

# طراحی و ساخت عملگر ژایروی کنترل ممان سرعت متغیر برای شبیه‌ساز تعیین و کنترل وضعیت ماهواره واکنش سریع

علیرضا آقالاری<sup>۱\*</sup>، احمد کلهر<sup>۲</sup> و فرهاد شمیم<sup>۳</sup>

۱ و ۳- مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲- دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

\* البرز، کدپستی: ۳۱۵۹۹۱۶۱۱۱

Ali\_Aghalar@mut.ac.ir

در این مقاله، روند طراحی، ساخت و آزمایش ژایروی کنترل ممان تک‌جیمبال سرعت متغیر به‌منظور کنترل وضعیت شبیه‌ساز ماهواره واکنش سریع ارائه می‌شود. طراحی عملگر براساس محدودیت‌های شبیه‌ساز (توان، ابعاد و وزن)، سادگی و گشتاور تولیدی انجام گرفته است. برای کنترل سرعت چرخ طیار و نرخ چرخش جیمبال از دو موتور DC استفاده شده و درایور و کنترلر آنها به گونه‌ای طراحی شده تا حداکثر دقت، حداقل خطا و سریع‌ترین زمان پاسخ را فراهم آورد. طراحی سازه بر اساس استحکام، سختی، حجم و وزن انجام و تحلیل‌های لازم بر روی آن انجام شده است. آزمایش‌های عملکردی سیستم شامل اندازه‌گیری گشتاور تولیدی با استفاده از حسگر و شبیه‌ساز، دقت کنترل نرخ چرخش جیمبال و موقعیت آن، دقت کنترل سرعت چرخ طیار و اندازه‌گیری توان مصرفی است.

**واژه‌های کلیدی:** شبیه‌ساز ماهواره، کنترل وضعیت، ژایروی کنترل ممان سرعت متغیر، تکنیکی

## مقدمه

ظرفیت پایین گشتاور تولیدی در عملگرهای معمولی مانع از کاربرد آنها در انجام مانورهای سریع در ماهواره می‌شود. برای این منظور از عملگر ژایروی کنترل ممان استفاده می‌شود [۲]. این عملگرها به سه گروه تک‌جیمبال، دو‌جیمبال و سرعت متغیر تقسیم‌بندی می‌شوند. به دلیل وجود پدیده تکنیکی<sup>۴</sup>، استفاده از ژایروهای کنترل ممان تک‌جیمبال در ماهواره‌ها با پیچیدگی خاصی همراه است. یکی از روش‌ها برای رفع این مشکل، استفاده از ژایروهای کنترل ممان سرعت متغیر است. در این نوع عملگرها سرعت چرخ طیار به‌عنوان یکی از پارامترهای کنترلی متغیر است [۳]. استفاده از این عملگرها در ماهواره‌های کوچک باعث افزایش زمان در اختیار ماهواره (که بسیار محدود است) برای فرستادن اطلاعات به زمین می‌شود که بسیار مهم است [۴، ۵ و ۶].

ماهواره‌ها دامنه وسیعی از مأموریت‌های فضایی را پوشش می‌دهند که هرکدام احتیاج به نیازمندی‌های سیستمی متفاوتی دارند. ماهواره‌های امروزی بیش از قبل احتیاج به قابلیت مانوردهی چرخشی واکنش سریع دارند. ماهواره‌هایی که برای ردیابی موشک‌ها، تصویربرداری و ردیابی اهداف متحرک زمینی طراحی می‌شوند به چابکی زیادی (۱۰-۱) درجه بر ثانیه) به‌منظور انجام مأموریت خود نیاز دارند [۱]. بنابراین، رسیدن به چرخش‌های سریع و نرخ‌های بالای مانوردهی احتیاج به استفاده از عملگرهای متفاوت یا ترکیب چندین عملگر دارد.

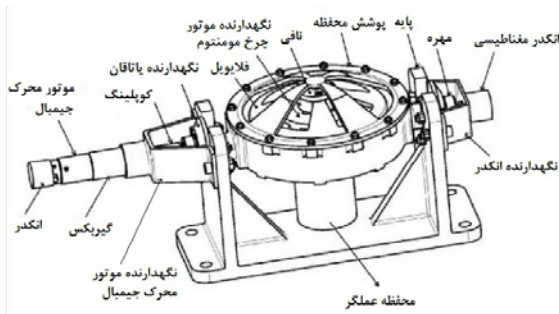
۱. دانشجوی دکتری (نویسنده مخاطب)

۲. استادیار

۳. پژوهشگر

4. Singularity

۲. موتور چرخ مومنتوم به سهولت در محل خود نصب شود؛
۳. محور دو موتور الکتریکی مذکور برهم عمود باشند و همچنین مرکز جرم مجموعه چرخ مومنتوم بر روی محور موتور محرک جیمبال منطبق شود تا حداقل نیروی نامتقارن به آن وارد شود؛
۴. مجموعه چرخ مومنتوم قابلیت چرخش ۳۶۰ درجه به دو سمت را داشته باشد [۸ و ۹].



شکل ۱- نمای کلی از سازه عملگر

## انتخاب موتورهای الکتریکی

عملگر دارای دو موتور الکتریکی برای چرخش چرخ طیار و تحریک جیمبال است که در ادامه به تفصیل توضیح داده شده‌اند.

### موتور چرخ مومنتوم

این موتور وظیفه چرخش چرخ طیار را بر عهده دارد. موتور الکتریکی مناسب برای چرخ مومنتوم باید بتواند خصوصیات مانند امکان ایجاد سرعت چرخش مناسب، داشتن حسگر مناسب برای کنترل سرعت مطلوب، داشتن توان و گشتاور لازم برای چرخش در آوردن چرخ طیار متصل به آن (با لحاظ شرایط یک محرک ژایروی کنترل ممان تک جیمبال سرعت متغیر<sup>۵</sup>) و تأمین برخی قیود دیگر همچون ابعاد فیزیکی کوچک، راندمان بالا و قابلیت اطمینان را پاسخگو باشد. به منظور کنترل چرخش چرخ طیار براساس فرامین کنترلی ارسالی از یک انکدر نسبی در انتهای آن استفاده شده است [۹ و ۱۰].

### موتور محرک جیمبال

موتور محرک جیمبال وظیفه چرخش مجموعه چرخ مومنتوم در یک بازه زاویه‌ای محدود را به عهده دارد. برای این منظور لازم است موتور الکتریکی مناسبی انتخاب شود تا بتواند خصوصیات چون گشتاور لازم، دقت چرخش، سرعت چرخش و دیگر قیود VSCMG مانند ابعاد فیزیکی کوچک، وزن کم و قابلیت اطمینان در عملکرد را

در این مقاله، روند طراحی، ساخت و آزمایش ژایروی کنترل ممان تک جیمبال سرعت متغیر به منظور کنترل وضعیت شبیه‌ساز ماهواره واکنش سریع ذکر شده و در انتها آزمایش‌های عملکردی نمونه ساخته شده انجام و نتایج ارائه شده است.

## سایزینگ عملگر

برای سایزینگ عملگر ژایروی کنترل ممان لازم است تا درک صحیحی از نحوه کار آن وجود داشته باشد. براساس مانور چرخشی، نحوه چیدمان و تعداد CMGها می‌توان مقدار گشتاور مورد نیاز و در نتیجه مقادیر مومنتوم زاویه‌ای و نرخ چرخش جیمبال را تعیین کرد. فرایند تعیین این مقادیر در حقیقت تعاملی بین کارایی (گشتاور)، اندازه و وزن است [۷]. این عملگر برای یک شبیه‌ساز زیرسیستم کنترل وضعیت ماهواره واکنش سریع که در مجتمع دانشگاهی هوافضا طراحی و ساخته شده است، طراحی شده و در حقیقت توسعه یافته عملگرهای سرعت ثابت استفاده شده در شبیه‌ساز مذکور است.

## چرخ طیار عملگر

چرخ طیار یکی از مهم‌ترین بخش‌های ژایروی کنترل ممان تک جیمبال سرعت متغیر است که وظیفه ذخیره مومنتوم زاویه‌ای را بر عهده دارد. اندازه و شکل چرخ طیار براساس توانایی ذخیره مومنتوم زاویه‌ای تعیین می‌شود. ممان اینرسی جرمی چرخ طیار بستگی به ساختار هندسی آن دارد. سرعت‌های چرخشی بالا، محدودیت‌هایی را در طراحی و ساخت چرخ طیار اعمال می‌کنند که نقش بسیار مهمی در تعیین ابعاد چرخ طیار دارند. علاوه بر تنش‌های چرخشی، اتصال فشاری چرخ طیار به محور (شفت) موتور نیز بارگذاری دیگری بر چرخ طیار اعمال می‌کند. بالانس استاتیکی و دینامیکی چرخ طیار نیز یکی از موارد مهمی است که به منظور کاهش مقدار نیروها و گشتاورهای اغتشاشی پس از نصب چرخ طیار بر روی موتور الکتریکی باید انجام شود [۸ و ۹].

## سازه عملگر

سازه، نگهدارنده و پشتیبان اجزای عملگر است. جنس آن A17075 است که پس از ساخت قطعات عملیات سخت کاری بر روی آنها انجام می‌شود. سازه عملگر از دو قسمت اصلی محفظه چرخ مومنتوم و پایه تشکیل شده است که هر کدام دارای المان‌های سازه‌ای متعددی هستند. در شکل (۱) نمای کلی از سازه کل عملگر ارائه شده است. سازه باید به گونه‌ای طراحی شود تا الزامات ذیل را برآورده کند:

۱. موتور محرک جیمبال بر روی سازه‌ای نصب شود تا علاوه بر وزن موتور، نیروهای ایجاد شده توسط این موتور را تحمل کند؛

5. Variable Speed Control Moment Gyro (VSCMG)

## الگوریتم کاری در برد درایور جیمبال

الگوریتم کاری برد درایور جیمبال در عملگر طراحی شده در ادامه بیان شده است.

### الگوریتم کاری پردازشگر ارتباط با نرم‌افزار مدیریتی

وظیفه پردازشگر CAN دریافت اطلاعات فرمان از کامپیوتر بیرونی (نرم‌افزار مدیریتی) و سپس ارسال آنها به پردازنده کنترلر موتور جیمبال است. در بخش دوم کار، پردازشگر CAN در برد جیمبال اطلاعات مربوط به مانیتورینگ را از پردازشگر کنترلر موتور جیمبال دریافت می‌کند و سپس آنها را به کامپیوتر بیرونی ارسال می‌کند.

### الگوریتم کاری برای پردازشگر موتور جیمبال

وظیفه پردازشگر جیمبال، دریافت اطلاعات فرمان از پردازشگر CAN است و پس از پردازش و کنترل موتور جیمبال وظیفه آن سنجش موقعیت موتور و ارسال آن به پردازشگر CAN است.

### الگوریتم کاری در برد درایور چرخ مومنتم

الگوریتم کاری برد درایور چرخ مومنتم در عملگر طراحی شده در ادامه بیان شده است.

### الگوریتم کاری پردازشگر ارتباط با نرم‌افزار مدیریتی

وظیفه پردازشگر CAN در برد چرخ مومنتم دریافت اطلاعات فرمان از کامپیوتر بیرونی (نرم‌افزار مدیریتی) و سپس ارسال آنها به پردازنده کنترلر موتور چرخ‌طیار است. در بخش دوم کار، پردازشگر CAN در برد چرخ مومنتم اطلاعات مربوط به مانیتورینگ را از پردازشگر کنترلر موتور دریافت می‌کند و سپس آنها را به کامپیوتر بیرونی ارسال می‌کند.

### الگوریتم کاری برای پردازشگر موتور چرخ مومنتم

وظیفه پردازشگر چرخ مومنتم دریافت اطلاعات فرمان از پردازشگر CAN است و پس از پردازش و کنترل موتور چرخ مومنتم وظیفه آن سنجش سرعت موتور و ارسال آن به پردازشگر CAN است.

## کنترل سرعت چرخ‌طیار

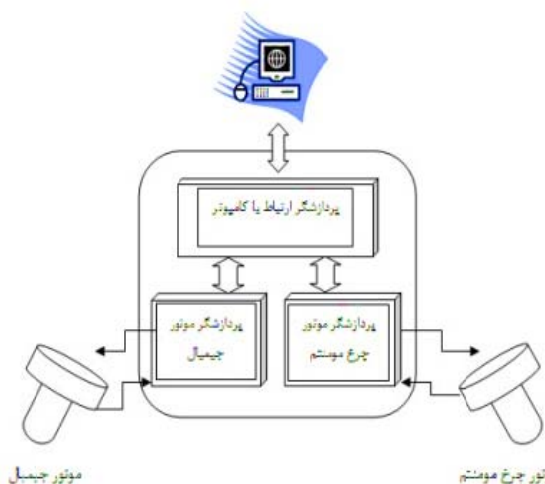
برای کنترل سرعت موتور چرخ‌طیار از یک کنترلر PID گسسته استفاده شده است. سیگنال کنترلر بین صفر ولت تا ۲۲ ولت با دقت ۰/۰۸۵ قابل تهیه است و برای تولید آن از فن PWM به کمک یک شمارنده ۸ بیتی و با فرکانس سیگنال PWM ۱۹ کیلو هرتز استفاده شده است. نرخ نمونه‌برداری، محاسبه و اعمال سیگنال کنترلر به‌طور متوسط در حدود ۱۰۰ بار در ثانیه است و بر این مبنا  $T = 0.01$

پاسخگو باشد. به دلیل پایین بودن حداکثر نرخ چرخش موتور جیمبال و بالابودن نسبی گشتاور، لازم است که از یک گیربکس با نسبت کاهنده بالا استفاده شود. به‌منظور کنترل نرخ چرخش جیمبال براساس فرامین کنترلی ارسالی از یک انکدر مطلق AEAT-6012 ساخت شرکت اوآگو<sup>[۱۱]</sup> در سوی دیگر جیمبال (جهت احتساب لقی‌های گیربکس موتور، سیستم مکانیکی و غیره در فرایند کنترل نرخ چرخش جیمبال) استفاده شده است [۸ و ۹].

## درایور عملگر

درایور محرک عملگر از سه مدار پردازشی ارتباط با کامپیوتر، کنترلر موتور جیمبال و کنترلر موتور چرخ مومنتم تشکیل شده است [۹]. به‌طور کلی وظایف این درایور عبارت است از:

۱. دریافت اطلاعات فرمان از کامپیوتر توسط پردازشگر ارتباط و انتقال آن به پردازشگرهای کنترل
  ۲. کنترل موتور جیمبال براساس اطلاعات فرمان توسط پردازشگر کنترلر موتور جیمبال
  ۳. کنترل موتور چرخ مومنتم براساس اطلاعات فرمان توسط پردازشگر کنترلر چرخ مومنتم
  ۴. جمع‌آوری اطلاعات مانیتورینگ شامل سرعت موتور چرخ مومنتم و موقعیت موتور جیمبال از پردازنده‌های خود و انتقال آن به کامپیوتر توسط پردازشگر ارتباط.
- بلوک دیاگرام درایور و نحوه ارتباط در آن در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- بلوک دیاگرام درایور و نوع ارتباط آن با کامپیوتر و موتورهای جیمبال و چرخ مومنتم

## طراحی و پیاده‌سازی برنامه‌های نرم‌افزارهای مدیریت و کنترل عملگر VSCMG

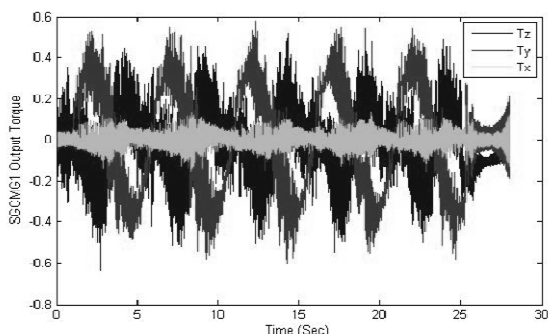
برای مدیریت و کنترل عملگر، از یک پنل نرم‌افزار LABVIEW به‌منظور گرفتن فرامین تنظیم، شروع و توقف پروفایل گشتاوری عملگر از طریق کاربر و همین‌طور به‌منظور امکان مانیتورینگ سیگنال‌های وضعیت جیمبال، سرعت چرخ مونتیم و نرخ چرخش جیمبال استفاده شده است. اعمال پروفایل‌های تولید گشتاور و ذخیره داده‌ها برای پردازش به کمک سی‌شارپ صورت گرفته است.

## ایجاد و پیاده‌سازی برنامه واسط برای ارتباط با PCAN

به‌منظور ایجاد ارتباط عملگر با مبدل PCAN یک برنامه واسط ایجاد و پیاده‌سازی شده است. سازنده این مبدل برای ارتباط با دستگاه یک کتابخانه به‌صورت DLL مهیا کرده است.

## آزمایش‌های عملکردی

گشتاور تولیدی عملگر با استفاده از دو روش حسگر نیرو و شبیه‌ساز ماهواره اندازه‌گیری شده که نتایج در شکل (۵) و جدول (۱) ارائه شده است. همچنین اغتشاشات عملگر با استفاده از دو روش حسگر نیرو اندازه‌گیری شده است.



شکل ۵- گشتاور تولیدی عملگر در سه راستای X, Y و Z

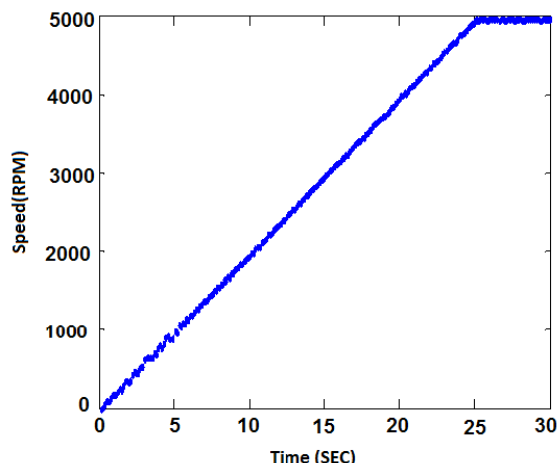
جدول ۱- گشتاور تولیدی عملگر با استفاده از شبیه‌ساز

Error	$T_{max\ theo} (N.m)$	$T_{tot\ Exp} (N.m)$
۰/۰۵۴۳	۰/۵۴۳۷	۰/۴۸۹۴

## کنترل سرعت چرخ طیار

در این آزمایش نحوه کنترل سرعت چرخ طیار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتیجه آزمایش در شکل (۶) ارائه شده است. سرعت مرجع در این آزمایش ۵۰۰۰ دور بر دقیقه است.

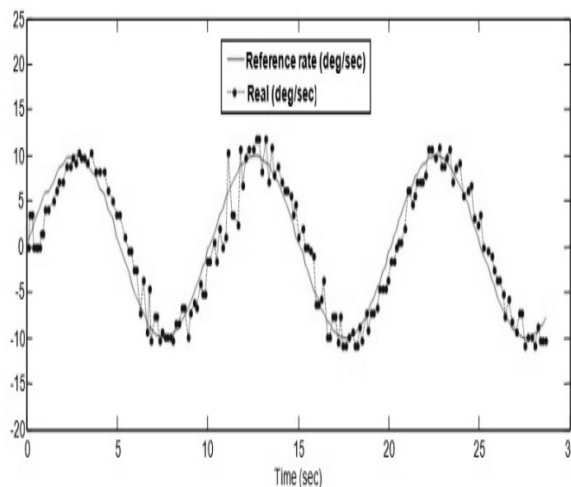
ثانیه است. در شکل (۳) نتیجه اعمال کنترلر برای افزایش سرعت چرخ طیار از صفر تا ۵۰۰۰ دور در دقیقه با شتاب ثابت ۲۰۰ دور در ثانیه ارائه شده است.



شکل ۳- نمودار کنترل سرعت (دور بر دقیقه) چرخ طیار در آزمون افزایش سرعت

## کنترل نرخ چرخش جیمبال

به‌منظور کنترل سرعت نرخ چرخش جیمبال از یک کنترلر PID گسسته استفاده شده است. سیگنال کنترل بین صفر ولت تا ۱۲ ولت با دقت ۰/۰۴۷ قابل تهیه است و برای تولید آن از فن PWM به کمک یک شمارنده ۸ بیتی و با فرکانس سیگنال PWM ۱۹ کیلوهرتز استفاده شده است. نرخ نمونه‌برداری، محاسبه و اعمال سیگنال کنترل به‌طور متوسط در حدود ۱۰۰ بار در ثانیه است. نتایج پیاده‌سازی در حالت سینوسی در شکل (۴) مشاهده می‌شود.

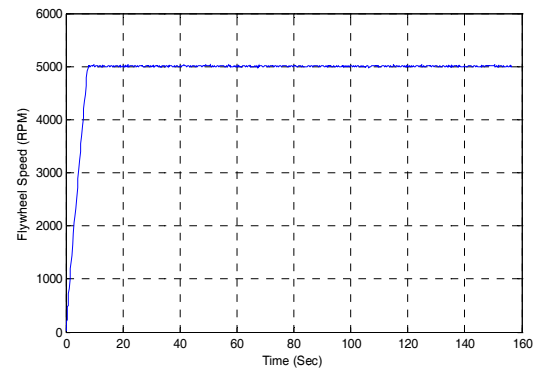


شکل ۴- کنترل نرخ چرخش جیمبال زمانی که نرخ مرجع فرم سینوسی دارد.

راحت میان کاربر و سخت‌افزار یک نرم‌افزار واسط گرافیکی طراحی شده که از طریق آن می‌توان تمام ورودی‌ها اعم از شکل و مقدار پروفیل گشتاور، سرعت چرخشی چرخ طیار، نرخ چرخش جیمبال و ... را تعریف کرده و خروجی‌ها را مشاهده و ذخیره کرد. آزمایش‌های عملکردی این عملگر بر روی یک حسگر ۶ محوره نیرو و شبیه‌ساز ماهواره انجام شده است که نتایج حاصل حاکی از دقت بالای آن در تولید و تعقیب پروفیل‌های گشتاور ورودی و در نتیجه موفقیت‌آمیز بودن مأموریت شبیه‌ساز است. آزمایش‌های عملکردی کنترل سرعت چرخ طیار و کنترل نرخ چرخش جیمبال نیز بر روی عملگر انجام شده است که نتایج حاکی از موفقیت‌آمیز بودن این آزمایش‌ها دارد.

## مراجع

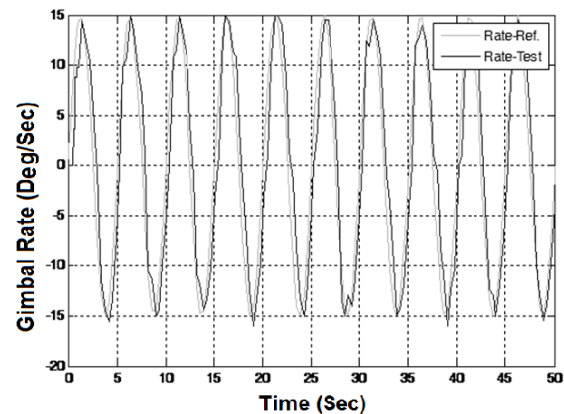
- [1] Berner, R., Control Moment Gyro Actuator for Small Satellite Application, (M.Sc. Thesis), University of Stellen Bosch, 2005.
- [2] Skelton, C. E., Mixed Control Moment Gyro and Momentum Wheel Attitude Control Strategies, (M. Sc. Thesis), Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [3] Yoon, H., Spacecraft Attitude and Power Control Using Variable Speed Control Moment Gyros, (PhD Thesis), Georgia Institute of Technology, 2004.
- [4] Lappas, V. J., Steyn, W. H. and Underwood, C. I., "Experimental Testing of a CMG Cluster for Agil Microsatellites," *IEEE 11<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation*, Rhodes, Greece, 2003.
- [5] Lappas, V. J., Steyn, W. H. and Underwood, C. I., "Attitude Control of Small Satellites using Control Moment Gyros," *52<sup>nd</sup> IAF Congress*, Toulouse, France, 2001.
- [6] Lappas, V. J. and et al., "Design, Analysis and In-orbit Performance of the BILSAT-1 Microsatellite Twin Control Moment Gyroscope Experimental Cluster", *55<sup>th</sup> International Astronautical Congress*, Vancouver, Canada, 2004.
- [7] Aghalari, A. and et al., "Designing, Testing and Evaluation of Single Gimbal Control Moment Gyro for Microsatellite," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 2, No. 3, 1388, pp.13-23 (In Persian).
- [8] Aghalari, A., *Study on Satellite Simulators, Designing and Fabrication of A Single Gimbal Control Moment Gyro for Simulator*, Technical Report, Aerospace University Complex, 1389 (In Persian).
- [9] Aghalari, A. and Kalhor, A., *Designing and Fabrication of a Variable Speed Control Moment Gyro*, Technical Report, Aerospace University Complex, 1390 (In Persian).
- [10] Kalhor, A. and Cheheltani, S. H., *Designing and Integration of Electronics and Computer Parts of Satellite Simulator With Single Gimbal Control Moment Gyros*, Technical Report, Aerospace University Complex, 1390 (In Persian).
- [11] Available,[on line]: [www.avagotech.com](http://www.avagotech.com), Access Date: 2012.



شکل ۶- آزمایش عملکردی کنترل سرعت چرخ طیار

## کنترل نرخ چرخش جیمبال

در این آزمایش نحوه کنترل نرخ چرخش جیمبال ارزیابی می‌شود. یک پروفایل سینوسی به عنوان مرجع به سیستم فرمان داده شده و انتظار می‌رود سیستم با دقت خوبی آن را دنبال کند (شکل ۷).



شکل ۷- آزمایش عملکردی نرخ چرخش جیمبال

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، روند طراحی عملگر ژایروی کنترل ممان تک‌جیمبال سرعت متغیر به‌عنوان مولد گشتاور برای استفاده در سیستم کنترل وضعیت یک شبیه‌ساز ماهواره واکنش سریع (ساخته شده در مجتمع دانشگاهی هوافضا توسط نگارنده و همکاران) و نیز آزمایش‌های انجام شده بر روی آن ارائه شده است. این سیستم شامل دو بخش مکانیکی و الکتریکی - کنترلی است. سازه و مکانیزم این سیستم به گونه‌ای طراحی شده است که سیستم علاوه بر سادگی، دارای کمترین حجم، وزن، اغتشاش، انرژی مصرفی و حداکثر کارایی بوده و قابلیت نصب بر روی شبیه‌ساز ماهواره را داشته باشد. جهت افزایش دقت و سرعت انجام محاسبات سعی شده تا الگوریتم‌های کنترلی ساده بوده و کارایی بالایی داشته باشند. برای ایجاد ارتباط