



## Characterization of electrothermal micro-actuator using image processing algorithm

Osman Ülker<sup>1\*</sup>, İshak Ertuğrul<sup>2</sup>, Nihat Akkuş<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronics and Automation, Mus Alparslan University, Mus, 49210, Turkey

<sup>1</sup>Department of Mechatronics, Mus Alparslan University, Mus, 49210, Turkey

<sup>2</sup>Department of Mechatronics Engineering, Marmara University, Istanbul, 34210, Turkey

### Highlights:

- Fabrication of micro-actuator
- Fabrication with digital light processing
- Characterization of the electrothermal micro-actuator

### Keywords:

- Digital light processing
- 3D fabrication
- Electrothermal micro-actuator
- Characterization
- Image processing

### Article Info:

Research Article  
Received: 02.02.2020  
Accepted: 01.01.2021

### DOI:

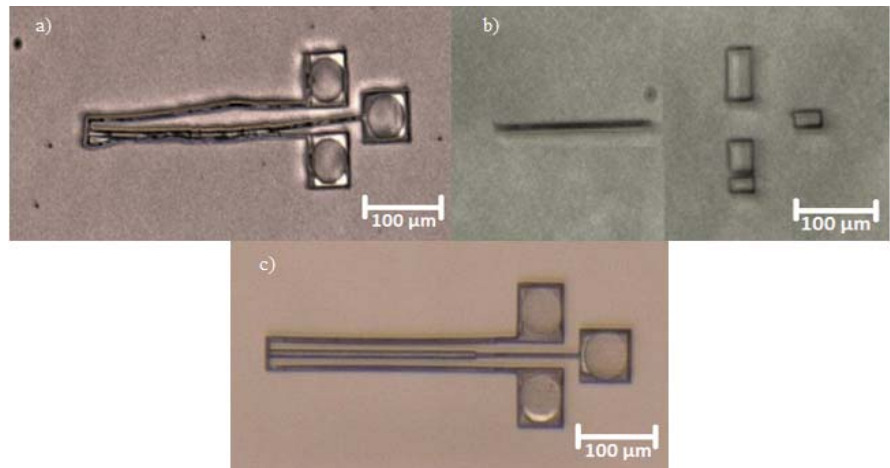
10.17341/gazimmfd.683386

### Correspondence:

Author: Osman Ülker  
e-mail:  
o.ulker@alparslan.edu.tr  
phone: +90 436 249 1850

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, the characterization of the electrothermal micro-actuator fabricated using digital light processing, which is one of the 3D fabrication methods, was realized using the image processing algorithm. For this aim, three different experiments were conducted during the fabrication process. During the fabrication process of the first two experiments, deterioration or breakage occurred in the micro-actuator structure. These problems did not occur in the fabrication of the 3rd experiment. Characterization process was done with the micro-actuator fabricated as a result of experiment 3. Based on the experimental results, the fabrication and displacement of the micro-actuator is carried out successfully.



**Figure A.** Fabrication of electrothermal micro-actuator a) fabrication as a result of experiment 1  
b) fabrication as a result of experiment 2, fabrication as a result of experiment 3

**Purpose:** This work aims to fabricate electrothermal micro-actuator with digital light processing method and characterize it with image processing algorithm.

### Theory and Methods:

This work consists of three main phases, namely, design, fabrication and characterization.

### Results:

It has been observed that the support structures used on the micro-actuator have a great influence on the 3D fabrication process. In the characterization process, when a voltage higher than 6V is applied to the micro-actuator, it was observed that breakages or deteriorations occurred in its structure.

### Conclusion:

It is concluded that the support structures are very important in the fabrication process of the micro-actuator using 3D fabrication technique. On the other hand, in the characterization process, it has been determined that the displacement of the micro-actuator is directly proportional to the applied voltage, but its structure is distorted after a point. As a result of experimental studies, the maximum displacement was measured as 3.84 µm at 6V voltage. As the actuator design is bidirectional, the maximum displacement of the micro-actuator was determined to be 7.68 µm.



## Görüntü işleme algoritması kullanarak elektrotermal mikro-aktüatörün karakterizasyonu

Osman Ülkir<sup>1\*</sup>, İshak Ertuğrul<sup>2</sup>, Nihat Akkuş<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Muş Alparslan Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Muş, 49100, Türkiye

<sup>2</sup>Muş Alparslan Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Mekatronik Bölümü, Muş, 49100, Türkiye

<sup>3</sup>Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34120, Türkiye

### ÖNEÇİKANLAR

- Mikro-aktüatörün üretimi
- Dijital ışık işleme yöntemiyle üretim
- Elektrotermal mikro-aktüatörün karakterizasyonu

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 02.02.2020

Kabul: 01.01.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.683386

### Anahtar Kelimeler:

Dijital ışık işleme,  
3B üretim,  
elektrotermal mikro-  
aktüatör,  
karakterizasyon,  
görüntü işleme

### ÖZET

3B üretim teknolojisi son zamanlarda çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere 3B parçaların hızlı üretilmesiyle büyük bir ilgi gördü. Bu makale, 3B üretim yöntemlerinden biri olan dijital ışık işleme (DLP) kullanılarak üretilen elektrotermal mikro-aktüatörün karakterizasyon çalışmasını sunmaktadır. Bu aktüatör, belirlenen kriterlere göre iki yönde hareket edebilecek biçimde tasarlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim sürecinde 3 farklı deney yapılmıştır. İlk 2 deneyin üretim sürecinde mikro-aktüatörün yapısında bozulmalar veya kırılmalar ortaya çıkmıştır. Bu sorunlar 3. deneyin üretiminde meydana gelmemiştir. Aktüatörün farklı çalışma gerilim değerleri altında yer değiştirmesini gözlemek için bir karakterizasyon deney düzeni oluşturulmuştur. Bu düzenek, prob istasyonunda yer değiştirmeleri gözlemek için optik mikroskop ve dijital kamera içermektedir. Gözlemlenen yer değiştirmeleri tespit etmek için görüntü işleme algoritması kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda mikro-aktüatörün yapısında bozulma veya kırılma gözlemlenene kadar çalışma gerilimi 0V'dan 1V'luk artışlarla artırılmıştır. Mikro-aktüatöre 6V gerilim uygulandığında, her yönde maksimum 3,84 µm yer değiştirme meydana gelmiştir. Mikro-aktüatöre 6V'dan fazla gerilim uygulandığında ise aktüatörün kollarında bozulmalar veya kırılmalar meydana gelmiştir. Sonuç olarak, mikro-aktüatörün tasarımı çift yönlü olduğundan maksimum yer değiştirmesi 7,68 µm'dir.

## Characterization of electrothermal micro-actuator using image processing algorithm

### HIGHLIGHTS

- Fabrication of micro-actuator
- Fabrication with digital light processing
- Characterization of the electrothermal micro-actuator

### Article Info

Research Article

Received: 02.02.2020

Accepted: 01.01.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.683386

### Keywords:

Digital light processing,  
3D fabrication,  
electrothermal micro-  
actuator,  
characterization,  
image processing

### ABSTRACT

3D fabrication technology has gained a lot of attention recently, with the rapid fabrication of 3D parts for use in various applications. This article presents an electrothermal micro-actuator's characterization study fabricated using digital light processing (DLP), one of the 3D manufacturing methods. This actuator has been designed and fabricated to move in two directions according to the specified criteria. Three different experiments were conducted during the fabrication process. During the fabrication process of the first two experiments, deterioration or breakage occurred in the micro-actuator structure. These problems did not occur in the fabrication of the 3rd experiment. A characterization test setup was created to observe the displacement of the actuator under different operating voltage values. This setup includes an optical microscope and digital camera to observe displacements at the probe station. An image processing algorithm was used to detect the observed displacements. In experimental studies, the operating voltage was increased from 0V to 1V until deterioration or breakage in the micro-actuator structure was observed. When 6V voltage is applied to the micro-actuator, a maximum displacement of 3.84 µm occurred in each direction. When more than 6V voltage is applied to the micro-actuator, deformations or breaks occurred in the actuator arms. As a result, the micro-actuator's design is bi-directional, so its maximum displacement is 7.68 µm.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mikro-elektro-mekanik sistem (MEMS), mikro üretim teknikleri kullanılarak üretilen minyatür mekanik ve elektromekanik bileşenlerden oluşan bir teknolojidir [1]. MEMS cihazlarının fiziksel boyutları, boyutsal spektrumun alt ucunda bir mikronun hemen altından birkaç milimetreye kadar değişebilir [2, 3]. MEMS cihazlarının tipleri ise hareketli elemanlar içermeyen basit yapılardan, entegre mikro-elektronik kontrol altında hareketli elemanlara sahip oldukça karmaşık elektromekanik sistemlere kadar değişebilir. Bu cihazların üretim sürecinde yüzey mikro işlemeyi ve entegre devre ile uyumlu yığın mikro işlemeyi içeren yarı iletken teknolojisi kullanılmaktadır [4, 5]. Günümüzde MEMS teknolojisi, otomotiv, biyoteknoloji, askeri ve endüstriyel otomasyon gibi birçok çalışma alanının önemli bir parçasıdır [6-8]. MEMS teknolojisinin işlevsel temel öğeleri minyatür yapılar, sensörler, aktüatörler ve mikro elektronik yapılar iken, en dikkat çekici bileşenler mikro-sensörler ve mikro-aktüatörlerdir [9-11].

Mikro-aktüatörler, mikro ölçekli hareket üretebilen MEMS tabanlı cihazlar olarak tanımlanmaktadır. Bu aktüatörlerin boyutları milimetreden mikrometreye kadar değişebilmektedir. Ancak genel boyutları paketleme işlemi tamamlandığında santimetreye kadar ulaşabilmektedir [12]. Diğer aktüatör tipleriyle karşılaştırıldığında, mikro-aktüatörler genellikle serbest uca birleştirilen iki konsol kirişten oluşmaktadır [13]. Bu aktüatörler küçük bir boyuta, yüksek doyumluk faktörüne, yüksek yer değiştirme aralığına ve düşük voltaj hareketine sahiptir. Bu özellikler mikro-aktüatörleri biyomedikal, mikro robotik, mikro montaj ve mikro optik gibi uygulamalarda kullanılabilir hale getirmektedir [14-16]. Mikro-aktüatörler, genellikle büyük yer değiştirme aralığı, yüksek çalışma frekansları, minyatürleştirme, paketleme ve entegrasyon tesislerini gerektiren çok çeşitli uygulamalar tarafından kullanılır [17-19]. Bu uygulamaları gerçekleştirmek için mikro-aktüatörler, piezoelektrik, elektrostatik, elektrotermal veya manyetik gibi çalıştırma mekanizmaları gerektirmektedir [20, 21]. Bu mekanizmalar arasında elektrotermal çalıştırma, yüksek mukavemet, yüksek kuvvet çıkışı ve düşük frekanslı çalışma gibi özelliklerinden dolayı daha çok tercih edilmektedir [22]. Bu özellikler elektrotermal mikro-aktüatörlerin robotik ve biyoteknoloji gibi alanlarda kullanılmasını sağlamıştır [23, 24].

Elektrotermal işlemde hareket sağlamak için, mikro-aktüatörün farklı enine kesitleri veya uzunlukları ile sıcak ve soğuk kırımların asimetrik olarak ısınması gerekir [25]. Bu ısınma, uygulanan gerilimin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Uygulanan gerilim sonucu ortaya çıkan elektrik akımı mikro-aktüatörün ince (sıcak) ve geniş (soğuk) kollarından geçer. Aktüatör den akım geçtiği zaman, daha uzun veya ince sıcak koldaki yüksek direnç, daha kısa veya kalın soğuk kolun daha fazla ısınmasına ve termal genişlemeye neden olmaktadır [26, 27]. Bu nedenle ortaya çıkan termal genişleme mikro-aktüatörü hareket etmeye zorlamaktadır.

Böylece mikro-aktüatörün yer değiştirmesi sağlanmış olmaktadır. 3B üretim teknolojisi, minyatürleştirilmiş bileşenlerin basit bir şekilde üretilmesini sağlayan bir imalat yöntemidir. Bu yöntem, bir bilgisayar destekli tasarım (CAD) çiziminden bileşenler oluşturmak için kullanılmaktadır. Burada 3B modeller sanal bir alanda çizilebilir ve ardından bileşen malzemelerin katman katman biriktirilmesi yoluyla yazdırılabilir [28, 29]. İşleme ve delme gibi geleneksel üretim proseslerinin aksine, eklemeli üretim yöntemi proses kontrolüne, kesme aletlerine, soğutuculara veya diğer ek kaynaklara ihtiyaç duymaz. Katmanlı imalatın temel avantajlarından biri, geleneksel eksiltmeli üretim yöntemleriyle ulaşılamayan basit adımlar kullanarak minyatürleştirilmiş yapısal geometriler oluşturma yeteneğidir. Ayrıca, eklemeli üretim, geometrik tasarımlarda esneklik, hassas kontrol, mükemmel özellik boyutu ve şekilleri ve işlevsel olarak derecelendirilmiş malzemeleri yazdırma yeteneği gibi diğer özellikleri de sunmaktadır [30, 31]. Elektrotermal mikro-aktüatörün üretimi, 3B üretim tekniklerinden biri olan dijital ışık işleme (DLP) yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. DLP iyileştirilebilir reçineler kullandığından, birçok fotonik ve nano ölçekli uygulamada tercih edilen 3B üretim tekniklerinden biridir [32]. Üretim için kullanılan sıvı plastik reçine büyük miktarda ışıktan etkilendiği için hızla sertleşir. Bu nedenle baskı hızı oldukça etkileyicidir. Kürleşmiş malzeme tabakası bu yazıcı ile birkaç saniye içinde oluşturulabilir. Katman bittiğinde yukarı hareket gerçekleşir ve bir sonraki katman üzerinde çalışma başlar. Bu katmanları oluşturmak için projeksiyon ışığı kullanılır [33]. Böylelikle DLP yöntemi ile hızlı ve kaliteli üretim sağlanabilir. Bu üretim yöntemi ile gelişmiş özelliklere sahip çok çeşitli yapılar elde etmek mümkündür. DLP yöntemi, aktüatörler, biyomedikal cihazlar ve mikroakışkanlar gibi çeşitli uygulamalar için birçok mikron boyutlu sistem üretmek için tercih edilmektedir [34, 35].

Mikro-aktüatörün farklı çalışma gerilim değerleri altında yer değiştirmesini gözlemlemek için bir karakterizasyon düzeneği oluşturuldu. Aktüatörün çalışma gerilim değerleri deneysel olarak belirlenir. Karakterizasyon işlemleri için görüntü işleme algoritması geliştirilmiştir. Literatürde prob istasyonlarına bağlı modüller olan sensör ve kamera sistemleri, MEMS ürünlerinin karakterizasyon işlemlerinde kullanılmaktadır [36, 37]. Bu sistemler ile mikro boyuttaki cihazların yer değiştirmesi tespit edilebilmektedir. Diğer bir ifadeyle, karakterizasyon süreci donanımsal ekipmanlarla gerçekleştirilmektedir. Bu ekipmanlar pahalı olduğu için çalışma maliyetini artırmaktadır. Bu çalışmada mikro-aktüatöre uygulanan gerilim neticesinde ortaya çıkan yer değiştirmeler fotoğraflanmış ve aktüatörün sıfır konumuna göre yer değiştirmesi MATLAB programıyla görüntü işleme algoritması geliştirilerek tespit edilmiştir. Birçok farklı uygulamada kullanılan bu algoritma [38-42] MEMS alanında bir yeniliktir.

Bu çalışmada, 3B üretim yöntemlerinden biri olan DLP ayrıntılı olarak incelenmiş ve bu yöntem kullanılarak bir elektrotermal mikro-aktüatörün üretimi gerçekleştirilmiştir.

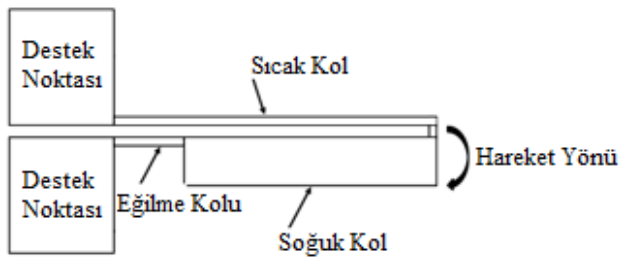
Aktüatör iki yönde hareket edebilecek biçimde tasarlanmıştır. Mikro-aktüatörün farklı çalışma gerilim değerleri altında yer değiştirmesini tespit etmek için bir karakterizasyon deney düzeneği oluşturulmuştur. Bu yer değiştirmeler görüntü işleme algoritması kullanılarak tespit edilmiştir.

Makalenin geri kalanı aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. İkinci bölümde, mikro-aktüatörün tasarım süreci, dijital ışık işleme ve elektriksel karakterizasyon yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, mikro-aktüatörün üretim ve karakterizasyon süreci detaylı bir biçimde anlatılarak elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Dördüncü bölümde ise genel sonuçlara yer verilmiştir.

## 2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

### 2.1. Tasarım Koşulları (Design Conditions)

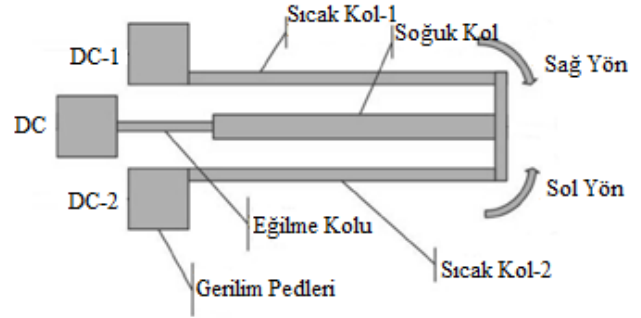
Bu çalışmada, mikro-aktüatörün tasarım sürecinde U tipi aktüatör referans alınmıştır. U-tipi mikro-aktüatör, birçok uygulamayı tasarlamak ve oluşturmak için kullanılan karakteristik bir MEMS cihazıdır [43]. Bu aktüatör, birleştirilmiş iki çizgi şeklinde koldan oluşmaktadır. Bunlardan biri ince (sıcak kol), diğeri ise geniş (soğuk kol) koldur. Bu kollar iki adet destek noktası ile sınırlıdır. Soğuk kol ve destek noktası arasında eğilme adı verilen daha küçük bir kol bulunur. Şekil 1'de U tipi bir mikro-aktüatör verilmiştir. U tipi mikro-aktüatörlerin yer değiştirmesi, sıcak ve soğuk kol arasındaki termal genişleme yoluyla gerçekleşir. Aktüatörün kollarından bir elektrik akımı geçtiğinde, daha yüksek elektrik akımı yoğunluğu, aktüatörün küçültülmüş boyutları nedeniyle ısının dağılmasına neden olur. Sonuç olarak, sıcak kolun ısı genişlemesi her iki kol arasındaki boşluğu azaltır. Böylece, mikro-aktüatörün yer değiştirmesi meydana gelir.



Şekil 1. U tipi mikro-aktüatör (U-type micro-actuator)

Mikro-aktüatör, COMSOL yazılımı kullanılarak iki yönde (sol ve sağ) yer değiştirebilecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 2). Mikro-aktüatöre DC-1 gerilimi uygulandığında, aktüatör sağ yöne doğru hareket eder. Bu durumda, DC-2 ve DC toprak bağlantı pozisyonundadır. Mikro-aktüatörün sağ yönde hareketi ile "sıcak kol-1" de yüksek bir akım oluşurken "soğuk kol" ve "sıcak kol-2" düşük akıma sahiptir. Mikro-aktüatöre DC-2 gerilimi uygulandığında, aktüatör sol yöne doğru hareket eder. Bu durumda, DC-1 ve DC toprak bağlantı pozisyonundadır. Mikro-aktüatörün sol yönde yer değiştirmesiyle "sıcak kol-2" de yüksek bir akım oluşurken

"soğuk kol" ve "sıcak kol-1" düşük akıma sahip olur. Simetrik olarak tasarlanan mikro-aktüatör her iki yönde aynı anda hareket etmemelidir. Bunun için gerilim değerlerinin (DC-1 ve DC-2) aynı anda uygulanmaması gerekir. Mikro-aktüatör, gerilimin nasıl uygulandığına bağlı olarak tek yönde hareket edecektir.



Şekil 2. Elektrotermal mikro-aktüatörün tasarımı (Design of electrothermal micro-actuator)

Elektrotermal mikro-aktüatör simetrik bir tasarıma sahip olduğundan tek kol için ölçülendirilmesi yapıldı (Şekil 3). Eğilme kolunun boyutu, mikro-aktüatörün yer değiştirmesi için önemlidir. Bu kolun tasarımı sırasında aşağıdaki kriterler dikkate alınmıştır:

- Eğilme kolu mümkün olduğunca ince olmalıdır. Bu kolun inceliği, mikro-aktüatör için düşük direnç anlamına gelir. Düşük direnç, yüksek akımın akmasını sağlar.
- Eğilme kolu sıcak koldan daha ince olmamalıdır. Yüksek akım bükülme kolundan geçeceğinden aşırı ısınabilir ve deforme olabilir.
- Mikro-aktüatörün hareketliliğini artırmak için, eğilme kolu önemli ölçüde daha uzun olmalıdır.
- Eğilme kolunun uzunluğu, mikro-aktüatörü deforme etmeyecek şekilde olmalıdır. Kol uzunluğunun az ya da çok olması deformasyona neden olur.

Tasarım ve ölçülendirilmelerin hepsi tasarım kriterlerinde verilen özelliklere göre yapılmıştır. Mikro-aktüatörün boyutları aşağıda gösterilmiştir (Tablo 1). Aktüatörün üretiminde fotopolimer malzeme kullanılmıştır. Bu malzeme temel fiziksel, mekanik ve elektriksel özelliklerinden dolayı 3B üretimde sıkça kullanılmaktadır.

Tablo 1. Mikro-aktüatörün parametreleri (Descriptions of micro-actuator)

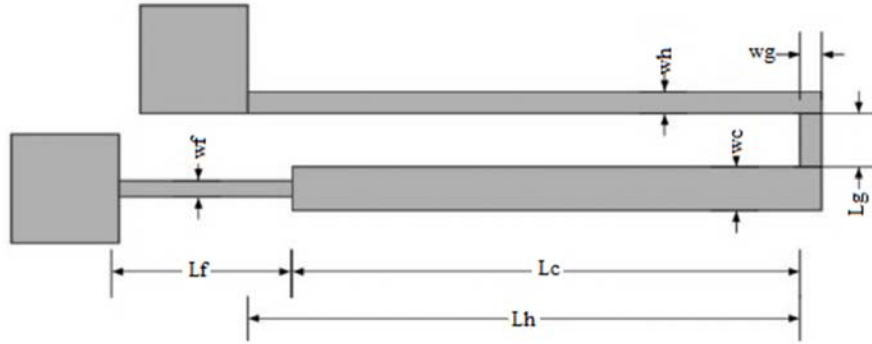
Parametre	Sembol	Değer (µm)
Sıcak kol uzunluğu	$L_h$	300
Soğuk kol uzunluğu	$L_c$	250
Eğilme kol uzunluğu	$L_f$	150
Birleştirme ucu uzunluğu	$L_g$	9,5
Sıcak kol genişliği	$w_h$	5
Soğuk kol genişliği	$w_c$	8
Eğilme kol genişliği	$w_f$	5
Hava boşluğu kalınlığı	$t_a$	6
Mikro-aktüatör kalınlığı	$t$	5

## 2.2. Dijital Işık İşleme Yöntemi (Digital Light Processing Method)

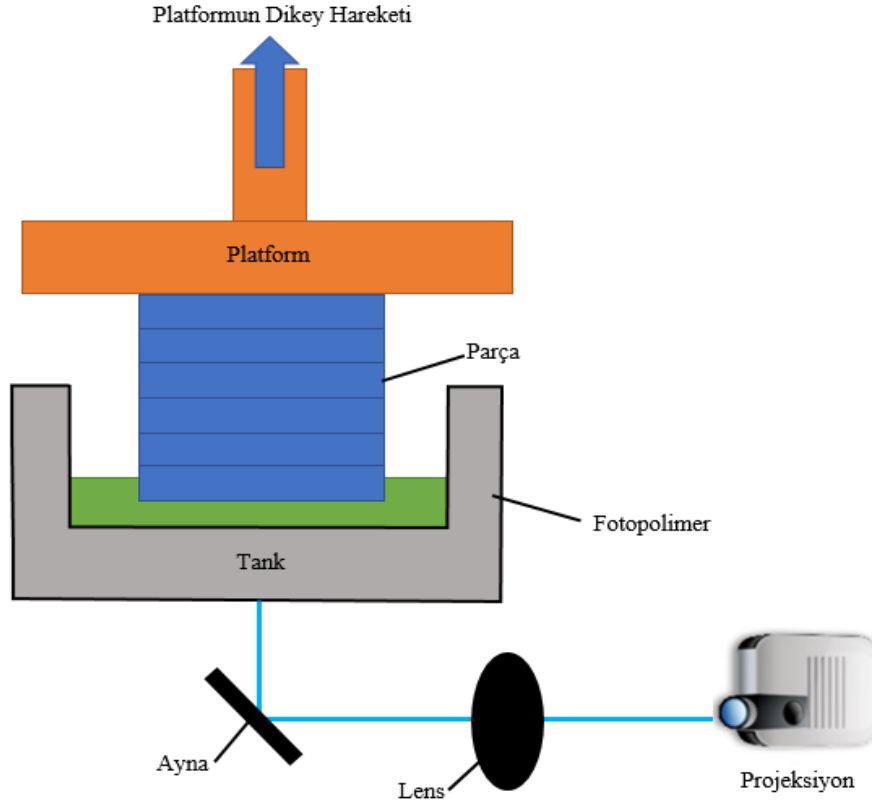
Dijital ışık işleme (DLP), sıvı bir fotopolimer malzemeyi katılaştırmak için ultraviyole (UV) ışığı kullanan eklemeli üretim yöntemidir. Bu yöntem, yüksek çözünürlüğü, hızlı baskı hızı ve basit yapısı nedeniyle 3B üretimde yaygın olarak kullanılmaktadır [44, 45]. DLP yönteminin çalışma prensibi Şekil 4'te gösterilmiştir [46].

Üretim süreci başlamadan önce, nesnenin 3B CAD modeli ilk olarak paralel bir düzlemde katmanlara dilimlenir. Bir sonraki adımda çıkan her dilim, bir 2B maske görüntüsüne dönüştürülür. Tanktaki reçineyi sertleştirmek için bir projeksiyon cihazı kullanılır. Bu cihaz, maske görüntüsünü reçine yüzeyine yansıtmak için dijital bir maskeleme

yöntemi kullanır. Bu sistemde 3B nesne katman katman üretilir. Farklı ışık kaynakları kullanan diğer stereolitografi (SLA) yöntemlerinden farklı olarak, DLP tekniği tüm maske görüntüsünü yansıtmak için bir havadan ışık kaynağı kullanır. Sonuç olarak, DLP yöntemiyle gerçekleştirilen üretim süreci diğer 3B üretim tekniklerinden daha hızlıdır. 3B malzemenin üretimi için kullanılan sıvı fotopolimer malzemeyi başarılı bir şekilde katılaştırmak için DLP yönteminde sıvı yüzeyine yeterli ışık yoğunluğu gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan projektör, 400 nm HD ultraviyole ışık kaynağı sağlar. Lensler, ışık yoğunluğu sağlayacak şekilde yerleştirilir. DLP yöntemi için kullanılan 3B yazıcının XY çözünürlüğü 65 µm'dir. Çalışmamızda maskeleme yöntemi olarak dijital mikro ayna cihazı kullanılmaktadır.



Şekil 3. Elektrotermal mikro-aktüatörün ölçülendirilmesi (Dimensions of the electrothermal micro-actuator)



Şekil 4. DLP yönteminin şematik gösterimi (Schematic image of the DLP method)



UV ışığının yönü, bir optik reflektör kullanılarak ayarlanır. Bu reflektörün konumu, elektrikli konum kontrol cihazı kullanılarak ayarlanır. Reçine teknesi, optik kuvars cam tabanlı ve alüminyum çerçevelidir. Reçineye basmak için esnek bir sıkıştırma cihazı kullanılır. Cihazın kazana uyguladığı basınç kuvveti, kaçınma etkisi kuvvetlerini önlemek için yükselir. Alüminyum çerçeve, reçine için kütleme yatağı olarak kullanılır. Bu çalışmada DLP için kullanılan malzeme IP-S reçinesidir (Tablo 2). Bu reçine, fotopolimer malzeme kullanılarak elde edilir.

### 2.3. Elektriksel Karakterizasyon (Electrical Characterization)

Elektrotermal mikro-aktüatörün elektriksel karakterizasyonu için prob istasyonu ve tek kanallı bir kaynak ölçer kullanılır. Prob istasyonu olarak Cascade Microtech PM5 cihazı kullanıldı. Bu istasyon, mikro-aktüatörün yer değiştirmesini karakterize etmek için 120x büyütme optik mikroskop ve dijital kameraya sahiptir. Aktüatörün akım-gerilim (I-V) özelliklerini belirlemek için ise Keithley 2182A kaynak ölçer cihazı kullanıldı. Mikro-aktüatörün elektriksel karakterizasyonu için malzemenin elektriksel özelliklerinin bilinmesi gereklidir. 3B tasarımı sahip mikro-aktüatörün elektriksel özelliklerinin matematiksel açıklaması aşağıdaki gibi yapılır. Elektrik akımının yoğunluğu Eş. 1'deki gibi hesaplanabilir:

$$I = V/R \quad (1)$$

Burada  $V$ , cihaza sağlanan gerilim ve  $R$ , malzemenin akım akışına karşı koyduğu dirençtir. Elektrik direnci, cihazın uzunluk, alan gibi fiziksel boyutlarından ve ayrıca malzemenin elektriksel özelliklerinden belirlenebilir. Malzemenin elektrik direnci Eş. 2'deki gibi hesaplanabilir:

$$R = \rho l/A \quad (2)$$

$R$ 'nin direnç olduğu yerde,  $l$  uzunluk ve  $A$  enine kesit alanıdır. Cihazın toplam direnci, parça sayısına ve konfigürasyona göre hesaplanır. Bu dirence karşılık gelen elektriksel güç Eş. 3'deki gibi hesaplanabilir:

$$P = VI \quad (3)$$

Gerilim tarafından kaynaklanan sıcaklık artışı, mikro-aktüatörün boyutlarında bir artış oluşturur. Bu özellik termal deformasyon olarak bilinir ve matematiksel olarak Eş. 4'deki gibi tanımlanır:

$$\epsilon = \alpha \Delta T \quad (4)$$

Burada  $\alpha$ , materyalin termal genleşmesidir ve  $\Delta T$  sıcaklık değişimini gösterir. Bu çalışmada oda sıcaklığı 25,6°C olarak kabul edilmiştir.

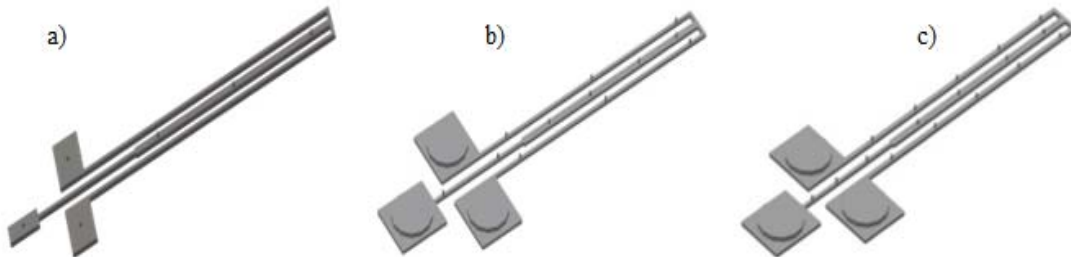
## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

### 3.1. Üretim (Fabrication)

Bu bölümde, CAD modeli Şekil 5'te verilen elektrotermal mikro-aktüatörün, 3B baskı cihazı kullanılarak DLP yöntemiyle üretimi gerçekleştirilmiştir. Mikro-aktüatörün üretimi sırasında üç deney yapılmıştır. Deneylerde kullanılan mikro-aktüatörlerin sıcak-soğuk kolları ve pedler deki destekler 3B tasarımlarda gösterilmiştir. Mikro-aktüatörün CAD modeli dilimlenip maske görüntülerine dönüştürüldükten sonra görüntüler yazıcıya yüklenir. Baskı işlemi, malzeme reçine kazanına döküldükten sonra başlar. İlk katmanın baskısında, platform, reçine tankının tabanı ile bir boşluk oluşturmak için aşağı doğru sürülür. Bu katman tamamlandıkça, baskı işlemi duraklatılır ve platformun

**Tablo 2.** IP-S reçinenin temel özellikleri (The basic properties of the IP-S resin)

Reçinenin Temel Analizi				
Karbon (%)	Hidrojen (%)	Nitrojen (%)	Oksijen (%)	Ampirik Formül
31,45	54,07	5,75	11,7	CH <sub>1,71</sub> N <sub>0,085</sub> O <sub>0,35</sub>
Fiziksel ve Mekanik Özellikleri				
Yoğunluk (sıvı) g/(cm <sup>3</sup> )	Yoğunluk (katı) g/(cm <sup>3</sup> )	Young's Modülü (GPa)	Sertlik (MPa)	Kırılma İndisi
1,3	1,5	3,8	150	1,51



**Şekil 5.** Mikro-aktüatörün CAD modelleri a) Deney 1 için tasarım, b) Deney 2 için tasarım, c) Deney 3 için tasarım  
(CAD models of micro-actuator a) Design for experiment 1, b) Design for experiment 2, Design for experiment 3)

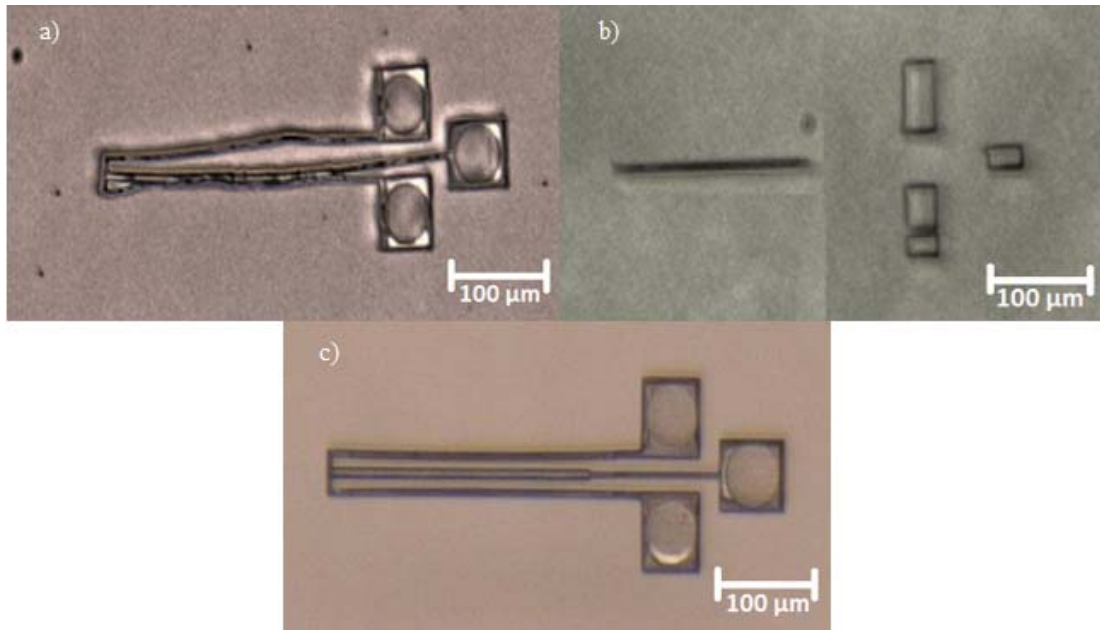
mevcut konumu kaydedilir. Platform daha sonra yukarı kaldırılır. Platformun sıfır konumu yeniden kalibre edildikten sonra platform, ayırma kuvvetini azaltmak ve daha büyük bir boşluk oluşturmak için son denemenin üstüne yerleştirilir. Platform, tankın dibine yaklaştırılır ve ilk katman yeniden yazdırılır. İlk katman başarıyla yazdırıldıktan sonra kalan katmanlar yazdırılır.

Aktüatörün imalatı boyunca, her katmanın katman kalınlığı (LT), ışık yoğunluğu (LI) ve kürleme süresi (CT) gibi farklı baskı katsayılarının belirlenmesi gerekir. Bu çalışmada TL = 40  $\mu\text{m}$  ve CT = 4 s ayarladık. Projektörün parlaklığı 400  $\text{nm}^2$ 'de 1200 mW'dir. İlk katmanın yazdırılması sırasında, LI parlaklığın% 50'sine ayarlanır. Mikro-aktüatörün 3B modelinde destek yapıları kullanılmıştır. Kollardaki destek sayısının az olduğu durumlarda mikro-aktüatör üretimi sırasında yapısal bozukluklar meydana geldi. Destek yapıları, aktüatörün kollarının bir arada tutulmasına izin verir. Destek yapıları doğru üretilmezse mikro-aktüatörde bozulmalara veya kırılmalara neden olacaktır.

İlk 2 deneyde kullanılan tasarımların üretiminde bazı bozulmalar veya kırılmalar meydana gelmiştir. Bu sorunlar deney 3'ün üretiminde meydana gelmemiştir. Elektrotermal mikro-aktüatör, deney 3'te istenildiği gibi üretilmiştir. Deney 1 ve 2'deki tasarımların üretilmemesinde birçok faktör etkili olmuştur. En önemli faktör kullanılan yeni teknoloji nedeniyle malzemenin davranışının deneme yanılma yöntemleriyle belirlenmesidir. Diğerleri ise 2 mikron boyutta üretim sürecinin deneyim gerektirmesidir. Bu deneyler destek yapılarının mikro-aktüatör üretimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Destek yapılarının yetersiz olması üretim sürecini olumsuz etkilemiştir. Üretilen mikro-aktüatörlerin görüntüleri Şekil 6'da

gösterilmektedir. Bu görüntüler mikroskop kullanılarak alınmıştır. Deney 1'de kullanılan CAD tasarımı Şekil 5a'da verilmiştir. Destek yapıları karakterizasyon sırasında bazı sorunlara neden olabileceğinden deney 1'de minimum destek kullanılmıştır. Bu tasarımda kullanılan destek sayıları Tablo 3'de verilmiştir. Bu desteklerin tümü kalın orta kolda kullanılmaktadır. Pedlerin 3 desteği vardır ve çapları 2 mikrondur. Mikro-aktüatörde kullanılan tüm desteklerin yüksekliği 2 mikrondur. Birinci tasarımın üretim görüntüsü Şekil 6a'da verilmiştir. Üretim sürecinde bozulmalar ve kırılmalar meydana gelmiştir. Bu sorunlar ince kolların ve eğilme kollarının olduğu yerlerde ortaya çıkmıştır. Desteklerin olduğu kalın kolda herhangi bir bozulma görülmemiştir. Desteğin olmadığı yerlerde ise bozulmalar ve kırılmalar ortaya çıkmıştır. Şekil 6a'da görüldüğü gibi elektrotermal mikro-aktüatör, pedlerin bulunduğu yerlerden kırılmaya başlamıştır. Sonuç olarak deney 1'deki desteklerin uzun ve ince kollarda yetersiz kullanımı nedeniyle bozulmalar meydana gelmiştir. Bu bozulmalar nedeniyle deney 1 için karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilememiştir.

Deney 1'deki bozulmaları ortadan kaldırmak için destek sayısı artırılmıştır. Deney 1'de kullanılan destekler güncellenerek Şekil 5b'deki tasarım elde edilmiştir. Deney 2 bu tasarım üzerinden gerçekleştirilmiştir. Pedlerdeki destek sayısı deney 1 ile aynı kalmıştır ve desteklerin çapları 40  $\mu\text{m}$  olarak değiştirilmiştir. Bunun nedeni karakterizasyon da pedleri sabit tutmaktır. Deney 2'de tüm kollardaki desteklerin çapları bir önceki deneyle aynı kaldı. Deney 1'de ince kollarda destek kullanılmamıştır, fakat bu tasarımda kollarda 12 destek kullanılmıştır. Ayrıca desteklerin yükseklikleri artırılarak 4  $\mu\text{m}$  yapılmıştır. Bu tasarımda kullanılan desteklerin boyutları Tablo 3'de verilmiştir. İkinci



**Şekil 6.** Elektrotermal mikro-aktüatörün üretimi a) deney 1 sonucunda üretim b) deney 2 sonucunda üretim c) deney 3 sonucunda üretim

(Fabrication of electrothermal micro-actuator a) fabrication as a result of experiment 1 b) fabrication as a result of experiment 2 c) fabrication as a result of experiment 3

tasarımın üretim görüntüsü Şekil 6b’de gösterilmiştir. Bu deneyde hiçbir çökme olmamasına rağmen kırılmalar ve şekil bozuklukları görünmektedir. Bu deneyde ince kollardaki desteklerin eksiklikleri tekrar görüldüğü için karakterizasyon sürecinin gerçekleştirilmesi mümkün olmamıştır. Şekil 6b’de ince kollardaki destek sayısının yetersiz olduğu görülmektedir. Kollarda kullanılan destek sayısı kolun uzunluğuna göre ayarlanırsa ve destekler ortalama 45-50  $\mu\text{m}$  aralıklarla kullanılırsa üretimin başarılı olacağı düşünülmektedir.

Deney 3’de kollardaki destek sayısı bir önceki deneyle karşılaştırıldığında artırılmış ve Şekil 5c’deki gibi tasarım elde edilmiştir. Deney 3’de kullanılan desteklerle ilgili tasarım önceki deneyler referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Deney 3 için kullanılan desteklerin boyutları Tablo 3’de verilmiştir. Kollardaki toplam destek sayısı 18 yapılmıştır ve iki destek arasındaki mesafe ortalama 45-50  $\mu\text{m}$  olarak ayarlanmıştır. Üçüncü tasarımın üretim görüntüsü Şekil 6c’de gösterilmiştir. Bu deneysel çalışma herhangi bir bozulma ve kırılma olmadan başarılı bir biçimde gerçekleştirilmiştir. Bunun nedeni desteklerin sayısı ve yapılarıdır. Bir sonraki bölümde, başarılı bir biçimde üretimi gerçekleştirilen deney 3 üzerinden mikro-aktüatörün karakterizasyon işlemleri yapılacaktır.

**Tablo 3.** Mikro-aktüatördeki destek yapıları  
(Structures of supports in the micro-actuator)

	Deney 1	Deney 2	Deney 3
Padlerdeki destek çapları ( $\mu\text{m}$ )	2	40	40
Kollardaki destek çapları ( $\mu\text{m}$ )	4	4	4
Kollardaki destek sayısı ( $\mu\text{m}$ )	3	12	18
Padlerdeki destek sayısı ( $\mu\text{m}$ )	3	3	3
Destek yükseklikleri ( $\mu\text{m}$ )	2	4	6

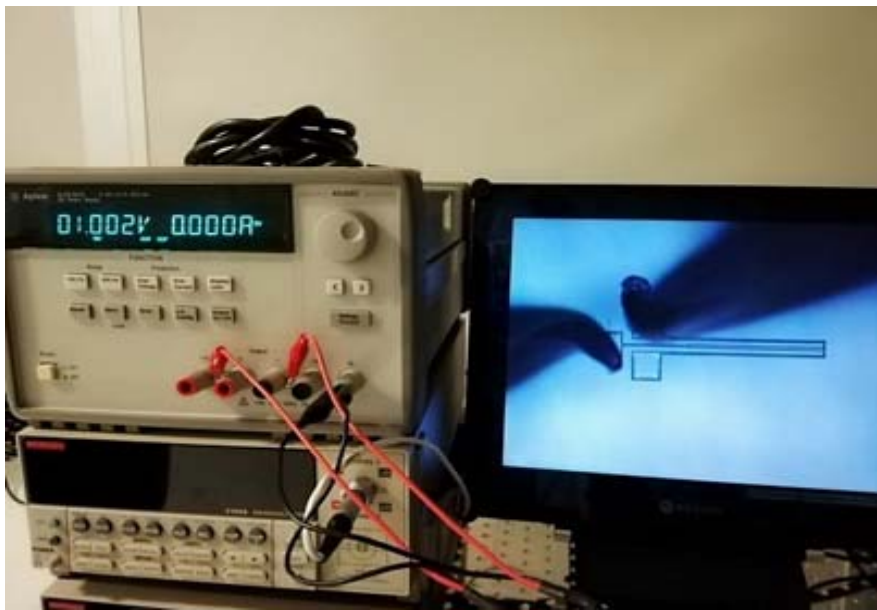
### 3.2. Karakterizasyon (Characterization)

Farklı çalışma gerilimi değerlerinde elektrotermal mikro-aktüatörün yer değiştirmesini tespit etmek için karakterizasyon deney düzeneği oluşturuldu. Karakterizasyon için Bölüm 3.1’de üretilen mikro-aktüatör kullanılmıştır (Şekil 6 (c)). Karakterizasyon işlemi için, “Cascade Microtech PM5 Prob İstasyonu” na bağlanan mikro-aktüatör, elektrik pedlerine bağlı kablolar bulunan bir devre kartına takılmıştır. Prob istasyonunda mikro-aktüatörün yer değiştirmesini karakterize etmek için 120x büyütme optik mikroskop ve dijital kamera ile bir kurulum kullanıldı. Ayrıca gerilim kaynağı olarak “Keithley 2182A - Nano Voltmetre” adı verilen cihaz kullanılmıştır. Mikro-aktüatör Şekil 7’de gösterildiği gibi prob istasyonuna yerleştirilmiştir.

Mikro-aktüatör için çalışma gerilimi deneysel olarak belirlenmiştir. Gerilim değeri, 0V’dan başlanarak 1V’luk artışlarla mikro-aktüatörün yapısında bozulma ve kırılma izlenene kadar artırıldı. Prob istasyonu ve gerilim kaynağıyla ilgili tüm elektrik bağlantıları yapıldıktan sonra gerilim değerleri sırasıyla mikro-aktüatöre uygulandı.

Mikro-aktüatörün yer değiştirmelerinin gözlemleri, aşağıda açıklanan bir video kayıt kurulumu kullanılarak yapılmıştır. Aktüatörün yer değiştirmeleri, 2 fps’de bir video dizisi olarak kaydedilir. Deneysel çalışmalar sırasında aktüatörün yer değiştirmelerini karakterize eden videolar elde edildi. Bu videolardaki kareler, aktüatörün ardışık kareler arasındaki yer değiştirmesini ölçen bir görüntü işleme algoritması kullanılarak analiz edildi.

Bu algoritmaya göre mikro-aktüatöre gerilim uygulanmadan önceki görüntü referans alındı. Ardından mikro-aktüatörde bozulma veya kırılma meydana gelene kadar gerilim değerleri uygulandı. Mikro-aktüatör, her gerilim



**Şekil 7.** Karakterizasyon için deney düzeneği (Experimental setup for the characterization)



uygulandıktan sonra görüntülendi. Alınan görüntüler referans görüntülerle karşılaştırılmış ve görüntü işleme algoritması ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda mikro-aktüatörün yer değiştirmeleri tespit edilir.

Bu algoritmanın anlaşılması için mikro-aktüatöre 6V gerilim uygulanması sonucu yer değiştirmesinin görüntü işleme tekniği ile tespit edilmesi aşağıda açıklanmıştır:

İlk olarak referans görüntü çekildi. Mikro-aktüatöre gerilim uygulanmadan önceki görüntü Şekil 8'deki gibi alınmıştır.



**Şekil 8.** Gerilim uygulanmadan önceki referans görüntü  
(The reference image before applying voltage)

Bu görüntü ile ilgili piksel ve uzunluk hesaplamaları MATLAB ile yapılmıştır. Piksel hesaplaması aktüatörün kol uzunluğuna göre yapıldı. Bu kolun uzunluğu 400  $\mu\text{m}$ 'dir. Görüntü işleme tekniğinde kolun piksel değeri 1574  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır. Kol uzunluğu ve piksel değerine göre Piksel Mikron Oranı (*PMO*) tanımlanmıştır. *PMO* değeri Eş. 5'de olduğu gibi elde edilir.

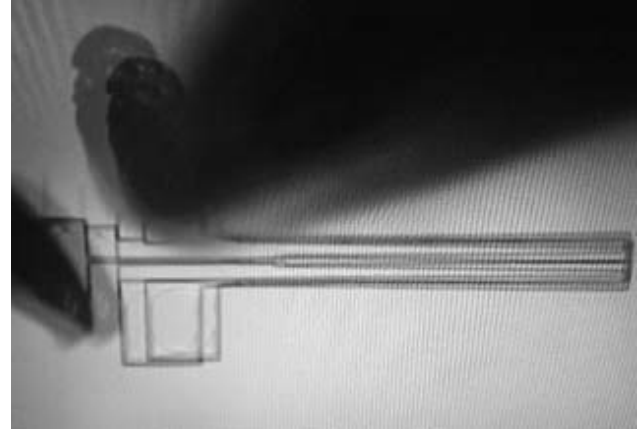
$$PMO = \frac{\text{kol uzunluğu}}{\text{piksel değeri}} = \frac{400}{1574} = 0,254 \quad (5)$$

Şekil 8'deki referans görüntü ile ilgili hesaplamalardan sonra mikro-aktüatör pedlerine 6V gerilim uygulanarak elde edilen görüntü MATLAB programına aktarılmıştır (Şekil 9).

Mikro-aktüatörün yer değiştirmesini hesaplamak için Şekil 8 ve Şekil 9 birleştirilmelidir. Bu işlemler görüntü işleme kodlarıyla yapıldığında yeni görüntü Şekil 10'daki gibi elde edilir. Bizim için önemli olan mikro-aktüatörün uç noktalarının yer değiştirmesidir. Bunun için görüntünün kodlarla büyütülmesi Şekil 11'deki gibi elde edilmiştir. Eğer aktüatörün uçlarına bakılırsa çok az yer değiştirme ortaya çıkmıştır. Bu yer değiştirmeyi bulmak için köşe noktasının y eksenindeki piksellerde ne kadar hareket ettiğini ölçmek gerekmektedir. Bu sebeple mikro-aktüatörün iki köşe noktasına kırmızı işaretçi yerleştirmiştir. Alt işaretçi, gerilim uygulamadan önce mikro-aktüatörün referans görüntüsünü temsil eder ve üst işaretçi, mikro-aktüatöre bir gerilim uygulandıktan sonraki görüntüyü temsil eder.



**Şekil 9.** 6V gerilim uygulandığındaki görüntü  
(Image obtained when 6V voltage is applied)



**Şekil 10.** Mikro-aktüatörün iki görüntünün birleştirilmesi  
(Combining two image of micro-actuator)

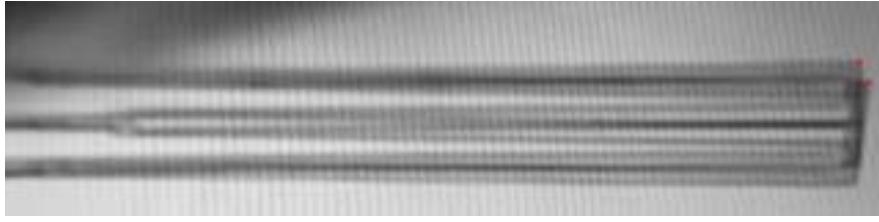
Bu hareket Eş. 6'da olduğu gibi iki noktanın piksel değişikliği (*PD*) farklılıklarından elde edilir.

$$PD = 209 - 194 = 15 \quad (6)$$

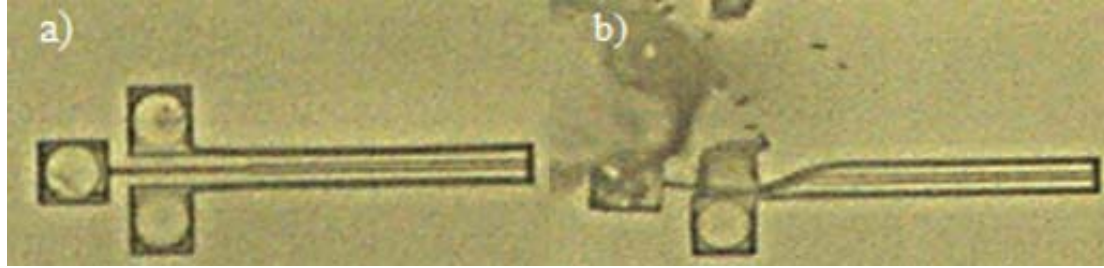
Mikro değişim (*MD*) değeri Eş. 7'de olduğu gibi elde edilir.

$$MD = PD * PMO = 15 * 0,254 = 3,84 \mu\text{m} \quad (7)$$

Mikro-aktüatöre 6V gerilim uygulandığında yer değiştirmesi 3,84  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Tüm bu işlemler her bir gerilim değeri için yapıldığında Tablo 4'deki yer değiştirme değerleri elde edilir. Karakterizasyon işlemleri oda sıcaklığında 0-7V çalışma gerilim değerleri aralığında gerçekleştirilmiştir. Tablo 4'deki değerler incelendiğinde mikro-aktüatörün dayanabileceği maksimum gerilimin 7V olduğu anlaşılacaktır. Mikro-aktüatöre 7V gerilim uygulandığında destek kollarında bozulmalar ve kırılmalar ortaya çıkmıştır. Mikro-aktüatörün üst gerilime yakın çalıştırılması, aktüatörün aşınma ve arıza şansını arttırabileceği için çalışma gerilimi, alt ve üst çalışma eşikleri arasındaki optimum gerilim seviyesine göre kararlaştırılabilir.



Şekil 11. İki görüntünün yakınlaştırılmışı (Zoomed of two image)



Şekil 12. (a) Mikro-aktüatörün kırılmadan önceki görüntüsü, (b) Mikro-aktüatörün kırılma anındaki görüntü  
(a) The image of the micro-actuator before fracture, (b) The image of the micro-actuator at the moment of fracture)

**Tablo 4.** Mikro-aktüatörün yer değiştirme değerleri  
(Displacement values of the micro-actuator)

Gerilim	Yer Değiştirme ( $\mu\text{m}$ )
0 V	0
1 V	0,5
2 V	1,14
3 V	2,18
4 V	2,93
5 V	3,15
6 V	3,84
7 V	Bozulmalar-Kırılmalar

Elektrotermal mikro-aktüatör üzerindeki karakterizasyon çalışmaları tamamlandıktan sonra, mikro-aktüatörün görüntüleme laboratuvarında mikroskop cihazı ile görüntüleri Şekil 12a ve Şekil 12b'deki gibi alınmıştır. Görüntülerin bu cihazla çekilmesinin nedeni karakterizasyon işlemlerinin etkisini daha net göstermektir. Mikro-aktüatör pedlerine 6V gerilim uygulandığında, Şekil 12a'daki görüntü elde edildi. Bu görüntüde, pedlerde prob işaretleri görülür. Bu görüntü çekildikten sonra mikro-aktüatöre 7V gerilim uygulandı. Şekil 12b'de görüldüğü gibi mikro-aktüatörde bozulmalar ve kırılmalar meydana gelmiştir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, 3B üretim yöntemlerinden biri olan dijital ışık işleme (DLP) yöntemi ayrıntılı olarak incelenmiş ve bu yöntem kullanılarak iki yönde hareket edebilen bir elektrotermal mikro-aktüatörün üretimi gerçekleştirilmiştir. Günümüze kadar geleneksel MEMS imalat yöntemleri kullanılarak üretimi gerçekleştirilen mikro-aktüatörler ilk defa bu çalışmayla 3B yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Ayrıca aktüatörün karakterizasyon işlemlerinde yer değiştirmeyi tespit etmek için kullanılan görüntü işleme algoritması bu alanda bir yeniliktir. Üretim sürecinde 3 deney

gerçekleştirildi. İlk 2 deneyde kullanılan tasarımların üretiminde bozulmalar ve kırılmalar ortaya çıkmıştır. Bu sorunlar deney 3'ün üretiminde meydana gelmemiştir. Bunun nedeni destek yapılarındaki farklılıklardır. Deney 3'deki destek yapıları önceki deneyler kullanılarak belirlenmiştir. Kollardaki toplam destek sayısı 18 yapılmış ve iki destek arasındaki mesafe ortalama 45-50  $\mu\text{m}$  olarak ayarlanmıştır. 4  $\mu\text{m}$  çapındaki destekler DLP yöntemi ile üretilmiştir.

Mikro-aktüatörün farklı çalışma gerilim değerleri altında yer değiştirmesini gözlemlemek için bir karakterizasyon deney düzeneği oluşturulmuştur. Mikro-aktüatörün yer değiştirmesi bir resim sekansı olarak kaydedildi. Çekilen resimdeki çerçeveler, MATLAB programında mikro-aktüatörün yer değiştirmesini tespit eden özel bir görüntü işleme algoritması kullanılarak analiz edilmiştir. Mikro-aktüatör için çalışma gerilimleri deneysel olarak belirlenmiştir. Çalışma gerilimi, 1V'luk artışlarla 0V'dan mikro-aktüatörün yapısında bozulma veya kırılma izlenene kadar artırıldı. Karakterizasyon sonuçları incelendiğinde aktüatörün 6V gerilime kadar dayanabildiği gözlenmiştir. Mikro-aktüatöre 7V gerilim uygulandığında destek kollarında bozulmalar veya kırılmalar gözlemlenmiştir. Maksimum yer değiştirme 6V gerilim değerinde 3,84  $\mu\text{m}$  olarak ölçüldü. Sonuç olarak, aktüatör tasarımı çift yönlü olduğundan mikro-aktüatörün maksimum yer değiştirmesi 7,68  $\mu\text{m}$  olarak tespit edilmiştir.

Bir sonraki çalışmamızda üretim ve elektriksel karakterizasyon süreci başarılı bir biçimde tamamlanan mikro-aktüatörün farklı boyutlarda üretilmesi öngörülmektedir. Ayrıca mikro boyuttaki aktüatör yapısının kimyasal ve fiziksel özellikleri, elektriksel ve yapısal özellikleri, ısıl ve tribolojik özellikleriyle ilgili malzeme karakterizasyonunun da gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

1. Di Giamberardino, P., Bagolini, A., Bellutti, P., Rudas, I. J., Verotti, M., Botta, F., Belfiore, N. P., New MEMS tweezers for the viscoelastic characterization of soft materials at the microscale, *Micromachines*, 9 (2), 15-25, 2018.
2. Crescenzi, R., Balucani, M., Belfiore, N. P., Operational characterization of CSFH MEMS technology based hinges, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 28 (5), 10-25, 2018.
3. Öcal A., Gürü M., Karacasu M., Improvement of bitumen performance properties with nano magnesium spinel and colemanite, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (3), 939-951, 2018.
4. Sabato, A., Nierecki, C., Fortino, G., Wireless MEMS-based accelerometer sensor boards for structural vibration monitoring: a review, *IEEE Sensors Journal*, 17 (2), 226-235, 2016.
5. Liu, H., Zhang, L., Li, K. H. H., Tan, O. K., Microhotplates for metal oxide semiconductor gas sensor applications—towards the CMOS-MEMS monolithic approach, *Micromachines*, 9 (1), 557-568, 2018.
6. Choudhary, N., Kaur, D., Shape memory alloy thin films and heterostructures for MEMS applications: A review, *Sensors and Actuators A: Physical*, 242 (1), 162-181, 2016.
7. Kunti, G., Dhar, J., Bhattacharya, A., Chakraborty, S., Electro-thermally driven transport of a non-conducting fluid in a two-layer system for MEMS and biomedical applications, *Journal of Applied Physics*, 123 (24), 244901, 2018.
8. Gómez-Cortés, J. F., N6, M. L., Ruíz-Larrea, I., Breczewski, T., López-Echarri, A., Schuh, C. A., San Juan, J. M., Ultrahigh superelastic damping at the nano-scale: A robust phenomenon to improve smart MEMS devices, *Acta Materialia*, 166 (2), 346-356, 2019.
9. Gerdroodbary, M. B., Mosavat, M., Ganji, D. D., Taeibi-Rahni, M., Moradi, R., Application of molecular force for mass analysis of Krypton/Xenon mixture in low-pressure MEMS gas sensor, *Vacuum*, 150 (3), 207-215, 2018.
10. Zamanzadeh, M., Ouakad, H. M., Azizi, S., Theoretical and experimental investigations of the primary and parametric resonances in repulsive force based MEMS actuators, *Sensors and Actuators A: Physical*, 303 (1), 111635, 2020.
11. Eşme E., Karlık B., Design of intelligent garment with sensor fusion for rescue teams, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (3), 1187-1200, 2019.
12. Knick, C. R., Sharar, D. J., Wilson, A. A., Smith, G. L., Morris, C. J., Bruck, H. A., High frequency, low power, electrically actuated shape memory alloy MEMS bimorph thermal actuators, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 29 (2), 075005, 2019.
13. Lobato-Dauzier, N., Denoual, M., Sato, T., Tachikawa, S., Jalabert, L., Fujita, H., Current driven magnetic actuation of a MEMS silicon beam in a transmission electron microscope, *Ultramicroscopy*, 197 (1), 100-104, 2019.
14. Niarchos, D., Magnetic MEMS: key issues and some applications, *Sensors and Actuators A: Physical*, 109 (1), 166-173, 2013.
15. Gaafar, E., Zarog, M., A low-stress and low temperature gradient microgripper for biomedical applications, *Microsystem Technologies*, 23 (12), 5415-5422, 2017.
16. Wijesiri, A., & Amarasinghe, Y. W. R., MEMS based microneedle actuator with piezoresistive force feedback system for biomedical applications, *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 3 (12), 1449-1454, 2014.
17. Galetto, M., Schiavi, A., Genta, G., Prato, A., Mazzoleni, F., Uncertainty evaluation in calibration of low-cost digital MEMS accelerometers for advanced manufacturing applications, *CIRP Annals*, 68 (1), 535-538, 2019.
18. Lega, P., Koledov, V., Orlov, A., Kuchin, D., Frolov, A., Shavrov, V., Khovaylo, V., Composite Materials Based on Shape-Memory Ti2NiCu Alloy for Frontier Micro- and Nanomechanical Applications, *Advanced Engineering Materials*, 19 (8), 1700154, 2017.
19. Bao, F. H., Wu, X. Q., Zhou, X., Wu, Q. D., Zhang, X. S., Bao, J. F., Spider web-like phononic crystals for piezoelectric MEMS resonators to reduce acoustic energy dissipation, *Micromachines*, 10 (9), 626, 2019.
20. Masood, M. U., Saleem, M. M., Khan, U. S., Hamza, A., Design, closed-form modeling and analysis of SU-8 based electrothermal microgripper for biomedical applications, *Microsystem Technologies*, 25 (4), 1171-1184, 2019.
21. Feng, H., Miao, X., Yang, Z., Design, Simulation and Experimental Study of the Linear Magnetic Microactuator, *Micromachines*, 9 (9), 454, 2018.
22. Piriyanont, B., Moheimani, S. R., MEMS rotary microgripper with integrated electrothermal force sensor, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 23 (6), 1249-1251, 2014.
23. Hamid, N. A., Majlis, B. Y., Yunas, J., Syafeeza, A. R., Wong, Y. C., Ibrahim, M., A stack bonded thermo-pneumatic micro-pump utilizing polyimide based actuator membrane for biomedical applications, *Microsystem Technologies*, 23 (3), 4037-4043, 2017.
24. Blachowicz, T., Ehrmann, A. 3D printed MEMS technology—recent developments and applications, *Micromachines*, 11 (1), 434, 2020.
25. Joshitha, C., Sreeja, B. S., Princy, S. S., Radha, S., Efficiency enhanced novel 3T heads V-beam microactuator for low power applications, *Microsystem Technologies*, 23 (4), 5797-5804, 2017.
26. Seo, Y. H., Hwang, K., Park, H. C., Jeong, K. H., Electrothermal MEMS fiber scanner for optical endomicroscopy, *Optics Express*, 24 (4), 3903-3909, 2016.

27. Cauchi, M., Grech, I., Mallia, B., Mollicone, P., Sammut, N., The effects of cold arm width and metal deposition on the performance of a U-beam electrothermal MEMS microgripper for biomedical applications, *Micromachines*, 10 (1), 167, 2019.
28. Zang, X., Zhou, Q., Chang, J., Liu, Y., Lin, L., Graphene and carbon nanotube (CNT) in MEMS/NEMS applications, *Microelectronic Engineering*, 132 (1), 192-206, 2015.
29. Genç A., Göksu T., Helhel S., Investigation of the performance of waveguide bend components fabricated with 3D printing and copper plating, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 801-810, 2019.
30. Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., *Additive manufacturing Technologies*, New York: Springer, 17, 2014.
31. Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., Charitidis, C., Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities, *Materials Today*, 21 (1), 22-37, 2018.
32. Kumar, S., Bhushan, P., Pandey, M., Bhattacharya, S., Additive manufacturing as an emerging technology for fabrication of microelectromechanical systems (MEMS), *Journal of Micromanufacturing*, 2 (2), 175-197, 2019.
33. Wu, D., Zhao, Z., Zhang, Q., Qi, H. J., Fang, D., Mechanics of shape distortion of DLP 3D printed structures during UV post-curing, *Soft matter*, 15 (30), 6151-6159, 2019.
34. Bazaz, S. R., Rouhi, O., Raoufi, M. A., Ejeian, F., Asadnia, M., Jin, D., Warkiani, M. E., 3D Printing of Inertial Microfluidic Devices, *Scientific reports*, 10 (1), 1-14, 2020.
35. Schmidleithner, C., Malferarri, S., Palgrave, R., Bomze, D., Schwentenwein, M., Kalaskar, D. M., Application of high resolution DLP stereolithography for fabrication of tricalcium phosphate scaffolds for bone regeneration, *Biomedical Materials*, 14 (4), 045018, 2019.
36. Littrell, R., Grosh, K., Modeling and characterization of cantilever-based MEMS piezoelectric sensors and actuators, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 21 (2), 406-413, 2012.
37. Kumar, R., Rab, S., Pant, B. D., Maji, S., Design, development and characterization of MEMS silicon diaphragm force sensor, *Vacuum*, 153 (2), 211-216, 2018.
38. İrem, K. Ö., Öztürk, S., Kuncan, M., Pantography Application with Real-Time PLC Based on Image Processing in Gantry Robot System, *European Journal of Technique*, 9 (2), 219-229, 2019.
39. Selçuk T., Çolakoğlu A.S., Alkan A., Bread texture analysis and development of user interface using image processing techniques, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 31-41, 2018.
40. Nikbakht Aali, S., Bagherzadeh, N., Divisible load scheduling of image processing applications on the heterogeneous star and tree networks using a new genetic algorithm, *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 32 (10), e5498, 2020.
41. Bingöl K., Aslı E.R., Örmecioglu H.T., Arzu E.R., Artificial intelligence applications in earthquake resistant architectural design: Determination of irregular structural systems with deep learning and ImageAI method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (4), 2197-2210, 2020.
42. Kuncan, M., Kaplan, K., Fatih, A. C. A. R., Kundakçi, I. M., Ertunç, H. M., Fuzzy logic based ball on plate balancing system real time control by image Processing, *International Journal of Natural and Engineering Sciences*, 10 (3), 28-32, 2016.
43. Vargas-Chable, P., Tecpoyotl-Torres, M., Cabello-Ruiz, R., Rodriguez-Ramirez, J. A., Vargas-Bernal, R. Modified U-shaped microactuator with compliant mechanism applied to a microgripper, *Actuators*, 8 (1), 28, 2019.
44. Zhang, J., Hu, Q., Wang, S., Tao, J., Gou, M., Digital light processing based three-dimensional printing for medical applications, *International Journal of Bioprinting*, 6 (1), 242, 2020.
45. Rodrigues, C., de Mello, J. M. M., Dalcanton, F., Macuvele, D. L. P., Padoin, N., Fiori, M. A., Riella, H. G., Mechanical, thermal and antimicrobial properties of chitosan-based-nanocomposite with potential applications for food packaging, *Journal of Polymers and the Environment*, 28, 1-21, 2020.
46. Wu, C., Yi, R., Liu, Y. J., He, Y., Wang, C. C. Delta DLP 3D printing with large size, In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2155-2160, 2016.