

سیستم توزین یک کیلوگرم با جبران ساز نیروی الکترومغناطیسی

چکیده: در این مقاله یک سیستم توزین با عملگر جبران ساز نیروی الکترومغناطیسی معرفی شده است. این سیستم‌ها در صنعت و به خصوص صنایع آزمایشگاه محور کاربردهای فراوانی دارند. مزیت استفاده از این سنسورها نسبت به سنسورهای مبتنی بر کرنش سنج‌ها، داشتن زمان پاسخ کوتاه‌تر می‌باشد. همین خاصیت این سنسورها باعث شده است که استفاده از آنها در توزین دینامیکی مناسب باشند. علاوه بر این، سیستم‌های توزین با جبران ساز نیروی الکترومغناطیسی در اندازه‌گیری مستقل از بخش الاستیک عمل می‌کنند. این امر باعث حذف اثراتی مانند خستگی ساختار الاستیک، در اندازه‌گیری می‌گردد. سیستم توزین پیشنهادی بر پایه ساختار دو اهرم طراحی شده و دارای ۳ بخش مکانیکی، الکتریکی و الکترومغناطیسی می‌باشد. این سیستم توانایی اندازه‌گیری وزن تا یک کیلوگرم با دقت یک گرم را دارد. در این سیستم از لولای خمشی برگی استفاده شده است که حساسیت سیستم را نسبت به لولای خمشی نوع هذلولی و نوع دایره‌ای بترتیب ۵ و ۲ برابر افزایش داده است. بخش مکانیکی سیستم از آلیاژ فولاد فنر بصورت یکپارچه ساخته شده است و جبران ساز الکترومغناطیسی شامل یک سیم‌پیچ با هسته فریت می‌باشد و جابجایی شاخص از طریق یک سوییچ نوری قابل شناسایی می‌باشد.

واژه‌های راهنما: سیستم توزین EMFR، لودسل، لولای خمشی، کرنش سنج، سنسور نوری، جبران ساز الکترومغناطیسی

احسان وکیلی

دانشجوی کارشناسی ارشد
مکانیک، دانشکده مهندسی
مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه،
ارومیه

* مسعود تیموری

استادیار،
دانشکده مهندسی برق،
دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

صابر عزیزی

دانشیار،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

مقاله ترویجی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴

1Kg weighing system with an electro-magnetic force restoration

Ehsan Vakili

M.Sc. Student of
Mechatronic,
Mechanical Engineering
Department, Urmia
University of
Technology, Urmia

Masood

Teymouri*

Assistant Professor,
Faculty of Electrical
Engineering, Urmia
University of
Technology, Urmia

Saber Azizi

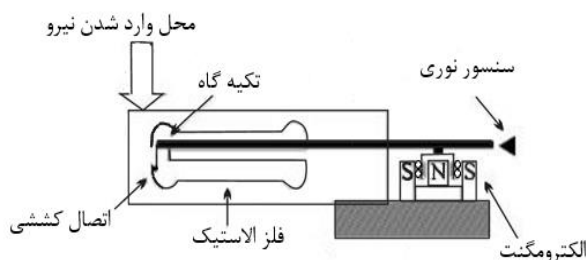
Associate professor,
Mechanical Engineering
Department, Urmia
University of
Technology, Urmia

Abstract: In this paper, a weighing system with an electromagnetic force restoration is introduced. The systems are widely used in industry and especially in research laboratories. These sensors have a shorter response time compared to the strain gauge load cells. This feature of the sensors has made it suitable for dynamic weighing. In addition, EMFR systems operate independently of the elastic component in measurement. This feature eliminates effects such as fatigue of the elastic structure in the measurement. The proposed weighing system is designed based on the structure of two levers and has 3 mechanical, electrical, and electromagnetic parts. The measuring capacity of the proposed weighing system is 1 kg and its accuracy is 1 gr. In this system, a leaf flexure hinge has been used, which has increased the sensitivity of the system by 5 and 2 times compared to the hyperbolic type and circular type flexure hinges, respectively. The mechanical part of the system is integrally made of steel alloy, and the electromagnetic compensator consists of a coil with a ferrite core and the displacement can be detected through an optical switch.

Keywords: EMFR weighing system, Load cell, Bending hinge, Strain gauge, Optical sensor, Electromagnetic compensator

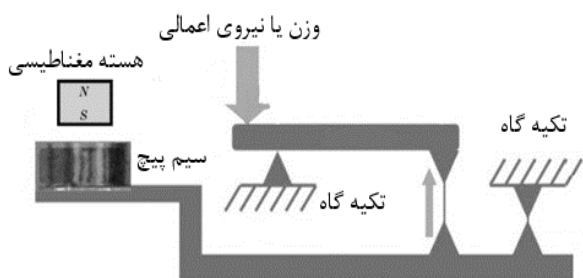
۱- مقدمه

در سال ۲۰۰۰ شرکت A&D ژاپن یک ترازوی سوپر هیبریدی با ترکیب سیستم EMFR با لودسل‌های معمولی تولید نمود. هدف آن‌ها افزایش دقت و توان اندازه‌گیری با ویژگی سیستم EMFR و همچنین کاهش ابعاد لودسل با استفاده از قسمت الاستیک لودسل‌های استرین گیج بود که در شکل (۲) نمای کلی نشان داده شده است [۷].



شکل ۲ سیستم توزین پیشنهادی شرکت A&D [۷]

در سال ۲۰۱۵ شرکت AND ژاپنی روشی را برای افزایش بار و ریزنگری لودسل‌های EMFR ارائه کرده است که قابلیت تحمل وزن تا ۳۰ کیلوگرم و رزولوشن بالایی دارد. سیستم پیشنهادی شرکت AND در شکل (۳) نشان داده شده است [۸].

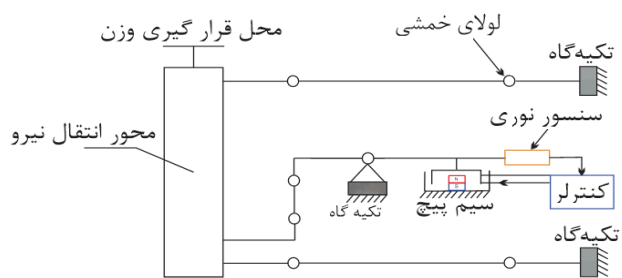


شکل ۳ مدل ارائه شده توسط شرکت AND در سال ۲۰۱۵ [۸]

در سال ۲۰۲۰، لی و همکاران یک مدل جدیدی با استفاده از آمپلی فایر نوع لوزی برای بهبود حساسیت سیستم-های EMFR ارائه کردند که مدل پیشنهادی در شکل (۴) نشان داده شده است [۴].

همان طور که در شکل (۴) مشخص است از یک تقویت کننده جابه‌جایی یا آمپلی فایر لوزی به جای اهرم استفاده شده است. آزمایشات تحلیلی و عملی آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از آمپلی فایر، دقت و ریزنگری سیستم را نسبت به سازه‌های اهرمی افزایش می‌دهد. آنطور که اشاره شده است حساسیت و ریزنگری سیستم پیشنهادی ارتباط مستقیم با وضوح و دقت سیستم الکترومغناطیسی و سنسور نوری داشته و با بهبود آن‌ها دقت و ریزنگری کل سیستم افزایش یافته است.

سیستم‌های توزین^۱ یا همان سیستم‌های اندازه‌گیری وزن کاربردهای بسیار فراوانی در زندگی بشری دارند. این سیستم‌ها به وفور در صنعت، آزمایشگاه‌ها، فروشگاه‌ها و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. به دلیل نیاز بالا به این تجهیزات اندازه‌گیری، بازار بسیار بزرگی را نیز در سطح جهان دارند. به همین منظور سیستم‌های توزین با دقت، صحت و اعتماد پذیری بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند و بهبود کارایی این نوع از سیستم‌ها می‌تواند یکی از زمینه‌های مهم تحقیق در حوزه میکاترونیک باشد. سیستم‌های توزین^۲ EMFR یا همان سیستم‌های جبران ساز نیروی الکترومغناطیسی یکی از جدیدترین نوع سیستم‌های اندازه‌گیری وزن با دقت و سرعت بالا هستند. سیستم EMFR برای اولین بار توسط شرکت آلمانی متلر^۳ برای استفاده در ترازوهای دقیق معرفی شد [۱-۲]. از ویژگی‌های مهم این سیستم‌ها می‌توان به دقت بالا، مقاومت بالا نسبت به بار ضربه‌ای و همچنین زمان پاسخ‌دهی کوتاه اشاره نمود. همین ویژگی‌ها باعث شده است که از سیستم‌های توزین EMFR در تجهیزات اندازه‌گیری ابزار دقیق و همچنین توزین دینامیکی شامل توزین مواد و مصالح موجود روی نوار نقاله‌ها و همچنین صنایع حمل بار استفاده گردد. بلوک دیاگرام کلی یک سیستم EMFR در شکل (۱) نشان داده شده است [۳].



شکل ۱ اجزای سیستم EMFR [۴]

یک سیستم توزین EMFR شامل اهرم‌ها، سیم‌پیچ الکترومغناطیسی و یک سنسور تشخیص جابه‌جایی می‌باشد. با قرار دادن وزنه بر روی کفه، مکانیزم از حالت تعادل خارج شده و می‌توان با تحریک سیم‌پیچ و تولید نیروی الکترومغناطیسی دوباره مکانیزم را به حالت تعادل اولیه برگرداند. در نهایت می‌توان از طریق میزان ولتاژ و یا جریان مصرفی سیم‌پیچ، اندازه وزن اعمالی به کفه را محاسبه نمود [۵-۶].

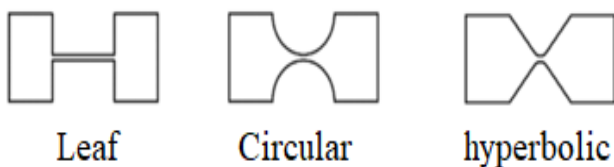
³ METTLER

¹ Weighing systems

² Electro-magnetic force restoration

برای کاهش مقدار نیروی وارد بر سمت دیگر اهرم که منجر به کاهش توان مصرفی سیم پیچ مغناطیسی می‌گردد. از سیستم‌های ۲ یا ۳ اهرم بهره می‌گیرند. البته سیستم‌های تک اهرم نیز وجود دارند که نسبت به سیستم‌های چند اهرم پیچیدگی کمتری دارند. سیستم‌های ۳ اهرم امکان توزین وزن‌های بالا با کمترین توان مصرفی را فراهم می‌نمایند. ولی سیستم‌های دو اهرم نیز مزیت‌هایی مانند سادگی ساخت و همچنین کاهش محاسبات و خطا به علت استفاده کمتر از اتصالات نسبت به سیستم‌های ۳ اهرم را دارند [۳].

در سال‌های اولیه تولید سیستم‌های توزین EMFR قطعات به صورت منفک تولید و سپس مونتاژ می‌شدند. با توسعه ماشین‌های ابزار ساخت، به منظور بالا بردن دقت اندازه‌گیری با کاهش دادن خطای ناشی از لقی بین قطعات مونتاژی، اولین بلوک یکپارچه سیستم‌های توزین EMFR در سال ۲۰۰۲ تولید گردید. نکته بسیار مهم و حائز اهمیت در این مکانیزم‌ها استفاده از لولاهای خمشی^۱ می‌باشد. لولاهای خمشی اجزا قابل انعطافی هستند که به جای لولاهای معمولی در مکانیزم‌های مکترونیک و میکروماشین کاربرد دارند. از انواع لولاهای خمشی می‌توان به نوع برگه^۲، دایره‌ای^۳ و هندولی^۴ اشاره نمود که در شکل (۵) قابل مشاهده می‌باشند.

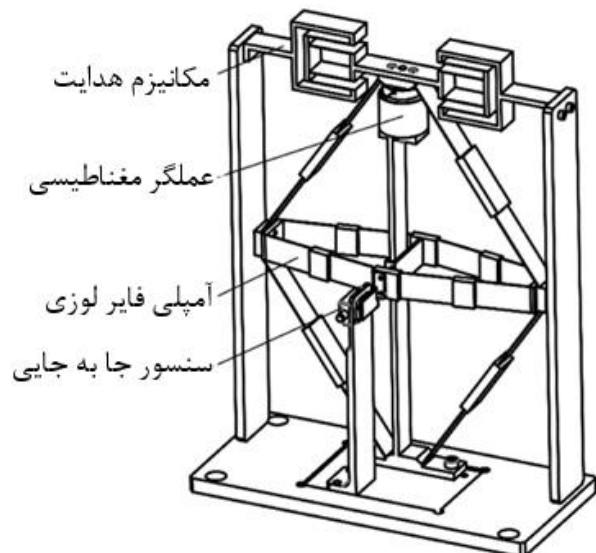


شکل ۵ انواع مهم لولاهای خمشی [۱۱]

ساده‌ترین روش تحلیل لولاهای خمشی استفاده از روابط تیر اوپلر-برنولی می‌باشد. با توجه به شکل (۶)، در این روش فرض می‌شود یک لولای خمشی مانند یک تیر سرگردار است که به سر آزاد آن گشتاور خمشی M وارد می‌شود. روابط ۲ و ۳ به ترتیب زاویه جابجایی و مقدار جابه‌جایی در محور y را نشان می‌دهد [۴۰].

$$\theta = \frac{ML}{EI} \quad (2)$$

$$\Delta y = \frac{ML^2}{2EI} \quad (3)$$



شکل ۴ مدل ارائه شده توسط لی و همکاران [۴]

در این مقاله یک سیستم توزین مبتنی بر EMFR ارائه شده است که بخش‌های مختلف مقاله به این شرح می‌باشد. بخش (۲)، عملکرد سیستم توزین EMFR را توضیح می‌دهد. در بخش (۳) یک سیستم EMFR جدید و نحوه ساخت آن ارائه شده است. در بخش (۴) نتایج تست سیستم پیشنهادی بیان گردیده است و در نهایت یک نتیجه‌گیری کلی در بخش نهایی بیان شده است.

۲- سیستم‌های توزین EMFR

همان‌طور که در بخش (۱) اشاره شد با اعمال وزنه به کفه سیستم EMFR شکل (۱)، شاخص جابجا شده و با اعمال نیروی الکترومغناطیسی به حالت تعادل اولیه بر می‌گردد. رسیدن شاخص به حالت اولیه توسط سنسور جابجایی قابل تشخیص می‌باشد. در حالت تعادل، نیروی اعمالی از طریق وزنه به کفه با نیروی الکترومغناطیسی سیم پیچ برابر می‌باشد و چون نیروی الکترومغناطیسی با جریان سیم پیچ طبق رابطه شماره ۱، ارتباط مستقیم دارد لذا با اندازه‌گیری این جریان می‌توان میزان نیروی اعمالی به کفه یا به عبارتی دیگر وزن را اندازه‌گیری نمود.

$$F_e = \frac{k\mu_0 N^2 I^2 A}{2L^2} \quad (1)$$

در این رابطه $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ، I شدت جریان الکتریکی، N تعداد دور سیم پیچ، A سطح مقطع هسته، L طول سیم پیچ و k ثابت تراوایی مغناطیسی هسته می‌باشد [۹].

³ Circular
⁴ hyperbolic

¹ Flexure Hinges
² Leaf

از ۲ لولای خمشی نوع Leaf و یک کوپلینگ به همراه پایه نگهدارنده سویچ نوری تشکیل شده است. خود کوپلینگ نیز شامل ۲ لولای خمشی و یک قسمت صلب می باشد. مدل دیاگرام آزاد مربوط به سیستم ساخته شده در شکل (۸) نشان داده شده است [۱۱].

با توجه به شکل (۸) و محاسبه گشتاور حول نقطه A خواهیم داشت:

$$F' = F_1 \cdot \frac{a}{b} \quad (۴)$$

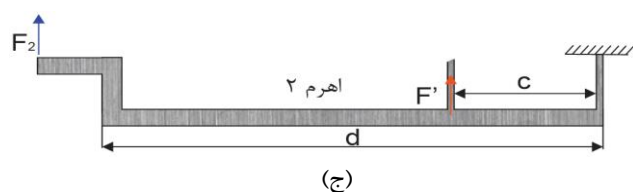
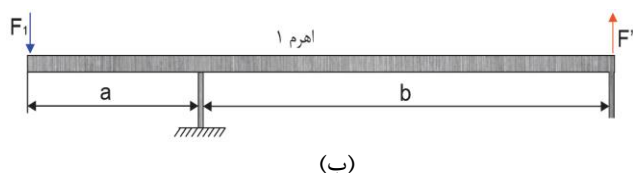
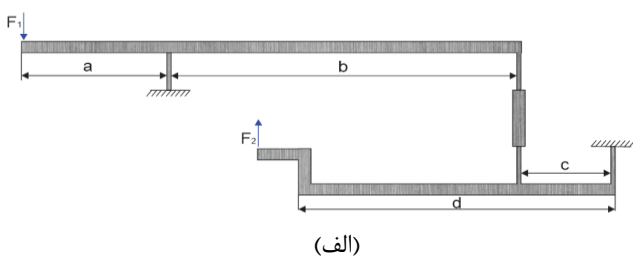
از طرف دیگر با محاسبه گشتاور حول نقطه D خواهیم داشت:

$$F_2 = F' \cdot \frac{c}{d} \quad (۵)$$

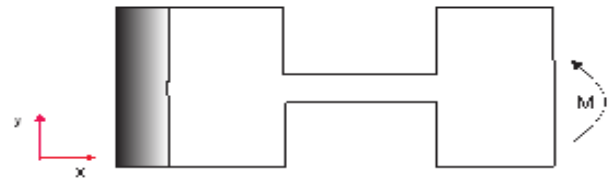
با مقایسه روابط ۴ و ۵ رابطه زیر بدست می آید.

$$F_2 = F_1 \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} \quad (۶)$$

این رابطه نشان می دهد می توان از طریق طول لولاها و بازوها یک تناسب مناسبی بین نیروی اعمالی به کفه و نیروی اعمالی از طریق سیم پیچ ایجاد کرد در مکانیزم طراحی شده با انتخاب $a=25\text{mm}$, $b=66\text{mm}$, $c=16\text{mm}$ و $d=55\text{mm}$ ارتباط بین این دو نیرو $F_2=0.11 \times F_1$ می شود که این نشان می دهد برای جبران سازی جابجایی به خاطر اعمال نیرو به کفه کفایت ۰.۱۱ برابر نیروی کمتر از طریق سیستم الکترومغناطیسی اعمال گردد.



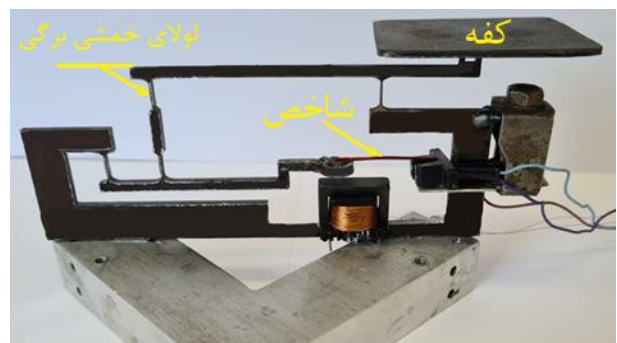
شکل ۸ دیاگرام آزاد (الف) سیستم توزین (ب) اهرم ۱ (ج) اهرم ۲



شکل ۶ محل اعمال گشتاور در لولای خمشی Leaf

۳- سیستم توزین پیشنهادی

سیستم پیشنهادی بر پایه ساختار دو اهرم طراحی و ساخته شده که تصویر آن در شکل (۷) نشان داده شده است. این سیستم دارای ۳ بخش مکانیکی، الکتریکی و الکترومغناطیسی می باشد. بخش مکانیکی از یک فولاد فنر با مدول الاستیسیته 670 GPa با استفاده از دستگاه برش CNC به صورت یکپارچه ساخته شده است. جبران سازی الکترومغناطیسی از یک سیم پیچ با هسته فریت ساخته شده و جابجایی شاخص از طریق یک سویچ نوری قابل شناسایی می باشد.

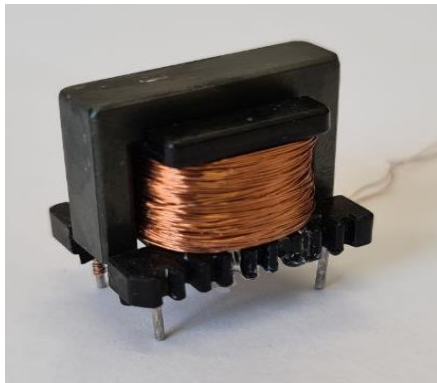


شکل ۷ سیستم توزین ساخته شده

مهم ترین مزیت این سیستم استفاده از ترکیب دو اهرم و همچنین لولای خمشی نوع برگی در آن است. که حساسیت سیستم را افزایش داده است. لولاهای خمشی برگی علاوه بر محاسبات ساده، فرآیند ساخت را نیز آسان تر می کنند. البته استفاده از لولای خمشی برگی با وجود اینکه حساسیت را بهبود می بخشد اما برای توزین بارها و وزن های سنگین محدودیت ایجاد می نماید توضیحات کامل مربوط به هر قسمت در ادامه بیان شده است.

۳-۱- بخش مکانیکی

همانطور که از تصویر شکل (۷) قابل مشاهده است. اعمال وزنه به کفه باعث جابجایی شاخص می شود. در واقع بخش مکانیکی به عنوان یک مکانیزم مبدل وزن به جابه عمل می کند. این سیستم



شکل ۱۰ سیم پیچ الکترومغناطیسی

برای کنترل میزان ولتاژ اعمالی به سیم پیچ از یک منبع تغذیه قابل تنظیم با ولتاژ مستقیم استفاده شده است. بطوریکه بعد از اعمال وزن به کفه، ولتاژ منبع از حداقل صفر ولت با گام‌های بسیار کم در حد دهم ولت اضافه گردید تا زمانیکه نیروی الکترومغناطیسی شروع به جابجایی اهرم دوم نماید در این حالت با گام‌های میلی ولت، ولتاژ خروجی منبع تغذیه افزایش یافت تا زمانیکه انتهای اهرم دوم با شاخص در یک راستا قرار گیرد. در این حالت همانطور که در بخش (۲-۳) توضیح داده شده است خروجی سوییچ نوری تغییر یافته و ولتاژ اعمالی به سیم پیچ در آن وضعیت به عنوان ولتاژ اعمالی به سیم پیچ برای آن وزن یادداشت شده است.

۴- تست و تحلیل نتایج

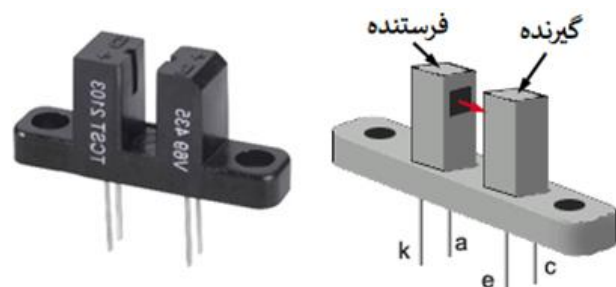
جهت بررسی رابطه میزان جابه‌جایی شاخص با نیروی ورودی، یک ساعت اندیکاتور یک میکرومتری همانند شکل (۱۱) به سیستم توزین متصل گردید. پس از نصب سازه و قرار دادن آن بر روی یک صفحه صافی، وزنه‌های استاندارد با ۵ بار تکرار بر روی ابتدای اهرم اولیه (کفه) قرار داده شد و میزان جابجایی ثبت گردید نتیجه حاصله در جدول (۱) و منحنی مربوطه در شکل (۱۲) قابل مشاهده می‌باشد.



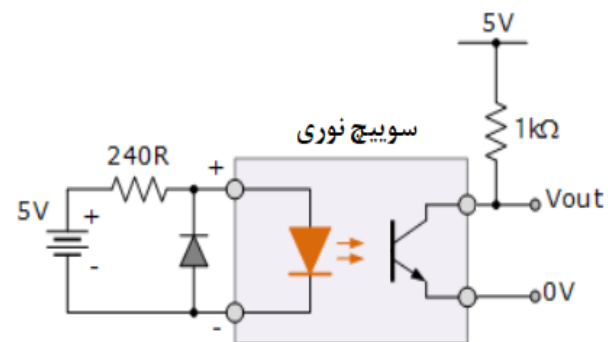
شکل ۱۱ اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی با ساعت اندیکاتور

۳-۲- بخش الکتریکی

از یک سوییچ نوری که تصویر آن در شکل (۹) نشان داده شده است برای تشخیص جابه‌جایی استفاده شده است. سوییچ مربوطه به گونه‌ای نصب شده است که شاخص (انتهای اهرم دوم) در شرایط بدون اعمال وزن، دقیقاً در مقابل شیار نوری سوییچ قرار می‌گیرد و به این طریق ارسال نور از فرستنده آن به گیرنده اش را مسدود می‌کند. در این شرایط خروجی ولتاژ سوییچ ۵V بوده و یا به عبارتی دیگر 1 دیجیتال می‌باشد حال در اثر اعمال وزن به کفه و به طبع آن جابجایی شاخص از داخل سوییچ، نور ارسالی فرستنده به گیرنده رسیده و ولتاژ خروجی سوییچ 0V و یا همان 0 دیجیتال می‌شود. واضح است که بعد از برگرداندن شاخص از طریق نیروی الکترومغناطیسی به محل اولیه خود، مجدداً نور بین فرستنده و گیرنده سوییچ قطع شده و خروجی سنسور مجدداً 1 دیجیتال می‌شود که از این طریق می‌توان دقیقاً متوجه شد که شاخص به محل اولیه خودش رسیده است.



(الف)



(ب)

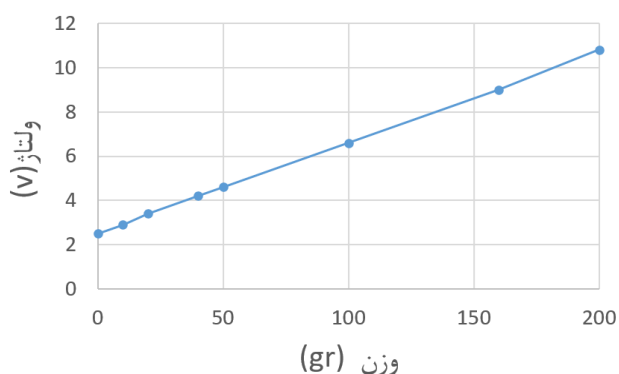
شکل ۹ (الف) سوییچ نوری (ب) مدار راه انداز

۳-۳- بخش الکترومغناطیسی

این بخش از سیستم شامل یک سیم‌پیچ مغناطیسی (شکل ۹) می‌باشد که وظیفه اعمال نیرو به انتهای اهرم دوم را دارد تا شاخص را به محل اولیه خود برگرداند.

جدول ۲ نتایج حاصل از آزمون در حالت Close – Loop

| نسبت ولتاژ ورودی به وزن | |
|-------------------------|----------|
| ولتاژ (V) | وزن (gr) |
| ۲/۵ | ۰ |
| ۲/۹ | ۱۰ |
| ۳/۴ | ۲۰ |
| ۴/۲ | ۴۰ |
| ۴/۶ | ۵۰ |
| ۶/۶ | ۱۰۰ |
| ۹ | ۱۶۰ |
| ۱۰/۸ | ۲۰۰ |



شکل ۱۳ نسبت ولتاژ ورودی و وزن

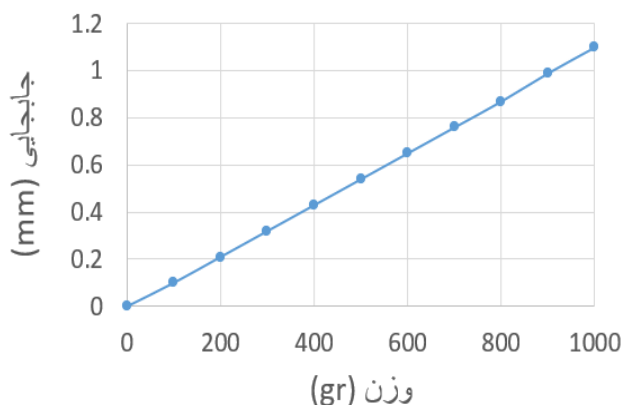
همانند حالت قبلی حاکی از یک رابطه خطی بین وزن اعمالی و ولتاژ اعمالی به سیم پیچ می باشد. این سیستم توزین قادر است وزن تا 1kg با دقت 1g را بخوبی اندازه گیری نماید. آزمون های اندازه گیری با استفاده از وزنه های استاندارد کلاس F1 انجام گرفت. که مطابق استاندارد OIML R111-1 خطای آن ها به شرح جدول (۳) می باشد.

| وزن نامی (گرم) | میزان خطا (میلی گرم) |
|----------------|----------------------|
| ۱۰۰۰ | ۵ |
| ۵۰۰ | ۲/۵ |
| ۲۰۰ | ۱ |
| ۱۰۰ | ۰/۵ |
| ۵۰ | ۰/۳ |
| ۲۰ | ۰/۲۵ |
| ۱۰ | ۰/۲ |

جدول ۳ میزان خطای وزنه های کلاس F1

جدول ۱ داده های حاصل از آزمایش در حالت Open-Loop

| داده های نسبت جا به جایی به وزن در حالت Open-Loop | |
|---|-----------------------|
| وزن (گرم) | جا به جایی (میلی متر) |
| ۰ | ۰ |
| ۱۰۰ | ۰/۱ |
| ۲۰۰ | ۰/۲۱ |
| ۳۰۰ | ۰/۳۲ |
| ۴۰۰ | ۰/۴۳ |
| ۵۰۰ | ۰/۵۴ |
| ۶۰۰ | ۰/۶۵ |
| ۷۰۰ | ۰/۷۶ |
| ۸۰۰ | ۰/۸۷ |
| ۹۰۰ | ۰/۹۹ |
| ۱۰۰۰ | ۱/۱ |



شکل ۱۲ نسبت جا به جایی به وزن

همانطور که قابل استنتاج است یک ارتباط خطی بین جابجایی و وزن اعمالی وجود دارد که رابطه آن عبارت است از

$$\Delta x \approx 0.1 \times F \quad (۷)$$

پس از ارزیابی عملکرد مکانیزم، سنسور نوری و جبران ساز نیروی الکترومغناطیسی بر روی سازه نصب گردید و همانند روش قبلی وزنه های استاندارد بر روی کفه قرار داده شد. با قرار دادن هر وزنه، شاخص مقداری جابجا می شد و در ادامه جریان الکتریکی به سیم پیچ اعمال می گردید تا دوباره شاخص به محل اولیه خود برگردد. هنگام رسیدن شاخص به محل اصلی، ولتاژ مربوطه ثبت گردید که داده ها و نتایج در جدول (۲) و منحنی بین وزن و ولتاژ در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

همچنین رزولوشن سیستم نوری و مغناطیسی دارد. در این مقاله یک سیستم توزین دو اهرم معرفی گردید که از فولاد فتر ساخته شده بود و از طریق یک سیم پیچ الکترومغناطیسی با هسته فرومغناطیسی جبران سازی شده و توسط یک سویچ نوری جابجایی آن بدست آمد. نتایج تست آزمایشگاهی نشان داد این سیستم توزین با دقت 1g قادر است وزنه های تا 1kg را اندازه گیری نماید و مشاهده شد رابطه بین ولتاژ مگنت با وزن اعمالی به کفه یک رابطه کاملاً خطی می باشد.

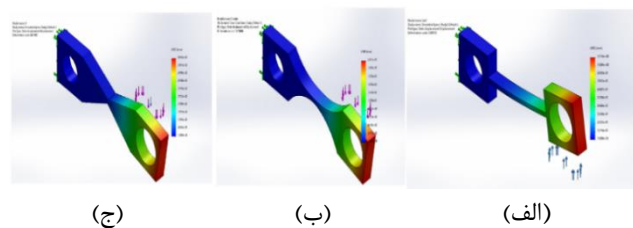
۶- مراجع

- [1] Büttner, J., Renn, J., Schemmel, J., The early history of weighing technology from the perspective of a theory of innovation, emergence and expansion of preclassical mechanics, *Boston Studies in the Philosophy and History of Science*, Vol. 270, Springer, (2018).
- [2] Kamble, V., shinde, V., Kittur, J., Overview of load cells, *mechanical and mechanics engineering*, Vol. 6, Issue 3, (2020).
- [3] Emery, J., A sub-ppm precision monolithic force sensor based on articulated structures with flexible bearings, *Sensors Expo & Conference*, pp. 1-12, (2001).
- [4] Li, Y., Zhu, X., Bi, S., Guo, R., Sun, J., Hu, W., Design and development of compliant mechanisms for electromagnetic force balance sensor, *Precision Engineering*, Vol. 64, pp. 157-164, (2020).
- [5] Stefanescu, M., Application of electromagnetic methods in force sensing, with emphasis on micro, nano and pico ranges, *Journal of Physics: Conf. Series*, Vol. 1065, (2018).
- [6] Abdullah, Ahn, J., Kim, H., Effect of electromagnetic damping on system performance of voice-coil actuator applied to balancing-type scale, *Actuators*, Vol. 9, Issue 1, pp. 1-23, (2020).
- [7] Izumo, N., Nagane, Y., SUPER-hybrid-sensor for new balances, *APMF2000*, (2000).
- [8] Application Note: Bringing Smarter Technology to Weighing with the Smart Super Hybrid Sensor, <https://andprecision.com>, (2019).
- [9] Purcell, E., Morin, D., *Electricity and Magnetism*, Cambridge University Press, 3rd Edition, (2013).
- [10] Dong, W., Chen, F., Gao, F., Yang, M., Sun, L., Du, Z., Tang, J., Zhang, D., Development and analysis of a bridge-lever-type displacement amplifier based on

از طرفی میزان خطای ساعت اندازه گیری 0.01%FS توسط سازنده در شرایط آزمایشگاهی اعلام شده بود. همچنین میزان خطای مولتی متر نیز به صورت 0.1%F.S می باشد.

آزمایش در شرایط آزمایشگاهی در دردمای ۲۵ درجه سانتیگراد و ۴۴ درصد رطوبت انجام گرفت. مهم ترین عامل موثر شرایط محیطی دما می باشد. دما باعث تغییر مدول الاستیسته فلزات می گردد. از آنجاییکه آلیاژ بخش مکانیکی با ضریب انبساط حرارتی $2/5 \text{ m/mk}\mu$ می باشد. ضریب انبساط حرارتی پایین باعث شده است که تغییرات چندانی در مدول الاستیسته در اثر تغییر شرایط محیطی کاری به وجود نیاید. بطوریکه شبیه سازی در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۵ درجه سانتیگراد تفاوت محسوسی را نشان نداد.

حساسیت سیستم پیشنهادی بر پایه آزمایشات عملی توسط رابطه (۱) بیان شده است. اما برای مقایسه حساسیت سیستم پیشنهادی با کارهای رایج که از لولاهای دیگر مانند دایره‌ای و هذلولی برای ساخت بخش مکانیکی استفاده کرده‌اند از تحلیل کامپیوتری با استفاده از نرم افزار Solid Works (شکل ۱۴) استفاده شد.



شکل ۱۴ لولا خمشی (الف) برگی (ب) دایره‌ای (ج) هذلولی

شبیه سازی کامپیوتری با اعمال نیروی ۰/۰۱ تا ۱۰ نیوتن برای ۳ نمونه برگی، دایره‌ای و هذلولی انجام گرفت و نتایج شبیه سازی نشان داد در اثر اعمال نیرو، مقدار جابه جایی سیستم پیشنهادی نسبت به جابه جایی سیستم‌های رایج که از نوع هذلولی و دایره‌ای استفاده می کنند بترتیب ۵ و ۲ برابر می باشد. که این نشان می دهد سیستم پیشنهادی در شرایط مساوی نسبت به کارهای رایج می تواند رزولوشن بالایی داشته باشد.

۵- نتیجه گیری

سیستم‌های EMFR به علت داشتن زمان پاسخ کوتاه تر نسبت به لودسل‌های استرین گیج برای توزین دینامیکی و همچنین توزین دستگاه‌های با دقت بالا مناسب تر هستند. دقت این سیستم‌ها رابطه مستقیم با لولاهای خمشی مورد استفاده و

[11] Xu, N., Dai, M., Zhou, X., Analysis and design of symmetric notch flexure hinges, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9, (2017).

hybrid flexure hinges, *Precision Engineering*, Vol. 54, pp. 171-181, (2018).