

مدل سازی و شناسایی سیستم چرخ عکس العملی با استفاده از داده های تجربی

وحید بهلوری^۱, سمانه کویری^۱, مرضیه تقی نژاد^۲, محمد ندافی پور میبدی^۲, سهیل سید زمانی^{۳*}

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکاترونیک، پژوهشگاه فضای ایران، تهران

۲- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، پژوهشگاه فضای ایران، تهران

۳- مری، مهندسی هوافضا، پژوهشگاه فضای ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۹۹۷۹۹۴۳۱۳، sseyedzamani@isrc.ac.ir

چکیده

در این مقاله مدل دینامیکی خطی یک چرخ عکس العملی نمونه با استفاده از داده های تجربی شناسایی شده است. بدین منظور اطلاعات ورودی- خروجی چرخ عکس العملی در بستر سخت افزار در حلقه که شامل چرخ عکس العملی، درگاه ارتباطی باس کن، برد پردازشی و نرم افزار LabVIEW بوده، به صورت برخط با نرخ یک مگا بت بر ثانیه ارسال و دریافت شده است. مدل سازی با فرض جعبه سیاه بودن مجموعه چرخ عکس العملی و مدار کنترل داخل آن، با در نظر گرفتن ملاحظات آزمون تجربی انجام شده است. در این راستا ابتدا رفتار چرخ عکس العملی با اعمال ورودی های سرعت زاویه ای و شتاب زاویه ای بررسی شده، سپس سیگنال های ورودی سیگنال دودوی تصادفی ساختگی و چیز برای شناسایی مدل چرخ توسط بستر سخت افزاری تولید و به چرخ اعمال شده است. داده های اعمالی فرمان و بازخورد ذخیره و بعد از بازیابی جهت شناسایی مدل چرخ استفاده شده است. با توجه به رفتار موتور الکتریکی، مدل های دینامیکی خطی خود رگرسیو و خود رگرسیو میانگین تحرک با ورودی خارجی برای شناسایی مدل چرخ در نظر گرفته شده و شناسایی برای چند مرتبه مختلف از مدل برای پاسخ سرعت زاویه ای انجام شده است. همچنین مرتبه تأخیر مناسب برای سیستم حلقه بسته چرخ و کنترل کننده آن بررسی و استخراج شده است. در نهایت خروجی مدل پیشنهادی به ازای یک سیگنال آزمون جدید با خروجی واقعی چرخ مقایسه و مدل پیشنهاد شده به وسیله داده های ارزیابی صحت سنجی شده است. نتایج مدل ارائه شده عملکرد مناسب مدل پیشنهادی برای بیان رفتار چرخ عکس العملی را نشان می دهد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دراфт: ۲۶ شهریور ۱۳۹۶

پذیرش: ۰۷ آبان ۱۳۹۶

ارائه در سایت: ۰۶ آذر ۱۳۹۶

کلید واژگان:

چرخ عکس العملی

شناسایی سیستم

ماهواره

مدل دینامیکی

کنترل و ضمیمه

Modeling and System Identification of a reaction wheel with experimental data

Vahid Bohlouri, Samane Kaviri, Marziye Taghinezhad, Mohammad Naddafi Pour Meibody, Soheil Seyedzamani*

Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran
* P.O.B. 1997994313 Tehran, Iran, s.seyedzamani@isrc.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 17 September 2017

Accepted 29 October 2017

Available Online 27 November 2017

Keywords:

Reaction wheel

System identification

Dynamic model

Satellite

Attitude control

ABSTRACT

In this paper, a linear dynamic model for a reaction wheel is identified using experimental analysis. To do this, online input-output data of reaction wheel is sent and received by CAN protocol working with the frequency of one mega bit per second. The experimental hardware consists of reaction wheel, processing board, CAN protocol, and LabVIEW monitoring. Modeling assumes the reaction wheel and its inner control circuit as a black box and takes into account the practical considerations. Initially, behavior of the reaction wheel is examined using test signals for velocity and acceleration as inputs. After that, the test signals are replaced by Chirp and PRBS signals and the output results are saved. According the results obtained in the tests, ARMAX and ARX linear dynamic models are assigned to the motor and different orders of these models are compared with each other to reach the appropriate order of the models. Furthermore, a delay is also incorporated in the model and its proper order is determined by the simulations. Finally, to validate the proposed model, the outputs of the model and plant are compared followed by exerting a new test signal. The results indicate a good agreement between the proposed model and the practical behavior.

مغناطیسی مزیت های دارد که سبب کاربرد گسترده این المان ها در کنترل وضعیت شده است. تراسترهای معمولاً گشتاورهای زیاد، سریع و گسسته تولید نموده و در کنترل دقیق وضعیت از آنها استفاده نمی شود [۲]. گشتاوردهندهای مغناطیسی واسته به میدان مغناطیسی زمین و ارتفاع ماهواره بوده و همچنین مقدار گشتاور خیلی کمی تولید می کنند. در این میان چرخ عکس العملی توانایی تولید مومنتوم پیوسته داشته و سطح مناسبی

عملگرهای مختلفی از جمله چرخ های عکس العملی، تراسترهای گشتاوردهندهای مغناطیسی برای کنترل وضعیت و پایدارسازی ماهواره ها مورد استفاده قرار می گیرند. در این بین چرخ های عکس العملی با تولید مومنتوم زاویه ای سبب پایدارسازی و مانور وضعیت دقیق تر ماهواره ها می شوند [۱] چرخ های عکس العملی نسبت به عملگرهایی مثل تراستر و گشتاوردهنده

۱- مقدمه

Please cite this article using:

V. Bohlouri, S. Kaviri, M. Taghinezhad, M. Naddafi Pour Meibody, S. Seyedzamani, Modeling and System Identification of a reaction wheel with experimental data, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 437-446, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

عکس‌العملی ساخته شده نیاز به استخراج مدل ریاضی آن بوده است؛ بنابراین در این مقاله استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های عملی روی چرخ عکس‌العملی برای تعیین یک مدل ریاضی کارآمد مورد توجه است.

در این مقاله ابتدا در مورد چرخ عکس‌العملی موجود و مشخصه‌های عملکردی آن بحث شده است، سپس بستر ساخت‌افزار در حلقه معرفی شده و اجزای آن از جمله چرخ عکس‌العملی مورد آزمون تشریح شده است. در ادامه شناسایی سیستم، شرایط و نحوه انجام آزمایش و ملاحظات عملی، طراحی سیگنال ورودی، انتخاب داده‌ها جهت شناسایی مدل و مدل‌های دینامیکی بررسی شده است. سپس با استفاده از داده‌های تجربی چند مدل دینامیکی در نظر گرفته شده و شناسایی سیستم برای این مدل‌ها انجام شده، در قسمت نهایی مدل‌های استخراج شده با یکدیگر مقایسه شده و همچنین جهت صحت‌سنگی نتایج، اعمال هم‌زمان سیگنال به مدل استخراج شده و ساخت‌افزار چرخ عکس‌العملی انجام شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است.

2- چرخ عکس‌العملی و مدل‌های موجود

چرخ عکس‌العملی شامل یک روتور چرخان است که به کمک یک موتور الکتریکی حرکت دورانی پیدا می‌کند. در شرایطی که ماهواره در نقطه تعادل خود قرار داشته باشد، موتور خاموش بوده و یا تغییر سرعت ندارد. در صورتی که نیاز باشد ماهواره در جهت خاصی دوران داشته باشد، یا وضعیت تغییر نماید، موتور الکتریکی با تغییر سرعت، گشتاور لازم را به ماهواره اعمال می‌نماید. بخش دور چرخ با حرکت دورانی می‌تواند اندازه حرکت دورانه را تغییر دهد، اثر گشتاورهای اغتشاشی را حذف کرده و در صورت لزوم وضعیت ماهواره را به مقدار دلخواه تنظیم کند. چرخهای عکس‌العملی عموماً از چهار قسمت موتور الکتریکی بدون زغال^۱، برد الکترونیکی کنترلی، چرخ طیار و محفظه تشکیل شده است. موتورهای الکتریکی بدون زغال قابلیت تولید دورهای بالا دارند که این دور در چرخهای عکس‌العملی به حدود 8000 دور بر دقیقه می‌رسد. محور موتور الکتریکی به یک چرخ طیار متعلق بوده که با چرخش موتور مونتموم زاویه‌ای ایجاد می‌نماید و با تغییرات سرعت باعث تولید شتاب زاویه‌ای و نهایتاً گشتاور می‌شود. موتورهای الکتریکی به دلیل خاصیت اشباع هسته و رفتار غیرخطی مغناطیس شوندگی هسته اساساً غیرخطی بوده و دارای معادلات غیرخطی هستند [14]. اگرچه که در بیشتر منابع معمولاً معادلات به صورت ساده شده در نظر گرفته شده است. از طرفی برد الکترونیکی کنترلی دارای قسمت‌های مختلفی شبیه پردازنده، مدارهای حفاظتی، مدارهای محدود کننده، مدارهای قدرت، حسگرهای فیلترهاست که برخی از آن‌ها شبیه محدود کننده‌ها رفتاری غیرخطی دارند [15]. نمونه‌ای از یک بلوك دیاگرام چرخ عکس‌العملی در شکل 1 ارائه شده است.

همان‌طور که از شکل 1 ملاحظه می‌شود بخش‌های مختلفی به غیر از یک موتور الکتریکی در ساختار یک چرخ عکس‌العملی وجود دارد که صرف‌نظر کردن از این قسمت‌ها، دقت مدل استخراج شده در مقایسه با رفتار واقعی چرخ را کاهش می‌دهد. در مرجع [12] برای مدل‌سازی چرخ عکس‌العملی از یک مدل موتور جریان مستقیم است. تابع تبدیل بین سرعت زاویه‌ای چرخ عکس‌العملی و ولتاژ ورودی از معادلات مرجع [16] استفاده شده است. این تابع تبدیل در فضای لایپلاس رابطه به صورت رابطه (1) دارد.

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{k_t}{k_t k_e + (L s + R)(J s + b)} \quad (1)$$

¹ Brushless

از گشتاور را تولید می‌کند. این عملکر در مود نشانه‌روی دقیق ماهواره‌ها کارایی ویژه‌ای دارد، اگرچه که اشباع شدن نیز از مشکلات چرخهای عکس‌العملی است [4,3].

کنترل وضعیت در مدهای نشانه‌روی مخصوصاً برای ماهواره‌های سنجشی و تصویربرداری از اهمیت بسزایی برخوردار است. در نظر گرفتن مدل صحیح و واقعی از عملکردها، پاسخ‌های الگوریتم کنترل وضعیت را واقعی‌تر نموده و جهت رسیدن به کنترل وضعیت دقیق، ضروری به نظر می‌رسد [5,1]. در این راستا پژوهش‌ها و تحقیقاتی در منابع صورت گرفته که به طور کلی دو رویکرد اصلی را می‌توان در مدل‌سازی چرخهای عکس‌العملی در نظر گرفت. رویکرد اول روش تحلیلی و محاسبه تابع تبدیل از روابط و معادلات ریاضی است. رویکرد دوم نگاه جعبه سیاه به چرخ عکس‌العملی و محاسبه تابع تبدیل آن از طریق شناسایی سیستم است [6]. هر دو رویکرد ویژگی‌هایی دارند. در رویکرد اول روابط ریاضی البته با تقریب مدل مناسی از چرخ ارائه می‌نماید، اما عموماً چرخهای عکس‌العملی به همراه ساخت‌افزار الکترونیکی کنترلی در یک مجموعه بوده و روابط ریاضی فقط برای موتور نوشته شده و از ساخت‌افزار الکترونیکی صرف‌نظر می‌شود، علاوه‌بر این در روابط ریاضی از ترم‌های غیرخطی و همچنین محدودیت‌های الکترونیکی و کنترلی داخل چرخ عموماً صرف‌نظر می‌شود؛ بنابراین تخمین مدل از طریق شناسایی سیستم چرخ و برد الکترونیکی مزیت دارد.

در مراجع [9,8] بررسی و شناسایی یک مدل برای چرخ عکس‌العملی انجام شده است. البته این شناسایی بدون داده‌های تجربی و از روی یک مدل ریاضی پیش‌فرض استخراج شده و سعی در شناسایی و پیشنهاد مدل بهینه جدید برای تشخیص عیب بوده است. در مرجع [9] از آموزش شبکه عصبی برای تشخیص عیب چرخ استفاده شده است. در مرجع [10] اغتشاشات یک چرخ عکس‌العملی مدل‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [11] مدل‌سازی یک چرخ عکس‌العملی از روی مدل یک موتور جریان مستقیم انجام شده و پارامترهای مدل موتور با روش حداقل مربعات بازگشتی تخمین زده شده است. در مراجع یادشده عموماً داده‌های تجربی در دسترس نبوده است و مدل‌های در نظر گرفته شده مبتنی بر روابط ریاضی حاکم بر موتورهای جریان مستقیم بوده است که هر یک در حد امکان ترم‌های غیرخطی را نیز در مدل چرخ عکس‌العملی در نظر گرفته‌اند.

شناسایی سیستم یک چرخ عکس‌العملی با استفاده از یک مدل غیرخطی در مرجع [12] بررسی شده که در این مرجع از نتایج تجربی برای شناسایی سیستم چرخ استفاده شده است. در مرجع [13] اغتشاشات یک چرخ عکس‌العملی نمونه مدل‌سازی شده، این مطالعه به منظور بررسی تأثیر اغتشاشات چرخ بر سازه ماهواره بررسی شده است.

اطمینان از حفظ وضعیت ماهواره و توانایی در کنترل وضعیت آن با توجه به پرهزینه بودن پروژه‌های طراحی و ساخت ماهواره یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های موجود است. به عبارت دیگر با توجه به هزینه بالای ساخت ماهواره روشنی اهمیت ویژه‌ای دارد که بتواند منجر به دقت بالاتر در کنترل وضعیت و افزایش قابلیت اطمینان کنترل وضعیت شود. در نظر گرفتن مدل دقیق چرخ عکس‌العملی به منظور پیاده‌سازی و آزمون الگوریتم‌های کنترل وضعیت ساخت‌افزار در حلقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بلوك دیاگرام کنترلی چرخ عکس‌العملی پیچیدگی‌های دارد که عموماً در تحقیقات انجام شده، مسئله ساده شده و از دینامیک‌های غیرخطی چرخ صرف نظر شده است، همچنین عمدتاً از داده‌های تجربی در استخراج اطلاعات ورودی-خروجی استفاده نشده است. علاوه‌بر این برای مدل‌سازی یک نمونه چرخ

و دریافت داده، پروتکل ارتباطی و نمایشگر داده می‌شود. دور نامی چرخ عکس‌العملی مورد آزمون دارای سرعت 6000 دور بر دقیقه و گشتاور نامی 0.015 نیوتون‌متر است. بلوک دیاگرام داخلی یک چرخ عکس‌العملی در شکل 3 نمایش داده شده است.

ویژگی‌های چرخ عکس‌العملی نمونه در جدول 1 بیان شده است. حداکثر سرعت این چرخ 7800 دور بر دقیقه و حداکثر شتاب 314 دور بر ثانیه است. این چرخ دارای مومنتوم زاویه‌ای 0.34 نیوتون متر ثانیه بوده و ممان اینرسی آن 42×10^{-4} کیلوگرم مترمربع است. ارسال فرمان و دریافت داده در این چرخ توسط دو درگاه ارتباطی سریال¹ و باس کن² قابل انجام است؛ بنابراین مشکل واحد آنالوگ به دیجیتال برای داده‌برداری برخط وجود ندارد. توجه به این نکته مجموعه چرخ و کنترل‌کننده داخلی آن به صورت یک مجموعه بسته ساخته شده است.

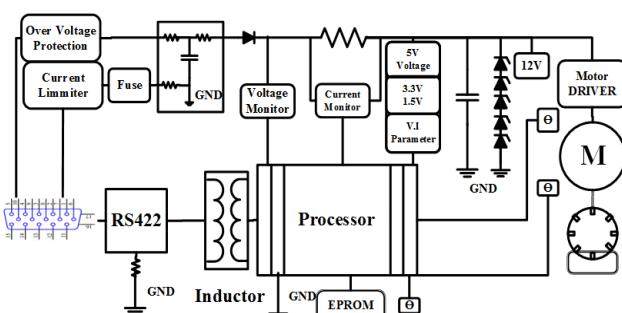
اندازه‌گیری داده فیدبک از دور چرخ در هر لحظه توسط سه حسگر اثر هال انجام شده و داده‌ها از طریق پردازنده داخلی روی درگاه ارتباطی باس کن ارسال می‌شود. برای برقراری ارتباط با مجموعه چرخ عکس‌العملی از برد الکترونیکی دارای پردازنده سری آرم³ با فرکانس کاری 8 مگاهرتز استفاده شده است. در این مطالعه پروتکل ارتباطی استفاده شده برای اعمال فرمان و دریافت داده، پروتکل باس کن با فرکانس کاری 1 مگاهرتز انتخاب شده است. مدت زمان لازم از لحظه ارسال داده از برد پردازنده تا دریافت بازخورد از چرخ، در این درگاه ارتباطی حدود 20 میلی‌ثانیه اندازه‌گیری شده است. در شکل 4 تصویری از چرخ عکس‌العملی و برد پردازشی ساخته شده را نشان می‌کنم. اطلاعات ورودی و خروجی از طریق درگاه سریال برد الکترونیکی به رایانه منتقل شده و مقداری ورودی و خروجی اندازه‌گیری شده به کمک نرم‌افزار لوبیو⁴ ذخیره و نمایش داده می‌شود.

در شکل 5 تصویری از ارتباط برد پردازشی، چرخ عکس‌العملی و محیط نرم‌افزاری طراحی شده مشاهده می‌شود. داده‌ها به جعبه ابزار شناسایی

جدول 1 مشخصات چرخ عکس‌العملی نمونه [17]

Table 1 Reaction wheel specifications [17]

مقادیر	پارامتر
0.34 (Nm·s)	مومنتوم زاویه‌ای
6000 (rpm)	دور نامی
7800 (rpm)	حداکثر دور
0.015 (Nm)	گشتاور نامی
4.2×10^{-4} (kg·m ²)	ممان اینرسی



شکل 3 بلوک دیاگرام داخلی چرخ عکس‌العملی RW90 [17]

¹ RS232
² CAN
³ ARM
⁴ LabVIEW

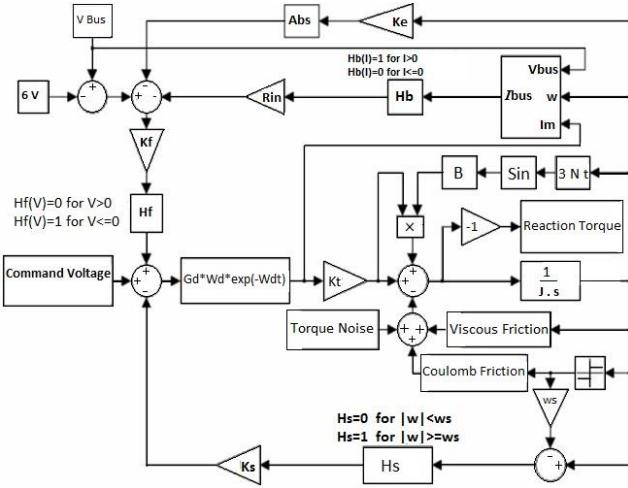


Fig. 1 Internal block diagram of a reaction wheel [11]

شکل 1 بلوک دیاگرام داخلی یک چرخ عکس‌العملی [11]

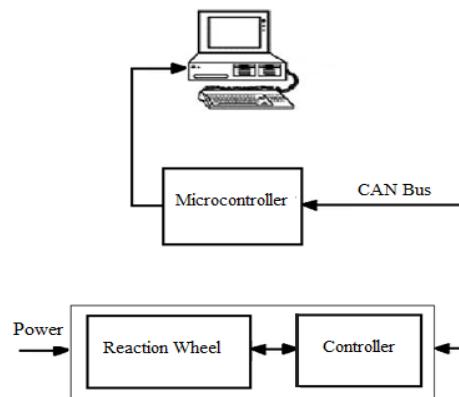
در مرجع یادشده با توجه به پارامترهای انتخابی برای چرخ عکس‌العملی مدلی در نظر گرفته شده وتابع تبدیل چرخ مشخص شده است. برای شناسایی مدل پارامترهای رابطه (1) با استفاده از روش حداقل مربعات بازگشتی تعیین شده است. در این مرجع اگرچه داده‌های تجربی در دسترس نبوده است، اما نیاز به یک مدل دقیق از چرخ عکس‌العملی مطرح شده است و با استفاده از شبیه‌سازی و برای یک مدل مفروض تخمین مدل دقیق صورت گرفته است.

3- ساخت بستر آزمون و آزمایش‌های تجربی

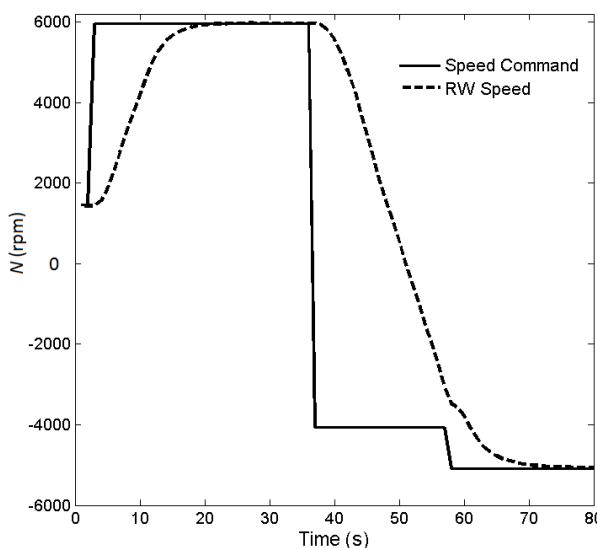
شناسایی مدل ریاضی مناسب از هر سیستمی نیازمند طراحی بستری برای استخراج داده‌های مناسب است. در این راستا یک بستر سخت‌افزاری برای اعمال فرمان و اکتساب داده از چرخ عکس‌العملی طراحی شده و تعریف آزمون‌های مختلف با توجه به ویژگی‌های مسئله تعریف شده است. داده‌برداری برخط، نویز کم داده‌ها و تعداد مناسب داده با توزیع یکنواخت از ویژگی‌های بستر سخت‌افزاری اکتساب داده است. در شکل 2 شماتیک بستر سخت‌افزاری پیاده‌سازی شده در این مطالعه نمایش داده شده است. در بخش بعد جزئیات بستر آزمون تشریح شده است.

1-3- بستر آزمون

بستر آزمون شامل یک چرخ عکس‌العملی نمونه، یک برد پردازنده برای ارسال



شکل 2 شماتیک بستر آزمون تجربی

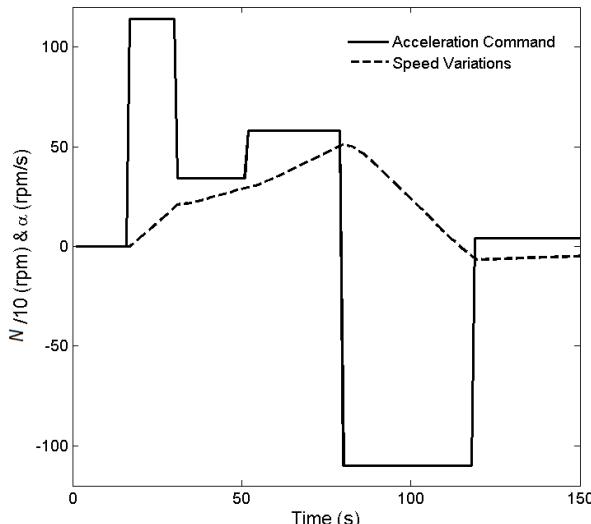


شکل ۶ مقایسه فرمان سرعت و سرعت چرخ عکس‌العملی

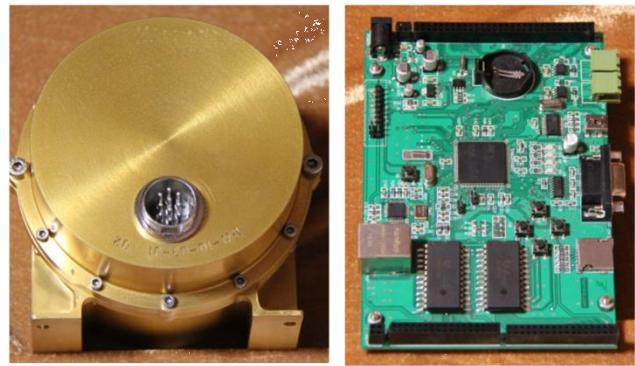
رسیده و خطای حالت ماندگار به صفر نزدیک شده است. با معکوس شدن فرمان دور نیز بعد از گذشت حدود 40 ثانیه دور چرخ معکوس شده است. در شکل 7 عملکرد چرخ عکس‌العملی در مدد شتاب بررسی شده است. در این شکل دستور شتاب به چرخ اعمال شده و نمودار تغییرات سرعت چرخ در جهت مثبت و منفی به دست آمده که در این شکل مشاهده می‌شود. در این شکل محور عمودی برای خط ممتد شتاب (α) و برای خط‌چین، سرعت با مقیاس $N/10$ سرعت چرخ مشخص شده است. البته قبل بیان است که بازخورد دریافتی از چرخ، پارامتر سرعت بوده و بازخوردی از پارامتر شتاب وجود ندارد، البته با محاسبه تغییرات سرعت یا همان مشتق گیری از سرعت نمودار شتاب استخراج می‌شود که در شکل 8 نمودار استخراجی برای شتاب مشاهده می‌شود. مطابق شکل چرخ به خوبی توانسته فرمان شتاب را دنبال نماید.

4- شناسایی و مدل‌سازی

شناسایی سیستم کاربردهای مهم و مختلفی در صنعت داشته و نقشی



شکل ۷ مقایسه فرمان شتاب و تغییرات سرعت چرخ عکس‌العملی



شکل ۴ چرخ عکس‌العملی و برد الکترونیکی

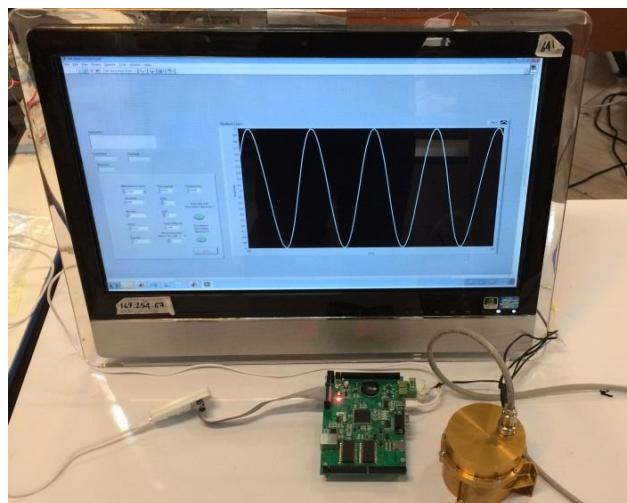
سیستم نرم‌افزار متلب انتقال داده می‌شود تا به کمک آن مدل دینامیکی مناسبی برای چرخ عکس‌العملی تعیین شود. چرخ عکس‌العملی مورد آزمایش دارای دو مد اصلی سرعت و شتاب است که در مد سرعت، مومنتوم زاویه‌ای و در مد شتاب گشتاور ایجاد می‌کند. با اعمال دستور سرعت، دور خروجی چرخ دور فرمان را ردیابی می‌نماید. کاربرد چرخ عکس‌العملی بیشتر در مود شتاب و ایجاد گشتاور مطرح است، در مود شتاب، چرخ با تغییرات سرعت گشتاوری به ماهواره اعمال می‌نماید. رابطه مومنتوم زاویه‌ای و گشتاور تولیدی توسط چرخ عکس‌العملی مطابق روابط (3.2) است که در آن T گشتاور تولیدی چرخ بر حسب نیوتون‌متر، I ممان اینرسی چرخ، α شتاب زاویه‌ای، ω سرعت زاویه‌ای و H مومنتوم زاویه‌ای است.

$$T = I\alpha \quad (N\cdot m) \quad (2)$$

$$H = I\omega \quad (r\cdot m\cdot v) \quad (3)$$

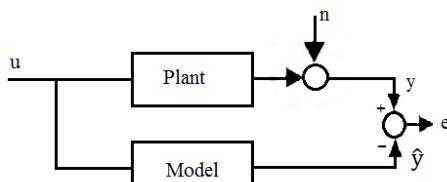
ابتدا به منظور آشنایی با نحوه عملکرد چرخ عکس‌العملی یک سیگنال آزمون تولید شده و به موتور اعمال می‌شود که طبق داده تجربی دریافت شده، این سیگنال مطابق شکل 6 است. در این شکل خط‌چین نشان‌دهنده سرعت چرخ و خط ممتد نشان‌دهنده فرمان اعمالی به آن است.

همچنان که در شکل 6 مشاهده می‌شود چرخ دارای زمان خیز حدود 20 ثانیه بوده و بعد از پنج ثابت زمانی مقدار دور چرخ به مقدار فرمان



شکل ۵ بستر تست سخت‌افزار در حلقة شامل چرخ عکس‌العملی، برد الکترونیکی و LabVIEW software

نمایشگر در محیط LabVIEW



شکل 10 بلوک دیاگرام شناسایی سیستم

توجه هستند و شناسایی غیرمستقیم مدل انجام می‌پذیرد، زیرا داده‌های در دسترس مربوط به سیستم حلقه بسته بوده و در نهایت تخمینی ازتابع تبدیل حلقه بسته را خواهیم داشت (شامل موتور، چرخ طیار و قسمت‌های مکانیکی، کنترل کننده، مدارهای الکترونیکی و پردازشی داخل چرخ) که تابع تبدیل آن در حالت کلی در حالت گستته زمان به صورت رابطه (5) است.

$$T = \frac{C_T(q^{-1})}{R_T(q^{-1})} = \frac{c_{T_1}q^{-1} + \dots + c_{T_m}q^{-m}}{1 + r_{T_1}q^{-1} + \dots + r_{T_n}q^{-n}} \quad (5)$$

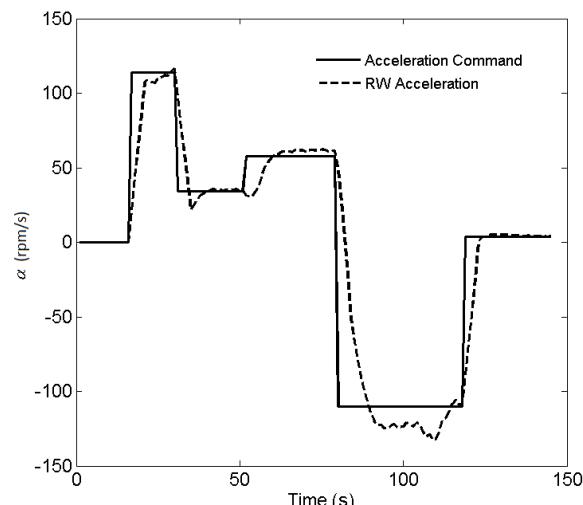
4-1-4- سیستم دینامیکی خطی

تابع تبدیل ساده‌ترین مدل ریاضی برای سیستم‌های دینامیکی خطی است. تابع تبدیل بیشترین کاربرد را در مهندسی کنترل دارد. همان‌طور که اشاره شد این مقاله مدل‌سازی را رویکرد مدل زمان گستته انجام شده است. مدل‌های دینامیکی خطی متداول شامل مدل‌های مودهای خودرگرسیو^۱، خودرگرسیو میانگین متحرک با ورودی خارجی^۲، خطای خروجی^۳ و باکس جنکین^۴ است که مدل‌های خودرگرسیو و خودرگرسیو میانگین متحرک با ورودی خارجی بیشترین کاربرد را دارند. در مدل خطای خروجی معیار مشاهده شده مستقیم در خروجی نشان داده می‌شود، مدل به نوع ساختار پسیار حساس است که این امر چندان مطلوب نیست. دلیل این مشکل در این است که این مدل برای سیستم‌های حلقه باز طراحی شده است. بدین جهت نمی‌توان سیستم‌های ناپایدار را توسط این مدل شناسایی نمود؛ بنابراین در این مقاله با توجه به این که سیستم مدد نظر حلقه بسته است، مدل خطای خروجی برای آن مناسب نیست.

مدل باکس جنکین پیچیده‌ترین مدل دینامیکی خطی و مشابه مدل خطای خروجی است با این نتفاوت که در آن برای دینامیک مدل نویز، درجه آزادی در نظر گرفته شده است؛ بنابراین می‌توان نویز خروجی در این مدل را به صورت رنگی در نظر گرفت. این مدل نسبت به تمام مدل‌های دیگر کامل‌تر بوده و انعطاف‌پذیری بیشتری دارد، زیرا توابع تبدیل مربوط به ورودی- خروجی و نویز- خروجی را به صورت جداگانه تخمین می‌زند. اشکال این مدل پیچیدگی آن (به دلیل کامل بودن آن) است. از دیدگاه پیچیدگی تا جایی که امکان دارد کمتر از این مدل استفاده می‌شود، زیرا تخمین قابل قبولی ارائه می‌دهد، اما بهای این که دینامیک‌هایی را به اشتباه برای سیستم در نظر می‌گیرد [6]. در ادامه تمرکز روی مدل‌های خودرگرسیو و خودرگرسیو میانگین متحرک با ورودی خارجی خواهد بود.

4-1-4-1- مدل خودرگرسیو

مدل خطای خودرگرسیو در تخمین سیستم‌های دینامیکی بسیار استفاده



شکل 8 مقایسه بین فرمان شتاب و شتاب چرخ عکس‌العملی

اساسی در تحلیل و کنترل سیستم‌های صنعتی دارد [18]. به منظور تحلیل و کنترل یک سیستم دینامیکی باید یک مدل ریاضی از آن سیستم در دسترس باشد. در این مطالعه شناسایی سیستم چرخ عکس‌العملی به معنای یافتن مدلی از خانواده مدل‌هاست که با توجه به مشاهدات ورودی- خروجی کمترین هزینه را ایجاد کند و معادل سیستم مورد نظر باشد [6].

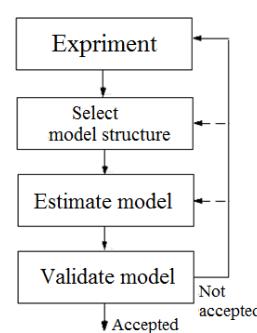
در فرایند شناسایی سیستم ابتدا باید داده‌های مناسب ورودی و خروجی دستگاه گردآوری شوند، پس از آن انتخاب ساختار مدل مناسب با توجه به کاربرد مدل و شناخت از سیستم مورد نظر صورت می‌پذیرد تا مدلی مناسب برای دستگاه مورد نظر حاصل شود [19]. در شکل 9 فرایند شناسایی سیستم به صورت کلی نمایش داده شده است.

در این مقاله حداقل مجموع مربعات خطای مربعات میانگین مربعات بودن مدل در نظر گرفته شده است. هدف از این معیار، کمینه نمودن مجموع مربعات خطای بین خروجی مدل و خروجی اندازه‌گیری شده از دستگاه برای همه نمونه‌های است که رابطه ریاضی این معیار در رابطه (4) مشخص شده است.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e(j)^2 \quad (4)$$

قابل بیان است که خطای در فرایند شناسایی مدل چرخ مطابق شکل 10 استخراج می‌شود.

در این مطالعه مدل‌های خطی دینامیکی برای چرخ عکس‌العملی مورد



شکل 9 فرایند شناسایی سیستم

¹ Autoregressive with exogenous input (ARX)

² Autoregressive moving average with exogenous input (ARMAX)

³ Output Error (OE)

⁴ Box Jenkins (BJ)

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} \quad (11)$$

$$\hat{y}(k) = \hat{b}_1 u(k-1) + \hat{b}_2 u(k-2) + \hat{c}_1 e(k-1) - \hat{a}_1 y(k-1) + \hat{a}_2 y(k-2) \quad (12)$$

در این مدل دیگر نمی‌توان از روش حداقل مربعات استفاده نمود و خطای پیش‌بینی از رابطه (13) تعیین می‌شود.

$$e(k) = \frac{A(q^{-1})}{C(q^{-1})} y(k) - \frac{B(q^{-1})}{C(q^{-1})} u(k) \quad (13)$$

4- ورودی

اعمال یک ورودی مناسب و پایا تأثیر به سازنده در شناسایی صحیح یک مدل ریاضی از سیستم مورد نظر دارد. چرخ‌های عکس‌العملی که مشابه موتورهای جریان مستقیم هستند، عموماً سیستم‌هایی با ثابت زمانی بالاست؛ بنابراین تغییرات زیاد ورودی را نمی‌توانند ردیابی نمایند. سیگنال‌های شبیه ضربه اگرچه به لحاظ فرکانسی غنی هستند، اما برای شناسایی مدل چرخ مناسب نیستند. علاوه‌بر این وارد کردن ورودی ضربه به سیستم، شبیه وارد کردن شوک است که منجر به آسیب به دستگاه می‌شود. ورودی سیگنال تصادفی با فرکانس خیلی بالا در عمل مناسب چرخ نیست، چون چرخ قادر به ردیابی آن نبوده و تغییرات سریع سیگنال ممکن است به محرك‌های سیستم دینامیکی آسیب برساند. به علاوه در شرایط کلی مدل سیستم اصلی شاید آن قدر پارامتر نامعلوم نداشته باشد که برای تخمین آن‌ها نیاز به چنین سیگنال غنی (تحریک پایا)² وجود داشته باشد. در این تحقیق از سیگنال سیگنال دودوبی تصادفی ساختگی و سیگنال چیرپ³ که نسبتاً پایا بوده و اغلب فرکانس‌های سیستم را سیگنال دودوبی تصادفی ساختگی⁴ تحریک می‌کنند برای شناسایی مدل چرخ استفاده شده است. عموماً سیگنال دودوبی تصادفی ساختگی بین دو سطح با پهنای پالس تصادفی تغییر می‌کند که البته سطح سیگنال هم می‌تواند تصادفی باشد.

در این مطالعه سطح سیگنال و پهنای پالس سیگنال هر دو به طور تصادفی تولید می‌شود. البته با توجه به شناختی که از چرخ عکس‌العملی وجود دارد مقدار حداقل زمان پهنای پالس سیگنال به 5 ثانیه و مقدار حداکثر اندازه دامنه به مقدار 6000 دور بر دقیقه محدود شده است. همچنین در تمام داده‌برداری‌ها سیستم از حالت آرام شروع به کار کرده و شرایط اولیه صفر بوده است. در شکل 14 سیگنال دودوبی تصادفی ساختگی اعمال شده به چرخ عکس‌العملی با سطح و پهنای پالس متغیر و تصادفی مشاهده می‌شود، همچنین در این شکل تغییرات سرعت موتور نیز به صورت خطچین نمایش داده شده است.

سیگنال تحریک چیرپ یک سیگنال سینوسی است که بین دو فرکانس مشخص تغییر می‌کند [12]. در کاربردهای عملی معمولاً سیگنال تصادفی خالص و یا سیگنال مشابه با پله به دلیل تغییرات ناگهانی قابلیت اعمال به موتور را ندارد، اما استفاده از سیگنال چیرپ می‌تواند سبب تحریک بازه فرکانس کاری دستگاه به صورت پیوسته و بدون اعمال ضربه به آن شود؛ در پسیاری از موارد در کاربردهای صنعتی مورد توجه است. به منظور بررسی عملکرد چرخ و همچنین تحریک مودهای دینامیکی بیشتر چرخ عکس‌العملی از سیگنال چیرپ استفاده شده است.

پاسخ چرخ به این سیگنال در شکل 15 مشاهده می‌شود. همچنان که از این شکل نیز مشخص است. در فرکانس‌های پایین ردیابی دستور سرعت

می‌شود چون مشابه بسیاری از سیستم‌های واقعی است. علاوه‌بر این چون خطای پیش‌بینی آن دارای یک رابطه‌ی خطی با پارامترهای می‌توان پلارامترهای آن را از روش حداقل مربعات⁵ تخمین زد. از آن جایی که خطای پیش‌بینی خودرگرسیو حتی در مواجهه با سیستم ناپایدار، پایدار است، از این مدل برای تخمین سیستم‌های ناپایدار استفاده می‌شود. در شکل 11 بلوك دیاگرام این مدل آورده شده است [6].

معادلات مدل خود رگرسیو به صورت روابط (8-6) است.

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k) + v(k) \quad (6)$$

$$\hat{y}(k|k-1) = B(q^{-1})u(k) + (1 - A(q^{-1}))y(k) \quad (7)$$

$$\hat{y}(k|k-1) = b_1 u(k-1) + \dots + b_m u(k-m) - a_1 y(k-1) - \dots - a_m y(k-m) \quad (8)$$

در این مدل کمینه‌سازی خطای پیش‌بینی مورد نظر است. در شکل 12 نحوه محاسبه آن نمایش داده شده است. در بهترین حالت خطای پیش‌بینی معادل یک نویز سفید خواهد بود یعنی هیچ اطلاعاتی در خطا باقی نمانده است.

4-1-2- مدل خود رگرسیو میانگین متحرک با ورودی خارجی

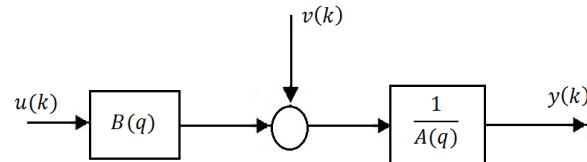
ساختمار در نظر گرفته شده برای این مدل به صورت بلوك دیاگرام در شکل 13 نمایش داده شده است.

معادله خروجی در مدل خود رگرسیو میانگین متحرک با ورودی خارجی به صورت (19) است.

$$\hat{y}(k|k-1) = \frac{B(q^{-1})}{C(q^{-1})} u(k) + \left(1 - \frac{A(q^{-1})}{C(q^{-1})}\right) y(k) \quad (9)$$

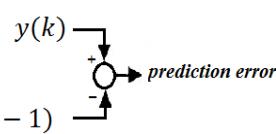
معادلات مدل ARMAX برای $n_a = n_b = 2, n_c = 1$ به صورت روابط (10) است.

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} \quad (10)$$



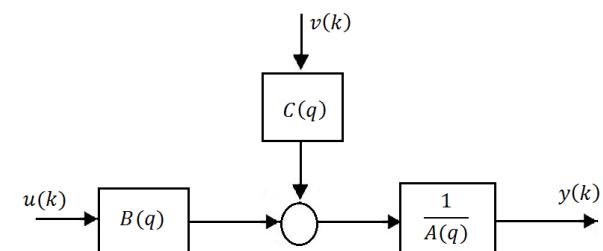
شکل 11 بلوك دیاگرام مدل خودرگرسیو

شکل 11 بلوك دیاگرام مدل خودرگرسیو



شکل 12 بلوك دیاگرام خطای تخمین

شکل 12 بلوك دیاگرام خطای تخمین



شکل 13 بلوك دیاگرام مدل خود رگرسیو میانگین متحرک با ورودی خارجی

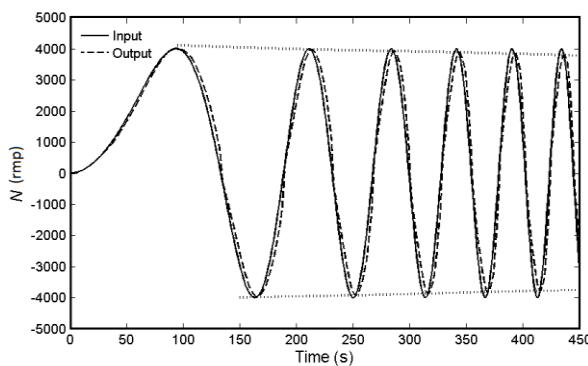
شکل 13 بلوك دیاگرام مدل خود رگرسیو میانگین متحرک با ورودی خارجی

¹ Least square

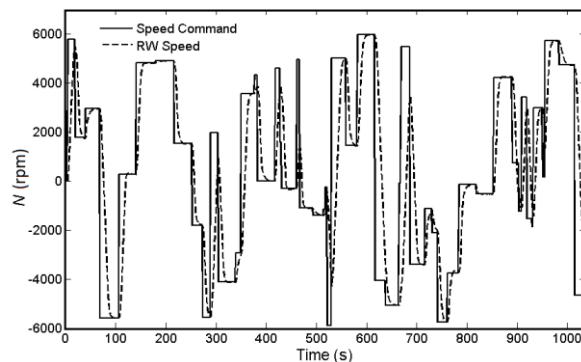
² Persistently exciting(PE)

³ Chirp

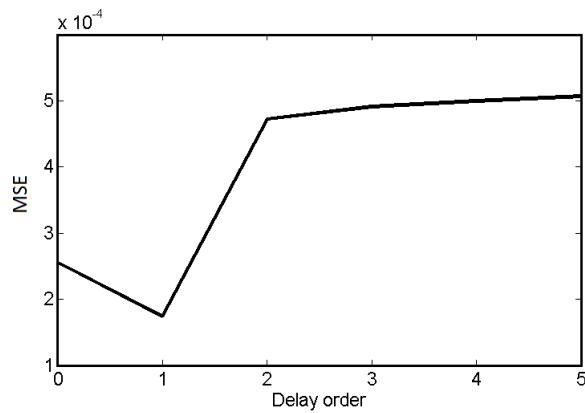
⁴ Pseudo random binary signal(PRBS)



شکل 15 سیگنال Chirp اعمالی و خروجی سرعت چرخ عکس‌العملی



شکل 14 سیگنال دودویی تصادفی ساختگی تولیدی به عنوان فرمان و تغییرات سرعت چرخ



شکل 16 درصد خطأ برحسب مرتبه تأخير

واحد تأخير، کمینه حداقل مربعات خطأ حاصل شده است.

4-5- شناسایی مدل سرعت چرخ عکس‌العملی

به منظور شناسایی مدل دینامیکی چرخ، مرتبه مدل بهازی یک خانواده مشخص از مدل‌های دینامیکی خطی بررسی شده تا مرتبه مناسب استخراج شود. داده‌های تجربی به دست آمده به دو دسته کلی داده‌های آموزش و داده‌های ارزیابی با نسبت 70% و 30% به صورت نرمالیزه شده بین 0 ± 1 در دو جهت ساعتگرد و پاد ساعتگرد تقسیم شده است.

شناسایی مدل چرخ با داده‌های تجربی برای خانواده مدل خود رگرسیو انجام شده و مقدار خطأ و درصد برازنده‌گی² با مرتبه‌های مختلف استخراج شده و نتایج آن در جدول 2 ارائه شده است. همان‌طور که از این جدول مشخص است، مدل خود رگرسیو 221³ از جهت مناسب بودن خطأ و سادگی مدل نسبت به سایر مدل‌ها ارجحیت داشته اگر چه مدل خود رگرسیو 331⁴ مقدار برازش بیشتری دارد، مدل خود رگرسیو 221 به عنوان مدل دینامیکی خطی برای چرخ عکس‌العملی مورد نظر انتخاب شده است. خطأ در تخمین مدل شناسایی شده ناشی از عوامل مختلفی مانند دینامیک‌های مدل نشده، اصطکاک، کالibrاسیون حسگرها و خطای اندازه‌گیری است.

به منظور تخمین مرتبه چند جمله‌ای ($A(q)$) در مدل خود رگرسیو شناسایی به ازای چند مرتبه مختلف انجام شده که در آن $n_b = 2$ و $n_k = 1$ در نظر گرفته شده است. مطابق این تحلیل که نمودار آن در شکل 17 مشاهده می‌شود، بهازی $n_a = 2$ کمینه مربعات خطأ اتفاق افتاده است.

به خوبی توسط چرخ انجام شده است، اما با افزایش فرکانس توانایی ردیابی سیگنال فرمان کاهش پیدا کرده و چرخ نمی‌تواند به مقدار حداقل سیگنال فرمان برسد که در شکل نیز مشخص شده است. از داده‌های تجربی این آزمایش نیز برای شناسایی مدل دینامیکی چرخ استفاده شده است. با توجه به پایابی سیگنال دودویی تصادفی ساختگی و نزدیک بودن شکل فرمان چرخ به این سیگنال برای شناسایی مدل دینامیکی چرخ از داده‌های اکتساب شده از این سیگنال استفاده شده است.

4-3- زمان نمونه‌برداری

عموماً زمان نمونه‌برداری متناسب با دینامیک سیستم مورد نظر انتخاب می‌شود. طبق قضیه نایکوویست-شون، فرکانس نمونه‌برداری حداقل باید از دو برابر بیشترین فرکانس موجود در دینامیک سیستم بیشتر باشد [21]. برای بررسی دینامیک چرخ عکس‌العملی و استخراج زمان نمونه‌برداری، سیگنال‌های چیرپ و سیگنال دودویی تصادفی ساختگی به چرخ عکس‌العملی اعمال شدند. سیگنال چیرپ از فرکانس 0.0001 هرتز تا 2 هرتز به چرخ عکس‌العملی اعمال شده است. در این خصوص شکل‌های 14 و 15 مشاهده می‌شود با بررسی دقیق‌تر این شکل‌ها، زمان خیز سرعت، حدود 20 ثانیه مشاهده شده و تغییرات سرعت چرخ به کندی اتفاق افتاده است؛ بنابراین چرخ یک دینامیک لخت داشته که زمان نمونه‌برداری 500 میلی‌ثانیه انتخاب شده است. البته از نظر بستر تست سخت‌افزاری، محدودیتی در زمان نمونه‌برداری وجود نداشته و تا فرکانس حدود 1 کیلوهرتز قابلیت نمونه‌برداری وجود دارد، اما با توجه به نوع سیستم و لختی نسبتاً زیاد آن فرکانس نمونه‌برداری 2 هرتز انتخاب شده که به نظر مناسب است.

4-4- تأخیر

به منظور شناسایی سیستم تحت مطالعه، تأخیر سیستم نخستین پارامتری است که باید مشخص شود. به عبارت دیگر بهتر است ابتدا تأخیر خالص سیستم مشخص شود و سپس به سیستم مدل‌های مختلف اعمال شده و این مدل‌ها بررسی شوند در غیر این صورت شناسایی سیستم با خطای بیشتر مواجه خواهد بود [20]. در این راستا مدل خود رگرسیو 22 در نظر گرفته شده و با استفاده از نرم‌افزار متلب برای مرتبه‌های مختلف شناسایی انجام شده و مقدار میانگین مربعات خطأ در این مرتبه‌ها مطابق شکل 16 حاصل شده است. همان‌طور که نتایج شکل 16 نشان می‌دهد بهازی یک

² Fitness

³ ARX221

⁴ ARX331

¹ ARX22

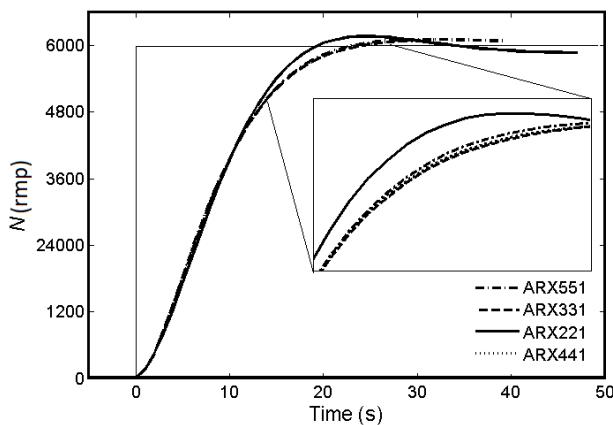


Fig. 18 Step response of ARX models

شکل ۱۸ پاسخ پله برای چند مدل مختلف خود رگرسیو

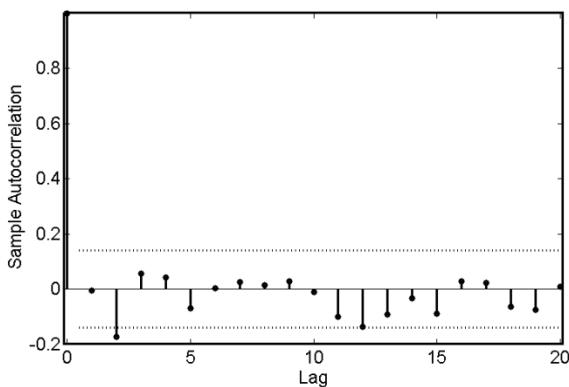


Fig. 19 Autocorrelation of error in ARX221

شکل ۱۹ خود همبستگی خطای در مدل خود رگرسیو 221

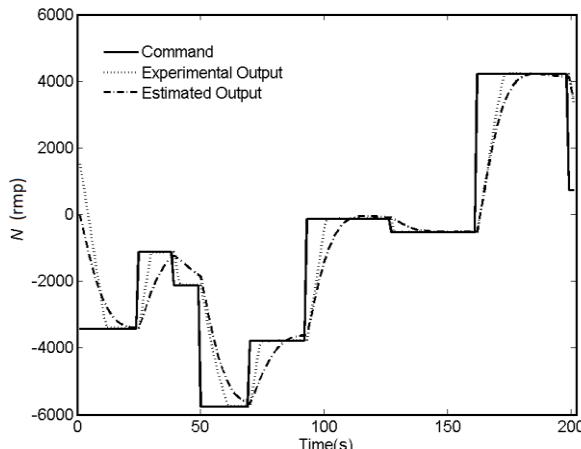


Fig. 20 Comparison of speed in estimated model and experimental data

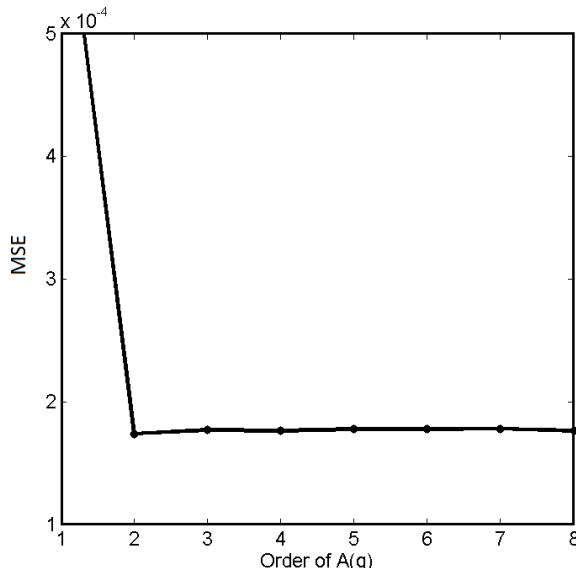
شکل ۲۰ مقایسه سرعت در خروجی مدل و داده تجربی

مدل خود رگرسیو میانگین متحرک با ورودی خارجی است که نسبت به مدل خود رگرسیو کامل‌تر است. با توجه به مشخص شدن مرتبه تأخیر و مرتبه چندجمله‌ای $A(q)$ در مراحل قبل از مدل خود رگرسیو میانگین متحرک با ورودی خارجی¹ استفاده شده و نتیجه ضرایب مدل دینامیکی خطی آن در جدول ۳ ارائه شده است. نمودارهای خود همبستگی خطای مقایسه بین خروجی مدل و خروجی واقعی در شکل‌های 21 و 22 ارائه شده است. با

جدول ۲ مشخصه مدل‌های خود رگرسیو برای شناسایی چرخ

Table 2 Specification of ARX model for reaction wheel

مدل	خطا	درصد برازندگی	مدل
$A(q) = 1 - 1.758 q^{-1} + 0.7852 q^{-2}$ $B(q) = 0.0275 q^{-1} - 0.0012 q^{-2}$	1.738×10^{-4}	76.52	خود رگرسیو 221
$A(q) = 1 - 2.11 q^{-1} + 1.445 q^{-2}$ $-0.3159 q^{-3}$ $B(q) = 0.027 q^{-1} - 0.0056 q^{-2}$ $-0.0019 q^{-3}$	1.773×10^{-4}	78.12	خود رگرسیو 331
$A(q) = 1 - 2.11 q^{-1} + 1.478 q^{-2}$ $-0.357 q^{-3} + 0.0167 q^{-4}$ $B(q) = 0.027 q^{-1} - 0.0057 q^{-2}$ $-0.0017 q^{-3} + 0.0002 q^{-4}$	1.772×10^{-4}	78.08	خود رگرسیو 441
$A(q) = 1 - 2.118 q^{-1} + 1.474 q^{-2}$ $-0.335 q^{-3} - 0.029 q^{-4} + 0.026 q^{-5}$ $B(q) = 0.027 q^{-1} - 0.0057 q^{-2}$ $-0.0017 q^{-3} + 0.0044 q^{-4}$ $-0.059 q^{-5}$	1.813×10^{-4}	77.89	خود رگرسیو 551

Fig. 17 Error per $A(q)$ orderشکل ۱۷ درصد خطای بر حسب مرتبه $A(q)$

یکی از معیارهای مهم مخصوصاً برای عملکرد یک چرخ عکس‌العملی پاسخ پله و خطای حالت ماندگار آن است. با استفاده از داده‌های تجربی به دست آمده مدل خود رگرسیو مرتبه 2 تا 5 تخمین زده شده و نمودار پاسخ پله آن در شکل ۱۸ ترسیم شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است مدل‌های ایجاد شده تا اندازه خوبی عملکرد چرخ را مدل نموده‌اند، اما با توجه به ارجحیت سادگی مدل در کاربردهای صنعتی مرتبه دوم (خود رگرسیو 221) پیشنهاد می‌شود. انتخاب مرتبه مدل در شکل ۱۷ نیز بررسی شد که مؤید تحلیل پاسخ پله است.

در این مرحله صحبت‌سنگی مدل برگزیده (خود رگرسیو 221) با استفاده از داده‌های ارزیابی انجام می‌شود. بدین منظور مقدار خطای نظر آماری باید خواصی مشابه نویز داشته باشد که در شکل ۱۹ خود همبستگی سیگنال خطای نمایش داده شده که مؤید مناسب بودن مدل است. در شکل ۲۰ داده‌های ارزیابی به چرخ و به مدل اعمال شده و خروجی سرعت مدل و چرخ با یکدیگر مقایسه شده است.

مدل دیگری که می‌توان برای شناسایی چرخ عکس‌العملی در نظر گرفت،

¹ ARMAX2211

جدول 3 مشخصه مدل خود رگرسیو میانگین متغیر با ورودی خارجی 2211 برای شناسایی چرخ

Table 3 Specification of ARMAX2211 model for reaction wheel

مدل	خطا	درصد برآزندگی	مدل
			خود رگرسیو
$A(q) = 1 - 1.69 q^{-1} + 0.7214 q^{-2}$			میانگین
$B(q) = 0.09156 q^{-1} - 0.06043 q^{-2}$	1.753×10^{-4}	78.03	متغیر با
$C(q) = 1 + 0.1573 q^{-1}$			ورودی خارجی 2211

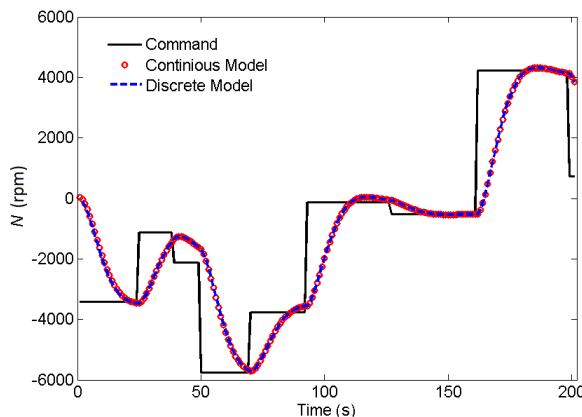


Fig. 23 Comparison of speed response in estimated discrete and continuous ARX2211 model

شکل 23 مقایسه پاسخ سرعت در دو مدل پیوسته و گسسته خود رگرسیو 221

$$\frac{-0.0081S^2 + 0.001355 S + 0.02969}{S^2 + 0.2425 S + 0.03071} \quad (14)$$

7-4- بررسی تابع تبدیل پیشنهادی به ورودی شتاب

به منظور بررسی مدل خود رگرسیو 221 پیشنهاد شده، در ردیابی سیگنال شتاب، نمودار شتاب (تفییرات سرعت) به مدل چرخ اعمال شده و پاسخ مدل به تغییرات سرعت، استخراج و در شکل 24 ترسیم شده است. نمودار این شکل نشان‌دهنده ردیابی مناسب سیگنال شتاب توسط مدل است.

5- محدودیت‌های عملی استفاده از مدل شناسایی شده

از آنجا که مدل شناسایی شده پیشنهادی یک مدل خطی از یک سیستم

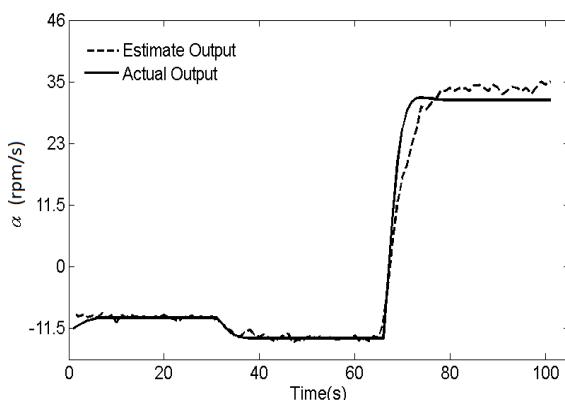


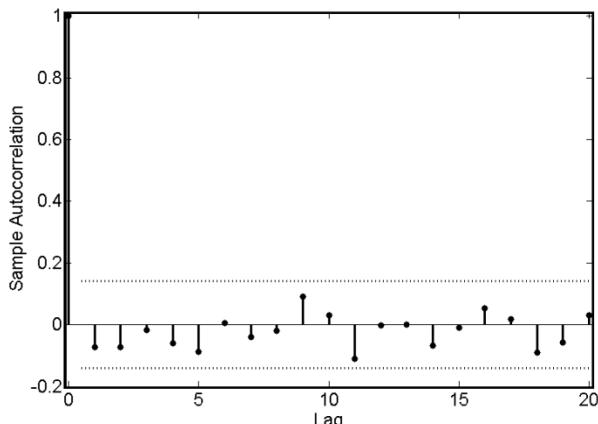
Fig. 24 Comparison of acceleration response in estimated ARX2211 model and actual acceleration

شکل 24 مقایسه شتاب واقعی چرخ و شتاب حاصل از مدل تخمینی خود رگرسیو 221

مقایسه شکل‌های 19 و 20 مشخص می‌شود که دو مدل خود رگرسیو و خود رگرسیو میانگین متغیر با ورودی خارجی انتخاب شده، دارای نتایج تقریباً یکسانی بوده؛ بنابراین براساس اصل سادگی مدل خود رگرسیو به عنوان مدل خطی دینامیکی برای چرخ عکس‌العملی پیشنهاد می‌شود. از نکات برجهسته مدل، تطبیق خروجی مدل و دستگاه مورد آزمایش با وجود دینامیک‌های مدل نشده و خطاها ناشی از اندازه‌گیری است.

6- بررسی تابع تبدیل پیوسته

تابع تبدیل شناسایی شده برای چرخ به صورت گسسته، در جدول 2 ارائه شده، اما تابع تبدیل مدل پیوسته خود رگرسیو 221 در رابطه (14) ارائه شده است. به منظور مقایسه بین تابع تبدیل پیوسته و گسسته، هر دو مدل به بازی یک ورودی جدید سرعت در شکل 23 با یکدیگر مقایسه شده است. در حالت کلی مطلوب‌ترست که اثر نمونه‌برداری قابل صرف‌نظر باشد به عبارت دیگر پاسخ سیستم گسسته و پیوسته یکسان باشد که در این شکل نیز این تزدیکی مشاهده شده و تقریباً تفاوت محسوسی بین این دو پاسخ به صورت رابطه (14) مشاهده نمی‌شود.



شکل 21 خود همبستگی خطای مدل خود رگرسیو میانگین متغیر با ورودی

خارجی 221

7-5- بررسی تابع تبدیل پیشنهادی به ورودی شتاب

به منظور بررسی مدل خود رگرسیو 221 پیشنهاد شده، در ردیابی سیگنال شتاب، نمودار شتاب (تفییرات سرعت) به مدل چرخ اعمال شده و پاسخ مدل به تغییرات سرعت، استخراج و در شکل 24 ترسیم شده است. نمودار این شکل نشان‌دهنده ردیابی مناسب سیگنال شتاب توسط مدل است.

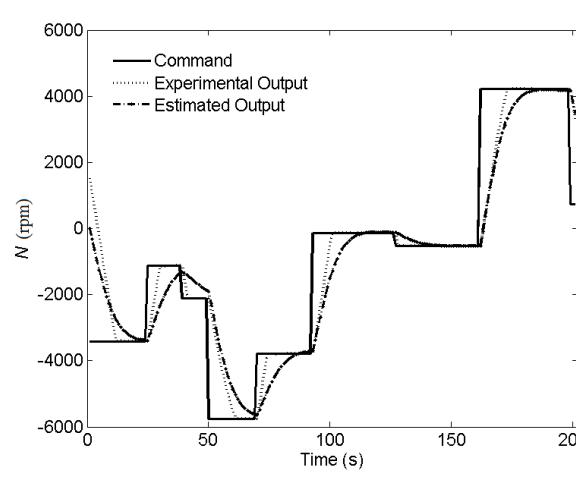


Fig. 22 Comparison of speed in estimated ARMAX2211 model and experimental data

شکل 22 مقایسه سرعت در خروجی مدل خود رگرسیو میانگین متغیر با ورودی خارجی 221 و داده تجربی

7- مراجع

- [1] M. J. Sidi, *Spacecraft Dynamics and Control, A Practical Engineering Approach*, First Edition, pp. 260-273, Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [2] L. Wilfried, K. Wittmann, W. Hallmann, *Handbook of Space Technology*, Vol. 22, pp. 332-361, New York: John Wiley & Sons, 2009.
- [3] A. E. Bryson, *Control of Spacecraft and Aircraft*, pp. 28-45, United Kingdom: Princeton University Press, 1994.
- [4] R. Wertz, *Spacecraft Attitude Determination and Control*, pp. 206-210, Boston: Kluwer Academic Publisher, 1978.
- [5] Y. Yavin, P. Kemp, Modelling and control of the motion of a rolling disk: effect of motor dynamics on the dynamical model, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 188, No. 1, pp. 613-624, 2000.
- [6] O. Nelles, *Nonlinear System Identification*, First Edition, New York: Springer-Verlag, pp. 1-77, 2002.
- [7] S. Silva, *Applied System Identification for a Four Wheel Reaction Wheel Platform*, Master Thesis, California Polytechnic State University, 2008.
- [8] S. K. Sohrabzade, M. Mahiabadi, M. Asadi, Determine of reaction wheel optimal model system for satellite attitude control in order to fault detection, *The 8th Iranian Aerospace Society Conference*, Tehran, Iran, February 18-20, 2009. (in Persian)
- [9] Z. Li, L. Ma, K. Khorasani, Fault detection in reaction wheel of a satellite using observer-based dynamic neural networks, in *International Symposium on Neural Networks*, pp. 584-590, 2005.
- [10] B. Bialke, High fidelity mathematical modeling of reaction wheel performance, *21st Annual American Astronautical Society Guidance and Control Conference*, San Diego: Univelt, May. 1998.
- [11] H. Khaksari, A. Khoshnood, J. Roshanian, Active Noise Cancelation in Reaction Wheel by simultaneous using of dynamical system identification and online wavelet, *Modares Mechanical Engineering* Vol. 15, No. 3, pp. 146-152, 2015. (In Persian)
- [12] D. Luo, A. Leonessa, Nonlinear system identification of a reaction wheel pendulum using subspace method, *American Control Conference, Proceedings of the IEEE*, Vol. 6, pp. 4590-4595, 4-6 June, Denver, 2003.
- [13] A. Aghalari, M. Imanzad, Disturbance modeling of a prototype reaction wheel and implementation on experimental prototype, *Space Science and Technology*, Vol. 6, No. 1, 2013. (in Persian)
- [14] T. Kara, I. Ekera, Experimental nonlinear identification of a three-mass system rotating in two directions, *Measurement and Control*, Vol. 36, No. 1, pp. 309-315, 2003.
- [15] S. Cong, G. Li, X. Feng, Parameters identification of nonlinear DC motor model using compound evolution algorithms, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2010.
- [16] S. Skilled, *Reaction Wheel Assembly Product Overview*, Accessed 16 November 2017, <http://www.skilledsystems.com/products.php>.
- [17] S. Stoltz, C. Raschke, K. Courtois, RW 90, a smart reaction wheel progress from BIRD to TET-1, *Proceedings of the Eighth IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation*, IAA-B8-1204, Berlin, April 2011.
- [18] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*, Second Edition, ed: Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [19] T. Soderstrom, P. Stoica, *System Identification*, First Edition, pp.40-178, London, England, Prentice-Hall, Inc., 1988.
- [20] T. C. Hsia, *System Identification: Least-Squares Methods*, 1977.
- [21] A. J. Jerri, The Shannon sampling theorem—Its various extensions and applications: A tutorial review, *Proceedings of the IEEE*, 65(11), pp. 1565-1596, 1977.

غیرخطی است، محدودیت‌هایی داشته و با مدل واقعی تفاوت‌هایی دارد. البته تفاوت‌ها بیشتر در محدوده‌های فرمان‌های اعمالی که ناشی از محدودیت‌های عملی چرخ است. حداکثر سرعت چرخ عکس‌العملی در دو جهت راستگرد و چپگرد، 7800 دور بر دقیقه بوده و حداکثر شتاب چرخ در دو جهت به مقدار 314 دور بر ثانیه محدود می‌شود؛ بنابراین در صورت استفاده از این مدل در سیستم کنترل، باید یکتابع اشباع برای محدود نمودن فرمان سرعت و یکتابع اشباع برای محدود کردن دستور شتاب استفاده شود. در صورت محدود نمودن حریان الکتریکی چرخ به مقدار کمتر از 700 میلی آمپر نتایج به دست آمده برای شتاب با مدل استخراج شده تفاوت خواهد داشت.

از آن جا که چرخ‌های عکس‌العملی ماهیتاً سیستم‌های لختی بوده و تغییرات ناگهانی در آن‌ها اتفاق نمی‌افتد و همچنین به دلیل کم بودن فرکانس کاری الگوریتم‌های کنترل وضعیت ماهواره که حداکثر در حد چند هرتز است، استفاده از این مدل در فرکانس‌های کاری الگوریتم‌های کنترل وضعیت ماهواره تقریباً تأثیر زیادی بر مدل استفاده شده ندارد.

6- نتیجه‌گیری

در این مطالعه نتایج شناسایی یک مدل دینامیکی خطی برای یک چرخ عکس‌العملی نمونه با استفاده از داده‌های تجربی ارائه شده است. جهت اکتساب داده‌های شناسایی یک بستر آزمون سختافزاری شامل چرخ عکس‌العملی، برد پردازشی، نمایشگر و درگاه ارتباطی باس کن طراحی و پیاده‌سازی شده و داده‌های تجربی به صورت برخط با سرعت یک مگا بیت بر ثانیه استخراج شده است. نوآوری این پژوهش در استخراج یک مدل ریاضی با دید کاربردی با استفاده از نتایج آزمون‌های سختافزاری است. مدل خود رگرسیو و خود رگرسیو میانگین متحرک با ورودی خارجی برازش شده برای چرخ ضمن ساده بودن از دقت کافی برخوردار هستند. نتایج حاصل از مقایسه بین خروجی مدل پیشنهادی و خروجی واقعی چرخ نشان‌دهنده مناسب بودن مدل پیشنهاد شده است. در مقایسه بین مدل‌های دینامیکی خطی مطالعه شده، مدل خود رگرسیو پیشنهادی، خروجی چرخ را برای داده‌های ارزیابی به خوبی ردهایی کند. از دیگر ویژگی‌های این مدل پیشنهادی می‌توان به قابلیت استفاده در کابدهای طراحی کنترل کننده برای کنترل وضعیت ماهواره و بررسی خرابی در چرخ عکس‌العملی و تأثیر آن بر وضعیت ماهواره اشاره کرد. در ادامه پیشنهاد می‌شود با توجه به وجود پدیده اشباع در عملکرد چرخ عکس‌العملی شناسایی مدل غیرخطی برای آن صورت گیرد.