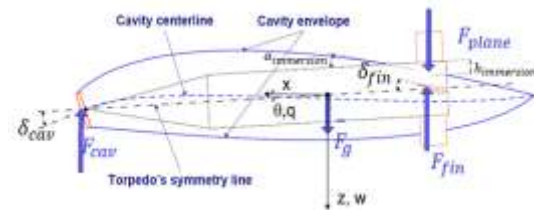
## ۲-۱ نیرو و گشتاور حفره‌ساز

حفره‌ساز به صورت دیسکی با ضریب درگ در نظر گرفته می‌شود که در آن، ضریب درگ حفره‌ساز در زاویه حمله صفر و  $\sigma$  عدد حفره<sup>۱۵</sup> است. شکل (۲) نشان دهنده نیروهای لیفت و درگ وارد بر حفره‌ساز است که بصورت زیر هستند:

هزینه‌های این حسگرها و نیز لزوم استفاده از سونار که مستلزم ارسال سیگنال صوتی و آشکار شدن است، در بسیاری از کاربردها ممکن نیست. از این رو، لازمست داده‌های حسگرهای موجود را با خروجی‌های مدل سیستم ترکیب کرد تا به تخمینی قابل قبول از مقدار متغیرهای حالت سیستم دست یافت. از طرفی اندازه‌گیری‌های حسگرها نیز خود دارای نویز هستند. از این رو، در این مقاله با ترکیب خروجی‌های مدل و داده‌های حسگرها با استفاده از فیلترهای <sup>۱۳</sup>EKF و <sup>۱۴</sup>UKF به تخمین متغیرهای حالت وسیله و استفاده از آنها در کنترل بهینه حرکت وسیله در مود عمق پرداخته شده است. نکات عملی مانند اشباع شدن عمل‌کننده‌ها و نحوه جبران آنها در نظر گرفته شده است و عملکرد سیستم طراحی شده روی مدل غیرخطی وسیله مورد بررسی قرار گرفته و توانایی کنترل‌کننده در پایداری و نیز رد اغتشاشات بررسی شده است. در این مقاله، پس از این مقدمه، در بخش ۲ به بیان معادلات دینامیکی و سینماتیکی حاکم بر حرکت پرداخته شده است. در بخش ۳، طراحی کنترل‌کننده LQR با استفاده از خطی‌سازی با پس‌خور و در نظر گرفتن جبران‌کننده برای کاهش اثر محدودیت عملگرهای ورودی‌ها انجام شده است. در بخش ۴، فیلترهای مورد استفاده و ملاک مقایسه کارایی فیلترها معرفی شده‌اند. در بخش ۵، کارایی فیلترها و کنترل‌کننده طراحی شده در پایداری سیستم واقعی، بررسی شده است.

## ۲- معادلات حاکم بر حرکت وسیله در مود عمق

معادلات دینامیکی وسیله ابر حفره‌ساز در مود عمق در دستگامی که مرکز آن در مرکز فشار حفره‌ساز قرار گرفته است، بیان شده است. به گونه‌ای که محور X در راستای محور تقارن وسیله و محور Z به سمت کف دریاست. نیروهای وارد در راستای z، ورودی‌های کنترلی و متغیرهای حالت  $\theta$ ، z، w و q است. بدنه از دو قسمت مخروطی و استوانه‌ای که طول قسمت استوانه‌ای آن دو برابر بخش مخروطی است تشکیل شده است. معادلات حاکم بر حرکت یک وسیله نمونه از [۵] استفاده شده‌اند.



شکل (۱): نیروها، ورودی‌های کنترلی و متغیرهای حالت وسیله مدل شده [۸]

با فرض ثابت بودن سرعت رو به جلوی وسیله ( $V$ ) و جرم آن، معادلات دینامیکی وسیله در صفحه‌ی طولی بصورت زیر هستند:

<sup>۱۵</sup> Cavity number

<sup>۱۳</sup> Extended Kalman Filter

<sup>۱۴</sup> Unscented Kalman Filter

علت ایجاد این نیرو بزرگتر بودن ابعاد بدنه از ناحیه ایجاد شده توسط حفره‌ساز است، که باعث تماس و عکس‌العمل بین بخش انتهایی بدنه و سیال می‌شود. برای این نیرو از مدل [۱۹] بصورت زیر استفاده شده است:

$$F_{plane}^z = -\pi \rho R_c^2 V^2 \sin \alpha_{imm} \cos \alpha_{imm} \left( \frac{1 + h_{imm}}{1 + 2h_{imm}} \right) \left[ 1 - \left( \frac{R'}{R' + h_{imm}} \right)^2 \right] \quad (17)$$

که در (۱۷)،  $R_c$  شعاع حفره و  $\dot{R}_c$  نرخ کاهش شعاع حفره نسبت به فاصله از حفره‌ساز در محل نیروی صفحه‌ای است که با روابط زیر بدست می‌آیند:

$$R_c = R_n \left[ 0.82 \left( \frac{1 + \sigma}{\sigma} \right) \right]^{1/2} k_2 \quad (18)$$

$$\dot{R}_c = \frac{-20}{17} (0.82 \frac{1 + \sigma}{\sigma})^{1/2} V \left( 1 - \frac{4.5\sigma}{1 + \sigma} \right) k_1^{23/17} = \frac{k_2 \left( \frac{1.92}{\sigma} - 3 \right)}{k_2 \left( \frac{1.92}{\sigma} - 3 \right)} \quad (19)$$

که در روابط (۱۹) و (۲۰)، و (۲) بصورت زیر هستند:

$$k_1 = \frac{L}{R_n} \left( \frac{1.92}{\sigma} - 3 \right)^{-1} - 1 \quad (20)$$

$$k_2 = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{4.5\sigma}{1 + \sigma} \right) k_1^{40/17} \right]^{1/2} \quad (21)$$

همچنین در رابطه (۱۷)، فرورفتگی نرمال شده که مربوط به عمق نفوذ بدنه در آب است و زاویه حمله که مربوط به زاویه‌ای است که سطح بدنه با دیواره حفره می‌سازد (شکل (۱)) و از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

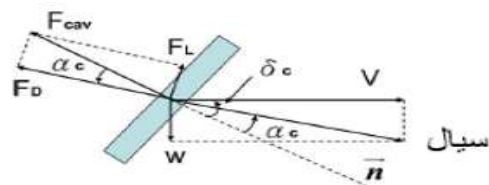
$$h_{imm} = \begin{cases} 0, & R' > \left( \frac{L}{R} \right) \left| \frac{w}{V} \right| \\ \left( \frac{L}{R} \right) \left| \frac{w}{V} \right| - R', & \text{در این غیر صورت} \end{cases} \quad (22)$$

$$\alpha_{imm} = \begin{cases} \tan^{-1} \frac{w}{V} - \tan^{-1} \frac{\dot{R}_c}{V}, & \frac{w}{V} > 0 \\ \tan^{-1} \frac{w}{V} \pm \tan^{-1} \frac{\dot{R}_c}{V}, & \text{غیر اینصورت} \end{cases} \quad (23)$$

در رابطه (۲۲)،  $R' = \frac{R_c - R}{R}$ ، اختلاف نرمال شده بین شعاع بدنه و شعاع حفره در محل نیروی صفحه‌ای است. با معلوم بودن این نیرو گشتاور متناسب با آن بصورت زیر است:

$$M_{plane} = F_{plane}^z L \quad (24)$$

بعد از جایگزاری نیروها و گشتاورها در رابطه (۳) و با فرض زوایای کوچک برای توابع مثلثاتی و کوچک بودن نسبت  $w$  به  $V$ ، شکل نهایی معادلات حرکت به صورت زیر است:



شکل (۲): حفره ساز و نیروهای وارد بر آن [۱۸]

$$F_L = \frac{1}{2} \rho V^2 C_x \pi R_n^2 \cos \alpha_c \sin \alpha_c \quad (9)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_x \pi R_n^2 \cos \alpha_c \cos \alpha_c \quad (10)$$

که در آن، زاویه حمله است و مؤلفه این نیرو در راستای Z بصورت

$$F_{cav}^z = F_L \cos(\alpha_c - \delta_c) - F_D \sin(\alpha_c - \delta_c) = \frac{1}{2} \rho V^2 C_x \pi R_n^2 \cos \alpha_c \sin \delta_c \approx C_{cav} \delta_c \quad (11)$$

و  $C_{cav} = \frac{1}{2} \rho_w V^2 C_x \pi R_n^2$  و  $R_n$  شعاع حفره ساز است. با توجه به قرارگیری دستگاه در مرکز فشار حفره ساز  $M_{cav} = 0$  صفر است.

## ۲-۲ نیرو و گشتاور وزن

نیروی وزن و گشتاور آن حول مرکز مختصات بصورت زیر مدل شده است:

$$F_{gra}^z = m_v g \cos \theta \quad (12)$$

$$M_{gra} = m_v g \cos \theta (-x_g) \quad (13)$$

## ۲-۳ نیرو و گشتاور بالک‌ها:

برای نیروی بالک‌ها نیز مدل خطی بصورت زیر مدل شده است:

$$F_{fin}^z = -n C_{cav} \alpha_f \quad (14)$$

که در آن  $n$ ، ضریب کارایی بالک‌ها نسبت به حفره ساز و  $\alpha_f$  زاویه حمله بالک‌ها به صورت زیر است:

$$\alpha_f = \tan^{-1} \left( \frac{w}{V} + \frac{qL}{V} \right) + \delta_f \quad (15)$$

که در آن  $w$  سرعت جانبی بدنه است. گشتاور متناسب با این نیرو بصورت زیر است:

$$M_{fin} = F_{fin}^z L \quad (16)$$

## ۲-۴ نیروهای صفحه‌ساز

$$E_I = \begin{bmatrix} \frac{7}{9} & \frac{17}{36} L \\ \frac{17}{36} L & \frac{11}{60} R^2 + \frac{133}{405} L^2 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\dot{z} = w - V\theta$$

$$\dot{\theta} = q$$

$$B_I = E_I^{-1} C V^2 \begin{bmatrix} -\frac{n}{mL} & \frac{1}{mL} \\ -\frac{n}{m} & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ B_I \end{bmatrix} \quad (29)$$

عمق ( $Z$ ) و زاویه چرخش ( $\theta$ ) متغیرهای هستند که باید کنترل شوند پس خطی سازی باید نسبت به آنها صورت گیرد. باید مرتبه ای از مشتقات  $Z$  و  $\theta$  را یافت که حد اقل تحت تأثیر یکی از ورودی‌ها است. در مشتقات اول  $Z$  و  $\theta$  ضرایب ورودی‌ها صفر است. برای  $\dot{Z}$  با توجه به اینکه  $l_f h_1 = [0 \quad -V \quad 1 \quad 0]$  است ضریب زاویه بالک‌ها بصورت زیر است:

$$l_{g_1} l_f h_1 = \frac{\partial}{\partial x} (l_f h_1) g_1 = B_I(1,1) \quad (30)$$

و ضریب زاویه حفره‌ساز نیز بصورت زیر است:

$$l_{g_2} l_f h_1 = \frac{\partial}{\partial x} (l_f h_1) g_2 = B_I(1,2) \quad (31)$$

برای  $\theta$  با توجه به اینکه  $l_f h_2(x) = x_4$  است ضریب زاویه بالک‌ها و حفره‌ساز بصورت زیر است:

$$l_{g_1} l_f h_2 = \frac{\partial}{\partial x} (l_f h_2) g_1 = B_I(2,1) \quad (32)$$

$$l_{g_2} l_f h_2 = \frac{\partial}{\partial x} (l_f h_2) g_2 = B_I(2,2) \quad (33)$$

با توجه به غیر صفر بودن درایه‌های ماتریس  $B_I$  و معکوس پذیری آن می‌توان ورودی‌های خطی‌ساز را بصورت زیر تعریف کرد:

$$u = -B_I^{-1} \begin{bmatrix} f_3 - V f_2 \\ f_4 \end{bmatrix} + B_I^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (34)$$

در رابطه (۳۵)، با اعمال این ورودی مدل‌های خطی شده  $\dot{z}$  و  $\dot{\theta}$  بصورت زیر هستند:

$$\dot{z} = v_1 \quad (35)$$

$$\dot{\theta} = v_2 \quad (36)$$

با اعمال این ورودی مدهای جابجایی و چرخش از یکدیگر جدا می‌شوند. با تعریف  $X_1 = [z \quad \dot{z}]^T$  و  $X_2 = [\theta \quad \dot{\theta}]^T$  می‌توان مدل‌های (۳۵) و (۳۶) را بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{bmatrix} \frac{7}{9} & \frac{17}{36} L \\ \frac{17}{36} L & \frac{11}{60} R^2 + \frac{133}{405} L^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = C V \begin{bmatrix} -\frac{n}{mL} & -\frac{n}{m} \\ -\frac{n}{m} & -\frac{nL}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} +$$

$$V \begin{bmatrix} 0 & \frac{7}{9} \\ 0 & \frac{17}{36} L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} + C V^2 \begin{bmatrix} -\frac{n}{mL} & \frac{1}{mL} \\ -\frac{n}{m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_c \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \frac{7}{9} \\ \frac{17}{36} L \end{bmatrix} g + \hat{F}_{plane}$$

(۲۵)

که در رابطه (۲۵)،  $C = 0.5 C_{X0} (1 + \sigma) (\frac{Rn}{R})^2$  و  $\hat{F}_{plane} = \frac{F_{plane} z}{\pi \rho_w m L R^2}$  نرمال شده نیروی صفحه‌ای نسبت به جرم بدنه و  $\delta_c$ ،  $\delta_f$  به ترتیب زاویه بالک‌ها و زاویه حفره‌ساز به عنوان ورودی‌های سیستم هستند.

### ۳- خطی‌ساز با پسخور خطی ساز<sup>۱۶</sup>

معادلات (۲۶) را می‌توان بصورت  $\dot{x} = f(x) + Bu$  باز نویسی

کرد که توابع  $f(x)$  بصورت زیر هستند:

$$f_1 = x_3 - V x_4$$

$$f_2 = x_4$$

$$\begin{bmatrix} f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}$$

$$= E_I^{-1} \left\{ C V \begin{bmatrix} -\frac{n}{mL} & -\frac{n}{m} \\ -\frac{n}{m} & -\frac{nL}{m} \end{bmatrix} \right. \quad (26)$$

$$\left. + V \begin{bmatrix} 0 & 7/9 \\ 0 & 17L/36 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 7/9 \\ 17/36 \end{bmatrix} g + F_{plane} \hat{\begin{bmatrix} 1 \\ L \end{bmatrix}}$$

در رابطه (۲۶)،  $[x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^T = [z \quad \theta \quad w \quad q]^T$  و  $E_I$  و  $B$  به صورت زیر هستند:

<sup>۱۶</sup> Feedback linearization

کافی تا قبل از اشباع دارد، این امکان پذیر است که کنترل را بین ورودی-های  $\delta_f$  و  $\delta_c$  بگونه‌ای، که بتوان به عملکرد یکسانی بدون تجاوز از محدودیت‌های فیزیکی رسید، تقسیم کرد.

فرض کنید، که  $\dot{q}_d$  و  $\dot{w}_d$  به ترتیب، مقادیر  $\dot{q}$  و  $\dot{w}$  در حالتی که ورودی‌ها بدون محدودیت‌های فیزیکی هستند، بدست آمده‌اند باشند. زمانی که یکی از ورودی‌ها یا  $\delta_f$  و یا  $\delta_c$  به حالت اشباع برسد، می‌توان ورودی‌ها را براساس مینیمم کردن پارامتر  $D$  که به صورت زیر تعریف می‌شود به روزرسانی کرد:

$$D = (\dot{w}_d - \dot{w})^2 + (\dot{q}_d - \dot{q})^2 \quad (45)$$

#### ۴- مشاهده سرعت جانبی و تخمین متغیرهای اندازه‌گیری شده

در کنترل وسیله حفره ساز، عمق وسیله با اندازه‌گیری فشار آب دریا، به صورت مستقیم قابل محاسبه است. برای اندازه‌گیری زاویای چرخش، از ژيروسکوپ استفاده می‌شود. اما برای اندازه‌گیری سرعت جانبی، نیاز به حسگر سونار است که علاوه بر پرهزینه بودن، مستلزم ارسال امواج صوتی است که در برخی از کاربردها مطلوب نیست، زیرا این امواج قابل ردیابی هستند. از آنجا که برای تولید ورودی‌ها (۳۴) لازمست همه تمام متغیرهای حالت اندازه‌گیری یا تخمین زده شوند و نیز با توجه به وجود نویزهای فرآیند و اندازه‌گیری در سیستم‌های واقعی، از فیلترهای EKF [۲۰] و UKF [۲۱] برای تخمین این متغیرها استفاده شده است. این دو فیلتر با ترکیب مدل ریاضی (۲۵) و مشاهدات حسگرها با هدف کاهش نویز اندازه‌گیری در داده‌های حسگرها و تخمین سرعت جانبی بکار گرفته شده‌اند. در هر دو فیلتر نویزها گوسی فرض شده‌اند، اما در EKF از خطی‌سازی و در UKF از کمترین مجموعه نقاط تحت عنوان نقاط سیگما برای بدست آوردن متوسط و کواریانس توزیع گوسی، استفاده شده است. برای مقایسه عملکرد فیلترها در تخمین متغیرهای سیستم از پارامتر جذر متوسط مربعات خطا، استفاده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \hat{x})^2}{n}} \quad (46)$$

در این رابطه،  $x$  متغیرهای واقعی،  $\hat{x}$  متغیرهای تخمین زده شده و  $n$  تعداد نمونه‌ها می‌باشند.

#### ۵- شبیه‌سازی

در این بخش به دنبال بررسی نحوه‌ی عملکرد فیلترها در تخمین و مزیت حضور آنها در کنترل مدل هستیم. از شبیه‌سازی کامپیوتری برای ساخت مدل‌های قطعی و تصادفی و اندازه‌گیری حسگرها استفاده شده است. برای شبیه‌سازی از پارامترهای سیستم نمونه مرجع [۵] با مقادیر ارائه شده در جدول (۱) استفاده شده است.

$$\dot{X}_1 = A_1 X_1 + B_1 v_1 \quad (37)$$

$$\dot{X}_2 = A_2 X_2 + B_2 v_2 \quad (38)$$

که در آن  $A_1$  و  $A_2$  و  $B_1$  و  $B_2$  بصورت زیر هستند:

$$A_1 = A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{1,2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (39)$$

#### ۳-۱ طراحی کنترل کننده LQR

برای مدل خطی  $\dot{x} = Ax + Bu$ ، ورودی بهینه‌ی پایدارساز که تابع هزینه  $J = \int_0^\infty [x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)] dt$  را مینیمم می‌کند بصورت  $u^* = -R^{-1} B^T P x(t)$  است. با انتخاب  $Q, R$  به ترتیب ماتریس وزن دهی‌های ورودی‌ها و متغیرهای حالت، با حل معادلات ریکاتی زیر، ماتریس  $P$  بدست می‌آید:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (40)$$

معادلات ریکاتی برای مدل‌های خطی شده (۳۷) و (۳۸) بصورت زیر هستند:

$$A_1^T P_1 + P_1 A_1 - P_1 B_1 R_1^{-1} B_1^T P_1 + Q_1 = 0 \quad (41)$$

$$A_2^T P_2 + P_2 A_2 - P_2 B_2 R_2^{-1} B_2^T P_2 + Q_2 = 0 \quad (42)$$

ورودی‌های بهینه پایدارساز مدل‌های (۳۸) و (۳۹) نیز بصورت زیر هستند:

$$v_1 = -R_1^{-1} B_1^T P_1 X_1 = K_1 X_1(t) \quad (43)$$

$$v_2 = -R_2^{-1} B_2^T P_2 X_2 = K_2 X_2(t) \quad (44)$$

#### ۳-۲ جبران کننده‌ی اشباع شدگی عملگرها

با توجه به اینکه در استخراج معادلات حرکت از تقریب کوچک بودن زاویه‌ها استفاده شده است. رابطه (۲۵) تنها در صورتی که تغییر زاویای بالک‌ها و حفره ساز بزرگ نباشند، معتبر است. از این رو ورودی‌های سیستم دارای محدودیت فیزیکی بین  $\pm 30^\circ$  درجه هستند. با اعمال این قیود به دلیل رخ دادن اشباع شدگی عملگرها برای کاهش اثر اشباع شدگی ورودی‌ها روی دینامیک کنترل شده از جبران کننده [۱۵] استفاده شده است. با توجه به معادلات حرکت (۲۷)،  $\delta_f$  و  $\delta_c$  نقش مشابهی در کنترل  $w, q$  دارند. بنابراین، اگر یکی از عملگرها چه  $\delta_f$  یا  $\delta_c$  به علت محدودیت فیزیکی به حالت اشباع برسد در حالی که دیگری هنوز فضای

$$P_0 = \begin{bmatrix} 1 & 5 \text{deg} & 5 \text{m/s} & 0.3 \text{rad/s}^2 \end{bmatrix}^T$$

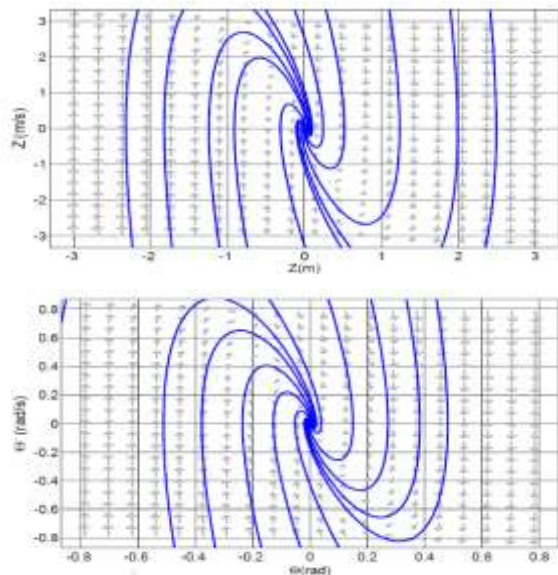
و  $\text{diag}[10 \ 1 \ 20 \ 1]$  برای فیلتر مدل شده است. برای فیلترها ماتریس کواریانس فرآیند و اندازه‌گیری برای EKF و UKF بصورت زیر در نظر گرفته شده اند:

$$Q = \text{diag}(2 \times 10^{-4}, 32 \times 10^{-6}, 10^{-4}, 64 \times 10^{-12}) \quad (47)$$

$$R = \text{diag}(0.04, 0.0076, 0.0076) \quad (48)$$

#### ۵-۱ طراحی کنترل‌کننده LQR با پسخور خطی ساز

مدل کنترل شده، بسته به انتخاب ضرایب وزن دهی مختلف  $Q$  و  $R$  می‌تواند بصورت مجانبی و یا ورودی-محدود، خروجی-محدود پایدار باشد. با انتخاب ضرایب  $Q_1 = \text{diag}(500, 0)$  و  $Q_2 = \text{diag}(200, 0)$  و  $R_{1,2} = 1$  در رابطه‌ی (۴۳) و (۴۴) ضرایب بهره‌ی کنترل‌کننده برای ورودی‌های  $v_1$  و  $v_2$ ،  $k_1 = [5.3183 \ -14.1421 \ -22.3607 \ -6.6874]$  و  $k_2 = [5.3183 \ -14.1421 \ -22.3607 \ -6.6874]$  بدست می‌آیند. شکل (۴) نمودار صفحه-فاز متغیرهای حالت مدل قطعی سیستم (بدون اضافه کردن نویز فرآیند)، کنترل شده با این ضرایب بهره را نشان می‌دهد. در این شکل پایداری مجانبی سیستم مداربسته مشاهده می‌شود.



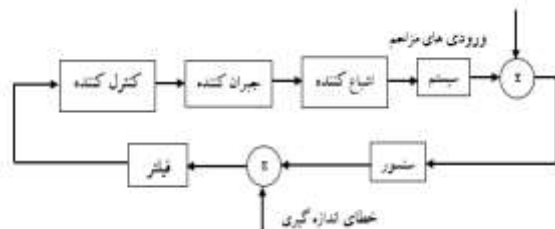
شکل (۴): نمودار صفحات فاز حرکت سیستم مدار بسته با کنترل LQR و پسخور همه متغیرهای حالت

نتایج اجرای شبیه‌سازی برای مدل کنترل شده قطعی به همراه جبران-کننده با شرایط اولیه  $z = 0$ ،  $w = 3 \text{m/s}$ ،  $\theta = 0$ ،  $q = 0.2 \text{rad/s}$  بصورت شکل (۵) است. در زمان‌های که بالک‌ها به اشباع

جدول (۱): مقادیر عددی پارامترهای یک وسیله ابرحفره ساز نمونه [۵]

مقدار و واحد	توضیح	پارامتر
$9.81 \text{m/s}^2$	شتاب گرانشی	g
2	نسبت چگالی بدنه به چگالی آب	m
0.5	کارایی بالک نسبت به حفره‌ساز	n
0.0191m	شعاع حفره‌ساز	$R_n$
0.0508m	شعاع بدنه	R
1.8m	طول کل وسیله	L
$75 \text{m/s}$	سرعت پیشروندگی وسیله	v
0.03	عدد حفره	$\sigma$
0.82	ضریب درگ حفره‌ساز در زاویه حمله صفر	$C_{x0}$

در شبیه‌سازی مدل تصادفی، ورودی‌های اغتشاشی نیرو و گشتاور هستند که باعث تولید اغتشاشاتی بصورت شتاب خطی و شتاب زاویه‌ای روی مدل می‌شوند. وسایل اندازه‌گیری نیز دارای خطا هستند و هر ۱۰ میلی ثانیه در دسترس هستند. با استفاده از تخمین‌های زده شده در هر پله زمانی توسط فیلتر و گرفتن پسخور از آن، ورودی‌های کنترلی براساس رابطه (۳۵) تولید و به سیستم اعمال شده‌است. در هر پله زمانی، ورودی‌ها ثابت فرض می‌شوند و در شبیه‌سازی از جبران‌کننده اشباع عملگرها (تشریح شده در قسمت ۳-۲) نیز استفاده شده است. شکل (۳) نحوه‌ی مدل کنترل شده را با پسخور از فیلتر نشان می‌دهد.



شکل (۳): دیاگرام بلوکی سیستم کنترل شده با LQR و پسخور از فیلتر

در شبیه‌سازی سیستم تصادفی کنترل شده و اندازه‌گیری آن، نویز اغتشاشات و اندازه‌گیری یکسانی در هر گام زمانی به صورتی ایجاد شده‌اند تا فیلترهای EKF و UKF، تحت شرایط یکسان بکار گرفته شوند. در کلیه شبیه‌سازی‌ها در لحظه اولیه متغیرهای سیستم واقعی مدل شده بصورت  $x_{es)0} = [0 \ 0 \ 3 \text{m/s} \ 0.2 \text{rad/s}^2]^T$  و  $x_{real} = [0 \ 0 \ 3 \text{m/s} \ 0.2 \text{rad/s}^2]^T$

سازی شده است. خروجی های حسگرها نیز با افزودن نویزهای اندازه گیری  $w_z$ ،  $w_\theta$  و  $w_q$  متغیرهای  $Z$ ،  $\theta$  و  $q$  حاصل از مدل تصادفی، شبیه سازی شده‌اند. مقادیر عددی متوسط و کواریانس های نویزهای بکار برده شده در شبیه سازی ها بصورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$\begin{aligned} w_z &\sim (0,0.2) & w_\theta &\sim (0,10deg) & w_q &\sim (0,10deg/s) \\ v_w &\sim (0,0.6g) & v_q &\sim (0,6 deg/s) \end{aligned} \quad (50)$$

#### ۵-۲-۱ توانایی فیلترها در تخمین متغیرها

برای مقایسه‌ی عملکرد فیلترها، در تخمین متغیرها ۵۰ بار اجرا صورت گرفته است و جذر متوسط مربعات خطای تخمین (رابطه (۴۷)) به عنوان ملاک مقایسه در نظر گرفته شده‌اند. در این اجراها، نویز فرآیند بصورت (۵۰) در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. متوسط RMSE متغیرها در ۵۰ اجرا

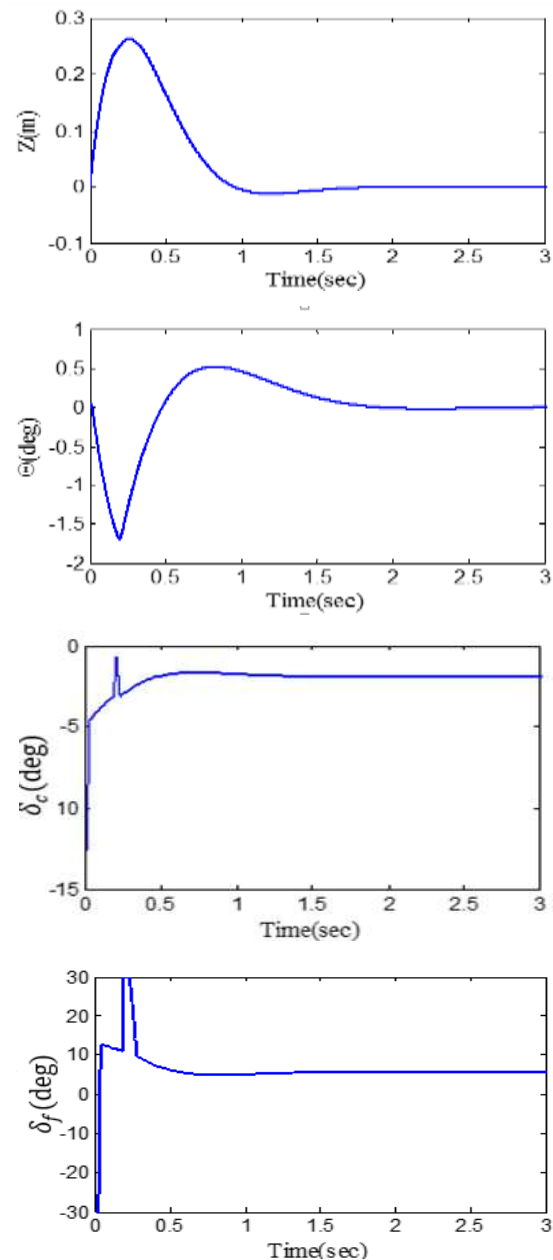
	$\overline{RMSE_z}$ (m)	$\overline{RMSE_\theta}$ (rad)	$\overline{RMSE_w}$ (m/s)	$\overline{RMSE_q}$ (rad/s)
UKF	0.1010	0.0206	0.2288	0.1439
EKF	0.0893	0.0188	0.3067	0.2388

بر اساس جدول ۲، در مورد  $Z$  و  $\theta$ ، EKF تخمین بهتر و در مورد  $w$  و  $q$ ، UKF تخمین بهتری را ارائه می‌کند. همچنین در شکل های (۶) و (۷)، که نشان‌دهنده‌ی نتایج شبیه سازی برای مدل کنترل شده با فیلترهای EKF و UKF برای یکی از اجراها هستند، تخمین های EKF پراکندگی کمتری در تخمین  $Z$  و  $\theta$  و پراکندگی بیشتری در تخمین  $w$  و  $q$ ، نسبت به تخمین های UKF نشان می‌دهند.

#### ۵-۲-۲ خطاها و پایداری تخمین ها

در شکل های (۸) و (۹)، خطای تخمین واقعی و محدوده های سه برابر خطای تخمین زده شده ( $3\sigma$ ) توسط فیلترها، به ترتیب برای فیلترهای UKF و EKF نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که بیش از ۹۹٪ از مجموعه خطای واقعی در هر دو فیلتر داخل این محدوده ها قرار گرفته‌اند. در باره‌ی  $w$  و  $q$  با توجه به اینکه EKF از خطی سازی در هر مرحله و UKF از مدل غیرخطی برای تخمین استفاده می‌کند، این محدوده‌ها در هر دو فیلتر دارای نوسان هستند. در این نمودارها، کوپلینگ  $w$  و  $q$  از تغییرات مشابه آنها در برخی از محدوده ها مشخص است. واگرا نشدن این محدوده های خطا نشان دهنده‌ی پایداری فیلترها می‌باشد.

رسیده‌اند در همان زمان جبران‌کننده حفره ساز را برای کاهش اثر اشباع شدگی بکار گرفته است که سبب جهش‌های در نمودار حفره ساز شده است. بعد از پایدارسازی  $\delta_c = 6$  و  $\delta_f = -2$  درجه هستند تا وزن وسیله را بالانس کنند.

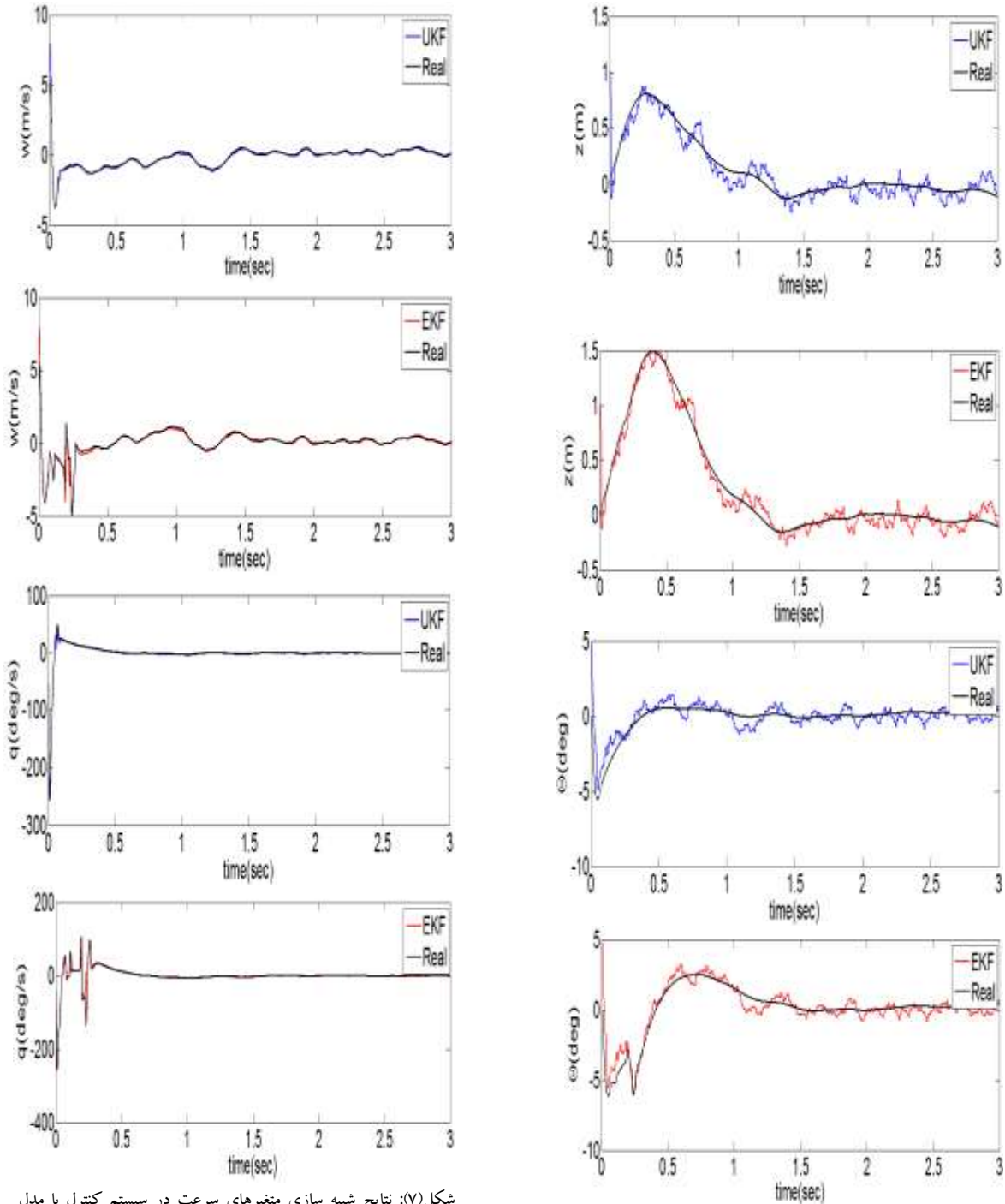


شکل (۵): مدل قطعی کنترل شده با LQR و پس‌خورخطی ساز به همراه جبران‌کننده

#### ۵-۲-۳ کارایی فیلترها

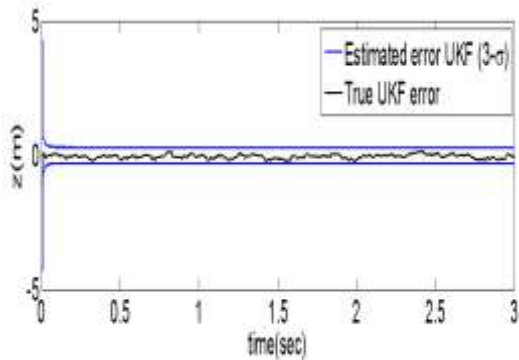
در این بخش، موضوع کارایی فیلترها، شامل بررسی توانایی در تخمین متغیرها و پایداری سیستم، بررسی شده است. مدل تصادفی وسیله نمونه، بر اساس مدل قطعی (۲۶) که به آن نویزهای  $v_w$  و  $v_q$  اضافه شده است، شبیه

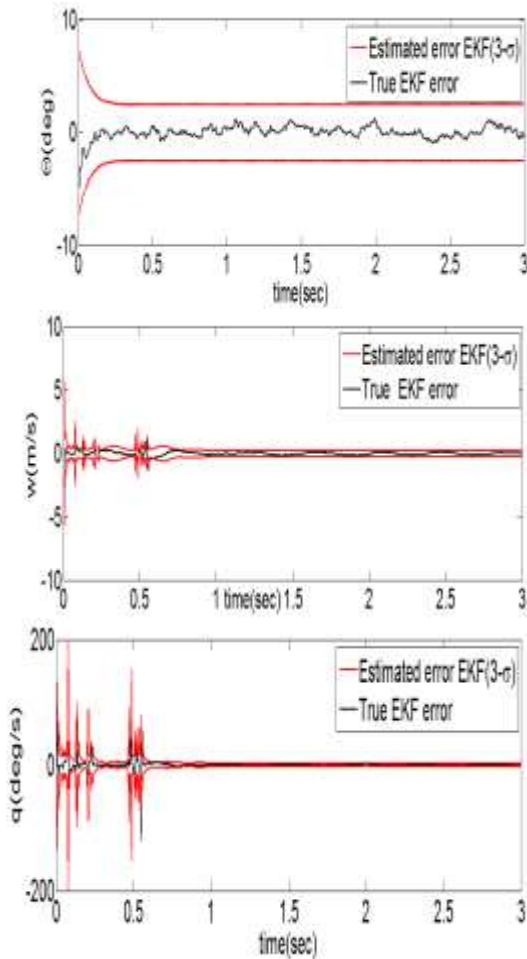




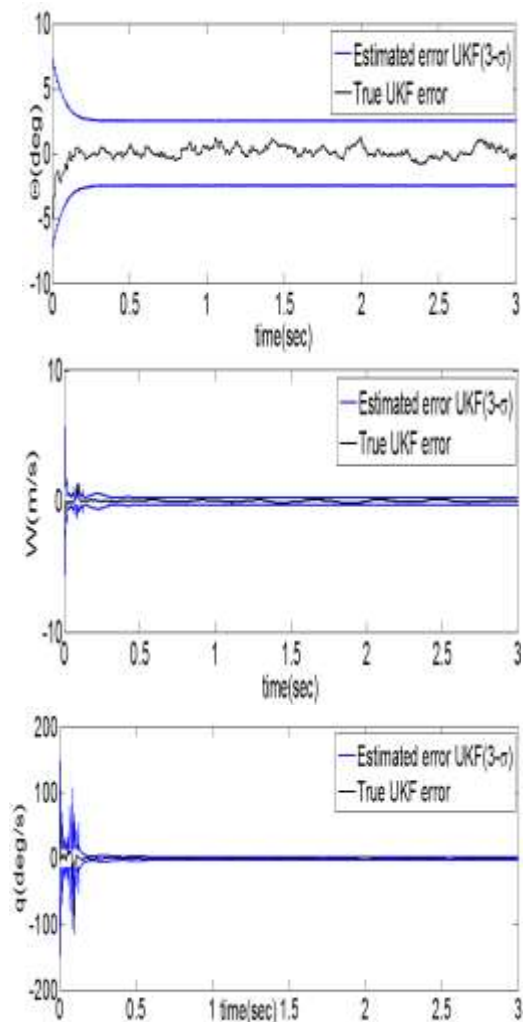
شکل (۷): نتایج شبیه‌سازی متغیرهای سرعت در سیستم کنترل با مدل تصادفی با پس‌خور از تخمین‌های فیلترهای UKF و EKF

شکل (۶): نتایج شبیه‌سازی متغیرهای موقعیت در سیستم کنترل با مدل تصادفی با پس‌خور از تخمین‌های فیلترهای UKF و EKF





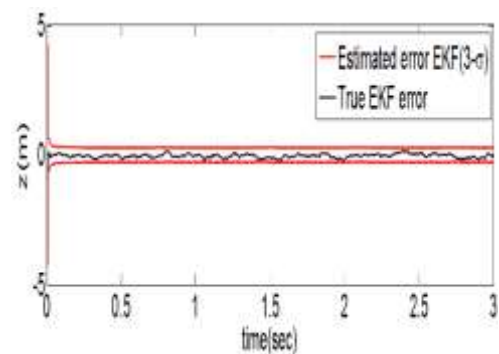
شکل (۹): خطای تخمین واقعی و محدوده های سه سیگمای فیلتر EKF.



شکل (۸): خطای تخمین واقعی و محدوده های سه سیگمای فیلتر UKF.

### ۳-۲-۵ عملکرد فیلتر در نویز یکنواخت و گوسی

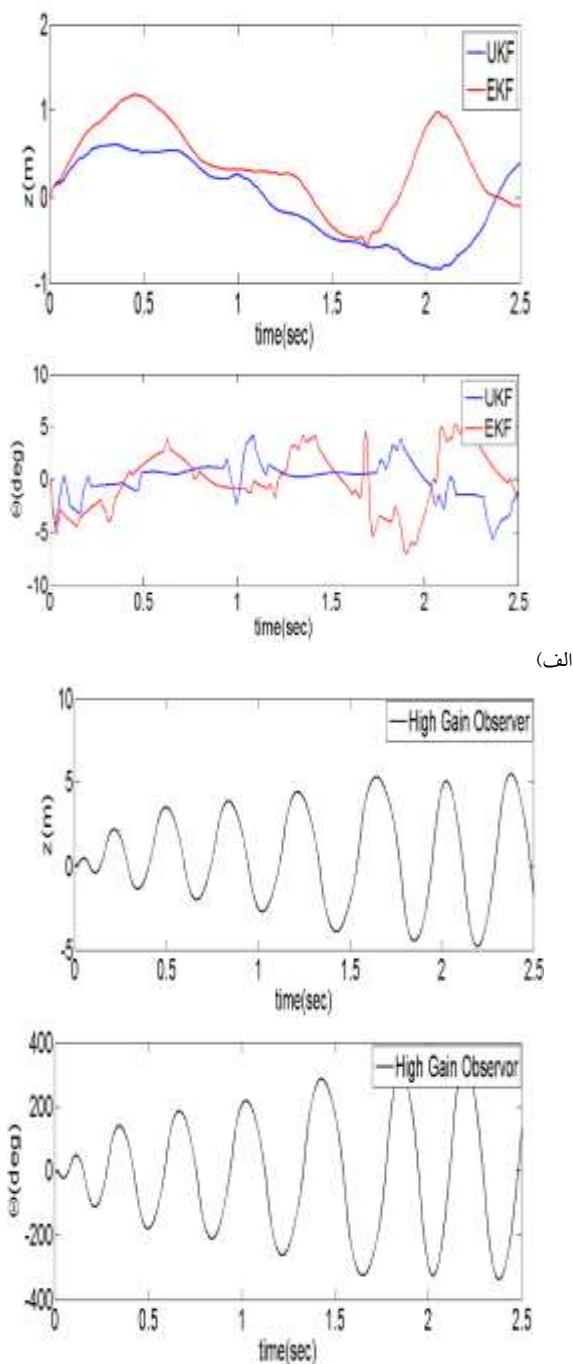
در این بخش، دو نوع نویز متداول گوسی و یکنواخت برای مدل و حسگرها در نظر گرفته شده‌اند و نتایج به ترتیب در جداول (۳) و (۴) ارائه شده‌اند. در این جداول نماد  $\bar{(\cdot)}$  نشان دهنده مقادیر متوسط خطای تخمین و  $\sigma$  نیز بیانگر پراکندگی مقادیر تخمین زده شده از مقادیر واقعی، در مدت زمان ۳ ثانیه اول شبیه سازی است. نتایج نشان دهنده این امر است که هرچند فیلتر بر اساس نویز گوسی طراحی شده است اما برای نویز یکنواخت نیز متوسط خطای تخمین و پراکندگی آن کم است و فیلتر پایدار است. در مدل تصادفی مقادیر متوسط و واریانس نویزهای فرآیندو اندازه گیری به صورت (۵۰) در نظر گرفته شده‌اند.



### ۳-۵ کارایی کنترل کننده در مدل تصادفی کنترل شده با

#### پسخور از فیلترها و مشاهده گر

در این قسمت پایداری کنترلی مدل تصادفی با گرفتن پسخور از فیلترهای طراحی شده و مشاهده گر بهره‌گر بزرگ [۱۸] بررسی شده است. در طراحی این مشاهده گر فرض شده است که  $\theta$  و  $q$  بصورت دقیق مستقیماً در دسترس باشند.  $\hat{z}$  و  $\hat{w}$  با استفاده از دینامیک مدل قطعی و



(الف)

(ب)

شکل (۱۰): نتایج شبیه‌سازی سیستم کنترل با مدل تصادفی و پس‌خور از تخمین‌گرهای: الف) فیلترهای EKF و UKF، ب) مشاهده‌گر بهره‌ی بزرگ.

با توجه به نیاز کنترل‌کننده به تمامی متغیرهای حالت برای اجرا، از فیلترهای UKF و EKF برای تخمین سرعت جانبی وسیله که غالباً اندازه‌گیری برای آن دردسترس نیست بهره‌گرفته شده است. فیلترها توانایی تعدیل اثر اغتشاشات دینامیکی و وسایل اندازه‌گیری را دارند و خطاهای تخمین آنها پایدار هستند. در مقایسه با مشاهده‌گر بهره‌ی بزرگ که بر اساس دینامیک مدل قطعی طراحی شده است، فیلترهای بکار گرفته شده پایدار هستند و خطای آنها از سیستم تصادفی مدل شده محدود است. اما تخمین

بهره‌گیری از پس‌خور اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری شده و  $\hat{z}$  تخمین زده شده بدست می‌آیند. ضرایب بهره‌ی دینامیک تخمین  $\hat{z}$  و  $\hat{w}$  از این اختلاف، به ترتیب  $\frac{2}{\varepsilon}$  و  $\frac{1}{\varepsilon^2}$  با مقدار عددی  $\varepsilon = 0.002$  در نظر گرفته شده‌اند. نویز فرآیند و حسگرها بصورت (۵۰) فرض شده‌اند. شکل (۱۰)، نشان دهنده‌ی رفتار مدل تصادفی با بهره‌گیری از فیلترهای UKF و EKF و مشاهده‌گر بهره‌ی بزرگ است. این مشاهده‌گر نتوانست باعث پایداری سیستم با کنترل‌کننده طراحی شده در قسمت ۵-۱ شود، در حالی که فیلترهای اشاره شده باعث پایداری سیستم می‌شوند. این موضوع می‌تواند به علت ترکیب مدل و اندازه‌گیری‌ها و به حساب آوردن اغتشاشات باشد.

جدول (۳): متوسط خطای تخمین و پراگندگی مقادیر تخمین زده شده از مقادیر واقعی با نویز گوسی.

	UKF	EKF
$\bar{z} + \sigma_z(m)$	$0.1478 \pm 0.1891$	$0.1411 \pm 0.1807$
$\bar{\theta} + \sigma_\theta(rad)$	$0.0299 \pm 0.0372$	$0.0238 \pm 0.0307$
$\bar{w} + \sigma_w(m/s)$	$0.2805 \pm 0.4151$	$0.5979 \pm 1.4905$
$\bar{q} + \sigma_q(rad/s)$	$0.2071 \pm 0.3655$	$0.3523 \pm 0.1017$

جدول (۴): متوسط خطای تخمین و پراگندگی مقادیر تخمین زده شده از مقادیر واقعی با نویز یکنواخت.

	UKF	EKF
$\bar{z} + \sigma_z(m)$	$0.0597 \pm 0.0927$	$0.0526 \pm 0.0866$
$\bar{\theta} + \sigma_\theta(rad)$	$0.0148 \pm 0.0207$	$0.0111 \pm 0.0173$
$\bar{w} + \sigma_w(m/s)$	$0.1302 \pm 0.2488$	$0.2200 \pm 0.1312$
$\bar{q} + \sigma_q(rad/s)$	$0.0533 \pm 0.1609$	$0.0428 \pm 0.1210$

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله کنترل‌کننده‌ی بر مبنای روش LQR برای پایدارسازی وسایل ابرحفره‌ساز در مود عمق طراحی شده است. چنانچه سرعت جانبی وسیله در محدوده‌ی  $\pm 2 m/s$  باشد، به علت صفر بودن نیروی صفحه‌ای، خطی‌سازی حول نقطه تعادل به علت حذف این نیرو نمی‌تواند معرف رفتار غیرخطی مدل باشد. از این رو با استفاده از خطی‌سازی پس‌خور با اختصاص دادن بخشی از ورودی‌ها، ترم‌های غیرخطی حذف و خطی‌سازی صورت گرفته شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی این است که اینگونه خطی‌سازی باعث اشباع شدن عملگرها می‌شود. به همین علت برای جبران دینامیک از دست رفته به علت اشباع شدگی، از جبران‌کننده استفاده شده است.

- [10] Lin, B. Balachandran, and E. Abed, "Supercavitating body dynamics, bifurcations and control," American Control Conference, Portland, USA, 2005. s
- [11] G. Lin, B. Balachandran, and E. Abed, "Bifurcation behavior of a supercavitating vehicle," ASME IMECE, Chicago, IL, 2006.
- [12] G. Lin and B. Balachandran, "Nonlinear dynamics and control of supercavitating bodies," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Keystone, Colorado, 2006.
- [13] X. Mao and Q. Wang, "Delay-dependent Control Design for a Time-delay supercavitating vehicle model." Journal of Vibration and Control, vol. 17, no. 3, pp. 431-448, 2010.
- [14] X. Zhang, Y. Wei, Y. Han, T. Bai and K. Ma, "Design and comparison of LQR and a novel robust back stepping controller for supercavitating vehicles", Transactions of the Institute of Measurement and Control, pp. 1-14, 2015.
- [15] X. Mao and Q. Wang, "Adaptive control design for a supercavitating vehicle model based on fin force parameter estimation", Journal of Vibration and Control, vol. 21, no. 6, pp. 1220-1233, 2015.
- [16] B. Qiang, Y. Sun, Y. Han and T. Bai, "Absolute stability control of supercavitating vehicles based on backstepping," IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Tianjin, China, pp. 1918-1923, 2014.
- [17] A. Pang, H. Zhen and J. Wang, "Double-loop Decoupling Control For a Supercavitating Vehicle", 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation, pp. 750-754, 2017.
- [18] X. Mao and Q. Wang, "Nonlinear control design for a supercavitating vehicle", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 17, no. 4, pp. 816-832, 2009.
- [19] G. V. Logvinovich, "Hydrodynamics of free - boundary flows", translated from Russian, U.S. Department of Commerce, Washington, 1972.
- [20] D. Simon, Optimal State Estimation: kalman filter, H-infinity, and Nonlinear Approaches, Wiley, 2006.
- [21] E. A. Wan and R. van der Merwe, "The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation", Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium, pp. 153-158, 2000.
- تولید شده توسط مشاهده گر ناپایدار است که می‌تواند باعث ناپایداری سیستم شود. فیلترها در تخمین با یکدیگر مقایسه شده‌اند که EKF در تخمین  $\theta$  و UKF در تخمین  $w$  و  $q$  عملکرد بهتری داشته‌اند. نتایج شبیه سازی نشان دهنده‌ی این مطلب است که کنترل‌کننده‌ی طراحی شده با پسخور از هر دو فیلتر قادر است که سیستم واقعی مدل شده را که دارای اغتشاشات دینامیکی است، را پایدار کند در حالی که با پسخور از مشاهده گر بهره بزرگ، پایداری سیستم تأمین نمی‌شود.

## مراجع

- [1] N. E. Fine and S. A. Kinnas, "A boundary element method for the analysis of the flow around 3-D cavitating hydrofoils," J. Ship Res., vol. 37, no. 1, pp. 213-224, 1993.
- [2] S. S. Kulkarni and R. Pratap, "Studies on the dynamics of a supercavitating Projectile," Appl. Math. Model, vol. 24, no. 2, pp. 113-129, 2000.
- [3] A. May, "Water entry and cavity-running behavior of missiles," Arlington, Naval Sea Systems Command, 1975.
- [4] R. Rand, R. Pratap, D. Ramani, J. Cipolla, and I. Kirschner, "Impact dynamics of a supercavitating underwater projectile," presented at the DETC ASME Des. Eng. Tech. Conf., Sacramento, CA, 1997.
- [5] J. Dzielski and A. Kurdila, "A benchmark control problem for supercavitating vehicles and an initial investigation of solutions," Journal of Vibration and Control, vol. 9, no. 7, pp. 791-804, 2003.
- [6] R. Kamada, "Trajectory optimization strategies for supercavitating vehicles," M.S. thesis, Sch. Aerosp. Eng., Georgia Inst. Technol., Atlanta, 2005.
- [7] B. Vanek, J. Bokor and G. Balas, "Theoretical aspects of high-speed supercavitation vehicle Control," American Control Conference, Minneapolis, Minnesota, USA, 2006.
- [8] B. Vanek, J. Bokor, G. Balas, and R. Arndt, "Longitudinal motion control of a high-speed supercavitation vehicle," Journal of Vibration and Control, vol. 13, no. 2, pp. 159-84, 2007.
- [9] G. Lin, B. Balachandran, and E. Abed, "Dynamics and control of supercavitating bodies," presented at the ASME IMECE, Anaheim, CA, 2004.