

## طراحی و شبیه‌سازی کنترل مدلغزشی فازی موقعیت زاویه‌ای رول ناوچه جنگی، در حضور عدم قطعیت‌های ساختاری و اغتشاشات خارجی ناشی از امواج دریا

محمد ویسی<sup>۱</sup>، محمدرضا سلطانیپور<sup>۲</sup>

[veysi@ssau.ac.ir](mailto:veysi@ssau.ac.ir)

۱- مربی دانشکده مهندسی برق، دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء (ص)

۲- دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

### چکیده

یکی از روش‌های پایدارسازی کشتی در مقابله با حرکات غیرخطی راستای زاویه رول، کنترل فین‌ها می‌باشد. با توجه به دینامیک کاملاً غیرخطی حرکت در راستای زاویه رول کشتی و همچنین با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ساختاری و اغتشاشات خارجی ناشی از امواج دریا، استخراج مدل دینامیکی دقیق به سادگی حاصل نمی‌گردد. لذا، طراحی یک کنترل کننده مبتنی بر مدل سیستم که با عملکردی مطلوب، نیروی مناسب را به عنوان ورودی کنترل به فین‌ها اعمال کند و از طرفی بر عدم قطعیت‌های ساختاری و غیرساختاری بیان شده غلبه نماید، امری دشوار است. راهکار مرسوم برای کنترل چنین سیستم‌های غیرخطی نامطمئنی، استفاده از کنترل مقاوم غیرخطی است. کنترل مدلغزشی یکی از روش‌های پرکاربرد کنترل مقاوم غیرخطی است که می‌تواند بر عدم قطعیت‌های مذکور غلبه نماید، اما این روش کنترلی در مرحله پیاده‌سازی عملی دارای معایبی همچون لرزش در ورودی کنترل می‌باشد. در این مقاله، برای از بین بردن پدیده نامطلوب لرزش ورودی کنترل، کنترل مدلغزشی با سیستم فازی تاکاگی-سوگنو-کانگ ترکیب می‌شود. کنترل کننده مدلغزشی فازی حاصل شده، مزایای کنترل مدلغزشی را دارا بوده و همچنین در پیاده‌سازی آن اثری از پدیده لرزش ورودی کنترل نیست. به عنوان مطالعه موردی و به منظور نمایش عملکرد مطلوب کنترل کننده‌های پیشنهادی، یک مسیر مطلوب ناهموار و چالش برانگیز برای موقعیت زاویه‌ای رول در نظر گرفته شده و کنترل کننده‌های مدلغزشی و مدلغزشی فازی بر روی یک ناوچه جنگی پیاده‌سازی و شبیه‌سازی شده است.

### واژگان کلیدی

کنترل مدلغزشی فازی، سیستم فازی تاکاگی-سوگنو-کانگ، موقعیت زاویه‌ای رول ناوچه جنگی، عدم قطعیت، فین

تاریخ دریافت مقاله : ۹۸/۰۶/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۱۱/۱۶

## ۱- مقدمه

تأثیر وجود و عدم وجود فین‌ها بر روی کاهش حرکات رول در هنگام دور زدن کشتی با سرعت‌های مختلف و در حضور و عدم حضور اغتشاشات امواج، به وسیله کنترل-کننده MIGA-PID را بررسی کرده است. راهکار پیشنهادی این مقاله نسبت به روش‌های کنترلی ZN-PID و LQR عملکرد بسیار بهتری دارد، اما متأسفانه در برابر تغییرات پارامترهای دینامیکی سیستم کشتی مقاوم نمی‌باشد. در مقاله [۷]، از یک کنترل‌کننده PID برای کنترل زاویه رول یک ناوچه جنگی استفاده شده است. در روش کنترلی ارائه شده، اغتشاشات خارجی ناشی از امواج دریا به عنوان یک ورودی ناخواسته در نظر گرفته شده است، اما برای مقابله با عدم قطعیت‌های ساختاری هیچ راهکاری ارائه نشده است. در مقاله [۱]، برای کنترل زاویه رول کشتی از یکی از پرکاربردترین روش‌های کنترل مقاوم غیرخطی<sup>۹</sup> یعنی کنترل مدلغزشی<sup>۱۰</sup> استفاده شده است. اگرچه این روش کنترلی در مواجهه با عدم قطعیت‌های ساختاری و اغتشاشات خارجی بسیار توانمند است، اما ورودی کنترل دارای ناپیوستگی است که این پدیده نامطلوب را لرزش ورودی کنترل<sup>۱۱</sup> می‌نامند. وجود لرزش باعث فعال شدن مدهای دینامیکی فین و کاهش کارایی ورودی کنترل می‌گردد [۸ و ۹]. برای حذف لرزش ورودی کنترل در مقاله‌های [۱ و ۱۰]، به ترتیب از روش‌های سنتی استفاده از  $\tanh(\cdot)$  و  $\text{sat}(\cdot)$  به جای  $\text{sgn}(\cdot)$  در قانون کنترلی، بهره گرفته شده است.

در سال ۲۰۱۶، در مرجع [۱۱] یک روش شبکه عصبی تطبیقی برای پایداری و کنترل زاویه رول کشتی مورد استفاده قرار گرفته است. در روش ارائه شده، تکنیک پسگام تطبیقی<sup>۱۲</sup> با شبکه عصبی<sup>۱۳</sup> تلفیق شده است. در روش پیشنهادی، تنها اغتشاشات خارجی ناشی از امواج دریا تخمین زده شده و با آن مقابله گردیده است اما متأسفانه برای غلبه بر عدم قطعیت‌های ساختاری هیچگونه تدبیری اندیشیده نشده است. در سال بعد و در همان مجله، یک تکنیک شبکه عصبی تطبیقی مقاوم بسیار جذاب ارائه شده است که به طور همزمان بر عدم قطعیت‌های ساختاری و غیرساختاری غلبه می‌نماید اما حجم

پایداری حرکات کشتی در راستای رول، اهمیت فوق-العاده‌ای در تأمین ایمنی تجهیزات و خدمه کشتی دارد [۱]. سیستم‌های پایداری رول کشتی<sup>۱</sup> را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم نمود، دسته اول سیستم‌های داخلی هستند که در داخل کشتی نصب می‌شوند، مانند سیستم پایداری ژيروسکوپی<sup>۲</sup> و سیستم جابجایی جسم مایع یا جامد. دسته دوم سیستم‌های خارجی هستند که عبارتند از تیر اصلی خن، فین<sup>۳</sup>، کنترل سکان و تریم تب<sup>۴</sup> [۲]. سیستم‌های داخلی، هم در حال سکون و هم در حالت حرکت کشتی کارآمد هستند، اما جرم بالایی دارند. در مقابل، سیستم‌های خارجی در حالت سکون کشتی کارایی ندارند و کشش هیدرودینامیکی<sup>۵</sup> ایجاد می‌کنند [۳]. البته اخیراً محققین در مقاله [۴]، با کنترل فین و با استفاده از یک کنترل‌کننده متبوع-تابع<sup>۶</sup> کشتی را در حالت سکون، در راستای رول پایدار نموده‌اند.

پایداری و کنترل زاویه رول کشتی‌های مختلف، عموماً توسط تلفیقی از سیستم‌های کنترلی داخلی و خارجی انجام می‌شود [۲]. فین‌ها نقش بسیار مهمی در پایداری و کنترل کشتی‌ها در راستای رول دارند. محققین عرصه مهندسی کنترل در سال‌های اخیر روش‌های کنترلی متنوعی را برای کنترل فین‌ها ارائه نموده‌اند. اکثر پارامترهای دینامیکی حرکت در راستای رول کشتی، دارای عدم قطعیت<sup>۷</sup> هستند. از طرفی اغتشاشات خارجی<sup>۸</sup> ناشی از امواج دریا نیز در کنار عدم قطعیت‌های ساختاری مذکور، مسئله کنترل موقعیت زاویه‌ای رول را به مسئله‌ای چالش‌برانگیز تبدیل نموده‌اند [۱]. نویسندگان در مقاله [۵]، با استفاده از کنترل‌کننده FGS-PID حرکات رول ناوچه جنگی SIGMA-e را در حالت‌های دریای آرام و موج کاهش داده‌اند. در کنترل‌کننده مرجع مذکور، عدم قطعیت‌های ساختاری در نظر گرفته نشده است و فقط اغتشاشات امواج، مد نظر قرار داده شده است. مقاله [۶]،

1. Ship Roll Stabilizer Systems

2. Gyrostabilizer

3. Fin

4. Trim Tab

5. Hydrodynamic Drag

6. Master-Slave

7. Uncertainty

8. External Disturbances

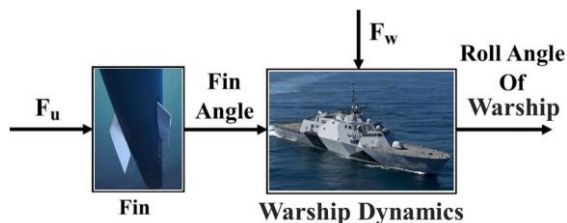
9. Robust Nonlinear Control

10. Sliding Mode Control

11. Control Input Chattering

12. Adaptive Backstepping Technique

13. Neural Network



شکل (۱) شماتیک سیستم حلقه-باز برای حرکت در راستای رولِ ناوچه جنگی

از آنجائیکه کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله یک کنترل کننده مبتنی بر مدل می باشد لذا در زیربخش زیر، مدل دینامیکی حرکت در راستای رولِ ناوچه جنگی معرفی می گردد.

## ۲-۱- معادلات دینامیکی حرکت در راستای رولِ ناوچه جنگی

معادلات دینامیکی حرکت در راستای رولِ ناوچه جنگی، غیر خطی، پیچیده و به صورت زیر است [۷ و ۱]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 \dot{v} + I_{xx} \dot{\Phi} &= \varepsilon_2 \dot{v} + \xi I_{xx} \dot{\Phi} + \varepsilon_3 |u|v + \\ &\varepsilon_4 ur + \varepsilon_5 v|v| + \varepsilon_6 v|r| + \varepsilon_7 r|v| + \\ &\varepsilon_8 \Psi |uv| + \varepsilon_9 \Psi |ur| + \beta_1 \Psi u^2 + \\ &\beta_2 \Phi |u| + \beta_3 \Phi |\Phi| + \beta_4 \Phi + \\ &\beta_5 \Psi^3 - \rho g \nabla G_z(\Psi) \end{aligned} \quad (1)$$

که در رابطه فوق،  $\Phi$  و  $r$  سرعت زاویه‌ای حول محورهای  $x$  و  $z$  ناوچه در قاب مختصاتی بدنه مطابق با سیستم مختصات اولبری می باشد.  $u$  سرعت در راستای محور  $x$  و  $v$  سرعت در راستای محور  $y$  است.  $I_{xx}$  و  $\xi I_{xx}$  به ترتیب ممان اینرسی کل سیستم و تأثیر جرم اضافه شده به سیستم بوده و  $\Psi$  زاویه رولِ ناوچه جنگی،  $\rho$  چگالی جرم آب،  $g$  گرانش زمین،  $\nabla$  جابجایی ناوچه جنگی و  $G_z(\Psi)$  تابع بیویانسی ناوچه جنگی می باشد.  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_9$  و  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_5$  ضرایبی با مقادیر ثابت هستند.

فرض ۱: ناوچه جنگی در یک مسیر مستقیم و با سرعت تقریباً ثابت در حال حرکت می باشد. از اینرو، شرایط زیر بر رابطه (۱) حاکم است [۱]:

$$\begin{cases} v = 0 \\ \dot{v} = 0 \\ u = V \\ r = 0 \end{cases} \quad (2)$$

محاسبات این کنترل کننده بسیار سنگین بوده و عملاً امکان پیاده سازی عملی این کنترل کننده وجود ندارد [۱۲]. در مرجع [۱۳]، برای کنترل زاویه رول کشتی از روش کنترلی بهینه رگولاتور درجه دوم خطی<sup>۱۴</sup> استفاده شده است. استفاده از این روش کنترلی برای کنترل سیستم های خطی بسیار مطلوب می باشد و پایداری سیستم را نیز تضمین می نماید. اما همانگونه که می دانیم معادلات دینامیکی حرکت در راستای رول کشتی، غیر خطی می باشد لذا تنها راه برای استفاده از این روش کنترلی به منظور کنترل زاویه رول کشتی، خطی سازی معادلات غیر خطی است که در این صورت کنترل کننده دیگر بهینه نخواهد بود. از طرفی کنترل کننده پیشنهادی این مرجع در مقابل عدم قطعیت ها، کنترل کننده ای مقاوم نمی باشد.

در این مقاله، برای کنترل موقعیت زاویه ای رول یک ناوچه جنگی از کنترل مدلفزشی فازی استفاده شده است. در تحقیق حاضر، برای حذف لرزش ورودی کنترل مدلفزشی و تضمین ردگیری دقیق مسیر مطلوب، از منطق فازی استفاده شده است و به طور همزمان بر تمامی عدم قطعیت های ساختاری و غیرساختاری غلبه گردیده است. در بخش ۲، ضمن تشریح مسأله کنترلی، ابتدا معادلات دینامیکی حرکت در راستای رولِ ناوچه جنگی بیان شده است، سپس در ادامه، روند طراحی کنترل کننده های مدلفزشی و مدلفزشی فازی ارائه گردیده است. بخش ۳، نتایج شبیه سازی های دو مرحله ای بر روی یک ناوچه جنگی را بیان می کند و در نهایت، بخش ۴ نتایج مقاله را تشریح می نماید.

## ۲- بیان مسأله

نادقیقی پارامترهای روابط دینامیکی حرکت در راستای رول ناوچه جنگی، مسئله کنترل موقعیت زاویه ای رول را با چالش مواجهه با عدم قطعیت های ساختاری روبرو می سازد. از طرفی، از اغتشاشات خارجی ناشی از امواج دریا ( $F_w$ ) نیز گریزی نیست. لذا در صورت عدم اعمال یک کنترل کننده مقاوم به مدل دینامیکی رول ناوچه جنگی، سیستم حلقه-باز شکل (۱) مطمئناً تنها با اعمال نیروی کنترلی  $F_u$  بسیار ناکارآمد خواهد بود.

<sup>14</sup>. Linear Quadratic Regulator

$$S = (d/dt + \lambda)^{n-1} e \quad (۸)$$

در رابطه (۸)،  $e = \Psi - \Psi_d$  خطای ردگیری بوده که در آن  $\Psi$  موقعیت زاویه‌ای رول ناوچه جنگی و  $\Psi_d$  موقعیت زاویه‌ای مطلوب رول ناوچه جنگی و  $\lambda$  ضریبی ثابت و مثبت است. برای طراحی کنترل کننده مدلزشی، متغیر  $\Psi_r^{(n-1)}$  در حالت کلی به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$\Psi_r^{(n-1)} = \Psi^{(n-1)} - s \quad (۹)$$

از آنجائیکه معادلات دینامیکی حرکت در راستای رول ناوچه جنگی از درجه دو می‌باشد، بنابراین رابطه (۹) با  $n = 2$  به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$\dot{\Psi}_r = \dot{\Psi} - s \quad (۱۰)$$

با مشتق گرفتن از رابطه (۱۰) داریم:

$$\ddot{\Psi}_r = \ddot{\Psi} - \dot{s} \quad (۱۱)$$

جهت طراحی کنترل کننده مدلزشی، با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱)، رابطه (۷) به صورت زیر تغییر می‌یابد:

$$A\ddot{\Psi}_r + A\dot{s} + F(\dot{\Psi})\dot{\Psi}_r + F(\dot{\Psi})s + F(\Psi) = F_u \quad (۱۲)$$

حال قانون کنترلی به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$F_u = \hat{F}_u - Ksgn(s) \quad (۱۳)$$

که در آن  $sgn(\cdot)$  تابع علامت است و  $\hat{F}_u$  به صورت زیر انتخاب می‌شود:

$$\hat{F}_u = \hat{A}\ddot{\Psi}_r + \hat{F}(\dot{\Psi})\dot{\Psi}_r + \hat{F}(\Psi) \quad (۱۴)$$

در روابط (۱۳) و (۱۴)،  $\hat{A}$ ،  $\hat{F}(\dot{\Psi})$  و  $\hat{F}(\Psi)$  به ترتیب تخمینی از  $A$ ،  $F(\dot{\Psi})$  و  $F(\Psi)$  می‌باشند و  $K$  یک ثابت مثبت است. روابط (۱۳) و (۱۴) در رابطه (۱۲)، جایگذاری می‌گردد:

$$A\ddot{\Psi}_r + A\dot{s} + F(\dot{\Psi})\dot{\Psi}_r + F(\dot{\Psi})s + F(\Psi) = \hat{A}\ddot{\Psi}_r + \hat{F}(\dot{\Psi})\dot{\Psi}_r + \hat{F}(\Psi) - Ksgn(s) \quad (۱۵)$$

رابطه (۱۵) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$A\dot{s} + F(\Psi)s = (\hat{A} - A)\ddot{\Psi}_r + (\hat{F}(\dot{\Psi}) - F(\dot{\Psi}))\dot{\Psi}_r + (\hat{F}(\Psi) - F(\Psi)) - Ksgn(s) \quad (۱۶)$$

نکته ۱: بدیهی است که رابطه  $\Phi = \Psi$  برقرار می‌باشد که در آن،  $\dot{\Psi}$  سرعت رول ناوچه جنگی می‌باشد.

حال با توجه به نکته (۱) و با استفاده از رابطه (۲)، رابطه (۱) به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$I_{xx}\ddot{\Psi} = \xi I_{xx}\dot{\Psi} + \beta_1\Psi V^2 + \beta_2\dot{\Psi}|V| + \beta_3\Psi|\Psi| + \beta_4\dot{\Psi} + \beta_5\Psi^3 - \rho g \nabla G_z(\Psi) \quad (۳)$$

رابطه (۳) را می‌توان به صورت رابطه درجه دوم و به فرم زیر ارائه نمود:

$$A\ddot{\Psi} + B\dot{\Psi} + C\Psi = F_h + F_w + F_u \quad (۴)$$

که در آن [۷ و ۱]:

$$\begin{cases} A = I_{xx} - \xi I_{xx} \\ B = -\beta_4 \\ C = -\beta_1 V^2 \\ F_{h1} = \beta_5 \Psi^3 - \rho g \nabla G_z(\Psi) \\ F_{h2} = \beta_2 \dot{\Psi}|V| + \beta_3 \dot{\Psi}|\Psi| \\ F_h = F_{h1} + F_{h2} \\ F_w = \omega_e^2 \alpha_m I_{xx} \cos(\omega_e t) \\ F_u = \frac{1}{2} C_L \rho A_f V^2 L \end{cases} \quad (۵)$$

در رابطه‌های فوق،  $F_h$  نیروی هیدرو دینامیکی،  $F_w$  نیروی اغتشاشات امواج و  $F_u$  نیروی کنترلی می‌باشد. همچنین،  $\omega_e$  فرکانس برخورد موج به ناوچه،  $\alpha_m$  بیشترین شیب موج،  $L$  مشخصه فین و  $A_f$  مساحت فین است. با تعریف دو رابطه زیر داریم:

$$\begin{cases} F(\Psi) = C\Psi - F_{h1} - F_w \\ F(\dot{\Psi}) = B - \frac{F_{h2}}{\dot{\Psi}} \end{cases} \quad (۶)$$

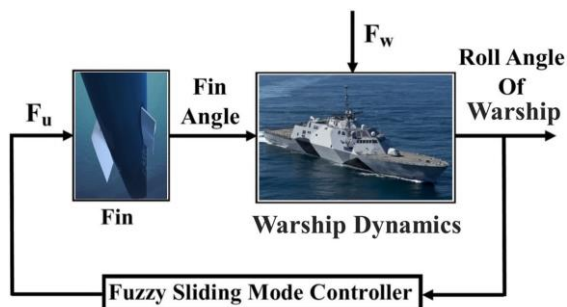
با استفاده از روابط (۵) و (۶)، رابطه (۴) به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$A\ddot{\Psi} + F(\dot{\Psi})\dot{\Psi} + F(\Psi) = F_u \quad (۷)$$

نکته ۲: در طرفین ناوچه جنگی از دو فین استفاده می‌شود، لذا رابطه  $F_u$  در ضریب  $\frac{1}{2}$  ضرب شده است.

## ۲-۲- طراحی کنترل کننده مدلزشی

برای طراحی کنترل مدلزشی، بردار سطح لغزش به صورت زیر تعریف می‌گردد [۱۴]:



شکل (۲) شماتیک سیستم کنترل مدلزغشی فازی برای حرکت در راستای رول ناوچه جنگی

برای طراحی کنترل کننده مدلزغشی فازی، رابطه (۱۳) را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{cases} F_{u_p} = \hat{F}_u + K & , s < 0 \\ F_{u_n} = \hat{F}_u - K & , s > 0 \end{cases} \quad (19)$$

با توجه به رابطه (۱۹)، می توان قواعد فازی کنترل کننده پیشنهادی را به صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{cases} \text{if } s \text{ is } A_1^1 \text{ and } F_{u_p} \text{ is } A_2^2 \text{ and } F_{u_n} \text{ is } A_3^3 \\ \quad \text{then} \\ \quad y^1 = a_0^1 + a_1^1 s + a_2^1 F_{u_p} + a_3^1 F_{u_n} \\ \text{if } s \text{ is } A_1^2 \text{ and } F_{u_p} \text{ is } A_2^2 \text{ and } F_{u_n} \text{ is } A_3^3 \\ \quad \text{then} \\ \quad y^2 = a_0^2 + a_1^2 s + a_2^2 F_{u_p} + a_3^2 F_{u_n} \end{cases} \quad (20)$$

در رابطه فوق،  $a_0^1 = a_0^2 = a_1^1 = a_1^2 = a_2^1 = a_2^2 = a_3^1 = a_3^2 = 1$  و  $a_2^1 = a_2^2 = 0$  تعیین می گردند و توابع عضویت به صورت زیر تعریف می شوند:

$$A_1^1 = \begin{cases} 1, & s \leq -F_1 \\ 1 - 2(s + F_1)^2, & -F_1 \leq s \leq 0 \\ 2(s - F_1)^2, & 0 \leq s \leq F_1 \\ 0, & s \geq F_1 \end{cases} \quad (21)$$

$$A_1^2 = \begin{cases} 0, & s \leq -F_2 \\ 2(s + F_2)^2, & -F_2 \leq s \leq 0 \\ 1 - 2(s - F_2)^2, & 0 \leq s \leq F_2 \\ 1, & s \geq F_2 \end{cases} \quad (22)$$

$$A_2^1 = A_2^2 = 1, \text{ lower bound of } F_u \leq F_{u_p} \leq \text{upper bound of } F_u \quad (23)$$

$$A_3^1 = A_3^2 = 1, \text{ lower bound of } F_u \leq F_{u_n} \leq \text{upper bound of } F_u \quad (24)$$

برای ساده تر شدن روابط فوق،  $\Delta A = \hat{A} - A$ ،  
 $\Delta F(\Psi) = \hat{F}(\Psi) - F(\Psi)$ ،  $\Delta F(\dot{\Psi}) = \hat{F}(\dot{\Psi}) - F(\dot{\Psi})$   
 $\Delta f = \Delta A \dot{\Psi}_r + \Delta F(\dot{\Psi}) \dot{\Psi}_r + \Delta F(\Psi)$  و  $F(\Psi)$   
 تعریف می گردد و رابطه (۱۶)، به صورت زیر ساده می گردد:

$$\begin{aligned} A \dot{s} + F(\dot{\Psi}) s &= \Delta A \dot{\Psi}_r + \Delta F(\dot{\Psi}) \dot{\Psi}_r + \\ \Delta F(\Psi) - K \text{sgn}(s) &= \Delta f - K \text{sgn}(s) \end{aligned} \quad (17)$$

نکته ۳:  $\Delta f$  مجموع تمام عدم قطعیت های ساختاری و اغتشاشات خارجی ناشی از امواج دریا می باشد.

نکته ۴: در کنترل مدلزغشی پیشنهادی، ورودی کنترل دارای لرزش خواهد بود و پدیده لرزش ممکن است باعث فعال شدن مدهای دینامیکی سیستم فین ناوچه جنگی شود. لذا حذف لرزش ورودی کنترل از اهمیت ویژه ای برخوردار است، به همین دلیل برای افزایش توانمندی این کنترل کننده در کنترل خطای ردگیری موقعیت زاویه ای رول ناوچه جنگی و غلبه بر پدیده نامطلوب لرزش در ورودی کنترل، در بخش بعد از سیستم فازی TSK مرتبه اول استفاده خواهد شد.

### ۲-۳- طراحی کنترل کننده مدلزغشی فازی

برای طراحی کنترل کننده مدلزغشی فازی شکل (۲)، از سیستم فازی TSK مرتبه اول استفاده خواهد گردید. یک سیستم فازی TSK مرتبه اول، بوسیله قواعد فازی if-then توصیف می شود که این قواعد، رابطه بین ورودی ها و خروجی ها را نشان می دهند. قواعد فازی سیستم کنترل فازی TSK مرتبه اول، در حالت کلی به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\begin{aligned} \text{if } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^i \text{ then} \\ y^i = a_0^i + a_1^i x_1 + \dots + a_n^i x_n \end{aligned} \quad (18)$$

که در آن  $i = 1, 2, \dots, M$  و تعداد قواعد فازی است.  $y^i$  ها خروجی های این M قاعده فازی و  $a_0^i, a_1^i, \dots, a_n^i$  ضرایبی ثابت هستند.

جدول (۱) پارامترهای ناوچه جنگی مورد مطالعه [۷]

$I_{xx} = 6.0087 \text{ Kg.m}^2$	$\hat{I}_{xx} = 6.20051 \text{ Kg.m}^2$
$\xi I_{xx} = 0.0496 \text{ Kg.m}^2$	$\hat{\xi} I_{xx} = 0.0902 \text{ Kg.m}^2$
$\rho = 1025 \text{ Kg/m}^3$	$\hat{\rho} = 1273 \text{ Kg/m}^3$
$\beta_1 = 10.17$	$\hat{\beta}_1 = 9.74$
$\beta_2 = 23.08$	$\hat{\beta}_2 = 23.56$
$\beta_3 = 14.16$	$\hat{\beta}_3 = 13.8$
$\beta_4 = 12.01$	$\hat{\beta}_4 = 12.35$
$\beta_5 = 9.52$	$\hat{\beta}_5 = 10.69$
$V = 16 \text{ m/s}$	$\hat{V} = 14.5 \text{ m/s}$
$L = 0.5$	$\hat{L} = 0.65$
$A_f = 5.76 \text{ m}^2$	$\hat{A}_f = 5.85 \text{ m}^2$

نکته ۶:  $\hat{I}_{xx}$ ،  $\hat{\xi} I_{xx}$ ،  $\hat{\rho}$ ،  $\hat{\beta}_1$ ،  $\hat{\beta}_2$ ،  $\hat{\beta}_3$ ،  $\hat{\beta}_4$ ،  $\hat{\beta}_5$ ،  $\hat{V}$ ،  $\hat{L}$  و  $\hat{A}_f$  تخمین‌هایی از مقادیر واقعی پارامترهای  $I_{xx}$ ،  $\xi I_{xx}$ ،  $\rho$ ،  $\beta_1$ ،  $\beta_2$ ،  $\beta_3$ ،  $\beta_4$ ،  $\beta_5$ ،  $V$ ،  $L$  و  $A_f$  می‌باشند، که در محاسبه  $\hat{F}_u$  مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جدول (۲) پارامترهای کنترل‌کننده‌های پیشنهادی

$k = 120$	$\lambda = 40$
$\Gamma_1 = 0.25$	$\Gamma_2 = 0.25$

در طول بازه زمانی شبیه‌سازیها، نیروی حاصل از امواج دریا به صورت تابعی از زمان ( $F_w$ ) و طبق رابطه (۵) به ناوچه جنگی مورد مطالعه اعمال گردید. مقادیر پارامترهای فرکانس برخورد موج ( $\omega_e$ ) و شیب موج ( $\alpha_m$ ) به صورت متغیر در نظر گرفته شده است تا اینکه کنترل‌کننده‌های پیشنهادی، بیشترین چالش را در مقابله با اغتشاشات ناشی از امواج دریا داشته باشند. نمایش سه بعدی امواج اعمال شده در شکل (۳) ارائه شده است.

در روابط (۲۱) و (۲۲)، پارامترهای  $\Gamma_1$  و  $\Gamma_2$  مقادیر ثابت و مثبتی هستند.

نکته ۵: به منظور طراحی کنترل‌کننده برای کنترل موقعیت زاویه‌ای رول ناوچه جنگی، طراحان نیاز به آگاهی از اطلاعات معادلات دینامیکی ناوچه جنگی دارند. از اینرو، کران عدم قطعیت‌های معادلات دینامیکی حرکت در راستای رول ناوچه جنگی مشخص است. بنابراین، برای عملکرد مطلوب سیستم رول-فین ناوچه، مطابق با روابط (۲۳) و (۲۴)، کران بالا و پائین نیروی وارده بر فین ناوچه مقادیری معین می‌باشند.

اگر  $x = [s, F_{u_p}, F_{u_n}]^T$  را بردار ورودی سیستم فازی TSK در نظر بگیریم، خروجی آن از ترکیب قواعد فازی رابطه (۲۰) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^2 f^i(x) y^i(x)}{\sum_{i=1}^2 f^i(x)} \quad (25)$$

$f^i(x)$  توان آتش قاعده  $i$  ام می‌باشد، که از طریق رابطه زیر حاصل می‌گردد:

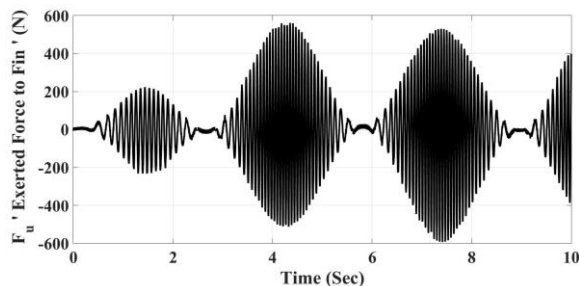
$$f^i(x) = \mu_{A_1^i}(x_1) * \mu_{A_2^i}(x_2) * \mu_{A_3^i}(x_3) \quad (26)$$

"\*" نشان‌دهنده یک t-norm می‌باشد و  $\mu_{A_j^i}(x_j)$  نشان‌دهنده درجه عضویت ورودی  $x_j$  در تابع عضویت  $A_j^i$  از قاعده  $i$  ام می‌باشد.

### ۳- نتایج شبیه‌سازی

ناوچه جنگی مورد مطالعه در مرجع [۷]، در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. ناوچه جنگی مورد نظر دارای دو فین در طرفین می‌باشد. پارامترهای ناوچه مورد مطالعه و مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده‌های مدلغزشی و مدلغزشی فازی که در این شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است، به ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است.

ردگیری بسیار دقیق مسیر مطلوب زاویه رول ناوچه جنگی در شکل‌های (۴) و (۵) مشخص است به نحوی که حداکثر خطای ردگیری موقعیت زاویه رول ناوچه جنگی مورد مطالعه،  $0.3157$  درجه می‌باشد. در شکل (۶)، ورودی کنترلی اعمالی به فین ناوچه جنگی نمایش داده شده است.

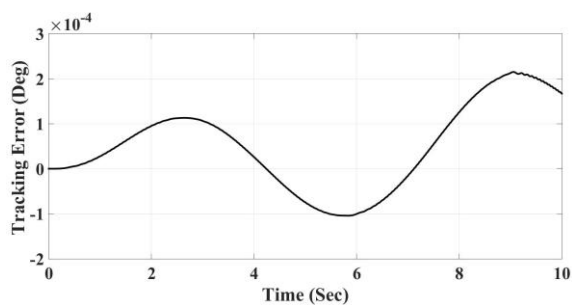


شکل (۶) ورودی کنترلی اعمالی به فین ناوچه جنگی

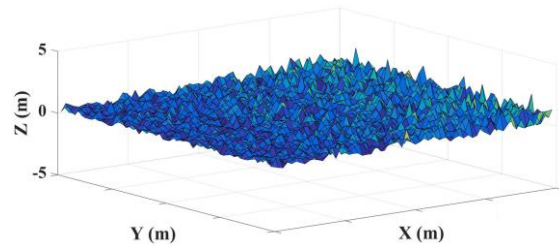
همانگونه که مشاهده می‌شود، ورودی کنترلی اعمال شده به فین ناوچه جنگی در اکثر بازه‌های زمانی دارای دامنه لرزش به اندازه  $16/156$  تا  $1124/272$  نیوتن می‌باشد. این لرزش می‌تواند منجر به فعال شدن مدهای دینامیکی و آسیب‌دیدگی ساختار فیزیکی سیستم فین ناوچه جنگی و عملگرهای الکتریکی و هیدرولیکی آن گردد.

### ۳-۲- شبیه‌سازی مرحله دوم

برای غلبه بر پدیده نامطلوب لرزش در ورودی کنترلی، ورودی کنترل مدغزشی فازی رابطه (۱۹) برای ناوچه جنگی شبیه‌سازی گردید. پس از اجرای شبیه‌سازی، خطای ردگیری موقعیت زاویه رول ناوچه جنگی در شکل (۷) نشان داده شده است.



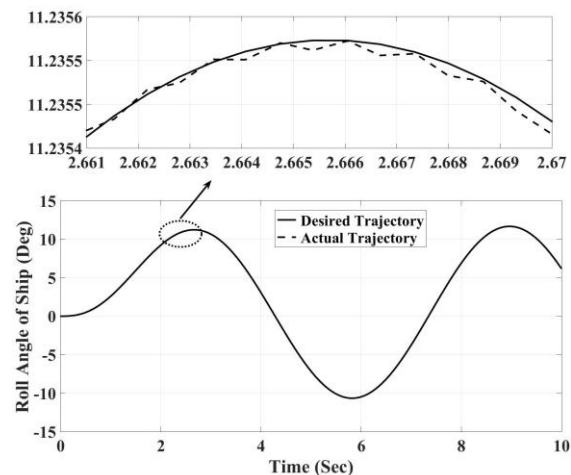
شکل (۷) خطای ردگیری موقعیت زاویه رول ناوچه جنگی



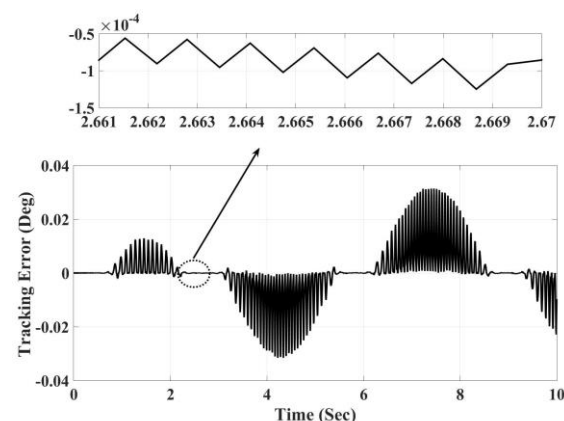
شکل (۳) امواج دریای اعمال شده که به عنوان اغتشاشات خارجی، نیروی  $F_w$  را به ناوچه جنگی اعمال می‌کند

### ۳-۱- شبیه‌سازی مرحله اول

ورودی کنترل رابطه (۱۷) برای ناوچه جنگی مورد مطالعه، شبیه‌سازی گردید. پس از اجرای شبیه‌سازی، مسیر مطلوب، مسیر واقعی و همچنین خطای ردگیری موقعیت زاویه رول ناوچه جنگی، در شکل‌های (۴) و (۵) نمایش داده شده است.



شکل (۴) مسیر مطلوب و مسیر واقعی موقعیت زاویه رول ناوچه جنگی



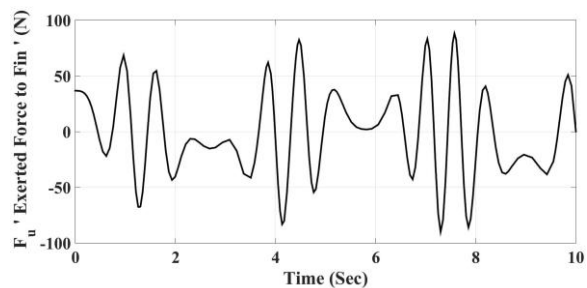
شکل (۵) خطای ردگیری موقعیت زاویه رول ناوچه جنگی

دارای دو قاعده فازی بوده که این موضوع بیانگر حجم محاسبات بسیار پایین کنترل پیشنهادی می‌باشد. ویژگی‌های ذکر شده، قابلیت پیاده‌سازی عملی کنترل پیشنهادی را ممکن می‌سازد که این مزیت و همچنین غلبه همزمان بر عدم قطعیت‌های ساختاری و غیرساختاری، شاخص‌ترین مشخصه‌های کنترل مدلفزشی فازی پیشنهادی نسبت به سایر کنترل‌کننده‌های پیشنهاد شده در تحقیقات قبلی می‌باشد.

### منابع

- [۱] حمید ملکی‌زاده، محمدرضا جاهد مطلق، بیژن معاونی، علی معرفیان‌پور « کنترل مدلفزشی رول-فین کشتی در مقابل نوسانات ناشی از امواج و عدم قطعیت »، دو فصلنامه علمی-پژوهشی دریا فنون، دوره ۲، شماره ۲، صفحه ۴۱-۳۵، ۱۳۹۴.
- [۲] رامبد رستگاری، محمدمهدی پناهیان « ارائه روشی برای کنترل پایداری رول شناور مطابق با استانداردهای رده-بندی با استفاده از سوئیچ کنترلر PID جهت کنترل ژایرو استابلایزر و جسم جابجاشونده »، فصلنامه علمی-ترویجی مدیریت استاندارد و کیفیت، دوره ۶، شماره ۲، صفحه ۴۴-۳۴، ۱۳۹۵.
- [3] Perez, Tristan, and Mogens Blanke. "Ship roll damping control." *Annual Reviews in Control*, Vol. 36, No. 1, pp. 129-147, 2012.
- [4] Su, Xiaoyu, Yannan Gao, and Ruihan Zhao. "Roll Attitude Controller Design for Ships at Zero Speed." *International Journal of Fuzzy Systems*, Vol. 20, No. 2, pp. 611-620, 2018.
- [5] Santoso, M. Y., I. Munadhif, A. Wahidin, and R. T. Soelistijono. "Rudder-roll stabilization using fgs-pid controller for sigma-e warship." In *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 855, No. 1, pp. 1-11, 2017.
- [6] Lihua, Liang, Zhao Peng, Zhang Songtao, Ji Ming, and Yuan Jia. "Simulation analysis of fin stabilizer on ship roll control during turning motion." *Ocean Engineering*, Vol. 164, No. 1, pp. 733-748, 2018.
- [7] Surendran, S., S. K. Lee, and S. Y. Kim. "Studies on an algorithm to control the roll motion using active fins." *Ocean Engineering*, Vol. 34, No. 3, pp. 542-551, 2007.
- [8] Veysi, Mohammad, and Mohammad Reza Soltanpour. "Eliminating chattering phenomenon in sliding mode control of robot

با دقت در شکل (۷) افزایش قابل توجه دقت ردگیری در کنترل مدلفزشی فازی قابل مشاهده است. به طوری که حداکثر خطای ردگیری موقعیت زاویه رول ناوچه جنگی، ۰/۰۰۰۲۱۵ درجه می‌باشد، که این میزان خطا بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی می‌باشد. شکل (۸) ورودی کنترلی اعمالی به فین ناوچه را نمایش می‌دهد.



شکل (۸) ورودی کنترلی اعمالی به فین ناوچه جنگی

همانگونه که از شکل (۸) مشاهده می‌شود، ورودی کنترلی برای فین ناوچه جنگی هیچ گونه لرزشی ندارد. با توجه به شکل‌های (۷) و (۸) و با مقایسه آنها با نتایج شبیه‌سازی مرحله اول، می‌توان دریافت که با اعمال ورودی کنترل مدلفزشی فازی به فین ناوچه جنگی، اهداف کنترلی که داشتن حداقل خطای ردگیری موقعیت و ورودی کنترلی با دامنه کوچک و بدون لرزش است، میسر گردیده است.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، در ابتدا کنترل‌کننده مقاوم غیرخطی مدلفزشی برای ردگیری موقعیت زاویه رول ناوچه جنگی طراحی گردید. در ادامه برای حذف لرزش ورودی کنترل، با استفاده از منطق فازی، کنترل مدلفزشی فازی مبتنی بر روش تاکاگی-سوگنو-کانگ طراحی شد. برای مقایسه عملکرد کنترل‌کننده‌های پیشنهادی، شبیه‌سازی‌هایی در دو مرحله بر روی یک ناوچه جنگی پیاده‌سازی گردید. عدم قطعیت‌های ساختاری مدل دینامیکی ناوچه جنگی لحاظ شد و همچنین با اعمال اغتشاشات خارجی متغیر امواج دریا به مدل دینامیکی، کنترل‌کننده در معرض چالش قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی، عدم لرزش و دامنه کوچک ورودی کنترل مدلفزشی فازی و دقت بسیار بالای ردگیری مسیر مطلوب زاویه رول ناوچه جنگی را به روشنی نشان می‌دهد. از طرفی پایگاه قواعد فازی، تنها



manipulators in the joint-space using fuzzy logic." *Journal of Solid and Fluid Mechanics, Shahrood University of Technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 45-54, 2012.

- [9] Veysi, Mohammad, Mohammad Reza Soltanpour, and Mohammad Hassan Khooban. "A novel self-adaptive modified bat fuzzy sliding mode control of robot manipulator in presence of uncertainties in task space." *Robotica*, Vol. 33, No. 10, pp. 2045-2064, 2015.

[۱۰] محمد ویسی، محمدرضا سلطانیپور، رامبد رستگاری  
« عبور از نقاط تکین فضای کار در کنترل ساختار متغیر  
موقعیت بازوهای ربات کاربردی در صنایع دریایی، در  
حضور عدم قطعیت ها»، فصلنامه علمی-ترویجی علوم و  
فناوری دریا، دوره ۱۸، شماره ۷۰، صفحه ۴۲-۳۲، ۱۳۹۳.

- [11] Li, Ronghui, Tieshan Li, Weiwei Bai, and Xian Du. "An adaptive neural network approach for ship roll stabilization via fin control." *Neurocomputing* 173 (2016): 953-957.
- [12] Luo, Weilin, Bingbing Hu, and Tieshan Li. "Neural network based fin control for ship roll stabilization with guaranteed robustness." *Neurocomputing* 230 (2017): 210-218.
- [13] Liang, Lihua, Peng Zhao, and Songtao Zhang. "Research and simulation of ship roll control in turning motion." In *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, pp. 3841-3846. IEEE, 2018.
- [14] Khalil, Hassan K. *Nonlinear control*. New York: Pearson, 2015.