

Improving the model of Permanent Magnet Brushed DC Motor Used in Automotive Industry for Sensorless Speed Estimation

H. Saneie^{*}, J. Soltani-Soufiani, B. Abdolali

^{*} PhD student, Faculty of Electrical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 24/11/2021; Accepted: 09/05/2022)

Abstract

Permanent magnet brushed DC motors are widely used in the automotive industry due to their low cost and simple speed control. Sensorless speed and position estimation are interesting topics for car manufacturers and researchers. Usually, the armature current ripples are used for senseless speed estimation. Therefore, this paper aims to present a model to precisely predict the behavior of this motor, especially in the prediction of armature current ripples. First off, the previous models of DC motor are studied, and then a new test is proposed for measuring armature resistance to increase the accuracy of the model. Besides, the effect of cogging torque was investigated and the model was modified to consider the cogging torque. Finite element analysis used for different studies and verifying the performance of the proposed improved model. Comparison between the results obtained from the proposed model, previous model, and finite element method shows the superiority of the proposed model.

Keywords: DC Motor, Brushed Motor, Permanent Magnet (PM), Electric Window Winder, Motor Model, Finite Element Method.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

© Authors



^{*} Corresponding author E-mail: Hamid.saneie@gmail.com

بهبود مدل موتور جریان مستقیم آهنربای دائم جاروبک‌دار برای تخمین سرعت بدون سنسور در خودرو

حمید صانعی^{۱*}، جواد سلطانی صوفیانی^۲، بهروز عبدالعلی^۳

۱- دکترا، دانشگاه صنعتی شریف، ۳۰۲- کارشناسی ارشد، تیم تحقیق و توسعه، شرکت صنایع کرو، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۹)

چکیده

موتورهای جریان مستقیم جاروبک‌دار آهنربای دائم به علت قیمت کم و همچنین کنترل ساده در بخش‌های مختلف خودرو مانند پنجره‌های برقی، سیستم تهویه، کنترل آینه‌ها و ... استفاده می‌شوند. تخمین دقیق سرعت و موقعیت بدون سنسور موتورهای مورد استفاده در این کاربردها یکی از موضوعاتی است که مورد توجه سازندگان خودرو و پژوهشگران قرار گرفته است. این کار معمولاً با استفاده از تشخیص نوسان‌های جریان آرمیچر انجام می‌گیرد. از این رو در این مقاله سعی شده است مدلی ارائه شود تا امکان پیش‌بینی دقیق نوسان‌های جریان این موتورها را فراهم کند. برای این کار ضمن بررسی مدل‌های توسعه داده شده، با اصلاح آزمایش‌های مورد نیاز جهت تعیین پارامترهای مدل و همچنین در نظر گرفتن اثر گشتاور دندانه در آن، دقت مدل بهبود داده شده است. در بخش‌های مختلف برای انجام بررسی و همچنین تأیید عملکرد مدل بهبود داده شده، از نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود یک موتور نمونه استفاده شده است. مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با مدل قبلی و همچنین شبیه‌سازی اجزای محدود نشان‌دهنده برتری مدل پیشنهادی است.

کلیدواژه‌ها: موتور جریان مستقیم، موتور جاروبک‌دار، آهنربای دائم، پنجره برقی خودرو، مدل موتور، شبیه‌سازی اجزای

محدود

۱- مقدمه

استفاده می‌شود تا سرعت محور موتور را اندازه‌گیری کند [۵ و ۸]. همچنین شمارش پالس‌های تولید شده توسط سنسور اثر هال نیز می‌تواند برای تشخیص موقعیت شیشه استفاده شود. اما استفاده از حسگر اثر هال به معنای افزایش قیمت سیستم پنجره برقی است [۹]. از این رو روش‌های مختلفی جهت تشخیص سرعت و موقعیت بدون حسگر محور موتور از روی جریان آن پیشنهاد شده است که عموماً این روش‌ها به دو دسته روش‌های مبتنی بر مدل و مبتنی بر نوسانات جریان آرمیچر تقسیم می‌شوند [۱۰]. همچنین در [۱۱] راهکارهایی جهت ترکیب این دو روش برای حل ایرادات هر کدام از این روش‌ها پیشنهاد شده است.

دسته‌ای از پژوهش‌ها برای تعیین موقعیت و سرعت محور از مدل دینامیکی موتور استفاده می‌کنند [۵]. این روش‌ها بسیار ساده هستند و پیاده‌سازی آن‌ها با پردازنده‌های ارزان قیمت به راحتی قابل انجام است. اما عیب این روش‌ها وابستگی به پارامترهای موتور است که با تغییر آن‌ها (ناشی از تغییر دمای محیط یا به علت اثر اشباع در هسته موتور) دیگر تخمین سرعت دقت کافی را نخواهد داشت [۱۲ و ۱۳]. البته پارامترهای موتور می‌توانند به صورت دینامیکی تخمین زده شوند [۱۴ و ۱۵]، اما این راه‌حل معمولاً منجر به یک مدل غیرخطی می‌شود که افزایش هزینه را به دنبال دارد [۱۳]. روش دیگری که بسیار مرسوم است استفاده از نوسان‌های موجود در جریان موتور است [۲، ۱۲ و ۱۶-۱۷]. با توجه به اینکه فرکانس اصلی نوسان‌های موجود در جریان موتور

موتورهای جریان مستقیم جاروبک‌دار با توجه به قیمت پایین و کنترل ساده به طور گسترده در صنعت خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱ و ۲]. این موتورها معمولاً در سیستم پنجره برقی، پنجره سقفی^۱، کنترل آینه‌ها، سیستم تهویه به کار برده می‌شوند. در سیستم پنجره برقی خودرو و پنجره سقفی، سیستم حفاظتی ضد مانع یکی از امکاناتی است که در استانداردها و پژوهش‌های مختلف به آن توجه شده است [۳ و ۴]. حرکت ناگهانی شیشه و نیرویی که وارد می‌کند می‌تواند باعث آسیب به کودکان و دیگر سرنشینان و همچنین افزایش احتمال بروز تصادف شود [۵]. از این رو استانداردهایی مانند 74/60/EEC، MVSS118 و GB11552-2009 قوانینی در این زمینه جهت ایمنی خودرو و سرنشینان ارائه می‌کنند [۶ و ۷] تا سیستم پنجره برقی قابلیت تشخیص مانع را داشته باشد.

تشخیص مانع معمولاً از روی افزایش جریان ورودی موتور یا کاهش سرعت محور انجام می‌شود که معمولاً در هر دو روش نیاز به اطلاع از سرعت محور وجود دارد [۵، ۷]. علاوه بر این، در تمام روش‌ها اطلاع از موقعیت شیشه برای تمایز ایجادکردن بین مانع و حالت رسیدن شیشه به انتهای مسیر حرکت امری ضروری است. از این رو معمولاً از یک سنسور اثر هال بر روی محور موتور

* رایانامه نویسنده مسئول: Hamid.saneie@gmail.com

^۱ sunroof

مدل سنتی مورد استفاده جهت پیش‌بینی عملکرد رفتار موتور جریان مستقیم به‌صورت زیر ارائه می‌شود [۱۹]:

$$E_m = K_a \Phi \omega_m \quad (۱)$$

$$T_e = K_a \Phi i_a \quad (۲)$$

که در این روابط ω_m سرعت مکانیکی محور، i_a جریان آرمیچر و Φ شار زیر هر قطب است که به جنس آهنرباها، هسته‌ها و پارامترهای ابعادی ماشین بستگی دارد. E_m نیرومحرکه الکتریکی القایی در آرمیچر، T_e گشتاور تولیدی موتور و K_a یک ضریب ثابت است که به تعداد کل هادی‌ها، تعداد قطب موتور و مسیرهای موازی بستگی دارد. با در اختیار داشتن دو رابطه بالا و به دست آوردن روابط حاکم بر مدار الکتریکی موتور و محور مکانیکی، رفتار موتور می‌تواند به‌صورت کامل توصیف شود. رابطه حاکم بر مدار الکتریکی به‌صورت زیر توصیف می‌شود [۱۲]:

$$v_t = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_m \quad (۳)$$

در این رابطه R_a و L_a به ترتیب مقاومت و اندوکتانس سیم‌پیچی آرمیچر هستند و v_t ولتاژ ترمینال است. معمولاً به دلیل کم بودن تغییرات جریان، از عبارت شامل اندوکتانس نیز صرف‌نظر می‌شود:

$$v_t = R_a i_a + E_m \quad (۴)$$

برای محور مکانیکی موتور نیز رابطه حاکم به‌صورت زیر توصیف می‌شود [۱۲]:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + b\omega_m = T_e + T_l \quad (۵)$$

که در این رابطه J ممان اینرسی، b ضریب میرایی و T_l گشتاور بار است. اما مدل ارائه شده یک مدل ایده‌آل و خطی است که اثرات کموتاسیون، اشباع هسته‌ها، نوسان جریان آرمیچر و نوسان گشتاور خروجی در آن لحاظ نشده است. این مدل تا اندازه خوبی برای تحلیل رفتار ماشین مناسب است و شناسایی پارامترهای آن کار نسبتاً ساده‌ای است، اما استفاده از این مدل برای تحلیل دقیق رفتار ماشین جهت محاسبه سرعت محور از روی نوسان‌های جریان مناسب نیست و نیاز به مدل دقیق‌تری است. از این‌رو در [۱۲] مدل بالا برای در نظر گرفتن اثرات کموتاسیون و همچنین پیش‌بینی صحیح نوسان جریان آرمیچر بهبود داده شد. در ادامه این مدل که آن را مدل پیشین می‌نامیم به‌صورت مختصر شرح داده می‌شود.

۲-۱- شرح مدل پیشین

ارتباط بین نیرومحرکه الکتریکی القایی در آرمیچر و سرعت محور که در (۱) بیان شد را می‌توان به‌صورت زیر بسط داد [۱۲]:

$$E_m = C_\phi(t, \theta) \omega_m \quad (۶)$$

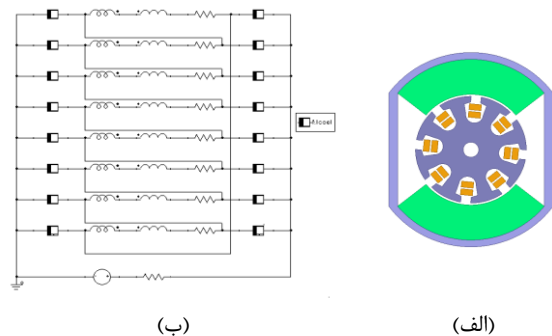
که در این رابطه $C_\phi(t, \theta)$ پارامتری است که به ابعاد ماشین، خواص مغناطیسی مواد مثل هسته و آهنرباها بستگی دارد و

متناسب با سرعت محور است، در این روش‌ها نوسان‌های جریان استخراج و جهت تعیین سرعت و موقعیت استفاده می‌شوند [۱۸]. اگرچه استفاده از نوسان‌های جریان بر خلاف روش اول به شرایط محیطی مانند دما وابستگی ندارد و نسبت به تغییرات دما مقاوم است [۱]، اما بسته به نوع موتور دامنه نوسان‌ها متفاوت بوده و همچنین نویز موجود در محیط می‌تواند منجر به خطا در تشخیص صحیح نوسان‌ها یا فرکانس اصلی آن‌ها شود [۱۳].

هدف اصلی این مقاله مدل‌سازی رفتار موتورهای جریان مستقیم جاروبک‌دار برای فراهم کردن امکان مطالعه و توسعه روش‌های مختلف تعیین سرعت و موقعیت بدون سنسور است. با توجه به اینکه بیشتر روش‌های تخمین موقعیت و سرعت از نوسان‌های جریان آرمیچر موتور جهت تشخیص سرعت استفاده می‌کنند، مدل مرسوم موتورهای جریان مستقیم جاروبک‌دار برای این هدف قابل استفاده نیست چراکه مدل مورد نظر باید امکان پیش‌بینی نوسان‌های موجود در جریان را با دقت زیاد فراهم کند. در [۱۲] با بهبود مدل مرسوم موتور جریان مستقیم جاروبک‌دار سعی شده است تا مدل امکان پیش‌بینی نوسان‌های جریان را فراهم کند. همچنین این مدل در سیستم تشخیص سرعت بدون سنسور استفاده شده است. با این حال بررسی مراجع نشان می‌دهد که تلاش دیگری در این زمینه انجام نگرفته است. علاوه بر این، مدل توسعه داده شده در [۱۲] به علت در نظر نگرفتن تأثیر گشتاور دندانه امکان پیش‌بینی دقیق نوسان‌های جریان را ندارد. از این‌رو در این مقاله ضمن بررسی مدل‌های توسعه داده شده برای این موتورها، سعی می‌شود با اصلاح آزمایش‌های مورد نیاز برای تشخیص پارامترهای مدل و همچنین در نظر گرفتن اثر گشتاور دندانه، دقت مدل در پیش‌بینی نوسان‌های موتور بهبود داده شود.

۲- مدل مورد مطالعه

موتور مورد مطالعه، یک موتور جریان مستقیم آهنربای دائم دو قطب است که رتور آن دارای ۸ دندانه و شیار است. در شکل (۱) سطح مقطع این موتور به همراه مدار مدل‌کننده بخش جاروبک و کموتاتورها ارائه شده است.



شکل (۱). موتور مورد مطالعه (الف) سطح مقطع موتور (ب) مدار مدل‌کننده جاروبک‌ها و کموتاتورها

۲-۲- محاسبه پارامترهای مدل

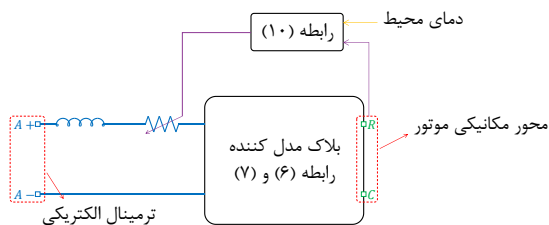
در مدل پیشین برای محاسبه پارامترهای $C_{\phi_0}(t)$ و $C_{\phi_i}(t)$ پیشنهاد می‌شود ولتاژ القایی در سیم پیچی آرمیچر زمانی که جریان آن صفر است اندازه‌گیری شود. برای این کار لازم است رتور با سرعت ثابت چرخانده و شکل موج ولتاژ ترمینال‌های مدار باز آرمیچر در یک تناوب مکانیکی رتور ذخیره شود.

برای به دست آوردن پارامترهای مقاومت موتور، یعنی $\mathfrak{R}_{a0}(t)$ و $\mathfrak{R}_{ai}(t)$ پیشنهاد شده است آهنرباهای دائم از موتور خارج و رتور با سرعت ثابت چرخانده شود [۱۲]. با اعمال ولتاژ به ترمینال موتور و اندازه‌گیری جریان آرمیچر، مقاومت آرمیچر در موقعیت‌های مختلف رتور از نسبت ولتاژ تغذیه به جریان لحظه‌ای محاسبه می‌شود. با داشتن شکل موج ضریب $C_{\phi}(t, \theta)$ و مقاومت آرمیچر و اعمال تبدیل فوریه گسسته می‌توان ضرایب مورد نیاز برای مدل را استخراج کرد.

قابل ذکر است در مدل پیشین اندوکتانس سیم پیچی آرمیچر در مدل در نظر گرفته شده است اما همچنان از تغییرات اندوکتانس نسبت به موقعیت رتور صرف نظر می‌شود.

۲-۳- پیاده‌سازی مدل

در این مقاله برای پیاده‌سازی مدل مطرح شده از برنامه متلب/سیمولینک و پیاده‌سازی بلاک دیاگرام نشان داده شده در شکل (۲) استفاده شده است. ترمینال‌های $A+$ و $A-$ ترمینال‌های ورودی موتور هستند که به منبع ولتاژ متصل شده و ترمینال‌های R و C نشان‌دهنده محور چرخش موتور هستند که بسته به نوع بار مکانیکی می‌تواند سرعت ثابت، گشتاور ثابت، گشتاور وابسته به سرعت یا مدل مکانیکی تجهیز متصل به محور موتور مانند مدل مکانیکی سیستم پنجره برقی و شیشه باشد. دمای محیط نیز سیگنال ورودی به مدل است که برای اصلاح مقدار مقاومت آرمیچر مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل (۲). بلاک دیاگرام مدل موتور مورد مطالعه در برنامه متلب/سیمولینک

۲-۴- بررسی تأثیر سرعت رتور بر پارامترهای مدل

در شکل (۳) (الف) نمودار ولتاژ القا شده در ترمینال‌های مدار باز

می‌تواند اثرات دما، دندان‌ها و شیار رتور، اثر اشباع و ... را در نظر بگیرد. با این توصیف رابطه (۲) نیز به صورت زیر اصلاح می‌شود [۱۲]:

$$T_e = C_{\phi}(t, \theta) i_a \quad (7)$$

همچنین در رابطه (۳) به جای اینکه مقدار مقاومت و اندوکتانس آرمیچر یک مقدار ثابت در نظر گرفته شود، می‌توان به ترتیب آن‌ها را به صورت المان‌های غیرخطی و متغیر با زمان $\mathfrak{R}_a(t, \theta)$ و $L_a(t, \theta)$ لحاظ و رابطه (۳) را به صورت زیر بازنویسی کرد [۱۲]:

$$v_t = \mathfrak{R}_a(t, \theta) i_a + \frac{dL_a(t, \theta) i_a}{dt} + E_m \quad (8)$$

قابل ذکر است که در این مدل با توجه به اینکه اثر نوسان‌های جریان اهمیت دارد، تأثیر اندوکتانس سیم پیچی آرمیچر باید دیده شود. بنابراین روابط (۶) تا (۸) مدل اصلاح شده ماشین را توصیف می‌کنند که با افزودن روابط مکانیکی محور، دستگاه معادلات کامل خواهد شد.

مهم‌ترین موضوع در مدل مطرح شده نحوه به دست آوردن پارامترهای آن است. در به دست آوردن پارامترهای یک مدل سادگی آزمایش‌ها، غیر مخرب بودن آن‌ها و دقت شناسایی پارامترها اهمیت پیدا خواهد کرد. پارامترهای مدل تشریح شده را می‌توان به فرم سری فوریه زیر بیان کرد [۱۲]:

$$\mathfrak{R}_a(t, \theta) = \mathfrak{R}_{a0}(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \mathfrak{R}_{ai}(t) \times \sin(i\omega_m t + \varphi_{Ri}) \quad (9)$$

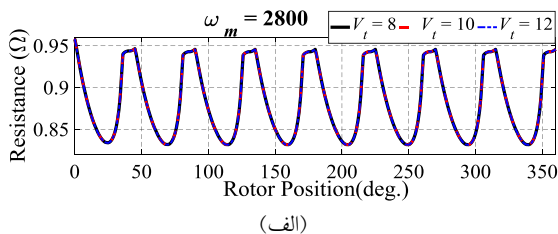
$$C_{\phi}(t, \theta) = C_{\phi_0}(t) + \sum_{i=1}^{\infty} C_{\phi_i}(t) \times \sin(i\omega_m t + \varphi_{ci}) \quad (10)$$

در نتیجه با این کار وابستگی پارامترها به موقعیت محور بر حسب سری فوریه بیان می‌شود و شناسایی پارامترهای مدل به شناسایی ضرایب این سری فوریه تقلیل پیدا می‌کند. علاوه بر این اثر اشباع و دما را نیز می‌توان در پارامترهای $\mathfrak{R}_{a0}(t)$ ، $\mathfrak{R}_{ai}(t)$ ، $C_{\phi_0}(t)$ و $C_{\phi_i}(t)$ در نظر گرفت. تأثیر دما در مقاومت الکتریکی را می‌توان با استفاده از رابطه زیر لحاظ کرد [۲۰]:

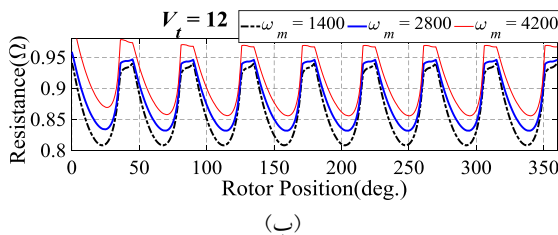
$$\mathfrak{R}_a(t, \theta) = \left(\mathfrak{R}_{a0}(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \mathfrak{R}_{ai}(t) \times \sin(i\omega_m t + \varphi_{Ri}) \right) (1 + \alpha \Delta \theta) \quad (11)$$

که در این رابطه α ضریب تغییرات دمایی هادی‌ها است. با توجه به اینکه هادی‌های مورد استفاده در ماشین از جنس مس هستند و نسبت مقاومت جاروبک و کموتورها نسبت به سیم پیچ‌ها کم است، می‌توان از ضریب تغییرات دمایی مس در این رابطه استفاده کرد.

آرمیچر لازم است آهنرباها از ساختار موتور خارج و با تغذیه سیم پیچی آرمیچر و چرخاندن رتور، جریان آرمیچر برای محاسبه مقاومت اندازه‌گیری شود. در شکل (۵) (الف) و (ب) مقاومت آرمیچر محاسبه شده با ولتاژهای تغذیه مختلف و در سرعت‌های مختلف رتور از شبیه‌سازی اجزای محدود نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار مقاومت اندازه‌گیری شده مستقل از مقدار ولتاژ تغذیه است. ذکر این نکته لازم است که در عمل ولتاژ تغذیه باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که جریان آرمیچر به سیم پیچ‌های آن آسیب وارد نکند. اما در مورد سرعت اعمالی به محور مشاهده می‌شود که مقدار و شکل موج مقاومت محاسبه شده به سرعت آزمایش بستگی دارد. دلیل این امر اثر تغییرات جریان و در نتیجه اثر اندوکتانس خودی سیم پیچی آرمیچر بر جریان آرمیچر و در نتیجه مقاومت محاسبه شده است.



(الف)



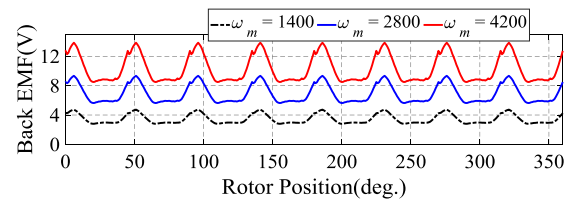
(ب)

شکل (۵). بررسی شکل موج مقاومت آرمیچر به‌ازای (الف) ولتاژهای تغذیه مختلف (ب) سرعت‌های مختلف رتور

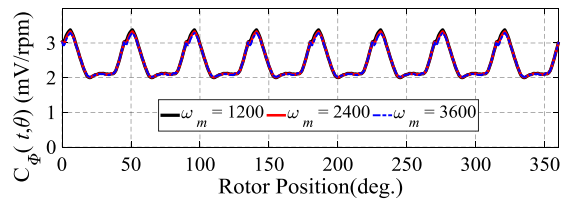
۲-۵- گشتاور دندانه

در مدل پیشین که در [۱۲] پیشنهاد شده است، نکته بسیار مهمی که به آن توجه نشده است برابر در نظر گرفتن ضریب ولتاژ و گشتاور در روابط (۶) و (۷) است. در مدل مرسوم موتور جریان مستقیم باتوجه به اینکه از مقادیر متوسط ولتاژ، جریان، گشتاور و سرعت استفاده می‌شود، طبق اصل پایستگی انرژی می‌توان اثبات کرد که ضریب ولتاژ با گشتاور با هم برابر است. اما در مدل پیشین از مقادیر لحظه‌ای کمیت‌های ورودی و خروجی موتور استفاده می‌شود، از این‌رو نمی‌توان لزوماً ضریب گشتاور را با ضریب ولتاژ برابر در نظر گرفت. در موتور جریان مستقیم آهنربای دائم به دلیل عکس‌العمل بین دندانه‌های آرمیچر و آهنرباهای دائم، گشتاور دندانه‌ای ایجاد می‌شود که بر عملکرد لحظه‌ای موتور تأثیر می‌گذارد [۲۱]. در واقع در صورتی که در رابطه (۷) گشتاور دندانه نیز لحاظ شود، آنگاه این رابطه به صورت لحظه‌ای

آرمیچر در سرعت‌های مختلف با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود نشان داده شده است. برای محاسبه ضریب $C_{\phi}(t, \theta)$ کافی است مقدار ولتاژ بر سرعت محور تقسیم شود. شکل (۳) (ب) این ضریب را برای سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب ولتاژ مستقل از سرعت حرکت محور در این آزمایش است.



(الف)



(ب)

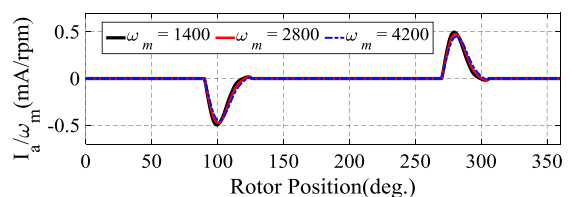
شکل (۳). شکل موج (الف) نیرو محرکه الکتریکی القایی و (ب)

$C_{\phi}(t, \theta)$ برای سرعت‌های مختلف به دست آمده از شبیه‌سازی

اجزای محدود

در نتیجه با داشتن شکل موج ضریب $C_{\phi}(t, \theta)$ و اعمال سری فوریه گسسته بر روی یک تناوب مکانیکی چرخش رتور، ضرایب $C_{\phi_0}(t)$ و $C_{\phi_i}(t)$ محاسبه خواهد شد.

نکته‌ای که وجود دارد این است که حتی در حالت مدار باز که جریان آرمیچر برابر صفر است، در هنگام کموتاسیون به علت اتصال کوتاه شدن دو کویل مجاور جریانی درون هادی‌ها به وجود خواهد آمد، که مسلماً مقدار این جریان بستگی به سرعت محور دارد. در شکل (۴) جریان ایجاد شده در یکی از کویل‌های رتور در سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حالت گذرای این جریان در سرعت‌های مختلف تقریباً یکسان است و دامنه آن تقریباً به صورت خطی با سرعت محور افزایش می‌یابد.



شکل (۴). نسبت جریان به سرعت محور یکی از کویل‌ها در حالتی

که آرمیچر مدار باز است

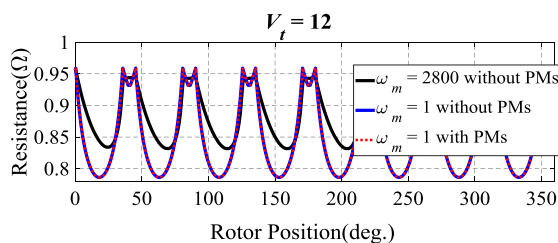
همان‌طور که در قسمت قبل بیان شد، برای محاسبه مقاومت

محاسبه مقاومت آرمیچر نیاز به اصلاح دارد. چرا که علاوه بر اینکه مقاومت محاسبه شده از روش قبلی به سرعت حرکت رتور در آزمایش بستگی دارد، لازم است تا آهنرباهای دائم از موتور خارج شوند. علاوه بر این در مدل مذکور تأثیر گشتاور دندانه بر عملکرد موتور دیده نشده است. از این رو در این قسمت به بهبود مدل قبل برای حل این مسائل پرداخته می‌شود.

۳-۱- آزمایش محاسبه مقاومت آرمیچر

در آزمایش قبل علت خارج کردن آهنرباها، حذف نیرو محرکه القایی در سیم‌پیچ‌های آرمیچر بود. برای حذف نیرو محرکه القایی در سیم‌پیچ‌های آرمیچر می‌توان به جای خارج کردن آهنرباها از موتور، رتور را با سرعتی بسیار کمتر از سرعت نامی چرخاند تا نیرو محرکه القایی که متناسب با سرعت است مقدار ناچیزی داشته باشد. بنابراین در این حالت دیگر نیازی به خارج کردن آهنرباها نخواهد بود و مشابه قبل مقاومت آرمیچر با محاسبه نسبت ولتاژ تغذیه به جریان آرمیچر محاسبه خواهد شد. از جهت دیگر باتوجه به اینکه سرعت حرکت رتور بسیار پایین است نرخ تغییرات جریان در کوئل‌های آرمیچر بسیار کاهش یافته و اثر اندوکتانس آرمیچر در محاسبه مقاومت وارد نمی‌شود.

در شکل (۷) مقاومت محاسبه شده از دو آزمایش مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در سرعت کم رتور، اثر آهنرباهای دائم بسیار ناچیز است به گونه‌ای که مقاومت محاسبه شده با وجود آهنرباها و بدون وجود آن‌ها بر هم منطبق هستند. از جهت دیگر در این شکل تأثیر اندوکتانس آرمیچر در سرعت نامی بر مقاومت آرمیچر نیز مشاهده می‌شود که در سرعت ۲۸۰۰ دور بر دقیقه باعث افزایش نسبت ولتاژ به جریان شده است.

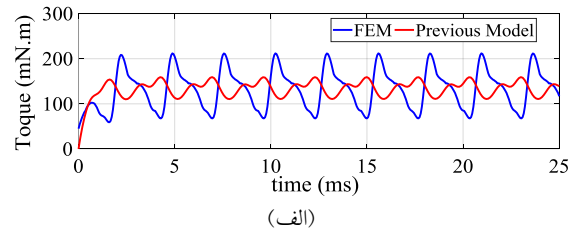


شکل (۷). مقایسه مقاومت آرمیچر محاسبه شده در سرعت نامی و سرعت‌های بسیار پایین با و بدون خارج کردن آهنرباهای دائم

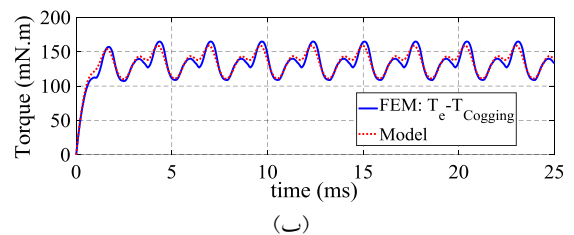
۳-۲- در نظر گرفتن گشتاور دندانه

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده شد، اختلاف گشتاور پیش‌بینی شده توسط مدل و شبیه‌سازی اجزای محدود در گشتاور دندانه ناشی از عکس‌العمل بین آهنرباهای دائم و دندانه‌های استاتور است. از این رو برای در نظر گرفتن اثر این

درست خواهد بود. برای بررسی این موضوع گشتاور خروجی موتور به دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود و مدل پیشین در شرایط ولتاژ تغذیه یکسان و چرخاندن رتور در سرعت ثابت در هر دو شبیه‌سازی محاسبه و در شکل (۶) (الف) مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار متوسط گشتاور از هر دو شبیه‌سازی با هم برابر هستند اما نوسان‌های گشتاور به دست آمده از مدل و شبیه‌سازی اجزای محدود با هم اختلاف دارند. در شکل (۶) (ب) گشتاور دندانه از شبیه‌سازی اجزای محدود محاسبه و از مقدار کل گشتاور کم شده است تا مقدار گشتاور الکترومغناطیسی با گشتاور محاسبه شده از مدل مقایسه شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود علت اختلاف بین گشتاور محاسبه شده توسط مدل و شبیه‌سازی اجزای محدود لحاظ نکردن گشتاور دندانه است.



(الف)



(ب)

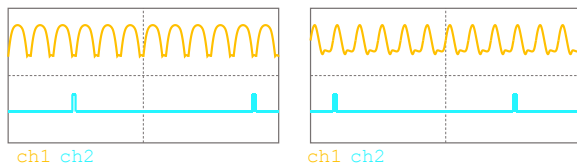
شکل (۶). محاسبه گشتاور خروجی به دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود و مدل پیشین (الف) گشتاور خروجی محور و (ب) گشتاور الکترومغناطیسی

طبق رابطه (۵) نوسان گشتاور خروجی می‌تواند باعث ایجاد نوسان در سرعت محور شود. از این رو باتوجه به رابطه (۷) نوسان سرعت باعث ایجاد نوسان در نیرو محرکه القایی در آرمیچر و نهایتاً طبق رابطه (۸) باعث ایجاد نوسان جریان می‌شود. در نتیجه باتوجه به هدف توسعه مدل مذکور که تخمین دقیق نوسان جریان برای انجام مطالعات بر روی روش تخمین سرعت بدون سنسور از روی جریان آرمیچر است، در نظر گرفتن گشتاور دندانه در مدل امری ضروری به نظر می‌رسد.

۳-۳- بهبود مدل

همان‌طور که در قسمت قبل توضیح داده شد، مدل توسعه داده شده در [۱۲] با هدف پیش‌بینی نوسان‌های جریان موتور جریان مستقیم آهنربای دائم جاروبک‌دار توسعه داده شد. اما با بررسی انجام شده در این مقاله می‌توان دید آزمایش مربوط به

همراه سیگنال‌های مورد استفاده برای استخراج مقاومت، ضریب ولتاژ و گشتاور دندانه، پنجره‌ای که سری فوریه بر روی آن اعمال می‌شود را مشخص می‌کند. در شکل (۹) (الف) و (ب) شمای کلی این روش نشان داده شده است. به‌عنوان مثال در شکل (۹) (الف) ولتاژ مدار باز و سیگنال کمکی به ترتیب با استفاده از کانال ۱ و ۲ اسیلوسکوپ ذخیره شده‌اند. باتوجه به اینکه پالس کمکی نشان‌دهنده یک موقعیت مشخص رتور است، می‌توان گفت پنجره سری فوریه ناحیه بین دو پالس است که در تمام آزمایش‌ها یکسان خواهد بود.



شکل (۹). شمای کلی استفاده از سیگنال کمکی (الف) سیگنال مورد استفاده برای ضریب ولتاژ و (ب) مقاومت

برای پیاده‌سازی عملی این پالس کمکی نیز می‌توان از یک حسگر اثر هال یا مادون قرمز بر روی استاتور استفاده کرد. برای مثال در استفاده از حسگر اثر هال، با قراردادن حسگر بر روی استاتور و یک آهنربا بر روی رتور، سیگنال مورد نظر ایجاد خواهد شد.

۴- شبیه‌سازی اجزای محدود

برای بررسی دقت مدل اصلاح شده با آزمایش‌های پیشنهادی، نتایج به دست آمده از آن را با نتایج مدل پیشین و شبیه‌سازی اجزای محدود مقایسه می‌کنیم. برای انجام شبیه‌سازی اجزای محدود در این بخش و همچنین مواردی که در بخش‌های قبل ارائه شد برنامه ANSYS Electronics Desktop 2019 R3 استفاده شده است. برای این کار هندسه نشان داده شده در شکل (۱) (الف) به همراه مدار خارجی شکل (۱) (ب) در این برنامه پیاده‌سازی و با استفاده از تحلیل حالت‌گذرای دوبعدی نتایج محاسبه شد. همچنین خواص مغناطیسی هسته‌ها با تعریف منحنی B-H اعمال و مسئله به صورت غیرخطی حل شد. سطح مقطع موتور مورد مطالعه به همراه مش استفاده شده در تحلیل‌ها در شکل (۱۰) نشان داده شده است. تعداد کل مش در این شبیه‌سازی‌ها حدوداً برابر ۳۵۰۰ است.

در شبیه‌سازی اول ولتاژ ترمینال برابر مقدار نامی ۱۲ ولت قرار داده و بار مکانیکی یک بار با سرعت ثابت نامی ۲۸۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. شکل موج جریان آرمیچر و گشتاور تولیدی موتور در این شبیه‌سازی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود،

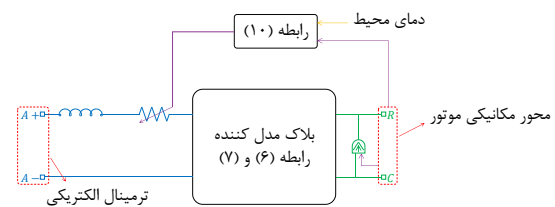
گشتاور می‌توان رابطه (۷) را به صورت زیر اصلاح کرد:

$$T_e = C_\phi(t, \theta) i_a + T_{Cogging}(t, \theta) \quad (۱۲)$$

که در این رابطه $T_{Cogging}(t, \theta)$ گشتاور دندانه است. بنابراین، می‌توان مدل نشان داده شده در شکل (۲) را مانند شکل (۸) اصلاح کرد. مشابه قبل گشتاور دندانه را می‌توان به صورت سری فوریه بیان کرد:

$$T_{Cogging}(t, \theta) = T_{C0}(t) + \sum_{i=1}^{\infty} T_{Ci}(t) \times \sin(i\omega_m t + \varphi_{Ti}) \quad (۱۳)$$

در نتیجه با اندازه‌گیری گشتاور دندانه و استفاده از تبدیل فوریه گسسته، پارامترهای مدل اصلاح شده محاسبه خواهد شد.

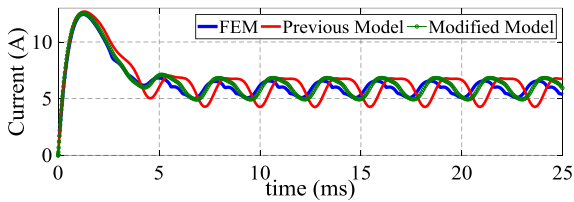


شکل (۸). بلوک دیاگرام مدل اصلاح شده موتور مورد مطالعه در برنامه متلب/اسیمولینک

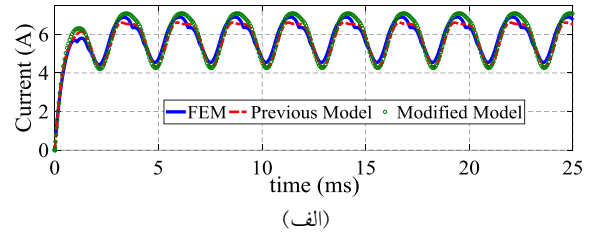
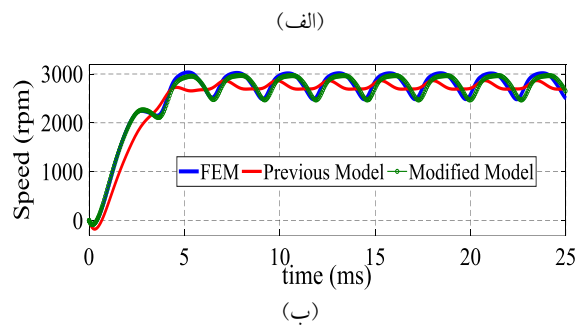
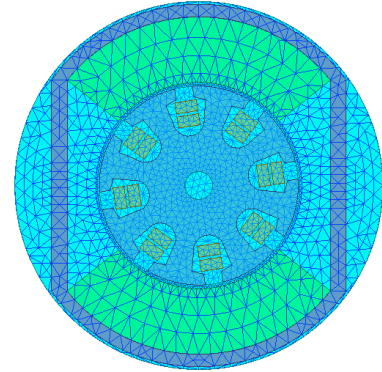
۳-۳- یکسان بودن پنجره سری فوریه

یکی از موارد مهمی که در مدل ارائه شده باید به آن توجه شود، فاز هر مؤلفه هارمونیک در روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۳) است. بیان گردید برای استخراج پارامترهای مدل لازم است از مقاومت آرمیچر، ضریب ولتاژ و گشتاور دندانه بر روی یک تناوب مکانیکی چرخش رتور سری فوریه گرفته شود. اما موضوع بسیار مهم این است که پنجره‌ای که (بر حسب موقعیت رتور) سری فوریه بر روی آن اعمال می‌شود باید برای این سه پارامتر یکسان باشد. در شبیه‌سازی اجزای محدود موقعیت رتور به صورت کامل مشخص است، از این رو پنجره‌ای که بر روی آن سری فوریه گرفته می‌شود به راحتی قابل تشخیص است و فاز مولفه‌های هارمونیک مقاومت نسبت به فاز مولفه‌های هارمونیک ضریب ولتاژ و گشتاور دندانه به درستی محاسبه می‌شود. اما در عمل این کار به سادگی قابل انجام نیست و نیاز است تا راهکاری ارائه شود تا پنجره مورد نظر در هر دو آزمایش یکسان باشد. یک راه استفاده از یک سنسور موقعیت مانند انکدر نوری است. اما این روش باعث پیچیدگی و نیاز به تجهیزات اضافی دیگری دارد. روش دیگری که در این مقاله پیشنهاد می‌شود و نسبت به روش قبلی ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر است، استفاده از یک سیگنال کمکی است. این سیگنال کمکی به نحوی تولید می‌شود که در یک بازه کوچک از موقعیت رتور مقداری مخالف صفر و در بقیه موقعیت‌های محور رتور مقدار صفر داشته باشد. ذخیره هم‌زمان این سیگنال به

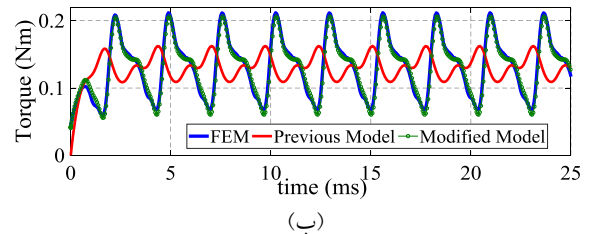
مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دقت مدل اصلاح شده و پیشین در پیش‌بینی مقدار متوسط کمیت‌ها تقریباً با هم برابر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود خطای محاسبه کمیت‌های مختلف از دو مدل کمتر از ۳ درصد است. این موضوع نشان می‌دهد اصلاحات انجام شده موجب کاهش دقت در محاسبه متوسط کمیت‌های مختلف نشده است. اما همان‌طور که بیان شد هدف اصلی از بهبودهای انجام گرفته پیش‌بینی دقیق‌تر نوسانات موجود در جریان آرمیچر است. برای این منظور در جدول (۲) مجذور مجموع مربعات اختلاف (RMSD)^۱ بین مدل‌ها و شبیه‌سازی اجزای محدود برای کمیت‌های مختلف مقایسه شده است.



شکل (۱۰). سطح مقطع موتور مورد مطالعه به همراه مش‌بندی انجام شده در شبیه‌سازی اجزای محدود



شکل (۱۲). مقایسه عملکرد مدل اصلاح شده با قبلی و شبیه‌سازی اجزای محدود در بار با گشتاور ثابت (الف) جریان آرمیچر و (ب) سرعت محور موتور



شکل (۱۱). مقایسه عملکرد مدل اصلاح شده با قبلی و شبیه‌سازی اجزای محدود در بار با سرعت ثابت (الف) جریان آرمیچر و (ب) گشتاور خروجی موتور

جدول (۱). مقایسه مقادیر متوسط در حالت ماندگار به دست آمده از مدل اصلاح شده و مدل پیشین

بار	کمیت	شبیه‌سازی اجزای محدود		مدل پیشین		مدل اصلاح شده	
		مقدار	اختلاف	مقدار	اختلاف	مقدار	اختلاف
جریان (A)	۵/۹۰	۵/۷۶	٪۲/۴	۵/۹۲	٪۰/۳	۲۷۷۱/۲	٪۱/۶۲
	گشتاور (N.m)	۰/۱۳۵	۰/۱۳۳	٪۱/۴۸	۰/۱۳۲		
سرعت (rpm)	۵/۸۶	۵/۹۲	٪۱/۰۲	۶/۰۰	٪۲/۳۹	۲۷۷۱/۲	٪۱/۶۲
	جریان (A)	۵/۸۶	۵/۹۲	٪۱/۰۲	۶/۰۰		

در شبیه‌سازی دوم مجدداً ولتاژ نامی ۱۲ ولت به ترمینال‌های موتور متصل می‌شود، اما این بار یک بار مکانیکی با گشتاور ثابت نامی ۱۳۵ میلی‌نیوتن‌متر به محور مکانیکی اعمال می‌شود. نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود عملکرد مدل اصلاح شده نسبت به مدل پیشین در پیش‌بینی جریان آرمیچر و سرعت خروجی محور بهبود قابل توجهی داشته است.

برای مقایسه جزئی‌تر دقت مدل اصلاح‌شده، مقدار متوسط کمیت‌های محاسبه شده از مدل پیشین و مدل اصلاح شده با نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود در جدول (۱)

^۱ Root Mean Square Deviation (RMSD)

ساختار ماشین را رفع می‌کند. مدل توسعه داده شده امکان بررسی و مطالعه روش‌های تخمین موقعیت بدون سنسور و همچنین بررسی تأثیر دما بر آن‌ها را فراهم می‌کند. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل اصلاح شده، مدل پیشین و شبیه‌سازی اجزای محدود نشان‌دهنده برتری مدل پیشنهادی در پیش‌بینی عملکرد این موتورها است.

۶- قدرت دانی

از شرکت محترم صنایع تولیدی کروز بابت اجازه انتشار این پژوهش بسیار سپاسگزاریم.

۷- مراجع

- [1] P. Radcliffe, and D. Kumar, "Sensorless speed measurement for brushed DC motors," *IET Power Electron.*, vol. 8, no. 11, pp. 2223-2228, 2015.
- [2] E. Vazquez-Sanchez, J. Sottile, and J. Gomez-Gil, "A Novel Method for Sensorless Speed Detection of Brushed DC Motors," *Appl. Sci.*, vol. 7, no. 1, pp. 1-15, 2017.
- [3] J. P. Whinnery, "Motor speed-based anti-pinch control apparatus and method with rough road condition detection and compensation," U.S. Patent, no. WO2003102338A2, Jan. 13, 2004.
- [4] M. G. Kliffken, H. Becker, H. Lamm, H. Prüssell, and J. Wolf, "Obstacle Detection for Power-Operated Window-Lift and Sunroof Actuation Systems", *SAE Tech. Paper Series*, pp. 1-10, 2001.
- [5] W. Ra, H. Lee, J. B. Park, and T. Yoon, "Practical Pinch Detection Algorithm for Smart Automotive Power Window Control Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 3, pp. 1376-1384, March 2008.
- [6] Y. Wang and Y. Qiu, "A Low Cost Anti-Pinch Control System for Electrical Window," in *Int. Conf. Inf. Comput.*, pp. 385-387, 2011.
- [7] Y. Zhang, Y. Zhang, Z. Ai, and Y. Feng, "Study on Electric Sunroof Pinch Detection of Cars Based on Model Reference Adaptive Cholesky Decomposition Filter," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 4, no. 1, pp. 190-201, March 2018.
- [8] W. Ra, H. Lee, T. Yoon and J. Park, "Real-Time Robust Pinch Detection Algorithm for Automobile Applications," in *IEEE Intell. Transp. Syst. Conf. (ITSC)*, pp. 325-330, 2006.
- [9] Y. Xu, C. Li and F. Chen, "A Design of Window Lifter System Based on Current Detection," in *Chin. Autom. Congr. (CAC)*, pp. 813-817, 2019.
- [10] M. Vidlak, P. Makys and M. Stano, "Comparison between model based and non-model based sensorless methods of brushed DC motor," in *Transp. Res. Proc.*, vol. 55, pp. 911-918, 2021.
- [11] Q. Zhang, B. Wen, and Y. He, "Rotational speed monitoring of brushed DC motor via current signal," *Measurement*, vol. 184, pp. 1-11, 2021.
- [12] J. M. Knezevi, "Low-Cost Low-Resolution Sensorless Positioning of DC Motor Drives for Vehicle Auxiliary Applications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 62, no. 9, pp. 4328-4335, 2013.
- [13] E. Vazquez-Sanchez, J. Gomez-Gil, J. C. Gamazo-Real, and J. F. Diez-Higuera, "A New Method for

در واقع هدف از این مقایسه بررسی انحراف شکل موج و دامنه نوسانات پیش‌بینی شده با مقادیر محاسبه شده توسط شبیه‌سازی اجزای محدود است. همان‌طور که قبلاً نیز باتوجه‌به شکل (۱۱) بیان گردید، برای بار مکانیکی با سرعت ثابت، مدل پیشین و اصلاح شده دقت تقریباً یکسانی در پیش‌بینی نوسانات جریان آرمیچر دارند به‌گونه‌ای که شاخص RMSD در این حالت برای هر دو مدل برابر ۰,۳۷ آمپر محاسبه شده است. اما در مورد گشتاور خروجی می‌توان دید مدل اصلاح شده انحراف کمتری نسبت به مدل پیشین دارد.

جدول (۲). مقایسه مجذور متوسط مربعات انحراف مدل پیشین و

مدل اصلاح شده با شبیه‌سازی اجزای محدود در حالت ماندگار

بار	کمیت	مدل پیشین		مدل اصلاح شده	
		$\frac{RMSD}{mean} \times 100$	RMSD	$\frac{RMSD}{mean} \times 100$	RMSD
جریان (A)	جریان	۰,۳۷	۶/۴	۰,۳۷	۶/۳
	گشتاور (N.m)	۰,۰۵۵	۴۱/۴	۰,۰۰۷	۵/۳
سرعت (rpm)	جریان (A)	۱/۳۷	۲۱/۵	۰,۵۰	۸/۳
	سرعت (rpm)	۱۷۷/۱	۶/۵	۹۲/۵	۳/۳

در مورد بار با گشتاور ثابت می‌توان دید عملکرد مدل اصلاح شده نسبت به مدل پیشین در پیش‌بینی جریان آرمیچر و سرعت محور مکانیکی بهبود قابل توجهی داشته است. مقدار RMSD جریان آرمیچر برای مدل پیشین و مدل اصلاح شده به ترتیب برابر ۱,۲۷ و ۰,۵ آمپر است که نشان می‌دهد مدل اصلاح شده حدود ۴۰ درصد انحراف کمتری با نتایج اجزای محدود دارد. همچنین RMSD سرعت پیش‌بینی شده توسط مدل پیشین و مدل اصلاح شده نیز به ترتیب برابر ۱۷۷,۱ و ۹۲,۵ دور بر دقیقه است که حدود ۵۰ درصد انحراف کمتری با نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود دارد. در نتیجه می‌توان ادعا کرد مدل اصلاح شده می‌تواند دقت بیشتری را در پیش‌بینی مولفه‌های نوسانی داشته باشد و در عین حال در محاسبه مقدار متوسط کمیت‌ها نیز دقت برابری با مدل پیشین ارائه کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با اصلاح آزمایش اندازه‌گیری مقاومت آرمیچر و همچنین افزودن اثر گشتاور دندانه در مدل موتور آهنربای دائم، مدل اصلاح‌شده‌ای جهت پیش‌بینی عملکرد موتورهای جریان مستقیم جاروبک‌دار پیشنهاد شد که امکان پیش‌بینی دقیق‌تر نوسان‌های جریان آرمیچر را فراهم می‌کنند. آزمایش پیشنهادی علاوه بر بهبود عملکرد مدل، نیاز به خارج کردن آهنرباهای دائم از

- [18] M. Vidlak, L. Gorel, P. Makys, and M. Stano, "Sensorless Speed Control of Brushed DC Motor Based at New Current Ripple Component Signal Processing," *Energies.*, vol. 14, no. 17, pp. 1-25, 2021.
- [19] P. C. Sen, *Principles of Electric Machines and Power Electronics*, 3rd ed., USA: Wiley, 2013.
- [20] H. Saneie, and Z. Nasiri-Gheidari, "Performance Analysis of Outer-Rotor Single-Phase Induction Motor Based on Magnetic Equivalent Circuit," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 2, pp. 1046-1054, Feb. 2021.
- [21] S. T. Boroujeni, and M. H. Hajjare, "Optimization of Cogging Torque in Surface Mounted PM Machines using PM Segmentation," *J. Appl. Electromagn.*, vol. 2, no. 4, pp. 31-38, 2016 (In Persian).
- Sensorless Estimation of the Speed and Position in Brushed DC Motors Using Support Vector Machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 3, pp. 1397-1408, March 2012.
- [14] F. Genduso, R. Miceli, C. Rando, and G. R. Galluzzo, "Back EMF sensorless-control algorithm for high-dynamic performance PMSM," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 6, pp. 2092-2100, Jun. 2010.
- [15] K. Ohishi, Y. Nakamura, Y. Hojo, and H. Kobayashi, "High-performance speed control based on an instantaneous speed observer considering the characteristics of a DC chopper in a low speed range," *Electr. Eng. Jpn.*, vol. 130, no. 3, pp. 77-87, Feb. 2000.
- [16] "TIDA-01421: Automotive Brushed-Motor Ripple Counter Reference Design for Sensorless Position Measurement," *Texas Instruments*, 2018. [Online]. Available: <https://www.ti.com/tool/TIDA-01421>.
- [17] A. Abacan, M. L. Canada and M. Gomez, "Sensorless Position Control of Brushed DC Motor Using Ripple Counting Technique," *Microchip Technology Inc.*, 2019. [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Sensorless-PositionControl-of-Brushed-DC-Motor-Using-Ripple-Counting-Technique-00003049A.pdf>.