



# Mikro Kiriş Uzunluğu Değişiminin Deformasyona Etkisinin Araştırılması

Osman Ülkir<sup>1\*</sup>, İshak Ertuğrul<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 9 Ocak 2020 ve Kabul Tarihi 13 Şubat 2020)

(DOI: 10.311590/ejosat.672464)

**ATIF/REFERENCE:** Ülkir, O. & Ertugrul, İ. (2020). Mikro Kiriş Uzunluğunun Değişmesinin Deformasyona Etkisinin Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 136-141.

## Öz

Bu çalışmada birçok mikro-elektro-mekanik- sistemin (MEMS) temelini oluşturan mikro kirişin tasarımı ve deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Mikro kiriş içerisinde geçen akım, termal genişleme ile ısı enerjisini dağıtmaktadır. Bu genişleme, kiriş içerisinde geçen akım ve yayılan sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. COMSOL yazılımı kullanılarak tasarlanan model için polikristalin silikon malzeme ataması gerçekleştirilerek gerekli analizler yapılmıştır. Bu malzeme, önemli fiziksel ve elektriksel özellikleri nedeniyle MEMS alanında çok sık kullanılan bir malzeme türüdür. Modellenen mikro kirişin iki ucundaki destek noktaları bir substrata sıkıca bağlanır. Bu destek noktalarından modele 10V giriş potansiyeli uygulanarak mikro kirişte ortaya çıkan deformasyon ve sıcaklık verileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda polikristalin malzeme atanmış mikro kirişin uzunluğu değiştirilerek ortaya çıkan deformasyon rapor edilmiştir. Dört farklı kiriş uzunluğu (50 µm, 100 µm, 150 µm ve 200 µm) girilerek oluşturulan modellerde ortaya çıkan deformasyon verileri arasında ciddi bir artış gözlemlenirken; sıcaklık değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Polikristalin silikon malzeme için en yüksek deformasyon 200 µm uzunluğundaki mikro kirişte 2.01 µm iken; en düşük deformasyon 50 µm uzunluğunda 0.6 µm olarak ölçülmüştür. 100 µm ve 150 µm mikro kiriş uzunlukları için deformasyon değerleri ise sırasıyla 0.93 µm ve 1.41 µm olarak ölçülmüştür. Sıcaklık verileri ise en düşük 4890 K iken; en yüksek 4940 K olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, mikro kiriş tasarımında kiriş uzunluğu değişiminin deformasyon özelliklerini ciddi bir biçimde etkilediği gözlemlenmiştir.

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

## Investigation of the Effect of Micro Beam Length Variation on Deformation

### Abstract

In this study, the design and deformation analysis of the micro beam, which forms the basis of many micro-electro-mechanical-systems (MEMS), was carried out. The current passing through the micro beam distributes the heat energy by thermal expansion. This expansion varies depending on the current passing through the beam and the radiating temperature. For the model designed using COMSOL software, polycrystalline silicon material was assigned and necessary analyzes were performed. This material is a type of material that is frequently used in the field of MEMS due to its important physical and electrical properties. The support points on both ends of the modeled microbeam are firmly connected to a substrate. By applying 10V input potential to the model from these support points, deformation and temperature data emerging in the micro beam were examined. In experimental studies, deformations that occur by changing the length of the micro-beam assigned polycrystalline material have been reported. While a significant increase is observed between the deformation data that occurs in the models created by entering four different beam lengths (50 µm, 100 µm, 150 µm and 200 µm); temperature values are close to each other. The highest deformation for the polycrystalline silicon material was 2.01 µm in the 200 µm long micro beam; the lowest deformation was measured as 50 µm and 0.6 µm in length. Deformation values for micro beam lengths of 100 µm and 150 µm were measured as 0.93 µm and 1.41 µm, respectively. Temperature data was the lowest at 4890 K; measured as the highest 4940K. As a result, it has been observed that the change of beam length seriously affects the deformation properties of the micro beam design.

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

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

## 1. Giriş

Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler (MEMS), bileşenlerin özellik boyutunun ve çalıştırılma aralığının mikro ölçekte olduğu bir elektromekanik entegre sistemidir. Geleneksel mekanik işlemenin aksine, MEMS cihazının üretimi, entegre bir devre ile uyumlu olabilen, yüzey mikro işleme ve toplu mikro işleme içeren yarı iletken üretim işlemini kullanmaktadır. Bu cihazlar veya sistemler mikro ölçekte algılama, kontrol etme, harekete geçirme ve makro ölçekte etkiler oluşturma yeteneğine sahiptir (Sim ve ark., 2017).

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.

Mevcut MEMS cihazları arasında çoğu, kapasitif basınç sensörleri, sürücüler, mikro pompalar, mürekkep püskürtmeli yazıcı kafası, RF anahtarları ve vakum rezonatörleri gibi elektrostatik tahrikli cihazlardır (Mehrpooya ve Cheraghi k., 2016; Saravanan ve ark., 2018). Mikro elektronik cihazlar katı ve mekanik olarak taşınmaz olsa da, MEMS cihazları hareketli 3D mikro yapılara sahiptir; mikro konsollar, mikro kırışlar, membranlar vb. (Lau ve Shrestha., 2017). Bununla birlikte MEMS/NEMS teknolojisinin önemi sadece mekanik harekette değil, aynı zamanda minyatürleştirme, çok fonksiyonlu entegrasyon ve seri üretimdedir (Krylov ve ark., 2008).

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; Zhou ve ark., 2019). Genel olarak, silikon MEMS teknolojisi, otomotiv, biyomedikal ve telekomünikasyon endüstrileri, savunma vb. çok çeşitli tüketici ve endüstriyel uygulamalarda kullanım için düşük maliyetli ve yüksek performanslı çok işlevli entegre cihazlar sunmaktadır (Faria ve ark., 2018; Geitmann, 2017).

MEMS/NEMS teknolojisiyle ilgili ilk fikirler 1959 yılında ortaya atılmıştır. Bununla birlikte, gaz kromatografisi, basınç sensörleri, kuvvet sensörleri, rezonatörler, mürekkep püskürtmeli nozular gibi mikro-cihazlar ve yapılar başarılı bir şekilde geliştirilmiştir (Choudhary ve Kaur., 2016; Zang ve ark., 2015). 1980'lerin sonlarına doğru ortaya çıkan mikro işleme teknolojisi, mevcut büyük aktüatörlerin yerini mikro ölçekli eşdeğer cihazlarla daha verimli bir biçimde değiştirdi. Elektromekanik kuplaj, mikro mekanik yapıları hareket geçirmek, kontrol etmek, mikron ve mikron altı partiküllerden nano yapılandırılmış malzemeler üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Lyshevski, 2018; Bittner ve ark., 2019).

İnce filmlerde ve çok katmanlı tabakalardaki gerilmelerin üç temel kaynağı vardır: yapısal, termal ve mekanik. Yapısal ve termal gerilmelere genellikle geriye kalan gerilmeler denilmektedir. Film ve kaplama malzemesi (veya çok katmanlı bir katmandaki katmanlar) farklı termal genleşme katsayılarına (CTE) sahip olduğu zaman sıcaklık değişiklikleri nedeniyle gerilmeler ortaya çıkar. Bazı sistemler için, bu gerilme değerleri çok büyük olabilir ve genellikle mekanik arıza için harekete geçirici güç sağlarlar. Ortaya çıkan sıcaklık, biriktirme sıcaklığından farklı olduğunda, geriye kalan gerilmeler hem yapısal hem de termal katkıları içerir (Bernstein ve ark., 2013).

Mikro kırışlar genellikle elektronik pakete dahil olan entegre devre çiplerinde üretilen gerilim gibi geriye kalan gerilimin doğru ölçümü için kullanılır (Dai ve Wang., 2017). Bununla birlikte, mikro kırışlar termal olarak çalıştırılan sensörleri, jiroskopları, mikro motorları ve rezonatörleri kontrol amacıyla ve çok çeşitli endüstriyel uygulamaları mikro kaynaqlamak için aktüatörler olarak kullanılır (Wang ve ark., 2011). Mikro kırışe gerilim uygulanması sonucunda, kırış üzerinden bir akım geçmektedir. Akım malzemeden tamamen geçtiğinde, malzemenin elektriksel direnç özelliği nedeniyle ısı enerjisi ortaya çıkmaktadır. Bu ısı enerjisi malzemeyi ısıtır ve termal gerilmeyi indükler. Sonuç olarak, malzeme üzerinde deformasyon meydana gelmektedir.

Termal genleşme, kırış üzerinden geçen akım miktarına ve yayılan sıcaklığa bağlıdır. Mikro kırış uygulaması, iletken katmanlardan uygun büyüklükte akım ileterek tüm kırışi istenen mesafeye taşımaktadır. Bunun sonucunda termal genleşme yoluyla deformasyona yol açan bir sıcaklık artışı ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada amaç, COMSOL yazılımı kullanılarak geliştirilen mikro kırış modelinde kırış uzunluğunun deformasyon üzerindeki etkisini araştırmak ve sıcaklık artışlarını gözlemlemektir. Bu yazılım sabit elektriksel potansiyelde polikristalin silikon malzemeden yapılmış mikro kırışi modellemek ve simüle etmek için seçilmiştir. Bu yazılım mevcut tasarım için son derece gerekli olan termal, elektriksel ve yapısal analizlerin birleştirilmesini kolaylaştırmaktadır.

Polikristalin silikon (ya da çok kristalli Silisyum, multi-Si, yarı kristal Silisyum, Poli-Si veya polisilikon) küçük kristaller olarak da bilinen, kristalitten oluşan bir silikon malzemedir. Bu malzeme, önemli fiziksel ve elektriksel özellikleri nedeniyle MEMS alanında çok sık kullanılan bir malzeme türüdür.

Bu makalenin diğer çalışmalardan (Arora ve ark., 2012; Reddy ve Kumar, 2013; Krysko ve ark., 2017) farkı; polikristalin silikon malzemenin mikro kırış uygulamasında COMSOL ile deformasyon analizi ilk defa bu çalışmayla gerçekleştirilmiştir. Bu analiz ile birlikte kırış uzunluğunun deformasyon ve sıcaklık değerleri üzerindeki etkisi ilk defa bu çalışma ile araştırılmıştır. Önceki çalışmalarda genellikle alüminyum, bakır ve gümüş gibi malzemelerin farklı potansiyellerde deformasyon karakteristiği üzerine araştırmalar yapılmıştır.

Bu makalede; COMSOL yazılımı kullanılarak polikristalin silikon malzemeden tasarlanan mikro kırışın deformasyon ve sıcaklık analizi gerçekleştirilmiştir. Sabit gerilim altında mikro kırış uzunlukları değiştirilerek ortaya çıkan deformasyon ve sıcaklık verileri rapor edilmiştir. Sonuç olarak, sabit gerilim uygulandığında kırış uzunluğu değişiminin deformasyonu etkilediği gözlemlenmiştir.

Bu makale şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde, mikro kırışın polikristalin silikon malzemeden tasarımı ve modellemesi gerçekleştirilmiştir. Üçüncü bölümde, oluşturulan model üzerine 10V gerilimde elektrik potansiyeli uygulanarak; farklı kırış uzunluklarında simülasyon çalışması yapılmıştır. Diğer bölümlerde ise yapılan analizler sonucu polikristalin silikon malzemede meydana gelen deformasyon, sıcaklık verileri ve iletilebilecek çalışmalar sunulmuştur.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.2. Tasarım Koşulları

Polikristalin silikon malzemeden yapılmış mikro kirişi modellemek ve simüle etmek için COMSOL MultiFizik yazılım paketi kullanılmıştır. Bu yazılım, çeşitli cihazların modellenmesi için güçlü bir fiziksel ara yüze sahiptir. Aynı zamanda mevcut tasarım için son derece gerekli olan termal, elektriksel ve yapısal analizlerin birleştirilmesini kolaylaştırabilmektedir. COMSOL yazılımı kullanılarak tasarlanacak bir sistem için, (1) geometri tanımlama (2) fiziksel arayüz ekleme (3) katı yapıya malzeme ekleme (4) meshing, gibi dört temel adımı takip etmek gerekir.

Polikristalin silikon mikro kirişin tasarımı için başlangıçta, önerilen model için geometri tanımlandı, tüm yapı oluşturulduktan sonra, önerilen yapıya mevcut malzeme kütüphanesinde uygun malzeme eklendi. Daha sonra yapılacak analize bağlı olarak gerekli fiziksel parametreler seçilmiştir. Son olarak ise model simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

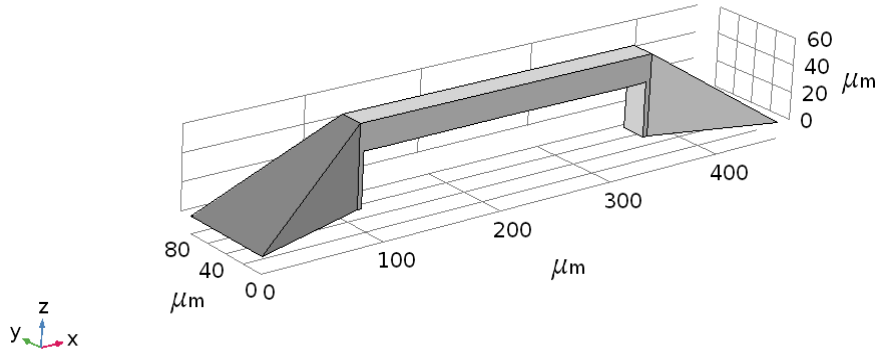
Mikro kirişin uzunluğu 50  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  ve 200  $\mu\text{m}$  olacak biçimde dört farklı uzunlukta tasarlanmıştır. Kirişin yüksekliği ve genişliği ise 20  $\mu\text{m}$  dir. Bu tasarım ile malzemenin farklı uzunluktaki sıcaklık ve deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Mikro kirişin iki ucundaki destek noktaları bir substrata sıkıca bağlanır. Bu destek noktalarından kirişe 10 V sabit gerilimde elektrik potansiyeli uygulanır. Malzemenin öz direnci nedeniyle, ortaya çıkan akım modeli ısıtmaktadır. Termal olarak indüklenen gerilim malzemeyi yükler, kirişi deforme eder ve deformasyon meydana gelir.

COMSOL kullanılarak 3D (3 boyutu düzlem) olarak 260  $\mu\text{m}$  uzunluğunda, 20  $\mu\text{m}$  yükseklik ve genişliğinde tasarlanan mikro kirişin geometrik yapısı Şekil 1’de gösterilmiştir. Önerilen geometrik yapıya malzeme ataması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma için malzeme tarayıcısından polikristalin silikon seçilmiştir. Polikristalin silikon, önemli fiziksel ve elektriksel özellikleri nedeniyle MEMS alanında fonksiyonel malzeme olarak kullanılmaktadır. Polikristalin silikon malzemenin analiz aşamasında kullanılan fiziksel özellikleri sırasıyla Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Polikristalin Silikonun Fiziksel Özellikleri

| Özellik                   | Değeri            | Birimi     |
|---------------------------|-------------------|------------|
| Referans öz direnci       | 34                | $\Omega.m$ |
| Termal genleşme katsayısı | 0.000026          | $1/K$      |
| Referans sıcaklık         | 293               | $K$        |
| Yoğunluk                  | 2320              | $Kg/m^3$   |
| Young modülü              | $160 \times 10^9$ | $Pa$       |
| Poisson oranı             | 0.22              | -          |

Bu çalışma termal, elektriksel ve yapısal analizleri tek bir modelde birleştirme özelliğini göstermektedir. Uygulama ile bir mikro kiriş içerisinden akım geçirilerek hareket sağlanır; akım ile ısı üretilir ve sıcaklık artışı termal genleşme yoluyla deformasyona yol açar. Model, kirişin yerini değiştirmesi için ne kadar akım ve sıcaklık artışı gerektiğini tahmin etmektedir.

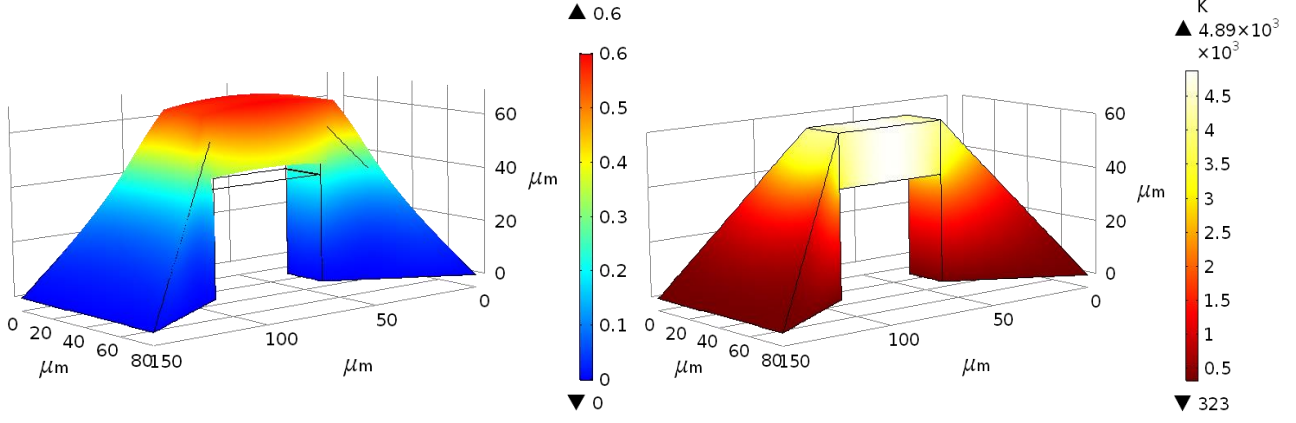


Şekil 1. Tasarlanan mikro kiriş modeli

## 3. Simülasyon

Mikro kiriş modeline gerilim uygulamak için iki destek noktası bir substrata sabitlendi. Bu destek noktalarından 10V gerilim uygulandı. Uygulanan elektrik potansiyeli, mikro kiriş de bir elektrik akımı indükler; yapıdan geçen akım, enerjinin ısı şeklinde yayıldığı elektronların akışında bir miktar yavaşlamaya neden olur. Bu üretilen ısı, kiriş üzerindeki termal gerilimi indükler ve mikro kirişin deformasyona maruz kalmasına neden olur.

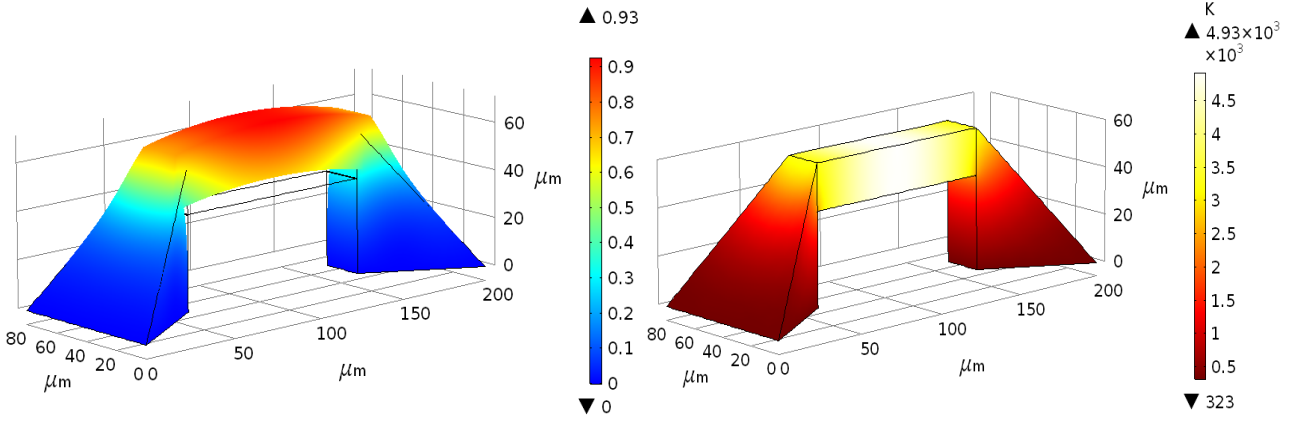
Simülasyon işlemi dört aşamada gerçekleştirildi. Başlangıçta 50  $\mu\text{m}$  uzunluğunda mikro kiriş tasarlandı ve polikristalin silikon malzeme ataması yapılarak; 10V giriş potansiyeli uygulandı. İkinci aşamada, aynı malzeme ve giriş potansiyeli ile 100  $\mu\text{m}$  uzunluğunda tasarlanan mikro kiriş için deformasyon verileri gözlemlendi. Üçüncü ve son aşamada, benzer özellikler ile 150  $\mu\text{m}$  ve 200  $\mu\text{m}$  uzunluğunda tasarlanan mikro kiriş için deformasyonlar ölçülmüştür. Şekil 2, 3, 4 ve 5’de simülasyon sonucu ortaya çıkan deformasyon miktarları ve kirişteki sıcaklık dağılımları gösterilmiştir.



(a) Toplam deformasyon

(b) Toplam sıcaklık dağılımı

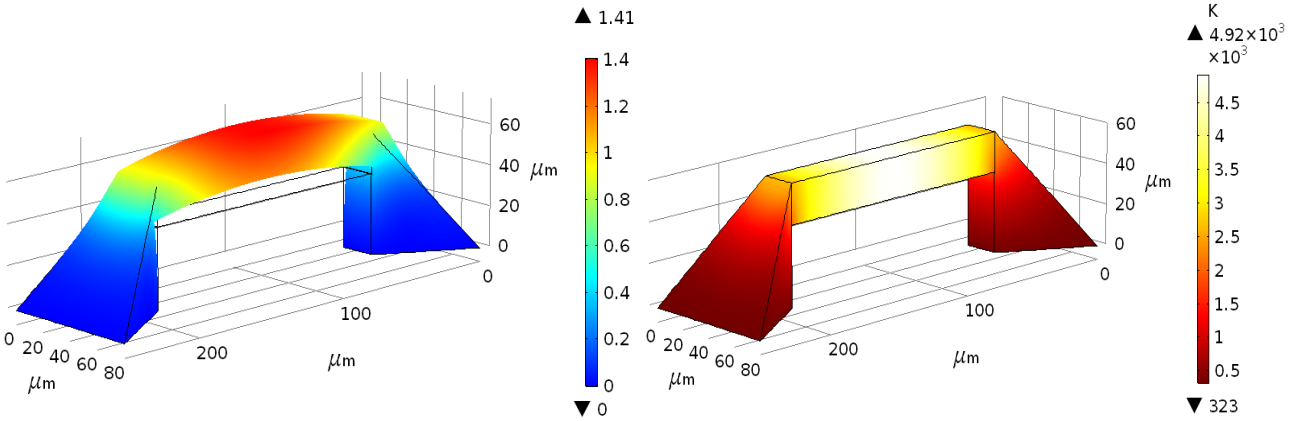
Şekil 2. Mikro giriş uzunluğunun 50 μm olması durumundaki deformasyon ve sıcaklık verileri



(a) Toplam deformasyon

(b) Toplam sıcaklık dağılımı

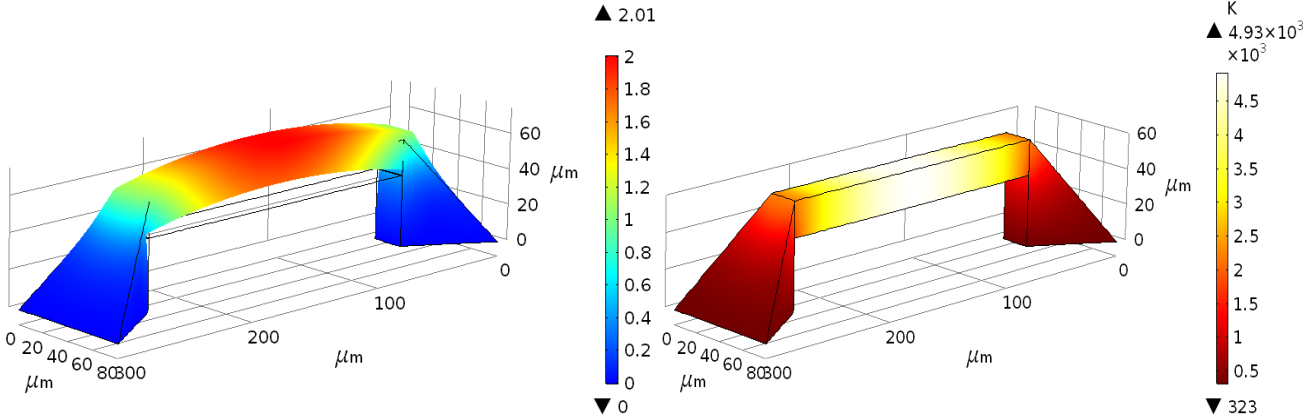
Şekil 3. Mikro giriş uzunluğunun 100 μm olması durumundaki deformasyon ve sıcaklık verileri



(a) Toplam deformasyon

(b) Toplam sıcaklık dağılımı

Şekil 4. Mikro giriş uzunluğunun 150 μm olması durumundaki deformasyon ve sıcaklık verileri



(a) Toplam deformasyon

(b) Toplam sıcaklık dağılımı

Şekil 5. Mikro giriş uzunluğunun 200 μm olması durumundaki deformasyon ve sıcaklık verileri

Yukarıdaki şekiller incelendiğinde, beklenildiği gibi en yüksek deformasyon mikro kırıların ortasında meydana gelmiştir. Ayrıca kırı uzunluğu değişiminin deformasyon verilerini ciddi bir oranda etkilediği gözlemlenmiştir. Analiz işlemleri malzemeye uygulanan 10V sabit elektrik potansiyeli ile gerçekleştirilmiştir. Bu gerilim değeri dört farklı kırı uzunluğunda (50 µm, 100 µm, 150 µm ve 200 µm) tasarlanan mikro kırıye uygulanarak deformasyon ve sıcaklık verileri gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Farklı Uzunluklar Kullanarak Elde Edilen Veriler

| Yapılan Analizler | Kırı Uzunluğu [µm] | Deformasyon [µm] | Sıcaklık [K] |
|-------------------|--------------------|------------------|--------------|
| 1                 | 50                 | 0.6              | 4890         |
| 2                 | 100                | 0.93             | 4920         |
| 3                 | 150                | 1.41             | 4930         |
| 4                 | 200                | 2.01             | 4940         |

## 4. Sonuç

Mikro kırı, COMSOL MultiFizik yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Kırı içerisinde geçen akım termal genişleme yoluyla deformasyona ve sıcaklık üretimine neden olmuştur. Termal, elektriksel ve yapısal analizlerin birleştirilmesi, mikro kırı deformasyona uğraması için gereken akım ve sıcaklık artışı tahmin etmeyi mümkün kılmıştır. Tasarlanan model için polikristalin silikon malzeme ataması gerçekleştirilerek gerekli analizler yapılmıştır. Bu malzeme, önemli fiziksel ve elektriksel özellikleri nedeniyle MEMS alanında çok sık kullanılan bir malzeme türüdür.

Polikristalin silikon mikro kırı için ortaya çıkan deformasyon değerleri, sabit 10V elektriksel potansiyelde ve farklı kırı uzunluğu ile gerçekleştirilmiştir. Polikristalin silikon malzeme için en yüksek deformasyon 200 µm uzunluğundaki mikro kırıde 2.01 µm iken; en düşük deformasyon ise 50 µm uzunluğunda 0.6 µm olarak ölçülmüştür. 100 µm ve 150 µm mikro kırı uzunlukları için deformasyon değerleri ise sırasıyla 0.93 µm ve 1.41 µm olarak ölçülmüştür. Sıcaklık verileri ise en düşük 4890 K iken; en yüksek 4940 K olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, mikro kırı tasarımında kırı uzunluğu değişiminin deformasyon özelliklerini ciddi bir biçimde etkilediği gözlemlenmiştir.

Mikro kırı uzunluğunun deformasyon ve sıcaklık değerleri üzerindeki etkisi ilk defa bu çalışma ile araştırılmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar polikristalin silikon malzemenin MEMS alanında uygulanabilirliğini göstermiştir. Önceki çalışmalarda genellikle alüminyum, bakır ve gümüş gibi malzemelerin farklı potansiyellerde deformasyon karakteristiği üzerine araştırmalar yapılmıştır.

## Kaynakça

- Arora, S., Arora, A., & George, P. J. (2012). Design of MEMS based microcantilever using comsol multihysics. *International Journal of Applied Engineering Research*, 7(11), 1-3.
- Bernstein, J. J., Bancu, M. G., Cook, E. H., Chaparala, M. V., Teynor, W. A., & Weinberg, M. S. (2013). A MEMS diamond hemispherical resonator. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 23(12), 125007.
- Bittner, A., Hochstein, D., Rockstroh, J., Dehnert, J., Hedrich, F., Billat, S., & Dehé, A. (2019). Plasma techniques in the production of customized MEMS-applications. *Plasma Processes and Polymers*, 16(9), 1900047.
- Choudhary, N., & Kaur, D. (2016). Shape memory alloy thin films and heterostructures for MEMS applications: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 242, 162-181.
- Dai, H. L., & Wang, L. (2017). Size-dependent pull-in voltage and nonlinear dynamics of electrically actuated microcantilever-based MEMS: a full nonlinear analysis. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 46, 116-125.
- Faria, D., Abreu, C. S., Buciumeanu, M., Dourado, N., Carvalho, O., Silva, F. S., & Miranda, G. (2018). Ti6Al4V laser surface preparation and functionalization using hydroxyapatite for biomedical applications. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 106(4), 1534-1545.
- Geitmann, A. (2017). Microfluidic-and Microelectromechanical System (MEMS)-Based Platforms for Experimental Analysis of Pollen Tube Growth Behavior and Quantification of Cell Mechanical Properties. In *Pollen Tip Growth* (pp. 87-103). Springer, Cham.
- Krylov, S., Seretensky, S., & Schreiber, D. (2008). Pull-in behavior and multistability of a curved microbeam actuated by a distributed electrostatic force. *21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 499-502.
- Krysko, A. V., Awrejcewicz, J., Pavlov, S. P., Zhigalov, M. V., & Krysko, V. A. (2017). Chaotic dynamics of the size-dependent nonlinear micro-beam model. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 50, 16-28.
- Lau, G. K., & Shrestha, M. (2017). Ink-jet printing of micro-electro-mechanical systems (MEMS). *Micromachines*, 8(6), 194.
- 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.
- Lyshevski, S. E. (2018). *MEMS and NEMS: systems, devices, and structures*. CRC press.
- Mehrpouya, M., & Cheraghi Bidsorkhi, H. (2016). MEMS applications of NiTi based shape memory alloys: a review. *Micro and Nanosystems*, 8(2), 79-91.
- Reddy, V. M., & Kumar, G. S. (2013). Design and analysis of microcantilevers with various shapes using comsol multiphysics software. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(3).
- Saravanan, P., Satyanarayana, N., Duong, H. M., & Sinha, S. K. (2018). Tribology of Self-lubricating SU-8 composites for MEMS applications. *surfaces*, 11, 14.



- Sim, G. D., Krogstad, J. A., Reddy, K. M., Xie, K. Y., Valentino, G. M., Weihs, T. P., & Hemker, K. J. (2017). Nanotwinned metal MEMS films with unprecedented strength and stability. *Science advances*, 3(6), e1700685.
- Zang, X., Zhou, Q., Chang, J., Liu, Y., & Lin, L. (2015). Graphene and carbon nanotube (CNT) in MEMS/NEMS applications. *Microelectronic Engineering*, 132, 192-206.
- Zhou, L., Zhang, X., & Xie, H. (2019). An Electrothermal Cu/W Bimorph Tip-Tilt-Piston MEMS Mirror with High Reliability. *Micromachines*, 10(5), 323.
- Wang, B., Zhou, S., Zhao, J., & Chen, X. (2011). Size-dependent pull-in instability of electrostatically actuated microbeam-based MEMS. *Journal of Micromechanics and microengineering*, 21(2), 027001.