



## توسعه یک حسگر دیجیتال تنش برشی بر اساس اختلاف فاز القایی، به منظور پیشگیری از زخم بستر

کیانا سادات موسوی جراحی<sup>۱</sup>، یوسف حجت<sup>۲\*</sup>، بهزاد قوامی نمین<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: yhojjat@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۱ دی ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۰ بهمن ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

القای مغناطیسی

نیروی برشی

اختلاف فاز

### چکیده

در این مقاله یک حسگر جدید ارائه شده که بر اساس اختلاف فاز، تنش برشی را اندازه‌گیری می‌کند. در این روش ابتدا، با استفاده از یک فنر، نیروی حاصل از تنش برشی، تبدیل به جابجایی شده و سپس جابجایی اندازه‌گیری می‌شود. اساس کار اندازه‌گیری جابجایی، القای جریان بین دو کویل مسطح است که در مقابل هم قرار دارند. یکی از این کویل‌ها ثابت بوده و دیگری جابجا می‌شود. هر یک گام که کویل متحرک روی کویل ثابت حرکت می‌کند، ولتاژ خروجی آن به اندازه ۲ ولت تغییر فاز می‌دهد. چون اختلاف فاز حاصل شده متناسب با جابجایی است، مقدار حرکت کویل متحرک را می‌توان از روی اندازه‌گیری اختلاف فاز به دست آورد. بر این اساس یک حسگر دو بعدی طراحی و شبیه‌سازی شده که در دو جهت  $x$  و  $y$  قابلیت اندازه‌گیری دارد. شبیه‌سازی به صورت مکانیکی - مغناطیسی انجام شده است، یعنی به ازای جابجایی الکترونها اختلاف فاز خروجی حاصل شده به صورت تفکیک شده در هر دو راستای  $x$  و  $y$  به دست آمده است.

## Development of a digital shear stress sensor based on induced phase difference, in order to prevent bedsores

Kiana Sadaat Mousavi Jarahi<sup>1</sup>, Yousef Hojjat<sup>2\*</sup>, Behzad Ghavami Namin<sup>3</sup>

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: yhojjat@modares.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 11 January 2024

Accepted: 30 January 2024

#### Keywords:

Magnetic Induction

Shear Force

Phase Difference

### Abstract

In this article, a new sensor is presented that measures the shear stress based on the phase difference. In this method, first, using a spring, the force resulting from the shear stress is converted into displacement, and then the displacement is measured. The basis of displacement measurement is the induction of current between two flat coils that are opposite each other. One of these coils is fixed and the other is movable. Each step that the moving coil moves on the fixed coil, its output voltage changes its phase by 2 V. Because the resulting phase difference is proportional to the displacement, the amount of movement of the moving coil can be obtained from the measurement of the phase difference. Based on this, a two-dimensional sensor has been designed and simulated that can measure in both  $x$  and  $y$  directions. The simulation has been done mechanically-magnetically, that is, for moving the electrodes, the output phase difference has been obtained separately in both  $x$  and  $y$  directions.

### Please cite this article using:

Mousavi Jarahi KS, Hojjat Y, Ghavami Namin B. Development of a digital shear stress sensor based on induced phase difference, in order to prevent bedsores. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 September 23;10(7):36-44. doi: 10.22034/IJME.2024.434979.1916 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

زخم بستر برای بیمارانی که به مدت طولانی بستری می‌شوند، یک مسئله حیاتی است که با نیروی نرمال و نیروهای برشی ایجاد شده به‌طور قابل توجهی باعث وخیم‌تر شدن زخم می‌شود. زخم بستر باعث کاهش کیفیت زندگی بیماران، فرسودگی شغلی پرستاران شده و افزایش هزینه‌های مراقبت‌های بهداشتی می‌شود. لذا شناسایی آن از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از روش‌های متداول، استفاده از حسگرها برای شناسایی زخم بستر و کمک به جلوگیری از بروز است. حسگرهایی که به این منظور استفاده می‌شوند، عمدتاً مقاومتی [۱]، خازنی [۲] و القایی هستند. حسگرهای مقاومتی با تغییر شکل هندسی، حسگرهای خازنی با تغییر ظرفیت خازن و حسگرهای القایی با تغییر ولتاژ القا شده مقدار و جهت نیرو را اندازه‌گیری می‌کنند. برخی از حسگرهای پیشنهادی می‌توانند در کاربردهای مختلف مانند روباتیک و همچنین در اندازه‌گیری نیروی سه‌بعدی نیز کاربرد داشته باشند.

واتانا سارن و همکاران [۳] در یک حسگر انعطاف‌پذیر را با روش القایی ساختند. نیروی اعمال‌شده به حسگر الاستومری باعث تغییر شکل مکانیکی در ساختار حسگر می‌شود و ولتاژ القایی هر زوج سیم‌پیچ در حسگر را تغییر می‌دهد. مقدار و جهت نیرو را می‌توان با داده‌های ولتاژ القایی محاسبه کرد.

دو و همکاران [۴] یک حسگر القایی برای اندازه‌گیری هم‌زمان نیروی نرمال و برشی بر روی کف پا را توسعه دادند. نیروی نرمال و نیروهای برشی از تغییرات ولتاژ القا شده در سه سیم‌پیچ حسگر نصب شده بر روی یک بستر مربعی، چهار بلوک لاستیکی ثابت در چهار گوشه بستر و یک صفحه آهنی محاسبه شد.

طاهرزاده و همکاران [۵] یک حسگر نیرو/گشتاور شش محوره با استفاده از استرین‌گیج برای بارگذاری‌های یک و چند مؤلفه‌ای طراحی کرده و ساختند. حسگر ساخته شده تحت بارگذاری ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج استقلال خروجی‌ها در شرایط بارگذاری ترکیبی را نشان داد.

هراکلیوس و همکاران [۶] یک حسگر پیرومقاومتی سه محوری ارزان قیمت و زیست سازگار را پیشنهاد کردند که با استفاده از تکنیک‌های ساخت ساده و ادوات ارزان قیمت توسعه یافته است. این حسگر می‌تواند فشارهای مختلف را با پاسخ و بازیابی بالا با حداقل پسماند و نتایج قابل تکرار تشخیص دهد.

میرزامحمدی و همکاران [۷] یک حسگر هیبریدی نوین بدون تماس استاتیکی مگنتواستریکتیو نیرو-گشتاور با استفاده از ماده گالفنل ارائه کردند. مقادیر حساسیت و خطای خطی بودن حسگر هیبریدی نیرو-گشتاور مگنتواستریکتیو که در این پژوهش ارائه شده و بهبود بسیار مناسبی را نسبت به پژوهش‌های قبلی تجربه کرده است.

حجت و همکاران [۸] یک روش القایی برای اندازه‌گیری هم‌زمان جابجایی در دو بعد را توسعه دادند. در این پژوهش یک سیم‌پیچ متحرک روی یک سیم‌پیچ مسطح حرکت می‌کند و از روی اختلاف فاز ولتاژهای القایی جابجایی‌ها را در جهات  $x$  و  $y$  اندازه‌گیری می‌کند.

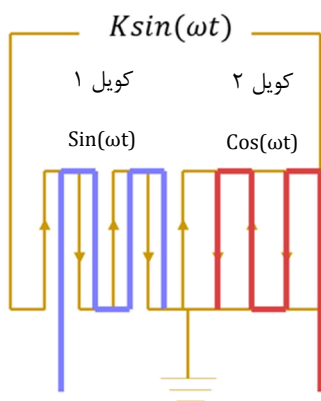
روش‌های القایی که تاکنون گزارش شده‌اند، بر اساس اندازه‌ی ولتاژ آنالوگ القا شده توسط سیم‌پیچ تحریک بر روی سیم‌پیچ گیرنده عمل می‌کنند. در این روش‌ها، با جابجایی برشی سیم‌پیچ گیرنده نسبت به سیم‌پیچ تحریک و قرار گرفتن آن‌ها در موقعیت‌های مختلف نسبت به یکدیگر میزان القای ایجاد شده تغییر کرده و به تبع آن ولتاژ القایی نیز تغییر می‌کند و می‌توان با ایجاد ارتباط بین جابجایی و ولتاژ القایی، میزان جابجایی برشی را اندازه‌گیری کرد. از آنجایی که در این روش‌ها جابجایی عمودی و برشی می‌تواند اثر یکسانی در خروجی داشته باشد، تغییر فاصله دو سیم‌پیچ می‌تواند موجب خطا در خروجی و عدم تشخیص درست شود. به همین دلیل انتخاب روشی که بتواند به‌صورت مستقل از فاصله کوئل‌ها، جابجایی برشی را اندازه‌گیری کند ضروری به نظر می‌رسد.

در این طرح برای اولین بار یک روش دیجیتال مبتنی بر اختلاف فاز بین دو سیگنال ارسالی و دریافتی معرفی می‌شود. از جمله مزایای این روش این است که تغییرات فاصله تأثیری بر روی اندازه‌گیری نداشته و به‌عبارت‌دیگر، حساسیتی نسبت به تغییرات فاصله ندارد. در پژوهش حاضر، جهت و بزرگی نیرو با استفاده از روش القای مغناطیسی به دست می‌آید. در این روش ابتدا توسط فنر، نیرو تبدیل به جابجایی شده و سپس جابجایی اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری با روش انکودر القایی انجام می‌شود. در این روش دو کوئل مسطح روی یکدیگر قرار گرفته و جریان متناوبی در کوئل ثابت برقرار می‌شود بر اساس قانون لنز در کوئل متحرک جریانی در خلاف جهت کوئل ثابت، القا می‌گردد. در اثر حرکت کوئل متحرک به‌اندازه یک گام، یک سیگنال کامل سینوسی در خروجی القا می‌شود. اگر

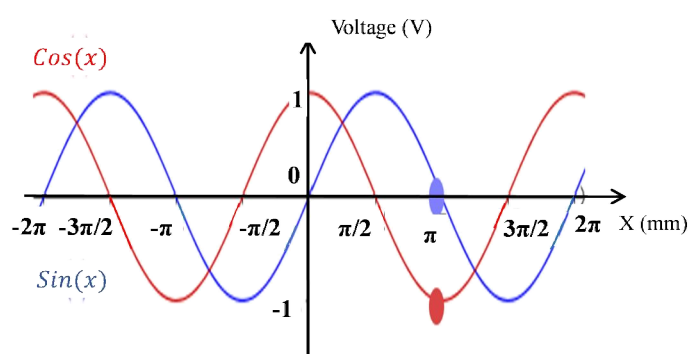
دو دسته کوپل متحرک داشته باشیم که نسبت به هم به اندازه یک چهارم گام اختلاف فاز مکانی داشته باشند، در این صورت در خروجی دو موج با اختلاف فاز ۹۰ درجه القا می شود که یکی سینوسی و دیگری کسینوسی است. در این پژوهش از این روش برای اندازه گیری مقدار و جهت نیروی برشی به صورت هم زمان در دو جهت استفاده می شود. به این منظور از شبیه سازی میدان های الکترومغناطیسی استفاده شده است. برای طی این مسیر ابتدا نیاز است تا با مطالعه ی فیزیک مسئله طراحی کوپل های تخت (الکترودها) در نرم افزار انجام شود. برای طراحی از نرم افزار "SOLIDWORKS 2018" و برای شبیه سازی از نرم افزار "COMSOL Multiphysics 6.1" استفاده شده است. سپس با مشخص شدن بهترین طراحی، یک سیستم مناسب متشکل از دو گروه الکترودها، جهت آزمایش و صحت سنجی در "Altium Designer 2022" طراحی و ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. پس از توسعه فناوری، یک نمونه حسگر تنش برشی ساخته و با موفقیت آزمایش شد. گزارش ساخت و آزمایش ها در مقالات آتی ارائه خواهد شد.

## ۲- طرح اولیه

اساس کار در شکل ۱ نشان داده شده است. کوپل تحریک تحت جریان  $K\sin(\omega t)$  قرار داشته و روی دو کوپل خروجی که باهم یک چهارم گام اختلاف فاز مکانی دارند، جریان های سینوسی و کسینوسی القا می کند (شکل ۲). از روی این خروجی ها مقدار و جهت جابجایی به دست می آید.

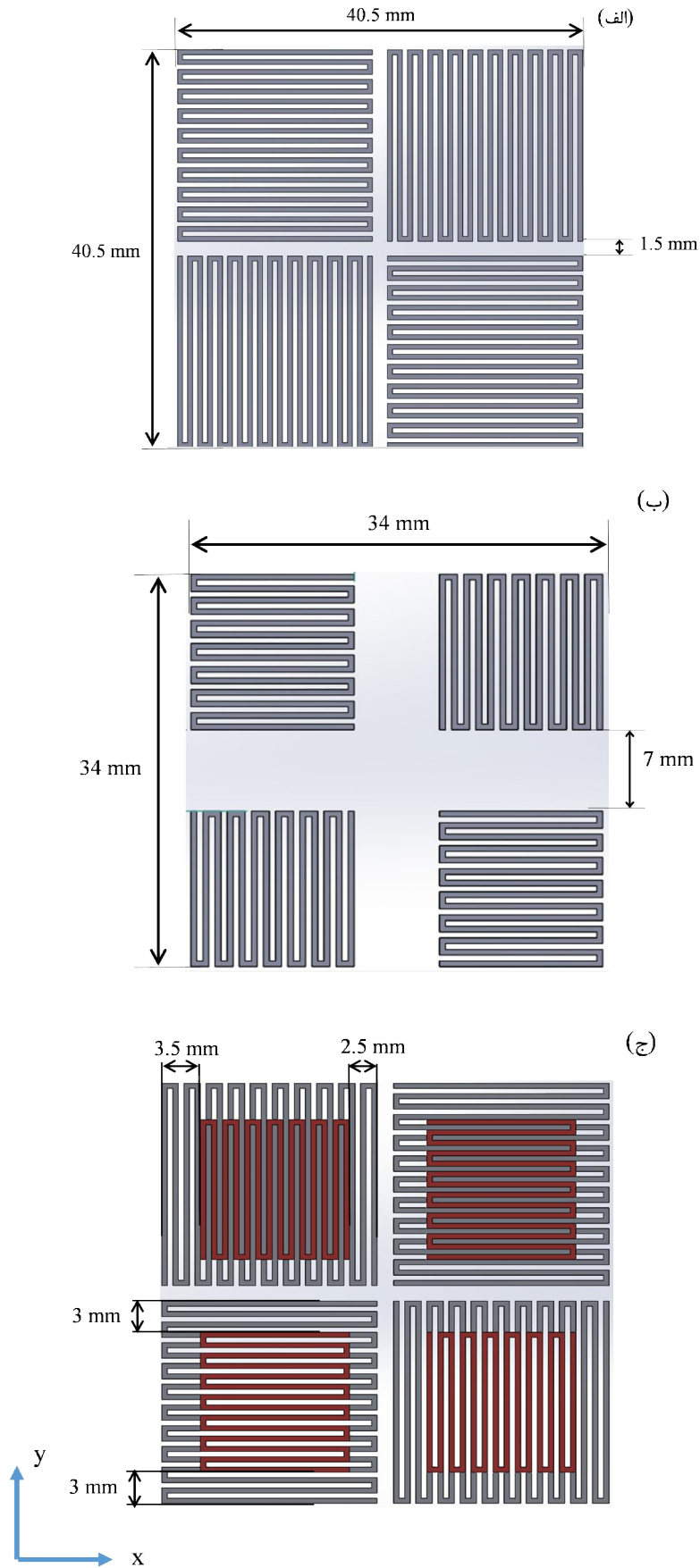


شکل ۱ الکترودها تحریک (زرد) - الکترودهای گیرنده (قرمز و آبی)



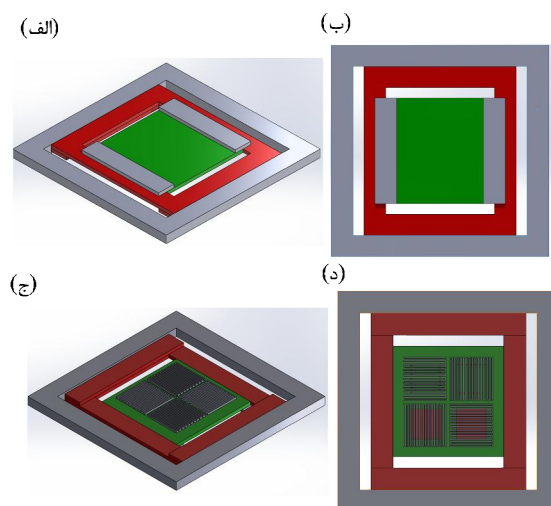
شکل ۲ نمایش اختلاف فاز دو الکترودها گیرنده

با توجه به نکات فوق یک نمونه حسگر طراحی شد. در شکل ۳-الف الکترودها تحریک نشان داده شده که دارای دو کوپل در جهت  $x$  و دو کوپل در جهت  $y$  است. شکل ۳-ب الکترودهای گیرنده را نشان می دهد. این قسمت دارای دو کوپل در جهت  $x$  با یک چهارم گام ( $0.5$  میلی متر) اختلاف فاز مکانی و دو کوپل در جهت  $y$  با یک چهارم گام ( $0.5$  میلی متر) اختلاف فاز مکانی است. در شکل ۳-ج الکترودها بر روی یکدیگر قرار گرفته اند همان گونه که در شکل قابل مشاهده است در هر کدام از جفت الکترودهای متحرک مربوط به حرکت در راستای  $x$  و راستای  $y$  الکترودها از نظر مکانی به اندازه یک چهارم گام باهم اختلاف فاز دارند.



شکل ۳ الف) الکتروود تحریک، ب) الکتروود گیرنده، ج) روی هم قرار گرفتن الکتروودها و نمایش اختلاف فاز

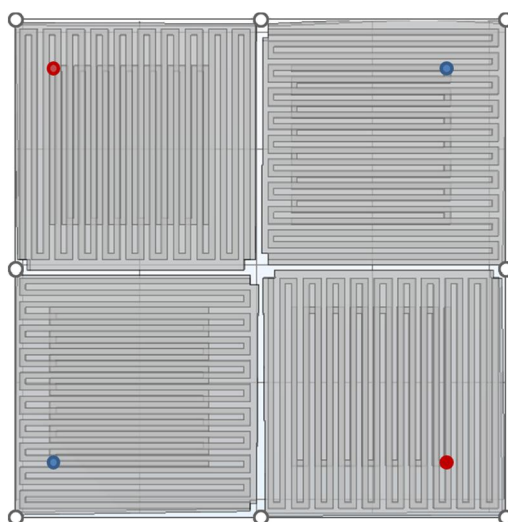
در شکل ۴ ترکیب نهایی و مونتاژ شده نشان داده شده است. دو قاب به شکل کشویی برای مقید کردن حرکت در دو جهت  $X$  و  $Y$  (جلوگیری از دوران) پیش‌بینی شده است. این مقید کردن به منظور جلوگیری از پیچش الکتروود متحرک در صفحه الکتروودهای ثابت و ایجاد خروجی‌ها ناخواسته در سیم‌پیچ‌های دریافت ضروری است.



شکل ۴ الف) شماتیک حسگر مونتاژ شده، ب) نمای پایین حسگر مونتاژ، ج) نمای الکتروودهایی که روی هم قرار می‌گیرند. د) نمای پایین الکتروودها

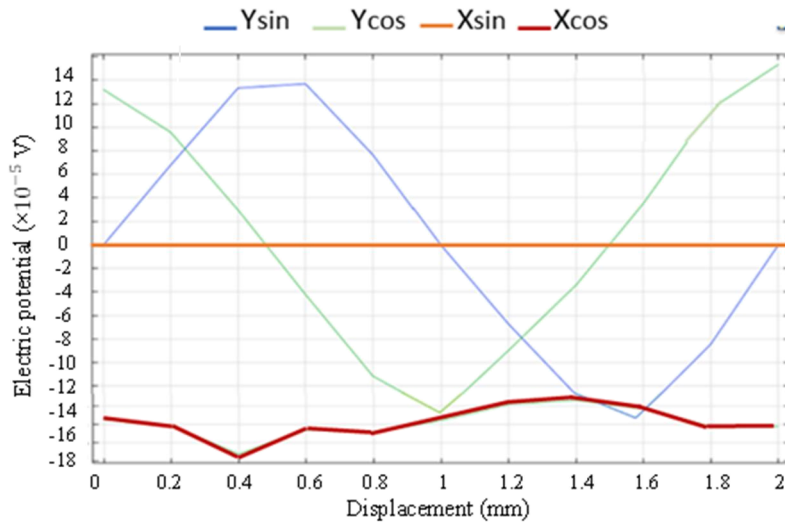
### ۳- نتایج حاصل از شبیه‌سازی

در مرحله بعد شبیه‌سازی مغناطیسی به مکانیکی هندسه پیشنهادی الکتروودها در نرم‌افزار "COMSOL 6.1" صورت پذیرفت. هندسه سه‌بعدی الکتروودها در شکل ۵ نمایش داده شده است. به منظور شبیه‌سازی از فیزیک میدان‌های الکترومغناطیسی استفاده شده است. در این شبیه‌سازی اختلاف پتانسیل اعمالی به سیم‌پیچ تحریک با دامنه ۴ ولت و فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز است. علت انتخاب فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز بزرگ شدن امپدانس سیم‌پیچ‌های تحریک به اندازه کافی و جلوگیری از جریان بالا در آن‌ها و ایجاد فاصله فرکانسی قابل قبول از نویزهای محیطی است. خروجی کوئل‌ها به ازای جابجایی‌های مختلف الکتروودهای متحرک بررسی شد. به این منظور در ابتدا دو نقطه متناظر از هر راستای الکتروود را انتخاب و ولتاژ القا شده در این نقاط بررسی شد. با جابجایی الکتروودهای متحرک در جهت‌های  $X$ ،  $Y$  و مقدار ولتاژ القا شده برحسب جابجایی نشان داده شد. دامنه حرکت تا ۲ میلی‌متر بود.

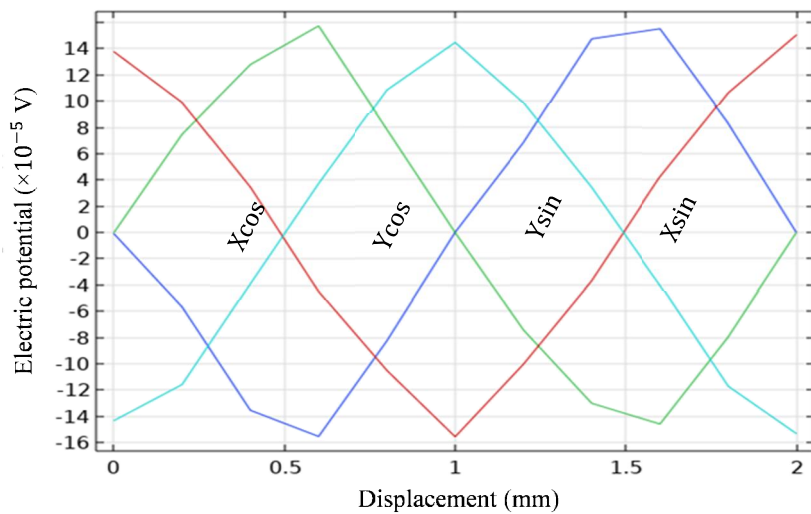


شکل ۵ هندسه سه‌بعدی الکتروودها

ابتدا جابجایی در جهت  $y$  انجام شد و خروجی به شکل ۶ دست آمد. الکترودهای جهت  $y$  همان طور که انتظار می‌رود، دو موج تقریباً سینوسی با اختلاف فاز  $90^\circ$  (sin و cos) را نشان می‌دهند. در این حالت، الکترودهای جهت  $x$  که نباید خروجی داشته باشند، دامنه نویز بسیار کمی نشان می‌دهند. همین کار برای جهت  $x$  تکرار شد و نتایج مشابهی به دست آمد. در آزمایش بعد قسمت متحرک به طور هم‌زمان در دو جهت  $x$  و  $y$  جابجا و مشاهده شد که هر دو گروه الکترودها ( $x$  و  $y$ ) اختلاف فاز نشان می‌دهند (شکل ۷).

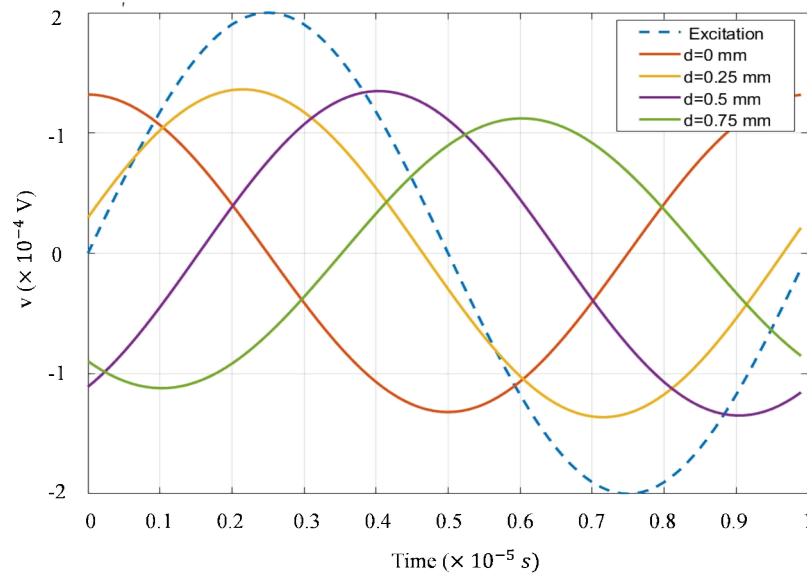


شکل ۶ اختلاف فاز دو الکتروود در جهت  $y$



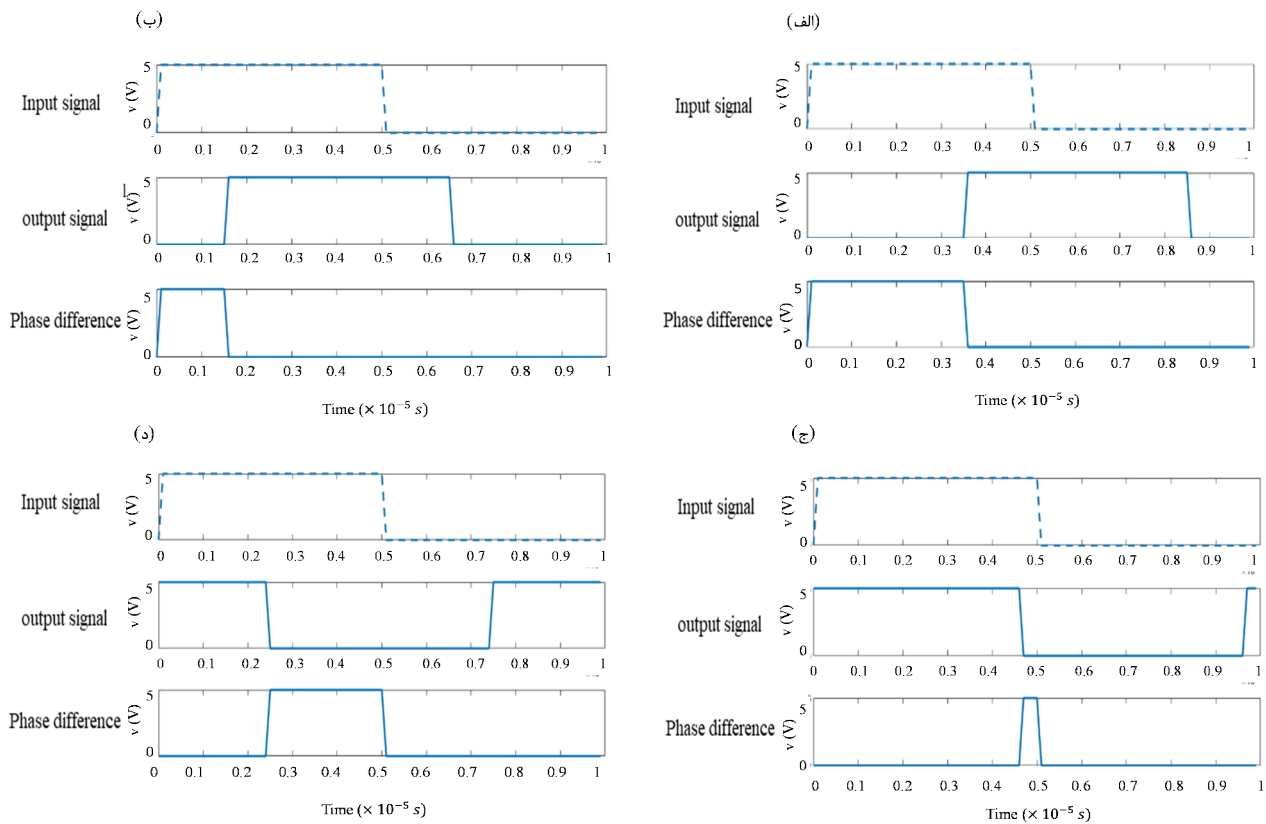
شکل ۷ اختلاف فاز دو الکتروود در جهت‌های  $x$  و  $y$

در مرحله بعد دو موج خروجی در هر مرحله باهم جمع شده و با موج مبنا (موجی که به الکتروود تحریک داده شده)، مقایسه می‌شود. برای نمونه متحرک در جهت  $x$  با گام‌های ۲ میلی‌متر حرکت داده شده و اختلاف فاز حاصل شده در ازای هر گام در شکل ۸ نمایش داده شده است. در شکل ۹ موج‌های سینوسی به سیگنال مربعی تبدیل شده، موج مبنا در ردیف اول (خط چین) و موج خروجی در ردیف دوم نشان داده شده است. بر اساس اختلاف فاز دو سیگنال، سیگنال ردیف سوم به دست می‌آید که عرض آن نشانگر اختلاف فاز است.



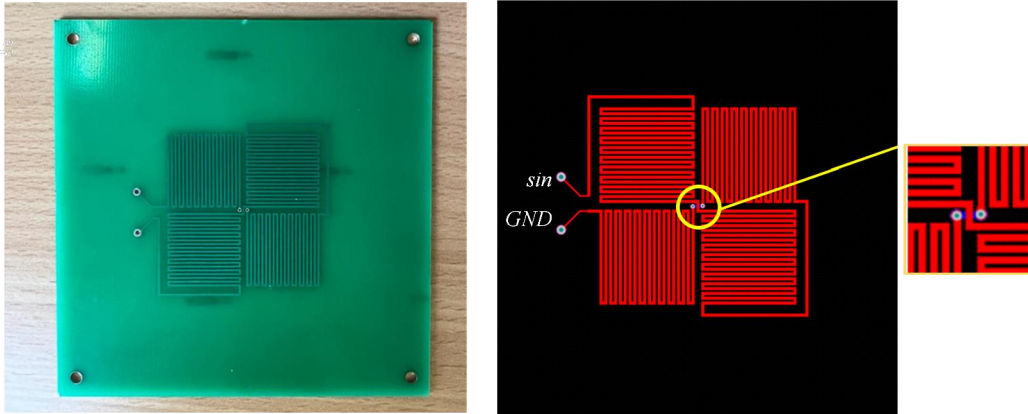
شکل ۸. اختلاف فاز بین موج مبنا (خطچین) و موج‌های خروجی و در اثر جابجایی حسگر

با توجه به خروجی که در شبیه‌سازی گرفته شد، دستگاه اولیه آزمایش ساخته شد. ابتدا طرح الکترودها در نرم‌افزار Altium Designer پیاده‌سازی شد. در شکل ۱۰ الکترودها تحریک نمایش داده شده است که ورودی  $V = A \sin(\omega t)$  به چهار الکترودها اعمال می‌شود.



شکل ۹. تبدیل موج سینوسی به مربعی برای جابجایی‌های الف) ۰ mm، ب) ۰/۲۵ mm، ج) ۰/۵ mm، د) ۰/۷۵ mm

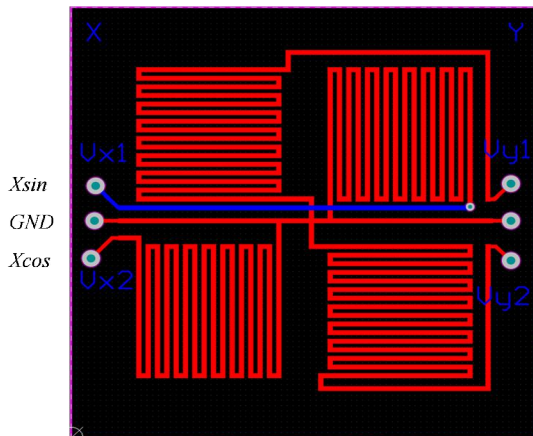




100x100 mm

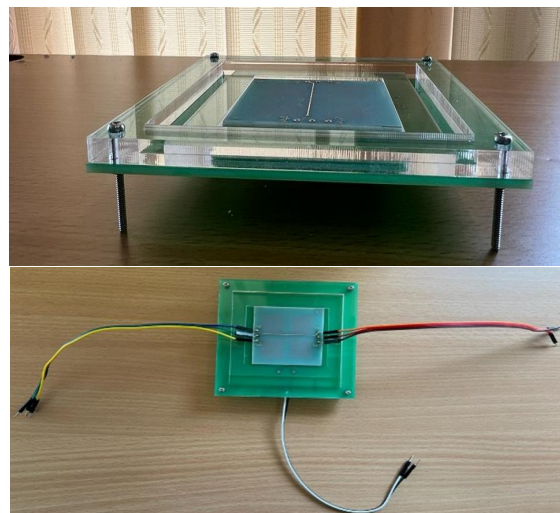
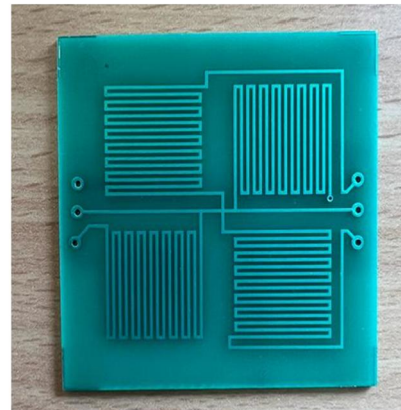
شکل ۱۰ الکتروود گیرنده چاپ شده روی PCB

در شکل ۱۱ الکتروودهای گیرنده در راستای  $x$  و  $y$  نشان داده شده‌اند که نسبت به هم  $90^\circ$  درجه اختلاف فاز مکانی دارند. در شکل ۱۲ دو الکتروود تحریک و گیرنده همراه با قاب بر روی تخته‌ای ثابت شدند. نتایج آزمایش با شبیه‌سازی تطابق کامل داشته و امکان پذیر بودن ایده را اثبات می‌کند. روش انجام آزمایش‌ها و نتایج آن در مقالات بعدی ارائه خواهد شد.



50x50 mm

شکل ۱۱ الکتروود گیرنده چاپ شده روی PCB



شکل ۱۲ الکتروود گیرنده چاپ شده روی PCB



#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش یک حسگر القایی بر اساس اختلاف فاز طراحی و شبیه‌سازی و ساخته شده است. طرح الکترودها کاملاً جدید است. عملکرد حسگر توسط شبیه‌سازی بررسی و توسط آزمایش‌ها تأیید شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ایده حسگر به خوبی عمل می‌کند و در ازای حرکت در هر جهت دو موج سینوسی و کسینوسی حاصل می‌شود. از روی این دو موج می‌توان اندازه و جهت حرکت را در دو راستای  $x$  و  $y$  به دست آورد. هنگام حرکت در یک راستا، خروجی‌ها در راستای دیگر تغییر محسوسی نمی‌کند و نشان می‌دهد که حسگر فقط به جهت موردنظر حساس بوده و حرکت در هر سمت باعث خروجی کاذب در سمت دیگر نمی‌شود. در این مرحله حسگر صرفاً نقش یک حسگر جابجایی را دارد. در مرحله بعد با اضافه کردن یک فنر، این وسیله تبدیل به حسگر نیرو شده و برای اندازه‌گیری نیروی و تنش برشی قابل استفاده خواهد بود.

#### ۵- برنامه آینده و پیشنهادها

در مرحله بعد این پژوهش ایده حسگر که صحت آن توسط شبیه‌سازی و آزمایش‌ها اولیه اثبات شده، با تکمیل آزمایش‌ها بر روی مجموعه ساخته شده، بررسی خواهد شد و با اضافه کردن قسمت‌های لازم تبدیل به حسگر تنش برشی برای اندازه‌گیری زخم بستر خواهد شد.

برای تبدیل اختلاف فاز (بین موج خروجی و موج مبنا) در مجموعه ساخته شده، دو مدار پیشنهاد می‌شود:

۱- مدار دیجیتال تبدیل اختلاف فاز به پالس

۲- مدار آنالوگ تبدیل اختلاف فاز

در هر دو حالت، می‌توان بر اساس اختلاف فاز موجود، جابجایی را اندازه‌گیری کرد. در نتیجه وقتی ورودی اندازه یک گام حرکت کند خروجی یک دوره تناوب ۳۶۰ درجه را می‌گذراند. هندسه و جنس ماده الاستیکی (فنر) که برای مهار حرکت قسمت متحرک حسگر استفاده خواهد شد، باید به گونه‌ای باشد که حساسیت کافی، امپدانس ورودی پایین و محدوده مناسب خطی برای حسگر فراهم کند.

#### References

- [1] Fajingbesi FE, Azman AW, Ahmad Z, Olanrewaju RF, Ibrahim MI, Mustafah YM. Low cost piezoresistive pressure sensor matrix for pressure ulcer prevention and management. In 2019 7th International Conference on Mechatronics Engineering (ICOM) 2019 Oct 30 (pp. 1-4). IEEE. doi: 10.1109/ICOM47790.2019.8952007
- [2] Cheng MY, Lin CL, Lai YT, Yang YJ. A polymer-based capacitive sensing array for normal and shear force measurement. Sensors. 2010 Nov 15; 10(11):10211-25. doi: 10.3390/s101110211
- [3] Wattanasarn S, Noda K, Matsumoto K, Shimoyama I. 3D flexible tactile sensor using electromagnetic induction coils. In 2012 IEEE 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 2012 Jan 29 (pp. 488-491). IEEE. doi: 10.1109/MEMSYS.2012.6170230
- [4] Du L, Zhu X, Zhe J. An inductive sensor for real-time measurement of plantar normal and shear forces distribution. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2014 Dec 24; 62(5):1316-23. doi: 10.1109/TBME.2014.2386136
- [5] Taherzadehghahfarokh MR, Karafi MR. Design and fabrication of six axis force/torque sensor using strain gauges. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2022 May 22; 9(3):1-0. doi: 10.22034/ijme.2022.157663 [In Persian]
- [6] Heracleous C, Leong JJ, Loureiro RC. Development of a low-profile planar sensor for the detection of normal and shear forces. IEEE Journal on Flexible Electronics. 2023 Jan 23. doi: 10.1109/JFLEX.2023.3239052
- [7] Mirzamohammadi S, Sheikhi MM, Karafi MR, Ghodsi M. Design and Fabrication of a Contactless Hybrid Static Magnetostrictive Force-Torque Sensor Using Galfenol. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2021 Nov 22; 8(9):50-9. [In Persian]
- [8] Hojjat Y, Karafi MR, Ghanbari M, Lotfi M. Development of an inductive encoder for simultaneous measurement of two-dimensional displacement. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011 Mar; 53:681-8. doi: 10.1007/s00170-010-2865-2