

# شناسایی پارامتر موتورها با جستجوی Cuckoo با استفاده از روابط حالت پایدار

عمر رودریگوئز-آبرئو<sup>۱،۲،۳</sup>، خوزه میگوئل هرماندز-پاردس<sup>۳،۴</sup>، آلفاندرو فلورس رنجل<sup>۱،۳</sup>، کارلوس فوئنتس-سیلوا<sup>۱،۳</sup> و فرانسيسكو آنتونیو کاستیو ولز،

## چکیده

موتورهای جریان مستقیم (DC) به طور گسترده استفاده می شوند. بنابراین، آنها در معرض مطالعات متعدد هستند، تکنیک‌ها یا تحلیل‌های مختلف کنترلی نیاز به یک مدل موتور DC دینامیکی دارند. پارامترها برای تکمیل مدل مورد نیاز هستند که به دست آوردن آن می تواند چالش برانگیز باشد. بنابراین، تکنیک های تخمین پارامتری متعددی توسعه داده شده است. این مقاله یک الگوریتم جستجوی Cuckoo فراابتکاری اصلاح شده برای موتورها را به عنوان یک ابزار تخمین پارامتریک ارائه می کند. تابع هزینه بر اساس خطای جریان و سرعت است که هنگام اعمال یک مرحله ولتاژ ورودی به موتور به دست می آید. تفاوت اصلی با کارهای مشابه این است که برای تعیین پارامترها از معادلات حالت پایدار استفاده کردیم. الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های Steiglitz-McBride و جستجوی Cuckoo اصلی مقایسه می شود تا عملکرد آن به طور عینی ارزیابی شود. نتایج شبیه سازی شده و تجربی نشان می دهد که الگوریتم پیشنهادی می تواند پارامترها را با دقت بهتری نسبت به جستجوی Cuckoo اصلی و Steiglitz-McBride محاسبه کند. اصلاحات انجام شده در الگوریتم اصلی جستجوی Cuckoo امکان یافتن مقادیر موتور پارامترها با ریشه میانگین مربعات خطای کمتر از ۰،۱٪ برای سیگنال های به دست آمده با شبیه سازی و کمتر از ۱٪ برای سیگنال های واقعی نمونه برداری شده در ۰،۰۰۱ ثانیه را فراهم می کند.

## عبارات صفحه اول

جستجوی Cuckoo، فراابتکاری، تخمین پارامتر، موتور DC، الگوریتم Steiglitz-McBride.

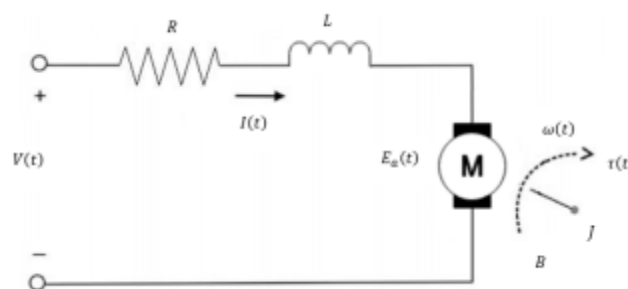
## مقدمه

موتورهای الکتریکی محرک هایی هستند که به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند و می توان آنها را در بسیاری از فرآیندهایی که عمدتاً به دلیل کارایی و هزینه کم نیاز به حرکت دارند، یافت [۱]. موتورهای

جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC) دارای مزایای اضافی مانند عملکرد بی صدا، نگهداری کم و اندازه کوچک هستند. این مزایا امکان استفاده از آن را در زمینه های متعدد [۲] فراهم می کند و منجر به توسعه تحقیقات مختلفی شده است که به بهبود عملکرد آن کمک می کند. به عنوان مثال، در [۳] یک روش جبرانی برای حذف سریع خطاهای کموتاسیون و بهبود عملکرد موتور پیشنهاد شده است. مرجع [۴] روشی را برای تخمین موقعیت زاویه ای و سرعت زاویه ای سیگنال تفکیک کننده با دقت بالا بر اساس فیلتر چبیشف پیشنهاد می کند. در [۵]، یک موتور DC بدون برس بدون شکاف با گشتاور بالا (BLDC) پیشنهاد شده است که گشتاور و کارایی بالایی را نشان داده است، یا حتی می توانیم کارهای اخیر را پیدا کنیم که شبیه سازی این محرک ها را مطالعه می کنند [۶]. حوزه دیگر مطالعه حرکتی کنترل است. در این زمینه، محققان تلاش می کنند تا نحوه راندن موتورها را بهبود بخشند. در [۷]، یک کنترل حالت لغزشی تطبیقی توسعه داده شد و عملکرد بهتری در مقایسه با سایر کنترل کننده های معمولی مانند PID مشاهده شد. در [۸]، نویسندگان یک روش تقریب تابع متعامد سیستم کنترل پس گام تطبیقی مبتنی بر FAT را با سه حالت کنترل موتور پیشنهاد کردند: (۱) حالت کنترل گشتاور موتور، (۲) حالت کنترل جریان موتور، و (۳) حالت کنترل ولتاژ موتور. در [۹]، یک قانون کنترل سلسله مراتبی برای موتورهای DC تغذیه شده توسط مبدل Cuk قدرت DC-DC، که بهبود عملکرد را هنگام استفاده از مبدل Cuk برای مسیر اتصال سرعت زاویه ای نشان می دهد. نمونه دیگری از کارهای کنترلی [۱۰] است که در آن نویسندگان بر بهینه سازی کنترل با استفاده از الگوریتم های فراابتکاری تمرکز می کنند. کارهای قبلی نشان می دهد که سیستم های کنترلی که توسعه می یابند نیاز به دانستن مدل دینامیکی موتور دارند. مدل را می توان در معادلات ریاضی به روشی نسبتاً ساده بیان کرد [۱۱]. با این حال، عدم قطعیت پارامترهای موتور در مدل یکی از مشکلات اصلی در این دستگاه ها است [۱۰]. این دلیلی برای توسعه تکنیک های متعدد برای تخمین پارامتری موتورهای مدل است.

در برخی از کارها مانند [۱۲]، پارامترهای مدل موتور با استفاده از مشاهده گر اختلال (DOB) به عنوان حسگر گشتاور تخمین زده می شوند. گزینه دیگر تکنیک مورد مطالعه در [۱۳] است، که در آن نویسندگان از یک فیلتر کالمن توسعه یافته و اندازه گیری مشتق جریان برای تخمین پارامترهای موتور رلوکتانس سنکرون استفاده می کنند و نتایج خود را به صورت تجربی نشان می دهند. با این حال، خطاها در برخی از پارامترها نسبتاً قابل توجه هستند. در کارهای قبلی، ما سودمندی الگوریتم Steiglitz-McBride را به عنوان یک تخمین گر پارامتری تأیید کردیم و نتایج دقیقی را نشان دادیم [۱۴]. نیاز به تخمین صحیح آنقدر زیاد است که نرم افزاری مانند Matlab دارای یک ابزار تخمین پارامتر اکتشافی یکپارچه است. این ابزار در [۱۵] برای تخمین پارامترهای یک موتور BLDC برای ویلچر برقی استفاده می شود. یکی دیگر از گزینه های تخمین پارامتری که در سال های اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است، الگوریتم های فراابتکاری نامیده می شوند که الگوریتم های جستجوی الهام گرفته از فرآیندهای طبیعی هستند. پرکاربردترین الگوریتم الگوریتم ژنتیک است. در مطالعاتی مانند [۱۶]، [۱۷] به عنوان تخمین گر پارامتری استفاده می شود. در کار [۱۸] از یک الگوریتم

فراابتکاری به عنوان برآوردگر در موتور القایی استفاده شده است. یکی دیگر از گزینه های شناخته شده الگوریتم جستجوی Cuckoo است که نتایج مشابهی با الگوریتم های ژنتیک دارد اما تعداد تکرارهای کمتری دارد [۱۹]. این مشخصه در کارهایی که از شبیه سازی مدل های پویا استفاده می شود مفید است زیرا زمان پردازش را کوتاه می کند. در همین خط کار، چندین تحقیق مانند [۲۰]-[۲۲]، که در آن الگوریتم جستجوی Cuckoo به طور خاص برای بهینه سازی کنترل موتور استفاده می شود، انجام شد. در [۲۳]، این الگوریتم برای تنظیم خودکار فرآیندهای شبکه عصبی بازگشتی استفاده می شود. الگوریتم جستجوی Cuckoo که قبلاً به عنوان تخمین گر پارامتری موتورهای PMSM استفاده می شد را می توان در [۲۴] مشاهده کرد، جایی که نویسندگان نیز بهبودی در الگوریتم پیشنهاد می کنند. برخلاف آثار [۱۲]-[۱۴]. این مقاله یک تخمین گر فراابتکاری تخصصی برای موتور جریان مستقیم آهنربای دائمی را ارائه می کند که دارای مزیت سادگی الگوریتمی نسبت به روش های اکتشافی است [۲۵]. از سوی دیگر، با سایر کارهای فراابتکاری، مانند ارائه شده در [۲۴] متفاوت است، زیرا از روابط بین پارامترهای موتور استفاده می شود. این روابط فقط در حالت ثابت انجام می شود. به این ترتیب، می توان مسئله تخمین پارامتریک جستجوی Cuckoo را به جای ۵ پارامتری که معمولاً در این نوع موتورها تخمین زده می شود، به ۳ پارامتر کاهش داد. دو پارامتر دیگر مستقیماً از روابط حالت پایدار در یک موتور dc محاسبه می شوند. برای به دست آوردن این روابط فقط به پاسخ گام موتور در سرعت و جریان نیاز است. دو موتور با پارامترهای نامی شناخته شده برای تأیید عملکرد الگوریتم پیشنهادی استفاده شد و الگوریتم به صورت شبیه سازی شده و آزمایشی مورد آزمایش قرار گرفت. برای شبیه سازی از محیط Matlab-Simulink استفاده شده است که قسمت Matlab وظیفه اجرای الگوریتم جستجوی Cuckoo را بر عهده دارد. در مقابل، سیمولینک مدل موتور را اجرا می کند. سیگنال جریان واقعی و سیگنال سرعت واقعی برای بخش تجربی استفاده شد. این سیگنال ها زمانی به دست می آیند که یک ولتاژ پله ای به موتور اعمال می شود.



شکل ۱. مدل موتور DC، سیستم های معادل.

الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم اکتشافی Steiglitz-McBride برای اعتبارسنجی عملکرد مقایسه شده است. علاوه بر این، همچنین با الگوریتم جستجوی Cuckoo اصلی مقایسه می شود تا بهبود را نسبت به

روش فراابتکاری سنتی نشان دهد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی می‌تواند پارامترها را با دقت بیشتری نسبت به جستجوی Cuckoo اصلی و الگوریتم Steiglitz-McBride پیدا کند. بر این اساس، بقیه کار به شرح زیر تنظیم شده است. بخش II یک مدل دینامیکی از یک موتور جریان مستقیم آهنربای دائم و معادلات آن در حالت پایدار ارائه می‌کند. بخش III اجرای الگوریتم جستجوی Cuckoo را به عنوان یک برآوردگر و ترکیب آن با روابط حالت پایدار توسعه می‌دهد. بخش IV نتایج به دست آمده در سطح شبیه سازی را نشان می‌دهد و الگوریتم پیشنهادی را با الگوریتم اصلی مقایسه می‌کند. بخش V نتایج به دست آمده را به صورت تجربی نشان می‌دهد. این بخش همچنین الگوریتم پیشنهادی را با الگوریتم Steiglitz-McBride مقایسه می‌کند. در نهایت، بخش ششم نتیجه گیری این کار را نشان می‌دهد.

## II. مدل موتور دینامیک و روابط حالت پایدار

مدل موتور جریان مستقیم آهنربای دائم به طور گسترده در چندین کار مورد مطالعه قرار گرفته است [۶]، [۱۱]. می‌توان آن را به عنوان یک سیستم متشکل از یک بخش الکتریکی و یک بخش مکانیکی نشان داد. شکل ۱ سیستم‌های معادل موتور را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، (۱)، (۲)، (۳)، و (۴) دینامیک این نوع موتور را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned}v(t) &= RI(t) + L \frac{dI(t)}{dt} + E(t) \\ \tau(t) &= J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) + T_L \\ E(t) &= K_e \omega(t) \\ \tau(t) &= K_m I(t)\end{aligned}$$

که در آن  $v(t)$  ولتاژ القایی در آرمیچر است.  $I(t)$  جریان است.  $\omega(t)$  سرعت زاویه ای روتور است.  $E(t)$  ولتاژ الکتریکی القایی است.  $\tau(t)$  گشتاور روتور است.  $R$  مقاومت اهمی سیم پیچ‌های روتور است.  $L$  اندوکتانس سیم پیچ‌های روتور است.  $J$  لحظه اینرسی روتور است.  $B$  ضریب اصطکاک ویسکوز بین روتور و استاتور است.  $T_L$  گشتاور بار است.  $K_e$  ثابت الکتریکی و  $K_m$  ثابت مکانیکی است. معادلات قبلی را می‌توان برای ایجاد سیستمی از معادلات دیفرانسیل بر اساس جریان و سرعت موتور ترکیب کرد، بنابراین موتور بدون بار ( $T_L = 0$ ) را در نظر گرفت و (۳) و (۴) را در (۱) و جایگزین کرد. (۲) به ترتیب به دست می‌آوردیم:

$$\begin{aligned}\frac{dI(t)}{dt} &= \frac{v(t) - RI(t) - K_e \omega(t)}{L} \\ \frac{d\omega(t)}{dt} &= \frac{K_m I(t) - B\omega(t)}{J}\end{aligned}$$

معادلات قبلی مدل دینامیکی یک موتور را نشان می‌دهد که (۵) معادله جریان و (۶) معادله سرعت را نشان می‌دهد. اندازه گیری هر دو متغیر (سرعت و جریان) نسبتاً ساده است. با این حال، شش پارامتر ناشناخته

هستند که به موتور مورد استفاده بستگی دارد. از سوی دیگر، می توان در نظر گرفت که به طور کلی، ثابت الکتریکی دارای قدری مشابه با ثابت مکانیکی است [۲]. بنابراین، مشکل را می توان به دستیابی به پنج پارامتر کاهش داد. حتی به این ترتیب، مشکل هنوز مجموعه ای از راه حل های بی نهایت دارد. به طور معمول، کار قبلی با طرح مسئله با این بردار ۵ پارامتری مشکل را حل می کند. با این حال، چند رابطه تکمیلی را می توان در پاسخ گام حرکتی یافت. حالت پایدار حالتی است که در آن متغیرهایی که سیستم را توصیف می کنند، نسبت به زمان تغییر نمی کنند. از نظر کنترل، وضعیت زمانی تعیین می شود که مقدار خروجی بیش از ۲٪ از مقدار نهایی پاسخ به یک سیگنال پله تغییر نکند. بنابراین، برای به دست آوردن روابط اضافی، می توان پاسخ سیستم به یک ورودی مرحله ای را تحلیل کرد و تنها با در نظر گرفتن حالت پایدار، روابط زیر را به دست آورد:

$$R = \frac{v_{ss} - K \omega_{ss}}{I_{ss}}$$

$$B = \frac{K I_{ss}}{\omega_{ss}}$$

که در آن  $K$  نشان دهنده بزرگی هر دو ثابت (الکتریکی و مکانیکی)،  $I_{ss}$  جریان حالت پایدار است، در مقابل ولتاژ اعمال شده در حالت پایدار (قدر گام)، و  $\omega_{ss}$  سرعت در حالت پایدار است. با توجه به اینکه (۷) و (۸) فقط برای پاسخ موتور به ورودی های پله در حالت پایدار معتبر هستند.

### III. الگوریتم جستجوی Cuckoo به عنوان برآوردگر پارامتری

الگوریتم جستجوی Cuckoo یک الگوریتم فراابتکاری است که توسط Suash Deb و Xin-she Yang در سال ۲۰۰۹ توسعه یافته است. این الگوریتم بر اساس نحوه تولید مثل این پرنده و قرار دادن تخم های خود در لانه های پرندگان دیگر است. اگر تخم ها به اندازه کافی به پرندگان میزبان نزدیک شوند، با موفقیت از تخم بیرون می آیند. در غیر این صورت، پرنده میزبان فریب را کشف می کند و تخم را رها می کند یا لانه را ترک می کند. یانگ با در نظر گرفتن این رفتار، الگوریتم جستجوی Cuckoo را طراحی کرد، جایی که تخم مرغ در لانه نشان دهنده یک راه حل است. زمانی که یک راه حل تصادفی پیشنهادی شبیه راه حل مورد نظر باشد، تخم مرغ شانس بیشتری برای عبور از تکرار بعدی خواهد داشت. این الگوریتم به دلیل انعطاف پذیری بالا در کارهای متعدد مورد استفاده قرار گرفته است [۲۶]. به طور کلی، الگوریتم جستجوی Cuckoo در جدول ۱ خلاصه شده است، جایی که شبه کد نمایش داده شده است.



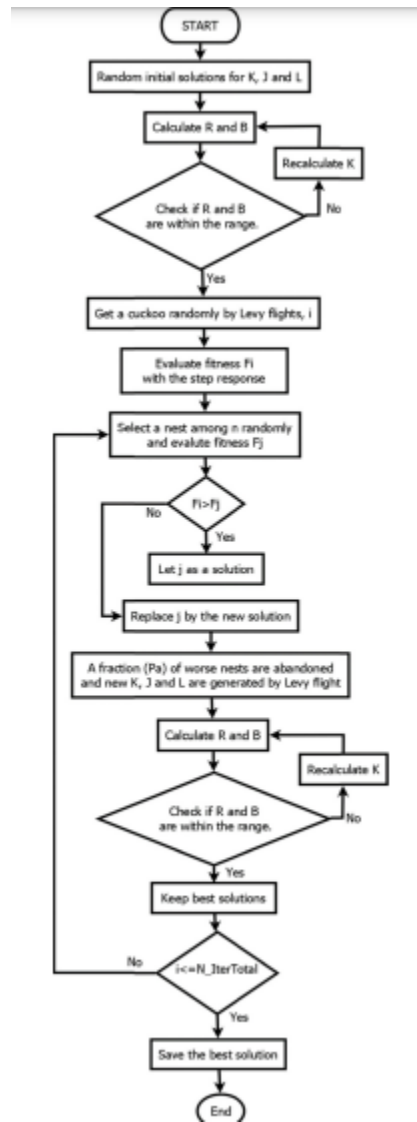
با عملکرد عالی، خطای مطلق انتگرال (IAE) [۲۸] در طول مسیر است. با این حال، موتور توسط یک سیستم معادلات دیفرانسیل توصیف می شود. بنابراین، در نظر گرفتن خطا در جریان و خطا در سرعت مهم است. هنگام کار با دو بردار، در کارهای قبلی نشان داده شده است که فاصله اقلیدسی شکل مناسبی از تابع تناسب است [۲۹]، با در نظر گرفتن تابع تناسب بالا که در ابتدا پیشنهاد شد (۹).

$$fitness = \frac{1}{\sqrt{\sum (I - I_s)^2 + \sum (\omega - \omega_s)^2}}$$

که در آن  $I_s$  و  $\omega_s$  جریان و سرعت برآورد شده هستند. تابع قبلی می تواند کار کند. با این حال، به طور کلی، سرعت زاویه ای از نظر اندازه بسیار بیشتر از جریان مصرفی است. بنابراین (۹) توابعی را اولویت بندی می کند که با سیگنال سرعت زاویه ای مطابقت دارند حتی زمانی که سیگنال فعلی خطاهای قابل توجهی را ارائه می دهد. هر دو سیگنال جریان و سیگنال سرعت نرمال می شوند تا از این اثر جلوگیری شود. الگوریتم با موارد فوق و سیگنال های پاسخ جریان و سرعت به ورودی پله ولتاژ تعریف می شود. بنابراین، می توان از آن به عنوان یک برآوردگر با فرآیند ارائه شده در شکل ۲ استفاده کرد.

#### IV. نتایج شبیه سازی

برای اجرای الگوریتم نشان داده شده در قسمت قبل از محیط Matlab Simulink استفاده کردیم. قسمت Simulink رفتار موتور را با مدل دینامیکی شبیه سازی می کند که در آن از (۵) و (۶) برای به دست آوردن پاسخ موتور (جریان و سرعت) با انتخاب پارامترهای ساخته شده توسط الگوریتم جستجوی Cuckoo که در Matlab اجرا شده است استفاده می شود. شبیه سازی به مدت ۲,۸ ثانیه با روش عددی گام ثابت ۰,۰۰۱ ثانیه اجرا می شود تا با سیستم جمع آوری داده های مورد استفاده در بخش آزمایشی سازگار شود. در این شکل سیگنال های شبیه سازی شده از نظر زمانی و نمونه ها با سیگنال های فیزیکی منطبق خواهند شد. برای اولین آزمایش از موتور RMCS۲۰۰۴ برند Robokits استفاده کردیم. برای این موتور از پارامترهای اسمی نشان داده شده در جدول ۲ استفاده شده است. پارامترهای به دست آمده توسط الگوریتم پیشنهادی پس از اتمام آزمایش در جدول ۲ نیز قابل مشاهده است. در شبیه سازی ها از ولتاژ ثابت ۱۰,۵ ولت استفاده شده است که پس از ۰,۵ ثانیه اعمال می شود. در شکل ۳ مقایسه بین سرعت به دست آمده با پارامترهای اسمی و سرعت به دست آمده با جستجوی Cuckoo اصلاح شده مشاهده شده است. به همین ترتیب، مقایسه جریان در شکل ۴ نشان داده شده است. نمودارهای بالا نشان می دهند که سیگنال ها بسیار مشابه هستند، با مقدار RMSE ۰,۰۰۹۹ برای سرعت و ۰,۰۰۱۱ برای جریان.

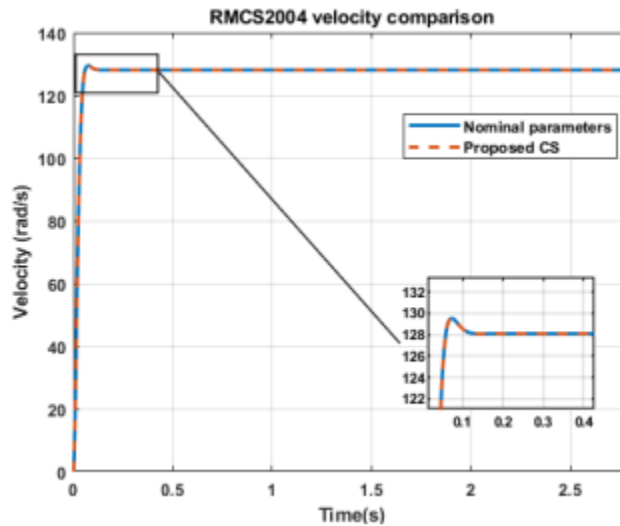


شکل ۲. نمودار جریان الگوریتم جستجوی Cuckoo اصلاح شده پیشنهادی که به عنوان تخمینگر پارامتر مدل موتور استفاده می شود.

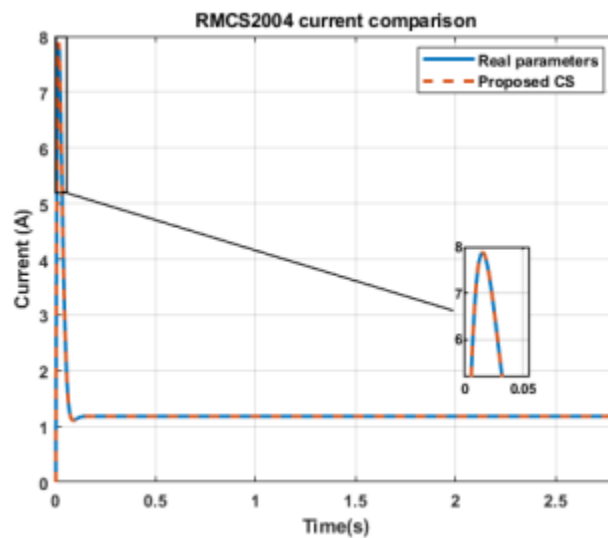
Parameter	Nominal value	CS value.	Error (%)
R	0.921042 $\Omega$	0.920353 $\Omega$	0.07
K	0.073472	0.073478	0.01
L	0.007759 H	0.007747 H	0.14
J	0.000136 Nm	0.00013633 Nm	0.24
B	0.000678 $\frac{Kg\ m^3}{s^2}$	0.00067805 $\frac{Kg\ m^3}{s^2}$	0.01

جدول ۲. پارامترهای اسمی موتور RMCS۲۰۰۴ در مقابل پارامترهای به دست آمده توسط CS.





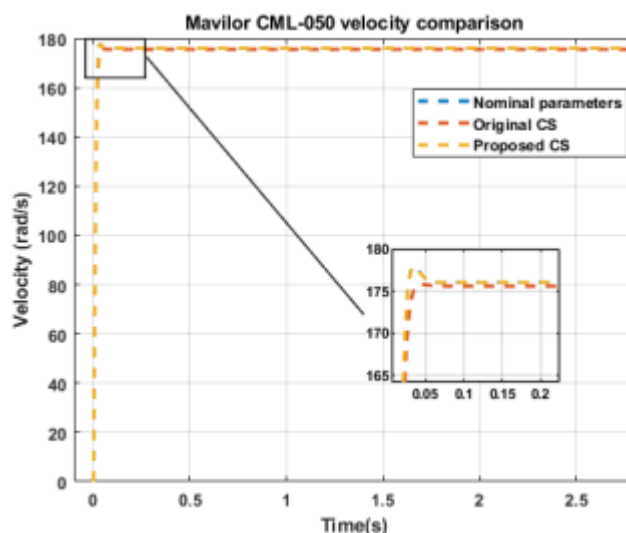
شکل ۳. مقایسه بین سرعت های RMCS2004 به دست آمده با پارامترهای اسمی و تخمینی.



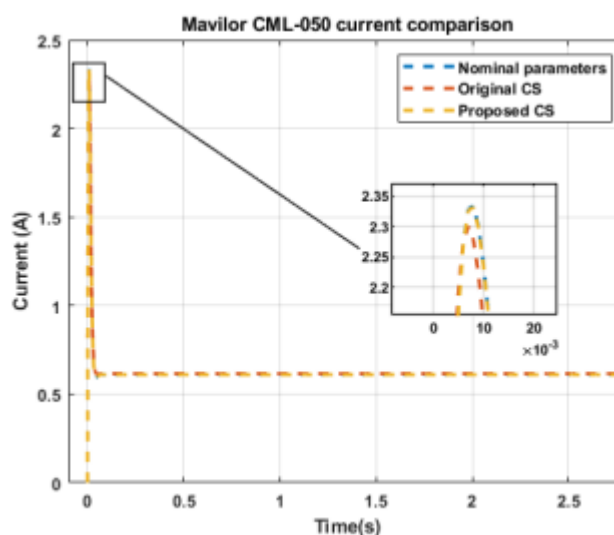
شکل ۴. مقایسه بین جریان RMCS2004 به دست آمده با پارامترهای اسمی و تخمینی.

Parameter	Nominal value.	Original CS.		Proposed CS.	
		Value	Error	Value	Error
R	3.1363 $\Omega$	3.3176 $\Omega$	5.78%	3.1417 $\Omega$	0.17%
K	0.048774	0.048173	1.23%	0.048754	0.04%
L	0.01307 H	0.01175 H	10.07%	0.01306 H	0.04%
J	0.000009 Nm	0.0000885 Nm	1.66%	0.0000089 Nm	0.05%
B	0.000169 $\frac{kg \cdot m^3}{s^2}$	0.0001687 $\frac{kg \cdot m^3}{s^2}$	0.15%	0.0001689 $\frac{kg \cdot m^3}{s^2}$	0.04%

جدول ۳. Mavilor CML-50 MOTOR مقایسه پارامترهای اسمی، پارامترهای به دست آمده با جستجوی اصلی Cuckoo و پارامترهای به دست آمده توسط الگوریتم پیشنهادی.



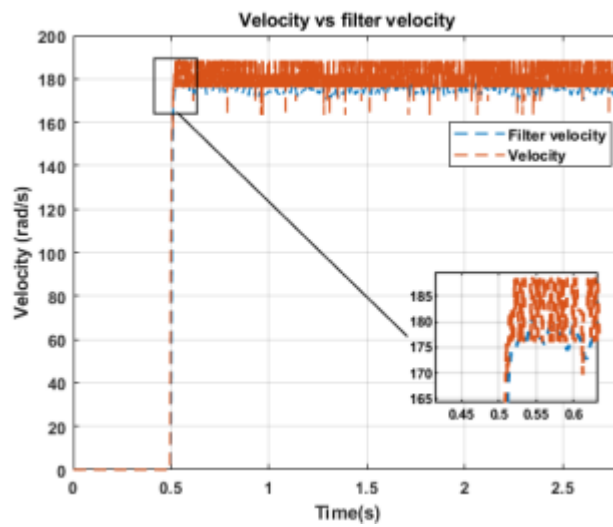
شکل ۵. مقایسه بین سرعت با پارامترهای اسمی  $Mavilor\ CML-050$  و سرعت با پارامترهای تخمین زده شده.



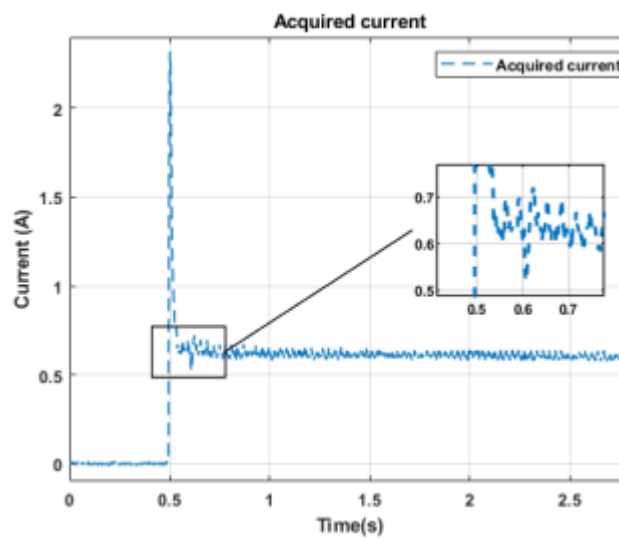
شکل ۶. مقایسه بین جریان با پارامترهای اسمی  $Mavilor\ CML-050$  و جریان با پارامترهای تخمین زده شده.

برای آزمایش دوم از موتور  $Mavilor\ CML-050$  استفاده شد. علاوه بر این، روش پیشنهادی با الگوریتم جستجوی Cuckoo اصلی با پنج پارامتر تصادفی در این آزمون مقایسه شده است. پارامترهای به دست آمده با روش پیشنهادی، پارامتر به دست آمده از جستجوی اصلی Cuckoo، و پارامترهای اسمی را می توان در جدول ۳ مشاهده کرد. برای نشان دادن مقایسه گرافیکی جدول ۳، شکل ۵ مقایسه بین سرعت به دست آمده با سرعت اسمی را نشان می دهد. پارامترها و سرعت های به دست آمده توسط الگوریتم های جستجوی Cuckoo (اصلی و پیشنهادی). به همین ترتیب در شکل ۶ مقایسه جریان ها را نشان می دهد. برای ارزیابی خطای عددی بهتر، RMSE برای هر سیگنال محاسبه شد و نتایج زیر به دست آمد: برای روش اصلی، خطای

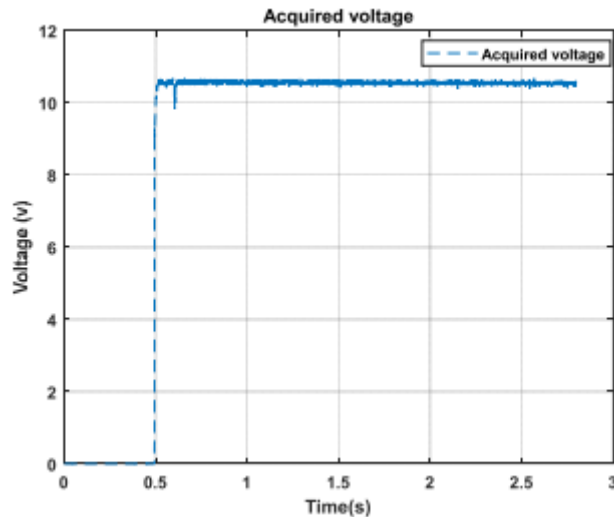
RMSE ۰,۵۷۴۱ در سرعت و ۰,۰۰۹۱ در جریان. از سوی دیگر، RMSE ۰,۰۰۹۳ در سرعت و RMSE ۰,۰۰۱۶ در جریان برای روش پیشنهادی وجود دارد.



شکل ۷. سرعت اکتسابی و سرعت فیلتر شده. سیگنال اصلی در پاسخ به یک سیگنال ولتاژ پله ای با قدر ۱۰,۵ ولت به دست آمد.



شکل ۸. جریان اکتسابی. سیگنال در پاسخ به یک سیگنال ولتاژ پله ای با قدر ۱۰,۵ ولت به دست آمد.

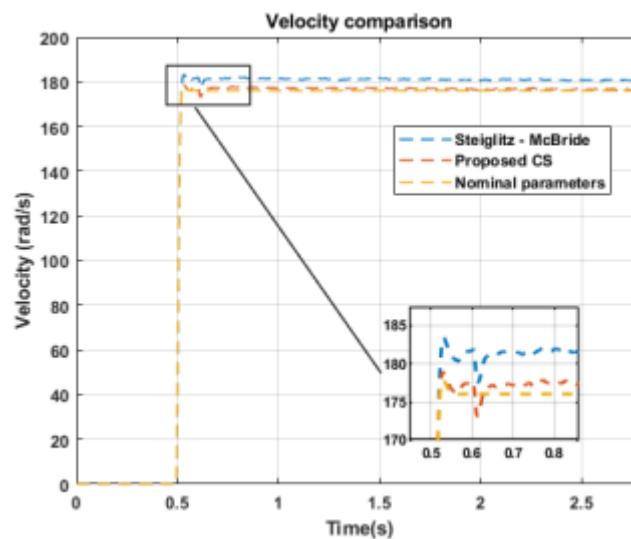


شکل ۹. ولتاژ اکتسابی. ۱۰,۵ ولت در ۰,۵ ثانیه اعمال شد.

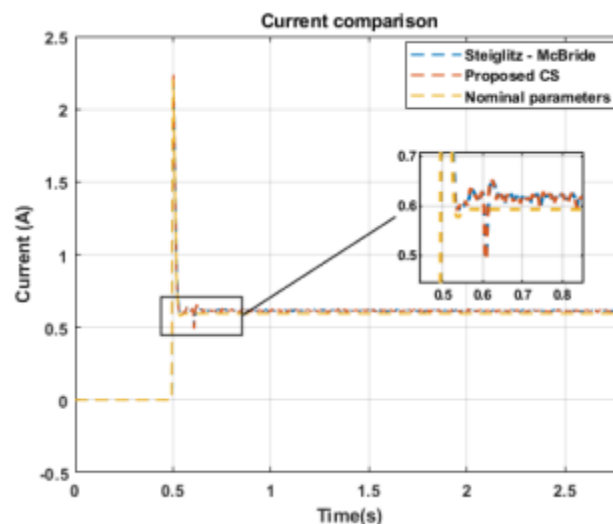
## ۷. نتایج تجربی

موتور Mavilor CML-۰۵۰ برای آزمایش‌های تجربی استفاده شد و پارامترهای اسمی آن در جدول ۳ نشان داده شده است. موتور، مانند ولتاژ و جریان آرمیچر. به عنوان سنسور سرعت، از رمزگذار ادغام شده در موتور Mavilor استفاده شد. جریان با سنسور اثر سالن اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های اصلی سیستم جمع‌آوری داده به شرح زیر است: سرعت پردازنده ۴۸ مگاهرتز، حافظه ۱۲۸ SRAM کیلوبایتی ۸، ۱۰۲۴ LC۲۳ کانال ۱۲ بیتی ۲، ADC mcp۳۲۰۸ کانال ۱۲ بیتی DAC mcp۴۹۲۲، اتصال بلوتوث ۲ × ۱۶ صفحه نمایش LCD، اتصال SPI، اتصال I2C، اتصال USB در حالت Bulk، نشانگر RGB، خروجی‌های PWM، خواننده رمزگذار Quadrature، سیستم بوت لودر. نتایج مختلف برای توسعه این کار با سرعت اکتساب ۱ کیلوهرتز به دست آمد. اولین مرحله این است که موتور را در معرض ورودی ولتاژ پله ای با قدر ۱۰,۵ ولت قرار دهید. این سیگنال از ۰,۵ دوم اعمال می‌شود. پس از آن، سیگنال‌های جریان و ولتاژ تا ۲,۸ ثانیه ذخیره شدند. با توجه به سیستم اکتساب، مشاهده می‌شود که سیگنال سرعت حاوی نویز بیش از حد است، بنابراین تصمیم گرفته شد فیلتر دیجیتال Chebyshev نوع ۱ اعمال شود. سرعت اولیه و نتیجه فیلتر را می‌توان در شکل ۷ مشاهده کرد. از سوی دیگر، در شکل ۸، ما می‌توانیم سیگنال جریان اصلی و اکتسابی را مشاهده کنیم. در نهایت، در شکل ۹، سیگنال ولتاژ نمایش داده شد. قبل از شروع الگوریتم، لازم است جریان و سرعت در حالت پایدار به دست آید. نویز ذاتی به دست آوردن سیگنال‌ها است. بنابراین این مقادیر از میانگین پنج مقدار آخر ثبت شده به دست می‌آیند. نتایج با الگوریتم Steiglitz-McBride (که بهبود روش حداقل مربعات بازگشتی است) برای مقایسه عملکرد روش پیشنهادی مقایسه شده است. از طریق روش Steiglitz-McBride سعی شده است تا خطای درجه دوم حاصل از یک فرآیند به صورت تکراری به حداقل برسد. پیش فیلتر کردن ورودی و خروجی‌های اندازه‌گیری شده سیستم، محاسبه پارامترهایی که فیلتر دیجیتالی معادل سیستم را تعریف می‌کنند. پس از آن، در نظر گرفتن نتایج به دست آمده در تکرار فعلی به عنوان

نقطه شروع برای تکرار بعدی. نتایج عددی دو الگوریتم در جدول ۴ نشان داده شده است. به همین ترتیب، در شکل ۹ مقایسه بین سرعت واقعی و به دست آمده توسط دو الگوریتم نشان داده شده است. علاوه بر این، شکل ۱۱ جریان الکتریکی واقعی را با جریان تخمین زده شده توسط دو الگوریتم Cuckoo (اصلی و پیشنهادی) نشان می دهد. در نهایت، مقادیر RMSE سرعت و جریان برای هر روش محاسبه می شود. الگوریتم Steiglitz-McBride RMSE ۲,۱۵۴۲ را در سرعت و RMSE ۰,۰۲۹۶ را در جریان ارائه می دهد. از سوی دیگر، روش جستجوی Cuckoo پیشنهادی دارای RMSE ۰,۸۵۶۲ در سرعت و RMSE ۰,۰۲۴۲ در جریان است.



شکل ۱۰. مقایسه سرعت بین سیگنال های بدست آمده توسط Steiglitz - McBride، Cuckoo Search پیشنهادی و اصلی.



شکل ۱۱. مقایسه فعلی بین سیگنال های بدست آمده توسط Steiglitz - McBride، Cuckoo Search پیشنهادی، و اصلی.

Parameter	Nominal value	Steiglitz - McBride		Proposed CS.	
		Value	Error	Value	Error
R	3.1363 $\Omega$	3.0031 $\Omega$	4.44%	3.0112 $\Omega$	3.99%
K	0.048774	0.0477	2.25%	0.049203	0.88%
L	0.01307 H	0.013556 H	3.72%	0.01144 H	12.41%
J	$9.0 \times 10^{-6}$ Nm	$9.0011 \times 10^{-6}$ Nm	0.01%	$8.55 \times 10^{-6}$ Nm	4.99%
B	$1.690 \times 10^{-4}$ $\frac{kg \cdot m^3}{s^2}$	$1.7458 \times 10^{-4}$ $\frac{kg \cdot m^3}{s^2}$	16.35%	$1.705 \times 10^{-4}$ $\frac{kg \cdot m^3}{s^2}$	0.02%

جدول ۴. Mavilor CML-۰۵۰ MOTOR مقایسه پارامترهای اسمی، پارامترهای بدست آمده توسط الگوریتم اصلی Cuckoo و به دست آمده توسط الگوریتم Cuckoo پیشنهادی.

## VI. نتیجه

نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی می‌تواند به درستی پارامترهای یک موتور را در شبیه‌سازی و آزمایش‌های واقعی تخمین بزند. نتایج همچنین حاکی از بهبود الگوریتم اصلی جستجوی Cuckoo و عملکرد بهتر نسبت به روش Steiglitz-McBride است. الگوریتم پیشنهادی نتایج بهتری نسبت به الگوریتم جستجوی Cuckoo اصلی دارد زیرا به روابط حالت پایدار احترام می‌گذارد، که همیشه با مقادیر تصادفی تخمین زده شده توسط الگوریتم اصلی اتفاق نمی‌افتد. از سوی دیگر، نتایج کمی بهتر به الگوریتم Steiglitz-McBride ارائه می‌دهد. اگرچه این روش‌های فراابتکاری و ابتکاری بهبود یافته را نشان می‌دهد، الگوریتم پیشنهادی در این کار فقط برای موتورهای DC قابل استفاده است. الگوریتم پیاده‌سازی شده به این روش به خطاها در حالت پایدار حساس می‌شود. بنابراین دقت الگوریتم تا حد زیادی تحت تأثیر دقت سیستم اکتساب است. با این حال، این مشکل را می‌توان با فیلتر کردن و تکنیک‌های میانگین کاهش داد. سیستم جمع‌آوری داده‌ها مانند هر سیستم سخت‌افزاری دیگری که با همین هدف طراحی شده است دارای محدودیت‌های فیزیکی است. این برد دارای مبدل ۱۲ بیتی آنالوگ دیجیتال است. بنابراین تشخیص تغییرات در سیگنال‌های آنالوگ ۱،۲۲ میلی‌ولت با ولتاژ مرجع ۵ ولت امکان‌پذیر است. این وضوح سیستم اکتساب است. اگرچه می‌توان آن را بهبود بخشید، اما از مبدل‌های ۸ بیتی یا ۱۰ بیتی که می‌توانند تغییرات ۱۹،۶ میلی‌ولت و ۴،۸ میلی‌ولت را به ترتیب اندازه‌گیری کنند، دقیق‌تر است. پاسخ محاسبه شده از پارامترهای تخمین زده شده RMSE کمتری را در همه موارد نشان می‌دهد. اگرچه تمام روش‌های تست شده در این مقاله نمودارهای مشابهی را نشان می‌دهند، اما دقت هر الگوریتم را می‌توان در خطاهای عددی مشاهده کرد.