



Optimal Electric Motor Selection for Tube Bending Machine within a Manufacturing Automation Cell



ARTICLE INFO

Authors

Norouzi Niyae F.^{1*},
Taheri Sartang K.¹
Taghavi Farahi MH.¹
Fesharakifard R.^{1*},
Rezaei SM.¹

¹ Mechanical Engineering Department,
Amirkabir University of Technology,
Tehran, Iran.

* Correspondence

Address: fesharaki@aut.ac.ir

How to cite this article

Norouzi Niyae F, Taheri Sartang K, Taghavi Farahi MH, Fesharakifard R, Rezaei SM. Optimal Electric Motor Selection for Tube Bending Machine within a Manufacturing Automation Cell. Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2022;22(10):161-166.

ABSTRACT

Choosing the right equipment in terms of price, performance and reliability, is one of the main challenges in the automation industry. Among these equipments, electric motors are the most important elements which are widely used in the industries. Electro motors selection is made according to certain rules and principles, and it is very important to know the governing conditions. Using a motor with less power than required will lead to system failure and a motor with much more power will result in extra costs.

In this article, scientific selection of an electric motor for the bending process in an automation system has been discussed. Using real conditions of a manufacturer and available data in articles and books, the necessary relationships were extracted. 28 number of motors (among the available ones) were nominated in the first stage of preliminary monitoring. Then, by applying other prevailing conditions and characteristics, 3 motors with different powers selected for final investigations. Eventually, after using Simscape simulations & exerting less energy consumption criteria, the 5RK90GE-CW2ML2 motor (manufactured by Oriental Motor Company) was selected and was approved after satisfying the power, quality and safety conditions.

Keywords Electric Motor Selection, Tube Bending Machine, Automation Cell



ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته.
مهر ۱۴۰۱، دوره ۲۲، شماره ۱۰، صفحه ۱۶۱-۱۷۷.

انتخاب الکتروموتور بهینه برای دستگاه خم لوله در سلول تولید اتوماتیک



چکیده

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها

فرنود نوروزی نیایی^{۱*}
کامران طاهری سرتنگ^۱
محمدماهان تقوی فرهی^۱
رسول فشارکی فردا^۱
سیدمهدی رضاعی^۱

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

* نویسنده مسئول

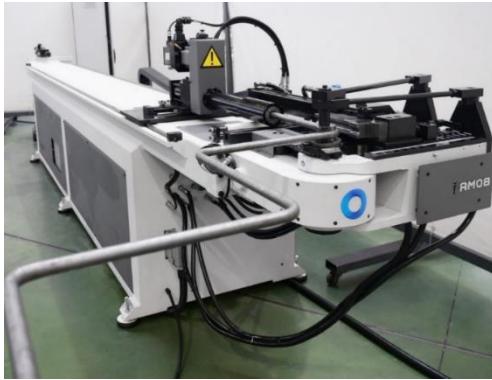
آدرس:

fesharaki@aut.ac.ir

امروزه یکی از چالش‌های صنعت، بخصوص صنعت اتوماسیون انتخاب تجهیزات مناسب از لحاظ قیمت، عملکرد و قابلیت اطمینان می‌باشد. از جمله این تجهیزات می‌توان به الکتروموتورها که از مهم‌ترین و پرکاربردترین ارکان صنعتی به شمار می‌آیند، اشاره نمود. انتخاب الکتروموتورها طبق قواعد و اصول خاصی صورت می‌پذیرد و شناخت شرایط حاکم بر مسئله بسیار مهم می‌باشد؛ چراکه استفاده از موتوری با توان کمتر از نیاز موجب آسیب دیدن موتور و عدم کارایی و استفاده از موتور با توان بالاتر از نیاز موجب افزایش هزینه‌های مجموعه می‌شود.

هدف این مقاله انتخاب علمی یک الکتروموتور برای فرآیند خم‌کاری لوله‌ها در یک سیستم اتوماسیون است. لذا با استفاده از شرایط واقعی یک تولیدکننده و بهره‌گیری از داده‌های موجود در مقالات و کتاب‌ها، روابط لازم استخراج گشته که پس از انجام محاسبات ابتدایی و اعمال شرایط کاری موتور، ۲۸ موتور در مرحله اول پایش مقدماتی و انتخاب گردید. سپس با اعمال سایر شرایط و روابط حاکم، ۳ موتور با توان متفاوت برای بررسی نهایی در نظر گرفته شدند. در نهایت پس از شبیه‌سازی در متلب سیم‌اسکیپ و اعمال شرایط انرژی مورد نیاز، موتور 5RK90GE-CW2ML2 ساخت شرکت Oriental Motor توانست با ارضا شرایط توانی، کیفی و ایمنی به عنوان گزینه نهایی انتخاب و تأیید گردید.

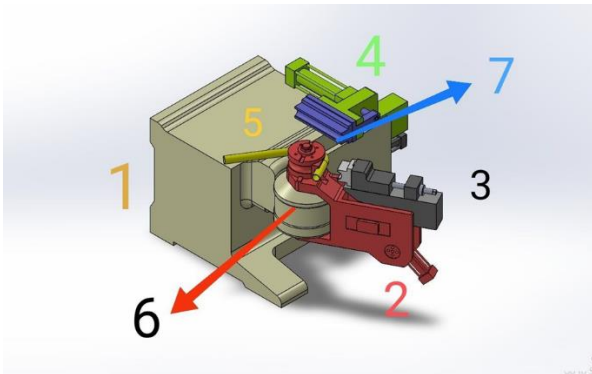
کلیدواژه‌ها انتخاب الکتروموتور، دستگاه خم لوله، سلول اتوماسیون



شکل ۲) دستگاه خم کاری شرکت AMOB

۱-۱- معرفی واحد خم کاری

دستگاه لوله خم کن نوعی تجهیز برای پروسه خم سرد لوله ها و پروفیل های فلزی است. فرایند خم شدن یک فرایند کششی است که در طول فرایند خم شدن، به مایع خنک کننده نیاز نیست. در برخی موارد، روغن کشی برای کاهش مقاومت بین لوله ها و ابزار خم لوله مورد نیاز است که می تواند کیفیت خم ها را بهبود بخشد و طول عمر قالب های خم لوله را افزایش دهد. همچنین در بعضی طرح ها از ماندل برای کاهش آسیب به قطعه مورد خم استفاده می گردد [4]. دستگاه شکل ۲ طیف وسیعی از خم ها با شعاع های متنوع با زوایای گوناگون در ۳ درجه آزادی برای میله های گوناگون را پشتیبانی می کند. المان های به کار رفته در کلگی قسمت خم در شکل ۳ نمایش داده شده است:



شکل ۳) کلگی قسمت خم کاری

اجزا شکل ۳ به شرح زیر است:

شماره ۱: میز کار

شماره ۲: خم کن (۰-۱۸۰ درجه)

شماره ۳: گیره قابل تنظیم (جهت ثابت نگه داشتن لوله بر روی غلتک خم)

شماره ۴: سیستم محرک گیره

شماره ۵: لوله

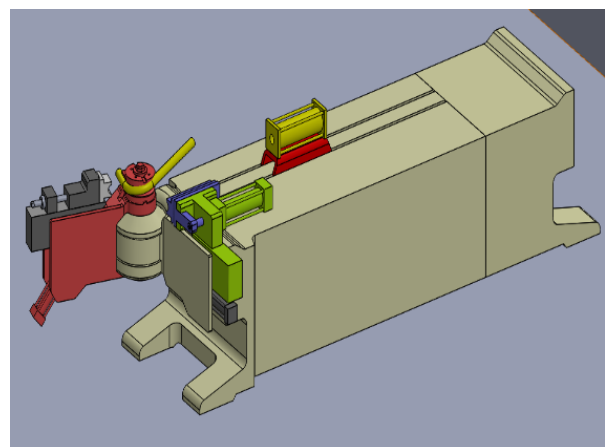
شماره ۶: محور دوار متصل به موتور

شماره ۷: کلگی گیره (جهت ثابت نگه داشتن انتهای لوله هنگام خم)

۱- مقدمه

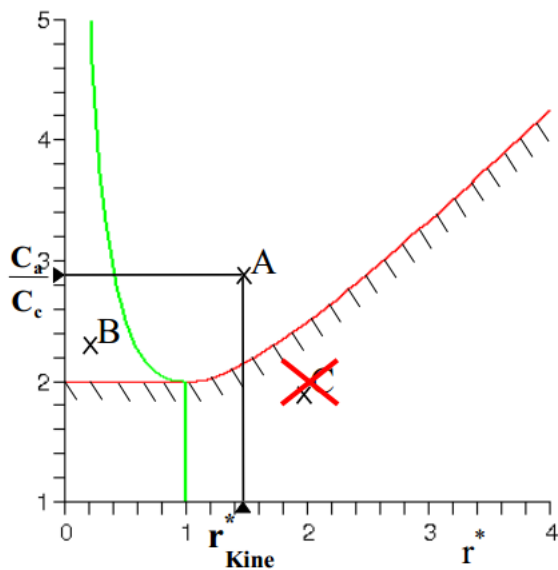
امروزه با پیشرفت صنایع و تغییر شکل زندگی بشر، استفاده از تکنولوژی های تولیدی سال های گذشته نیز پاسخگوی نیازهای متعدد و متنوع جوامع مصرفی محصولات نمی باشد؛ چه رسد به تکنولوژی های تولیدی دهه های گذشته. اتوماسیون با حذف نیروی انسانی، محدودیت ها را کنار زده و با کمک ربات ها، سیستم های تولید و انتقال قدرت، زبان های برنامه نویسی و... موجب کاهش زمان تولید و هزینه های جاری شده و افزایش بهره وری و سود نهایی را در پی دارد. تشخیص عیوب در این سیستم ها ساده، سریع، امکان پشتیبانی لحظه ای و از راه دور را دارا می باشد. سیستم های بالادستی اتوماسیون مانند PLC ها قابل هماهنگی با طیف وسیعی از سیستم های برقی، هیدرولیکی و نیوماتیکی بوده و منحصر به سیستم های مکانیکی نمی باشند [1]. یکی از صنایع نیازمند توسعه در این زمینه، صنعت تولید ویلچر است؛ بطوریکه در اکثر کارخانه ها و کارگاه های کشور در این حوزه خط تولید به صورت کاملاً دستی بوده و از راندمان کاری پایینی برخوردار است.

برای این منظور با الهام از مدل های موجود [2-3]، یک سلول تولید اتوماتیک شامل خطوط تغذیه، سوراخ کاری، برش، خم (شکل ۱) و انتقال به واحد مونتاژ (یا انبار در صورت نیاز) برای حل این مسئله پیشنهاد و در سالی دور کس طراحی شده است. یک مورد از دستگاه های واقعی ساخته شده در شکل ۲ نمایش داده شده است. هدف این مقاله، پیشنهاد موتور الکتریکی مناسب برای قسمت خم کاری این طرح می باشد، که در همین راستا با توجه به شرایط فیزیکی واقعی، استانداردهای موجود و روابط حاکم بر مسئله، موتور با قابلیت برآورده کردن نیاز طراحان بررسی و پیشنهاد شده است.



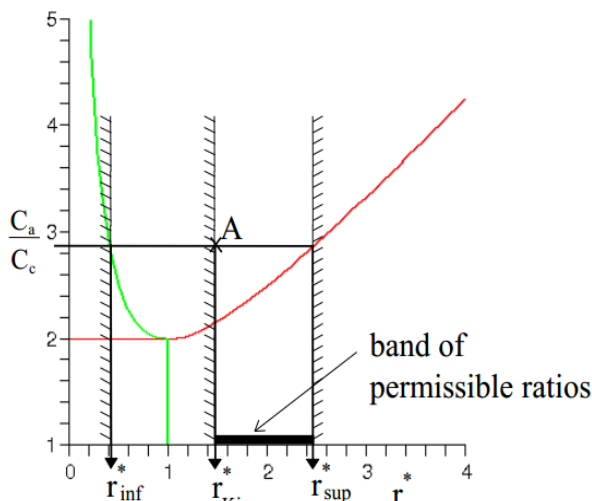
شکل ۱) واحد خم کاری طراحی شده

هنگام انتخاب موتور توجه به نمودار $\frac{C_a}{C_c}$ برحسب r^* و موقعیت قرارگیری مشخصات موتور در این نمودار ضروری می‌باشد (شکل ۴). باتوجه به شکل این نمودار، ۳ حالت کلی ممکن است پدید آید:



شکل ۴) منحنی عملکردی موتور

۱. نقاط بالای نمودار در محدوده قابل قبول قرار دارند (نقطه A).
 ۲. نقاط زیر نمودار قابل استفاده نیستند (نقطه C).
 ۳. نقاط در محدوده B به شرط انتخاب سیستم انتقال قدرت مناسب قابل استفاده می‌باشند.
- برای انتخاب سیستم انتقال قدرت مناسب نیز از نمودار شکل ۵ استفاده می‌شود. در حداصل r^*_{kine} تا r^*_{sup} باند نسبت‌های مجاز برای انتخاب سیستم انتقال قدرت می‌باشد.



شکل ۵) انتخاب سیستم انتقال قدرت مناسب موتور

۲-۲- شرایط فیزیکی مسئله

میله‌های مورد استفاده در صنعت عمدتاً از جنس آلومینیوم یا فولاد سبک St12 (معادل DIN 1629/3) می‌باشند که در این

دقت شود شعاع کلگی گیره‌ها و شعاع غلتک، با شعاع لوله موردنظر (با در نظر گرفتن تolerانس موجود) برابرند.

۲- مشخصات موتور واحد خم‌کاری

۲-۱- روابط حاکم بر انتخاب موتور

معادلات حاکم بر موتور به شرح زیر بوده و گشتاور موتور انتخابی باید شرط زیر را ارضا کند [5-7]:

$$T_{max} \geq \left(\frac{J_1}{r} + r M_2 \right) \ddot{x}_{spec} + f_1 \omega_{max} + f_2 r \dot{x}_{spec} + r F_{ext} \quad (1)$$

در این رابطه، مؤلفه‌های اطلاعات اولیه و مشخصات کاری سیستم (معلومات)، مؤلفه‌های مشخصات موتور و r نسبت انتقال قدرت بوده که ۲ مورد آخر می‌بایست مطابق شرایط کاتالوگ‌ها استخراج شوند.

باتوجه به عدم وجود نیروی خارجی عبارت $r F_{ext}$ برابر صفر می‌باشد. به دلیل عدم اصطکاک ضرایب f_1 و f_2 هم صفر در نظر گرفته می‌شوند، کل جرم جابه‌جایی در راستای حرکت نیز حدود ۱۰/۷ کیلوگرم است که برای اطمینان محاسبات ضریب ایمنی ۱/۵ انجام می‌شود.

برای محاسبه نسبت انتقال قدرت پارامتر $r_{opt \gamma}$ تعریف می‌شود. همچنین در راستای محاسبات مربوط به نسبت انتقال قدرت از پارامتر بی‌بعد r^* استفاده می‌شود که رابطه آن به این صورت است.

$$r_{opt \gamma} = \frac{\sqrt{J_1}}{M_2} \quad (2)$$

$$r^* = \frac{r}{r_{opt \gamma}} \quad (3)$$

بنابراین روابط گشتاور موتور به شرح زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{T_{max}}{J_1} = \left(r^* + \frac{1}{r^*} \right) \sqrt{M_2} \ddot{x}_{spec} \quad (4)$$

$$\sqrt{J_1} \omega_{max} = \left(\frac{1}{r^*} \right) \sqrt{M_2} \dot{x}_{spec} \quad (5)$$

از آنجاکه پارامترهای قسمت مربوط به نسبت انتقال قدرت بی‌بعد می‌باشند، به طریق مشابه پارامترهای ثابت جدیدی c_a و c_c تعریف شده تا از تقسیم آن‌ها بر هم پارامتر بی‌بعد جدیدی برای مقایسه با r^* استفاده شود. این ثوابت به ترتیب ثابت عملگر (Actuator Constant) و ثابت بار (Load Constant) نامیده می‌شوند.

$$c_a = \frac{T_{max}}{\sqrt{J_1}} \quad (6)$$

$$c_c = \sqrt{M_2} \dot{x}_{spec} \quad (7)$$

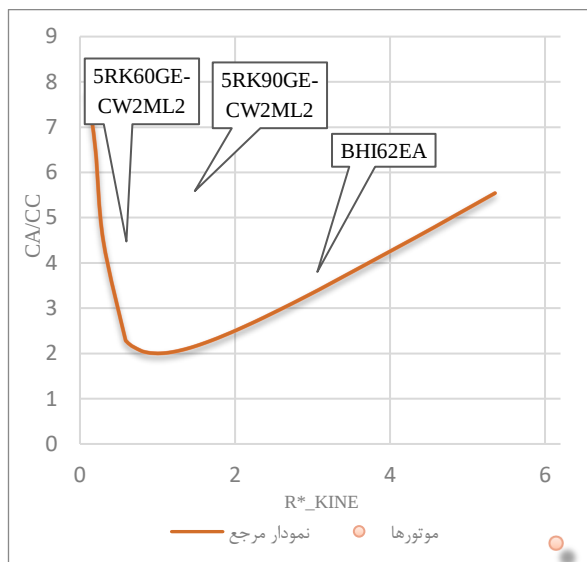
$$r^*_{kine} = \frac{\sqrt{M_2} \dot{x}_{spec}}{J_1 \omega_{max}} \quad (8)$$

بنابراین روابط گشتاور موتوری و انتقال قدرت به شکل زیر تغییر می‌کنند:

$$\frac{c_a}{c_c} = r^* + \frac{1}{r^*} \quad (9)$$

$$r^* \geq r^*_{kine} \quad (10)$$

روابط (۹) و (۱۰) بی‌بعد بوده و در نتیجه صرفاً مقایسه عددی می‌باشند.

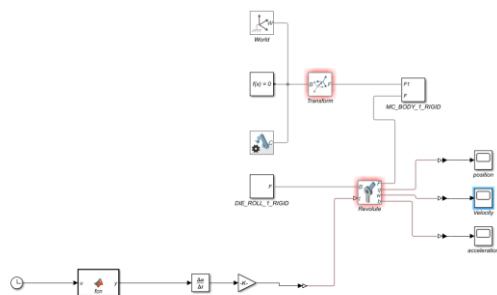


شکل ۷) وضعیت موتورهای در نمودار انتخاب موتور

درنهایت از بین ۲۸ مدل موتور، ۳ موتور 5RK90GE-CW2ML2 (M3)، 5RK60GE-CW2ML2 (M1)، و BHI62EA (M2) از شرکت Oriental Motor که شرایط معادلات لازم را برآورده می- نمایند، پیشنهاد می‌شود[9].

۲-۳- مدل سازی و شبیه سازی در نرم افزار متلب سیم اسکپ:

پس از انتخاب ۳ موتور نهایی، برای یافتن موتور بهینه و مناسب از نرم‌افزار متلب و قسمت سیم‌اسکیپ استفاده شده است. به این منظور مدل ساده‌شده‌ای از شکل ۱ وارد متلب شده است (Import). سپس در قسمت سیمولینک شماتیکی از دستگاه خم بلوک چینی شده است (شکل ۸).



شکل ۸) بلوک چینی دستگاه خم در سیمولینک

برای رسیدن به نتیجه، پروفیل سرعتی که مدنظر طراح می‌باشد (شکل ۶) در تابع نوشته‌شده و تبدیل به ورودی مطلوب موتور می‌شود. با درنظرگرفتن خروجی واقعی موتورها و میزان انرژی مصرف‌شده برای انجام آن، امکان انتخاب موتور بهینه فراهم خواهد شد. در شکل ۹ پروفیل سرعت طی شده توسط ۳ موتور نمایش داده شده است.

پژوهش فرض بر استفاده از میلۀ فولادی می‌باشد. مشخصات مورد استفاده در محاسبات در جدول ۱ نشان داده شده است:

جدول ۱) مشخصات میله تحت خم

چگالی (Kg/m ³)	۷۸۷۰
طول کلی (m)	۲
طول درگیر (m)	۱،۵
ضخامت (cm)	۰،۷۵
قطر خارجی (cm)	۳
قطر داخلی (cm)	۱،۵

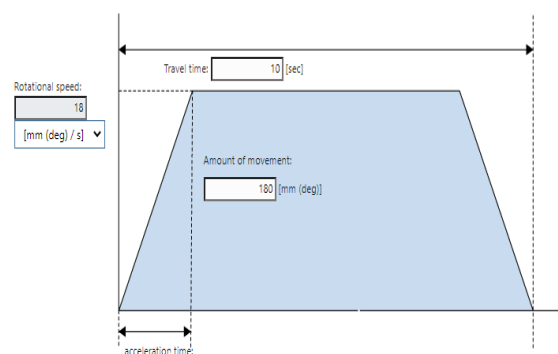
باتوجه به مشخصات فوق جرمی که موتور باید تحمل کند از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$M = \rho L(D^2 - d^2) = 7870 * 2(0.03^2 - 0.015^2) = 10.624 \text{Kg} \quad (11)$$

$$I_{center} = 5.33 \text{ Kg/m}^2 \quad (12)$$

$$T_{Mass} = 16 * 0.3 = 4.8 \text{ N/m} \quad (13)$$

با احتساب ضریب ایمنی $1/5$ ، محاسبات برای جرم 16 کیلوگرم انجام می‌گردد. سرعت حرکت میله در مدار برای رسیدن به مکانیزم خم (سرعت تأمینی توسط موتور) برابر $10/8$ متربردقیقه در نظر گرفته شده و زمان هر فرایند 10 ثانیه است. مکانیزم حرکت به صورت مدل دوزنقه‌ای و زمان شتاب گیری‌ها 2 ثانیه می‌باشد. پروفیل حرکتی در شکل 6 نمایش داده شده است.



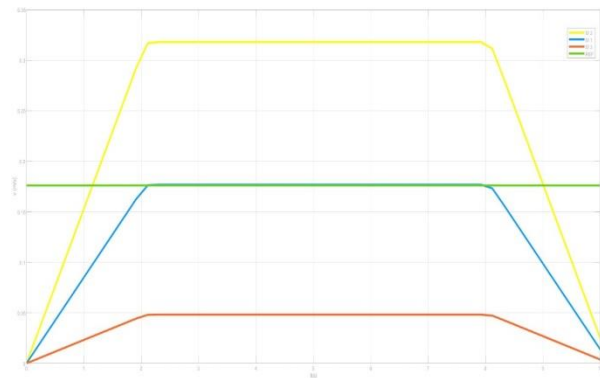
(شکل ۶) مشخصات یرو فیل حرکتی

باتوجه به اینکه روابط، ترکیبی از ترم‌های معلوم و ترم‌های وابسته به خواص موتور می‌باشند، و باتوجه به ویژگی‌های زیر، دسته‌ای از موتورهایی که قابل برآورده کردن نیازهای این طرح را دارند انتخاب می‌گردند. این ویژگی‌ها مطابق دستگاه موجود در مرجع [8] انتخاب شده‌اند.

- موتور از سری موتورهای AC استاندارد انتخاب شده است.
 - تأمین برق موتور از جریان تک فاز ۲۲۰ ولت AC با فرکانس ۶۰ هرتز فرض شده است.
 - موتور دارای ترمز الکترومغناطیسی می‌باشد.
 - موتور قابلیت توقف آنی دارد.
- در شکل ۷ وضعیت ۲۸ موتور که شرایط شکل ۵ را برآورده کرده و در ناحیه مناسب قرار گرفته‌اند، نمایش داده شده است.

۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

گسترش جوامع و بالا رفتن سرعت زندگی، منجر به افزایش فرهنگ عرضه و تقاضا در سطح زندگی انسان‌ها شده است. اتوماسیون سیستم‌های تولیدی، مؤثرترین رویکرد برای پاسخ به این تقاضا و سودآوری است. یکی از وسایل پرکاربرد که در کشور ما همچنان نگاه سنتی (تولید دستی) به آن وجود دارد، ویلچر می‌باشد. این پروژه بخشی از یک تحقیقات مفصل در راستای ایجاد یک سلول کاملاً اتوماتیک برای تولید ویلچر می‌باشد که هدف آن انتخاب موتور مناسب برای قسمت خم سلول می‌باشد. ازین رو پس از بررسی دستگاه‌های خم متداول در صنعت، یک دستگاه خم طراحی شده و با توجه به کارکرد دستگاه و روابط حاکم بر مسئله، مجموعه‌ای از موتورهای مناسب که بتوانند خواسته‌های طراحان را برآورده نمایند، پیشنهاد شده است. در مرحله اول ۲۸ موتور برای این کار در نظر گرفته شدند. سپس ۳ موتور با توان‌های مختلف (۹۰، ۶۰ و ۲۰۰ وات) که در معادلات موتور برقرار بودند انتخاب می‌شوند. در مرحله بعد مدل ساده‌شده‌ای از دستگاه خم در متلب مدل‌سازی شده است تا امکان مقایسه موتورها فراهم شود. پروفیل سرعت مدنظر طراح (که مبتنی بر فیزیک واقعی مسئله می‌باشد) به‌عنوان پروفیل مطلوب به ورودی موتورها تبدیل می‌شود و خروجی سرعت موتورها جمع‌آوری می‌شوند. نهایتاً مشاهده می‌شود موتور ۶۰ وات امکان تعقیب پروفیل مدنظر را نداشته و حذف می‌شود. بین موتورهای ۹۰ و ۲۰۰ وات، موتور با توان بالاتر به دلیل مصرف انرژی بیشتر برای انجام فرآیند، انتخاب بهینه نبوده و سرانجام موتور 5RK90GE-CW2ML2 با توان ۹۰ وات از شرکت Oriental Motor به همراه سیستم انتقال قدرت متناسب با موتور به مدل 5GE15KBF که دارای بالاترین ضریب ایمنی در محاسبات می‌باشند برای این کار در نظر گرفته شده است.



شکل ۹) پروفیل طی شده توسط ۳ موتور

باتوجه به شکل ۹، خط سبز مقدار سرعت مرجع، نمودار آبی پروفیل سرعت موتور ۹۰ وات، پروفیل زرد برای موتور با توان ۲۰۰ وات و پروفیل قرمز مربوط به موتور با توان ۶۰ وات است. همان‌طور که مشاهده می‌شود موتور ۶۰ وات به پروفیل سرعت نرسیده و امکان برآورده کردن خواسته طراح را ندارد؛ بنابراین انتخاب نهایی نمی‌باشد. از بین موتورهای ۹۰ و ۲۰۰ وات، موتور ۲۰۰ وات نیز مسیر را با شتاب بیشتری طی می‌کند که این امر مستلزم افزایش نیرو و مصرف کار بیشتری است. این موضوع از این طریق قابل‌بحث نیز می‌باشد که بین موتورهای ۹۰ و ۲۰۰ وات، برای انجام عملی ثابت و معین که کار مشخصی انجام شود، موتور ۲۰۰ وات به دلیل ممان اینرسی بالاتر قطعاً انرژی بیشتری مصرف می‌کند و انتخاب موتور ۹۰ وات بهینه خواهد بود.

همچنین این مدل‌سازی قابلیت کنترل مدارباز با ضریب بهره ثابت را دارد.

۲-۴- مشخصات موتور انتخاب‌شده:

ویژگی‌های موتور انتخاب‌شده در جدول ۲ بیان شده است:

جدول ۲) ویژگی‌های موتور انتخاب‌شده برای سیستم خم

نوع	ترمز الکترومغناطیسی با قابلیت برگشت‌پذیری
سایز فریم	۳/۵۴ in
توان خروجی	۹۰ W (۱/۸ HP)
ولتاژ (VAC)	تک فاز ۲۲۰-۲۳۰ VAC
فرکانس (Hz)	۶۰ ۵۰
جریان	۰/۸۲ A [۲۳۰ VAC, ۵۰ Hz] ۰/۹۶ A [۲۲۰-۲۳۰ VAC, ۶۰ Hz]
نوع شفت / چرخ‌دنده	شفت پینیون (سردنده موردنیاز - به‌صورت جداگانه فروخته می‌شود)
استاندارد ایمنی	UL, CSA, CCC, EN, CE
علامت CE	ولتاژ پایین
کلاس عایق	کلاس B (۲۲۶ درجه فارنهایت [۱۳۰ درجه سانتی‌گراد])
حفاظت از گرمای بیش‌ازحد	محافظ حرارتی داخلی (نوع برگشت اتوماتیک). دمای کارکرد، باز: ۱۳۰ درجه سلسیوس، بسته شدن: ۸۲ درجه سلسیوس
محدوده دمای محیط	منفی ۱۰ الی ۴۰ درجه سلسیوس
رطوبت محیط	حداکثر ۸۵٪ (غیر متراکم)
درجه محافظت	IP40

فهرست علائم

T	گشتاور (N.m)
M	جرم (Kg)
J	ممان (Kg.m ²)
x	جابجایی (m)
$\dot{x}$	سرعت (m/s)
$\ddot{x}$	شتاب (m/s ²)
F	نیرو (N)
f	ضریب اصطکاک
r	شعاع (m)
c	ثابت بی‌بعد
علائم یونانی	
ρ	چگالی (Kg/m ³)
ω	سرعت چرخش (rad/s)
زیرنویس‌ها	
spec	تجهیزات
kine	سینماتیک

تشکر و قدردانی: نویسندگان مراتب تشکر خود را از جناب آقای مهندس جعفر محامد، مدیر کارخانه ایران بهکاران به دلیل فراهم کردن امکان بازدید از کارخانه اعلام می‌دارند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان متعهد می‌شوند کلیه نتایج به‌دست‌آمده، حاصل تحقیقات و محاسبات ایشان می‌باشد.

تعارض منافع: نویسندگان متعهد می‌شوند کلیه نتایج به‌دست‌آمده هیچ‌گونه تعارضی با منافع اشخاص یا سازمان‌های حقیقی و حقوقی ندارد.

منابع مالی: کلیه هزینه‌های پروژه انجام‌شده توسط خود محققین تأمین گردیده است.

مراجع

- 1- Mikell P. Groover, "Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing", 4th Ed., 2015.
- 2- <https://www.youtube.com/watch?v=vUkvBp12H5I>
- 3- <https://www.amobgroup.com/en/products/cnc-pipe-bender>
- 4- Kalpakjian-schmid, "Manufacturing Processes for Engineering Materials", 4th Ed., 2003.
- 5- Hakan Gurocak, "Industrial Motion Control Motor Selection, Drives, Controller Tuning, Applications", 2016.
- 6- Wilfried Voss, "A Comprehensive Guide to Servo Motor Sizing", 2007.
- 7- Giancarlo Cusimano, "Influence of the Reducer Efficiencies on the Choice of Motor and Transmission: Torque Peak of the Motor", Journal of Mechanism and Machine Theory, 2012.
- 8- <https://products.swagelok.com/en/tubing-tube-accessories/tube-benders/electric-tube-benders/c/805?clp=true>
- 9- <https://sizing.orientalmotor.co.jp/>