



Makale / Research Paper

MEMS Tabanlı Elektrotermal Mikro-Aktüatörün Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Analizi

Osman ÜLKİR^{1*}, İshak ERTUĞRUL², Nihat AKKUS³

¹Muş Alparslan Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Muş, Türkiye

²Muş Alparslan Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makina Bölümü, Muş, Türkiye

³Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*o.ulkir@alparslan.edu.tr

Received/Geliş: 10.04.2020

Accepted/Kabul: 15.06.2020

Öz: Bu makale, COMSOL yazılımı ile tasarlanan mikro elektromekanik sistem (MEMS) tabanlı elektrotermal mikro-aktüatörün sonlu elemanlar analizi çalışmasını sunmaktadır. Elektrotermal aktüatörler, elektrostatik aktüatörlere kıyasla daha büyük yer değiştirmeler sağlamaktadır. Termal aktüatörler iki tiptir. Bimorf termal aktüatör ve tek malzemedan yapılmış elektrotermal uyumlu (ETU) aktüatör. Bimorf aktüatörler, iki veya daha fazla farklı malzemedan yapılmış kompozit yapıdır. Bu çalışmada ETU tipi termal aktüatör kullanılmıştır. İki yönde hareket edebilen mikro-aktüatör, belirlenen kriterlere göre tasarlanmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizi için mikro-aktüatöre iletken özelliği olan polycrystalline silicon malzeme ataması yapılmıştır. Bu analiz mikro-aktüatörün fabrikasyonu ve karakterizasyonu işlemleri öncesinde büyük öneme sahiptir. Analiz sürecinde gerilim uygulanarak mikro-aktüatörün hareket etmesi sağlanmıştır. Çalışma gerilimi, 1V'luk artışlarla 0V'dan mikro-aktüatörün yapısında kırılmalar ve bozulmalar gözlemlenene kadar artırılmıştır. Mikro-aktüatör 5V gerilime kadar dayanabilmiştir. Bu gerilim değerinden sonra mikro-aktüatörün yapısında kırılmalar ve bozulmalar meydana gelmiştir. Analizler sonucunda maksimum yer değiştirme 5V gerilim uygulandığında 4.18 µm olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, elektrotermal mikro-aktüatör tasarımı çift yönlü olduğundan maksimum yer değiştirme 8.36 µm olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: MEMS; sonlu elemanlar analizi; mikro-aktüatör; yer değiştirme; çalışma gerilimi.

Design and Finite Element Analysis of MEMS Based Electrothermal Micro-Actuator

Abstract: This article presents the finite element analysis study of the micro-electromechanical system (MEMS) based electrothermal micro-actuator designed with COMSOL software. Electrothermal actuators provide larger displacements compared to electrostatic actuators. Thermal actuators are of two types. Bimorph thermal actuator and electrothermal compatible (ETU) actuator made of single material. Bimorph actuators are composite structures made of two or more different materials. In this study, ETU type thermal actuator was used. The micro-actuator, which can move in two directions, has been designed and analyzed according to the specified criteria. Polycrystalline silicon material is assigned to the micro-actuator for finite element analysis, which has a conductive feature. This analysis is of great importance before the fabrication and characterization processes of the micro-actuator. During the analysis process, the micro-actuator was moved by applying voltage. The operating voltage is increased from 0V in 1V increments until breaks and distortions are observed in the structure of the micro-actuator. The micro-actuator was able to withstand up to 5V voltage. After this voltage value, breaks and distortions occurred in the structure of the micro-actuator. As a result of the analyzes, the maximum displacement was measured as 4.18 µm when 5V voltage was applied. As the electrothermal micro-actuator design is bidirectional, the maximum displacement was determined to be 8.36 µm.

Keywords: MEMS; finite element analysis; micro-actuator; displacement; operating voltage.

Bu makaleye atf yapmak için

Ülkir, O., Ertugrul, I., "MEMS Tabanlı Elektrotermal Mikro-Aktüatörün Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Analizi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2020, 7(3); 1017-1024

How to cite this article

Ülkir, O., Ertugrul, I., "Design and Finite Element Analysis of MEMS Based Electrothermal " El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7(3); 1017-1024.

ORCID: ^a0000-0002-1095-0160, ^b0000-0001-9586-0377, ^c0000-0002-3891-5340

1. Giriş

Mikro elektromekanik sistemler (MEMS) elektronik, biyoteknoloji ve ölçüm gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. MEMS teknolojisi genellikle mikro-aktüatörler ve mikro-sensörlerden oluşmaktadır [1-3]. Mikro-aktüatörler hareket sağlayan çekirdek kısımdır. Diğer mikro-aktüatör çeşitleri ile karşılaştırıldığında, elektrotermal mikro-aktüatörler sağlam yapı, büyük çıkış gücü, yüksek yer değiştirme ve kolay kullanım avantajlarına sahiptir. Bu özellikler mikro-aktüatörleri, mikro robotik, mikro montaj ve mikro optik gibi uygulamalarda kullanılabilir hale getirmiştir [4-6]. Bu aktüatörler genellikle serbest uca birleştirilen iki konsol kırıştan (kol) oluşmaktadır. Bu cihaz, farklı kesit veya uzunluktaki sıcak ve soğuk kolların asimetrik ısıtılmasıyla sapma oluşturur.

Mikro-aktüatöre uygulanan elektriksel gerilim sonucunda ortaya çıkan elektrik akımı bir dayanak noktasından diğerine geçer ve dar koldaki daha yüksek akım yoğunluğu ısınmasını ve genişlemesini sağlayarak soğuk kol tarafına doğru bir düzlemsel hareket üretmektedir. Akım mikro-aktüatör den geçtiğinde, daha uzun veya daha ince sıcak koldaki yüksek direnç, daha kısa veya kalın soğuk koldan daha fazla ısınmasına ve genişlemesine neden olur. Bu nedenle ortaya çıkan diferansiyel genişleme cihazın ucunu hareket etmeye zorlamaktadır. Böylece cihazın uç bölgesinde hareket ortaya çıkmaktadır.

Literatürdeki çalışmalara baktığımız zaman birçok alanda kullanılan sonlu elemanlar analizi [7-9] mikro-aktüatör uygulamalarında fazla tercih edilmemiştir. Biswas ve ark. 'U' tipi bir aktüatör üretmiş ve aktüatörün ucundaki ark hareketini analiz etmişlerdir [10]. Araştırmalarında, aktüatör serbest uçları birbirine bağlı iki düzlem içi konsol koldan oluşmaktadır. Bu kolun daha dar bir kesiti ve diğer kolun daha geniş bir kesiti vardır. Aktüatör, sabit uçlara sabitlenmiştir. Elektrik akımı, mikro-aktüatör den bir dayanak noktasından diğerine geçirildi ve dar koldaki daha yüksek akım yoğunluğu ısınmasını ve genişlemesini sağlayarak soğuk kol tarafına doğru düzlem içi hareket üretir. Elbuken ve ark. mikro polisilikon termal aktüatör geliştirdi [11]. Bu çalışmada giriş gücü ve çıkış kuvveti arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Lau ve ark. mikro-aynalar, mikro-motorlar gibi çeşitli mikro cihazlara uygun olacak mikro termal aktüatörler tasarladılar [12]. Seng ve ark. direnci azaltmak ve daha büyük bir uç sapması oluşturmak için daha geniş kol katmanının üzerine ek bir metal katman (altın) eklenmiş yeni bir model tasarlamıştır [13]. S.M. Karbasi ve ark. optimum elektromanyetik mikro-düzenleyicilerin farklı tasarımları arasında optimum tasarım ve performansın kilit faktörlerine vurgu yapan karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlardır [14]. Ayrıca analitik ve sonlu elemanlar yöntemi modelleri geliştirdiler ve modeller literatürde deneysel sonuçlarla doğrulandı. D. Yan ve ark. çift yönlü dikey hareket ile yeni bir elektro termal mikro-aktüatör tasarlamış ve test etmişlerdir [15]. Bu çalışma ile mevcut 'U' şekil yapısını dikey bir hareket oluşturmak için değiştirdiler. Ching ve ark. elektrotermal mikro-aktüatörün statik ve dinamik performansını analiz etmek için dinamik bir model sundular [13]. Modellerinde, elektro-termal-mekanik sistemi bir dizi elektrik direnci, ısı direnci, ısı kapasitörü ve mekanik bir çerçeveye ayıran topaklı bir model yaklaşımı benimsediler. N. Chronis ve ark. iki sıcak ve iki soğuk kol çalıştırıcıdan oluşan SU-8 bazlı elektrotermal olarak çalıştırılan bir polimer tutucu geliştirmiştir [17]. Silikon ve metallere kıyasla SU-8'in yüksek termal genleşme katsayısı nedeniyle SU-8 kullandılar ve düşük voltajlarla daha yüksek yer değiştirmeye izin verdiler. A. Alwan ve ark. entegre bir elektrotermal ve elektrostatik aktüatörler geliştirdiler ve düşük güç tüketimi ve yüksek çıkış gücü sağlayan hibrit çalıştırma şemaları ürettiler [18]. Wu ve ark. sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerinin fiziği ve sonlu elemanlar modelleme teknikleri dahil olmak üzere elektro termal mikro-aktüatörlerin modellenmesi ile ilgili bir dizi konu sundular [19].

Bu çalışmada, elektrotermal uyumlu (ETU) bir mikro-aktüatörün COMSOL yazılımı ile tasarımı ve sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Çift yönlü olacak biçimde tasarlanan mikro-aktüatörün analiz işlemleri için iletken özellikli polimer bir malzeme olan polycrystalline silicon malzeme

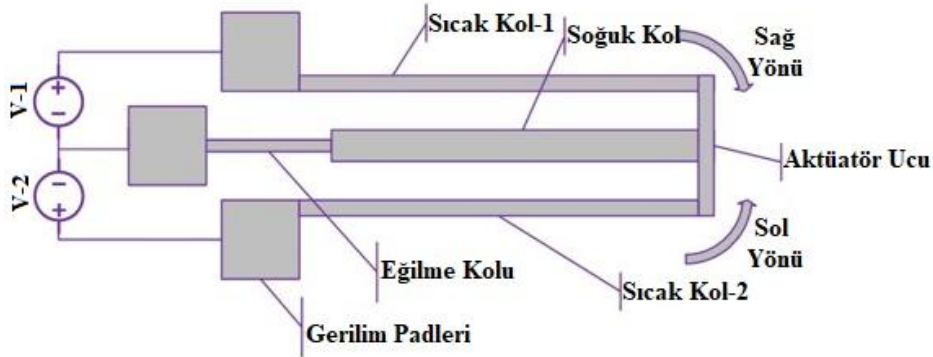
ataması yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi, mikro-aktüatöre farklı çalışma gerilim değerleri uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Aktüatöre gerilim uygulanarak hareket etmesi sağlanmıştır. Bu hareketler sonucunda mikro-aktüatörün yer değiştirmesi tespit edilmiştir. Çalışma gerilim değerleri 1V'luk artışlarla 0V'dan aktüatörün yapısında kırılmalar ve bozulmalar gözlemlenene kadar artırılarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar analiz süreci mikro-aktüatörün fabrikasyon ve karakterizasyon işlemleri öncesinde büyük öneme sahiptir.

Makalenin geri kalanı aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. İkinci bölümde, elektrotermal mikro-aktüatörün tasarımı ve termal genleşme özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, mikro-aktüatörün sonlu elemanlar analiz sonucu detaylı bir biçimde anlatılmıştır. Dördüncü bölümde ise genel sonuçlara yer verilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Elektrotermal Mikro-Aktüatörün Tasarımı

Bu çalışmada, mikro-aktüatörün tasarımı gerçekleştirilirken modifiye edilmiş bir 'U' tipi aktüatör referans alınmıştır [20]. Elektrotermal mikro-aktüatör iki yönde hareket edecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 1). Tasarım ve sonlu elemanlar analizi COMSOL programı ile yapılmıştır. Mikro-aktüatöre V-1 gerilimi uygulandığında aktüatör sağa doğru hareket etmektedir. Gerilim sıcak kola bağlı pade, toprak eğilme koluna tutturulmuş pade bağlıyken uygulanırsa; mikro-aktüatör sağa hareket eder. Aktüatöre V-2 gerilimi uygulandığında aktüatör sola doğru hareket etmektedir. Tasarlanan mikro-aktüatör simetrik olduğu ve her iki yönde aynı anda hareket edemediği için, iki gerilim değeri (V-1, V-2) aynı anda uygulanamaz. Mikro-aktüatör kullanıcıya göre sağa veya sola hareket edecektir.

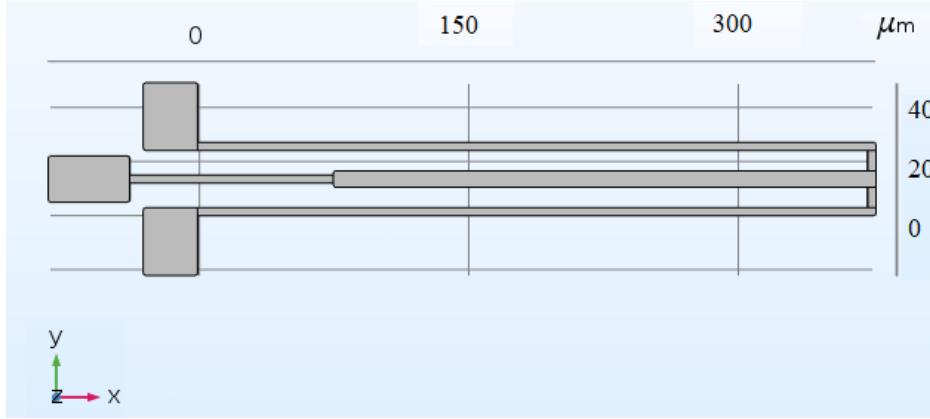


Şekil 1. Elektrotermal mikro-aktüatörün çalışma prensibi

Sonlu elemanlar analizi için COMSOL programı ile gerçekleştirilen bilgisayar destekli tasarım (CAD) Şekil 2'de görüldüğü gibidir. Mikro-aktüatör çalışması, elektrik akımı iletimi, ısı iletimi ve termal genleşmeden kaynaklanan gerilmeler olmak üzere üç bağlı fiziği içerir. Tasarım aşamasında bu fiziksel özellikler, kol uzunluğu ve eğilme dikate alınmıştır. Mikro-aktüatör için tasarım kriterleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- Eğilme kolu mümkün olduğunca ince olmalıdır.
- Eğilme kolu sıcak koldan daha ince olmamalıdır, çünkü eğilme kolu aşırı ısınabilir ve deforme olabilir.
- Eğilme kolu, mikro-aktüatörün yönleri değiştirmesine izin verecek kadar uzatılmalıdır.
- Eğilme kolu, mikro aktüatörü deforme etmeyecek şekilde uzatılmalıdır.

Tasarlanan aktüatöre malzeme tanımlaması yapılması gerekmektedir. Bu çalışma için program ara yüzünden iletken özellikli polimer malzeme olduğu için “Si-Polycrystalline Silicon” malzeme ataması yapılmıştır.



Şekil 2. COMSOL ile elde edilen CAD tasarımı

Bu malzeme ile ilgili fiziksel özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Bu adım tamamlandıktan sonra CAD tasarımına mesh element tanımlamaları yapılmıştır. Sonuç olarak COMSOL yazılımı ile mikro-aktüatörün sonlu element modeli Şekil 3’deki gibi elde edilmiştir. Bu işlem ile mikro-aktüatörün diferansiyel denklem analizi kolaylaştırılmaktadır.



Şekil 3. Mikro-aktüatörün sonlu elemanlar modeli

Mikro-aktüatör, elektrotermal olarak çalıştırılır. Elektrik akımı, elektrik direncine sahip kollardan geçerken sıcaklık gradyanı genişler. Mikro-aktüatöre enerji tasarrufu prensibi kavramı uygulanır [21]. Dirençli ısıtma kaynağı ile kararlı durum enerji denklemi olarak sunulabilir:

$$\Delta(k\Delta T) + \frac{E^2}{\rho_c} = 0$$

(1)

Burada K, E, ρ_c ve ΔT sırasıyla ısı iletkenlik katsayısı, elektrik alanı, elektrik öz direnç ve sıcaklık farkıdır.

Tablo 1. Analiz için kullanılan malzeme özellikleri

Parametre	Sembolü	Değer
Yoğunluk, [g/(cm ³)]	D	1.3
Poisson Oranı [Birimsiz]	ν	0.25
Young’s modülü [GPa]	E	3.8
Termal iletkenlik [W/m.K]	k_p	4.1
Termal genişleme katsayısı [$\mu\text{m}/\text{m.K}$]	a	4.5

2.2. Termal Genleşme

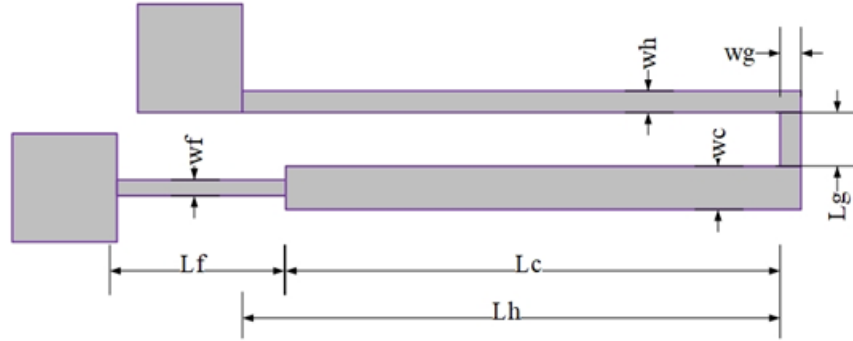
Elektrik akımı, mikro-aktüatör den bir destek noktasından diğer desteğe geçer ve sıcak koldaki daha yüksek akım yoğunluğu, aktüatörün soğuk koluna göre daha fazla ısınmasına ve genişlemesine neden olur. Böylece soğuk kol tarafına doğru yanıl ark hareketi oluşturur. Tek boyutlu yapısal eleman için, termal genişlemeye bağlı aksnel sapma, ΔL aşağıdaki gibi bulunur.

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \quad (2)$$

Burada α , malzemenin termal genişleme katsayısı, L , elemanın orijinal uzunluğudur ve ΔT , sıcaklık değişimidir. Sonlu elemanlar analizi için kullanılan sınır koşulları aşağıdaki gibidir:

- Destek noktaların alt yüzeyleri sabitlenmiştir.
- Yapıştırma padlerine 1V'luk artışlarla 0V'dan mikro-aktüatörün yapısında kırılmalar ve bozulmalar gözlemlenene kadar DC gerilim uygulanır.

Çift yönlü mikro-aktüatör simetrik bir tasarıma sahip olduğundan, Şekil 4'de görüldüğü gibi tek bir kol için ölçülendirme ve tasarım yapılmıştır. Mikro-aktüatörün boyutları Tablo 2'de verilmiştir. Tasarım ve ölçülendirilmelerin hepsi tasarım kriterlerinde verilen özelliklere göre yapılmıştır.



Şekil 4. Elektrotermal mikro-aktüatörün geometrik boyutları

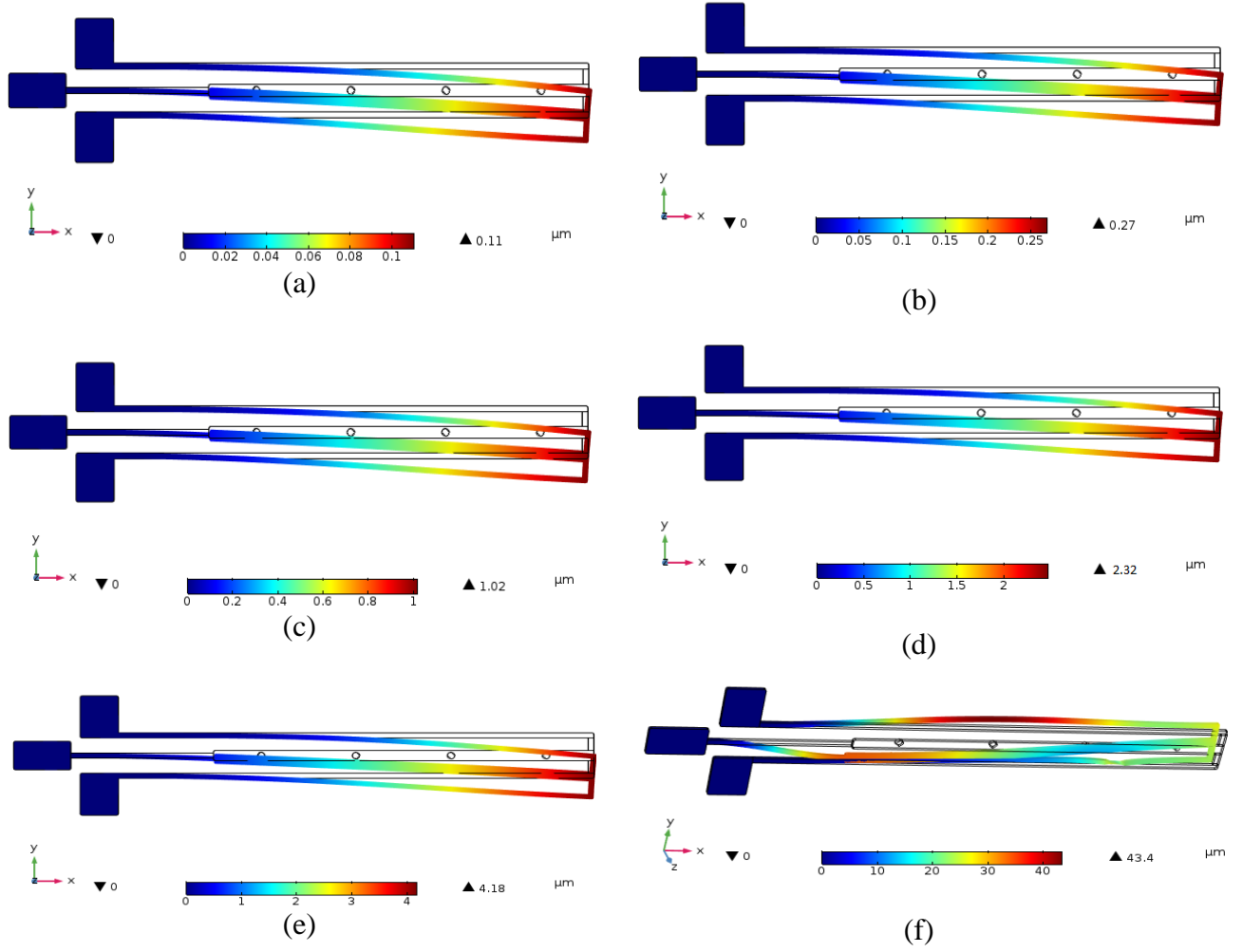
Tablo 2. Elektrotermal mikro-aktüatör parametreleri

Parametre	Sembolü	Değer (μm)
Sıcak kol uzunluğu	L_h	300
Soğuk kol uzunluğu	L_c	250
Eğilme kol uzunluğu	L_f	150
Birleştirme ucu uzunluğu	L_g	9.5
Sıcak kol genişliği	w_h	5
Soğuk kol genişliği	w_c	8
Eğilme kol genişliği	w_f	5
Hava boşluğu kalınlığı	t_a	6
Mikro-aktüatör kalınlığı	t	5

3. Sonuçlar ve Tartışmalar

Mikro-aktüatörün fabrikasyon ve karakterizasyon işlemleri yapılmadan önce sonlu elemanlar analizinin yapılması büyük öneme sahiptir. Sonlu elemanlar analizi için gerekli tasarım ve malzeme özellikleri Bölüm 2'de verilmiştir. Analiz işlemleri için gerilim verilerek aktüatörün hareket etmesi sağlanmıştır. Bu çalışma gerilimi mikro-aktüatöre 1V'luk artışlarla 0V'dan mikro-aktüatörün

yapısında kırılmalar ve bozulmalar gözlemlenene kadar uygulanmıştır.



Şekil 5. Mikro-aktüatörün sonlu elemanlar analiz verileri (a) 1V gerilim uygulanarak elde edilen yer değiştirme; (b) 2V gerilim uygulanarak elde edilen yer değiştirme; (c) 3V gerilim uygulanarak elde edilen yer değiştirme; (d) 4V gerilim uygulanarak elde edilen yer değiştirme; (e) 5V gerilim uygulanarak elde edilen yer değiştirme; (f) 6V gerilim uygulanarak elde edilen yer değiştirme

Sonlu elemanlar analizi sonucu ortaya çıkan toplam yer değiştirme verileri Şekil 5’de gösterilmiştir. Uygulanan gerilimler neticesinde mikro-aktüatör 5V gerilim değerine kadar yapısında herhangi bir bozulma olmadan yer değiştirme göstermiştir. Ancak aktüatörün kollarında 5V’den sonra kırılmalar ve bozulmalar meydana gelmiştir.

Şekil 5.a’da aktüatör padlerine 1V gerilim uygulandığında aktüatörün maksimum 0.11 μm hareket ettiği görülmüştür. Şekil 5.b’de aktüatör padlerine 2V gerilim uygulandığında aktüatörün maksimum 0.27 μm hareket etmiştir. Aktüatörde 2V gerilimde fazladan 0.16 μm ’lik hareket oluşması sağlanmıştır. Şekil 5.c’de aktüatör padlerine 3V gerilim verildiğinde aktüatörün maksimum 1.02 μm hareket ettiği gözlemlenmiştir. Mikro-aktüatöre gerilim verildikçe aktüatör kollarındaki hareket miktarı da bu analize kadar arttığı görülmüştür. Şekil 5.d’de aktüatör padlerine 4V gerilim verildiğinde aktüatörün maksimum 2.32 μm hareket ettiği gözlemlenmiştir. Aktüatördeki hareket mesafesi bir önceki analize göre 1.30 μm arttığı gözlemlenmiştir. Aktüatör kollarında herhangi bir kırılma veya bozulma meydana gelmemiştir. Şekil 5.e’de aktüatör padlerine 5V gerilim verildiğinde aktüatörün maksimum 4.18 μm hareket ettiği gözlemlenmiştir. Aktüatördeki hareket, bir önceki analize göre 1.86 μm artmıştır. Bu analizde herhangi bir kırılma veya bozulma oluşmamıştır. Dikkat edilirse 5V’a kadar yapılan analizlerde hareket farkı da sürekli artmaktadır. Şekil 5.f’de aktüatör padlerine 6V gerilim verildiğinde aktüatörün maksimum 43.4 μm

hareket ettiği gözlemlenmiştir. Aslında burada hareket etme söz konusu değildir. Şekil dikkatli bir şekilde incelendiğinde ince ve kalın kollarda kırılma ve bozulmaların olduğu görülecektir. 6V gerilim uygulanması durumunda mikro-aktüatör üzerinde analizlerin mümkün olmayacağı bu şekilde görülmüştür. Sistemin karakterizasyonunun sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için sisteme verilmesi gereken gerilim değerleri bu analizler ile ortaya koyulmuştur. Tablo 3’de mikro-aktüatör padlerine uygulanan tüm gerilim ve ortaya çıkan yer değiştirme verileri gösterilmiştir.

Tablo 3. Mikro-aktüatöre uygulanan tüm gerilimlerin SEA sonuçları

Gerilim	Yer Değiştirme [μm]
0 V	0
1 V	0.11
2 V	0.27
3 V	1.02
4 V	2.32
5 V	4.18
6 V	Kırılmalar ve Bozulmalar

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, COMSOL yazılımı kullanılarak tasarlanan elektrotermal mikro-aktüatörün sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz mikro-aktüatörün fabrikasyon ve karakterizasyon işlemleri öncesinde büyük önem arz etmektedir. Mikro-aktüatör, iki yönde hareket edebilecek biçimde belirlenen kriterlere göre tasarlanmış ve analizler gerçekleştirilmiştir.

Analiz sürecinde mikro-aktüatöre gerilim uygulanarak hareket etmesi sağlanmıştır. Çalışma gerilimi, 1V’luk artışlarla 0V’dan mikro-aktüatörün yapısında kırılmalar ve bozulmalar gözlemlenene kadar artırılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakılırsa, mikro-aktüatöre 5V’a kadar gerilim verilmesi halinde herhangi bir kırılma ve bozulma meydana gelmeyerek hareketi sağlanmıştır. En çok yer değiştirme 5V’da meydana gelmiş olup 4.18 μm olmuştur. 5V’dan sonra gerilim verilmesi durumunda kollarda kırılmalar ve bozulmalar oluşmuştur ve aktüatörün yer değiştirmesinde ani bir yükselme meydana gelmiştir. Bu yükselme aktüatörde kırılma ve bozulma olduğunu göstermektedir. Mikro-aktüatör tasarımı simetrik yapıya sahip olduğu için her iki yönde de aynı miktarda hareket etmiştir. Bir yönde hareketi maksimum 4.18 μm olduğu için toplam hareketi 8.36 μm ’dir.

MEMS tabanlı bir mikro-aktüatörün çift yönlü hareket kabiliyetinin olması ve yapılan analizler sonucunda 8.36 μm yer değiştirme göstermesi bu çalışmaya özgünlük katmıştır. Bir sonraki çalışmada tasarımı ve sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilen çift yönlü elektrotermal mikro-aktüatörün eklemeli imalat yöntemlerinden olan dijital ışık işleme (DLP) ve iki foton polimerizasyon (2PP) ile fabrikasyonu yapılacaktır. Fabrikasyon işlemi takiben mikro-aktüatörün karakterizasyonu gerçekleştirilecektir.

Kaynaklar

- [1]. Mineta, T., Yanatori, H., Hiyoshi, K., Tsuji, K., Ono, Y., Abe, K., Tactile Display MEMS Device with SU8 Micro-pin and Spring on SMA Film Actuator Array, 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2017, 2031-2034.
- [2]. Singh, J., Kumar, A., Chelvane, J. A., Stress Compensated MEMS Magnetic Actuator Based on Magnetostrictive Fe₆₅Co₃₅ Thin Films, Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 294 (1), 54-60.

- [3]. Çiftçi, H., ERSOY, B. Adsorption of Cr (VI) Ions on Magnetite Nano-Particles (Fe₃O₄): Kinetic and Thermodynamic Studies. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2016, 3(3), 417-427.
- [4]. Chen, S. H., Michael, A., Kwok, C. Y., Design and Modeling of Piezoelectrically Driven Micro-Actuator With Large Out-of-Plane and Low Driving Voltage for Micro-Optics, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2019, 28(5), 919-932.
- [5]. Chen, N., Yan, P., Ouyang, J., An improved model analysis approach for hybrid thermo-piezoelectric micro actuator with thermo-piezoelectric coupling, *Measurement*, 2019, 136, 517-524.
- [6]. Bechtold, C., Chluba, C., Zamponi, C., Quandt, E., de Miranda, R. L., Fabrication and Characterization of Freestanding NiTi Based Thin Film Materials for Shape Memory Micro-actuator Applications, *Shape Memory and Superelasticity*, 2019, 5(4), 327-335.
- [7]. Flick, E., Belski, A., Li, W., Steinhoff, G., & Gatzert, H. H., Magnetic Microactuator for Controlling Nanoparticles in gene Delivery Applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45 (10), 4869-4872.
- [8]. Yavuz, İ., Minaz, M. R., Kuncan, M., 1, 1 kw'lık İndüksiyon Motorun Oluk Sayısının Verime ve Torka Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi, *IETS'18 International Engineering and Technology Symposium*, 2018, 555-560.
- [9]. Lee, J. J., Piersanti, E., Mardal, K. A., Rognes, M. E., A mixed finite element method for nearly incompressible multiple-network poroelasticity, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2019, 41(2), 722-747.
- [10]. Burman, E., Hansbo, P., Larson, M. G., Massing, A., A stable cut finite element method for partial differential equations on surfaces: The Helmholtz–Beltrami operator. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2020, 362, 112803.
- [11]. Biswas, P. K., Bannerjee, S., Analysis of UI and UU type rail and actuator used in electromagnetic levitation system using FEM software, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2012, 2 (5), 32-39.
- [12]. Elbukun, C., Gui, L., Ren, C. L., Yavuz, M., Khamesee, M. B., Design and Analysis of a Polymeric Photo-Thermal Microactuator, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 147 (1), 292-299.
- [13]. Lau, G. K., Goosen, J. F., van Keulen, F., Duc, T. C., Sarro, P. M., Polymeric Thermal Microactuator with Embedded Silicon Skeleton: Part I—Design and Analysis, *Journal of Microelectromechanical systems*, 2008, 17(4), 809-822.
- [14]. Seng, A. B., Dahari, Z., Sidek, O., Miskam, M. A., Design and Analysis of Thermal Micro-Actuator, *European Journal of Scientific Research*, 2009, 35 (2), 281-292.
- [15]. Karbasi, S. M., Shamshirsaz, M., Naraghi, M., Maroufi, M., Optimal Design Analysis of Electrothermally Driven Microactuators. *Microsystem technologies*, 2010, 16 (7), 1065-1071.
- [16]. Dong, Y. A., Raafat, Mansour,, Design and Modeling of MEMS Bidirectional Vertical Thermal Actuator, *J. Micromech. Microeng*, 2004, 14 (2), 841-845.
- [17]. Ching, L., Meng, Lin., Chang, L., Modeling and Analysis of Electro Thermalactuators, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2009, 32 (3), 351-360.
- [18]. Nikolas, C., Luke, P. L., Electrothermally Activated SU-8 Microgripper for Single Manipulation in Solution”, *J. Micro electro Mechanical Syst.*, 2005, 35 (4), 857-863.
- [19]. Aravind, A., Naryana, R., Analyssi of Hybrid Electrothermal Mechanical Microactuators with Integrated Electrothermal and Electrostatic Actuation, *J. Micro electro Mechanical Syst.*, 2009, 18 (3), 1126-1136.
- [20]. Wu, L., Xie, H., A Large Vertical Displacement Electrothermal Bimorph Microactuator with very Small Lateral Shift, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 145 (2), 371-379.
- [21]. Huang, H., Wang, L., Wu, Y., Design and Experimental Research of a Rotary Micro-Actuator Based on a Shearing Piezoelectric Stack, *Micromachines*, 2019, 10 (2), 96-110.