



## MEMS Tabanlı Mikro Rezonatörün Tasarımı ve Analizi

İshak Ertuğrul<sup>1\*</sup>, Osman Ülker<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Muş Alparslan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Muş, Türkiye (ORCID: 0000-0001-8133-5889)

<sup>2</sup> Muş Alparslan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Muş, Türkiye (ORCID: 0000-0001-9586-0377)

(İlk Geliş Tarihi 17 Ocak 2020 ve Kabul Tarihi 22 Şubat 2020)

(DOI: 10.311590/ejosat.676368)

**ATIF/REFERENCE:** Ertuğrul, İ. & Ülker, O. (2020). MEMS Tabanlı Mikro Rezonatörün Tasarımı ve Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 25-29.

### Öz

Mikro-Elektro-Mekanik (MEMS) rezonatörler uzun zamandır sensör tasarımı için kullanılmaktadır ve artık günümüzde güç elektroniği alanında osilatörler olarak giderek önem kazanmaktadır. Farklı metalik malzemeler kullanılarak COMSOL programı ile deformasyon analizi bu çalışmada gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, bir mikro mekanik filtrenin parçası olarak tasarlanan bir yüzey mikro işlenmiş MEMS rezonatörü ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Geliştirilen model, uygulanan 100 V DC gerilim ile rezonatörün analizini gerçekleştirir. Mikro rezonatör içerisinden geçen akım, termal genişleme ile ısı enerjisini dağıtmaktadır. Bu genişleme, rezonatör içerisinden geçen akım ve yayılan sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. COMSOL yazılımı kullanılarak 400 µm uzunluğunda ve 50 µm kalınlığında dikdörtgen bir giriş olarak tasarlanan rezonatör için polikristalin silikon, demir, alüminyum, gümüş ve altın malzeme ataması yapılarak gerekli analizler yapılmıştır. Giriş potansiyeli rezonatörün hava boşluğu merkezinden uygulanarak y ekseninde meydana gelen deformasyonlar ölçülmüştür.

En yüksek deformasyon 0.062 µm ile alüminyum malzemede ortaya çıkarken; en düşük deformasyon 0.029 µm ile polikristalin silikon malzemede ölçülmüştür. Demir, gümüş ve altın malzemelerinde ise sırasıyla 0.030 µm, 0.052 µm ve 0.059 µm deformasyon verileri ölçülmüştür. Sonuç olarak, mikro rezonatör tasarımında kullanılan alüminyumun diğer metalik rezonatörler ile kıyaslandığı zaman önerilen geometri için önemli miktarda deformasyon verdiği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Mikro rezonatör, Elektrik potansiyeli, COMSOL.

## Design and Analysis of MEMS Based Micro Resonator

### Abstract

Micro-Electro-Mechanical (MEMS) resonators have long been used for sensor design and are now becoming increasingly important as oscillators in the field of power electronics. Deformation analysis with COMSOL program using different metallic materials was carried out in this study.

In this study, a surface micromachined MEMS resonator designed as part of a micromechanical filter is analyzed in detail. The developed model performs the analysis of the resonator with the applied 100 V DC voltage. The current passing through the microresonator dissipates heat energy by thermal expansion. This expansion depends on the current flowing through the resonator and the radiated temperature. Using the COMSOL software, the resonator was designed as a rectangular beam with a length of 400 µm and a thickness of 50 µm. By applying the input potential from the centre of the air gap of the resonator, the deformations in the y-axis were measured. The highest deformation occurred in aluminium material with 0.062 µm; the lowest deformation was measured in polycrystalline silicon material with 0.029 µm. The deformation data of iron, silver and gold materials were measured as 0.030 µm, 0.052 µm and 0.059 µm, respectively. As a result, it is observed that aluminium used in microresonator design gives a significant amount of deformation for the proposed geometry when compared with other metallic resonators.

**Keywords:** Micro resonator, Electrical potential, COMSOL.

\* Sorumlu Yazar: Muş Alparslan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Muş, Türkiye, ORCID: 0000-0001-8133-5889, [i.ertugrul@alparslan.edu.tr](mailto:i.ertugrul@alparslan.edu.tr)

## 1. Giriş

Mikro-Elektro-Mekanik-Sistemler (MEMS), sıcaklık, barometrik basınç, bağıl nem, ivme, titreşim gibi fiziksel dünyadan elektronik olmayan bilgileri toplayabilen minyatür, son derece hassas sensörler ve aktüatörler oluşturmak için kullanılır. Bu analog bilgi sayısallaştırılabilir ve sinyal işleme için bir mikro denetleyiciye iletilebilir. Zamansal modellerin çıkarılması gibi karmaşık sinyal analizi gerektiğinde, sinyal radyo frekansı yüksek kaliteli bir bilgisayara iletilebilir (Younis ve ark., 2003).

MEMS, bileşenlerin özellik boyutunun ve çalıştırılma aralığının mikro ölçekte olduğu bir elektromekanik entegre sistemidir. Geleneksel mekanik işlemin aksine, MEMS cihazının üretimi, entegre bir devre ile uyumlu olabilen, yüzey mikro işleme ve toplu mikro işleme içeren yarı iletken üretim işlemini kullanır. Bu cihazlar veya sistemler mikro ölçekte algılama, kontrol etme, harekete geçirme ve makro ölçekte etkiler oluşturma yeteneğine sahiptir (Ertugrul ve Ark, 2019).

Giderek artan proses teknolojisi sayesinde, günümüzde çok sayıda karmaşık mikro yapısal ve fonksiyonel modül mevcuttur. Bu nedenle, cihazların daha iyi optimize edilmiş performansı geliştirilmiştir. Elektrostatik tahrikli MEMS cihazları hızlı tepki, daha düşük güç tüketimi ve entegre devre standart proses uyumluluğu avantajlarına sahiptir.

Sadece elektrik sinyalleri ile ilgilenen LSI cihazlarıyla karşılaştırıldığında, MEMS cihazları fiziksel (elektrik, mekanik, termal, optik vb.) , kimyasal ve biyolojik sinyaller gibi çok çeşitli sinyal tiplerinin dönüştürülmesi ve entegrasyonu ile ilgilidir (Lee ve ark., 2010). Genel olarak, silikon MEMS teknolojisi, otomotiv, biyomedikal ve telekomünikasyon endüstrileri, savunma ve benzeri gibi çok çeşitli tüketici ve endüstriyel uygulamalarda kullanım için düşük maliyetli, yüksek performanslı ve minyatür çok işlevli entegre cihazların imkanı sunar (Nisar ve ark., 2008; Ashraf ve ark., 2011).

MEMS rezonatörleri, yüksek stabilite, düşük güç tüketimi ve entegre devrelerle uyumluluk gibi çok faydalı özellikleri nedeniyle hem fizik hem de mühendislik topluluklarında yoğun bir şekilde incelenmiş ve dikkat çekmiştir. Quartz osilatörleri gibi geleneksel osilatörlere alternatif olarak tasarlanan MEMS rezonatörleri, zaman tutma ve senkronizasyon amaçlarının yanı sıra kuvvet, kütle, elektronik ve nükleer dönüşlerin algılanması için de uygulanır (Zhao ve ark., 2016). Bu uygulamalarda yüksek hassasiyet gerekliliği, yüksek kalite faktörü, düşük faz gürültüsü ve büyük sinyal/gürültü oranı dahil olmak üzere çeşitli performans gereksinimleri getirmektedir. Bu gereksinimleri karşılamak için, MEMS osilatörleri genellikle tipik olarak doğrusal olmamakla birlikte sınırlı olan büyük titreşim genliklerinde çalıştırılır (Hajjaj ve ark., 2017).

Son zamanlarda, tipik olarak bant geçiren filtrelerde ve dupleksleyicilerde kullanılmak üzere GHz aralığı MEMS rezonatörlerinde çok ilerleme kaydedilmiştir. Bu rezonatörler 1000'den fazla kalite faktörü gösterdiğinden, bu cihazlar düşük güçlü RF alıcı-vericilerin tasarımını kolaylaştırma potansiyeline sahiptir (Yang ve ark., 2017). Bir RF frekans referansının varlığı, sistemdeki kuvars kristallerine olan ihtiyacı ortadan kaldırabilir, bu da entegrasyon seviyesini büyük ölçüde artırır ve maliyeti azaltır.

İot (nesnelerin interneti) ve giyilebilir cihazlarının boyut ve güç tüketimini azaltmak için 32.768 kHz MEMS rezonatör geliştirilmiştir. Günümüzde birçok modern cihaz doğru zamanlamaya dayandığından, zamanlama sinyalleri sağlamak için sürekli çalışması gereken düşük güç tüketimi rezonatörlerine artan bir ihtiyaç söz konusudur. MEMS teknolojisine dayanan yeni rezonatörler, -30 ile 85 °C çalışma aralığında düşük sıcaklık kayması ile kararlı frekans özellikleri sergilemektedir. Silikon temelli ambalajlarda olan rezonatör, homojen yarı iletken malzemeden yapılmış bir IC'ye entegre edilebilmektedir (Kourani ve ark., 2017).

Termal genleşme, içinden geçen akım miktarına ve yayılan sıcaklığa bağlıdır. Mikro rezonatör uygulaması, iletken katmanlardan uygun büyüklükte akım ileterek tüm rezonatörü istenen mesafeye taşımak ve termal genleşme yoluyla yer değiştirmeye yol açan bir sıcaklık artışı oluşturmaktır. Bu çalışmada amaç, COMSOL yazılımı kullanılarak geliştirilen modelde farklı malzeme çeşitlerinin sabit gerilimde deformasyon üzerindeki etkisini araştırmaktır. COMSOL MultiFizik yazılımı sabit potansiyelde farklı malzemelerden yapılmış mikro rezonatörü modellemek ve simüle etmek için seçilmiştir. Bu yazılım mevcut tasarım için son derece gerekli olan termal, elektriksel ve yapısal analizlerin birleştirilmesini kolaylaştırmaktadır.

Mikromekanik rezonatörler, sensör sistemlerinin tasarımında uzun zamandır kullanılmaktadırlar (Zhao ve ark., 2017). Günümüzde elektronik cihazlarda osilatör olarak görev yapmaktadır. Bu çalışmada yüzey mikro işleme tekniğiyle üretilen Mems tabanlı mikro rezonatörün analizi ayrıntılı olarak yapılmıştır. Gerçekleştirilen analizler ile uygulanan elektriksel potansiyel karşı rezonatörün deformasyon performansı incelenmiştir.

Bu makalenin diğer çalışmalardan farkı; farklı malzemeler kullanılarak COMSOL ile deformasyon analizinin gerçekleştirilmesidir. Bu analizi ile malzeme çeşitliliğinin mikro rezonatördeki deformasyon üzerindeki etkisi ilk defa bu çalışma ile gerçekleştirilmiştir. Önceki çalışmalar genellikle alüminyum ve bakır malzemelerin deformasyon karakteristiğini araştırmıştır.

Bu makalede; COMSOL yazılımı kullanılarak MEMS tabanlı mikro rezonatörün tasarımı ve analizi gerçekleştirilmiştir. Önerilen modelde, uygulanan elektrik potansiyeli sonucunda deformasyon verileri analiz edilmiştir. Sabit gerilim altında polikristalin, demir, gümüş, alüminyum ve altın malzeme için mikro rezonatörde oluşan deformasyon değerleri incelenmiştir.

Bu makale şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde, mikro rezonatörün metalik malzemelerden tasarımı ve modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Üçüncü bölümde, oluşturulan model üzerine sabit 100V gerilimde elektrik potansiyeli uygulanarak simülasyon çalışması yapılmıştır. Diğer bölümlerde ise yapılan analizler sonucu malzemelerde meydana gelen deformasyon verileri ve iletilebilecek çalışmalar sunulmuştur.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Tasarım Koşulları

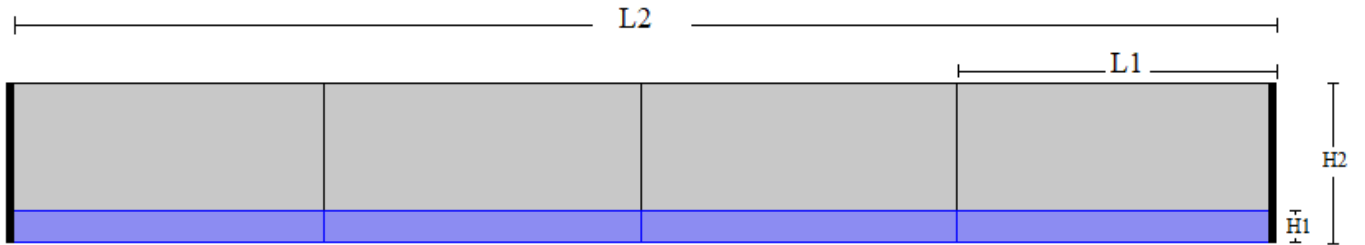
Yüze mikro işleme yöntemiyle üretilen rezonatörün model geometrisi Şekil 1'de gösterilmiştir. Önerilen geometrik yapıya malzeme ilavesi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma için malzeme tarayıcısından polikristalin silikon, demir, alüminyum, gümüş ve altın seçilmiştir. Bu malzemeler, önemli fiziksel ve elektriksel özellikleri nedeniyle MEMS alanında fonksiyonel malzeme olarak kullanılmaktadır. Malzemelerin analiz aşamasında kullanılan fiziksel özellikleri sırasıyla Tablo 1'de verilmiştir. COMSOL kullanılarak 2D (2 boyut düzlem) olarak tasarlanan çalışma için, 3D geometrisinin basitleştirilmiş bir versiyonu dikkate alınmıştır. Basitleştirilmiş tasarım için, rezonatör 400 µm uzunluğunda ve 50 µm kalınlığında dikdörtgen bir giriş olarak modellenmiştir.

Rezonatörün alt tabaka wafer'a sabitlendiği noktaların hareket edebilmesi için rezonatörün her bir ucuna kısıtlama sınırı uygulanır. Wafer substratı net bir biçimde modellenmemiştir. Bunun yerine rezonatör ve substrat arasında sadece 10 µm kalınlığında bir hava boşluğu bulunmaktadır. Geliştirilen modele farklı malzemeler tanımlanarak mikro rezonatörün deformasyon performansı gözlemlenmiştir. Malzeme olarak polikristalin silikon, demir, alüminyum, gümüş ve altın kullanılmıştır. Bu deformasyonun ortaya çıkması için rezonatörün hava boşluğu merkezinden 100V gerilim değerinde elektriksel potansiyel uygulanmıştır.

Tablo 1. Kullanılan Malzemelerin Fiziksel Özellikleri

Özellik	Polikristalin Silikon	Demir	Alüminyum	Gümüş	Altın	Birim
Termal genleşme katsayısı	$2.6 \times 10^{-6}$	$11.8 \times 10^{-6}$	$23.1 \times 10^{-6}$	$18.9 \times 10^{-6}$	$14.2 \times 10^{-6}$	1/K
Yoğunluk	2320	7860	2700	10500	19300	Kg/m <sup>3</sup>
Termal İletkenlik	34	80.2	237	429	317	W/(m*K)
Young modülü	$160 \times 10^9$	$152 \times 10^9$	$70 \times 10^9$	$83 \times 10^9$	$70 \times 10^9$	Pa
Poisson oranı	0.22	0.27	0.35	0.37	0.44	-

Model geometrisi Şekil 1'de gösterilen dikdörtgen mikro rezonatör ve hava boşluğu sırasıyla gri ve mavi çerçeve ile vurgulanmıştır. Model sağ ve sol köşelerden sabitlenmiştir. Şekil üzerindeki L1 = 100 µm, L2 = 400 µm, H1 = 10, H2 = 50 olarak ölçeklendirilmiştir. Elektriksel potansiyel hava boşluğunun merkezi kısmından uygulanmıştır. Dikey bölme çizgileri rezonatörün fiziksel geometrisinin bir parçası değildir. Ancak uygun bir mesh kolayca oluşturulmasını sağlamak için dahil edilmiştir. Çalışma sırasında rezonatör topraklanır (etki alanı terminali özelliğini kullanarak) ve bir sürücü elektrotu, hava boşluğunun merkezi kısmına elektrik potansiyeli uygular.



Şekil 1. Tasarlanan mikro rezonatörün model geometrisi

### 2.2. Elektromekanik Kuvvetler

Vakumlu veya başka bir ortamda, yüklü cisimler arasındaki kuvvetler, alan içinde hayali bir gerilme durumunun var olduğu varsayımıyla hesaplanabilir. Elektromanyetik veya Maxwell gerilme tensörü, bir elektrik alanının sonucu olarak bir malzemede indüklenen gerilmelerin yanı sıra hava veya vakumdaki cisimlere etki eden yüzey kuvvetlerini hesaplamak için kullanılabilir. Bir materyalin içinde, COMSOL Multifizik, izotropik materyaller için uygun olan aşağıdaki stres tensörü  $T_{EM,S}$  kullanır.

$$T_{EM,S} = -\frac{1}{2}(E \cdot D + a_2 E \cdot E)I + ED^T + \frac{1}{2}(a_2)EE^T$$

Burada  $E$  elektrik alanı,  $D$  elektrik yer değiştirme alanı ve  $I$  kimlik tensörüdür.  $a_1$  ve  $a_2$ , malzemenin elektrostriktif özelliklerini belirten malzeme parametreleridir (bu cihaz için  $a_2 = a_2 = 0$  varsayalım çünkü alan malzeme içinde çok düşüktür). Bu ek gerilim, elektromekanik katı düğüm tarafından malzemeye uygulanır. Elektriksel alanın neden olduğu gerilime ek olarak, yüzeyde etkiyen net kuvvetlerin bir sonucu olarak genellikle malzemede mekanik gerilmelerin indüklendiğine dikkat edilmesi gerekmektedir. Katı bir cismin yüzeyleri üzerindeki kuvvetler, formun boşluğuna benzer bir gerilim terimi uygulanarak hesaplanabilir.

$$T_{EM,V} = -\frac{1}{2}(E \cdot D)I + ED^T$$

Yüzey üzerindeki net kuvvet genel olarak arayüzdeki gerilim tensörünün süreksizliğinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, vakum boyunca bir gerilmenin uygulanması istenmediğinden, kuvvet sadece katı gövdelerin yüzeyinde, elektromekanik arayüz düğümü ile sağlanabilmektedir. Yüzey kuvveti aşağıdaki hesaplanmaktadır:

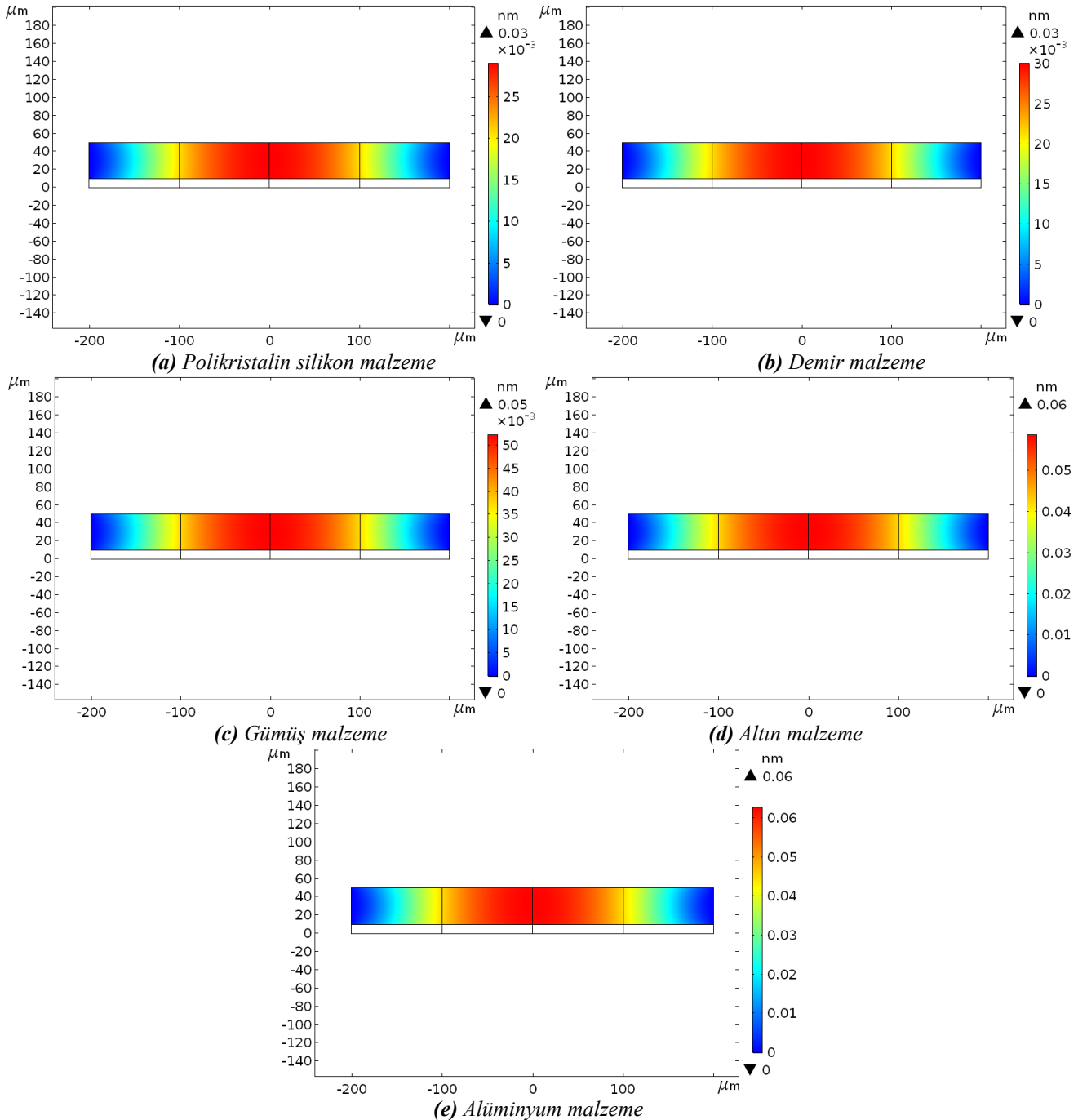
$$n_1 T_{EM,V} = -\frac{1}{2}(E \cdot D)n_1 + (n_1 \cdot E)D$$

Burada  $n_1$  mekanik gövdeden dışarı bakacak biçimde tanımlanan normal yüzeydir.

### 3. Simülasyon

Mikro rezonatöre uygulanan sabit 100V elektriksel potansiyel ile y ekseninde oluşan deformasyonlar hesaplanmıştır. Rezonatör iki destek noktası bir substrata sabitlendi ve hava boşluğunun merkezine gerilim uygulandı. Uygulanan elektrik potansiyeli, mikro rezonatör de bir elektrik akımı indükler; yapıdan geçen akım, enerjinin ısı şeklinde yayıldığı elektronların akışında bir miktar yavaşlamaya neden olur. Bu üretilen ısı, rezonatör üzerindeki termal gerilimi indükler ve deformasyona neden olur.

Simülasyon işlemi Şekil 2 (a-e)'de de görüleceği üzere beş aşamada gerçekleştirildi. Başlangıçta 400  $\mu\text{m}$  uzunluğunda ve 50  $\mu\text{m}$  kalınlığında dikdörtgen bir kiriş olarak tasarlanan rezonatöre polikristalin silikon malzeme ataması yapılarak elektriksel potansiyel uygulandı. Benzer biçimde diğer aşamalarda ise rezonatöre sırasıyla demir, gümüş, altın ve alüminyum malzeme atamaları yapılarak 100V değerinde gerilim uygulanarak y ekseninde meydana gelen deformasyonlar ölçülmüştür. Şekil 2 (a-e)'de simülasyon sonucu ölçülen deformasyon miktarları gösterilmiştir. Beklendiği gibi, maksimum yer değiştirme geometrinin merkezinde oluşmuştur.



Şekil 2. Mikro rezonatörün farklı malzemeler kullanılarak elde edilen deformasyon verileri

Modellemesi gerçekleştirilen mikro rezonatörün polikristalin silikon, demir, gümüş, altın ve alüminyum malzemeleri uygulanarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz işlemleri her bir malzemeye uygulanan 100V sabit elektrik potansiyeli ile gerçekleştirilmiştir. Mikro rezonatöre uygulanan gerilim neticesinde ortaya çıkan deformasyon verileri gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2’de gösterilmiştir. Polikristalin silikon malzemesi düşük genleşme katsayısı değeri nedeniyle diğer malzemelere kıyasla düşük deformasyon göstermiştir. Alüminyum malzemesi ise yüksek genleşme katsayısı nedeniyle önerilen geometri için önemli miktarda deformasyon verdiği tespit edilmiştir. Önerilen geometri, kırıktan geçen akımla ilişkili basit termal genleşme olgusu vasıtasıyla tüm mikro ölçekli kiriş yapılarının istenen yer değiştirmelerini üretmek için MEMS cihazlarının üretiminde faydalı olacaktır.

Tablo 2. Kullanılan Malzemelere Göre Elde Edilen Veriler

Malzeme	Deformasyon [ $\mu\text{m}$ ]
Polikristalin Silikon	0.029
Demir	0.030
Gümüş	0.052
Altın	0.059
Alüminyum	0.062

#### 4. Sonuç

MEMS tabanlı mikro rezonatör, COMSOL MultiFizik yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Kiriş içerisinden geçen akım termal genleşme yoluyla deformasyona neden olmuştur. Termal, elektriksel ve yapısal analizlerin birleştirilmesi, mikro rezonatörün deformasyona uğraması için gereken akım ve sıcaklık artışını tahmin etmeyi mümkün kılmaktadır. Tasarlanan model için polikristalin silikon, demir, gümüş, altın ve alüminyum malzeme ataması gerçekleştirilerek gerekli analizler yapılmıştır. Bu malzemeler, önemli fiziksel ve elektriksel özellikleri nedeniyle MEMS alanında çok sık kullanılan malzeme türleridir.

Bu çalışmada farklı malzemeler kullanılarak COMSOL programı ile deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Farklı malzemeler kullanılarak bu malzemelerin kiriş üzerindeki etkisinin incelenmesi ve analizlerinin yapılması bu çalışmanın yeniliklerindedir.

Farklı malzemeler için mikro rezonatör için üretilen deformasyon değerleri, 100V gerilimde gerçekleştirilmiştir. En yüksek deformasyon 0.062  $\mu\text{m}$  ile alüminyum malzemede ortaya çıkarken; en düşük deformasyon 0.029  $\mu\text{m}$  ile polikristalin silikon malzemede ölçülmüştür. Demir, gümüş ve altın malzemelerinde ise sırasıyla 0.030  $\mu\text{m}$ , 0.052  $\mu\text{m}$  ve 0.059  $\mu\text{m}$  deformasyon verileri ölçülmüştür. Sonuç olarak, mikro rezonatör tasarımında kullanılan alüminyumun diğer metalik rezonatörler ile kıyaslandığı zaman önerilen geometri için önemli miktarda deformasyon verdiği gözlemlenmiştir.

#### Kaynakça

- Ashraf, M. W., Tayyaba, S., & Afzulpurkar, N. (2011). Micro electromechanical systems (MEMS) based microfluidic devices for biomedical applications. *International journal of molecular sciences*, 12(6), 3648-3704.
- Ertugrul I., Akkus N. ve Yüce H., Fabrication of MEMS based electrothermal microactuators with additive manufacturing Technologies, *Materiali in tehnologije*, 53 (5), 665-670, 2019.
- Hajjaj, A. Z., Hafiz, M. A., & Younis, M. I. (2017). Mode coupling and nonlinear resonances of MEMS arch resonators for bandpass filters. *Scientific reports*, 7, 41820.
- Kourani, A., Song, Y. H., Arakawa, B., Lu, R., Guan, J., Gao, A., & Gong, S. (2017, June). A 150 MHz voltage controlled oscillator using lithium niobate RF-MEMS resonator. In 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS) (pp. 1307-1310).
- Lee, K. W., Kanno, S., Kiyoyama, K., Fukushima, T., Tanaka, T., & Koyanagi, M. (2010). A cavity chip interconnection technology for thick MEMS chip integration in MEMS-LSI multichip module. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 19(6), 1284-1291.
- Nisar, A., Afzulpurkar, N., Mahaisavariya, B., & Tuantranont, A. (2008). MEMS-based micropumps in drug delivery and biomedical applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 130(2), 917-942.
- Yang, Y., Gao, A., Lu, R., & Gong, S. (2017, January). 5 GHz lithium niobate MEMS resonators with high FoM of 153. In 2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) (pp. 942-945).
- Younis, M. I., Abdel-Rahman, E. M., & Nayfeh, A. (2003). A reduced-order model for electrically actuated microbeam-based MEMS. *Journal of Microelectromechanical systems*, 12(5), 672-680.
- Zhao, C., Montaseri, M. H., Wood, G. S., Pu, S. H., Seshia, A. A., & Kraft, M. (2016). A review on coupled MEMS resonators for sensing applications utilizing mode localization. *Sensors and Actuators A: Physical*, 249, 93-111.
- Zhao, C., Pandit, M., Sun, B., Sobreviela, G., Zou, X., & Seshia, A. (2017). A closed-loop readout configuration for mode-localized resonant MEMS sensors. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 26(3), 501-503.