

معادلات دینامیک کشتی با تاکید بر مدلسازی اثر نیروی باد

محمود سالاری¹⁸ و مصطفی کارآموزیان¹⁹

چکیده:

در این مقاله مدل ریاضی حاکم بر رفتار دینامیکی حرکات کشتی ها بدست آورده شده و هریک از مولفه های نیرو و گشتاور موثر بر حرکت دینامیکی شناورها تجزیه و تحلیل شده اند. در این تحلیل ها کشتی به عنوان جسم صلب در نظر گرفته شده و معادلات شش درجه آزادی حاکم بر آن معرفی شده اند. این معادلات بالانس اثرات نیروهای مختلف محیطی و اثرات نیروها و گشتاورهای ایجاد شده توسط سیستم های هدایت شناور را با شتاب ها و سرعت های مختلف بدنه کشتی برقرار می کند. به منظور تحلیل دقیق تر هریک از اثرات محیطی، به صورت خاص مدل ریاضی اثر نیروی باد و نحوه تاثیر آن بر حرکات کشتی بیان شده است. توجه شود که هدف از این مقاله حل ریاضی چنین معادلاتی نبوده است بلکه تاکید بر شناسایی و چگونگی بدست آوردن مدل ریاضی حاکم بوده است بطوریکه پس از حل آنها بتوان مقدار مولفه های دینامیکی شناورها را محاسبه نمود.

کلمات کلیدی: مدلسازی ریاضی - دینامیک کشتی - اثر نیروی باد

¹ - عضو هیئت علمی دانشگاه امام حسین (ع) m.salari@gmail.com

² - مدرس دانشکده علوم و فنون دریایی جوادالانمه (ع) ندسا mostafa_karmani@yahoo.com

۱- مقدمه

پیش بینی رفتار دینامیکی کشتی و حرکات آن در دریا یکی از مهمترین موضوعات در طراحی شناورهای دریایی می باشند. در مباحث مرتبط با هیدرواستاتیک کشتی ها، عمدتاً تمرکز بر تعادل و شناوری و اثرات نیروهای استاتیکی وارد بر کشتی همچون نیروی وزن و نیروهای بویانسی می باشد. در حالیکه به هنگام حرکت کشتی ها در آبها، نیروها و گشتاورهای وارد بر کشتی به صورت دینامیک بوده و لذا حرکات کشتی نیز به صورت دینامیکی و پیچیده می باشند. به همین منظور سیستم های هدایت، کنترل و ناوبری در کشتی ها به گونه ای طراحی می شوند تا بتوانند با اعمال نیروهای هیدرو دینامیکی لازم و تغییر و کنترل راستا و جهت آنها، بالانس نیرویی و تعادل دینامیک شناورها را تامین نمایند. واضح است که بدنه هر کشتی تحت تاثیر نیروها و گشتاورهای مختلف محیطی دریا (اثرات باد، موج، جریان های آبی و ...) و نیروهای ناشی از سیستم های هدایت و ناوبری قرار دارد. تنوع زیاد این عوامل باعث شده تا معادلات حاکم دینامیکی و مدل های ریاضی مربوطه نیز پیچیده شوند.

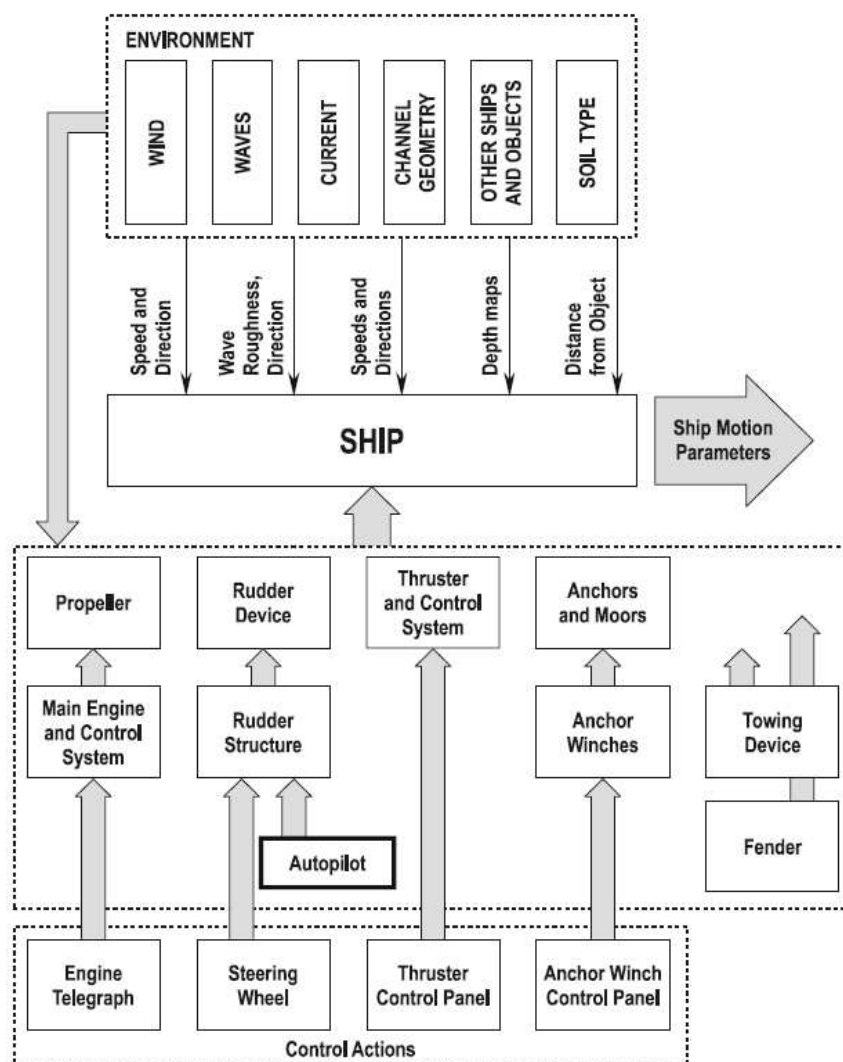
قبل از هر نوع محاسبه ای به نظر می رسد که لازم باشد تا به طور دقیقی مولفه نیروهای وارده بر بدنه کشتی شناسایی و تجزیه و تحلیل شوند. در چنین مسائلی به دلیل تنوع مولفه های نیرویی و نیز زیاد بودن مولفه های سینماتیکی حرکت کشتی، امکان تجزیه و تحلیل دقیق پارامترهای حاکم بدون مدل سازی ریاضی آن میسر نخواهد شد. این مدل سازی کمک خواهد نمود تا علاوه بر شناسایی پارامترهای حاکم، میزان تاثیر هر عامل بر رفتار دینامیکی را بتوان تعیین نمود. همچنین معمولاً مدل های ریاضی باعث می شوند تا کیفیت و کمیت تست ها و آزمایش های لازم در مرحله طراحی کشتی ها مشخص شوند. به کمک داده های تجربی و استفاده از مدل های ریاضی می توان تا حدود زیادی رفتار دینامیکی شناورها را تحلیل و تخمین زد. این مقاله گامی به سوی این هدف می باشد.

در این مقاله ابتدا مدل کنترلی حاکم بر دینامیک حرکات کشتی معرفی شده است و بالانس اثرات نیروهای مختلف محیطی و اثرات نیروها و گشتاورهای ایجاد شده توسط سیستم های هدایت شناورها برقرار شده اند. در این مدل کنترلی معادلات شش درجه آزادی حاکم بر دینامیک حرکات کشتی تجزیه و تحلیل شده و عمده مولفه های اصلی آن و نحوه تاثیر هر یک بر حرکات کشتی فرموله شده است. در قسمت دوم تمرکز بر

تجزیه و تحلیل اثر نیروی باد و عبارات اصلی این نیرو بوده و نحوه تاثیر آن بر رفتار دینامیکی کشتی تحلیل شده است. لازم به ذکر است که با حل مدل ریاضی حاکم و معادلات مربوطه می توان رفتار دینامیک شناور را محاسبه نمود.

۲- مدل کنترلی یک کشتی

هنگام طراحی مدل ریاضی، یک کشتی به عنوان یک سیستم قابل کنترل در نظر گرفته می شود. این سیستم در برگیرنده بدنه کشتی مورد نظر، سیستم هدایت کشتی و سایر سیستم های کنترلی آن می باشد. این سیستم ها کنترل حرکات کشتی در آب را میسر می کند. شکل ۱ دیاگرام کنترلی یک کشتی تحت تاثیر شرایط محیطی مختلف و سیستم های کنترل کننده داخلی کشتی را نشان می دهد.



شکل ۱. سیستم کنترلی یک کشتی و عوامل موثر بر آن

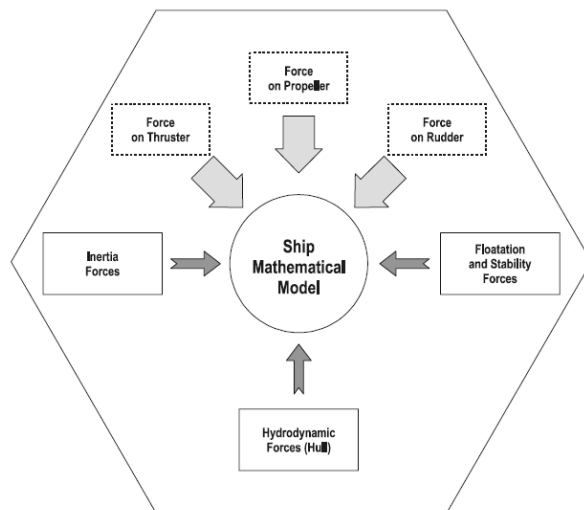
در این دیاگرام، بدنه کشتی به عنوان شیء کنترل پذیر در نظر گرفته شده و سیستم های هدایت آن شامل پروانه ها، تیغه سکان، لنگر، سیستمهای مهار کشتی و غیره می باشند. مقدار نیروها و اثرات آنها بر حرکت های بدنه، بستگی مستقیم به مقدار تغییرات انجام گرفته در اجزای سیستم هدایت دارد. معمولاً این تغییرات توسط سکاندار و به منظور فراهم نمودن حرکت های معینی برای کشتی انجام می پذیرد.

حرکات یک کشتی را می توان با در نظر گرفتن نیروهای خارجی وارد بر آن و یا بدون در نظر گرفتن آنها بررسی نمود. نیروهای خارجی وارد بر کشتی عموماً ناشی از اثرات مختلف محیطی نظیر اثر نیروی باد، جریان های آبی، امواج دریا، شکل هندسی کانال ها و آبراهها (تاثیر عمق آب ، دیواره ها ، بستر آب و ...) می باشند. همچنین حضور اجسام متحرک (همانند سایر کشتی ها) و یا ثابت در مجاورت کشتی باعث اعمال یک سری نیروهای خاص بر بدنه کشتی خواهد شد.

توصیف حرکات کشتی در آب دریا و بیان عوامل و نیروهای موثر بر رفتار کشتی، اساس مدل ریاضی مطرح شده در این مقاله می باشد. جهت مدل سازی دینامیک حرکات کشتی در آب ابتدا می بایست عوامل تاثیر گذار شناسایی شوند. واضح است که تقابل این نیروها و گشتاورها با بدنه کشتی موجب حرکات شش درجه آزادی (سه حرکت انتقالی و سه حرکت چرخشی) برای بدنه کشتی خواهند شد. از آنجا که ماهیت جرمی و خواص اینرسی هر کشتی تابع شکل هندسی بدنه آن و مشخصات دقیق ساختاری آن می باشد لذا در این مقاله فعلاً تمرکز اصلی بر تشریح نیروها و گشتاورهای موثر بر حرکات بدنه کشتی خواهد بود و فعلاً کشتی را به عنوان یک جسم صلب در نظر می گیریم.

۳- نیروهای موثر بر بدنه کشتی

نیروهای موثر بر دینامیک کشتی که باید در مدل سازی ریاضی به آنها توجه شود در شکل ۲ نشان داده شده اند.

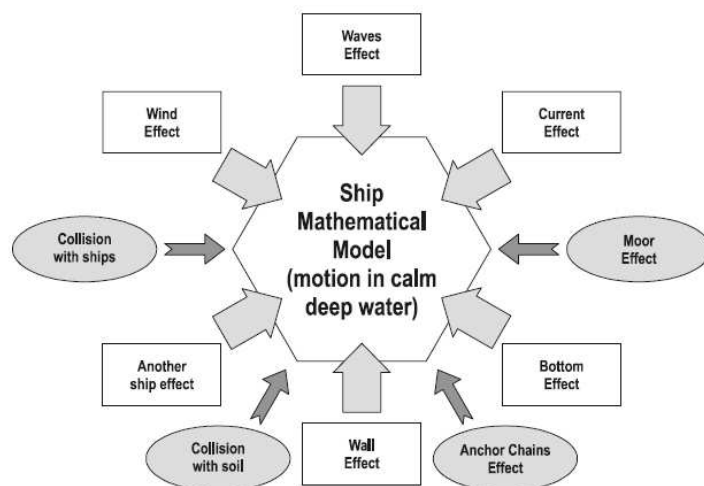


شکل ۲. نیروهای موثر بر دینامیک کشتی

نیروهای اینرسی، هیدرودینامیک و هیدرواستاتیک (تعالی و شناوری) از مهمترین نیروهایی هستند که بر حرکات کشتی در دریا تاثیر گذاشته و لذا به آنها نیروهای پایه ای نیز گفته می شود. به هنگام مدل سازی ریاضی، سایر نیروهای خارجی (همانند نیروهای وارد بر پروانه، نیروهای وارد بر سکان و نیروهای وارد بر تراسر که در شکل ۲ به صورت خط چین نشان داده شده اند) نیز معمولاً به نیروها و گشتاورهای پایه ای افزوده می شوند.

نیروهای وارد بر کشتی به دو گروه اصلی تقسیم می شوند که عبارتند از: (۱) نیروهای آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی (۲) نیروهای مکانیکی.

نیروهای آیرودینامیکی ناشی از جریان باد، نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از جریانهای آبی و امواج دریا و همچنین نیروهای ناشی از شناورهای مجاور، دیواره ها و بستر کانال ها جزء دسته اول بوده و نیروهای حاصل از تصادم کشتی با صخره ها، دیواره ها، سایر شناورها و نیروهای زنجیر لنگر در دسته دوم (نیروهای مکانیکی) قرار می گیرند. بلوک دیاگرامی از نیروهای موثر بر کشتی در شکل ۳ آورده شده است.

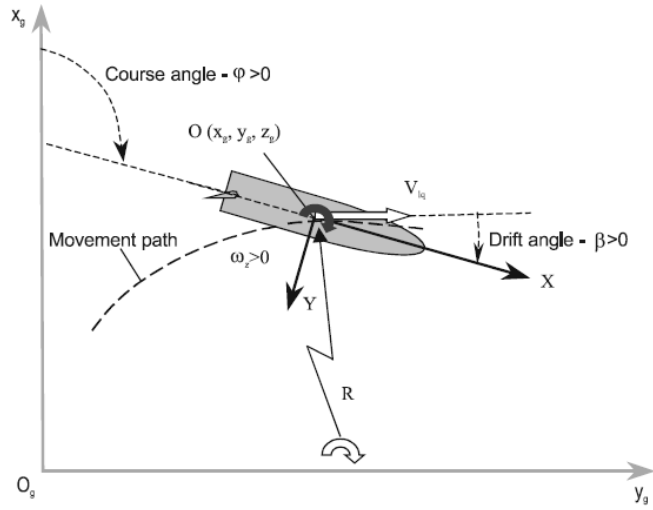


شکل ۳. نیروهای موثر بر دینامیک حرکت کشتی در آب دریا

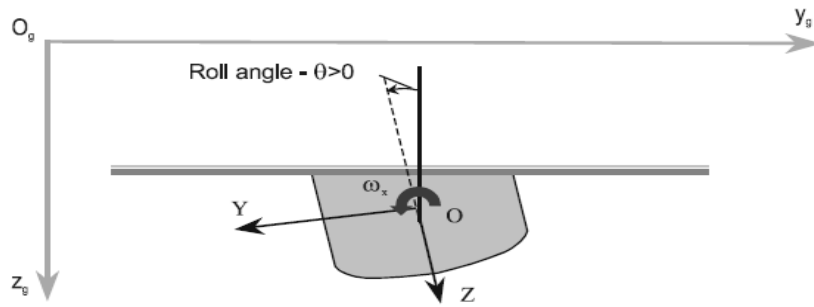
۴- تشریح معادلات دینامیکی

مدل ریاضی حرکات بدنه کشتی معمولاً بر پایه مجموعه ای از معادلات دیفرانسیل غیرخطی استوار می گردد. حل این دستگاه معادلات موجب خواهد شد تا پارامترهای سینماتیکی حرکت کشتی نظیر موقعیت مرکز جرم کشتی (X_g, Y_g, Z_g) و زوایای شیب بدنه (زاویه رول θ ، زاویه تریم ψ ، زاویه راه φ) و همچنین مقادیر متناظر سرعت و شتاب در راستاهای فوق محاسبه شوند.

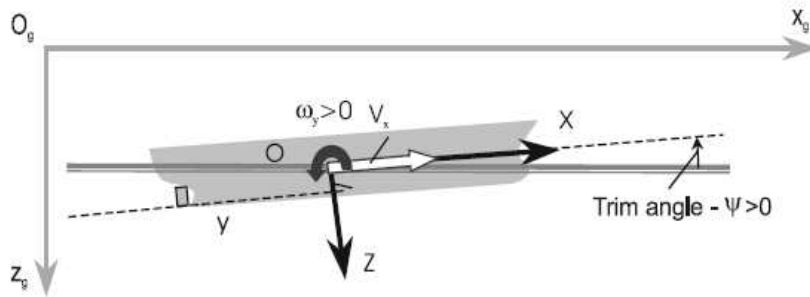
برای توصیف حرکات بدنه کشتی و به هنگام مدل سازی ریاضی آنها معمولاً دو سیستم مختصات مورد استفاده قرار می گیرد؛ یکی سیستم مختصات ثابت نسبت به زمین (X_g, Y_g, Z_g) و دیگری سیستم مختصات متحرک نسبت به بدنه کشتی (XYZ) می باشد. شکل ۴ سیستم های مختصات فوق را در از سه نمای مختلف نمایش می دهد.



الف) نمای بالا (صفحه خط آب)



ب) نمای روبه رو



ج) نمای جانبی

شکل ۴ (الف، ب، ج). سیستم های مختصات ثابت و متحرک

Og مبدأ دستگاه مختصات ثابت و O مبدأ دستگاه مختصات بدنه کشتی می باشند. با در نظر گرفتن کشتی به عنوان یک جسم صلب و در نظر گرفتن نیروهای موثر بر آن می توان قانون دوم نیوتن را نوشته و معادلات شش درجه آزادی حاکم بر حرکات بدنه کشتی را بدست آورد. در ذیل معادلات حاکم بر رفتار دینامیکی کشتی آورده شده است :

$$(m + \lambda_{11}) \frac{dV_x}{dt} + (m + \lambda_{22}) V_y \omega_z + (m + \lambda_{33}) V_z \omega_y = \sum F_x + \sum F_{x(M)},$$

$$(m + \lambda_{22}) \frac{dV_y}{dt} + (m + \lambda_{11}) V_z \omega_x - (m + \lambda_{33}) V_y \omega_x = \sum F_y + \sum F_{y(M)},$$

$$(m + \lambda_{33}) \frac{dV_z}{dt} - (m + \lambda_{11}) V_z \omega_y - (m + \lambda_{22}) V_y V_z = \sum F_z + \sum F_{z(M)},$$

$$(J_x + \lambda_{44}) \frac{d\omega_x}{dt} + [(J_z + \lambda_{66}) - (J_y + \lambda_{55})] \omega_y \omega_z + (\lambda_{33} - \lambda_{22}) V_y V_z = \sum M_x + \sum M_{x(M)},$$

$$(J_y + \lambda_{55}) \frac{d\omega_y}{dt} + [(J_x + \lambda_{44}) - (J_z + \lambda_{66})] \omega_x \omega_z + (\lambda_{11} - \lambda_{33}) V_x V_z = \sum M_y + \sum M_{y(M)},$$

$$(J_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega_z}{dt} + [(J_y + \lambda_{55}) - (J_x + \lambda_{44})] \omega_z \omega_y + (\lambda_{22} - \lambda_{11}) V_y V_z = \sum M_z + \sum M_{z(M)},$$

سه معادله اول فوق بیانگر رفتار حرکت خطی بدنه کشتی و سه معادله انتهایی بیانگر رفتار حرکت های زاویه ای بدنه کشتی می باشند. عبارات سمت راست در معادلات فوق بیانگر مجموع نیروها و گشتاورهای موثر بر بدنه کشتی بوده که به دو قسمت نیروها و گشتاورهای مکانیکی (با اندیس M) و نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی تفکیک شده اند. در سمت چپ معادلات فوق عبارات مرتبط با اینرسی بدنه کشتی آورده شده و به صورت حاصلضرب جرم در مولفه های مختلف شتاب های خطی و زاویه ای می باشند.

حل معادلات فوق منجر به محاسبه مولفه های مختلف سرعت کشتی $(V_x, V_y, V_z, \dot{\theta}, \dot{\phi}, \dot{\psi})$ خواهند شد. البته مولفه های زاویه ای سرعت در معادلات فوق بر حسب ω مرتب شده اند که این کمیت ها با سرعت های زاویه ای بدنه کشتی به صورت زیر به یکدیگر مرتبط می شوند.

$$\begin{aligned}\omega_x &= \dot{\theta} - \dot{\phi} \sin \phi, \\ \omega_y &= \dot{\psi} \cos \theta + \dot{\phi} \cos \psi \sin \theta, \\ \omega_z &= \dot{\phi} \cos \psi \cos \theta - \dot{\psi} \sin \theta,\end{aligned}$$

سایر پارامترهای معادلات فوق در فهرست علائم معرفی شده اند.

۴-۱- نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی

نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی وارد بر کشتی در برگیرنده اجزای مختلفی از قبیل اثرات سایر کشتی ها، شکل هندسی کانال ها، امواج دریا، جریان های آبی، نیروهای هیدرودینامیکی و آیرودینامیکی و ... می باشند که در حالت کلی مولفه های آنها را می توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\begin{aligned}\sum F_x &= (F_{xBH} + \sum F_{xR} + F_{xP}) + F_{xA} + F_{xC} + F_{xW} + F_{x\text{bank}} + F_{x\text{bot}} + F_{x\text{ship}}, \\ \sum F_y &= (F_{yBH} + \sum F_{yR} + F_{yP} + F_{yTHR}) + F_{yA} + F_{yC} + F_{yW} + F_{y\text{bank}} + F_{y\text{ship}}, \\ \sum F_z &= (F_{zBH} + F_{zST} + F_{zg} + F_{zz}) + F_{zW} + F_{z\text{bank}} + F_{z\text{bot}}, \\ \sum M_x &= (M_{xBH} + \sum M_{xR} + M_{xTHR} + M_{xST} + M_{xx}) + M_{xA} + M_{xW} + M_{x\text{bank}} + M_{x\text{ship}}, \\ \sum M_y &= (M_{yBH} + M_{yST} + M_{yy}) + M_{yW} + M_{y\text{bank}} + M_{y\text{bot}} + M_{y\text{ship}}, \\ \sum M_z &= (M_{zBH} + \sum M_{zR} + M_{zP} + M_{zTHR}) + M_{zC} + M_{zA} + M_{zW} + M_{z\text{bank}} + M_{z\text{bot}} + M_{z\text{ship}},\end{aligned}$$

در معادلات فوق عبارات داخل پرانتز مربوط به تاثیر نیروها و گشتاورهای پایه ای وارد بر بدنه کشتی (نیروهای آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی اصلی وارد بر بدنه) و عبارات بیرون از پرانتز بیانگر اثر نیروهای

هیدرودینامیکی ناشی از سیستم های هدایت و کنترل می باشد (شکل ۲ را ببینید). در حالت کلی می توان

مجموع مولفه های فوق را در سه دسته طبقه بندی نمود که عبارتند از :

۱- نیروها و گشتاورهای وارد بر تنه یا بدنه خالص کشتی شامل:

الف) نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی وارد بر کشتی (با اندیس BH)

ب) نیروی بویانسی و گشتاورهای برگرداننده و مستهلک کننده حرکات غلتشی رول و تریم

۲- نیروها و گشتاورهای ناشی از دستگاه های هدایت و کنترل کشتی شامل:

الف) نیروها و گشتاورهای وارده از سوی آب به تیغه سکان (با اندیس R).

ب) نیروها و گشتاورهای وارد بر پروانه کشتی (با اندیس P).

ج) نیروی محوری تراستر و گشتاورهای ناشی از آن با اندیس THR)

۳- نیروها و گشتاورهای خارجی شامل:

الف) نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی (با اندیس A)

ب) نیروها و گشتاورهای ناشی از جریان های آبی (با اندیس C).

ج) نیروها و گشتاورهای ناشی از امواج دریا (با اندیس W)

د) نیروها و گشتاورهای ناشی از بستر در آبهای کم عمق (با اندیس bot).

ه) نیروها و گشتاورهای ناشی از اثرات شکل هندسی کانال ها بر بدنه (با اندیس bank).

و) نیرو و گشتاورهای ناشی از اثرات بدنه سایر کشتی ها (با اندیس ship).

۲-۴- نیروها و گشتاورهای مکانیکی

نیروها و گشتاورهای مکانیکی بستگی به ماهیت و نوع کاربری کشتی دارد. لذا بسته به شرایط مختلف

ممکن است یک یا چند مولفه از این نیروها بر بدنه کشتی وارد گردد. مولفه های مختلف نیروها و

گشتاورهای مکانیکی به صورت زیر قابل بازنویسی می باشند.

$$\sum F_{x(M)} = F_{x(M)wall} + F_{x(M)ship} + \sum F_{x(M)rope} + \sum F_{x(M)anch}$$

$$\sum F_{y(M)} = F_{y(M)wall} + F_{y(M)ship} + \sum F_{y(M)rope} + \sum F_{y(M)anch}$$

$$\sum F_{z(M)} = F_{z(M)wall} + F_{z(M)ship} + \sum F_{z(M)rope} + \sum F_{z(M)anch}$$

$$\sum M_{x(M)} = M_{x(M)wall} + M_{x(M)ship} + \sum M_{x(M)rope} + \sum M_{x(M)anch}$$

$$\sum M_{y(M)} = M_{y(M)wall} + M_{y(M)ship} + \sum M_{y(M)rope} + \sum M_{y(M)anch}$$

$$\sum M_{z(M)} = M_{z(M)wall} + M_{z(M)ship} + \sum M_{z(M)rope} + \sum M_{z(M)anch}$$

در معادلات فوق مولفه های مختلف با اندیس های مجزایی نشان داده شده اند. لذا مولفه های اصلی نیروها و گشتاورهای مکانیکی به چند دسته تقسیم می شوند که عبارتند از:

الف) نیروها و گشتاورهای مکانیکی وارد بر کشتی در شرایط تصادم با دیواره (با اندیس wall).

ب) نیروها و گشتاورهای مکانیکی وارد بر کشتی در شرایط تصادم با سایر کشتی ها. (با اندیس ship).

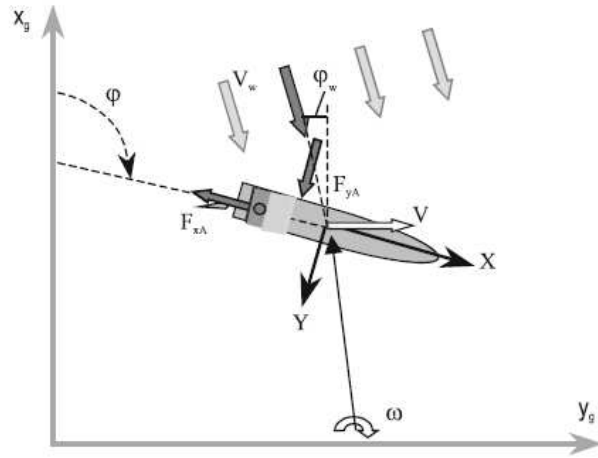
ج) نیروها و گشتاورهای مکانیکی ناشی از کشش طناب مهار (با اندیس rope).

د) نیروها و گشتاورهای مکانیکی ناشی از لنگر شناور (با اندیس anch).

۵- مدل ریاضی اثر نیروی باد

هنگام حرکت کشتی در دریا همواره قسمت عمده ای از بدنه اصلی کشتی و سوپر استراکچر آن تحت تاثیر جریان های هوایی (باد) و نیروهای ناشی از آن قرار می گیرد. راستای نسبی جهت وزش باد و سرعت نسبی آن تعیین کننده مقدار و راستای نیروی وارد بر کشتی خواهد بود. در مدل سازی ریاضی این پدیده، معمولاً سرعت و جهت وزش باد نسبت به راستای طول کشتی ثابت در نظر گرفته می شود. از آنجا که سرعت وزش باد نسبت به ارتفاع از سطح دریا تغییر نموده و به صورت تقریباً سهموی نسبت به ارتفاع از سطح افزایش می یابد، لذا در محاسبات مدل سازی ریاضی مقدار متوسط سرعت را برابر سرعت وزش باد در

ارتفاع ۶ متری از سطح آب در نظر می گیرند. شکل ۴ دیاگرام آزاد یک کشتی تحت تاثیر وزش و نیروی باد را نشان می دهد.



شکل ۴. دیاگرام آزاد کشتی تحت تاثیر وزش باد

با برخورد باد به سطوح بیرونی بدنه کشتی و سوپر استراکچر آن، انرژی جنبشی آن کاسته شده و به صورت افزایش فشار روی سطح بدنه در می آید. لذا مقادیر نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی ناشی از وزش باد بر حسب انرژی جنبشی ذرات هوا $(0.5\rho_A V_A^2)$ و سطوح تصویر شده بدنه کشتی در راستای وزش باد به کمک روابط زیر قابل تعیین می باشند:

$$F_{xA} = [C_{xAH}(\varphi_{wk}) + dC_{xA}(\varphi_{wk}, A_{xN})] 0.5 \rho_A V_A^2 (A_x + A_{xN})$$

$$F_{yA} = [C_{yAH}(\varphi_{wk}) + dC_{yA}(\varphi_{wk}, A_{yN})] 0.5 \rho_A V_A^2 (A_y + A_{yN})$$

$$F_{zA} = [C_{zAH}(\varphi_{wk}) + dC_{zA}(\varphi_{wk}, A_{yN})] 0.5 \rho_A V_A^2 (A_z + A_{yN})$$

$$M_{zA} = [C_{mzAH}(\varphi_{wk}) + dC_{mzA}(\varphi_{wk}, A_{yN})] 0.5 \rho_A V_A^2 (A_x + A_{yN}) L$$

$$M_{xA} = [C_{mxA}H(\varphi_{wk}) + dC_{mxA}(\varphi_{wk}, A_{xN})] 0.5 \rho_A V_A^2 (A_x + A_{xN}) L$$

به طوریکه در روابط فوق ضرایب ثابت تابع ابعاد هندسی بدنه کشتی بوده به صورت زیر تعریف می شوند:

الف) ضرایب آیرودینامیکی نیرو و گشتاورهای وارد بر بدنه کشتی در جهات مختلف (با اندیس AH).

ب) ضرایب آیرودینامیکی نیرویی و گشتاورهای وارد بر سوپر استراکچر کشتی در جهات مختلف (با اندیس A).

در معادلات فوق ضرایب مرتبط با سوپر استراکچر و بدنه کشتی از یکدیگر متمایز شده اند. این تمایز با آوردن حرف d در مقابل عبارات مربوط به سوپر استراکچر کشتی انجام گرفته است. سایر کمیت های اصلی در معادلات فوق به صورت زیر معرفی شده اند.

V_A, ρ_A ؛ چگالی هوا و مقدار سرعت باد نسبت به بدنه کشتی.

A_x, A_y ؛ مساحت تصویر شده بدنه بیرون از آب کشتی روی صفحات مرکزی و میانی.

A_{xN}, A_{yN} ؛ مساحت تصویر شده سوپر استراکچر کشتی روی صفحات مرکزی و میانی.

مقدار سرعت نسبی باد از جمع برداری مولفه های آن و به صورت زیر بدست می آید:

$$V_A = \sqrt{V_{xA}^2 + V_{yA}^2}$$

در رابطه فوق $V_{xA} = V_{xw} - V_x$ و $V_{yA} = V_{yw} - V_y$ بوده و V_{xw} و V_{yw} مولفه های

سرعت نسبی باد نسبت به بدنه کشتی می باشند. بر حسب مولفه های فوق، زاویه راستای باد نسبت به محور کشتی φ_{wk} به صورت زیر محاسبه خواهد شد. (شکل ۴ را ببینید).

$$\varphi_{wk} = \arctg\left(\frac{V_y + V_{yw}}{V_x + V_{xw}}\right)$$

که در آن:

$$V_{YW} = V_W \cos(\varphi - \varphi_W) \quad , \quad V_{XW} = V_W \sin(\varphi - \varphi_W)$$

در عمل مقدار مشخصه ها و ضرایب آیرودینامیکی فوق با استفاده از نتایج آزمون های تجربی یا به کمک استفاده از جداول آماری و عددی تعیین می شوند. واضح است که ضرایب آیرودینامیکی فوق تابعی از زوایه نسبی راستای وزش باد نسبت به راستای بدنه کشتی دارد لذا معمولا روابط ساختاری برای محاسبه ضرایب و مشخصه های آیرودینامیکی به کمک تابعی از سری های فوریه نوشته می شوند. در زیر شکل ساختاری تعدادی از این روابط برای ضرایب آیرودینامیکی در راستاهای مختلف آورده شده است.

الف) ضریب نیروی آیرودینامیکی در راستای طولی

$$C_{XA}(\varphi_{WK}, \bar{L}) = \left[0.5a_{X0} + \sum_{K=1}^6 a_{XK} \cos(K\varphi_{WK}) + \sum_{K=1}^6 b_{XK} \sin(K\varphi_{WK}) \right] K_A$$

ب) ضریب نیروی آیرودینامیکی در راستای عرضی

$$C_{YA}(\varphi_{WK}, \bar{L}) = \left[0.5a_{Y0} + \sum_{K=1}^6 a_{YK} \cos(K\varphi_{WK}) + \sum_{K=1}^6 b_{YK} \sin(K\varphi_{WK}) \right] K_A + \left[\sum_{K=1}^3 (q_{yk}) \sin(K\varphi_{WK}) \right] K_{AN}$$

د) ضریب نیروی آیرودینامیکی در راستای عمودی

$$C_{ZA}(\varphi_{WK}, \bar{L}) = \left[0.5a_{Z0} + \sum_{K=1}^6 a_{ZK} \cos(K\varphi_{WK}) + \sum_{K=1}^6 b_{ZK} \sin(K\varphi_{WK}) \right] K_A$$

ه) ضریب گشتاور آیرودینامیکی در جهت یاو :

$$C_{mzA}(\varphi_{WK}, \bar{L}) = \left[0.5a_{mz0} + \sum_{K=1}^6 a_{mzK} \cos(K\varphi_{WK}) + \sum_{K=1}^6 b_{mzK} \sin(K\varphi_{WK}) \right] K1_A + \left[\sum_{K=1}^3 (q_{mzk}) \sin(K\varphi_{WK}) \right] K1_{AN}$$

و) ضریب گشتاور آیرودینامیکی در جهت رول :

$$C_{mxA}(\varphi_{WK}, \bar{L}) = \left[0.5a_{mx0} + \sum_{K=1}^6 a_{mxK} \cos(K\varphi_{WK}) + \sum_{K=1}^6 b_{mxK} \sin(K\varphi_{WK}) \right] K1_A + \left[\sum_{K=1}^3 (a_{mxk}) \sin(K\varphi_{WK}) \right] K1_{AN}$$

در روابط فوق $\bar{L} = L/H$ نسبت ابعادی طول به عرض کشتی می باشد و ضرایب $a_{x0}, a_{x1}, \dots, a_{x5}, b_{x1}, \dots, b_{x5}, a_{y0}, a_{y1}, \dots, a_{y5}, \dots$ بستگی به شکل و ابعاد سوپر استراکچر کشتی دارند. همچنین مقادیر ضرایب $k_A, k_{AN}, k1_A, k1_{AN}$ نیز بستگی به سطح سوپر استراکچر کشتی و سطح بدنه بیرون از آب شناور دارند. این ضرایب به کمک تست های تجربی تعیین شده و به عنوان جدول محاسباتی کشتی در دسترس می باشند.

جمع بندی

در این مقاله مدل ریاضی حاکم بر رفتار دینامیک کشتی ها معرفی شده و اثر پارامترهای موثر محیطی و داخلی کشتی (سیستم های هدایت و کنترلی) بر بالانس دینامیکی حرکات بدنه شناور تجزیه و تحلیل شده است. به کمک مدل ریاضی مطرح شده و در دسترس بودن برخی ثابت ها که تابع نوع هندسه هر کشتی هستند می توان رفتار دینامیکی شناورها را تحلیل و محاسبه نمود. به منظور معرفی نحوه تحلیل دقیق تر اثر هریک از عوامل محیطی، مدل ریاضی اثر نیروی وزش باد بر دینامیک کشتی ها با جزئیات بیشتری بررسی شده است. این مقاله نشان می دهد که با بهره گیری از مدل سازی ریاضی، می توان پدیده های پیچیده ای همچون دینامیک حرکات کشتی در دریا را که تحت تاثیر عوامل مختلفی است را به صورت دقیق تر تجزیه و تحلیل نمود.

مراجع:

- MARSIM 1993, 1. Ankudinov V.K., Modular Mathematical Model for Maneuverability Predictions, St. Jons, Canada.
- shallow water. – S.- 2. Basin A.M., Velednitsky I.O., Lyahovitsky A.G. Hydrodynamics of ships at Petersburg:Shipbuilding, 1976.
- Research of Ship Active 3. Boitsov V.P. Greenpress V.M., Lebedev E.P., Results of Hydrodynamic Control Means, Transaction of KSRI, S.-Petersburg. V.8(292), 1998.
4. Borodai I.K., Netsvetaev Yu.A. Ship motion at rough sea, S - Petersburg:Shipbuilding, 1989.
- Parallel Courses, 5. Dand I.W., Some Measurements of Interaction Between Ship Models Passing on National Maritime Institute, 1981.
- S.-Petersburg:Shipbuilding, 1963. 6. Fedyayevsky K.K., Sobolev G.V, Controllability of ship, International 7. Fujino M., Experimental studies on Ship Manoeuvrability in Restricted Waters, Shipbuilding Progress, volume 15, 1988.
- Shipbuilding, 1988. 8. Gofman A.D, Propulsion-rudder system and ship manoeuvring, S.-Petersburg: Int.Shipbuild.Progr., 9. Inoue S., Hirano M., Kijima K., Hydrodynamic derivatives on Shipmanoeuvring, 1981.
- Manoeuvring and 10. Kijima K., Furukawa Y., A Ship Manoeuvring Motion in the Proximity of Pier. – Conference – Southampton, UK, 1994. Control of Marine Craft, 3rd International (surface), Prentice-Hall, 11. Kinsman B., Wind Waves (their generation and propagation on the ocean Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.
12. Znamerovsky B.P, Theoretic fundamentals of ship control, S.-Petersburg:1974.

فهرست علائم:

در این معادلات "m" جرم کشتی است ($m = \rho.LBT.C_B$) که در اینجا ρ - چگالی آب ؛ T.B.L به ترتیب طول ، عرض و آبخور کشتی از میانه کشتی و C_B ضریب هستند).

J_x, J_y, J_z ؛ ممان های اینرسی کشتی در راستای محورهای مختصات متحرک.

$\lambda_{11}, \lambda_{22} \dots \lambda_{66}$ ؛ جرمهای اضافه شده به کشتی.

V_x, V_y, V_z ؛ مولفه های سرعت کشتی در راستای محورهای مختصات متحرک.

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ؛ مولفه های سرعت زاویه ای کشتی در راستای محورهای مختصات متحرک.

$F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ ؛ مولفه های نیرو و گشتاور ناشی از اثرات خارجی (باد، جریان های آبی)

$F_{x(M)}, F_{y(M)}, F_{z(M)}, M_{x(M)}, M_{y(M)}, M_{z(M)}$ ؛ مولفه های نیرو و گشتاورهای مکانیکی وارد بر

کشتی.

m: جرم کشتی

$\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{33}, \lambda_{44}, \lambda_{55}, \lambda_{66}$: جرم اضافه شده

Ship : کشتی (سایر)

Bot : بستر آب

Bank : شکل هندسی کانال

Thr : تراستر یا موتور الکتریکی سینه یا پاشنه

Wall: دیواره (اسکله یا کانال)

Rope : طناب مهار کشتی

Anch: لنگر کشتی