

# MEMS Malzeme Karakterizasyonu için Bütünleşik bir Elektrostatik Mikro Bükülme Test Yapısı Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi

Ender Yıldırım<sup>1,\*</sup>, Tayfun Akın<sup>2,3</sup> ve M. A. Sahir Arıkan<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Çankaya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06810 Yenimahalle, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>ODTÜ, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06800 Çankaya, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>ODTÜ-MEMS Araştırma ve Uygulama Merkezi, 06800 Çankaya, Ankara, Türkiye

<sup>4</sup>ODTÜ, Makine Mühendisliği Bölümü, 06800 Çankaya, Ankara, Türkiye

\*Corresponding author: endery@cankaya.edu.tr

---

**Özet.** Mikro elektromekanik sistemlerde kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin, üretim yöntemleri nedeniyle, mikro boyuttaki test yapılarıyla tespit edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, eyleyici, test numunesi ve ölçüm skalası tek bir yonga üzerinde bütünleşik olarak üretilmiş bir mikro bükülme test yapısı sunulmaktadır. Tüm bileşenlerin bütünleşik olarak üretilmiş olması, benzer sistemlerde gözlenen hizalama problemini ortadan kaldırmaktadır. Yapı, iki uçtan ankastre mesnetli bir test kirisinin orta noktasından tarak tipi bir elektrostatik eyleyici ile çekilmesi esasına dayanmaktadır. Bükülme miktarı, ölçüm skalası üzerinden, görüntü işleme yöntemleri kullanılarak tespit edilmektedir. Tasarlanan yapılar yalıtkan-üzeri-silisyum pullar kullanılarak üretilmiştir. Testler sonunda, literatürde belirtilen sonuçlarla uyumlu olarak, silisyum elastik modülü 136 GPa olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler.** Mikro elektromekanik sistemler, malzeme karakterizasyonu, elektrostatik eyleyici.

**Abstract.** Because of the fabrication techniques, mechanical properties of the materials used in micro electromechanical systems should be determined by utilizing micro-scale test structures. In this study, a micro bending test structure, whose actuator, sample, and read-out scale are integrally fabricated on a single chip is presented. Integrated fabrication of all components eliminates the alignment problem observed in similar systems. The structure relies on the principle of bending a double-clamped beam from its center by using an electrostatic comb drive. Deflection amount is determined by using image processing techniques on the read-out scale. Designed structures are fabricated by using silicon-on-insulator wafers. As a result of the tests, elastic modulus of silicon is determined as 136 GPa in accordance with the literature.

**Keywords.** Micro electromechanical systems, material characterization, electrostatic actuator.

---

## 1. Giriş

1980'lerden itibaren hızla gelişen ve sivil ve askeri uygulamalardan, kimyasal, biyolojik ve tıbbi alanlara kadar çok geniş bir alana yayılan mikro elektromekanik sistemlerin (MEMS) tasarımları, üretimde kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin bilinmesiyle mümkün olmaktadır. Mekanik özelliklerin tespiti için, büyük ölçekli numunelerin bilinen test yöntemleriyle karakterizasyonu mümkün olmakla birlikte, bu şekilde tespit edilecek sonuçlar mikro ölçekte geçerliliğini yitirebilmektedir. Bunun nedeni, MEMS üretim yöntemlerinin geleneksel yöntemlerden farklı olmasıdır. MEMS üretim yöntemleri, malzemenin mikro yapısını etkileyebilmekte, bu da mekanik özelliklerin değişmesine neden olmaktadır [1]. Bu nedenle, MEMS malzemelerinin, aynı yöntemle üretilmiş ve ürünle aynı ölçekte olan test yapıları kullanılarak karakterize edilmesi gerekmektedir [2]. Şimdiye kadar bu amaçla pek çok test yöntemi önerilmiş olmakla birlikte MEMS malzeme karakterizasyonu ile ilgili standartlar yeni geliştirilmektedir [2].

Haque ve Saif [3] bu amaçla bir mikro çekme testi tasarlamışlardır. Tasarım, bir mikro çekme numunesinin elektrostatik bir eyleyici kullanılarak çekilmesi esasına dayanmaktadır. Önerilen çekme testi taramalı elektron mikroskobu içerisinde yapılmakta, bu da ölçüm işlemini zorlaştırmaktadır. Ayrıca numune, deplasman algılayıcıları ve eyleyicinin birbirinden bağımsız olarak üretiliyor olması da bir hizalama problemi yaratmaktadır. Yine Haque ve Saif tarafından, bu sefer numune ve algılayıcıların bir arada üretildiği bir test yapısı geliştirilmiştir [4]. Ancak, bu yapıda kullanılan çip-dışı piezoelektrik eyleyici yine hizalama problemlerine neden olmaktadır. Bu çekme testlerinin yanı sıra mikro bükülme testleri de tasarlanmıştır. İlk olarak Weihs ve diğerleri tek uçtan ankastre kirişlerde bükülme testi tasarlamışlardır [5]. Bu testlerde kuvveti uygulamak için ayrıca üretilen bir nano-izaçar (nano-indenter) kullanılmıştır. Bu durum yine bir hizalama problemi yaratmaktadır. Benzer bir yapı harici bir elektrostatik eyleyici ile de çalıştırılmıştır [3]. Ancak harici eyleyici yine hizalama problemi yaratmaktadır.

Yukarıda bahsedilen yöntemlerdeki sorunlar, eyleyicinin test numunesi ile entegre bir şekilde üretilmesinin önemini göstermektedir. Mikro elektromekanik sistemlerde genellikle elektromanyetik, piezoelektrik veya elektrostatik eyleyiciler kullanılmaktadır. Ancak elektrostatik eyleyiciler, entegrasyon kolaylığı nedeniyle genellikle tercih edilmektedirler. Örneğin Lee ve diğerleri tarak tipi elektrostatik bir eyleyiciye bağlı, tek uçtan ankastre mesnetli bir test kirişi tasarlamışlardır [6]. Ancak

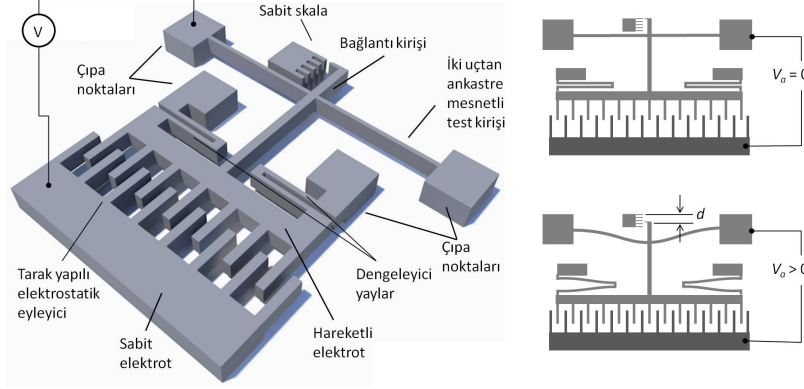
bu tasarımda, test kirişinin simetrik olarak yüklenmiyor olması, tarak tipi eyleyicinin yanal “pull-in” e maruz kalması ihtimalini arttırmaktadır.

Bu makalede sunulan tasarımda [7] ise, ortasından tarak tipi elektrostatik bir eyleyiciye bağlı, iki ucundan ankastre mesnetli bir test kirişi kullanılarak simetrik bir yükleme sağlanmıştır. Ayrıca, elektrostatik eyleyicinin hareketli elektrotları dengeleyici yaylarla desteklenerek yanal pull-in ihtimali minimize edilmiştir. Yapının yanal direngenliğinin arttırılmış olması ve simetrik bir test kirişinin kullanılması, uygulanan elektrostatik kuvvetin daima kirişin tam ortasına ve kirişe dik olarak etki etmesini sağlamaktadır. Böylelikle ikinci bir hizalama işlemine gerek kalmamaktadır. Yapının tasarımı, üretimi ve karakterizasyonu ile ilgili detaylar sonraki kısımlarda açıklanmıştır.

## 2. Test Yapısının Analizi ve Tasarım

Şekil 1, elektrostatik mikro bükülme test yapısını göstermektedir. Yapı, iki uçtan ankastre mesnetli test kirişinin orta noktasından, tarak şeklinde elektrostatik bir eyleyici ile çekilmesi esasına dayanmaktadır. Uygulanan potansiyel ( $V_a$ ) sıfır iken test kirişinin bükülme miktarı sıfırdır.  $V_a$  arttırıldıkça dengeleyici yaylara bağlı olan hareketli elektrot sabit elektrota doğru çekilmekte, bu da test kirişinin bükülmesine neden olmaktadır. Test kirişinin orta noktasındaki bükülme miktarı, bağlantı kirişinin uç noktasının sabit skalaya göre deplasmanı ölçülerek tespit edilmektedir. Uygulanan potansiyel ( $V_a$ ) ile deplasman ( $d$ ) arasındaki ilişki test kirişinin ve dengeleyici yayların direngenliğine bağlıdır. Direngenlik ise kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine ve test yapısının geometrisine bağlı olarak değişmektedir. Sonuç olarak, bu ilişki kullanılarak malzemenin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi mümkün olmaktadır.

Mikro elektromekanik sistemlerde iki tip elektrostatik eyleyici kullanılmaktadır. Bunlar değişken-aralık ve değişken-alan elektrostatik eyleyicilerdir (Şekil 2). Her iki tip eyleyici de, birbirine temas etmeyen, biri sabit diğeri asılı iki elektrota potansiyel uygulanarak çalıştırılmaktadır. Potansiyel uygulanması neticesinde iki elektrot da elektriksel olarak yüklenmekte, bunun sonucunda oluşan Coulomb kuvveti de asılı elektrotu sabit elektrota doğru çekmektedir. Bu iki tip elektrostatik eyleyiciden özellikle değişken-alan eyleyici, mikro elektromekanik yapılarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bunun nedeni, değişken-alan elektrostatik eyleyicilerde oluşan



ŞEKİL 1. Elektrostatik mikro bükülme test yapısı. Uygulanan potansiyel arttırıldıkça test kirişi bükülmektedir.

kuvvetin deplasman miktarından bağımsız olmasıdır. Eşitlik 1 ve 2 sırasıyla, değişken-aralık ve değişken-alan elektrostatik eyleyicilerde kuvvet-deplasman ilişkisini göstermektedir [8]:

$$F_{\text{elektrostatik}}^{\text{değişken-aralık}} = \frac{\varepsilon w t V^2}{2(g-x)^2}, \quad (1)$$

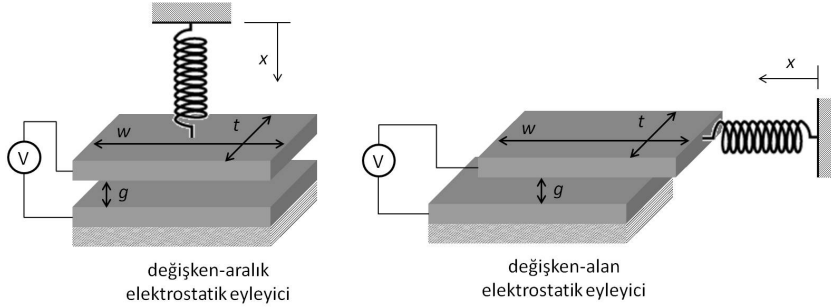
$$F_{\text{elektrostatik}}^{\text{değişken-alan}} = \frac{\varepsilon t V^2}{2g}. \quad (2)$$

Bu eşitliklerde yer alan  $\varepsilon$ ,  $w$ ,  $t$ ,  $g$ ,  $x$  ve  $V$  sırasıyla elektrik geçirgenliği, plaka genişliği, plaka derinliği, plakalar arasındaki mesafe, deplasman ve uygulanan potansiyeli ifade etmektedir (Şekil 2). Birden fazla değişken-alan elektrostatik eyleyicinin yan yana getirilmesiyle tarak tipi elektrostatik eyleyiciler elde edilmektedir. Tarak tipi eyleyicilerde oluşan elektrostatik kuvvet

$$F_{\text{elektrostatik}}^{\text{tarak}} = \frac{n \varepsilon t V^2}{g} \quad (3)$$

olarak ifade edilir. Burada  $n$ , tarak yapısındaki parmak sayısını ifade etmektedir. Kuvvetin deplasmandan bağımsız olması nedeniyle, test yapısında tarak tipi elektrostatik eyleyicilerin kullanılmasına karar verilmiştir.

Elektrostatik eyleyiciler ile ilgili bir diğer kavram “pull-in”dir. Pull-in, asılı elektrot için kararsız denge durumunu ifade etmektedir. Denge durumunda elektrostatik kuvvetler ile dengeleyici elastik kuvvetler birbirlerine eşittir ( $F_{\text{elektrostatik}} = F_{\text{elastik}}$ ). Ancak elektrotlara uygulanan potansiyel arttırıldıkça, elektrostatik kuvvet de artmaktadır. Elektrostatik kuvvetteki artma hızı, dengeleyici elastik kuvvetin artma hızından daha fazla olduğu anda ( $\partial F_{\text{elektrostatik}}/\partial x \geq \partial F_{\text{elastik}}/\partial x$ ) kararsız denge



ŞEKİL 2. Değişken-aralık ve değişken-alan elektrostatik eyleyiciler.

konumuna ulaşılmakta (pull-in) ve asılı elektrot aniden sabit elektrota yapışmaktadış. Teorik olarak “pull-in” değişken-alan elektrostatik eyleyiciler için geğerli olmamakla birlikte, tarak tipi eyleyicilerde yanıl kuvvetler kararsız denge durumuna neden olup, hareketli elektrotun “pull-in”e girmesine neden olabilir. Test yapısında yer alan dengeleyici yaylar (Şekil 1), hareketli elektrotun yanıl yönde hareketini kısıtlayarak “pull-in”i geciktirmektedir.

Ataletsel kuvvetler göz ardı edildiğinde, elektrostatik kuvvetler, yapımın direngenliğine (stiffness) bağlı olan elastik kuvvetlerle dengelenmektedir (Eşitlik 4):

$$F_{\text{elektrostatik}} = k_{\text{yapı}} d. \quad (4)$$

Bu nedenle potansiyel-bükülme ilişkisini tespit etmek için öncelikle yapımın direngenliği ( $k_{\text{yapı}}$ ) hesaplanmıştır. Yapımın direngenliğini, test kirişi ve dengeleyici yaylar belirlemektedir (Şekil 3). Buna göre, yapımın direngenliği

$$k_{\text{yapı}} = k_{\text{kiriş}} + 2k_{\text{yay}} \quad (5)$$

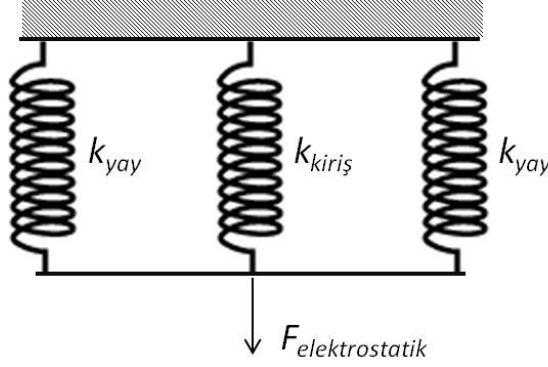
eşitliği ile ifade edilebilir. Burada  $k_{\text{kiriş}}$  ve  $k_{\text{yay}}$  sırasıyla test kirişi ve dengeleyici yayın direngenliğini ifade etmektedir. Kirişin direngenliği ( $k_{\text{kiriş}}$ ) noktasal kuvvetle ortadan yüklenmiş, iki taraftan ankastre kirişler için Roark formülü [9] kullanılarak bulunabilir (Eşitlik 6):

$$k_{\text{kiriş}} = \frac{192EI_{\text{kiriş}}}{L_{\text{kiriş}}^3}. \quad (6)$$

Eşitlikte yer alan  $E$ ,  $I_{\text{kiriş}}$ , ve  $L_{\text{kiriş}}$  sırasıyla kiriş malzemesinin elastik modülü, kiriş kesitinin atalet momenti ve kiriş uzunluğudur. Atalet momenti, dikdörtgen kesitli bir kiriş için

$$I_{\text{kiriş}} = \frac{1}{12}w_{\text{kiriş}}^3 t \quad (7)$$

ile ifade edilir. Bu eşitlikte yer alan  $w$  kiriş genişliğini,  $t$  ise kiriş kalınlığını ifade etmektedir.



ŞEKİL 3. Test yapısının toplu parametrelili modeli.

Dengeleyici yaylar ise, bir ucu ankastre diğer ucu kılavuz mesnetli iki adet kirişin uç uca eklenmesi ile oluşturulmuştur (Şekil 4). Böylelikle dengeleyici yayların direngenliğinin göreceli olarak daha düşük olması sağlanmıştır. Buna bağlı olarak, toplam direngenliğin (Eşitlik 5) daha ziyade test kirişinin direngenliğine bağlı olması sağlanmıştır. Bu durumda dengeleyici yayın direngenliği, bir ucu ankastre diğer ucu kılavuz mesnetli kirişler için Roark formülü [9] kullanılarak

$$k_{yay} = \frac{6EI_{yay}}{L_{yay}^3} \quad (8)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $I_{yay}$  ve  $L_{yay}$  sırasıyla yay kesitinin atalet momentini ve yay uzunluğunu ifade etmektedir. Mikro üretim yöntemleri göz önünde bulundurulduğunda, kiriş kalınlığı ile yay kalınlığının eşit olduğu görülmektedir. Bu durumda yay kesitinin atalet momenti

$$I_{yay} = \frac{1}{12}w_{yay}^3t \quad (9)$$

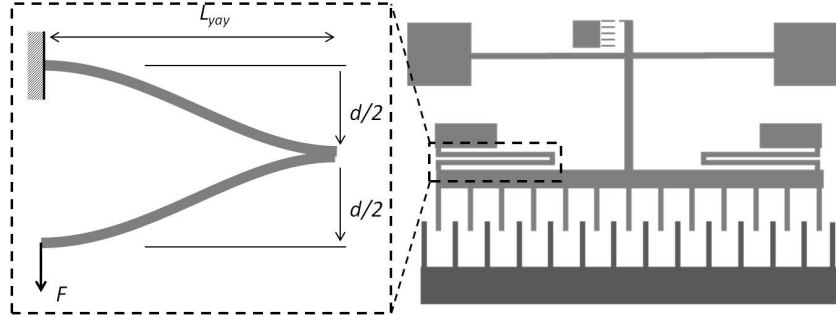
şeklinde ifade edilebilir. Burada  $w_{yay}$ , yay genişliğini ifade etmektedir. Sonuç olarak yapının direngenliği aşağıdaki şekilde bulunmaktadır:

$$k_{yapı} = Et \left( \frac{16w_{kiriş}^3}{L_{kiriş}^3} + \frac{w_{yay}^3}{L_{yay}^3} \right). \quad (10)$$

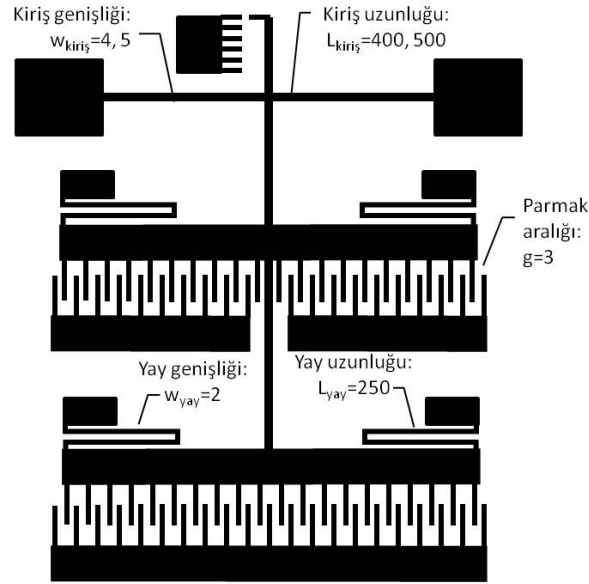
Bu durumda potansiyel-deplasman ilişkisi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$d = \frac{n\varepsilon}{gE} \left( \frac{16w_{kiriş}^3}{L_{kiriş}^3} + \frac{w_{yay}^3}{L_{yay}^3} \right)^{-1} V^2. \quad (11)$$

Burada  $n$  toplam parmak sayısını,  $g$  parmaklar arasındaki boşluğu,  $E$  ise malzemenin elastik modülünü belirtmektedir.



ŞEKİL 4. Dengeleyici yayların her biri, birbirine bağlanmış bir ucu ankastre diğer ucu kılavuz mesnetli iki kirişten meydana gelmektedir.



ŞEKİL 5. Test yapısının tasarım ölçüleri. Eyleyici üzerindeki parmak sayısını maksimize etmek için iki tarak tipi eyleyici ardı ardına yerleştirilmiştir.

Mikro bükülme testi yapıları Şekil 5'te verilen ölçülerde silisyum kullanılarak üretilmiştir. Yapılarda, elektrostatik kuvveti maksimize edebilmek için ardışık iki tarak yapısı kullanılmıştır. Böylelikle elektrostatik eyleyici üzerindeki toplam parmak sayısının artırılması mümkün olmuştur. Ancak bu durum dengeleyici yayların

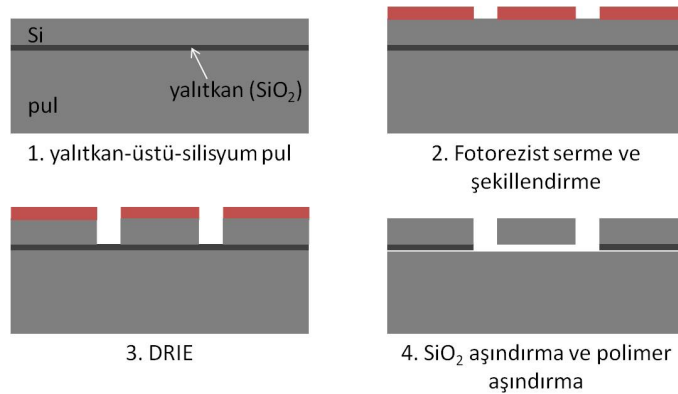
toplam direngenliğini etkilemiştir. Bu durumda deplasman-potansiyel eşitliği

$$d = \frac{n\varepsilon}{gE} \left( \frac{16w_{\text{kiriş}}^3}{L_{\text{kiriş}}^3} + \frac{2w_{\text{yay}}^3}{L_{\text{yay}}^3} \right)^{-1} V^2 \quad (12)$$

şeklinde ifade edilebilir. Sonraki kısımda, tasarlanan yapıların üretimi anlatılmıştır.

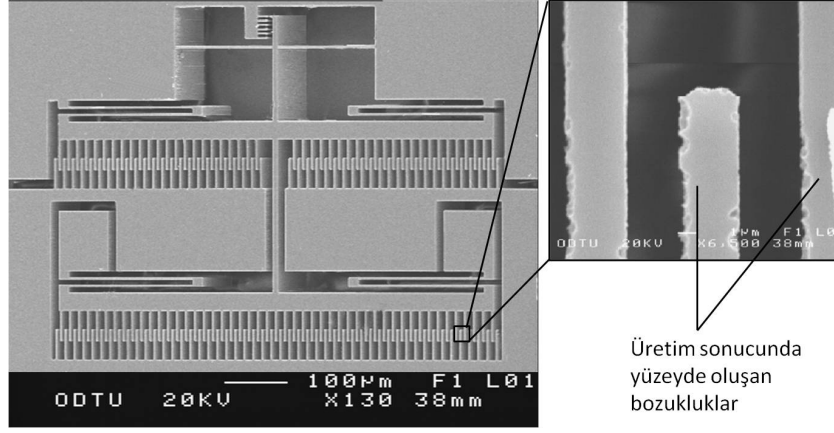
### 3. Üretim

Tasarlanan test yapıları silisyum kullanılarak üretilmiştir. Silisyum yapıların üretilmesinde yalıtkan-üzeri-silisyum (SOI) pullar kullanılmıştır. İlk olarak SOI pul üzerine, ışığa duyarlı bir polimer katmanı serilmiştir (fotorezist). Bu polimer katmanı, yapının geometrisini tanımlayan bir maske ile maskelenerek mor ötesi ışığa maruz bırakılmıştır. Bu işlem sonrasında, mor ötesi ışığa maruz kalan bölgelerdeki fotorezist katmanı kimyasal yöntemlerle temizlenmiştir. Sonraki aşamada, SOI pul derin reaktif iyon aşındırma (DRIE) işlemine tabi tutulmuştur. Bu aşamada, fotorezist katmanı ile maskelenmeyen bölgelerdeki silisyum katmanı, alttaki yalıtkan katmanına kadar aşındırılmıştır. Böylelikle yapının geometrisi pul üzerinde aktarılmıştır. Sonraki aşamada ise yapının altında yer alan yalıtkan katmanı kimyasal yöntemlerle aşındırılmıştır. En son olarak DRIE işleminde yüzeye kaplanan polimer katmanı kimyasal işlemlerde temizlenmiş ve test yapıları elde edilmiştir. Şekil 6 silisyum test yapılarının üretim aşamalarını göstermektedir. Şekil 7 üretilen bir mikro bükülme test yapısının taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş bir fotoğrafını göstermektedir.



ŞEKİL 6. Test yapısının üretim aşamaları.

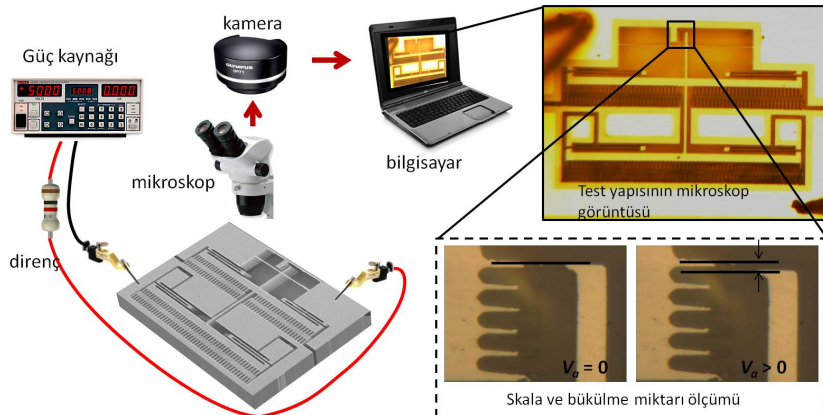




ŞEKİL 7. Üretilen test yapısının SEM görüntüsü.

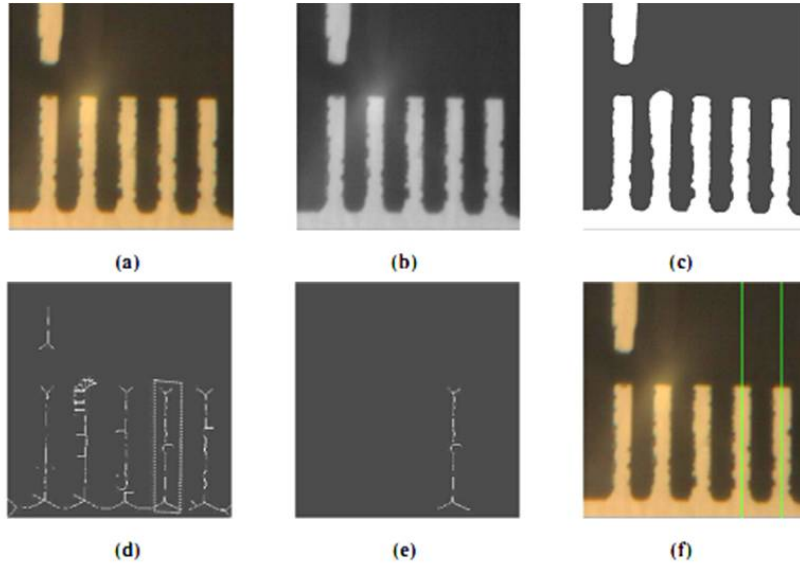
#### 4. Testler

Yapıların testleri için Şekil 8’te gösterilen düzenek kullanılmıştır. Yapının çalıştırılması için elektrostatik eyleyicinin sabit elektrotu ve hareketli elektrotu arasında, mikro prob yardımıyla potansiyel uygulanmıştır. Test sırasında, uygulanan potansiyel kademeli olarak arttırılmış ve test kirişinin hareketi mikroskoba bağlı bir kamera ile kaydedilmiştir. Uygulanan potansiyel “pull-in” e kadar kademeli olarak arttırılmış ve her potansiyel seviyesinde kaydedilen görüntü analiz için bilgisayara aktarılmıştır. Testlerde “pull-in” voltajı, farklı boylardaki test kirişleri için 95 - 160 V olarak ölçülmüştür. Bu voltaj seviyesinde oluşacak akımın test elemanlarında neden olacağı herhangi bir zararı önlemek için devreye seri olarak 100 k $\Omega$  direnç bağlanmıştır.



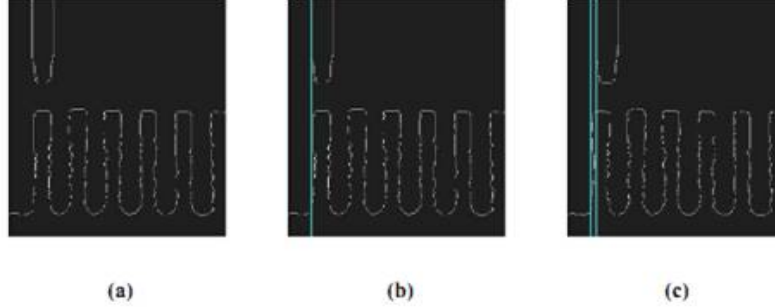
ŞEKİL 8. Test düzeneğinin şematik görünümü.

Testler sırasında her bir potansiyel seviyesi için kaydedilen görüntü, MATLAB ile hazırlanan bir görüntü işleme kodu kullanılarak analiz edilmiştir. Analizlerde ilk olarak potansiyel seviyesi sıfır iken kaydedilen görüntü kullanılarak kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Kalibrasyon sırasında sabit skala üzerinde yer alan ardışık iki parmağın orta çizgileri arasındaki mesafe kullanılarak, bir pikselin  $\mu\text{m}$  cinsinden genişliği bulunmuştur. Bu işlem için renkli olarak kaydedilen görüntü önce gri ton ve daha sonra monokrom görüntüye dönüştürülmüştür. Monokrom görüntü kullanılarak sabit skalanın iskelet görüntüsü elde edilmiştir. Daha sonra ardışık iki parmağın iskelet görüntülerine bir doğru uydurulmuştur. İki doğru arasındaki mesafe kullanılarak piksel genişliği ölçülmüştür. Şekil 9 kalibrasyon işlemini özetlemektedir.



ŞEKİL 9. Test sonucunda elde edilen görüntülerin kalibrasyonu. (a) Renkli görüntü, (b) gri ton görüntü, (c) monokrom görüntü, (d) iskelet görünümü. (e) Skala üzerindeki tek bir parmağın iskelet görüntüsü. İskeletler skala üzerindeki parmakların ortalarını ifade etmektedir. (f) Yeşil çizgiler arasındaki mesafe kullanılarak piksel genişliği tespit edilmektedir.

Deplasman miktarının ölçülmesi için yine benzer bir yöntem uygulanmıştır. Öncelikle sıfır potansiyel için sabit skalanın en üstteki parmağının kenar çizgisi belirlenmiştir. Daha sonra her potansiyel seviyesi için bağlantı kirişinin ucunda bulunan göstergenin kenarına bir doğru uydurulmuş ve bu doğrunun ilk başta tespit edilen kenara olan uzaklığı deplasman miktarı olarak kaydedilmiştir. Şekil 10 deplasman ölçümünü özetlemektedir.



ŞEKİL 10. (a) Siyah beyaz görüntü kullanılarak yapının kenar çizgileri tespit edilmektedir. (b) Daha sonra sabit skalanın kenarı referans çizgisi olarak belirlenmektedir. (c) Bağlantı kirişinin ucunun hareketi referans çizgisine göre belirlenmektedir.

Her bir potansiyel seviyesi için tespit edilen deplasman verisi kullanılarak, Eşitlik 12’de ifade edildiği gibi  $d = AV^2$  şeklinde bir eğri oturtulmuştur. Şekil 11, potansiyelin karesine bağlı deplasman miktarını ve uydurulan doğruyu göstermektedir. Bu doğrunun eğimi ( $A$ ), test yapısının geometrisi ve malzemenin mekanik özelliklerine bağlıdır:

$$A = \frac{n\varepsilon}{gE} \left( \frac{16w_{\text{kiriş}}^3}{L_{\text{kiriş}}^3} + \frac{2w_{\text{yay}}^3}{L_{\text{yay}}^3} \right)^{-1}. \quad (13)$$

Sonuç olarak, elastik modül  $A$ ’ya bağlı olarak aşağıdaki şekilde bulunabilir:

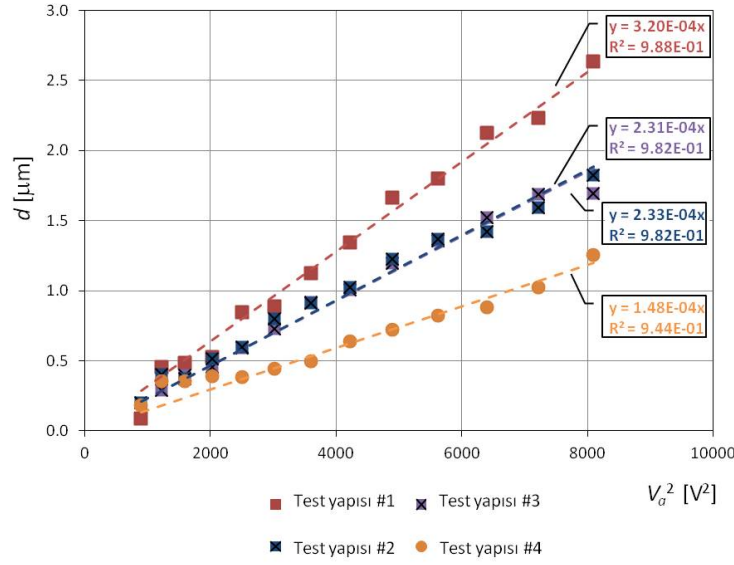
$$E = \frac{n\varepsilon}{gA} \left( \frac{16w_{\text{kiriş}}^3}{L_{\text{kiriş}}^3} + \frac{2w_{\text{yay}}^3}{L_{\text{yay}}^3} \right)^{-1}. \quad (14)$$

Eşitlik 14 incelendiğinde, elastik modülün yapının direngenliği ile aşağıda verildiği şekilde ilişkili olduğu görülmektedir:

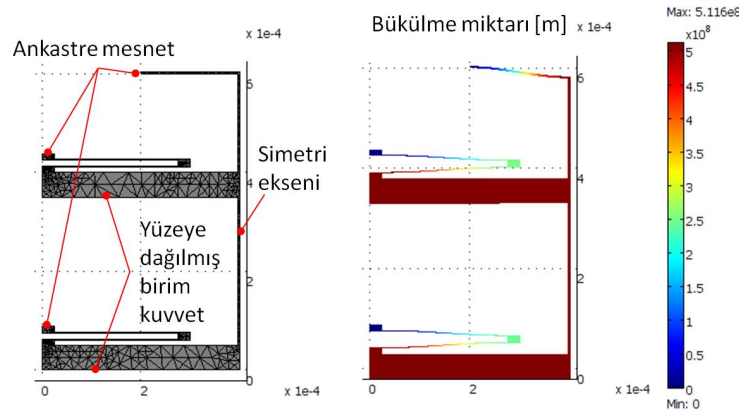
$$E = \frac{n\varepsilon t}{gA(k_{\text{yapı}}/E)}. \quad (15)$$

Yukarıda açıklanan analitik yöntem incelendiğinde ise yöntemin, direngenlik hesabında sadece dengeleyici yayların ve test kirişinin etkilerini göz önüne aldığı görülmektedir. Bu varsayımı doğrulamak için Eşitlik 15’te yer alan ( $k_{\text{yapı}}/E$ ) değeri sonlu elemanlar modeli ile hesaplanmıştır. Bu amaçla test yapısı COMSOL Multiphysics 3.5 sonlu elemanlar analizi programı kullanılarak modellenmiştir. Modelde yapının simetrisi göz önünde bulundurulmuş, malzemenin elastik modülü 1 olarak ayarlanmıştır. Modelde, tarak parmaklarının esnekliği göz önüne alınmamış, bunun yerine tarakların olduğu bölgeye sabit birim kuvvet etki ettirilmiştir. Şekil 12, yapının sonlu eleman modelini ve sınır değerlerini göstermektedir. Tablo 1, farklı

ölçülerdeki test yapıları için hem analitik hem de sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmış ( $k_{yapı}/E$ ) değerlerini listelemektedir. Sonuçlar birbiri ile uyumlu olmakla beraber, sonlu elemanlar yönteminin daha yüksek bir direngenlik hesapladığını göstermektedir. Özellikle nispeten kısa test kirişlerinde gözlenen bu sonucun, bağlantı kirişindeki uzamadan kaynaklandığı düşünülmektedir.



ŞEKİL 11. Test sonuçları ve test sonuçlarına oturtulan doğrular.



ŞEKİL 12. Yapının sonlu elemanlar modeli ve analiz sonucunda bulunan bükülme miktarı. Bükülme miktarının tersi ( $k_{yapı}/E$ ) değerini vermektedir.

Her bir test yapısı için, daha önce tespit edilen  $A$  katsayısı ve Eşitlik 14 kullanılarak elastik modül değerleri bulunmuştur. Üretim hatalarının (Şekil 7) elastik modül

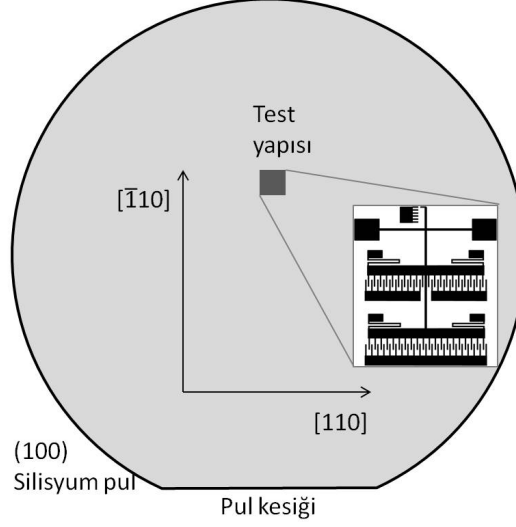
TABLO 1. Farklı test yapıları için analitik olarak ve sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan  $k_{\text{yapı}}/E$  değerleri.

$g$ ( $\mu\text{m}$ )	$w_{\text{kiriş}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$w_{\text{yay}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$L_{\text{kiriş}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$L_{\text{yay}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$k_{\text{yapı}}/E$ (m) $\times 10^{-9}$	
					analitik	sonlu elemanlar
3	4	2	500	250	0.922	1.016
3	5	2	500	250	1.702	1.866
3	4	2	400	250	1.702	1.918
3	5	2	400	250	3.227	3.644

değerinin hesabındaki etkisini ortadan kaldırmak için yapının üretim sonrası boyutları ölçülmüştür. Tablo 2, her bir test yapısının tasarım ölçülerini, üretim sonrası ölçülerini,  $A$  katsayısını ve buna bağlı olarak bulunan silisyum elastik modülünü listelemektedir. Tabloda yer alan elastik modül değerlerindeki varyasyonun üretim sonucunda meydana gelen yüzey bozukluklarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 7). Bu sonuçlar kullanılarak silisyum elastik modülü ortalama 136 GPa olarak tespit edilmiştir. Ancak silisyum elastik modülü, anizotropik kristal bir malzeme olması nedeniyle, yapının oryantasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada ise test yapıları (100) silisyum pullar üzerinde, pul kesğine paralel bir şekilde üretilmişlerdir (Şekil 13). Bu durumda, tespit edilen elastik modül değeri [110] doğrultusu için geçerlidir. Bu değer literatürde belirtilen silisyum elastik modülü değerlerinden daha düşük olmakla birlikte [10], bu farkın üretim sonucunda ortaya çıkan ölçüsel sapmalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuçlardaki sapmanın yüksek olmasına rağmen, testlerin, daha hassas bir şekilde üretilmiş yapılar ile tekrar edilmesi durumunda, elastik modül değerlerinin daha tutarlı olarak ölçülebileceği öngörülmektedir.

TABLO 2. Farklı test yapıları için tespit edilen silisyum elastik modülü ([110] doğrultusu için).

	$g$ ( $\mu\text{m}$ )		$w_{\text{kiriş}}$ ( $\mu\text{m}$ )		$w_{\text{yay}}$ ( $\mu\text{m}$ )		$L_{\text{kiriş}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$L_{\text{yay}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$A$ ( $\mu\text{m}/V^2$ )	$n$	$E$ (GPa)
	tasarım	üretim	tasarım	üretim	tasarım	üretim					
<b>1</b>	3	5.73	4	3.01	2	1.64	500	250	0.000320	123	146
<b>2</b>	3	5.43	5	3.68	2	1.66	500	250	0.000233	123	124
<b>3</b>	3	5.42	4	3.12	2	1.67	400	250	0.000231	123	106
<b>4</b>	3	5.31	5	3.90	2	1.82	500	250	0.000148	123	166
									Ortalama		136



ŞEKİL 13. (100) oryantasyonlu silisyum pul üzerinde test yapısının yerleşimi. Test kirişi [110] doğrultusunda yer almaktadır.

## 5. Sonuç

Bu makalede eyleyici, skala ve test kirişi tek bir yonga üzerinde bütünleşik bir şekilde üretilmiş bir elektrostatik mikro bükülme test yapısı sunulmuştur. Yapının bütünleşik olarak üretiliyor olması, mevcut test yöntemlerinde karşılaşılabilen hizalama problemini ortadan kaldırmaktadır. Tüm bunların yanı sıra, yapısal avantajları nedeniyle de önerilen mikro bükülme test yapısı malzeme karakterizasyonu için tercih edilebilir. Kullanılan iki uçtan ankastre mesnetli test kirişi, kuvvet-deplasman arasındaki doğrusal ilişkinin geniş bir potansiyel aralığında doğrusal kalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, hareketli elektrotları desteklemek için kullanılan dengeleyici yaylar da elektrotları yanıl “pull-in”e girmesini engellemekte, bu nedenle yapının kararlı denge durumunda kalmasını sağlamaktadır.

Tasarlanan test yapıları bir maske kullanılarak SOI pullar üzerinde üretilmiştir. Testler sonucunda silisyumun elastik modülü ortalama 136 GPa olarak bulunmuştur. Her ne kadar test yapıları silisyum karakterizasyonu için kullanılmış olsa da aynı yapı diğer MEMS malzemelerinin karakterizasyonu için de kullanılabilir. Örneğin, yine yüksek MEMS yapıları için tercih edilen elektro kaplama yöntemi ile üretilmiş test yapılarında nikel veya bakır karakterizasyonu yapmak da mümkün olabilir.

**Teşekkür.** Test yapılarının üretimi ve testlerdeki katkılarından dolayı Dr. Said Emre Alper’e ve üretimdeki katkılarından dolayı Kıvanç Azgın’a teşekkürlerimizi sunarız.

## Kaynaklar

- [1] T. Yi and C.-J. Kim, Measurement of mechanical properties for MEMS materials, *Measurement Science and Technology* **10** (1999), 706–716.
- [2] T. Tsuchiya, Evaluation of mechanical properties of MEMS materials and their standardization, *Reliability of MEMS*, Wiley-VCH 2008, 1–25.
- [3] M. A. Haque and M. T. A. Saif, Microscale materials testing using MEMS actuators, *Journal of Microelectromechanical Systems* **10** (2001), 146–152.
- [4] M. A. Haque and M. T. A. Saif, Mechanical behavior of 30-50 nm thick aluminum films under uniaxial tension, *Scripta Materialia* **47** (2002), 863–867.
- [5] T. P. Weihs, S. Hong, J. C. Bravman and W. D. Nix, Mechanical deflection of cantilever microbeams: A new technique for testing the mechanical properties of thin films, *Journal of Materials Research* **3** (1988), 931–942.
- [6] S.-H. Lee, J. W. Evans, Y. E. Pak, J. U. Jeon and D. Kwon, Evaluation of elastic modulus and yield strength of Al film using an electrostatically actuated test device, *Thin Solid Films* **408** (2002), 223–229.
- [7] E. Yildirim, *Development of Test Structures and Methods for Characterization of MEMS Materials*, Master Thesis, Middle East Technical University, Ankara 2005.
- [8] S. D. Senturia, *Microsystem Design*, Springer 2001.
- [9] W. Young, R. Budynas and A. Sadegh, *Roark's Formulas for Stress and Strain*, Mcgraw-Hill 2011.
- [10] M. A. Hopcroft, W. D. Nix and T. W. Kenny, What is the Young's modulus of silicon? *Journal of Microelectromechanical Systems* **19** (2010), 229–238.

