

## تحلیل ، بررسی و مدلسازی ساختار و نحوه عملکرد پایدارساز دو محوره نیرویی و شبیه سازی رفتار آن در سیمولینک

محمد صادق میرزاجانی دارستانی ، سید زین العابدین موسوی ، پرویز امیری

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی ، دانشکده فنی و مهندسی

عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی ، دانشکده برق

مستوفی مکاتبات : محمد صادق میرزاجانی دارستانی

### چکیده

امروزه میزهای پایدار شده با درجات آزادی مختلف ، کاربردهای متعددی در صنعت و تجارت مانند هوافضا ، نجوم ، کارخانجات خودرو سازی ، ربات ها و ... دارند . با توجه به اینکه مهمترین مزیت اینگونه میزها ، پایداری رفتار و عملکرد آنها در شرایط مختلف محیطی و کاری می باشد ، لذا در بسیاری از کاربردها ، بر روی آنها سیستم های تصویربرداری قرار می گیرد تا جهت جستجو و ردیابی هدف مورد نظر ، تصویر پایداری در اختیار باشد . میزهای پایدار شده با درجات آزادی مختلف از نظر نوع پایدارسازی به دو دسته نیرویی و اندیکاتوری تقسیم می شوند . در این مقاله پس از نگاه اجمالی بر ساختار و نحوه عملکرد پایدارکننده های تک محوره نیرویی ، ساختار و نحوه عملکرد یک پایدارکننده ژيروسکوپی دو محوره نیرویی نمونه در نرم افزار متلب ( سیمولینک ) شبیه سازی شده است و رفتار پلتفرم مورد نظر در شرایط مختلف کاری و عملکردی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته که نتایج شبیه سازی نشان دهنده مطابقت نتایج بدست آمده از شبیه سازی انجام شده در سیمولینک با رفتار واقعی پلتفرم مورد نظر در شرایط کاری یکسان می باشد .

**کلمات کلیدی :** ژيروسکوپ ، پایدارکننده اندیکاتوری ، شبیه سازی ، پایدارکننده نیرویی

### مقدمه

مجموعه ها و سیستم های مختلفی در صنعت و تجارت وجود دارند که از میزهای پایدار شده با درجات آزادی مختلف جهت تصویر برداری استفاده می کنند . اینگونه سیستم ها هنگامیکه جهت شناسایی ، ردیابی و تهیه فیلم و یا عکس از هدف مورد نظر خود از سیستم تصویربرداری استفاده می کنند ، پایداری دوربین باید طوری باشد که وضوح تصویر در اثر لرزش و تکانهای متوالی از بین نرود . اینگونه میزها معمولاً در دماغه یک وسیله هدایت شونده قرار می گیرند . این نوع از میزها قادرند ضمن رعایت اصل پایداری ، فضایی را که در حوزه دید آنها قرار دارد برای یافتن هدف و تصویربرداری از آن جستجو کنند و مانند هر سیستم کنترلی دیگر ، خروجی مورد نظر یعنی زاویه محور میز ، با ورودی مرجع یعنی زاویه خط دید سیستم تصویربرداری ، مقایسه شده و یک جبران ساز از روی خطای تولید شده دستور گشتاور مناسب را صادر می کند (تاکا ، ۱۳۸۸) .

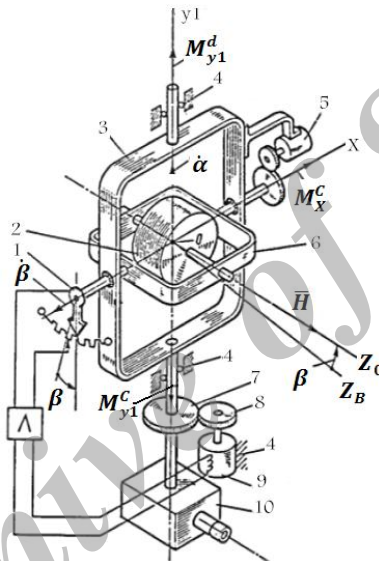
همان طور که اشاره شد ، موضوع اصلی این مقاله یک پایدارکننده ژيروسکوپی دو محوره نیرویی است که بر روی آن یک سیستم تصویربرداری قرار گرفته است . لذا ملاکهای عملکرد نهایی سیستم پایدارساز در این تحقیق کیفیت ، وضوح و دقت تصویر ایجاد شده توسط سنسور اپتیکی با وجود حرکت های حامل و هدف است . کاهش ناپایداری معمولاً به عنوان معیاری برای عملکرد مناسب پایدارکننده به حساب می آید .

پیشرفت های شگفت انگیز جدید در عملکرد پایدار کننده مرهون موارد مختلفی است . به عنوان مثال افزایش پهنای باند عملیاتی مستقیماً باعث کاهش آشفتگی می شود و در مقابل پیشرفت در ژيروسکوپ ها ، عملگرها و سیستمهای الکترونیکی ، کنترلرهای جدید را قادر می سازد تا با پهنای باند بیشتری کار کنند . ناپایداری و حرکات نامنظم و ناخواسته در پایدارکننده نیز با کاهش نویز در ژيروسکوپ ها ، عملگرها و قطعات الکترونیکی ، کاهش پیدا کرده است .

در کتب و مقالات مختلفی به موضوع پایدارکننده های ژيروسکوپی پرداخته شده است که در اغلب آنها به بحث هایی مانند شناسایی سیستم این میزها ، طراحی پایدارساز ، بررسی کاربرد اینگونه میزها در صنایع مختلف ، تبیین روشهای آزمون و ارزیابی و ... اشاره گردیده است ، اما در این تحقیق ما قصد داریم ابتدا به مدلسازی یک پایدارکننده ژيروسکوپی دو محوره نیرویی نمونه پرداخته و معادلات لازم برای شبیه سازی این گونه پایدارکننده ها را بدست می آوریم و سپس با استفاده از قسمت سیمولینک در نرم افزار متلب ، ساختار پایدارکننده ژيروسکوپی دو محوره مورد نظر شبیه سازی خواهد شد تا بتوان با استفاده از مدل بدست آمده از پایدارکننده مورد نظر در سیمولینک ، رفتار و عملکرد آنرا در شرایط مختلف کاری ، محیطی و عملکردی ارزیابی نمود که بدینوسیله می توان در هزینه های ناشی آزمایش های عملی جهت ارزیابی رفتار این پایدارکننده ها صرفه جویی کرد .

## مروری بر پایدارساز نیرویی یک محوره :

شکل ۱، یک پایدارکننده ژيروسکوپی فعال نیرویی یک محوره را نمایش می دهد ، که یک دوربین به عنوان هدف پایدارسازی به قاب بیرونی آن متصل شده است . مجموعه ژيروسکوپ سه درجه آزادی و دوربین ، سکوی پایدار را تشکیل می دهد . در اینجا گشتاور های مزاحم خارجی  $M_{y1}^d$  ، که حول محور  $y_1$  تاثیر می گذارد ، تقدم  $\beta$  را برای محور قاب داخلی باعث شده و انحراف  $\beta$  را ایجاد می کند . با اندازه گیری زاویه انحراف  $\beta$  توسط زاویه سنج شماره ۱ و تولید سیگنال فیدبک بر اساس آن و ارسال فرمان به موتور گشتاور ساز ۹ ، این موتور گشتاور برگرداننده محور اصلی ژيروسکوپ را در جهت کاهش  $\beta$  تولید کرده و تقدم ژيروسکوپ را محدود می سازد ، بطوریکه همواره مقدار زاویه  $\beta$  را در حوالی صفر نگه می دارند . بدین ترتیب در لحظه اول گشتاور ژيروسکوپی ، وظیفه خنثی کردن گشتاور مزاحم با سرعت تقدم  $\beta$  را به عهده دارد و بلافاصله با غیر صفر شدن  $\beta$  ، گشتاور کنترلی برگرداننده  $M_{y1}^c$  ، توسط مدار فیدبک تولید و به کمک گشتاور ژيروسکوپی می آید . در نهایت ، محور ژيروسکوپ در یک مقدار ثابت زاویه  $\beta = \beta^*$  (حدود چند دقیقه ) ثابت شده و گشتاور ژيروسکوپی پایان یافته و کل گشتاور مزاحم خارجی توسط گشتاور کنترلی  $M_{y1}^c$  خنثی می گردد و بدین صورت قاب خارجی و مجموعه دوربین با وجود چرخش بدنه ، حول محور  $y_1$  پایدار می شود و دوربین با وجود حرکات بدنه ، نسبت به فضای اینرسی ثابت می ماند . به چنین پایدارکننده ژيروسکوپی اصطلاحاً پایدارکننده ژيروسکوپی اکتیو نیرویی گفته می شود (MASTEN , 2008) .



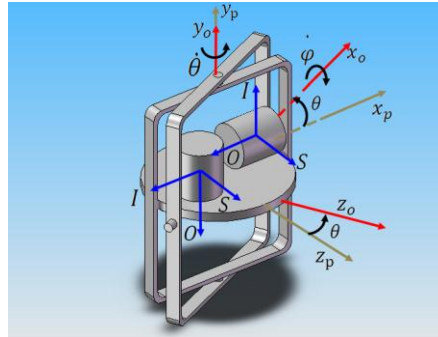
شکل ۱ - پایدارکننده فعال نیرویی یک محوره برای پایدار کردن دوربین : ۱- زاویه سنج ۲- روتور ژيروسکوپ ۳- سکوی پایدار ۴- بدنه ۵- گشتاور ساز کنترلی (ترکر) ۶- قاب روتور ۷ و ۸- جعبه دنده ۹- موتور پایدارساز ۱۰- جسم مورد پایداری (دوربین)

## تحلیل و بررسی نحوه عملکرد پایدارکننده های ژيروسکوپی دو محوره نیرویی :

یک پایدار ساز نیرویی دو محوره جهت پایدارسازی و کنترل حرکت زاویه ای یک سکو حول دو محور در فضای اینرسی و یا یک دستگاه مرجع مورد استفاده قرار می گیرد . این نوع پایدارسازها را می توان در جایی که حرکت جسم پایدار شونده تنها حول دو محور مد نظر می باشد ، مورد استفاده قرار داد . مانند سیستمهای آشیانه یاب و یا عمودهای ژيروسکوپی (Gyro verticals) در هواپیماها و مانند آنها . در تقریب اول عملکرد یک پاژیر دو محوره را می توان شبیه به ۲ پاژیر یک محوره در نظر گرفت . در نتیجه آنچه در مورد پاژیر یک محوره گفته شده در اینجا نیز صدق می کند . برای پایدار ساختن هر یک از محورهای سکو نیاز به یک ژيروسکوپ می باشد ، به طوریکه هر محور پایدار شده موازی محور ورودی ژيروسکوپ مختص به خود باشد . در پایدار ساز نیرویی دو محوره گشتاور های مزاحم خارجی  $M_{y1}^d, M_{x1}^d$  ، که حول محورهای پایداری  $x_1, y_1$  تاثیر می گذارد ، باعث ایجاد انحراف زاویه ای  $\alpha$  و  $\beta$  در محور خروجی ژيروسکوپها می شوند . همچنین برای هر یک از محورها یک موتور پایدار ساز تعبیه می گردد ، که فرمان ورودی آن متناسب با زاویه انحراف در محور خروجی ژيروسکوپ مربوطه است و گشتاور خروجی تولید شده توسط موتور در جهت کاهش این زاویه انحراف و تثبیت محور سکوی پایدار نسبت به فضای اینرسی عمل می نماید . بدین ترتیب زوایای انحراف سکوی پایدار نسبت به فضای اینرسی همواره نزدیک صفر باقی خواهد ماند (BRANES , 1971) .

نمایی از پایدار ساز نیرویی دو محوره که جهت پایدارسازی سکو حول محورهای  $x$  و  $y$  آن مورد استفاده قرار می گیرد در شکل ۲ ، دیده می شود . در این شکل چهار دستگاه مختصات متصل به هر کدام از اجزاء دینامیکی موجود ، در نظر گرفته شده است ، که اندیس  $o$  نشانگر دستگاه مختصات قاب بیرونی و اندیس  $p$  نشانگر دستگاه مختصات سکوی پایدار می باشد . دستگاه مختصات سکوی پایدار با یک چرخش  $\theta$  حول محور  $y$  خود بر روی دستگاه مختصات قاب خارجی منطبق می شود و زاویه  $\phi$  چرخش قاب خارجی برای انطباق بر بدنه پاژیر می باشد . همچنین دستگاه مختصات جابجایی  $x$  در شکل ۲ چسبیده

به بخش شناور (قاب داخلی) ژيروسکوپ X است و حول محور خروجی آن قابلیت چرخش دارد ، همچنین دستگاه مختصات جابجایی Y چسبیده به بخش شناور جابجایی و مربوطه است و حول محور خروجی آن قابلیت چرخش دارد .

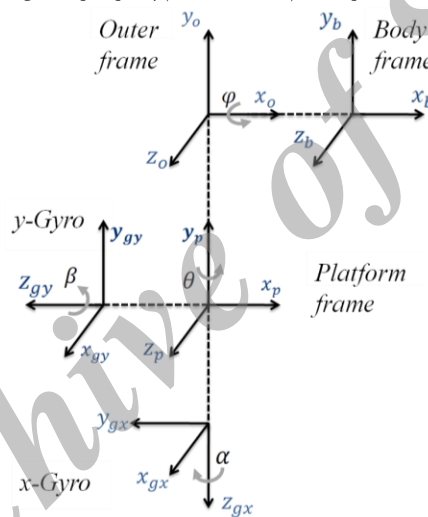


شکل ۲- پایداری دو محوره شامل قابهای خارجی و سکوی پایدار و ژيروسکوپها به همراه محورهای مختصات مربوطه (Aruga et al, 2009)

مدلسازی دینامیکی پایدارکننده های ژيروسکوپی دو محوره نیرویی :

سیستم های مختصات :

در شکل ۳ ارتباط میان دستگاه های مختصات مورد استفاده برای تمام اعضای سیستم پایدار ساز نمایش داده شده است .



شکل ۳- ارتباط میان دستگاه های مختصات مختلف

در شکل ۳، مختصات  $(x_o, y_o, z_o)$  مربوط به قاب بیرونی ، مختصات  $(x_p, y_p, z_p)$  مربوط به سکوی پایدار ، مختصات  $(x_{gx}, y_{gx}, z_{gz})$  مربوط به

جابجایی X ، مختصات  $(x_{gy}, y_{gy}, z_{gy})$  مربوط به جابجایی Y و مختصات  $(x_b, y_b, z_b)$  مربوط به بدنه می باشد .

روابط سینماتیک قاب بیرونی :

بردار سرعت زاویه ای قاب بیرونی ،  $\vec{\omega}_o$  ، از جمع برداری سرعت زاویه ای بدنه  $\vec{\omega}_b$  با سرعت زاویه ای نسبی میان قاب و بدنه  $\vec{\omega}_{o/b}$  حاصل می گردد ، زاویه بدنه نسبت به قاب خارجی را با  $\phi$  و سرعت زاویه ای بدنه نسبت به قاب خارجی را با  $(\dot{\phi})$  نمایش دادیم . لذا سرعت زاویه ای قاب خارجی نسبت به بدنه بصورت رابطه (۱) تعریف می گردد (Ji et al , 2009) .

$$\vec{\omega}_{o/b} = -\vec{\omega}_{b/o} = -\dot{\phi} \quad (1)$$

و طبق توضیحات فوق خواهیم داشت :

$$\vec{\omega}_o = T_{b/o} \vec{\omega}_b + \vec{\omega}_{o/b} \quad (2)$$

$$\vec{\omega}_o = \begin{bmatrix} p - \dot{\varphi} \\ q \cdot \cos(\varphi) - r \cdot \sin(\varphi) \\ q \cdot \sin(\varphi) + r \cdot \cos(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{ox} \\ \omega_{oy} \\ \omega_{oz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

مشق بردار (3) در دستگاه قاب خارجی عبارت خواهد شد از:

$$\vec{\dot{\omega}}_o = \begin{bmatrix} \dot{p} - \dot{\dot{\varphi}} \\ \dot{q} \cdot \cos(\varphi) - q \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin(\varphi) - \dot{r} \cdot \sin(\varphi) - r \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) \\ \dot{q} \cdot \sin(\varphi) + q \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) + \dot{r} \cdot \cos(\varphi) - r \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_{ox} \\ \dot{\omega}_{oy} \\ \dot{\omega}_{oz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

#### روابط سینماتیک سکوی پایدار:

به شیوه ای مشابه قسمت قبل، در این قسمت سرعت زاویه ای مطلق سکوی پایدار از سرعت زاویه ای قاب بیرونی و سرعت زاویه ای سکو نسبت به قاب،  $\vec{\omega}_{p/o}$  به دست می آید. زاویه قاب خارجی نسبت به سکوی پایدار را با  $\theta$  و سرعت قاب خارجی نسبت به سکوی پایدار را  $(\dot{\theta})$  نمایش دادیم. بنابراین:

$$\vec{\omega}_{p/o} = -\vec{\omega}_{o/p} = -\dot{\theta} \quad (5)$$

$$\vec{\omega}_p = T_{o/p} \vec{\omega}_o + \vec{\omega}_{p/o} \quad (6)$$

$$\vec{\omega}_p = \begin{bmatrix} \omega_{ox} \cdot \cos(\theta) + \omega_{oz} \cdot \sin(\theta) \\ \omega_{oy} - \dot{\theta} \\ -\omega_{ox} \cdot \sin(\theta) + \omega_{oz} \cdot \cos(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{px} \\ \omega_{py} \\ \omega_{pz} \end{bmatrix} \quad (7)$$

مشق بردار (7) در دستگاه سکوی پایدار عبارت خواهد بود با:

$$\vec{\dot{\omega}}_p = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_{ox} \cdot \cos(\theta) - \omega_{ox} \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\theta) + \dot{\omega}_{oz} \cdot \sin(\theta) + \omega_{oz} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\theta) \\ \dot{\omega}_{oy} - \dot{\dot{\theta}} \\ -\dot{\omega}_{ox} \cdot \sin(\theta) - \omega_{ox} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\theta) + \dot{\omega}_{oz} \cdot \cos(\theta) - \omega_{oz} \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_{px} \\ \dot{\omega}_{py} \\ \dot{\omega}_{pz} \end{bmatrix} \quad (8)$$

#### روابط سینماتیک جابجایی X:

بردار سرعت زاویه ای مطلق جابجایی X، در دستگاه مختصات جابجایی X، بصورت رابطه (9) بدست می آید:

$$\vec{\omega}_{gx} = T_{p/gx} \begin{bmatrix} \omega_{px} \\ \omega_{py} \\ \omega_{pz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\vec{\omega}_{gx} = \begin{bmatrix} -\omega_{px} \cdot \sin(\alpha) + \omega_{pz} \cdot \cos(\alpha) \\ -\omega_{px} \cdot \cos(\alpha) - \omega_{pz} \cdot \sin(\alpha) \\ -\omega_{py} + \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{gxs} \\ \omega_{gxl} \\ \omega_{gx0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

مشق بردار (10) در دستگاه جابجایی X عبارت خواهد شد از:

$$\vec{\dot{\omega}}_{gx} = \begin{bmatrix} -\dot{\omega}_{px} \cdot \sin(\alpha) - \omega_{px} \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos(\alpha) + \dot{\omega}_{pz} \cdot \cos(\alpha) - \omega_{pz} \cdot \dot{\alpha} \cdot \sin(\alpha) \\ -\dot{\omega}_{px} \cdot \cos(\alpha) + \omega_{px} \cdot \dot{\alpha} \cdot \sin(\alpha) - \dot{\omega}_{pz} \cdot \sin(\alpha) - \omega_{pz} \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos(\alpha) \\ -\dot{\omega}_{py} + \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_{gxs} \\ \dot{\omega}_{gxl} \\ \dot{\omega}_{gx0} \end{bmatrix} \quad (11)$$

#### روابط سینماتیک جابجایی Y:

بردار سرعت زاویه ای جابجایی Y، در دستگاه مختصات جابجایی Y، بصورت رابطه (12) بدست می آید (Kennedy and Kennedy, 2003):

$$\vec{\omega}_{gy} = T_{p/gy} \begin{bmatrix} \omega_{px} \\ \omega_{py} \\ \omega_{pz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

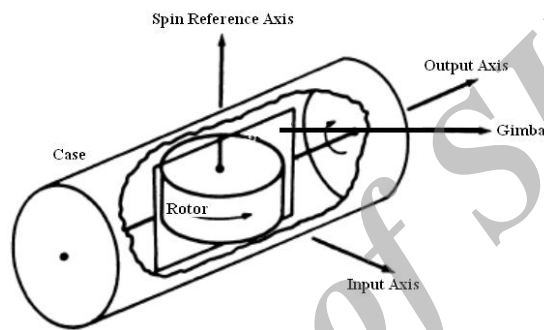
$$\vec{\omega}_{gy} = \begin{bmatrix} \omega_{py} \cdot \sin(\beta) + \omega_{pz} \cdot \cos(\beta) \\ \omega_{py} \cdot \cos(\beta) - \omega_{pz} \cdot \sin(\beta) \\ -\omega_{px} + \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{gys} \\ \omega_{gyl} \\ \omega_{gy0} \end{bmatrix} \quad (13)$$

مشق بردار (۱۳) در دستگاه جایرو  $\gamma$  عبارت خواهد شد از :

$$\vec{\omega}_{gy} = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_{py} \cdot \sin(\beta) + \omega_{py} \cdot \dot{\beta} \cdot \cos(\beta) + \dot{\omega}_{pz} \cdot \cos(\beta) - \omega_{pz} \cdot \dot{\beta} \cdot \sin(\beta) \\ \dot{\omega}_{py} \cdot \cos(\beta) - \omega_{py} \cdot \dot{\beta} \cdot \sin(\beta) - \dot{\omega}_{pz} \cdot \sin(\beta) - \omega_{pz} \cdot \dot{\beta} \cdot \cos(\beta) \\ -\dot{\omega}_{px} + \ddot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_{gys} \\ \dot{\omega}_{gyI} \\ \dot{\omega}_{gyO} \end{bmatrix} \quad (14)$$

معادلات دینامیکی جایرو ها :

اگر بدنه ژيروسکوپها که به سکو متصل است را جزو بدنه در نظر بگیریم . بخش متحرک ژيروسکوپ که نیاز به نوشتن معادلات دینامیکی آن می باشد را شامل قاب داخلی و متعلقات آن به همراه روتور ژيروسکوپ در نظر می گیریم . که اصطلاحاً به آن بخش شناور گویند (شکل ۴) ( Khodadadi and Jahed , 2011 ) .



شکل ۴- جایرو مکانیکی یک درجه آزادی

در اینصورت ممنتوم زاویه ای کل بخش شناور جایرو را می توان به صورت برداری (۱۵) نشان داد :

$$\vec{H}_g^g = [I_g] \vec{\omega}_g + \vec{H}_\omega \quad (15)$$

که در آن

$\vec{H}_g^g$  : ممنتوم زاویه ای کل بخش شناور ژيروسکوپ

$\vec{H}_\omega$  : ممنتوم زاویه ای روتور جایرو ( ممان سینتیک جایرو) است و بصورت رابطه (۱۶) تعریف می گردد:

$$\vec{H}_\omega = I_R \cdot \Omega \quad (16)$$

که  $I_R$  ممان اینرسی قطبی روتور است .

$[I_g]$  : ممان اینرسیهای اصلی بخش شناور است که بصورت رابطه (۱۷) نمایش داده می شود :

$$[I_g] = \begin{bmatrix} I_S & 0 & 0 \\ 0 & I_I & 0 \\ 0 & 0 & I_O \end{bmatrix} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷) ممان اینرسی های محوره های مربوطه روتور در  $I_S$  و  $I_I$  لحاظ شده اند ولی  $I_S$  بدون احتساب ممان اینرسی قطبی روتور است .

$\vec{\omega}_g$  : سرعت زاویه ای مطلق بخش شناور

$$\vec{H}_{gx}^g = \begin{bmatrix} I_S \omega_{gxs} + I_R \Omega \\ I_I \omega_{gxi} \\ I_O \omega_{gxO} \end{bmatrix}, \dot{H}_{gx}^g = \begin{bmatrix} I_S \dot{\omega}_{gxs} \\ I_I \dot{\omega}_{gxi} \\ I_O \dot{\omega}_{gxO} \end{bmatrix} \quad (18)$$

برای ژيروسکوپ  $\gamma$  نیز که مشابه ژيروسکوپ  $x$  انتخاب می شود به همان طریق خواهیم داشت :

$$\vec{H}_{gy}^g = \begin{bmatrix} I_S \omega_{gys} + I_R \Omega \\ I_I \omega_{gyI} \\ I_O \omega_{gyO} \end{bmatrix}, \dot{H}_{gy}^g = \begin{bmatrix} I_S \dot{\omega}_{gys} \\ I_I \dot{\omega}_{gyI} \\ I_O \dot{\omega}_{gyO} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\sum M = \dot{H}_g^I = \dot{H}_g^g + \vec{\omega}_g \times \vec{H}_g^g \quad (20)$$

$$\dot{\vec{H}}_{gx}^I = \begin{bmatrix} I_{gxs} \dot{\omega}_{gxs} \\ I_{gxl} \dot{\omega}_{gxl} \\ I_{gx0} \dot{\omega}_{gx0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{gxl} \cdot \omega_{gx0} \cdot (I_{gx0} - I_{gxl}) \\ \omega_{gxs} \cdot \omega_{gx0} \cdot (I_{gxs} - I_{gx0}) + I_R \cdot \Omega \cdot \omega_{gx0} \\ \omega_{gxs} \cdot \omega_{gxl} \cdot (I_{gxl} - I_{gxs}) - I_R \cdot \Omega \cdot \omega_{gxl} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\dot{\vec{H}}_{gy}^I = \begin{bmatrix} I_{gys} \dot{\omega}_{gys} \\ I_{gyl} \dot{\omega}_{gyl} \\ I_{gy0} \dot{\omega}_{gy0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{gyl} \cdot \omega_{gy0} \cdot (I_{gy0} - I_{gyl}) \\ \omega_{gys} \cdot \omega_{gy0} \cdot (I_{gys} - I_{gy0}) + I_R \cdot \Omega \cdot \omega_{gy0} \\ \omega_{gys} \cdot \omega_{gyl} \cdot (I_{gyl} - I_{gys}) - I_R \cdot \Omega \cdot \omega_{gyl} \end{bmatrix} \quad (22)$$

نیز به طریقی مشابه به صورت رابطه (22) بدست می آید :

با جایگذاری روابط (21) و (22) در معادله (20) خواهیم داشت :

$$\vec{M}_{gx} = \begin{bmatrix} M_{gxs} \\ M_{gxl} \\ M_{gx0}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{gxs} \dot{\omega}_{gxs} \\ I_{gxl} \dot{\omega}_{gxl} \\ I_{gx0} \dot{\omega}_{gx0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{gxl} \cdot \omega_{gx0} \cdot (I_{gx0} - I_{gxl}) \\ \omega_{gxs} \cdot \omega_{gx0} \cdot (I_{gxs} - I_{gx0}) + I_R \cdot \Omega \cdot \omega_{gx0} \\ \omega_{gxs} \cdot \omega_{gxl} \cdot (I_{gxl} - I_{gxs}) - I_R \cdot \Omega \cdot \omega_{gxl} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\vec{M}_{gy} = \begin{bmatrix} M_{gys} \\ M_{gyl} \\ M_{gy0}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{gys} \dot{\omega}_{gys} \\ I_{gyl} \dot{\omega}_{gyl} \\ I_{gy0} \dot{\omega}_{gy0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{gyl} \cdot \omega_{gy0} \cdot (I_{gy0} - I_{gyl}) \\ \omega_{gys} \cdot \omega_{gy0} \cdot (I_{gys} - I_{gy0}) + I_R \cdot \Omega \cdot \omega_{gy0} \\ \omega_{gys} \cdot \omega_{gyl} \cdot (I_{gyl} - I_{gys}) - I_R \cdot \Omega \cdot \omega_{gyl} \end{bmatrix} \quad (24)$$

دو معادله‌ای که در شبیه‌سازی نیاز خواهد شد ، مربوط به محور خروجی جاپروها می‌باشد ، یعنی :

$$\dot{\omega}_{gx0} = -\dot{\omega}_{py} + \ddot{\alpha} = [M_{gx0}^* - \omega_{gxs} \cdot \omega_{gxl} \cdot (I_{gxl} - I_{gxs}) + I_R \cdot \Omega \cdot \omega_{gxl}] / I_{gx0} \quad (25)$$

$$\dot{\omega}_{gy0} = -\dot{\omega}_{px} + \ddot{\beta} = [M_{gy0}^* - \omega_{gys} \cdot \omega_{gyl} \cdot (I_{gyl} - I_{gys}) + I_R \cdot \Omega \cdot \omega_{gyl}] / I_{gy0} \quad (26)$$

که در آن :

$$M_{gx0}^* = -D_\alpha \cdot \dot{\alpha} + M_{Cx} , M_{gy0}^* = -D_\beta \cdot \dot{\beta} + M_{Cy} \quad (27)$$

$D_\alpha$  ,  $D_\beta$  ضریب میرایی لژ برای محور خروجی جاپروها هستند .  $M_{Cy}$  و  $M_{Cx}$  گشتاورهای کنترلی جهت رهگیری و تغییر راستای سکوی پایدار هستند ( Shan-zhong and Long-he , 2010 ) .

معادلات دینامیکی سکوی پایدار :

رابطه نیوتن اول را برای سکوی پایدار به صورت (28) بیان می‌نماییم :

$$\sum \vec{M}_p = \dot{\vec{H}}_p^I \quad (28)$$

$\vec{H}_p$  ممتموم زاویه ای کل سکوی پایدار را می‌توان به صورت برداری (29) نشان داد :

$$\vec{H}_p = I_p \cdot \vec{\omega}_p \quad (29)$$

: ممتموم زاویه ای کل سکوی پایدار

: ممان اینرسیهای اصلی سکوی پایدار

ممتموم زاویه‌ای کل سکوی پایدار به صورت رابطه (30) بدست می آید :

$$\vec{H}_p = \begin{bmatrix} I_{px} & 0 & 0 \\ 0 & I_{py} & 0 \\ 0 & 0 & I_{pz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{px} \\ \omega_{py} \\ \omega_{pz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{px} \cdot \omega_{px} \\ I_{py} \cdot \omega_{py} \\ I_{pz} \cdot \omega_{pz} \end{bmatrix} \quad (30)$$

آهنگ تغییرات ممتموم زاویه‌ای کل از رابطه (31) بدست می آید :

$$\dot{\vec{H}}_p^I = \dot{\vec{H}}_p^P + \vec{\omega}_p \times \vec{H}_p^P \quad (31)$$

با توجه به روابط (5) و (30) خواهیم داشت :

$$\vec{\omega}_p \times \vec{H}_p^P = \begin{bmatrix} \omega_{py} \cdot \omega_{pz} \cdot (I_{pz} - I_{py}) \\ \omega_{px} \cdot \omega_{pz} \cdot (I_{px} - I_{pz}) \\ \omega_{px} \cdot \omega_{py} \cdot (I_{py} - I_{px}) \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\dot{\vec{H}}_p^P = \begin{bmatrix} I_{px} \cdot \dot{\omega}_{px} \\ I_{py} \cdot \dot{\omega}_{py} \\ I_{pz} \cdot \dot{\omega}_{pz} \end{bmatrix} \quad (33)$$

با جایگذاری روابط (32) و (33) در رابطه (31) خواهیم داشت :

$$\dot{\vec{H}}_p^I = \begin{bmatrix} I_{px} \cdot \dot{\omega}_{px} + (\omega_{py} \cdot \omega_{pz} \cdot (I_{pz} - I_{py})) \\ I_{py} \cdot \dot{\omega}_{py} + (\omega_{px} \cdot \omega_{pz} \cdot (I_{px} - I_{pz})) \\ I_{pz} \cdot \dot{\omega}_{pz} + (\omega_{px} \cdot \omega_{py} \cdot (I_{py} - I_{px})) \end{bmatrix} \quad (34)$$

گشتاور های وارد بر سکو را می توان به شکل رابطه (35) نوشت :

$$\sum \vec{M}_p = \vec{M}_{gx/p} + \vec{M}_{gy/p} + \vec{M}_{o/p} + \vec{M}_{ext} \quad (35)$$

که  $\vec{M}_{ext}$  در اینجا می تواند گشتاورهای نابالانسی خود سکو باشد و یا هر گشتاور خارجی عمومی دیگر که در عمل و مسئله نامشخص است و بایستی لحاظ گردد. در ادامه به تشریح باقی گشتاور ها می پردازیم. اولین گشتاور اثر جابروی X را بر سکو نشان می دهد (Ashwin et al, 2002).

$$\vec{M}_{gx/p} = \begin{bmatrix} M_{gxs} \cdot \sin(\alpha) + M_{gxI} \cdot \cos(\alpha) \\ M_{gxO}^* \\ -M_{gxs} \cdot \cos(\alpha) + M_{gxI} \cdot \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad (36)$$

عبارت دوم در سمت راست رابطه (35)، نمایانگر اثر جابروی Y بر سکو است که از رابطه (37) بدست می آید :

$$\vec{M}_{gy/p} = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ \cos(\beta) & -\sin(\beta) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_{gys} \\ M_{gyI} \\ M_{gyO}^* \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -M_{gyO}^* \\ M_{gys} \cdot \sin(\beta) + M_{gyI} \cdot \cos(\beta) \\ M_{gys} \cdot \cos(\beta) - M_{gyI} \cdot \sin(\beta) \end{bmatrix} \quad (37)$$

و عبارت سوم از معادله (35)، اثر قاب بیرونی بر سکو می باشد :

$$\vec{M}_{o/p} = \begin{bmatrix} M_{o/px} \\ M_{o/py}^* \\ M_{o/pz} \end{bmatrix} \quad (38)$$

گشتاورهای وارد از قاب خارجی به سکوی پایدار در محور لولا عبارتند از گشتاور کنترلی و نیز گشتاور اصطکاک لزوج که گشتاور اصطکاک لزوج برابر است با منفی ضریب اصطکاک لزوج در سرعت زاویه ای سکو نسبت به قاب خارجی  $(-\dot{\theta})$ ، عبارتی خواهیم داشت :

$$M_{o/py}^* = -D_{\theta} \cdot (-\dot{\theta}) + M_{Sy} = D_{\theta} \cdot \dot{\theta} + M_{Sy} \quad (39)$$

$M_{Sy}$  گشتاور موتور پایدارساز می باشد. با جایگذاری روابط (36)، (38) و (39) در رابطه (35) و با توجه به رابطه (29) خواهیم داشت :

$$\sum \vec{M}_p = \begin{bmatrix} I_{px} \cdot \dot{\omega}_{px} + (\omega_{py} \cdot \omega_{pz} \cdot (I_{pz} - I_{py})) \\ I_{py} \cdot \dot{\omega}_{py} + (\omega_{px} \cdot \omega_{pz} \cdot (I_{px} - I_{pz})) \\ I_{pz} \cdot \dot{\omega}_{pz} + (\omega_{px} \cdot \omega_{py} \cdot (I_{py} - I_{px})) \end{bmatrix} \quad (40)$$

معادلات دینامیکی قاب بیرونی :

عملیات مشابهی جهت به دست آوردن معادلات دینامیکی قاب بیرونی به شکل رابطه (41) انجام می پذیرد (Ashwin and Seshia, 1996).

$$\sum \vec{M}_o = \dot{\vec{H}}_o^I \quad (41)$$

$$\dot{\vec{H}}_o^I = \dot{\vec{H}}_o^O + \vec{\omega}_o \times \vec{H}_o^O \quad (42)$$

$$I_o = \begin{bmatrix} I_{ox} & 0 & 0 \\ 0 & I_{oy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{oz} \end{bmatrix}$$

$$\vec{\omega}_o \times \vec{H}_o^o = \begin{bmatrix} \omega_{oy} \cdot \omega_{oz} \cdot (I_{oz} - I_{oy}) \\ \omega_{ox} \cdot \omega_{oz} \cdot (I_{ox} - I_{oz}) \\ \omega_{ox} \cdot \omega_{oy} \cdot (I_{oy} - I_{ox}) \end{bmatrix}$$

$$\dot{\vec{H}}_o^o = \begin{bmatrix} I_{ox} \cdot \dot{\omega}_{ox} \\ I_{oy} \cdot \dot{\omega}_{oy} \\ I_{oz} \cdot \dot{\omega}_{oz} \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$\dot{\vec{H}}_o^I = \begin{bmatrix} I_{ox} \cdot \dot{\omega}_{ox} + \omega_{oy} \cdot \omega_{oz} \cdot (I_{oz} - I_{oy}) \\ I_{oy} \cdot \dot{\omega}_{oy} + \omega_{ox} \cdot \omega_{oz} \cdot (I_{ox} - I_{oz}) \\ I_{oz} \cdot \dot{\omega}_{oz} + \omega_{ox} \cdot \omega_{oy} \cdot (I_{oy} - I_{ox}) \end{bmatrix} \quad (44)$$

گشتاور های وارد بر قاب بیرونی شامل گشتاور های وارد از طرف بدنه ( $\vec{M}_{b/o}$ ) و گشتاور عکس العملی سکو ( $\vec{M}_{p/o}$ ) و گشتاورهای نابالانسی قاب و یا هر گشتاور عمومی خارجی می باشد ( $\vec{M}_{exo}$ )، می باشد.

$$\sum \vec{M}_o = \vec{M}_{b/o} + \vec{M}_{p/o} + \vec{M}_{exo}$$

$$\sum \vec{M}_o = \begin{bmatrix} I_{ox} \cdot \dot{\omega}_{ox} + (\omega_{oy} \cdot \omega_{oz} \cdot (I_{pz} - I_{py})) \\ I_{oy} \cdot \dot{\omega}_{oy} + (\omega_{ox} \cdot \omega_{oz} \cdot (I_{px} - I_{pz})) \\ I_{oz} \cdot \dot{\omega}_{oz} + (\omega_{ox} \cdot \omega_{oy} \cdot (I_{py} - I_{px})) \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$T_{p/o} \cdot \vec{M}_{o/p} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cdot M_{(o/p)x} - \sin(\theta) \cdot M_{(o/p)z} \\ M_{(o/p)y} \\ \sin(\theta) \cdot M_{(o/p)x} + \cos(\theta) \cdot M_{(o/p)z} \end{bmatrix} \quad (46)$$

اثر بدنه بر سکو به صورت رابطه (47) بیان می شود:

$$\vec{M}_{b/o} = \begin{bmatrix} M_{b/ox}^* \\ M_{b/oy} \\ M_{b/oz} \end{bmatrix} \quad (47)$$

گشتاورهای وارده از طرف بدنه به قاب خارجی در محور لولا عبارتند از گشتاور کنترلی  $M_{Sx}$  و نیز گشتاور اصطکاک لژ که گشتاور اصطکاک لژ برابر است با منفی ضریب اصطکاک لژ در سرعت زاویه ای سکو نسبت به قاب خارجی ( $-\dot{\phi}$ )، به عبارتی خواهیم داشت (Ljung, 1997):

$$M_{b/ox}^* = -D_\phi \cdot (-\dot{\phi}) + M_{Sx} = D_\phi \cdot \dot{\phi} + M_{Sx} \quad (48)$$

علامت ستاره نشانگر محور لولا شده است. مجموع ترم اول از معادلات (46) و (47) برابر ترم اول از معادله (45) است لذا خواهیم داشت:

$$M_{ox} = -\cos(\theta) \cdot M_{(o/p)x} + \sin(\theta) \cdot M_{(o/p)z} + M_{b/ox}^* = I_{ox} \cdot \dot{\omega}_{ox} + \omega_{oy} \cdot \omega_{oz} \cdot (I_{oz} - I_{oy}) \quad (49)$$

$$M_{(o/p)x} = C_1 \cdot (\omega_{ox} \cdot \cos(\theta) - \omega_{ox} \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\theta) + \dot{\omega}_{oz} \cdot \sin(\theta) + \omega_{oz} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\theta)) + C_2 \cdot (-\dot{\omega}_{ox} \cdot \sin(\theta) - \omega_{ox} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\theta) + \dot{\omega}_{oz} \cdot \cos(\theta) - \omega_{oz} \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\theta)) + K_6 \quad (50)$$

حال ترمهایی از  $M_{(o/p)x}$  را که دارای مولفه  $\dot{\omega}_{ox}$  و  $\dot{\omega}_{oz}$  هستند را جدا می سازیم:

$$M_{(o/p)x} = C_3 \cdot \dot{\omega}_{ox} + C_4 \cdot \dot{\omega}_{oz} + K_7 \quad (51)$$

$$C_3 = C_1 \cdot \cos(\theta) - C_2 \cdot \sin(\theta) \quad (52)$$

$$C_4 = C_1 \cdot \sin(\theta) + C_2 \cdot \cos(\theta) \quad (53)$$

$$K_7 = K_6 + C_1 \cdot \dot{\theta} \cdot (-\omega_{ox} \cdot \sin(\theta) + \omega_{oz} \cdot \cos(\theta)) + C_2 \cdot \dot{\theta} \cdot (-\omega_{ox} \cdot \cos(\theta) - \omega_{oz} \cdot \sin(\theta)) \quad (54)$$

معادله (54) را به صورت رابطه (55) بازنویسی می نمایم:

$$M_{(o/p)z} = f_4 \cdot \dot{\omega}_{ox} + f_5 \cdot \dot{\omega}_{oz} + f_3 \cdot \dot{\omega}_{py} + L_8 \quad (55)$$



که متغیرهای معادله (۵۴) به صورت روابط (۵۶) تا (۵۸) تعریف می شوند :

$$f_4 = f_1 \cdot \cos(\theta) - f_2 \cdot \sin(\theta) \quad (56)$$

$$f_5 = f_1 \cdot \sin(\theta) + f_2 \cdot \cos(\theta) \quad (57)$$

$$L_8 = L_7 + f_1 \cdot \dot{\theta} \cdot (-\omega_{ox} \cdot \sin(\theta) + \omega_{oz} \cdot \cos(\theta)) + f_2 \cdot \dot{\theta} \cdot (-\omega_{ox} \cdot \cos(\theta) - \omega_{oz} \cdot \sin(\theta)) \quad (58)$$

ترم  $\dot{\omega}_{oz}$  از معادله (۵۵) شامل با مشخص بودن سرعتها و شتابهای زاویه ای بدنه ، مشخص می باشد .

دوباره به معادله (۴۹) بر می گردیم و با جایگزینی  $M_{(o/p)x}$  و  $M_{(o/p)z}$  از معادلات (۵۱) و (۵۵) ، در معادله (۴۹) معادله مورد نیاز برای شبیه سازی قاب خارجی به صورت رابطه (۵۹) بدست می آید :

$$\begin{aligned} I_{ox} \cdot \dot{\omega}_{ox} + \omega_{oy} \cdot \omega_{oz} \cdot (I_{oz} - I_{oy}) \\ = -(C_3 \cdot \dot{\omega}_{ox} + C_4 \cdot \dot{\omega}_{oz} + K_7) \cdot \cos(\theta) + (f_4 \cdot \dot{\omega}_{ox} + f_5 \cdot \dot{\omega}_{oz} + f_3 \cdot \dot{\omega}_{py} + L_8) \cdot \sin(\theta) \\ + M_{b/ox}^* \end{aligned} \quad (59)$$

ترمهای شامل  $\dot{\omega}_{ox}$  و  $\dot{\omega}_{py}$  از معادله (۵۹) را به سمت چپ انتقال می دهیم ، خواهیم داشت :

$$N1 \cdot \dot{\omega}_{py} + N2 \cdot \dot{\omega}_{ox} = N3 \quad (60)$$

$$N1 = -f_3 \cdot \sin(\theta) \quad (61)$$

$$N2 = I_{ox} + C_3 \cdot \cos(\theta) - f_4 \cdot \sin(\theta) \quad (62)$$

$$N3 = -\omega_{oy} \cdot \omega_{oz} \cdot (I_{oz} - I_{oy}) - (C_4 \cdot \dot{\omega}_{oz} + K_7) \cdot \cos(\theta) + (f_5 \cdot \dot{\omega}_{oz} + L_8) \cdot \sin(\theta) + M_{b/ox}^* \quad (63)$$

از طرفی :

$$\dot{\omega}_{ox} = \dot{p} - \ddot{\phi} \quad \dot{\omega}_{py} = \dot{\omega}_{oy} - \ddot{\theta} \quad (64)$$

$$N1 \cdot (\dot{\omega}_{oy} - \ddot{\theta}) + N2 \cdot (\dot{p} - \ddot{\phi}) = N3 \quad (65)$$

$$N1 \cdot \ddot{\theta} + N2 \cdot \ddot{\phi} = N4 \quad (66)$$

که  $N4$  عبارتست از :

$$N4 = N1 \cdot \dot{\omega}_{oy} + N2 \cdot \dot{p} - N3 \quad (67)$$

در نهایت معادلات نهایی پایدار ساز دو محوره ۴ معادله می شود که دوتای آن مربوط با جابروها می باشد و دو مورد دیگر مربوط به سکوی پایدار و قاب خارجی می شود که به ترتیب شامل معادلات (۲۵) ، (۲۶) و (۶۶) می شوند . معادلات (۶۳) و (۶۶) همراه هم یک دستگاه دو معادله و دو مجهولی را تشکیل می دهند که با حل این دستگاه به معادلات نهایی برای شبیه سازی دست خواهیم یافت .

$$\ddot{\phi} = \frac{(M4 * N1 - B1 * N4)}{(B2 * N1 - B1 * N2)} \quad (67)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{M4 - B2 \cdot \ddot{\phi}}{B1} \quad (68)$$

معادله (۲۵) دارای ترم  $\dot{\omega}_{px}$  است که می توان آنرا به صورت رابطه (۶۹) بازنویسی نمود :

$$\dot{\omega}_{px} = (\dot{p} - \ddot{\phi}) \cdot \cos(\theta) - \omega_{ox} \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\theta) + \dot{\omega}_{oz} \cdot \sin(\theta) + \omega_{oz} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\theta) = -\ddot{\phi} \cdot \cos(\theta) + R1 \quad (69)$$

$$R1 = \dot{p} \cdot \cos(\theta) - (\dot{p} - \ddot{\phi}) \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\theta) + \dot{\omega}_{oz} \cdot \sin(\theta) + \omega_{oz} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\theta) \quad (70)$$

با احتساب روابط فوق می توان روابط (۲۵) و (۲۶) را نیز بر حسب  $\ddot{\theta}$  و  $\ddot{\phi}$  ، به صورت وابط (۷۱) و (۷۲) بازنویسی نمود :

$$\ddot{\alpha} = (\dot{\omega}_{oy} - \ddot{\theta}) + [M_{gxo}^* - \omega_{gxS} \cdot \omega_{gxt} \cdot (I_{gxt} - I_{gxs}) + I_R \cdot \Omega \cdot \omega_{gxt}] / I_{gxo} \quad (71)$$

$$\ddot{\beta} = -\ddot{\phi} \cdot \cos(\theta) + R1 + [M_{gyo}^* - \omega_{gyS} \cdot \omega_{gyt} \cdot (I_{gyt} - I_{gys}) + I_R \cdot \Omega \cdot \omega_{gyt}] / I_{gyo} \quad (72)$$

چهار معادله (۶۶) ، (۶۷) ، (۶۹) و (۷۱) در حقیقت فرمولهای مورد نیاز جهت شبیه سازی سکوی پایدار دو محوره نیرویی می باشند .

## پاسخ سیستم حلقه باز پایدارکننده ژيروسکوپی دو محوره نیرویی :

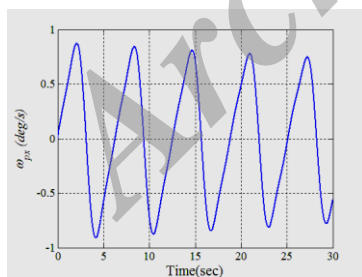
در این حالت وردی کنترلی را صفر فرض نموده و تست حلقه باز را به دو صورت انجام می‌دهیم . در حالت اول فرض بر این است که پایه حرکتی ندارد و یک سرعت زاویه‌ای اولیه به دوربین (سکوی پایدار) و قاب خارجی داده می‌شود . در شبیه‌سازی دوم پاسخ حلقه باز سیستم ، تحت اثر حرکات نوسانی بدنه بررسی می‌شود . متغیرهایی که در اشکال دیده می‌شوند در جدول ۱ توضیح داده شده اند .

جدول ۱ - توضیح متغیرهای موجود در نمودارهای شبیه‌سازی شده

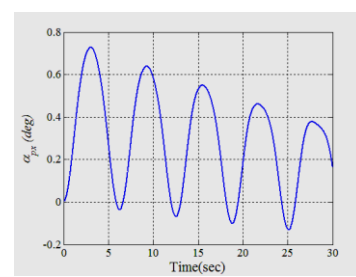
متغیر	توضیح
$\omega_{px}$	سرعت زاویه‌ای مطلق سکوی پایدار حول محور X
$\alpha_{px}$	زاویه مطلق سکوی پایدار حول محور X
$\omega_{py}$	سرعت زاویه‌ای مطلق سکوی پایدار حول محور Y
$\alpha_{py}$	زاویه مطلق سکوی پایدار حول محور Y
$\alpha$	زاویه محور خروجی جاپروی X ، نسبت به سکوی پایدار
$\beta$	زاویه محور خروجی جاپروی Y ، نسبت به سکوی پایدار
$p$	سرعت زاویه‌ای بدنه حول محور X
$\Phi_{body}$	زاویه مطلق بدنه حول محور X
$q$	سرعت زاویه‌ای بدنه حول محور Y
$\Theta_{body}$	زاویه مطلق بدنه حول محور Y

## شبیه سازی پاسخ آزاد گیمبال دو محوره تحت اغتشاشات پایه :

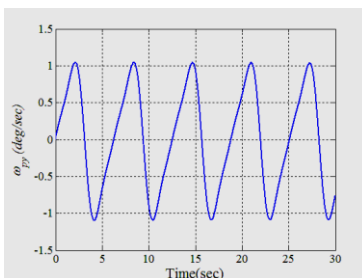
در این شبیه‌سازی به بررسی پاسخ آزاد گیمبال دو محوره تحت اغتشاشات پایه می‌پردازیم . در این شبیه سازی ، یک انحراف زاویه‌ای به صورت یک موج سینوسی پیوسته به پایه وارد می‌شود و همانطور که در نمودارهای سرعت زاویه‌ای مطلق سکوی پایدار مشاهده می‌شود ، نوسانات پایه از صفر شروع شده و سپس به یک مقدار ماکزیمم ۱ درجه بر ثانیه می‌رسد و در نهایت با یک دامنه ثابت سرعت زاویه‌ای سکو حول مقدار صفر نوسان می‌نماید . همانطور نمودار زاویه‌ای مطلق سکو نشان می‌دهد نوسانات سکوی پایدار در مقایسه با نوسانات بدنه به شدت کوچک هستند که حول محور X حدود ۱ درجه و حول محور Y در حدود ۲ درجه می‌باشد. نوسانات منظم سکوی پایدار حول دو محور X و Y ، در نمودار آخری نشان داده شده است . نتایج شبیه سازی ها نشان دهنده مطابقت این نتایج با رفتار واقعی پلتفرم مورد نظر در واقعیت و در شرایط کاری یکسان می باشد .



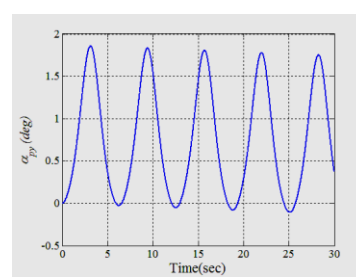
(۲)



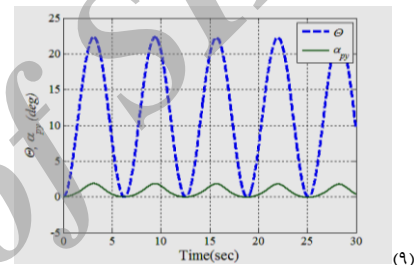
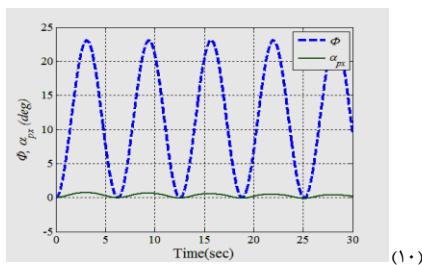
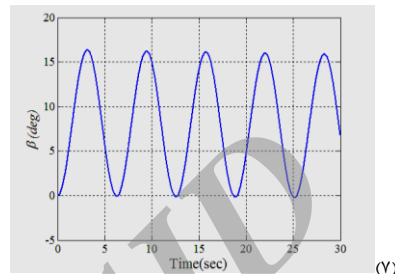
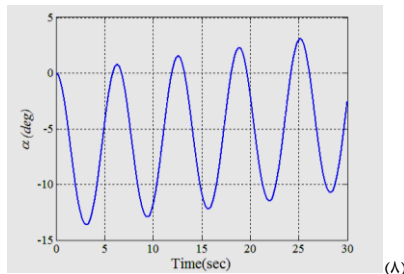
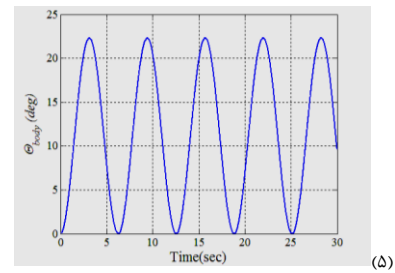
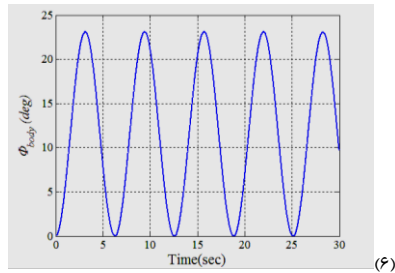
(۱)



(۴)



(۳)



شکل ۵- ۱: زاویه مطلق سکو پایدار حول محور X - ۲: سرعت زاویه‌ای مطلق سکوی پایدار حول محور X - ۳: زاویه مطلق سکوی پایدار حول محور Y - ۴: سرعت زاویه‌ای مطلق سکوی پایدار حول محور Y - ۵: زاویه مطلق بدنه حول محور X - ۶: زاویه مطلق بدنه حول محور X - ۷: زاویه محور خروجی جاپروی Y، نسبت به سکوی پایدار - ۸: زاویه محور خروجی جاپروی X، نسبت به سکوی پایدار - ۹: پایداری حول محور Y - ۱۰: پایداری حول محور X

#### پاسخ سیستم حلقه بسته پایدارکننده ژيروسکوپی دو محوره نیرویی:

در این حالت از کنترلر تناسبی مشتق‌گیر (P) استفاده نموده و ورودیهای کنترلی را به صورت روابط (۷۳) و (۷۴) تعریف می‌نماییم (Trends, 1997):

$$M_{Sx} = k_{\alpha} \cdot \alpha \quad (73)$$

$$M_{Sy} = k_{\beta} \cdot \beta \quad (74)$$

در این حالت موتورهای کنترلی که به بدنه و قاب خارجی متصلند، فقط وظیفه پایداری سکو را به عهده دارند و ترکیبی که در محور خروجی جاپروها قرار گرفته کار هدایت سکوی پایدار به سمت یک هدف را بر عهده دارد. آزمایش به چهار روش انجام می‌شود. در آزمایش اول و دوم به پایداری سکو تحت سرعت زاویه‌ای اولیه سکو و تحت ارتعاشات نوسانی حرکت پایه پرداخته می‌شود. در آزمایش سوم و چهارم به بررسی رفتار سکو تحت اثر گشتاورهای ثابت و تناوبی خارجی حول محورهای پایداری می‌پردازیم. گینهای کنترلی با توجه به شروط ارضای پایداری انتخاب گردیدند که در جدول ۲ دیده می‌شوند.

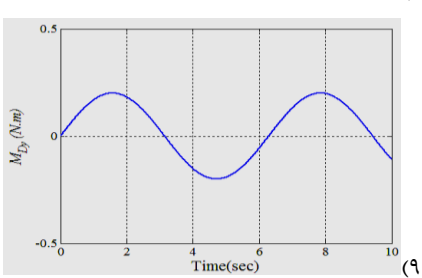
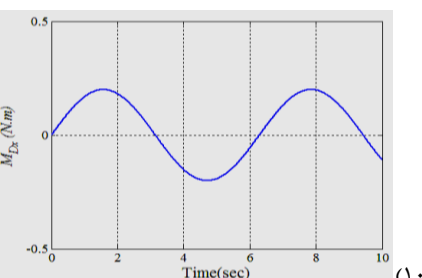
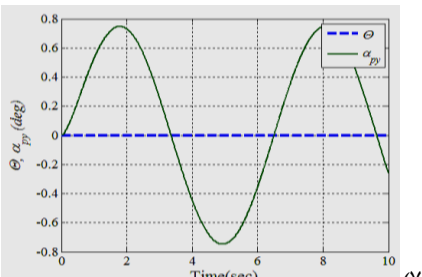
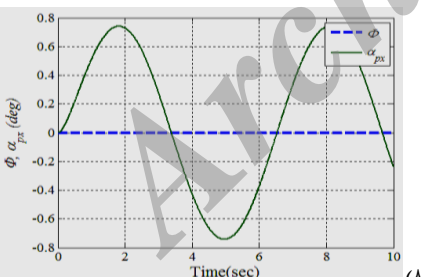
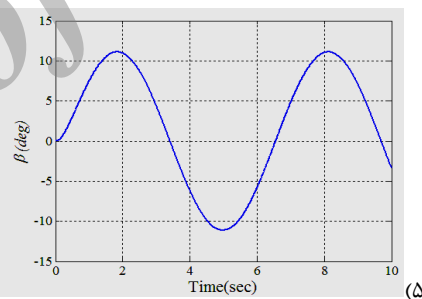
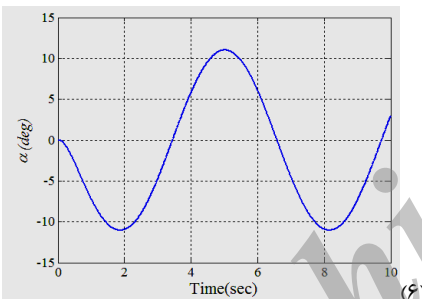
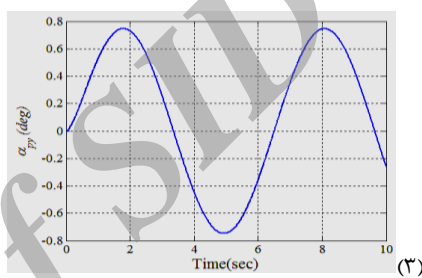
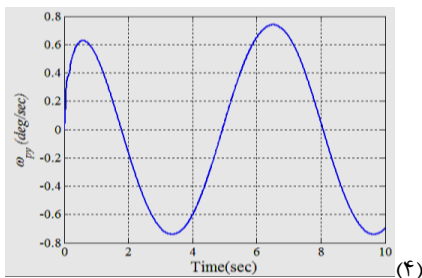
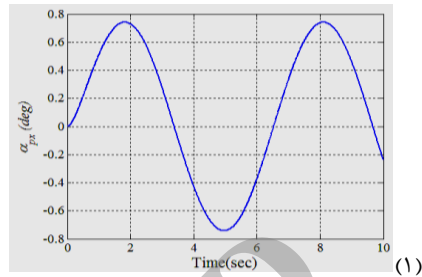
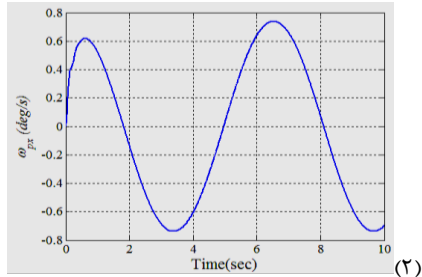
جدول ۲ - گینهای کنترلی تناسبی - مشتق‌گیر برای موتورهای پایدارساز

$k_{\alpha}$		$k_{\beta}$	
1		-1	

#### شبیه سازی پایدارکننده دو محوره نیرویی تحت اثر گشتاورهای خارجی تناوبی وارده بر قاب خارجی و سکوی پایدار:

در این شبیه سازی به تحلیل پاسخ حلقه بسته سیستم تحت اثر گشتاورهای خارجی تناوبی وارده بر قاب خارجی و سکوی پایدار می‌پردازیم. گشتاور خارجی وارده بر قاب خارجی حول محور X را با  $M_{Dx}$  نشان داده و گشتاور خارجی وارده بر سکوی پایدار حول محور Y را با  $M_{Dy}$  نشان داده می‌شود. هر کدام از این گشتاورهای اغتشاشی را به صورت یک موج سینوسی با دامنه ۰/۲ نیوتن متر در نظر می‌گیریم. همانطور که در نمودارها دیده می‌شود زوایای محورهای

خروجی جاپروها با دامنه ۱۱/۵ درجه نوسان می کند تا سیگنال لازمه برای پایدارسازی را به موتورها تولید نماید . باز هم نوسانی بودن زاویه محورهای خروجی جاپروها ناشی از این است که فیدبک کنترلی فقط از زاویه محورهای خروجی جاپروها گرفته شده و کنترلی بر روی سرعت زاویه های آنها نیست . در این حالت سکو نیز از حالت اولیه خارج شده و دارای نوسانات سینوسی با دامنه ثابت ۰/۷۷ درجه می باشد . نتایج شبیه سازی ها نشان دهنده مطابقت این نتایج با رفتار واقعی پلتفرم مورد نظر در واقعیت و در شرایط کاری یکسان می باشد .



شکل ۶- ۱ : زاویه مطلق سکو پایدار حول محور X - ۲ : سرعت زاویه ای مطلق سکو پایدار حول محور X - ۳ : زاویه مطلق سکو پایدار حول محور Y - ۴ : سرعت زاویه ای مطلق سکو پایدار حول محور Y - ۵ : زاویه محور خروجی جاپرو ی ، نسبت به سکو پایدار - ۶ : زاویه محور خروجی

جایروی  $x$  ، نسبت به سکوی پایدار -  $y$  : پایداری حول محور  $x - 9$  : گشتاور خارجی وارده بر قاب خارجی حول محور  $x - 10$  : گشتاور خارجی وارده بر سکوی پایدار حول محور  $y$

## نتایج و بحث :

در این مقاله ابتدا یک مقدمه کلی درباره ساختار و نحوه عملکرد پایدار کننده های یک محوره نیرویی ارائه شد . سپس به رفتار ، نحوه عملکرد و رفتار پایدار کننده های دو محوره نیرویی پرداخته شد و به برخی از کاربردهای این نوع از پایدارکننده ها در صنایع مختلف اشاره شد . در این مقاله ابتدا معادلات حاکم بر پایدار کننده های ژيروسکوپی دو محوره نیرویی تحلیل و بررسی شدند و سپس در نرم افزار متلب / سیمولینک ، ساختار و نحوه عملکرد این نوع از پایدار کننده ها شبیه سازی شد و نتایج این شبیه سازی در دو حالت حلقه بسته و حلقه باز مورد ارزیابی قرار گرفت . نتایج شبیه سازی های انجام شده حاکی از آن است که رفتار پایدار کننده مورد نظر به ازاء شرایط تعریف شده در شبیه سازی ها ، با آنچه که از این نوع پایدارکننده ها در کاربردهای واقعی و در شرایط یکسان با شرایط تعریف شده برای شبیه سازی های انجام شده ، انتظار می رود یکسان می باشد .

از جمله نکات مهمی که در مورد پایدار کننده های ژيروسکوپی دو محوره نیرویی بسیار حائز اهمیت است و بایستی حتماً مد نظر قرار گیرد ، بکارگیری این میزها در شرایط محیطی متفاوت و تأثیر مستقیم شرایط محیطی بر رفتار قطعات تشکیل دهنده یک پلتفرم نمونه و پارامترهای نشانه روی اینگونه میزها می باشد . لذا بررسی تأثیرات شرایط محیطی مانند دما و رطوبت بر رفتار اجزاء تشکیل دهنده یک پایدار کننده ژيروسکوپی دو محوره و عملکرد کلی این میزها می تواند کمک شایانی به بررسی تأثیر شرایط محیطی مختلف بر پارامترهای نشانه روی اینگونه میزها نماید . لذا این موضوع می تواند زمینه تحقیقاتی مناسبی در جهت تکمیل پژوهش های صورت گرفته در زمینه پایدار کننده های ژيروسکوپی دو محوره نیرویی برای محققین باشد .

## منابع مورد استفاده :

- تاکی ، ع . (۱۳۸۸) ، مدل سازی ، تحلیل سیستمی و شبیه سازی سرومکانیزم جستجوگر ژيروسکوپ انتگرال سرعت زاویه ای ، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم های هدایت و کنترل ( کنترل پرواز ) ، دانشگاه صنعتی مالک اشتر ، مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک
- MASTEN , M.(2008) , Inertially Stabilized Platforms for Optical Imaging Systems Tracking dynamic targets with mobile sensors , IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE , Volume 28 Number 1. Page 47-65.
- BRANES , F. (1971) , Stable Member Equation of motin for a Three-Axis Gyro stabilized Platform , IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPCE AND ELECTRONICS SYSTEM, VOL.AES-7, NO. 5
- Aruga, T. and Wada, N. and Ming, A. and Kurakane, N. and Satoh, M. and Takeuchi, H. and Tazoe , S. (2009). Development of a Small Tracking Camera System for Mobile Platforms , International Conference on Information and Automation. Zhuhai/Macau. 939-944
- Ji, W. and Li, Q. and Xu, B. and Tu, J.j. and Zhao, D.a. (2009), Cascade Servo Control for LOS Stabilization of Opto-electronic Tracking Platform- Design and Self-tuning , International Conference on Information and Automation. Zhuhai/Macau. 1034-1039
- Kennedy, P.J. and Kennedy, R.L. (2003), Direct Versus Indirect Line of Sight (LOS) Stabilization , Journal of CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY. VOL. 11, NO. 1, 3-15.
- Khodadadi, H. and Jahed Motlagh, M. and Gorji, M. (2011) , Robust control and modeling a 2-DOF Inertial Stabilized Platform , International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering. Pahang. 223-228
- Shan-zhong , L. and Long-he , S. (2010) , Research on Stabilizing and Tracking Control of Electro-Optical Tracking and Sighting Platform Based on Fuzzy Control , International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation.175-178
- Ashwin A. and Seshia , R. and Tim , H. and Stephen M. , (2002) , An Integrated Micro Electromechanical Resonant Output Gyroscope , In Proceedings, 15th IEEE Micro Electro Mechanical systems Conference, Las Vegas, NV, Jan. 20-24
- Ashwin , A. and Seshia , B. , (1996) , Integrated Micromechanical Resonant Sensor for Inertial Measurement Systems , Indian Institute of Technology, Bombay
- Ljung , P.B. , (1997) , Micro machined Angular Rate Sensor. , PhD thesis, University of California, Berkeley .
- Trends , U.G. , (1997) , Modern Gyroscope Technology , Martinenko Education Journal of Sorosovski , No 11. , Russian