

طراحی یک سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی با استفاده از فیلتر کالمن تطبیقی

نوید نوروزی^۱، ایرج بابائی^۲، ایرج حسینی^۳^۱دکتری مهندسی کنترل، گروه مهندسی برق و مهندسی پزشکی، دانشگاه شیخ بهایی؛ noroozi@shbu.ac.ir^۲کارشناس ارشد مهندسی کنترل، گروه صنایع شهید ابراهیم همتی، سازمان صنایع دریایی؛ babaei.iraj@gmail.com^۳کارشناسی ارشد مهندسی کشتی سازی، گروه صنایع شهید ابراهیم همتی، سازمان صنایع دریایی؛ hosseini72com@gmail.com

چکیده

اهمیت استخراج ذخائر نفت و گاز در آب‌های شمالی و جنوبی کشور از یک سو و لزوم خودکفایی در صنایع دریایی از سوی دیگر، نیاز به طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های تثبیت موقعیت شناور را بیش از پیش مورد توجه قرار داده است. هدف از طراحی سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی شناور، ثابت نگهداشتن موقعیت و وضعیت شناور یا دنبال کردن یک مسیر از پیش تعیین شده با سرعت پائین با استفاده از نیروهای پیش ران شناور می‌باشد. این مقاله حاصل تلاش چندی از محققین کشور در راستای امکان سنجی طراحی و ساخت یک سیستم تثبیت موقعیت است که بتواند از لحاظ شاخصه‌های عملکرد هم تراز یا بهتر از نمونه‌های پیشرفته خارجی آن باشد. در این مقاله، با توجه به محدودیت صفحات، مهمترین گام‌های طراحی یک سیستم تثبیت موقعیت صنعتی را معرفی نموده و در نهایت روش نوینی برای ارتقا عملکرد یک سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی ارائه می‌نمائیم. در این راستا، در ابتدا، ما به معرفی بخش‌های مختلف یک سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی شناور می‌پردازیم. سپس از فیلتر کالمن تطبیقی و روش کنترل LQG در سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی استفاده می‌نمائیم. مزیت اصلی این فیلتر در طراحی سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی، تخمین ماتریس کوواریانس نویز فرایند می‌باشد. تعیین دقیق دریاچه‌های این ماتریس در سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی بسیار پیچیده بوده و خطا در تعیین مولفه‌های این ماتریس باعث کاهش چشمگیر دقت عملکرد سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی می‌گردد. از این رو با استفاده از این روش جدید در طراحی می‌توان دقت سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی را به صورت چشمگیر افزایش داد. در نهایت، صحت روش پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی بر اساس داده‌های واقعی بررسی شده است.

کلمات کلیدی: شناور، سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی، فیلتر کالمن تطبیقی، کنترل بهینه.

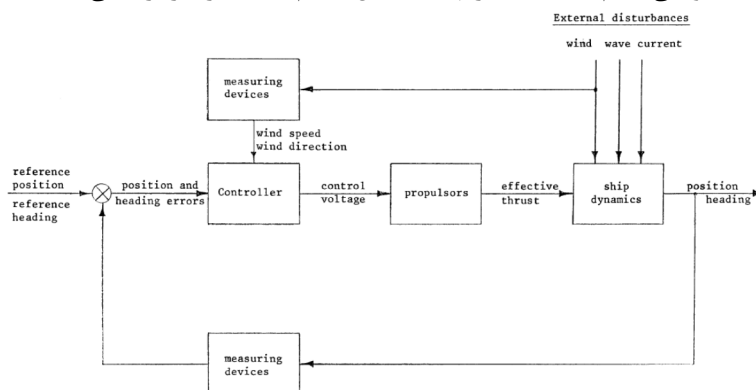
۱- مقدمه

با افزایش نیاز به دسترسی به منابع انرژی به ویژه ذخائر نفت و گاز، و با کاهش این ذخائر در خشکی، توجه بسیاری به برداشت از این ذخائر در آب‌ها به ویژه آب‌های کم عمق معطوف شده است. در ابتدا، جستجوها جهت کشف و استخراج برای ذخائر نفتی و گازی در آب توسط سکوها ثابت انجام می‌شد. با این وجود، نظارت و تعمیر این سکوها بسیار پر هزینه بوده و از این رو، نیاز استفاده از شناورها به جای سکوها احساس شد. برای این منظور نیازمند بکارگیری سیستم خودکاری هستیم که موقعیت و زاویه سمت^۱ شناور را بدون نیاز به لنگرگیری، ثابت نگه دارد. مفهوم تثبیت موقعیت دینامیکی^۲ (DP) شناور برای همین منظور ارائه شده و هدف آن ثابت نگهداشتن موقعیت شناور و زاویه سمت آن یا دنبال کردن یک مسیر از پیش تعیین شده با سرعت پائین با استفاده از نیروهای پیش ران شناور می‌باشد. با توجه به اینکه شناورها در معرض نیروهای بیرونی ناشی از باد^۳، امواج^۴ و جریاهای آبی^۵ می‌باشند و این نیروها باعث تغییر موقعیت شناورها می‌گردند، باید این نیروها را تخمین زده و مکانیزمی را برای جبران اثرات این نیروها در سیستم موقعیت یابی دینامیکی لحاظ نمائیم.

یک سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی متعارف از چهار بخش اصلی تشکیل شده است: (۱) سیستم رانش، (۲) سنسورهای اندازه‌گیری زاویه سمت و موقعیت، (۳) سنسور اندازه‌گیری سرعت باد و (۴) الگوریتم‌های کنترل و تخمین حالات. ساختار کلی یک سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی در شکل ۱ نشان داده است. همانطور که دیده می‌شود، این سیستم یک سیستم کنترل حلقه-سته بوده و در مسیر فیدبک آن سنسورهای لازم برای اندازه‌گیری موقعیت و زاویه سمت شناور وجود دارد. همچنین جهت اندازه‌گیری سرعت و راستای باد نیز سنسور دیگری نیز قرار داده شده است که با استفاده از آن می‌توان اثر نیروی باد را جبران نمود. کیفیت عملکرد یک سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی کاملاً وابسته به صحت و دقت تخمین اغتشاشات وارده به سیستم و روش جبران اثرات آنها است.

¹ Yaw (heading) angle² Dynamic Positioning³ Wind⁴ Waves⁵ Currents

این مقاله دو هدف اصلی را دنبال می‌کند: (۱) معرفی کلی مدلسازی و طراحی یک سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی به گونه‌ای که برای مهندسين در صنعت و همچنین محققين در بخش‌های تحقیقاتی کشور مفید واقع شود؛ (۲) ارائه روشی جدید جهت ارتقا دقت تخمین حالات سیستم DP. روش‌های بسیاری در متون علمی برای طراحی سیستم‌های تثبیت موقعیت شناور ارائه شده است، با این حال اکثر این روش‌ها به علت بار محاسباتی بالای آنها، برای پیاده‌سازی علمی در صنعت چندان مفید نیستند.^۶ در این راستا، در بخش دوم از این مقاله نیروهای (اغتشاشات) وارد بر یک شناور که باعث تغییر موقعیت و وضعیت آن می‌شوند را مرور می‌نمائیم. بخش سوم به بحث مدلسازی یک سیستم DP می‌پردازد. در بخش چهارم یک کنترل کننده بهینه را برای پایدارسازی سیستم DP ارائه می‌نمائیم. سپس با توجه به تصادفی بودن عدم قطعیت‌های موجود در مدل سیستم DP، از فیلتر کالمن برای تخمین حالات سیستم استفاده می‌نمائیم. به منظور تخمین دقیق حالات سیستم اطلاع دقیق از ماتریس‌های کوواریانس نویز فرایند و نویز اندازه‌گیری لازم است؛ و چنانکه در بخش پنجم بحث خواهد شد، تعیین ماتریس کوواریانس نویز فرایند بسیار پیچیده است. برای رفع این مشکل، یک فیلتر کالمن تطبیقی ارائه می‌نمائیم. صحت روش پیشنهادی برای طراحی یک سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی توسط شبیه‌سازی بر اساس داده‌های واقعی انجام شده است. در نهایت، بخش هشتم نتیجه‌گیری را ارائه می‌نماید.



شکل ۱: ساختار کلی یک سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی.

۲- اغتشاشات خارجی

نیروهای محیطی ناشی از امواج، باد و جریان آب موجب تلاطم شناور شده و وضعیت و موقعیت آن را تغییر می‌دهند. از این رو، این نیروها را به عنوان اغتشاشات در یک سیستم کنترل حرکت شناور در نظر گرفته می‌شوند. این اغتشاشات طبیعی تصادفی داشته و محتوی طیف فرکانسی گوناگونی هستند.

امواج باعث تغییر فشار روی بدنه شناور شده و این به نوبه خود نیرویی را به شناور القا می‌کند. این نیروها محتوی مولفه‌هایی هستند که به صورت خطی وابسته به ارتفاع موج می‌باشند و به همین دلیل به آنها نیروهای فرکانس-موج^۸ گفته می‌شود. نیروهای ناشی از موج همچنین محتوی مولفه-هایی هستند که فرکانس آنها ارتباط غیرخطی با ارتفاع موج دارد بگونه‌ای که این نیروها دارای هر دو فرکانس بالاتر و پائین تر از ارتفاع موج می‌باشند. به ویژه آنکه نیروهای با فرکانس پائین باعث ایجاد رزونانس در حرکت در صفحه افقی شناور شده و منجر به تغییر موقعیت شناور می‌شوند [۳]. نیروهای با فرکانس بالا معمولاً تاثیر چندانی بر حلقه کنترلی ندارند ولی به ارتعاشات بدنه‌ای^۹ کمک می‌کنند.

همانند امواج، نیروهای ناشی از باد و جریان آب نیز باعث تغییر فشار بر بدنه شناور شده و نیروهایی را به شناور القا می‌کنند. نیروی ناشی از باد دارای یک مولفه متوسط و یک مولفه تصادفی ناشی از تند باد است. در مباحث کنترل حرکت شناور، تنها مولفه متوسط این نیرو جبران می‌شود زیرا فرکانس تندبادها معمولاً خارج از پهنای باند شناور است [۳]. نیروهای ناشی از جریان دارای فرکانس‌های پائین بوده و تاثیر مخرب بر سیستم DP و همچنین لنگرگیری شناور دارند [۱].

نیروهای غیرخطی (ناشی از امواج)، باد و جریان موثر بر حلقه کنترل حرکت شناور را نیروهای فرکانس-پائین^{۱۰} گویند. مجموع نیروهای فرکانس-پائین و فرکانس-موج، تقریباً کل اغتشاشات وارد بر شناور را تشکیل می‌دهد. لازم به ذکر است که بخش فرکانس-موج حرکت‌های شناور نباید در مسئله تثبیت موقعیت شناور جبران گردد؛ در غیر اینصورت، این امر موجب نوسانات شدید در عملگرها و نهایتاً افزایش چشمگیر مصرف سوخت شناور می‌شود [۱].

۳- مدلسازی حرکت شناور

^۶خواننده علاقه مند می‌تواند جهت مطالعه بیشتر در خصوص آخرین یافته‌ها در زمینه طراحی سیستم‌های DP به فصل هشتم از مرجع [۱] مراجعه نماید.

^۷ Stochastic

^۸ Wave-frequency Forces

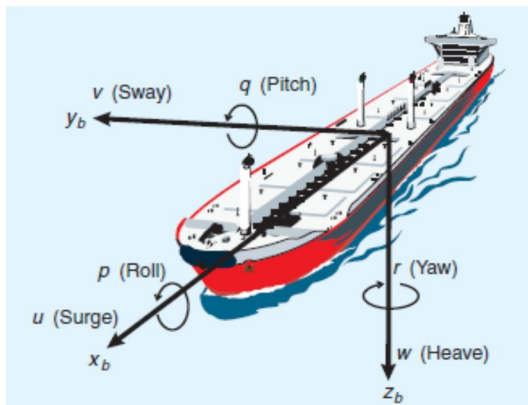
^۹ Structural Vibration

^{۱۰} Low-frequency Forces

با ظهور سیستم‌های موقعیت‌دهی جهانی^{۱۱} (GPS) در دهه ۸۰ میلادی طراحی سیستم‌های خودکار تنظیم موقعیت و وضعیت شناورها ممکن شد. اینگونه سیستم‌ها به صورت کلی بر فیدبک نمودن اندازه‌گیری از موقعیت و زاویه سمت شناور استوارند. موقعیت یک شناور معمولاً به وسیله GPS و وضعیت آن (به ویژه زاویه سمت) توسط ژایروکامپس^{۱۲} اندازه‌گیری می‌شود. جهت افزایش اطمینان در سیستم سنسورهای اندازه‌گیری دیگری نیز مانند واحد اندازه‌گیری اینرسی، سنسورهای موقعیت هیدرو-آکوستیک، سیم‌های محکم^{۱۳} و سنسورهای لیزری در یک شناور تهیه شده است. برای مدل‌سازی حرکت یک شناور از دو مرجع مختصات ناوبری و بدنه استفاده می‌شود. در مسئله تثبیت موقعیت با توجه به اینکه شناور ساکن بوده یا با سرعت پائین در حرکت است، معمولاً مدل‌سازی حرکت در صفحه افقی و با سه درجه آزادی در نظر گرفته شده می‌شود. در چنین شرایطی نوسانات زوایای چرخش^{۱۴} و غلطش^{۱۵} تأثیری بر متغیرهای صفحه افقی نگذاشته و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشند [۱]. از این رو، مدل‌سازی حرکت به صورت سه درجه آزادی بوده و مولفه‌های حرکت در راستاهای surge, sway و زاویه سمت در نظر گرفته می‌شوند [۲]. بردار وضعیت-موقعیت همین ترتیب بردار سرعت را نیز به صورت $\kappa = [u, v, r]^T$ تعریف می‌نمائیم. این متغیرها در شکل ۲ برای یک شناور نشان داده شده است. مدل دینامیکی برای یک شناور به صورت زیر است [۲]:

$$\dot{\eta} = C_b^n(\psi)\kappa \quad (1)$$

$$(M_{RB} + M_A)\dot{\kappa} + C_{RB}(\kappa)\kappa + d(V_{rc}, \gamma_c) = \tau_{control} + \tau_{wind} + \tau_{waves} \quad (2)$$



شکل ۲: مختصات بدنه برای یک شناور.

در ادامه به معرفی ترم‌های موجود در (۱) و (۲) می‌پردازیم. با توجه به اینکه ما از اثرات زوایای چرخش و غلطش صرف‌نظر نموده‌ایم، ماتریس کسینوسی مستقیم^{۱۶} در رابطه (۱) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_b^n(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

با این ویژگی که $C_b^n(\psi)^{-1} = C_b^n(\psi)^T$ است. ماتریس جرم M_{RB} ، ماتریس ثابت و مثبت موکد^{۱۷} است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_g \\ 0 & mx_g & I_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در این رابطه m جرم، I_z ممان اینرسی حول محور z_b و x_g موقعیت طولی مرکز جاذبه شناور متناسب با مختصات بدنه است. $C_{RB}(v)$ ماتریس کوریولیس-مرکزگرا^{۱۸} بوده که یک ماتریس پاد-متقارن^{۱۹} است:

¹¹ Global positioning system (GPS)

¹² Gyrocompass

¹³ Taut wires

¹⁴ Pitch

¹⁵ Roll

¹⁶ Direction cosine matrix

¹⁷ Positive definite

¹⁸ Coriolis-centripetal matrix

¹⁹ Skew-symmetric matrix

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_g r + v) \\ 0 & 0 & mu \\ m(x_g r + v) & -mu & 0 \end{bmatrix}$$

با توجه به اینکه در مسئله تثبیت موقعیت دینامیکی اندازه سرعت شناور کوچک است، می توان از ترم $C_{RB}(v)v$ صرف نظر نمود. زمانی که یک شناور در آب حرکت می کند، تغییرات فشار روی بدنه آن متناسب با سرعت و شتاب شناور نسبت به آب است. ضرائب مورد استفاده جهت بیان این نیروی متناسب با شتاب را ضرائب جرم اضافه شده²⁰ گویند. ماتریس جرم اضافه شده M_A که یک ماتریس مثبت موکد است به صورت زیر تعریف می شود:

$$M_A = \begin{bmatrix} -X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} \\ 0 & -Y_{\dot{r}} & -N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ترم $d(V_{rc}, \gamma_c)$ ناشی از نیروهای میرایی و نیروهای ناشی از جریان است که در آن V_{rc} اندازه سرعت جریان و γ_c جهت آن می باشند و به صورت زیر تعریف می گردند:

$$V_{rc} = \sqrt{(u - u_c)^2 + (v - v_c)^2}$$

$$\gamma_c = -\tan^{-1}\left(\frac{v - v_c}{u - u_c}\right)$$

که u_c و v_c مولفه های سرعت جریان در مختصات بدنه هستند. با توجه به اینکه تعیین دقیق $d(V_{rc}, \gamma_c)$ نیازمند آنالیزهای وسیع هیدرودینامیکی است، محاسبه دقیق این ترم مشکل بوده و به جای آن می توان از مدل تقریبی زیر استفاده نمود [4]:

$$d(V_{rc}, \gamma_c) \approx D\kappa - C_n^b(\psi)^T b. \quad (6)$$

در این رابطه، D ماتریس میرایی خطی و b بردار بایاس²¹ است. بردار بایاس معمولاً ثابت فرض می شود و توسط یک تخمینگر، تخمین زده می شود. با توجه به ثابت بودن بایاس و نیاز به تخمین آن و همچنین آن در نظر گرفتن تقریب (6) و صرف نظر نمودن از $C_{RB}(\kappa)\kappa$ داریم:

$$\dot{\eta} = C_n^b(\psi)\kappa \quad (7)$$

$$M\dot{\kappa} + D\kappa = C_n^b(\psi)^T b + \tau_{control} + \tau_{wind} + \tau_{waves} \quad (8)$$

$$\dot{b} = 0. \quad (9)$$

در مسئله تثبیت موقعیت دینامیکی معمولاً تغییرات زاویه سمت نسبت به زمان کوچک است و به بیان دیگر $\dot{C}_n^b(\psi) \approx 0$ است. متغیر η_p به صورت $\eta_p = C_n^b(\psi)^T \eta$ تعریف کنید. با استفاده از این تعریف، معادلات (7) تا (9) تبدیل به معادلات خطی زیر می گردد [2]:

$$\dot{\eta}_p = \kappa \quad (10)$$

$$M\dot{\kappa} + D\kappa = b_p + \tau_{control} + \tau_{wind} + \tau_{waves} \quad (11)$$

$$\dot{b}_p = 0. \quad (12)$$

۳-۱- مدلسازی نیروی باد

نیروی باد و ممان های ناشی از آن را می توان به صورت زیر مدل نمود:

$$\tau_{wind} = \frac{1}{2} \rho_a V_{nw}^2 \begin{bmatrix} A_{Fw} C_{Xw}(\gamma_{nw}) \\ A_{Lw} C_{Yw}(\gamma_{nw}) \\ A_{Lw} L_{oa} C_{Nw}(\gamma_{nw}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

که ρ_a چگالی هوا، A_{Fw} و A_{Lw} نواحی تصویر شده باد در صفحه کنار و جلو، و L_{oa} طول کلی شناور است. V_{nw} اندازه سرعت باد و γ_{nw} جهت آن می باشند و به صورت زیر تعریف می گردند:

$$V_{nw} = \sqrt{(u - V_w \cos \beta_w)^2 + (v - V_w \sin \beta_w)^2} \quad (14)$$

$$\gamma_{nw} = -\tan^{-1}\left(\frac{v - V_w \sin \beta_w}{u - V_w \cos \beta_w}\right) \quad (15)$$

²⁰ Added mass matrix

²¹ Bias

که V_w و β_w سرعت و جهت باد در مختصات زمین ثابت هستند. ضرائب باد برای شناورها $C_{Xw}(\gamma_{rw})$ ، $C_{Yw}(\gamma_{rw})$ و $C_{Nw}(\gamma_{rw})$ بر حسب جهت باد توسط محاسبات دینامیک سیالات یا مقیاس نمودن با یک شناور مشابه تعیین می‌شوند. در عمل تعیین گشتاور به صورت بالا بسیار پیچیده بوده و از این رو، از سنسور باد جهت تعیین آن استفاده می‌شود.

۲-۳- مدلسازی نیروی موج

همانطور که در بالا بیان شد، نیروی ناشی از موج به صورت مجموع دو مولفه خطی و غیرخطی تقسیم می‌شود:

$$\tau_{waves} = \tau_{waves}^{lin} + \tau_{waves}^{nlin} \quad (16)$$

مولفه خطی با فرکانسی مشابه با طول موج نوسان می‌کند. مولفه غیرخطی دارای فرکانس‌های بالاتر و پائین‌تر از طول موج هستند. موج خطی و غیرخطی فرکانس-پائین باعث تخریب موقعیت شناور در مسئله تثبیت موقعیت دینامیکی شناور می‌شود. موج فرکانس-پائین به عنوان اغتشاش در ورودی در نظر گرفته شده و به صورت یک ترم بایاس در رابطه (12) مدلسازی می‌شود. نیروهای خطی را معمولاً به صورت اغتشاش خروجی مدل نموده و از این رو، بردار موقعیت اندازه‌گیری شده را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۲]:

$$\eta_{tot} = \eta + \eta_w \quad (17)$$

که در این رابطه بردار موقعیت اندازه‌گیری شده، η_w بردار انحراف موقعیت ناشی از نیروهای خطی موج و η بردار موقعیت واقعی است. چنانکه از این رابطه دیده می‌شود، برای دستیابی به بردار موقعیت واقعی باید بردار انحراف موقعیت ناشی از نیروهای خطی موج تخمین زده شود. جهت تخمین، مولفه‌های این بردار را به صورت خروجی تابع تبدیل زیر مدل می‌کنند [۲]:

$$G(s) = \frac{\omega_0^2 s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (18)$$

که ورودی به این تابع تبدیل نویز سفید است. برای تابع تبدیل (18) می‌توان یک نمایش فضای حالت به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\dot{\xi}_i = A_{w_i} \xi_i + E_{w_i} \alpha_{3i} \quad (19)$$

$$\eta_{w_i} = C_{w_i} \xi_i$$

که $\xi_i \in \mathbb{R}^2$ ، $\alpha_{3i} \in \mathbb{R}$ بردار نویز سفید با متوسط صفر و توزیع گوسین^{۲۲} ($\alpha_3 = [\alpha_{31}^T, \alpha_{32}^T, \alpha_{33}^T]^T$)، η_{w_i} مولفه نام بردار انحراف موقعیت و $i = 1, 2, 3$ است. با توجه به اینکه بردار موقعیت سه مولفه دارد و وابسته به هر مولفه دو متغیر حالت لازم است.

۳-۳- مدل نهایی شناور برای استفاده در مسئله تثبیت موقعیت نهایی

با ترکیب نمودن معادله (19) با (10)-(12) مدل نهایی خطی سازی شده شناور به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\dot{\eta}_p = \kappa \quad (20)$$

$$M \dot{\kappa} + D\kappa = b_p + \tau_{control} + \tau_{wind} + \tau_{waves} + \alpha_1 \quad (21)$$

$$\dot{b}_p = \alpha_2 \quad (22)$$

$$\dot{\xi} = A_w \xi + E_w \alpha_3 \quad (23)$$

$$y = \eta_p + C_w \xi + \beta \quad (24)$$

که $\xi = [\xi_1^T, \xi_2^T, \xi_3^T]^T \in \mathbb{R}^6$ ، $\alpha_i \in \mathbb{R}^3$ و $i = 1, 2, 3$ ، $\beta \in \mathbb{R}^3$ نویز سفید با توزیع گوسین و متوسط صفر، $A_w \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ ، $E_w \in \mathbb{R}^{6 \times 3}$ و $C_w \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ را نشان می‌دهند. گشتاور کنترل $\tau_{control} \in \mathbb{R}^3$ معمولاً از سه بخش زیر تشکیل شده است:

$$\tau_{control} = -\hat{b} - \hat{t}_{wind} + B_u u_{con}$$

که \hat{t}_{wind} تخمینی از نیروی باد است که با روش کنترل پیشرو جبران می‌شود و \hat{b}_p بردار تخمین بایاس است که با استفاده از فیلتر کالمن بدست می‌آید و $B_u u_{con}$ گشتاور کنترلی می‌باشند. مولفه‌های ماتریس B_u نداشت از فرمان به عمگرها به نیروهای تولید شده توسط عملگر را تشکیل می‌دهند. برای مثال، اگر فرمان به یک پروانه، سرعت چرخش است، پس مولفه متناظر با آن در ماتریس B_u نداشت سرعت به رانش تولید شده است [۳]. لازم به ذکر است که اختلاف $\tau_{wind} - \hat{t}_{wind}$ به صورت یک خطای بایاس و اثر آن توسط بردار بایاس b_p مدلسازی می‌شود. البته چنانکه در بالا نیز بیان شد، بردار بایاس تنها ناشی از این خطا نبوده و خطای فرکانس پائین ناشی امواج فرکانس-پائین، جریان‌های آبی و میرایی نیز توسط آن مدل شده است. از اینجا به بعد برای سادگی و بدون از دست دادن کلیت، اجازه می‌دهیم که $B_u = I_{3 \times 3}$ باشد. معادلات (20)-(24) را می‌توان به صورت خلاصه نمود:

²² Gaussian

$$\dot{x} = Ax + Bu_{con} + E\alpha \quad (25)$$

$$y = Cx + \beta \quad (26)$$

که $\alpha = [\alpha_1^T, \alpha_2^T, \alpha_3^T]^T \in \mathbb{R}^9$ و $u_{con} \in \mathbb{R}^3$ ، $x = [\eta_p^T, \kappa^T, b_p^T, \xi^T]^T \in \mathbb{R}^{15}$ است و:

$$C = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & C_w \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ M^{-1} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{6 \times 3} & 0_{6 \times 3} & E_w \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 6} \\ 0_{3 \times 6} & -M^{-1}D & M^{-1} & 0_{3 \times 6} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 6} \\ 0_{6 \times 3} & 0_{6 \times 3} & 0_{6 \times 3} & A_w \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ M^{-1} \\ 0_{3 \times 3} \\ 0_{6 \times 3} \end{bmatrix},$$

می‌باشند. با توجه به اینکه در عمل قانون کنترل و الگوریتم تخمین به صورت دیجیتال پیاده‌سازی می‌شوند، علاقه مند هستیم که مدل دینامیکی (25) با خروجی (26) را با استفاده از روش اویلر به صورت زیر گسسته‌سازی کنیم:

$$x(k+1) = F_d x(k) + B_d u_{con}(k) + E_d \alpha(k) \quad (27)$$

$$y(k) = H_d x(k) + \beta(k) \quad (28)$$

که h زمان نمونه برداری، $F_d := (I + hA)$ ، $B_d := hB$ ، $E_d := hE$ و $H_d := C$ است.

۴- طراحی کنترل کننده برای یک سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی

جهت طراحی یک کنترل کننده برای یک سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی، باید زیرسیستم (20)-(21) کنترل و متغیرهای حالت آنها را به سمت مقادیر دلخواه همگرا نمائیم. از این رو این حالات باید کنترل پذیر^{۲۳} باشند. خوشبختانه این حالات کنترل پذیر بوده و با استفاده از اصل جداسازی (به علت خطی و تغییرناپذیر بودن مدل (20)-(24)) از یک فیدبک حالت جهت طراحی کنترل کننده استفاده می‌نمائیم.^{۲۴} با این حال بهره فیدبک حالت الزاما بهینه نیست و این مسئله منجر به افزایش مصرف سوخت شناور و اتلاف انرژی می‌گردد. برای حل این مشکل می‌توان از نظریه کنترل بهینه استفاده نمود. قانون کنترل فیدبک حالت $u_{con} = -K_c [\eta_p^T \quad \kappa^T]^T$ را در نظر بگیرید. بهره فیدبک حالت (K_c) را به صورتی انتخاب نمائید که تابع هزینه زیر را بهینه سازد:

$$\Sigma(K_c) = \int_{t=0}^{t=\infty} [\eta_p(t)^T \quad \kappa(t)^T] Q_c [\eta_p(t)^T \quad \kappa(t)^T]^T + u_{con}(t)^T R_c u_{con}(t) dt. \quad (29)$$

در معادله بالا ماتریس‌های وزن R_c و Q_c به ترتیب مثبت موکد و مثبت نیمه موکد هستند. این ماتریس‌ها باید بگونه ای انتخاب شوند که خواسته‌های طراحی در یک سیستم DP را برآورده نمایند. برای مثال اگر ماتریس Q_c در مقایسه با R_c خیلی کوچک باشد، این انتخاب بدین معنی است که ما می‌خواهیم بهره K_c را بگونه ای انتخاب کنیم که مصرف انرژی بسیار کاهش یابد، حتی اگر متغیرهای حالت به کندی به سمت مقادیر دلخواه همگرا شوند. لازم به ذکر است که معمولا ماتریس‌های وزن R_c و Q_c قطری هستند. حل مسئله (29) ختم به حل جبری معادله ریکاتی زیر می‌گردد:

$$A_L^{3T} S + S A_L^3 - S B_L^3 R_c^{-1} S B_L^{3T} + Q_c = 0 \quad (30)$$

که ماتریس S را ماتریس ریکاتی^{۲۵} گویند. حال بهره K_c به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$K_c = R_c^{-1} B_L^{3T} S. \quad (31)$$

بنابراین قانون کنترل به صورت زیر بدست می‌آید:

$$u_{con} = -K_c [\eta_p^T \quad \kappa^T]^T. \quad (32)$$

این روش طراحی را Linear Quadratic Regulator (LQR) گویند. در این روش طراحی چنانکه دیده شد، فرض نمودیم که همه حالات سیستم در اختیار هستند. با این وجود در عمل چنین نیست و ما بر اعمال قانون کنترل (32) نیاز به یک تخمینگر داریم. در این صورت اگر از یک فیلتر کالمن برای تخمین حالات سیستم (25)-(26) استفاده شود، به قانون کنترل زیر خواهیم رسید:

$$u_{con} = -K_c [\hat{\eta}_p^T \quad \hat{\kappa}^T]^T. \quad (33)$$

که $\hat{\eta}_p$ و $\hat{\kappa}$ تخمین حالات η_p و κ است. به چنین روش طراحی، Linear Quadratic Gaussian (LQG) گویند.

۵- تعیین ماتریس‌های کوواریانس برای پیاده‌سازی فیلتر کالمن

²³ Controllable

باید خاطر نشان نمود که کنترل کننده علاوه بر ترم مربوط به فیدبک حالت از دو ترم پیش رو نیز جهت حذف اثر اغتشاش باد و بایاس نیز تشکیل شده است.

²⁵ Riccati

مدل دینامیکی گسسته‌سازی شده (28)-(27) را در نظر بگیرید. اجازه دهید ماتریس‌های کوواریانس نویز فرایند و نویز اندازه‌گیری به صورت زیر داده شوند:

$$E[\alpha(k)\alpha(k)^T] = \begin{cases} Q_k & k = i \\ 0 & k \neq i \end{cases}$$

$$E[\beta(k)\beta(k)^T] = \begin{cases} R_k & k = i \\ 0 & k \neq i \end{cases}$$

که $E[.]$ امید ریاضی بوده و

$$E[\alpha(k)\beta(k)^T] = 0$$

است. با توجه به رویت پذیری سیستم (26)-(25)، فرض کنید که نرخ نمونه‌برداری h به صورتی انتخاب می‌شود که سیستم (28)-(27) رویت پذیر باشد. حال با در اختیار داشتن ماتریس‌های کوواریانس $Q_k \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$ و $R_k \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ، فیلتر کالمن تخمین بهینه از بردار حالات را فراهم می‌کند. ماتریس کوواریانس خطای تخمین را با $P_k \in \mathbb{R}^{15 \times 15}$ و بردار تخمین حالت را با $\hat{x} \in \mathbb{R}^{15}$ نشان دهید. الگوریتم فیلتر کالمن به صورت زیر است:

گام ۱) مقدار اولیه برای P_0 و $\hat{x}(0)$ تعیین کنید.

گام ۲) برای هر لحظه $k = 1, 2, 3, \dots$ مراحل زیر را انجام دهید:

۲-الف) گام تخمین:

$$\hat{x}^-(k) = F_d \hat{x}(k-1) + B_d u_{con}(k-1) \quad (34)$$

$$P_k^- = F_d P_{k-1} F_d^T + E_d Q_{k-1} E_d^T \quad (35)$$

۲-ب) گام تصحیح:

$$K_k = P_k^- H_d^T (H_d P_k^- H_d^T + R_k)^{-1} \quad (36)$$

$$\hat{x}(k) = \hat{x}^-(k) + K_k (y(k) - H_d \hat{x}^-(k)) \quad (37)$$

$$P_k = (I - K_k H_d) P_k^- \quad (38)$$

چنانکه دیده می‌شود این الگوریتم را می‌توان به سادگی پیاده‌سازی و تخمین بهینه $\hat{x}(k)$ در هر لحظه $k = 1, 2, 3, \dots$ محاسبه نمود. با این وجود، کیفیت تخمین بستگی به تعیین دقیق ماتریس کوواریانس نویز فرایند Q_k و ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری R_k دارد. در عمل تعیین دقیق این ماتریس‌ها همواره ممکن نیست. به ویژه در مسئله DP، ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری R_k ، بر اساس کوواریانس نویز سنسورهای اندازه‌گیری بردار خروجی y بدست می‌آید. جهت تعیین y ، از سنسور تعیین زاویه سمت (ژایروکامپس) و جهت تعیین موقعیت x_n و x_e (GPS) استفاده می‌گردد. با در اختیار داشتن کوواریانس نویز این سنسورها می‌توان ماتریس قطری کوواریانس نویز اندازه‌گیری $R_k \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ را به صورت زیر تعیین نمود:

$$R_k = \text{diag}(\sigma_n^2, \sigma_e^2, \sigma_\psi^2) \quad (39)$$

که σ_n^2 کوواریانس نویز سنسور اندازه‌گیری x_n (β_1)، σ_e^2 کوواریانس نویز سنسور اندازه‌گیری x_e (β_2) و σ_ψ^2 کوواریانس نویز سنسور اندازه‌گیری زاویه سمت (β_3) است. تعیین ماتریس کوواریانس نویز فرایند Q_k ، بسیار پیچیده‌تر بوده و به شرایط دریا، زاویه پیشانی شناور نسبت به اغتشاشات محیطی و میزان عدم قطعیت (تقریب) در گسسته‌سازی^{۲۶} بستگی دارد. معمولاً این ماتریس را به فرم قطری زیر انتخاب می‌کنیم [۳]:

$$Q_k = \text{diag}(Q_1, Q_2, Q_3) \quad (40)$$

ماتریس $Q_1 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ کوواریانس نویز α_1 است که نشان دهنده عدم قطعیت در معادله حرکت شناور می‌باشد. ماتریس $Q_2 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ کوواریانس نویز α_2 است که نشان دهنده عدم قطعیت در بردار بایاس است و بخش فرکانس پائین نیروهای میرایی، جریان آبی و نیروی موج را مدلسازی می‌کند. ماتریس $Q_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ کوواریانس نویز α_3 است که اغتشاش ناشی از موج خطی را مدلسازی می‌کند. ماتریس‌های Q_1 و Q_2 معمولاً قطری انتخاب می‌شود. درایه‌های روی قطر ماتریس Q_1 به صورت کسری از کوواریانس نویز اندازه‌گیری موقعیت انتخاب می‌شود [۳]. درایه‌های روی قطر ماتریس Q_2 که کوواریانس نویز α_2 را نشان می‌دهد، مقادیر بزرگی دارند [۳]. درایه‌های ماتریس کوواریانس Q_3 همراه با پارامترهای فیلتر موج (23) تخمین زده می‌شود [۳]. این تخمین‌ها بر اساس اطلاعاتی است که از قبل و حین عملکرد شناور بدست آمده است. لازم به ذکر

²⁶ Discretization

است که درایه‌های Q_3 و پارامترهای فیلتر موج (23) پس از تغییرات محسوس در زاویه سمت یا پس از هر بازه زمانی ۲۰ دقیقه مجددا تخمین زده می‌شود [۳].

با توجه به اینکه دقت تخمین فیلتر کالمن وابسته به دقت تعیین ماتریس‌های R_k و Q_k بوده و تعیین این ماتریس‌های به خصوص Q_k پیچیده است، جهت تعیین آنها می‌توان از روش‌های تطبیقی^{۲۷} که در متون علمی ارائه شده است، استفاده نمود. روش‌های فراوانی در متون علمی برای تعیین این ماتریس‌های ارائه شده است، که البته برخی از آنها به لحاظ پیاده‌سازی دارای مشکلاتی همچون بار محاسباتی بالا است. یکی از روش‌های تطبیقی که برای تعیین ماتریس‌های R_k و Q_k در صنعت نوابری اینرسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، روشی است که در [۴] ارائه گردیده است. ما نیز در اینجا می‌خواهیم از این روش استفاده نمائیم. الگوریتم پیاده‌سازی این روش در زیر شرح داده می‌شود:

گام ۱) مقدار اولیه برای $N, P_0, \hat{Q}_0, \hat{R}_0$ و $\hat{x}(0)$ را تعیین کنید (پارامتر N جهت متوسط‌گیری از خطای تخمین استفاده می‌شود و این مقدار معمولاً بین ۱۰ تا ۳۰ انتخاب می‌گردد).

گام ۲) برای هر لحظه $k = 1, 2, 3, \dots$ مراحل زیر را انجام دهید:

۲-الف) گام تخمین:

$$\hat{x}^-(k) = F_d \hat{x}(k-1) + B_d u_{con}(k-1) \quad (41)$$

$$P_k^- = F_d P_{k-1} F_d^T + E_d \hat{Q}_{k-1} E_d^T \quad (42)$$

۲-ب) تخمین ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری \hat{R}_k :

$$\varepsilon(k) = y(k) - H_d \hat{x}^-(k) \quad (43)$$

$$\hat{C}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k \varepsilon(i) \varepsilon(i)^T \quad (44)$$

$$\hat{R}_k = \hat{C}_k - H_d P_k^- H_d^T \quad (45)$$

۲-ج) گام تصحیح:

$$K_k = P_k^- H_d^T (H_d P_k^- H_d^T + \hat{R}_k)^{-1} \quad (46)$$

$$\hat{x}(k) = \hat{x}^-(k) + K_k (y(k) - H_d \hat{x}^-(k)) \quad (47)$$

$$P_k = (I - K_k H_d) P_k^- \quad (48)$$

۲-د) تخمین ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری \hat{Q}_k :

$$E_d \hat{Q}_k E_d^T = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k (\hat{x}(i) - \hat{x}^-(i)) (\hat{x}(i) - \hat{x}^-(i))^T + P_k - F_d P_{k-1} F_d^T \approx K_k \hat{C}_k K_k^T \quad (49)$$

در پیاده‌سازی الگوریتم فوق باید توجه گردد که در معادله (49)، $E_d \hat{Q}_k E_d^T$ به جای \hat{Q}_k محاسبه می‌نماید و تخمین عبارت $E_d \hat{Q}_k E_d^T$ برای پیاده‌سازی فیلتر کالمن کفایت می‌کند. بیان این نکته نیز ضروری است، که در الگوریتم فوق در صورتی که ماتریس‌های \hat{Q}_k و \hat{R}_k تخمین زده نشوند، این الگوریتم تبدیل به فیلتر کالمن کلاسیک می‌گردد.

۶- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به بررسی صحت روش پیشنهادی جهت پیاده‌سازی سیستم DP در حضور اغتشاشات ناشی از باد، جریان‌های بادی، امواج و خطاهای مدلسازی، از طریق شبیه‌سازی بر اساس داده‌های واقعی می‌پردازیم. در این راستا فرض می‌کنیم که هدف این است که موقعیت یک شناور در زاویه سمت صفر و راستاهای صفر برای sway و surge تثبیت نمائیم. باید توجه نمود که این زاویه سمت و راستاهای حرکتی جهت سهولت شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است و تغییر آن تأثیری بر الگوریتم کنترل-تخمین نخواهد داشت. همچنین جهت مدلسازی از داده‌های یک شناور واقعی که در مرجع [۵] بیان شده است، استفاده می‌نمائیم:

جدول (۱) پارامترهای لازم جهت محاسبه ماتریس‌های جرم و اصطکاک [۵].

Parameter	Value	SI-units
m	23.800	kg
x_G	0.046	m
I_z	1.760	kgm ²
$X_{\dot{u}}$	-2.0	kg
$Y_{\dot{v}}$	-10.0	kg
$Y_{\dot{r}}$	-0.0	kgm
$N_{\dot{v}}$	-0.0	kgm
$N_{\dot{r}}$	-1.0	kgm ² /s
X_u	-0.72253	kg/s
Y_v	-0.88965	kg/s
Y_r	-7.250	kgm/s
N_v	0.03130	kgm/s
N_r	-1.900	kgm ² /s

با استفاده از داده‌های جدول ۱، ماتریس‌های جرم و اصطکاک M و D را تعیین می‌نماییم. از سوی دیگر، پارامترهای فیلتر (23) نیز به صورت $\zeta = 0.1$ و $\omega_0 = 0.8976$ انتخاب شده است. چنانکه در متون علمی از جمله [۲] گزارش شده است، این مقادیر معمولاً برای این فیلتر انتخاب مناسبی است. در شبیه‌سازی پیش رو اغتشاش ناشی از امواج، میرایی و جریان‌های آبی را نیز در نظر گرفته می‌شود. در این صورت، فیلتر (23) جهت تخمین امواج خطی و دینامیک بایاس (22) جهت تخمین اغتشاشات فرکانس-پائین اعمالی به دینامیک شناور اضافه می‌گردد. اجازه دهید که مقادیر اولیه ماتریس‌های \hat{R} و مقدار اولیه ماتریس کوواریانس نویز فرایند \hat{Q} به صورت زیر در نظر گرفته شوند:

$$\hat{R}_0 = \text{diag}(0.01, 0.01, 0.01) \quad (50)$$

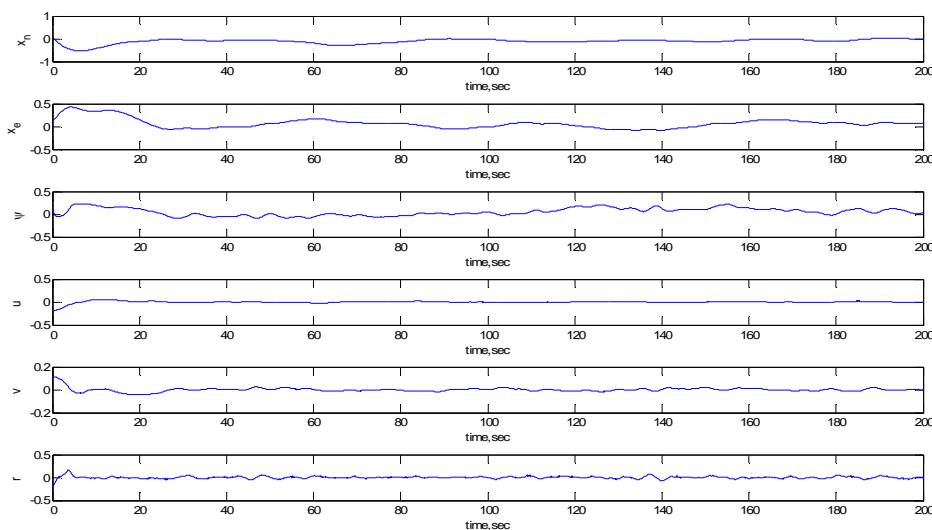
$$\hat{Q}_0 = \text{diag}(1, 1, 1, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01) \quad (51)$$

همچنین ماتریس‌های وزنی R_c و Q_c برای تعیین بهره فیدبک حالت (33) را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

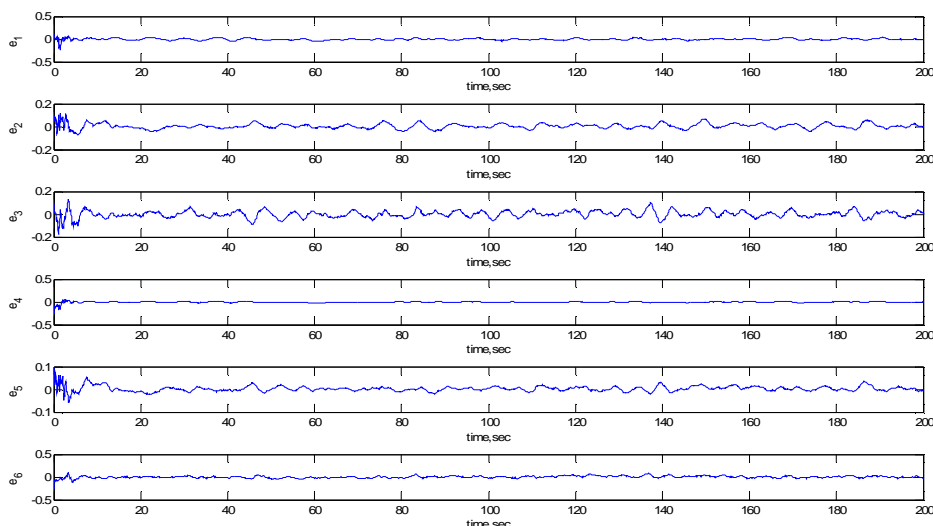
$$R_c = \text{diag}(1, 1, 1) \quad (52)$$

$$Q_c = \text{diag}(2, 1.5, 4, 1, 1, 1) \quad (53)$$

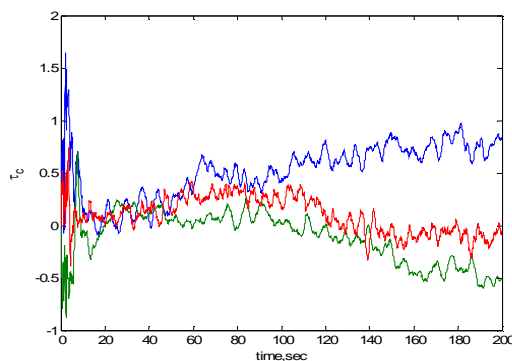
شکل‌های ۳ تا ۵ نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهند. شکل ۳ حالات دینامیک شناور را نشان می‌دهند. چنانکه دیده می‌شود، روش کنترلی LQG توانسته است، هدف ما که تثبیت موقعیت شناور در نقطه $\eta_p = [0 \ 0 \ 0]^T$ است، را خوبی انجام دهد. به ویژه، زاویه سمت با خطای کمتر از ۰/۵ درجه تثبیت شده است. شکل ۴ نیز خطای تخمین متغیرهای فرکانس-پائین حرکت شناور (یعنی ۶ متغیر اول بردار خطای تخمین $e = x - \hat{x}$) را نشان می‌دهد. چنانکه از این شکل نیز دیده می‌شود، خطای تخمین نیز پس از زمان کوتاهی به سمت صفر میل نموده است. در نهایت، شکل ۵ گشتاور کنترل $\tau_{control}$ را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، در حضور سایر اغتشاشات و خطا در تخمین نیروی باد که به صورت یک نویز سفید با متوسط غیرصفر مدلسازی شده است، روش پیشنهادی به خوبی توانسته است متغیرهای خروجی (زاویه سمت، موقعیت در راستای شرق و موقعیت راستای شمال) را تثبیت نماید.



شکل ۳: حالات دینامیک شناور کنترل شده با ماتریس‌های وزنی (52) و (53).



شکل ۴: خطای تخمین فیلتر کالمن.



شکل ۵: مولفه‌های گشتاور کنترل u_c .

۷- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های تثبیت موقعیت دینامیکی در کشور، در این مقاله تلاش نمودیم که با معرفی بخش‌های اصلی یک سیستم DP واقعی و چگونگی طراحی آنها گامی به سمت این هدف برداریم. همچنین، روش نوینی نیز برای ارتقا عملکرد یک سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی ارائه نمودیم. در این راستا، به جای فیلتر کالمن کلاسیک که معمولاً جهت تخمین حالات در این سیستم‌ها بکار می‌رود، از یک فیلتر کالمن تطبیقی استفاده گردید. مزیت اصلی این فیلتر در طراحی سیستم DP، تخمین ماتریس کوواریانس نویز فرایند بوده که تعیین دقیق درایه‌های این ماتریس در سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی بسیار پیچیده است و خطا در تعیین مولفه‌های این ماتریس باعث کاهش چشمگیر دقت عملکرد سیستم می‌گردد. از این رو با استفاده از این روش جدید در طراحی می‌توان دقت سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی را به صورت چشمگیر افزایش داد. در نهایت، صحت روش پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی بر اساس داده‌های واقعی بررسی گردید.

مراجع

- [1] Sørensen, A. J., Marine Control Systems, Department of Marine Technology, NTNU, 2013.
- [2] Fossen, T. I., Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Trondheim, Norway: Marine Cybernetics, 2002.
- [3] Fossen, T. I., and Perez, T., Kalman Filtering for Positioning and Heading Control for Ships and Offshore Rigs, IEEE Control Systems Magazine, vol. 32, 2009.
- [4] Mohamed, A. H., and Schwarz, K. P., Adaptive Kalman Filtering for INS/GPS, Journal of Geodesy, vol. 73, pp. 193-203, 1999.
- [5] Fannemel, A. V., Dynamic Positioning by Nonlinear Model Predictive Control, MSc Thesis, NTNU, 2008.