

# پایش وضعیت لقی در یک سرومکانیزم لنگ لغزشی با استفاده از تحلیل هارمونیک‌های سیگنال حسگر انکودر

مهدی دانش\*  
علی اکبر محمدی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، بوئین زهرا، قزوین، ایران  
کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق، تهران، ایران

## چکیده

وجود لقی در مکانیزم‌ها اگر چه ساخت و مونتاژ آنها را ساده می‌کند اما از سوی دیگر اثرات نامطلوبی مانند افزایش ارتعاش و کاهش دقت را در بر خواهد داشت. عامل اصلی خطا در موقعیت و جهت اتصالات وجود لقی در مفصل‌ها می‌باشد. در این تحقیق امکان استفاده از سیگنال انکودر جهت برآورد میزان لقی در مفصل‌های یک سرومکانیزم لنگ لغزشی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور سیگنال انکودر در سرومکانیزم مذکور در حالت‌های مفصل بدون لقی، مفصل با لقی کم و مفصل با لقی زیاد در محلی از قطعه که نقش لینک ارتباطی در مکانیزم را دارد مورد بررسی قرار گرفته است. با انجام آزمایشات و تجزیه و تحلیل سیگنال‌های خروجی انکودر و مقایسه سیگنال‌ها در حالت‌های مفصل با لقی و بدون لقی، مشاهده شد سیگنال انکودر در حالت مفصل بدون لقی دارای شکل موج کاملاً سینوسی و در حالت مفصل با لقی دارای شکل موج سینوسی همراه با اعوجاج می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان داد اعوجاج در سیگنال انکودر را می‌توان به عنوان معیاری جهت برآورد و پایش وضعیت لقی در سرو مکانیزم لنگ لغزشی مورد استفاده قرار داد. **واژه‌های کلیدی:** مکانیزم لنگ لغزشی، سرومکانیزم خطی، حسگر انکودر، پردازش سیگنال.

## Condition monitoring of slider crank mechanism of a linear servo mechanism using encoder sensor signal harmonics

M. Danesh

Department of Mechanical Engineering, Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Iran

A. A. Mohammadi

Islamic Azad University, East Tehran Branch, Tehran, Iran

## Abstract

Although clearance in mechanisms facilitates manufacturing and assembly, it will lead to undesirable results such as an increase in vibration and a decrease in accuracy. Joint clearance is considered as the main cause of errors in the position and the direction of the links. This research has investigated the possibility of using encoder signals to estimate the extent of clearance in the joints of a slide crank servomechanism. The output signal of the encoder was studied in three modes of zero, low and high clearances. It was done on the point of the part that serves as a link for servomechanism. The output signals of encoder were tested, analyzed and compared with those in joints with/without clearances. It was found that the signals had a sinusoidal waveform in the joint with ideal clearance but it has a distorted waveform in the joint which has high clearance. The results show that the distortion available in encoder signals may be used as a criterion to estimate and monitor clearance condition in slide crank mechanisms.

**Keywords:** Encoder sensor, Signal processing, linear servo mechanism, Slide crank mechanism.

ماهواره‌ها، تجهیزات پزشکی و بیومکانیک، سیستم‌های اندازه‌گیری، خطوط اتوماسیون، خودروسازی و صنایع نیازمند به ایمنی بالا هنوز زمینه زیادی برای پژوهش در زمینه کاربرد و بهبود عملکرد مکانیزم‌ها وجود دارد. تأثیر لقی مفاصل در عملکرد دینامیکی یک سیستم مکانیکی توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده به طوری که تحقیقات عملی و تئوری بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. ادامه به برخی از مهم‌ترین آنها به صورت مختصر اشاره خواهد شد. شکل ۱ طرحواره یک مکانیزم لنگ لغزشی نشان داده شده است.

## ۱- مقدمه

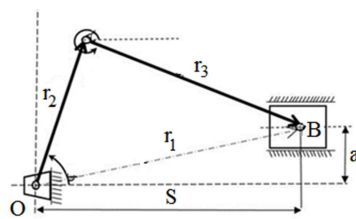
مکانیزم لنگ لغزشی یک سیستم اتصالی مکانیکی با تاریخچه ای از کاربردهای موفقیت آمیز است [۱]. کار اصلی این مکانیزم‌ها تبدیل حرکت دورانی لنگ به حرکت انتقالی می‌باشد. در موتورهای احتراق داخلی، ماشین بخار و غیره، حرکت رفت و برگشتی پیستون به حرکت دورانی میل‌لنگ و در کمپرسورهای رفت و برگشتی و دستگاه پانچ حرکت دورانی میل‌لنگ به حرکت رفت و برگشتی پیستون یا دستگاه پانچ تبدیل می‌شود.

کاربرد گسترده مکانیزم‌ها در صنایع ابتدایی و پیشرفته باعث توجه ویژه محققین و مهندسان برای طراحی و بهبود مکانیزم‌ها شده است. از این رو بسیاری از روش‌های کلاسیک و مدرن طراحی در انواع مکانیزم‌ها اعمال شده است و تحقیقات بسیار گسترده‌ای در این زمینه وجود دارد. امروزه نیز با رشد صنایع پیشرفته مانند فناوری فضایی و

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: danesh@bzte.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۹/۱۳



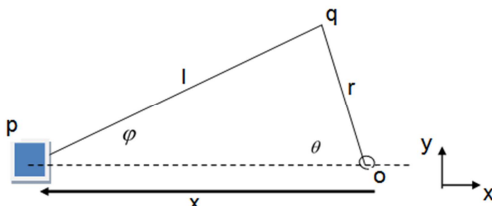
شکل ۱- طرحواره مکانیزم لنگ لغزشی

استفاده نمودند [۶]. در تحقیق حاضر لقی مفصل مکانیزم لنگ لغزشی یک سرومکانیزم خطی که به محور موتور دی سی کوپل شده است و باعث می‌گردد محور متصل شده به مکانیزم فوق را در بازه زاویه  $\pm 14^\circ$  درجه حرکت دهد مورد پایش و ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور از یک حسگر انکودر برای استخراج سیگنال خروجی سیستم و از یک فیکسچر مخصوص طراحی شده جهت نگهداری و نصب مجموعه سرومکانیزم خطی و حسگر جهت انجام آزمایش استفاده شده است. جهت پایش لقی مفصل، سه حالت مفصل با لقی زیاد، مفصل با لقی کم و مفصل بدون لقی در محلی از قطعه که نقش لینک ارتباطی در مکانیزم را دارد و باعث لقی می‌گردد در نظر گرفته شد. نتایج آزمایش نشان داد با افزایش لقی در مفصل، شکل موج سیگنال خروجی انکودر دچار اعوجاج می‌شود. پردازش حوزه فرکانس نشان داد اعوجاج ایجاد شده با هارمونیکهای آن مرتبط می‌باشد و می‌توان از پارامتر اعوجاج هارمونیک کلی سیگنال<sup>۱</sup> (THD) به عنوان شاخصی جهت پایش وضعیت مفصل در مکانیزم لنگ لغزشی مورد مطالعه استفاده نمود.

### ۱-۱- تحلیل مکانیزم لنگ لغزشی

شمارتیک میله‌ای مکانیزم لنگ و لغزنده سرومکانیزم خطی مطابق

شکل ۲ می‌باشد.



شکل ۲- طرحواره مکانیزم لنگ لغزشی و دستگاه مختصات [۷]

از رابطه سینوس‌ها در مثلث opq داریم:

$$\frac{\sin \theta}{L} = \frac{\sin \phi}{r} \rightarrow \sin \phi = \frac{r}{L} \sin \theta = n \sin \theta \quad (1)$$

با مشتق‌گیری از رابطه بالا، رابطه بین سرعت زاویه‌ای لنگ (oq) که در حقیقت خارج از مرکزی موتور می‌باشد و میله رابط (pq) بدست می‌آید:

$$\dot{\phi} = n \dot{\theta} \frac{\cos \theta}{\cos \phi} \quad (2)$$

با مشتق‌گیری از رابطه بالا، رابطه بین شتاب زاویه‌ای لنگ و لغزنده بدست می‌آید:

$$\ddot{\phi} = \frac{n(\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) + \dot{\phi}^2 \sin \phi}{\cos \phi} \quad (3)$$

دیگرام آزاد نیروهای وارد به لینک‌های متصل به موتور و محور مجموعه سرومکانیزم خطی در شکل ۳ و شکل ۴ نشان داده شده است.

معمولاً در سنتز مکانیزمها فرض می‌شود که اجزاء از نظر هندسی بی نقص هستند. یعنی اینکه بدون هیچ لقی در اتصالات کار می‌کنند. اما در عمل، لقی‌ها به سبب تolerانس‌ها و عیوبی که از طراحی، ساخت و سایش ناشی می‌شوند اجتناب ناپذیر هستند. لقی می‌تواند باعث دقت کم، عدم قطعیت سینماتیکی، نیروهای ضربه‌ای و ارتعاشات ناخواسته در مکانیزم‌ها شود. ینگ چن و همکاران تحقیقاتی‌اش مدل‌سازی دینامیکی و شناسایی یک مکانیزم لنگ لغزشی را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. در تحقیق آنها با استفاده از اصل همپلتون، ضریب لاگرانژ، محدودیت‌های هندسی و روش تفکیک سعی شده است تا معادلات دینامیک یک مکانیزم لنگ لغزشی که توسط یک سرو موتور به حرکت در می‌آید حاصل گردد. با مقایسه کردن پاسخ‌های دینامیکی بین نتایج آزمایش و شبیه‌سازی‌های عددی، مدل‌سازی دینامیک یک تفسیر و تعبیر بسیار خوبی از مکانیزم لنگ لغزشی ارائه شد [۲].

ارکایا و همکاران تأثیرات بالانس‌کردن و انعطاف‌پذیری لینک بر دینامیک یک مکانیزم مسطح دارای لقی مفصل را مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق آنها، نتایج تجربی بدست آمده نشان داد لقی مفصل منجر به تغییرات ناگهانی در ویژگی حرکت مکانیزم می‌گردد. در فواصل زمانی کوتاه این تغییرات ناگهانی باعث ایجاد نیروهایی می‌شوند که بر مفاصل مکانیزم دارای لقی تأثیر می‌گذارند. علاوه بر این ویژگی، انعطاف‌پذیری لینک مکانیزم دارای نقش مهمی در کاهش ارتعاشات اضافی ناشی از لقی اتصال دارد. نتایج آنها نشان داد تأثیرات نامطلوب لقی با استفاده از بالانس‌کردن تا حدودی کاهش می‌یابد [۳].

ارکایا و همکارانش مطالعات عددی و تجربی حول تأثیرات لقی مفصل بر دینامیک مکانیزم‌های مفصل‌دار انجام دادند. به این منظور، ارتعاشات در نقاط مختلف روی مکانیزم‌ها مورد سنجش قرار گرفت. حالت‌های مختلفی برای مقادیر لقی و سرعت‌های در حال اجرا در مکانیزم‌های مفصل‌دار مورد مطالعه قرار گرفت که ارزیابی نتایج پیشنهاد شده به صورت خلاصه در زیر آورده شده‌اند: الف) لقی مفصل منجر به تغییرات تدریجی در ویژگی‌های مکانیزم دارای لقی در مقایسه با مکانیزم بدون لقی می‌گردد. تحت تأثیر همین ارتعاشات است که فرسایش و خستگی در اجزاء مکانیزم افزایش یافته و دقت آن کاهش می‌یابد، در نتیجه کارایی مورد نظر را نخواهد داشت. همچنین باعث می‌شوند تا دقت مکانیزم بدتر شود و مکانیزم نتواند وظایف مورد انتظار را با دقت انجام دهد. ب) اگر مقدار لقی یا سرعت در حال اجرا افزایش یابد، دامنه‌های ارتعاش نیز افزایش می‌یابد [۴]. سیمپسونکو ساخت بهینه عملگر لغزشی نوسانی جهت کاربرد در مکترونیک را بررسی نمود. او در این تحقیق روش سنتز بهینه جهت دستیابی به بهترین زاویه انتقال، حداکثر مزایای مکانیکی و حداقل خطای انحراف از خطی بودن را ارائه نمود [۵]. واردی و همکارانش از روش بهینه سازی PSO جهت کاهش تأثیرات ناخواسته لقی اتصالات در مکانیزم لنگ لغزشی

<sup>1</sup> Total Harmonic Distortion

دوران است می‌باشد. هم‌چنین شتاب زاویه‌ای محور دوران به صورت زیر می‌باشد.

$$\alpha_b = \frac{\ddot{x}_p}{e} \quad (12)$$

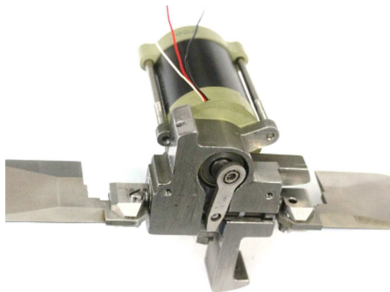
هم‌چنین برای شتاب خطی در نقطه p داریم:

$$\ddot{X}_p = r\dot{\theta}^2 \cos \theta + r\ddot{\theta} \sin \theta + L\dot{\varphi}^2 \cos \varphi + L\ddot{\varphi} \sin \varphi \quad (13)$$

## ۲- سرومکانیزم خطی لنگ لغزشی

سرومکانیزم‌های خطی در مقایسه با سرو مکانیزم‌های غیر خطی به لحاظ طراحی کنترل ساده‌تر بوده و اغتشاشات کمتری را به سیستم تحمیل می‌کنند. در این سرومکانیزم‌ها به منظور کاهش اندازه گشتاور مورد نیاز از مکانیزمی استفاده می‌شود که با اتصال به محور موتور باعث خواهد شد موتوری که تنها یک پنجم گشتاور مورد نیاز را تولید می‌کند بتواند محور چرخان را به حرکت درآورد. البته استفاده از مکانیزم‌های تبدیل گشتاور علاوه بر فوایدی که دارد ممکن است باعث ایجاد خطای لقی یا اصطکاک و مواردی از این دست نیز گردد. در مکانیزم انتقال نیرو که یک مکانیزم حرکت رفت و برگشتی است، حرکت دورانی موتور تبدیل به حرکت رفت و برگشتی لغزنده می‌شود. منظور از مکانیزم در اینجا، لینک‌های رابط نیرو بین موتور و محور می‌باشد. در حقیقت این مکانیزم وظیفه انتقال قدرت از موتور به محور را بر عهده دارد [۷].

شکل ۵ نمونه آزمایشگاهی سرومکانیزم خطی لنگ لغزشی مورد استفاده در این تحقیق که جهت ایجاد گشتاور با زاویه  $\pm 14^\circ$  درجه طراحی و ساخته شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۵- سرومکانیزم خطی لنگ لغزشی

## ۱-۲- اجزاء سیستم یک سرومکانیزم خطی

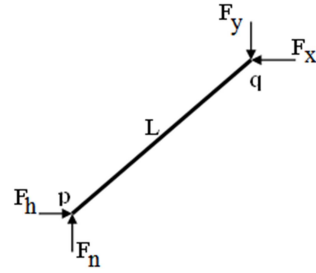
نحوه اتصال این اجزاء در شکل ۶ آورده شده است. سرومکانیزم خطی استفاده شده در این تحقیق از این زیرمجموعه‌های اصلی تشکیل شده است [۸]:

۱- موتور دی‌سی از نوع آهنربای دائم که مشخصات فنی این نوع موتور در جدول ۲ آورده شده است.

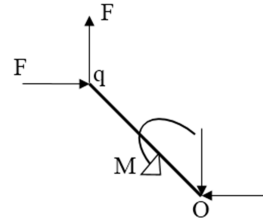
۲- مکانیزم لنگ لغزشی

۳- پتانسیومتر به عنوان حسگر بازخورد موقعیت محور سرومکانیزم که بر روی محور موتور نصب شده است.

سه نقطه کاری مؤثر مکانیزم لنگ لغزشی سرومکانیزم خطی  $p, o, q$  و  $q$  که در شکل ۷ نشان داده شده است به ترتیب مرکز دوران موتور، مرکز بلبرینگ (مرکز دوران لنگ) و مرکز مفصل (مرکز اتصال گوی



شکل ۳- دیاگرام آزاد بازوی رابط pq [7]



شکل ۴- دیاگرام آزاد بازوی رابط pq [7]

$$\begin{cases} F_h - F_x = ma_{GX} = A \\ F_n - F_y = ma_{GY} = B \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} F_x \left(\frac{L}{2}\right) \sin \varphi + F_n \left(\frac{L}{2}\right) \sin \varphi \\ - F_y \left(\frac{L}{2}\right) \cos \varphi \\ - F_n \left(\frac{L}{2}\right) \cos \varphi = I_L \ddot{\theta} \end{aligned} \quad (5)$$

$$M - F_x r \sin \theta + F_y r \cos \theta = I_r \ddot{\theta} \quad (6)$$

با حل چهار معادله آخر، چهار مجهول  $F_h, F_x, F_y, F_n$  بدست می‌آید. از طرفی برای محاسبه  $a_{GX}$  و  $a_{GY}$  از روابط سینماتیکی ذیل می‌توان استفاده کرد:

$$\vec{a}_G = \vec{a}_q + \vec{a}_{G/q} \quad (7)$$

$$\begin{cases} a_{Gx} = -r\dot{\theta}^2 \cos \theta - r\ddot{\theta} \sin \theta + \frac{L}{2}\dot{\varphi}^2 \cos \varphi + \frac{L}{2}\ddot{\varphi} \sin \varphi \\ a_{Gy} = -r\dot{\theta}^2 \sin \theta + r\ddot{\theta} \cos \theta + \frac{L}{2}\dot{\varphi}^2 \sin \varphi - \frac{L}{2}\ddot{\varphi} \cos \varphi \end{cases} \quad (8)$$

برای محاسبه ممان اعمالی به محور دوران نیروی  $F_h$  باید محاسبه شود.

$$\begin{aligned} F_h = \frac{1}{C} [I_L \dot{\varphi} r \cos \theta + I_r \dot{\theta} L \cos \varphi \\ - B \frac{L}{2} r \cos \varphi \cos \theta + A \frac{L}{2} r \\ \sin \varphi \cos \theta + BrL \cos \varphi \cos \theta - ArL \sin \theta \cos \varphi \\ - ML \cos \varphi] \end{aligned} \quad (9)$$

که در آن  $C$  از رابطه (۱۰) بدست می‌آید:

$$C = -rL \sin \theta \cos \varphi + rL \cos \theta \sin \varphi \quad (10)$$

ممان اعمالی به محور از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$M_{fin} = eF_h \quad (11)$$

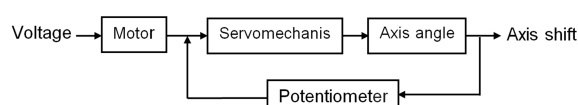
که در آن  $e$  فاصله عمودی لولای  $p$  تا محور دوران می‌باشد.

روش تقریبی دیگری برای محاسبه ممان محور دوران وجود دارد. برای این منظور از رابطه  $M_{fin} = I_b \alpha_b$  که در آن اندیس  $b$  مربوط به محور دوران و متعلقاتی است که به صورت صلب به محور متصل و

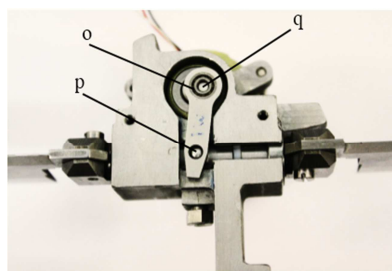
متصل به محور و لینک ارتباطی (pq) می‌باشند. لینک oq خارج از مرکزی محور موتور می‌باشد که توسط لینک pq به محور متصل می‌شود. حرکت لولای p (محل ایجاد لقی مفصل) را با تقریب خوبی می‌توان مستقیم‌الخط فرض کرد. مکانیزم انتقال نیرو که یک مکانیزم حرکت رفت و برگشتی است حرکت دورانی موتور تبدیل به حرکت رفت و برگشتی لغزنده می‌شود. منظور از مکانیزم در این جا، لینک‌های رابط نیرو بین موتور و محور می‌باشد. در حقیقت این مکانیزم وظیفه انتقال قدرت از موتور به محور را بر عهده دارد.

جدول ۲ - مشخصات فنی موتور دی سی

مقدار	مشخصه	ردیف
80W	توان مصرفی	۱
40V	ولتاژ نامی	۲
2400±5%rpm	سرعت بی باری	۳
≤350mA	جریان بی باری	۴
18±15%Ω	مقاومت موتور	۵
360deg	چرخش مکانیکی	۶



شکل ۶- بلوک دیاگرام اتصال اجزاء سرومکانیزم خطی



شکل ۷- مکانیزم لنگ لغزشی سرومکانیزم خطی

با استفاده از حسگرهای تعیین موقعیت و استخراج نمودارهای عملکردی سرومکانیزم می‌توان میزان دقت عملکرد سیستم را مورد پایش و ارزیابی قرار داد. با توجه به دلایل مختلفی که ذکر گردید امکان ایجاد لقی در مفصل مکانیزم سیستم فوق وجود دارد.

### ۳- اندازه‌گیری تغییر موقعیت

شناخت عملکرد وسایل اندازه‌گیری میزان تغییر مکان بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در حقیقت مبدل‌های تعیین مکان به عنوان عنصر ثانویه در دستگاه‌های اندازه‌گیری کمیت‌هایی چون فشار، دما، نیرو، گشتاور و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. کمیت‌های فوق‌الذکر در عنصر اولیه مبدل‌های مربوطه به حرکت خطی "تغییر مکان" تبدیل می‌گردند و سپس توسط مبدل‌های تعیین تغییر مکان مورد سنجش قرار می‌گیرند.

در این بخش به بررسی انکودرها که یکی از مبدل‌های تغییر مکان است و دلایل انتخاب آن در سیستم پایش وضعیت پیشنهادی پرداخته می‌شود. با توجه به نوع تغییر مکان بر اساس آن که خطی و یا دورانی باشد وسایل اندازه‌گیری میزان تغییر مکان نیز به دو گروه خطی و دورانی (زاویه‌ای) تقسیم می‌گردد. انکودر دورانی حسگری است که به یک محور گردنده متصل می‌شود و می‌تواند میزان چرخش محور را اندازه‌گیری کند. با اندازه‌گیری میزان چرخش می‌توان جایجایی دورانی، سرعت و شتاب زاویه‌ای را تعیین کرد. معمولاً انکودرها از نوع نوری می‌باشند و عملکرد آنها به این صورت است که یک صفحه دایره‌ای شیاردار به محور گردنده متصل شده و در یک سمت آن یک فرستنده نوری و در طرف دیگر یک گیرنده نوری قرار داده شده است. با چرخش صفحه و عبور شیارها از مقابل فرستنده نوری، در سمت گیرنده پالس‌های الکتریکی تولید می‌شود. به عبارت دیگر می‌توان گفت زمانی که نور ارسالی توسط فرستنده از شیارهای چرخنده عبور می‌کند توسط گیرنده دریافت نمی‌شود و مقدار ولتاژ خروجی گیرنده صفر می‌گردد و به این ترتیب پالس‌های الکتریکی تولید می‌شود. در هنگام انتخاب یک انکودر دورانی یا انتخاب فنآوری مورد استفاده در انکودرها، فاکتورهایی چون دقت، کنترل موقعیت یا سرعت، پایداری سرعت، مصرف توان، پهنای باند و مشخصه‌های دیگر را باید در نظر گرفت. عوامل بسیاری بر انتخاب یک انکودر چرخشی مناسب برای استفاده در سروو درایوهای کنترل شده تأثیرگذار است. در حالی که دقت تعیین موقعیت در فرآیند انتخاب انکودر مهم است، دانستن چگونگی تأثیرگذاری ویژگی‌های دیگر بر کاربرد مورد نظر نیز حائز اهمیت است.

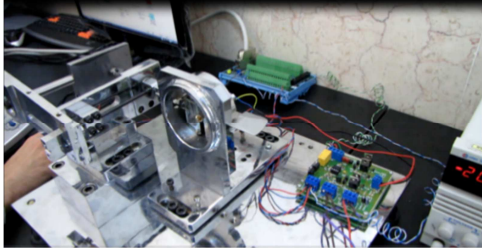
راه‌اندازهای سروو<sup>۱</sup> در حوزه‌های مختلف اتوماسیون صنعتی از قبیل اتوماسیون ماشین‌ابزار، ماشین‌آلات تولیدی، تبدیل و جایجایی مواد، چاپ، کنترل و رباتیک کاربرد فراوان دارند. انتخاب یک انکودر دورانی یا فنآوری انکودر برای استفاده در داخل یک سامانه، به دقت مورد نیاز، نوع کاربرد، اعم از کنترل موقعیت و یا سرعت و بسیاری از دیگر عوامل بستگی دارد. قبل از اتخاذ تصمیم در مورد انتخاب انکودر، باید آن دسته از ویژگی‌های انکودر را که بر کارایی مجموعه کنترل حرکت تأثیر مستقیم دارند بررسی نمود. این ویژگی‌ها به شرح زیر است:

- دقت تعیین موقعیت
- پایداری سرعت
- نویز قابل شنیدن، در کمترین حد ممکن
- اتلاف توان
- پهنای باند، که مشخص‌کننده پاسخ سیگنال فرمان است [۹].

### ۴- تنظیمات تجربی و روش تحقیق

در این تحقیق از یک حسگر انکودر چرخشی مدل E40S6-3600-6-L-5 ساخت شرکت اتونیکس برای استخراج سیگنال خروجی سیستم استفاده شده است. (شکل ۸). دلیل انتخاب این انکودر، علاوه بر داشتن قیمت مناسب، قابلیت تشخیص جهت چرخش را نیز دارد. انکودر انتخابی از دقت بسیار بالایی برخوردار بوده و می‌تواند تا چندین

<sup>۱</sup> Servo drive



شکل ۱۰- تجهیزات به کار رفته در آزمایش های تجربی

هزار پالس را در یک دور کامل تولید کند. سهولت در پردازش سیگنال خروجی و اتصال مکانیکی راحت تر از دیگر ویژگی های این نوع انکودر می باشد. مشخصات فنی این انکودر مطابق جدول ۱ می باشد.



شکل ۸- انکودر چرخشی

جدول ۱ - مشخصات فنی انکودر چرخشی

ولتاژ خروجی (VDC)	پالس	قطر شفت (میلی متر)
۲۴-۱۲	۳۶۰۰	۶

تغذیه مدار راه انداز موتور سرومکانیزم خطی با استفاده از یک منبع تغذیه دوپل که تنظیمات ولتاژ آن بر روی  $\pm 20$  ولت می باشد تأمین می شود. با توجه به اینکه خروجی حسگر انکودر متصل شده بر روی محور، آنالوگ می باشد از یک سیستم داده برداری مدل PCI-6259 شرکت NI با نرخ داده برداری 1 MS/s جهت ثبت داده ها استفاده شد. پس از انتقال داده ها به رایانه سیگنال بدست آمده توسط برنامه نویسی انجام شده در نرم افزار متلب مورد پردازش قرار می گیرد.

شکل ۹ فیکسچر طراحی شده جهت نگهداری سرومکانیزم و انکودر را نشان می دهد. خروجی آنالوگ حسگر انکودر نصب شده بر روی آزمونگر، زاویه حرکت محور سرومکانیزم را به کارت ورودی/خروجی کامپیوتر منتقل نموده و توسط نرم افزار متلب ثبت می گردد. سپس سیگنال بدست آمده به کمک برنامه نویسی انجام شده در متلب مورد پردازش قرار گرفته است. شکل ۱۰ تجهیزات به کار رفته در آزمایش های تجربی را نشان می دهد. شکل ۱۱ لقی ایجاد شده در محلی از قطعه که نقش لینک ارتباطی در مکانیزم را دارد نشان می دهد. در این تحقیق حالت های مختلف لقی مفصل مکانیزم لنگ لغزشی مطابق با جدول ۳ در نظر گرفته شده است.

Spherical slider location	Spherical axis
$\phi 3.58$	$S\phi 3.57$
$\phi 3.61$	
$\phi 3.68$	

شکل ۱۱- تغییرات تلرانس محل لغزش گوی کروی

جدول ۳- حالت های لقی مفصل مکانیزم لنگ لغزشی

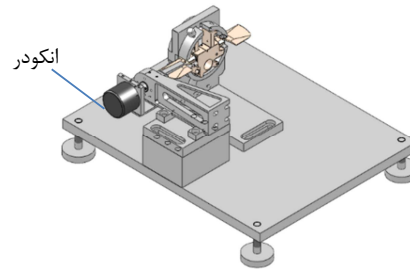
تغییرات مجازی لقی مفصل (میلی متر)	نوع لقی مفصل
۰/۰۱	لقی ایده آل
۰/۰۴	لقی کم
۰/۱۱	لقی زیاد

## ۵- نتایج و تحلیل داده ها

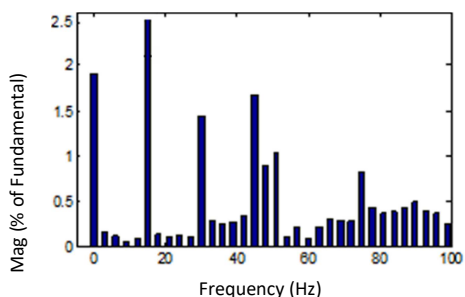
### ۵-۱- مقایسه سیگنال خروجی حسگر انکودر در

#### حالت های مفصل دارای لقی و مفصل بدون لقی

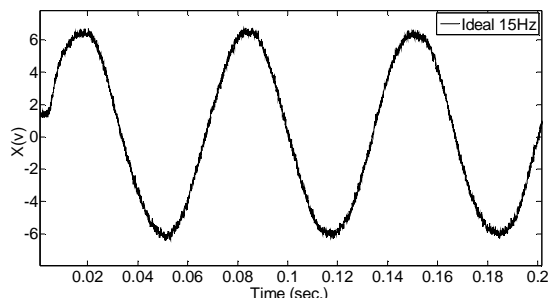
شکل ۱۲ شکل موج سیگنال خروجی حسگر انکودر در حالت لقی ایده آل را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود شکل موج بدست آمده به صورت کاملاً سینوسی است. شکل های ۱۲ تا ۱۴ به ترتیب سیگنال خروجی انکودر در حالت های لقی ایده آل، لقی کم و لقی زیاد را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش میزان لقی در مفصل، سیگنال خروجی انکودر از حالت کاملاً سینوسی خارج شده و دچار اعوجاج می شود.



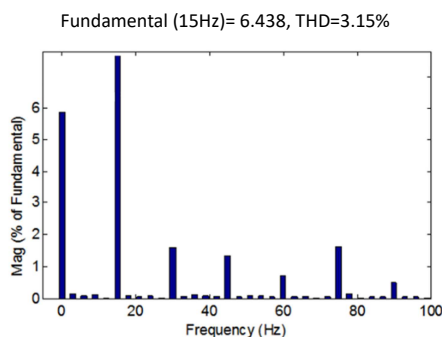
شکل ۹- تجهیزات بستن انکودر و سرومکانیزم خطی



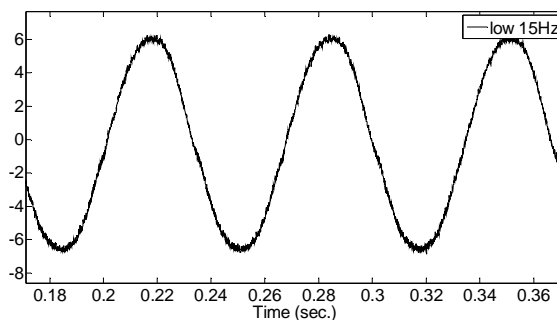
شکل ۱۵- سیگنال خروجی در حوزه فرکانس، لقی ایده آل با فرکانس ورودی ۱۵هرتز



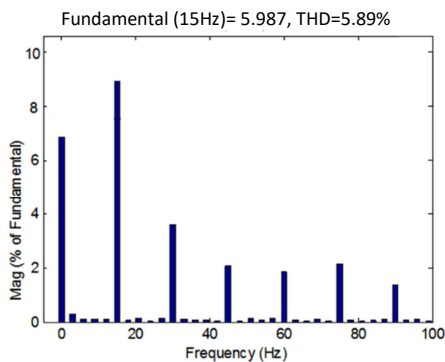
شکل ۱۲- سیگنال خروجی انکودر با لقی ایده آل در فرکانس ورودی ۱۵ هرتز



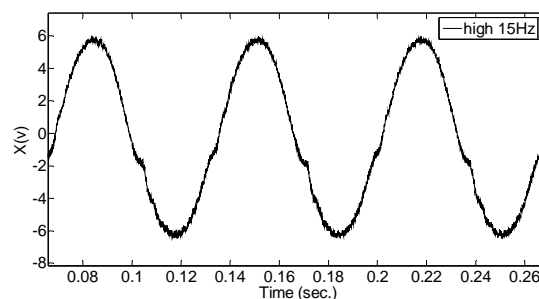
شکل ۱۶- سیگنال خروجی در حوزه فرکانس، لقی کم با فرکانس ورودی ۱۵هرتز



شکل ۱۳ سیگنال خروجی انکودر با لقی کم در فرکانس ورودی ۱۵ هرتز



شکل ۱۷- سیگنال خروجی در حوزه فرکانس، لقی زیاد با فرکانس ورودی ۱۵هرتز



شکل ۱۴ - سیگنال خروجی انکودر با لقی زیاد در فرکانس ورودی ۱۵ هرتز

## ۵-۲- تأثیر اعوجاج هارمونیک بر شکل موج سیگنال

مطابق شکل ۱۸ بارهای خطی ذاتاً دارای جریانی سینوسی هستند و در نتیجه شکل موج آنها دارای اعوجاج نیست. در شکل ۱۹ بارهای غیرخطی جریانی را ترسیم می‌کنند که کاملاً سینوسی نیست. از آنجایی که شکل موج جریان نسبت به موج سینوسی دارای انحراف است، اعوجاج‌هایی در شکل موج جریان ایجاد می‌شود [۱۰].

به منظور بررسی دلیل اعوجاج سیگنال، تحلیل در حوزه فرکانس نیز انجام شد. شکل ۱۵ سیگنال خروجی انکودر در حالت لقی ایده‌آل با فرکانس ورودی ۱۵هرتز در حوزه فرکانس را نشان می‌دهد. در ادامه شکل‌های ۱۶ و ۱۷ سیگنال‌های خروجی در حالت‌های لقی کم و زیاد با فرکانس ورودی ۱۵ هرتز در حوزه فرکانس را نشان می‌دهد. در اینجا با توجه به نمودارهای حوزه فرکانس و وجود مؤلفه‌های فرکانسی با ضریبی از فرکانس اصلی ۱۵ هرتز می‌توان نتیجه گرفت که اعوجاج ایجاد شده از نوع هارمونیک است. مقدار این اعوجاج هارمونیک با توجه به فرکانس ورودی ۱۵هرتز، برای حالت لقی ایده‌آل ۲/۹۱ درصد، لقی کم ۳/۱۵ درصد و لقی زیاد ۵/۸۹ درصد می‌باشد. در بخش ۵-۲ مابقی اعوجاج هارمونیک و پارامتر اعوجاج هارمونیک کلی سیگنال (THD) توضیح داده شده است.

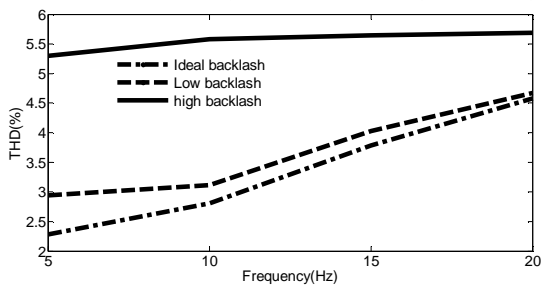
### ۵-۳- تأثیر لقی مفصل بر اعوجاج هارمونیک کلی (THD)

#### سیگنال انکودر

با توجه به اعوجاج ایجاد شده در سیگنال انکودر در اثر لقی مفصل که در بخش ۵-۱ مشاهده شد و همچنین وجود هارمونیکها در سیگنال حوزه فرکانس می توان نتیجه گرفت افزایش لقی در مفصل موجب غیر خطی شدن سیستم و افزایش هارمونیکها شده است.

شکل ۲۱ نتایج حاصل از مقایسه ویژگی اعوجاج هارمونیک کل (THD) بر حسب درصد در حوزه فرکانس و میزان مؤثر سیگنال در حوزه زمان را به ترتیب در فرکانسهای ورودی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ هرتز برای حالت های لقی ایده آل، کم و زیاد نشان می دهد.

همانطور که مشاهده می شود با افزایش لقی مفصل، هارمونیکها به طور محسوسی افزایش یافته است. لذا پارامتر اعوجاج هارمونیک کلی معیار مناسبی جهت پایش وضعیت لقی در مفصل مکانیزم است.



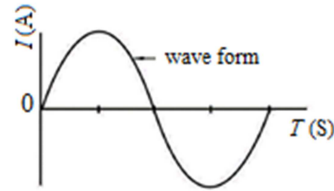
شکل ۲۱- تأثیر فرکانس ورودی سرو مکانیزم بر اعوجاج هارمونیک سیگنال در لقی های مختلف

### ۶- نتیجه گیری

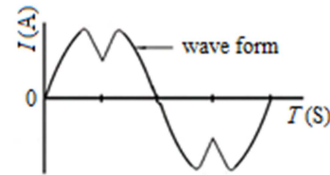
مفصل مکانیزم لنگ لغزشی ممکن در اثر خطاهای فرآیند ساخت، تolerانسها، سائیدگی و خوردگی دچار لقی شود. هدف از انجام این تحقیق پایش وضعیت مکانیزم لنگ لغزشی در یک سرومکانیزم خطی توسط پردازش سیگنال حسگر انکودر می باشد. با استفاده از خروجی آنالوگ حسگر انکودر نصب شده بر روی آزمونگر، زاویه حرکت محور سرومکانیزم ثبت و جهت تحلیل و پایش وضعیت سرومکانیزم استفاده شده است. نتایج و تحلیل داده ها نشان داد چنانچه در مفصل مکانیزم لنگ لغزشی، لقی وجود نداشته باشد شکل موج سیگنال خروجی انکودر کاملاً سینوسی است. با افزایش لقی در مفصل، شکل موج سیگنال دچار اعوجاج شده و از حالت کاملاً سینوسی خارج می شود.

با توجه به اعوجاج ایجاد شده در سیگنال انکودر در اثر لقی مفصل همچنین وجود هارمونیکها در سیگنال حوزه فرکانس می توان نتیجه گرفت افزایش لقی در مفصل موجب غیر خطی شدن سیستم و افزایش هارمونیکها شده است. بررسی پارامتر اعوجاج هارمونیک کلی (THD) سیگنال خرجی انکودر نشان داد با افزایش لقی مقدار THD افزایش یافته است. لذا می توان از این پارامتر به عنوان شاخصی جهت پایش وضعیت مفصل در مکانیزم استفاده نمود.

همچنین نتایج آزمایشها نشان داد در فرکانسهای ورودی پائین افزایش اعوجاج هارمونیک سیگنال انکودر در اثر افزایش لقی مفصل مشهودتر است.



شکل ۱۸- شکل موج سینوسی ایده آل [۱۰]



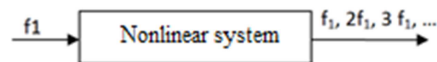
شکل ۱۹- شکل موج دارای اعوجاج [۱۰]

همانطور که در شکل ۱۹ مشاهده می شود، اعوجاج شکل موج به طور مؤثری شکل سینوسی را تغییر می دهد. در واقع این موضوع ربطی به پیچیدگی موج اصلی ندارد بلکه ناشی از ترکیب شکل موجهای هارمونیکها می باشد. هارمونیکها دارای فرکانسهایی با مضارب صحیح فرکانس اصلی شکل موج هستند. به عنوان مثال برای شکل موج با فرکانس اصلی ۵۰ هرتز دومین، سومین، چهارمین و پنجمین مؤلفه های هارمونیک به ترتیب ۱۰۰ هرتز، ۱۵۰ هرتز، ۲۰۰ هرتز و ۲۵۰ هرتز می باشد. بنابراین اعوجاج هارمونیک، میزان انحراف شکل موج از مقادیر سینوسی خالص در نتیجه مجموع همه این عناصر هارمونیک است. یک موج سینوسی ایده آل دارای مؤلفه های هارمونیک صفر است. مطابق شکل ۲۰ هنگامی که سیگنال  $X(t)$  با فرکانس مشخص (به عنوان مثال  $f_1$ ) از یک سیستم غیرخطی عبور می کند خروجی سیستم علاوه بر فرکانس ورودی ( $f_1$ ) شامل هارمونیکهای آن ( $f_2 = 2f_1, f_3 = 3f_1, f_4 = 4f_1, \dots$ ) نیز می شود. تعداد هارمونیکها و مقدار آنها به درجه غیرخطی بودن سیستم بستگی دارد. به طور کلی هر چه میزان غیرخطی بون بیشتر باشد فرکانسهای هارمونیک بیشتری خواهد بود و بالعکس.

یکی از معیارهای اعوجاج سیگنال تناوبی، اعوجاج هارمونیک کلی<sup>۱</sup> است. اعوجاج هارمونیک کلی، مجموع مؤلفه های فرکانسی شکل موج جریان در مقایسه با مؤلفه اصلی جریان می باشد [۱۱]. اعوجاج هارمونیک کلی، مجموع مؤلفه های فرکانسی شکل موج جریان در مقایسه با مؤلفه اصلی جریان می باشد.

$$THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \times 100 \quad (14)$$

در رابطه بالا که اعوجاج هارمونیک کلی از سیگنال جریان را نشان می دهد  $I_1$  مؤلفه های جریان و  $I_2, \dots, I_n$  مؤلفه اصلی جریان می باشد.



شکل ۲۰- هارمونیکها در سیستم غیر خطی [۱۰]

<sup>1</sup> Total Harmonic Distortion

- [1] Sang Y., Karayaka H. B., Yan Y., Zhang J. Z., Bogucki D. and Yu Y., A Rule-Based Phase Control Methodology for a Slider-Crank Wave Energy Converter Power Take-Off System, *International journal of marine energy*, Vol. 19, PP. 124-144, 2017.
- [2] Ha J. L., Fong R. F., Chen K.Y. and Hsien S. C., Dynamic modeling and identification of a slider-crank mechanism, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 289, pp. 1019–1044, 2006.
- [3] Erkaya S. and Uzmay I., Effects of balancing and link flexibility on dynamics of a planar mechanism having joint clearance, *Scientia Iranica*, Vol 19, No. 3, PP. 483-490 2012.
- [4] Erkaya S., Dogan S. and Ulus S., Effects of joint clearance on the dynamics of a partly compliant mechanism. Numerical and experimental studies, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 88, PP. 125-140, 2015.
- [5] Simionescu A., Optimum Synthesis of Oscillating Slide Actuators for Mechatronic Applications, *Journal of computation design and engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 215-231, 2018.
- [6] Varedi S.M., Daniali H.M., Dardel M. and Fathi A., Optimal dynamic design of a planar slider-crank mechanism with a joint clearance, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 86, PP. 191–200, 2015.
- [7] Aslambakhsh M., *Analysis of the load torque effect on the dynamic behavior of linear and servomechanism*, Yamahdi publications, pp10-15, 2010(In Persian).
- [8] Ahmad S.M.i., *Design of linear servomechanism for enhancement of an existing PWM system*, M.S Thesis, Electrical engineering faculty, K.N Toosi university of technology, Tehran, 2003(In Persian).
- [9] Ahmadi B., *Servomotors and encoders automation motion control complete reference*, Aylar publications pp160-167, 2014(In Persian).
- [10] Danesh M., Khalili K., Tool wear condition monitoring using time frequency marginal integral of motor current signal, *Tarbitmodarres mechanical engineering journal*, No.16, pp.183, 2014(In Persian).
- [11] Akbari A., Danesh M., Khalili K., A method based on spindle motor current harmonic distortion measurements for tool wear monitoring, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 39, No. 12, pp 5049–5055, 2017.