





Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Üç Boyutlu Baskı Metodu ile Üretilmiş Dalgalı Yüzeyli Sığal Basınç Algılayıcı

 Yiğit Dağhan GÖKDEL^a,  Baykal SARIOĞLU^{a,*}

^a *Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul Bilgi Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE*

* *Sorumlu yazarın e-posta adresi: baykal.sarioglu@bilgi.edu.tr*

DOI : 10.29130/dubited.506583

ÖZET

Geleneksel olarak, sığal basınç algılayıcıları paralel plaka düzlemsel kondansatörlerin bir plakasını ince diyafram olarak kullanmaktadır. Bu çalışmada yeni nesil, kulan-at özelliğine sahip, üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş ve yüzeyi alanı arttırılmış şeffaf polimer bir sığal basınç algılayıcı yapısı sunulmuştur. Önerilen yapı düzlemsel bir sığaç özelliklerine sahip olup, üst ve alt olmak üzere iki plakadan oluşmaktadır. Plakaların iç yüzeylerinin topolojisi değiştirilerek algılayıcının yüzey alanı arttırılmıştır. Önerilen bu cihaz, Polyjet Connex3 Objet260 üç boyutlu yazıcı kullanılarak VeroClear malzemesinden üretilmiştir. 3B yazıcı ile oluşturulan ve şeffaf termoplastik malzeme ile üretilen algılayıcı parçaları, kullanılan malzemenin yapısı itibarıyla iletken değildir. Söz konusu cihaza toz tutma prensibi kullanılarak önce 40 nm kalınlığında ince film krom daha sonra ise 115 nm kalınlıktaki altın malzeme kaplanmış ve böylelikle yapıya iletkenlik kazandırılmış; düzlemsel sığaç yapısının alt ve üst metal yüzeyleri oluşturulmuştur. Üretilen algılayıcının boyutları 11x11x4,6 mm³'dür. Nominal değeri 2,7 pF olan cihaza deneyler esnasında en yüksek 8,88 kPa kadar çeşitli basınç değerleri uygulanmıştır. Cihazın azami 4,3 pF sığaç değeri aldığı ölçülmüştür. En yüksek hassasiyet değeri ise 0,14 pF / kPa olarak hesaplanan algılayıcının, basınç ölçümlerinde başarı ile kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Sığaç, Basınç Algılayıcı, 3B Baskı*

3D Printed Capacitive Pressure Sensor with Corrugated Surface

ABSTRACT

Conventionally, capacitive pressure sensors employ thin diaphragms as one of plates of a parallel-plate planar capacitor. Applied pressure causes this diaphragm to deflect and the capacitance to change. In this study, a new generation, 3D printed, transparent polymer capacitor pressure sensor structure with increased surface area is presented. The structure is basically a planar capacitor that consists of two plates, upper and lower. The surface area of the sensor is increased by changing the topology of the surfaces of the plates. Proposed device is fabricated using Polyjet Connex3 Objet260 3D printer and Veroclear as the printing material. The sensing plates that are fabricated by employing the 3D printer and transparent thermoplastic material are not inherently conductive. Therefore, 3D printed polymer device obtained conductivity by applying first 40 nm thick chromium film and subsequently 115 nm thick gold layer via sputtering process. The dimensions of the manufactured

sensor are $11 \times 11 \times 4.6 \text{ mm}^3$. The device has a nominal capacitance value of 2.7 pF. Pressure values up to 8.88 kPa applied to the sensor during experiments. The sensor measured to have a maximum of 4.3 pF capacitance value. The highest sensitivity value is measured as 0.14 pF / kPa. With the experiments carried out, it is proven that the presented sensor can be used in pressure measurement.

Keywords: Capacitive Sensor, Pressure Sensor, 3D Printing

I. GİRİŞ

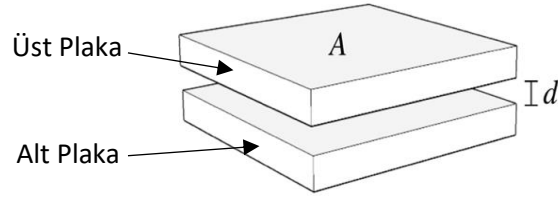
Mikro-elektro-mekanik sistemlerin (MEMS) mekanik performans ve davranışlarının bağlı olduğu önemli değişkenlerden biri, mikro ölçekteki bu yapıların üç boyutlu (3B) geometrisidir. Söz konusu MEMS cihazların gerçekleştirilmesinde geleneksel olarak baş vurulan çok ince yüzey işleme (surface micromachining) [1], kütle mikro imalat (bulk micromachining) [2], litografi, elektro-kaplama (electroplating) ve LIGA [3] benzeri düzlemsel mikro üretim (planar micro fabrication) teknikleri bu cihazların geometrisini iki boyutlu (düzlemsel) olarak değiştirmeye izin vermekle beraber, üçüncü boyutta yüzey derinlik profilinin değiştirilmesine imkân vermemektedir. Bu nedenle yüksek performanslı MEMS tabanlı cihazlar meydana getirmek için lüzumlu olan kavisli ve eğilimli yüzey profilleri oluşturulamamaktadır. Her ne kadar literatürde mikro-stereo litografi [4] veya eğimli/döndürülmüş UV litografi [5] gibi polimer veya silisyum alttaşları düzlem dışı şekillendirip, z-yönünde eğimli yüzeyler ortaya çıkarabildiği ileri süren metotlar raporlanmış olsa da bu tekniklerin hiçbiri kısa sürede, düşük maliyetli, gerçek 3B mikro yapılar oluşturamamaktadır.

Son zamanlarda MEMS tabanlı cihaz üretiminde ince detay işleme becerisi, düşük maliyeti, az atık üretmesi ve hızlı prototipleme yeteneği sebebiyle, literatürde bir eklemeli üretim (EÜ) tekniği olarak sınıflanan, üç boyutlu (3B) yazıcı teknolojisine sıklıkla başvurulmaya başlanmıştır [6-11]. Geleneksel üretim tekniklerinin aksine, birleştirmeli yığma (fused-deposition) metodu [12], stereolitografi veya seçkili lazerli sinterleme (selective laser sintering) [13] gibi EÜ teknikleri ana üretim malzemesini tabaka tabaka biriktirmektedir. Buna ek olarak, EÜ tekniği daha önce de bahsedilen ve mikro yapıların z-yönündeki profillerini ancak sınırlı düzeyde başarabilen [17] düzlemsel mikro üretim tekniklerinin aksine MEMS yapıların derinlik profillerini tamamen şekillendirmeye olanak sağlamaktadır. 3B yazıcı teknolojisi ile oluşturulmuş ve birçok değişik geometri ve özelliğe sahip sığaç ve sığal algılayıcı (capacitive sensor) yapıları daha önce literatürde gösterilmiştir [6-8,14-16]. Bu çalışma ise EÜ kullanılarak derinlik profili değiştirilen, dolayısı ile hassasiyeti ve sistem performansı artırılan özgün sığal basınç algılayıcıların tasarım ve üretimine odaklanmaktadır. Araştırma ilk olarak, karşılaştırmalı değerlendirme yapabilmek adına düz paralel levha geometrisine sahip tipik bir sığaç yapısını kullanmaktadır. Daha sonra yapılacak sığa değeri artış ölçümleri ile birlikte önerilen algılayıcının hassasiyet büyüklüğünde temin edilen artışın mukayese edilmesi bu sayede mümkün olmaktadır. Araştırma kapsamında, temel referans olması adına kullanılan bu jenerik yapıyla düzlemsel olarak aynı taban alanına sahip, ancak z yönündeki yüzey profili değiştirilerek sığa alanı dolayısı ile sığa büyüklüğü artırılan dalgalı yüzeyli sığaç geometrisi önerilmiştir. Tasarlanan bu yapının yüzeyi matematiksel olarak modellenmiş, benzetimleri yapılmış ve müteakiben üç boyutlu yazıcı teknoloji ve tozutma tekniği kullanılarak üretilip, test edilmiştir.

II. TEORİK METOT

Şekil 1’de iki plakadan oluşan genel bir paralel plaka sığaç yapısı gösterilmiştir. Bu yapı birbirine paralel olan ve sırası ile üst ve alt plaka olarak adlandırılan iki adet plakadan oluşmaktadır. Bu çalışmada önerilen polimer sığal dönüştürücüler de paralel plaka sığaç esasına dayanmaktadır. Söz konusu sığaç yapısının sığa değeri, sığaç kenarındaki alanların katkıları ihmal edildiğinde basitçe aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

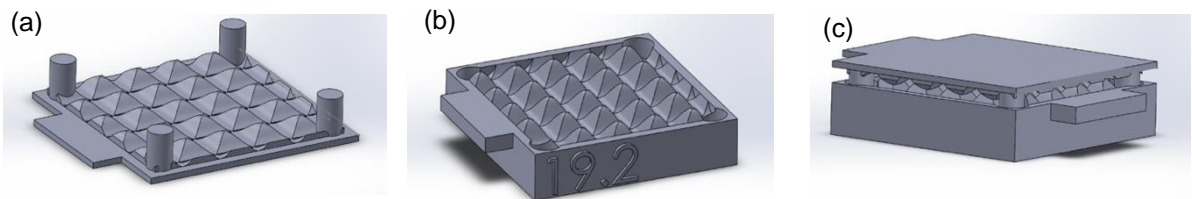
$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1)$$



Şekil 1. Paralel plaka sığaç yapısı

Eş. 1’de ϵ değişkeni dielektrik sabiti, A değişkeni Şekil 1’de de gösterildiği gibi iletken plakanın alanını ve son olarak d ise iki plaka arasındaki dikey uzaklığı göstermektedir. Bu tip bir sığaçın basınç algılanmasında kullanılması şu şekilde mümkün olabilmektedir. Üst plakaya uygulanacak basınç değerine bağlı olarak, söz konusu plaka aşağıya doğru bükülecek ve iki plaka arasındaki dikey uzaklığı sembolize eden d büyüklüğü değişecektir. Değişen büyüklük dolayısı ile de yapının sığa değeri Eş. 1’e bağlı olarak artıp-azalacaktır. Sığa değerindeki bu değişim ise uygulanan basıncın hesaplanmasında rahatlıkla kullanılabilir. Uygulanan basınç değerinin ölçülebilmesi için salınım üretici ve gerilim ölçümlerine bağlı sığal algılayıcı devreleri kullanılmaktadır.

Önerilen özgün tasarım sayesinde sığa değerinin kontrollü olarak artırılması, basınç değişimlerine olan hassasiyetin yükseltilmesi, ölçümün daha verimli olması için elzemdir. Eş. 1’de açıkça gösterildiği üzere paralel plaka sığaçın sığa değerinin artırılması için önerilerden biri, plaka yüzey alanı A ’nın artırılmasıdır. Söz konusu yüzey alanının artırılması için plakaların birbirlerine bakan iç yüzeylerine 3B bir form verilebilmektedir. Şekil 2’de bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen yüzey alanı artırılmış basınç dönüştürücü sığal cihazların temel tasarım detayları sunulmuştur. Tasarım iki adet polimer parçadan oluşmaktadır. Bu parçalar sığacın üst ve alt plakalarını oluşturmaktadır. Polimer sığaç üzerine uygulanan herhangi bir basınç, üst plakanın aşağı yönde esnemesine, dolayısı ile üst plakanın alt plakaya yaklaşmasına ve sonuç olarak plakalar arasındaki dik d uzaklığı azaldığından, sığa değerinin artmasına sebebiyet vermektedir.

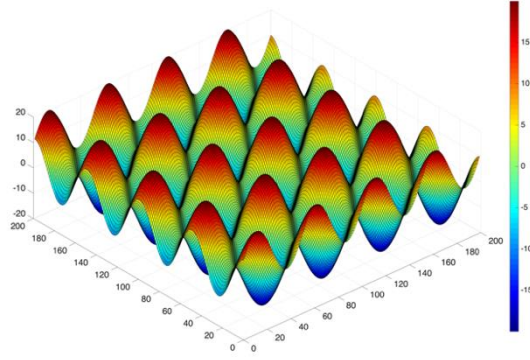


Şekil 2. Önerilen yüzey alanı artırılmış sığal basınç algılayıcı yapısının üç boyutlu kavramsal çizimleri (a) üst plaka, (b) alt plaka, (c) plakaların birleşmeleriyle meydana gelen nihai tasarım

Şekil 2’de gösterilen yapının alt ve üst plaka iç yüzeyleri oluşturulurken, toplam yüzey alanını ve dolayısı ile sığa değerini arttırmak için aşağıda verilen sinüzoidal eşitlik uygulanmıştır;

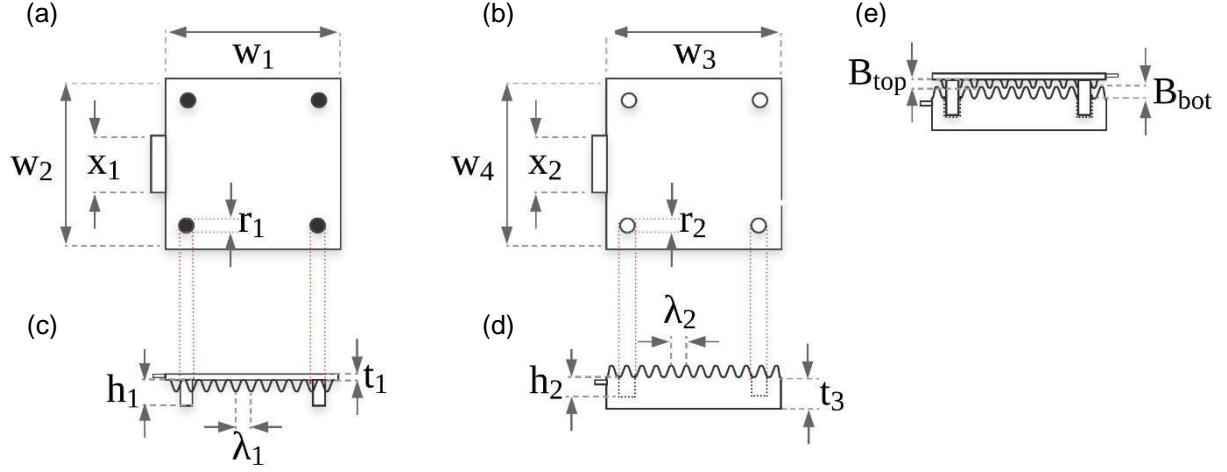
$$f(x, y) = B \left[\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_x} x\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_y} y\right) \right] \quad (2)$$

Eş. 2’de yer alan parametrelerden B sinüzoidal dalga genliğini, λ_x ve λ_y değerleri ise, sırasıyla, x ve y düzlemindeki dalga boylarını göstermektedir. Eş. 2 kullanılarak ($\lambda_x=\lambda_y=20$, $B=10$) oluşturulan örnek bir yüzey Şekil 3’te gösterilmiştir. Şekil 1’de gösterilen standart paralel plaka sığaç yapısına kıyasla sinüzoidal yüzey kullanılarak elde edilen alan artışı %58,5 teorik olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Eş. 2 kullanılarak ($\lambda_x=\lambda_y=20$, $B=10$) oluşturulmuş örnek bir iç plaka yüzeyi. Şekil 1’de gösterilen standart paralel plaka sığaç yapısına kıyasla elde edilen yüzey alanı artışı %58,5 olarak hesaplanmıştır.

Önerilen tasarımlarda hassasiyetle üzerinde durulan alan arttırma çalışması, daha sonra üretim aşaması kapsamında tozutmaya işlemiyle (sputtering) gerçekleştirilecek ince film metal kaplamayı bozmayacak şekilde tamamlanması amaçlanmıştır. Sinüzoidal yüzey fonksiyonu hem yüzey alanında önemli miktarda artış sağladığından, hem de alan artışı sağlayan diğer yüzey geometrilerine kıyasla üretim aşamasında kolaylık getirdiğinden tercih edilmektedir.



Şekil 4. Önerilen yüzey alanı arttırılmış sığaç tasarımının yapısı ve ilgili boyutların detaylı gösterimi (a) üst plakanın tepeden görünümü, (b) alt plakanın tepeden görünümü, (c) üst plakanın yandan görünümü, (d) alt plakanın yandan görünümü, (e) üst ve alt plakanın birleştirilmiş görünümü

Hedeflenen sığal basınç algılayıcının gerçekleştirilmesi sürecinde, ilk olarak önerilen tasarımlar, Şekil 2’de gösterildiği gibi, 3B olarak bilgisayar destekli tasarım yazılımı yardımıyla çizilmiştir. Bu tasarımda kullanılan yapı parametreleri Şekil 4’te gösterilmiş, ilintili büyüklükler ise Tablo 1’de listelenmiştir.

Tablo 1. Tasarımın yapı parametrelerinin değerleri.

| Parametreler | Boyutlar (μm) | Parametreler | Boyutlar (μm) |
|------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|
| w_1 | $1,1 \times 10^4$ | w_2 | $1,1 \times 10^4$ |
| w_3 | $1,1 \times 10^4$ | w_4 | $1,1 \times 10^4$ |
| x_1 | 550 | x_2 | 550 |
| r_1 | $1,2 \times 10^3$ | r_2 | $1,6 \times 10^3$ |
| h_1 | $1,85 \times 10^3$ | h_2 | $1,1 \times 10^3$ |
| t_1 | 300 | t_3 | $2,5 \times 10^3$ |
| λ_1 | 200 | λ_2 | 200 |
| B_{top} | 300 | B_{bot} | 500 |

Önerilen sığal basınç algılayıcı yapı $11 \times 11 \times 4,6 \text{ mm}^3$ büyüklüğünde bir hacme sığacak biçimde, yüzey alanı aynı boyutlardaki paralel plaka sığal algılayıcı yapısına oranla %25 artacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 4’te x_1 ve x_2 boyutları ile nitelenen çıkıntılar, kaplama sonrası üst ve alt plakalardan algılama için kullanılacak elektronik devreye elektriksel bağlantı alma işlemini kolaylaştırmak üzere eklenmiştir. Şekil 4 (c)’de gösterilen üst plaka profilinde z yönünde h_1 büyüklüğünde olan çıkıntılar ise, alt plakadaki karşılıkları düşünüldüğünde iki plakanın arasındaki mesafeyi düzenleyip, hizalamayı sağlamaktadır. Tasarlanan bu cihaza basınç uygulanması sebebiyle değişen sığa değeri aşağıda verilen Eş. 3 ile yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir.

$$C = \iint \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r dx dy}{d(x,y) - \Delta(x,y)} \quad (3)$$

Eş. 3'te C uygulanan basınç değeri altında ölçülen sığa değerini, ε_r bağıl dielektrik katsayısını, ε_0 dielektrik sabitini, $d(x, y)$ iki plaka arasındaki mesafe denklemini ve $\Delta(x, y)$ ise basınç altında esneyen üst plakanın sebep olduğu dinamik mesafe değişimini ifade etmektedir. Basınç uygulanmaz iken $\Delta(x, y)$ sıfır değerine sahip olacağı için geriye kalan tüm sistemi, x, y ve z koordinatlarında değişen sinüs dalgalarıyla da beraber, alt ve üst plaka yapıları oluşturmaktadır. İki plaka arasındaki dinamik mesafeyi ifade etmek için temel olarak Eş. 3'e, $d(x, y)$ fonksiyonu eklenmiştir. $d(x, y)$ fonksiyonu aşağıdaki eşitlikte görüldüğü gibi ifade edilebilmektedir.

$$d(x, y) = h_1 - h_2 + f_{üst}(x, y) - f_{alt}(x, y) \quad (4)$$

Eş. 4'te h_1 üst plaka bacak uzunluğunu, h_2 alt plakadaki boşlukların derinliklerini, $f_{üst}(x, y)$ ve $f_{alt}(x, y)$ ise Eş. 2 ile ifade edilmiş olan, üst ve alt plakalardaki basınç uygulanmayan durumdaki yüzey denklemini ifade etmektedir. Basınç nedeni ile üst plakanın bükülmesi ile oluşan yer değiştirme Eş. 5 te iletilen $\Delta(x, y)$ eşitliği ile modellenmiştir.

$$\Delta(x, y) = K \left(\frac{w_1 + w_2}{2} - x^2 - y^2 \right) \quad (5)$$

Eş.5 da yer alan K değeri uygulanan basınca göre üst plakada gerçekleşen en yüksek deformasyon mesafesini modellemektedir. Bu durumda, makalede önerilen yapının toplam sığa değeri aşağıdaki Eş. 6'deki gibi ifade edebilmektedir:

$$C = \iint \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r dx dy}{h_1 - h_2 + f_{üst}(x, y) - f_{alt}(x, y) - K \left(\frac{w_1 + w_2}{2} - x^2 - y^2 \right)} \quad (6)$$

Eş. 2, Eş. 6'nın içine yazıldığı zaman, herhangi bir üst plaka deformasyonu sırasındaki sığa değişimi Eş. 7 ile elde edilmektedir;

$$C = \iint \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r dx dy}{h_1 - h_2 + B_{üst} \left[\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_{xüst}} x\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_{yüst}} y\right) \right] - B_{alt} \left[\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_{xalt}} x\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_{yalt}} y\right) \right] - K \left(\frac{w_1 + w_2}{2} - x^2 - y^2 \right)} \quad (7)$$

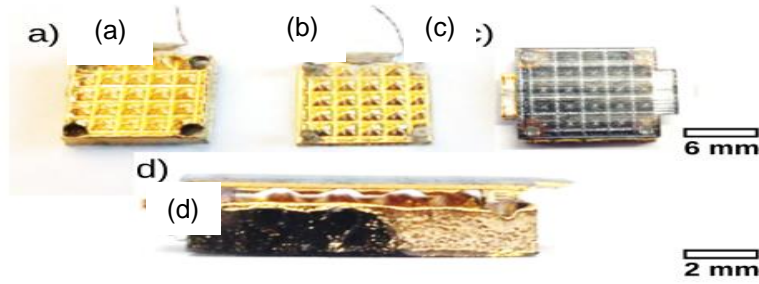
III. ÜRETİM

Bu çalışmada yukarıda vurgulandığı üzere 3B yazıcı ile üretilmiş, yeni nesil, hızlı üretimi yapılabilecek "kullan-at" tarzında sığal basınç algılayıcı tasarımları gerçekleştirilmiştir. Üretim aşamasında Stratasys Objet Eden 3B yazıcı ve VeroClear RGD-810 isimli üç boyutlu şeffaf polimer basım malzemesi kullanılmıştır. Söz konusu şeffaf termoplastik üç boyutlu baskı malzemesinin yapısal özellikleri Tablo 2'de listelenmiştir. Üretim sırasında 3B yazıcıda 75°C erime sıcaklığı, %100 doluluk oranı, 16 µm katman kalınlığı, 16 µm nozul çapı, 5,6 mT basınç değeri parametreleri kullanılmıştır.

Tablo 2. Vero Clear polimer malzemesinin özellikleri

| | |
|---|-----------|
| Elastisite Sabiti (MPa) | 2000-3000 |
| Uzama katsayısı (%) | 10-25 |
| Gerilme mukavemeti (MPa) | 50-65 |
| Bükülme Mukavemeti (MPa) | 75-110 |
| Bükülme Modülü (MPa) | 2200-3200 |
| Polimer yoğunluğu (g/cm³) | 1,18-1,19 |

Üretilen sığal basınç algılayıcı parçaları, üç boyutlu baskı aşamasında esas üretim malzemesinin yanında kullanılan destek malzemesinden arındırılması için %40 derişime sahip olan NaOH solüsyonunda yaklaşık 16 saat bekletilmiştir. Müteakip adımda çözünmenin tam sağlanması için aynı yapılar ılık su içerisinde yaklaşık 30 saniye kadar durulanmış ve ardışık kaplama işlemi için hazır hale getirilmişlerdir.

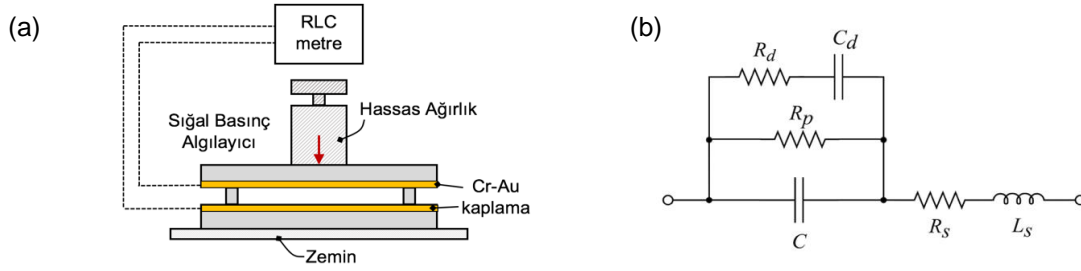


Şekil 5. Üretimi tamamlanmış sığal basınç algılayıcının görüntüsü. (a) alt plaka görüntüsü (b) üst plaka görüntüsü (c) krom kaplanmamış üst plaka görünümü ve (d) alt ve üst plakanın hizalanıp, birleştirilmiş durumunun yan görüntüsü

3B yazıcı ile oluşturulan ve şeffaf termoplastik malzeme ile üretilen algılayıcı parçaları, kullanılan malzemenin yapısı itibarıyla iletken değillerdir. Bundan dolayı iletkenliğin sağlanması için önerilen yapı tozutmama işlemiyle (sputtering) kullanılarak önce 40nm kalınlığında ince film krom daha sonra ise 115 nm kalınlıktaki altın malzeme ile kaplanmıştır. İnce film kaplama işleminden sonra Şekil 4 (a) ve (b)'de x_1 ve x_2 ile nicelenen çıkıntılarının üstünden gümüş epoksi kullanılarak kablolama yapılmış ve dolayısı ile dışarıya elektriksel bağlantı sağlanmıştır. Şekil 5'te üretimi tamamlanmış sığal basınç algılayıcının görüntüsü fotoğraflanmıştır.

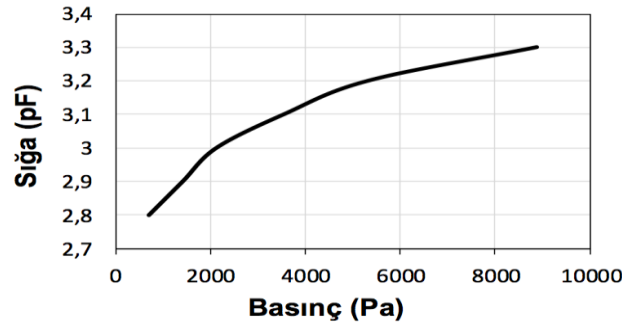
IV. DENEYSEL SONUÇLAR

Sığal basınç algılayıcı test ve ölçümleri için Şekil 6'da gösterilen deney düzeneği kullanılmıştır. Yapılan ölçümler sırasında hassas ağırlık seti vasıtasıyla algılayıcı üst plakasına çeşitli seviyelerde basınç uygulanmıştır. Sığa değerindeki değışimler ise RLC metre kullanılarak izlenip, kaydedilmiştir.



Şekil 6. (a) Tasarlanıp üretilen sığal basınç algılayıcı yapının test düzeneği. Basit modelleme adına çizimde alt ve üst plakaların iç yüzeyleri dalgalı değil düz olarak gösterilmiştir. Test esnasında miligram seviyesinde değişen mikro hassas ağırlıklar algılayıcı yapının üstüne konmuş ve yapıdaki değişiklikler ve bükülmeler gözlenmiştir. Yapının üstüne ekti eden kuvvetten kaynaklanan sığa değişikliği düzenli olarak izlenip, ölçümlenmiştir. **(b)** Üretilen sığal algılayıcının eşlenik devresi.

Şekil 6 (b)'de üretilen sığal basınç algılayıcının eşlenik devresi gösterilmiştir. Bu devrede C değeri algılayıcının sığa değerini, R_p plakalar arası kaçak akımın etkisini gösterilen direnç değerini, R_d ve C_d değerleri dielektrik materyalin soğrulma etkisini, R_s ve L_s ise algılayıcı geometrisinden kaynaklanan ve deney düzeneğinde kullanılan kablo ve devre bileşenlerinin dirençsel ve endüktif parazitik etkilerini modellemektedir. Farklı kuvvet dolayısı ile basınç değerleri altında ölçümü yapılan cihazın sığa değeri bu makalenin ikinci kısımda anlatılan usul ve eşitliklere dayanarak değişmektedir. Önerilen cihazın üst plakasına uygulanan basınç değerine mukabil oluşan sığa değerinin grafiği Şekil 7'de verilmiştir.

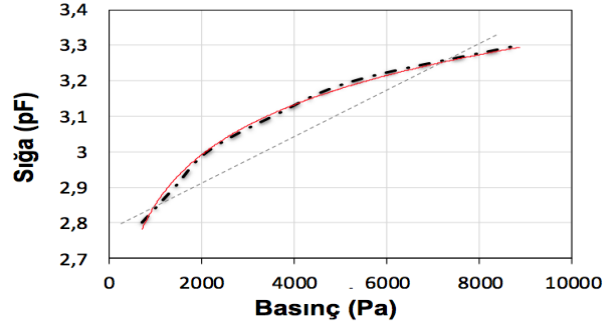


Şekil 7. Sığal basınç algılayıcıya uygulanan farklı basınç değerlerine karşılık olarak ölçülen sığa değerleri

Şekil 7'de gösterildiği üzere elde edilen deneysel eğri parabolik bir davranış sergilemektedir. Elde edilen bu deney sonuçları sonucunda ortaya çıkan grafiğe MATLAB yazılımında eğri yakıştırma (curve fitting) uygulanarak Eşit.8'de verilen basınç (P)-sığa (C) analitik bağıntısı ortaya çıkartılmıştır. İlgili grafik Şekil 8'de paylaşılmıştır.

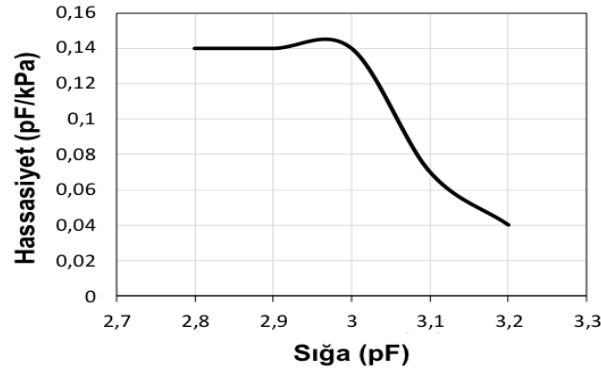
$$C = 0.2034 \times \ln(P) + 1,4454 \quad (8)$$

Söz konusu egride üst plakanın elastik yapısı ve aşağıya doğru deforme olması sebebiyle sığa artış değeri üstel olarak azalmakta ve plastik deformasyon sınırında yaklaşık olarak 3,5 pF değerine ulaşabilmektedir. Gerçekleştirilen sığal basınç algılayıcı için hassasiyet ölçümleri de ayrıca tamamlanmıştır. Elde edilen hassasiyet ölçümleri sonucu oluşturulan grafik Şekil 9'da gösterilmektedir. Sistemin en yüksek hassasiyeti 0,14 pF/kPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 8. Sıgal basınç algılayıcının ölçüm ve analitik modelinin karşılaştırılması

Yukarıda verilen hassasiyet ölçümlerine ek olarak algılayıcı cihazın diğer özellikleri ise Tablo 3’de listelenmiştir.



Şekil 9. Sıgal basınç algılayıcı hassasiyet-sığa grafiği.

Yapılan testlerde deney düzeneğinin üzerindeki parazitik direnç değerleri de ölçülmüştür. Ölçülen değerler ise Tablo 4’te listelenmiştir. Sonuçlar ölçüm düzeneğinin 2,12 Ω toplam parazitik dirence sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Gerçekleştirilen sıgal basınç algılayıcının ölçüm sonuçları

| Nominal Sığa (pF) | Azami Hassasiyet (pF/kPa) | Azami Sığa Değişimi (%) |
|----------------------|------------------------------|-------------------------|
| 2,7 | 0,14 | 59,25 |

Parazitik dirençler sıgal dönüştürücülerin salıngaç yapılarının performansını etkileyen en büyük etmenlerden biridir. Bu direnç değeri salıngaç frekansını önemli ölçüde değiştirebileceği için mümkün olduğunca düşük tutulması gerekmektedir.

Tablo 4. Deney düzeneğindeki parazitik direnç değerleri.

| Altın Kaplama (Ω) | Bakır Kablo (Ω) | Gümüş Epoksi (Ω) |
|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 2,1 | $1,79 \times 10^{-2}$ | $5,30 \times 10^{-5}$ |

V. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma ile üç boyutlu yazıcı ile üretilen yüzey alanı arttırılmış polimer bir sığal basınç algılayıcı yapısı, bu algılayıcının üretim aşaması ve tasarlanıp, üretilen bu algılayıcı ile yapılan deney ve ölçüm sonuçları sunulmuştur. Sunulan algılayıcının teorik olarak incelemesi yapılmış ve basınç – sığa değişimi eğrileri ve bu eğriye tekabül eden eşitlikler ortaya konmuştur. Çalışmadaki esas özgünlük, sığal algılayıcıyı oluşturan plakaların birbirlerine bakan kısımlarındaki yüzeylerin alanlarını arttırarak sistemin hassasiyetini yükseltmektedir. İç yüzey topolojisinde kullanılan sinüzoidal yüzey fonksiyonu hem yüzey alanında önemli miktarda artış sağladığından, hem de alan artışı sağlayan diğer yüzey geometrilerine kıyasla üretim aşamasında kolaylık getirdiğinden tercih edilmektedir. Yapılan ölçümlerle aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

(1) Standart paralel plaka sığaç yapısına kıyasla sinüzoidal yüzey kullanılarak elde edilen alan artışı %25 olarak hesaplanmıştır. Algılayıcı üç boyutlu bir yazıcı ile şeffaf polimer baskı malzemesi kullanılarak üretilmiş olup, yapısal olarak yalıtıcıdır. Bu yalıtıcılığın giderilmesi ve üretilen algılayıcının iletkenlik kazandırılması için cihazın alt ve üst plakalarının iç yüzeylerine toz tutma yöntemi ile ince film krom ve altın ile kaplanmıştır. (2) İletken hale getirilen polimer sığal algılayıcı ile yapılan deneyler esnasında algılayıcıya 0 Pa ile 8,88 kPa arasında çeşitli şiddetlerde basınç değerleri uygulanmıştır. Algılayıcıdan bu değerlere karşılık 2,7 pF ve 4,3 pF arasında sığa değerleri alınmıştır. (3) Algılayıcının en yüksek hassasiyet değeri 0,14 pF/kPa olarak ölçülmüştür. Bu deneyler ile önerilen cihazın basınç değerlerinin ölçülmesinde yüksek maliyetli yarı iletken sığal algılayıcılara alternatif olarak kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.

Sonraki çalışmalar ile önerilen plaka topolojileri değiştirilerek daha fazla yüzey artışının sağlanması, böylelikle daha yüksek değerlerde bir hassasiyet elde edilmesi planlanmaktadır. Buna ek olarak, bir sonraki çalışmada kullanılacak olan ana üretim malzemesinin daha düşük elastisite sabitine sahip olmasıyla üretilecek olan yapının çözünürlüğünün ve ölçebileceği minimum basınç değerinin iyileştirilmesi ön görülmektedir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma EEEAG 114E549 no'lu Tübitak Proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar ayrıca çalışmalar sırasındaki katkılarından dolayı Oğuz Kaan Erden, Ahmet Tuna ve Ahmet Turan Talas'a içten teşekkürlerini sunmaktadır.

V. KAYNAKLAR

- [1] J. M. Bustillo, R. T. Howe, and R. S. Muller, "Surface micromachining for microelectromechanical systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1552-1574, 1998.
- [2] K. E. Petersen, "Silicon as a mechanical material," *Proceedings of the IEEE*, vol. 70, no. 5, pp. 420-457, 1982.
- [3] H. Guckel, "High-aspect-ratio micromachining via deep X-ray lithography," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1586-1593, 1998.

- [4] A. Bertsch, H. Lorenz, and P. Renaud, "3D microfabrication by combining a microstereolithography and thick resist UV lithography," *Sensors and Actuators A-Phys.*, vol. 73, no. 1-2, pp. 14-23, 1999.
- [5] M. Han, W. Lee, K. Lee, and S.S. Lee, "3D microfabrication with inclined/rotated UV Lithography," *Sensors and Actuators A-Phys.*, vol. 111, no. 1, pp. 14-20, 2004.
- [6] C. Shemelya, "3D printed capacitive sensors," *IEEE Sensors*, Baltimore, US, 2013, pp. 1-4.
- [7] C. Zhao, C. Wang, R. Gorkin, S. Beirne, K. Shu, and G. G. Wallace, "Three dimensional (3D) printed electrodes for interdigitated supercapacitors," *Electrochemistry Communications*, vol. 41, pp. 20-23, 2014.
- [8] Y. Ishiguro and I. Poupyrev, "3D printed interactive speakers," *ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, Toronto, Kanada, 2014, pp. 1733-1742.
- [9] S. Thiele, K. Arzenbacher, T. Gissibl, S. Schmidt, H. Gross, H. Giessen, and A. M. Herkommer, "Design, simulation and 3D printing of complex micro-optics for imaging," *Conference of Optical MEMS and Nanophotonics*, Singapore, 2016, pp. 1-2.
- [10] R. Walczak, "Application of Inkjet 3D Printing in MEMS Technique," *2018 25th International Conference of Mixed Design of Integrated Circuits and System (MIXDES)*, Gdynia, 2018, pp. 121-124.
- [11] R. Dahle and R. Rasel, "3-D Printing as an Effective Educational Tool for MEMS Design and Fabrication," *IEEE Transactions on Education*, vol. 59, no. 3, pp. 210-215, 2016.
- [12] G. Aspar, B. Goubault, O. Lebaigue, J-C. Souriau, G. Simon, L. Di Cioccio, and Y. Bréchet., "3D Printing as a New Packaging Approach for MEMS and Electronic Devices," *2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, Orlando, FL, 2017, pp. 1071-1079.
- [13] J. Chen, J. Yang, and T. Zuo, "Micro Fabrication with Selective Laser Micro Sintering," *2006 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, Zhuhai, China, 2006, pp. 426-429.
- [14] S. Wu, C. Yang, W. Hsu, and L. Lin, "3D-printed microelectronics for integrated circuitry and passive wireless sensors," *Microsystems & Nanoengineering*, vol. 1, pp. 15013, 2015.
- [15] C. Zhu, "3D printed functional nanomaterials for electrochemical energy storage," *NanoToday*, vol. 15, pp. 107-120, 2017.
- [16] A. Tanwilaisiri, "Design and fabrication of modular supercapacitors using 3D printing," *Elsevier Journal of Energy Storage*, vol. 16, pp. 1-7, 2018.
- [17] Y. D. Gokdel, "Self-terminating electrochemical etching of stainless steel for the fabrication of micro-mirrors," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, pp. 095009, 2010.