کنفرانس ملی تحقیقات بنیادین در مهندسی مکانیک
1st National Conference in Mechanical Engineering
Tehran 2018
ISC ۹۶۱۸۰-۲۱۳۰۲

سیستم فرمان برقی با محرک خطی

سلمان ابراهیم نژاد [*۱]، حسن خدادوست [۲]، محمدعلی ایزدی [۳]

۱- استادیار، دانشگاه علم وصنعت ایران

ebrahiminejad@iust.ac.ir

۲- کارشناس ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران

Hasan.khodadoost@yahoo.com

۳- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، مدرس گروه مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان

Mohammad.izadi45@gmail.com

خلاصه

با رشد و گسترش روزافزون فناوری های ساخت سامانه های هوشمند و خودرو های خودران، بی شک چشم انداز صنعت خودرو، هوشمند سازی خودرو و کنترل پذیری بهتر آن است. در این مسیر نیاز به یک سیستم فرمان با عملکرد و دقت بالا میباشد تا بتواند بنا به نیاز های سیستم به بهترین نحو ممکن خودرو را هدایت کند، سیستم فرمان برقی بهترین گزینه در راه رسیدن به این مطلوب است، که داغ ترین موضوعات در زمینه فرمان برقی خودرو کنترل و کاهش تداخلات سیستم فرمان است، سیستم فرمان برقی با موتور خطی در این راستا میتواند کمک شایانی داشته باشد به دلیل این که این موتور دارای کنترل پذیری بهتر و همینطور سرعت بالاتر نسبت به فرمان برقی با موتور دورانی میباشد.

کلمات کلیدی:
خودرو های خودران، هوشمند سازی خودرو، سیستم فرمان برقی، موتور خطی

۱. مقدمه

امروزه پیشرفت های علمی و فنی در تمام زمینه ها تحقق یافته و این امر شامل صنایع خودرو سازی و صنایع وابسته نیز شده است، یکی از این صنایع وابسته، قسمت فرمان خودرو است که وظیفه خطیر هدایت خودرو را بر عهده دارد و همینطور رابطه مستقیم با ایمنی و آسایش در خودرو دارد. همیشه راننده برای تغییر مسیر خودرو و حرکت در مسیر دلخواه از مکانیزم سیستم فرمان استفاده می کند، لذا مجموعه تشکیل دهنده این سیستم نقش مهمی در خودرو بر عهده دارند. ساخت و تولید مجموعه فرمان خودرو بخش مهمی در صنعت خودرو سازی به شمار میرود. در خودرو های قدیمی نیروی مورد نیاز برای هدایت خودرو بین ۵ تا ۱۰ کیلوگرم بوده که در خودرو های جدید این نیرو به ۳۰ گرم کاهش یافته است. [۱-۷]

[*] **Corresponding author:** استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران در رشته مهندسی مکانیک خودرو گرایش سیستم های دینامیکی خودرو
Email: ebrahiminejad@iust.ac.ir

یکی از پارامتر های موثر در انتخاب نوع خودرو در کشور های توسعه یافته، راحتی چرخش غربیلک فرمان آن خودرو میباشد، این موضوع سازندگان خودرو را بر آن داشته است که جهت تسهیل در چرخش فرمان به تبع آن کاهش خستگی راننده و همینطور افزایش ایمنی در جاده های خشن از سیستم های کمکی فرمان که به قسمت مکانیکی اضافه شده اند استفاده نمایند. که این سیستم ها عبارت اند از:

- سیستم فرمان هیدرولیک:

این سیستم نسل اولیه سیستم های کمک فرمان است که وظیفه خود که کمک کردن به سیستم فرمان مکانیکی است را با کمک گرفتن از روغن هیدرولیک که توسط پمپ هیدرولیک که فشار این روغن توسط موتور خودرو تامین میشود، را انجام میدهد علاوه بر آن، سیستم هیدرولیک بصورت مرکز آزاد (Open – Center) عمل می کند یعنی حتی در زمانهایی که خودرو بصورت مستقیم در حال حرکت بوده و هیچ انحرافی انجام نمی دهد، باز هم این سیستم عمل می کند.

- سیستم فرمان الکتروهیدرولیک:

این سیستم برای برطرف کردن معایب سیستم فرمان هیدرولیک بوده و استفاده از مزایای این سیستم که مهمترین تغییری که در این سیستم به وجود آمده این است که به جای استفاده از موتور خودرو از یک موتور الکتریکی استفاده شده که این موتور وظیفه تامین نیروی مورد نیاز برای تولید فشار در روغن را بر عهده دارد.

- سیستم فرمان الکتریکی:

این سیستم نسل اخر سیستم های کمکی فرمان می باشد. که امروزه در بیشتر خودرو های جدید مورد استفاده قرار گرفته است در این سیستم از روغن استفاده نشده است و یک موتور الکتریکی وظیفه تولید توان کمکی را دارد، یکی از اصلی ترین مزیت های سیستم این است که میتوان در حالت خاموش بودن خودرو نیز از فرمان برقی استفاده کنیم.

در این مقاله سیستم فرمان مورد بررسی سیستم فرمان الکتریکی است به دلیل استفاده از موتور برقی در سیستم عملگر سیستم فرمان برقی، هدف بر این است که به جای استفاده از موتور الکتریکی دورانی از موتور الکتریکی خطی در سیستم محرک سیستم فرمان برقی استفاده شود.[۷-۱]

یک موتور الکتریکی دورانی از قسمت های مختلف زیر تشکیل شده است :

- روتور:

در یک موتور الکتریکی، روتور بخش در حال حرکت است که با چرخاندن شافت توان مکانیکی را تولید میکند. روتور معمولا دارای رسانایی است که دارای جریان الکتریکی هستند و تحت تاثیر میدان مغناطیسی استاتور تولید نیروی لازم برای چرخش شافت را انجام میدهد. البته برخی از روتورها دارای آهنرباهایی دایمی هستند و رسانای حامل جریان در استاتور قرار میگیرند.

- استاتور:

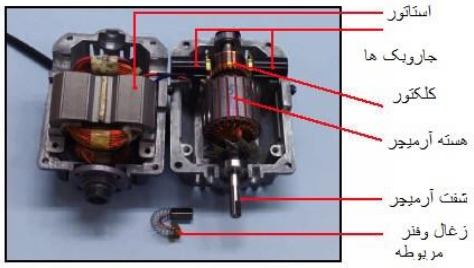
بخش ثابت موتور استاتور است که معمولا دارای سیم پیچ یا آهنربای دائمی میباشد.

- سیم پیچ:

سیم هایی است که به صورت کلاف بافته میشوند و معمولا در اطراف یک هسته مغناطیسی چند لایه از جنس آهنربای نرم پیچیده میشوند و زمانی که در اثر جریان الکتریکی انرژی میگیرند تشکیل قطب مغناطیسی میدهند.

- ذغال هادی:

بخش رابط انتقال جریان به روتور ذغال هادی ثابت است که در تماس با کموتاتور دوار قرار دارند که باعث معکوس شدن جریان مورد نیاز و اعمال جریان بهینه به ماشین در زمان چرخش روتور از یک قطب تا قطب دیگر میشوند. در صورت نبود این عضو موتور توقف کامل، ترمز میکند.



شکل۱- اجزاء موتور الکتریکی

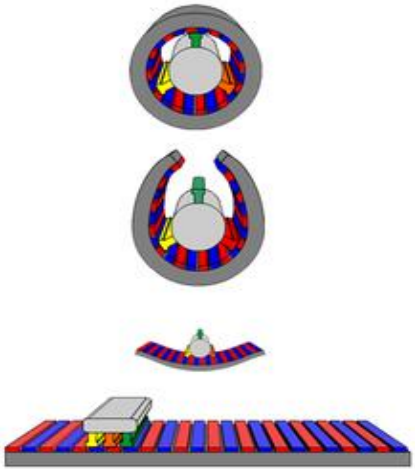
موتور خطی نیز دارای قسمت های تشکیل دهنده بالا میباشند با این تفاوت که این موتور ها به صورت خطی حرکت کرده نه به صورت دوارنی در نتیجه برای ارضا کردن این شرط نیاز است که روتور و استاتور این موتور ها به صورت خطی باشند تا بتوانند به صورت خطی حرکت داشته باشند.[۷-۱]

موتور های خطی نسبت به حالت دورانی دارای مزایایی هستند که این مزایا عبارت اند از:

- این موتور ها به دلیل شناور بودن، نیاز به تعمیر و نگهداری چندانی ندارند.
- اثر شناوری در این موتور ها وجود دارد.
- قابل اعتماد
- سرعت بالا
- بازده بالا
- بدون نیاز به تبدیل سرعت دورانی به خطی

معایب موتور های خطی نسبت به حالت دورانی عبارت است از:

- گران
- عدم تعادل مدار مغناطیسی در طول مسیر حرکت
- برای هر سیستمی نوع خاصی باید طراحی شود
- افزایش هزینه با طول
- درایور و نرم افزار های کنترلی گران



شکل۲-موتور خطی

مقایسه موتور های خطی و دورانی

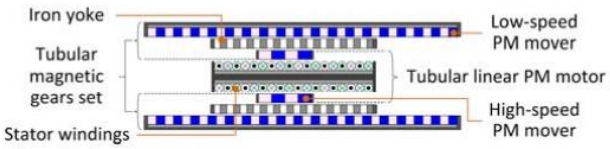
- موتور خطی بر خلاف موتور دوار در مسیر حرکتش یک ابتدا و یک انتها دارد. این خصوصیت تولید اثر دو انتها خواهد کرد.
- در موتور های دوار، خروجی مکانیکی ماشین به صورت سرعت دوارنی (برحسب رادیان بر ثانیه) و گشتاور (برحسب نیوتن- متر) بیان میشود با توجه به این که موتور های خطی دارای حرکت خطی هستند لذا خروجی مکانیکی انها به صورت سرعت خطی (بر حسب متر بر ثانیه) و نیرو (برحسب نیوتن) است.
- اغلب موتور های خطی روتور هایشان فاقد میله های هادی یا سیم پیچ های الکتریکی است و عضو متحرک در یک موتور خطی تقریبا همیشه از صفحه یا ورق های یکپارچه ساخته میشود.
- فاصله هوائی در موتور خطی نسبتا بزرگ بوده که جزء لاینفک موتور خطی میباشد. در یک موتور دوار فاصله هوائی تا حد امکان کوچک میباشد. بعلاوه جریان مغناطیسی نسبتا خوبی دارد. فاصله هوائی اثر نامطلوبی روی رفتار موتور خطی میگذارد.
- شتابگیری و کاستن از سرعت موتور های خطی به نحو مطلوبی امکانپذیر است.
- حفاظت مکانیکی و الکتریکی و قابلیت تحمل شرایط، محیطی نامتقارن نسبت به مشابه دوارش بهتر صورت میپذیرد.
- نگهداری، تعمیر و تعویض موتور های خطی ساده میباشد.
- توانائی اعمال نیرو در ثانویه بدون اینکه نیازی به کنتاکت مکانیکی باشد.
- کنترل مناسب و راحت نیرو و سرعت در موتورهای خطی القایی ساده تر است.
- مشکل ناشی از فراهم آوردن امکانات لازم برای درگیر ماندن دو قسمت ساکن و متحرک، ضمن حرکت خطی نسبی بین انها، بخصوص اگر قرار باشد این عمل در این مسیر انجام شود.
- عدم تعادل مدار مغناطیسی در طول مسیر حرکت
- وجود نیروی جاذبه بسیار بزرگ بین دو قست فعال موتور در صورتی که هر دو قسمت فوق دارای هسته مغناطیسی باشند.

موتور خطی القایی (ماشین های مولد نیروی (عمل کننده ها)):

این موتور های برای تولید نیروی درحالت سکون و یا برای حرکت کند در یک مسیر کوتاه به کار میروند و معمولا در اندازه های کوچک ساخته میشوند و به عنوان رقیبی برای مولد های بادی یا هیدرولیکی به حساب می آیند. در این موتور ها کاربردی نسبت نیروی تولید شده به تلفات اهمی معیار طراحی محسوب میشوند.[۷-۱]

۲. مشخصات موتور خطی:

خودرو مورد آزمایش یک خودرو با چرخ های جلو محرک فرمان پذیر است که دارای ۱,۲ تن وزن و حداکثر سرعت ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت است از دیگر مشخصات این خودرو طول دو محور جلو و عقب این که حدود ۱,۵ متر میباشد و حداکثر نیروی مورد نیاز فرمان حدود ۴ تا ۵ کیلو نیوتن است.[۱۰-۸]

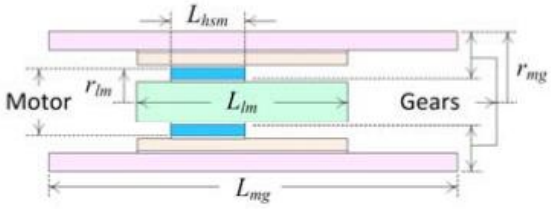


شکل۳- اجزاء موتور الکتریکی خطی

در شکل بالا موتور خطی مورد استفاده در سیستم فرمان خودرو نشان داده شده است که این موتور تشکیل شده است از دو محرک PM (آهنربای دائم) که یکی از این آهنربا ها دارای سرعت کم و دیگری دارای سرعت بالا و همینطور از یک استاتور سیم پیچی شده تشکیل شده است که میدانی که توسط سیستم آهنربای دائم سرعت بالا و سیم پیچ تشکیل شده است باعث حرکت در شفت استاتور میشود و آهنربای بیرونی سرعت پایین جهت حفظ میدان مغناطیسی مورد استفاده قرار گرفته است در این سیستم از یک عدد یوغ (راهنمای آهنی) استفاده شده است جهت راهنمای موتور الکتریکی در داخل مجموعه موتور الکتریکی.[۱۰-۸]

۳. روابط موتور خطی :

شکل شماتیک موتور القایی خطی جهت انجام محاسبات :



شکل۴-شماتیک موتور الکتریکی خطی

- سرعت انتقال دهنده PM

$$v_{lsm} = \frac{N_{hsm} v_{hsm} - N_{yk} v_{yk}}{N_{hsm} - N_{yk}} \qquad (۱)$$

که در این فرمول N_{hsm} تعداد جفت قطب ها از محرک PM یا سرعت بالا است، N_{yk} تعداد قطب های راهنمای آهنی و v_{yk} سرعت راهنمای آهنی است. به این ترتیب مقدار N_{hsm} کمتر از مقدار N_{yk} تعیین شده است، که باعث ایجاد سرعت بالا و پایین حرکت و همینطور حرکت در هر دو جهت حرکت موتور.

۱-۳- محاسبات مورد جهت استفاده از سیستم موتور خطی به جای موتور دورانی در سیستم فرمان خودرو:

- نسبت دنده

برای جایگذینی موتور خطی به جای موتور دورانی باید یک نسبت دنده که باعث به وجود آمدن گشتاور در سیستم میشود را نیز در موتور خطی لحاظ شود که محاسبات آن عبارت است از:

$$G_R \geq [F_{out} / (f_{lm}.V_{cmla})] \quad (۲)$$

که در این فرمول F_{out} نیروی خروجی مورد نیاز سیستم، V_{cmla} محدوده حجم خروجی مورد نیاز برای سیستم فرمان برقی است.

- وزن و مقدار ابعاد

کل وزن سیستم فرمان خودرو با موتور خطی برابر است که اگر m_{lm} چگالی جرم حجمی در نظر بگیریم کل وزن بدین صورت میشود:

$$W_{lm} = m_{lm}.V_{lm} \quad (۳)$$

با در نظر گرفتن W_{reps} به عنوان حد بالای وزن سیستم و W_{cmla} به عنوان وزن سیستم کل وزن مورد قبول سیستم به صورت زیر است :

$$W_{mg} = (W_{cmla} - W_{lm}) \leq (W_{reps} - W_{lm}) \quad (٤)$$

هم چنین برای به دست طول محرک مورد قبول سیستم فرمان برقی با موتور خطی از فرمول زیر استفاده میکنیم:

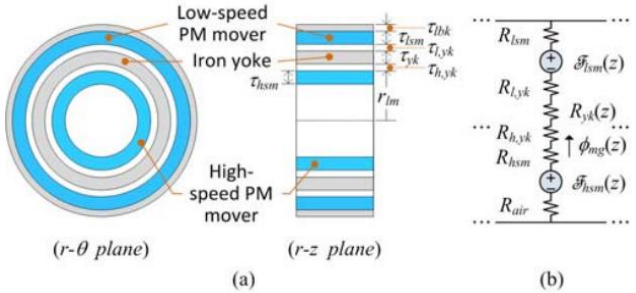
$$L_{hsm} = L_{lsm} - (G_R + 1).S_t \quad (۵)$$

که در این فرمول S_t کورس حرکت محرک الکترومغناطیس است.

همچنین میتوان شعاع بیرونی موتور خطی را از فرمول زیر محاسبه کرد

$$r_{mg} = [r_{lm}^2 + W_{mg} / (\pi.m_{lm}.L_{mg})]^{1/2} \quad (۶)$$

در موتور های خطی مقدار مقاومتی که در سیستم موتور الکتریکی وجود دارد تحت تاثیر مقاومت هوایی بین کپ ها هم بوده که از فرمول زیر محاسبه میشود:



شکل۵- مقاومت ها در موتور الکتریکی

که منجر به فرمول زیر خواهد بود:

$$R_F = R_{lsm} + R_{l,yk} + R_{h,yk} + R_{hsm} + R_{air} \quad (۷)$$

در این فرمول مقاومت پوسته آهنی از فرمول

$$R_{yk}(z,\xi)= \frac{N_{yk}\tau_{yk}}{\pi^2\mu_0 r_{yk}L_{hsm}}[1+\cos(2\pi N_{yk}(z-\xi)/L_{hsm})] \quad (۸)$$

برای محاسبه نشت موجود در سیستم وابسته به موقعیت نفوذ مغناطیسی داریم:

$$G_{bh}(z,\xi)=1/(R_F+R_{yk}(z,\xi)) = G_{bh0}+G_{bh1}\cos(2\pi N_{yk}(z-\xi)/L_{hsm}) \quad (۹)$$

از انجا که چرخ دنده های مغناطیسی با سرعت های مختلفی کار میکنند جریان شار مغناطیسی برابر است با

$$\phi_{mg}(z,\xi) = G_{bh}(z,\xi).[\varsigma_{hsm}(z,\xi)+\varsigma_{lsm}(z,\xi)] \quad (۱۰)$$

مقدار نیروی فشاری خروجی که توسط محرک PM سرعت پایین در موقعیت Z عرضه می شود، میتواند پس از آن به طور سینماتیکی از هردو معادل تانسور تنش معادل ماکسول یا رویکرد کار مجازی ارزیابی شود:

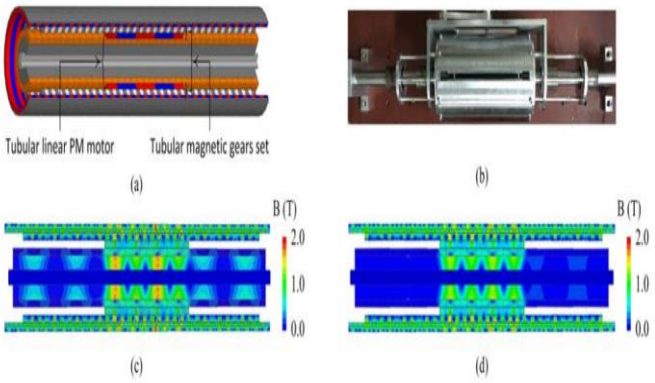
$$F_{lsm}(z)= (1/2)d[\int_0^{L_{hsm}}(\phi_{mg}^2(z,\xi)/G_{bh}(z,\xi))d\xi]/dz \quad (۱۱)$$

۴. ساخت نمونه و نتایج حاصله:

اگر از این سیستم جهت جای گزینی در سیستم فرمان خودرو های رگ محرک استفاده کنیم نیروی رانشی تولیدی در حدود ۰,۶ نیوتن بر سانتی متر مکعب است و همینطور این سیستم نصف فضای مجاز را مورد استفاده قرار میدهد.[۸-۱۰]

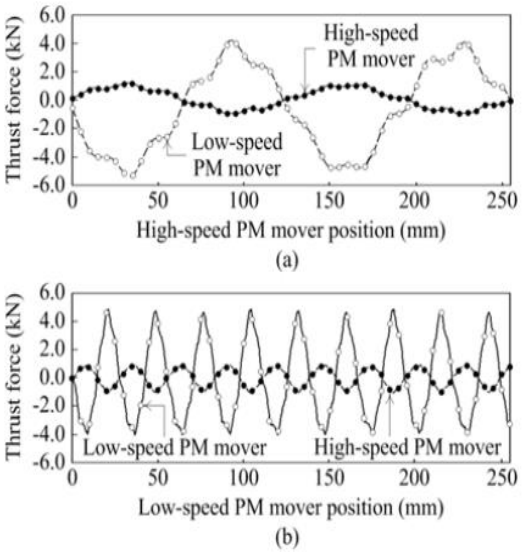
۱-۴- نمونه آزمایشگاهی تولیدی برای سیستم فرمان خودرو برقی خطی:

این نمونه ای که ساخته شده است در نرم افزار انسیس مورد تست حرارتی قرار گرفته شده است که برای شکل (c) در سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت مورد آنالیز حرارتی قرار گرفته شده است اما در شکل (d) در سرعت ۱۲۰ کیلو متر در ساعت مورد تست قرار گفته شده است.[۸-۱۰]



شکل۶- موتور خطی و انالیز حرارتی

با استفاده از این سیستم میتوان از کل وزن خودرو حدود ۴۵ کیلوگرم کاسته شود. در این سیستم بهترین حالت نسبت دنده در حدود ۴,۵ است.



شکل۷- نتایج تحلیل نرم افزاری

همانطور که در شکل بالا نشان داده شده است، از این نیروی رانشی خروجی و اختلاف فرکانس های که به طور مداوم روی محرک های PM با سرعت بالا و پایین مواجه میشویم، با تغییر همان فاصله های طولی، اثرات چرخ دنده مورد نظر میتواند به وضوح مورد تایید قرار گیرد.

بر اساس روش طراحی شده، پاسخهای دینامیکی سیستم CMLA شبیه سازی شده و در دو سرعت استاندارد خودرو در شکل پایین نشان داده شده است. همانطور که از شکل بالا دیده میشود در ساخت نمونه اولیه CMLA سنسور و واحد کنترل را شامل نمیشود.[۱۰-۸]

۵. نتیجه گیری

بر این اساس موتور های خطی اگر در سیستم فرمان برقی استفاده شوند وزن خودرو کاهش میابد به دلیل این که نیاز به چرخ دنده های حلزونی نبوده این سیستم نیز دارای سرعت بالایی است که کنترل پذیری را بالاتر میبرد همینطور نیروی اصطکاک کمتر بوده و استهلاک پایینی دارد.

در نمونه شبیه سازی شده که توسط نرم افزار انسیس تست حرارتی گرفته شده است مقدار حرارت تولیدی در این سیستم مقدار کمی داشته و هرچه سرعت بالاتر میرود سیستم عملکرد کمتری دارد در نتیجه تغییرات دمایی آن کم است.

در قسمت کنترلی سیستم از کنترلری استفاده شده است که باعث میشود مشکل ارتعاشات در موتور با حفظ قدرت کافی و پهنای باند حل شود که باعث بازخورد گشتاوری مثبت برای حس راننده است که با این روش به ساخت مدارات کنترلی، کنترلر و موتور پرداخته شده است.

در پایان برای بهبود حس راننده و کاهش ارتعاشات و نویز ها میتوان از یک موتور دورانی در روی میله فرمان استفاده کرد که باعث انتقال بهتر حس جاده را به راننده میشود.

۶. مراجع

۱. Mallikarjuna, V., & Rao, B. J. P. (2017). Fabrication of Electrical Steering Mechanism, *5*(X), 1414–1429.

۲. Johanson, C., & Stockel, M. T. (2010). Auto Suspension and Steering, 168–193. Retrieved from http://www.g-w.com/auto-suspension-steering-2010

۳. Guo, X., Ji, X., & Liu, Y. (2007). Study on dynamic responses of the vehicle handling models with a speed-sensitive hydraulic power steering system. *SAE Technical Papers*, (724). https://doi.org/10.4271/2007-01-4239

٤. Gieras JF, Piech ZJ, Tomczuk B. Linear synchronous motors: transportation and automation systems. CRC press; 2016 Apr 19.

٥. Laithwaite ER. A history of linear electric motors. Macmillan International Higher Education; 1987 Nov 11.

٦. Boldea I, Nasar SA. Linear electric actuators and generators. InElectric Machines and Drives Conference Record, 1997. IEEE International 1997 May 18 (pp. MA1-1). IEEE.

۷. (n.d.) ”پایان نامه موتور های القائی خطی از مجتبی منصوری“,

۸. Liu, C. T., Hwang, C. C., & Chiu, Y. W. (2017). Design of a Coaxially Magnetic-Geared Linear Actuator for Electric Power Steering System Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *53*(3), 2401–2408. https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2672665

۹. Eckert, P. R., Filho, A. F. F., Perondi, E., Ferri, J., & Golt, E. (2016). Design methodology of a dual-halbach array linear actuator with thermal-electromagnetic coupling. *Sensors (Switzerland)*, *16*(3). https://doi.org/10.3390/s16030360

۱۰. Bianchi, N., Bolognani, S., Corte, D. D., & Tonel, F. (2002). Tubular Linear Permanent Magnet Motors : an Overall Comparison, 1266–1273.

۱۱. محمدحسن پیشه ور و محمدهادی کریمی تفتی. (۱۳۹۴). تجزیه و تحلیل نیروی الکترومغناطیسی و نویز های موتور سنکرون مغناطیس دائم برای استفاده در سیستم فرمان اتومبیل.

۱۲. فربد احمدی فر.(۱۳۹۱). مدل سازی سیستم کنترل فرمان الکتریکی خودرو با استفاده از روش باند گراف