



XVIII. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ  
26 - 30 Ağustos 2013, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa

## MEMS TABANLI KUVVET ALGILAYICILARI İLE MİKRO- NEWTON MERTEBESİNDE ÖLÇÜM

Zuhal Taşdemir, Gökhan Nadar, B. Erdem Alaca

Koç Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34450, Sarıyer, İstanbul

### ABSTRACT

With the continuous advances in the field of nanotechnology, both force generation and force measurement techniques at micro and nano scales are widely employed in industry and academia. The proposed force measurement system of this work consists of a monolithic flexural part and a sensor with the three-electrode geometry, namely “tri-plate geometry”, for capacitive displacement sensing. One of these sets of electrodes is movable, whereas the remaining two are fixed. Displacement of the movable set of electrodes induced by an external source results in a capacitive difference in between movable and fixed set of electrodes. This displacement is then sensed on the movable stack as a DC voltage output by applying an AC voltage of  $180^0$  phase difference to the two fixed electrode sets. In this study, we propose a design of a force sensor which is able to detect a maximum force of  $30 \mu\text{N}$ . To verify the design, finite element simulations are carried out and shown to be in agreement with the design criteria. As a final step, fabrication of the force sensor will be carried out.

### ÖZET

Nanoteknolojideki gelişmeler sayesinde mikro ve nano seviyesindeki küçük ölçeklerde kuvvet üretimi ve üretilen kuvvetin ölçülmesi hem endüstrinin hem de akademinin ilgi alanına girmektedir. Bu çalışmada önerilen kuvvet ölçümü sistemi, yekpare olarak üretilmiş bir yay sistemi ve üçlü algılayıcı elektrot geometrisinden meydana gelmektedir. Bu elektrot kümelerinden ikisi sabit, birisi hareketli durumdadır. Dış bir kuvvetten uygulanan tahrik sonucunda oluşan yer değiştirme, hareketli elektrot kümesinin sabit kümelerine göre yer değiştirmesine sebep olur. Bunun sonucunda sistemde oluşan sığa değişimi, sabit elektrot kümelerine uygulanan ve  $180^0$  faz farkına sahip olan AC gerilimi neticesinde hareketli plakadan DC gerilimi olarak okunur. Bu çalışmada en fazla  $30 \mu\text{N}$  kuvveti okuyabilen bir kuvvet algılayıcı tasarımı gerçekleştirildi. Tasarım kriterlerini kontrol etmek amacıyla sonlu elemanlar yazılımı ile yöntem doğrulaması sağlandı. Bir sonraki adım olarak, tasarımı yapılan kuvvet algılayıcı, mikro-üretim yöntemleri kullanılarak imal edilecektir.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde nanoteknolojinin hızla yaygınlaşmasıyla birlikte küçük ölçekte kuvvet ölçümünün değeri ve önemi gittikçe artmaktadır. Örneğin biyoteknoloji alanında biyolojik moleküller arasında oluşan etkileşim kuvvetlerinin ölçümünde atomik kuvvet mikroskobu (AFM) tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Bu alanda ölçülen kuvvet değerleri pico-Newton ve nano-Newton seviyelerinde seyretmektedir. Malzeme bilimi alanında ise genellikle mikro elektromekanik sistem (MEMS) tabanlı uygulamalar oldukça rağbet görmektedir [2]. Özellikle küçük ölçekli uygulamalarda sıklıkla kullanılan malzemelerin küçük boyutlardaki mekanik davranışları büyük ilgi çekmektedir. MEMS tabanlı kuvvet ölçümü testleri genellikle mikrometre seviyesindeki numuneleri kapsamaktadır. Yakın gelecekte bu alanda başlıca çözülmesi gereken sorun, nanometre seviyelerinde numuneler üzerinde mikrometre seviyesinde MEMS cihazlar kullanılarak ölçüm yapılması olacaktır. Buradaki en büyük zorluk, nanometre seviyesindeki numune ile mikrometre seviyesinde ölçüm sisteminin aynı anda ve tümleşik üretimi ve çok küçük boyutlardaki numunenin birkaç nanometre seviyesindeki yer değiştirmesini ölçebilecek hassasiyette kuvvet algılayıcıları tasarımı ve üretimidir. MEMS tabanlı sistemler kullanılarak şu ana kadar mikro-Newton seviyelerinde kuvvet ölçülebilmektedir. Fen bilimleri alanında ise en büyük merak konusu Casimir kuvvetinin gerçeğe en yakın şekilde ölçülebilmesidir. Özellikle mikron-altı seviyelerdeki boyutlarda etkili olan bu kuvvetin miktar olarak ölçülebilmesi küçük ölçekte meydana gelen şu anki fizik bilgilerimizle bilemediğimiz birçok konunun anlaşılmasına ışık tutacaktır [3], [4].

## 2. YÖNTEM

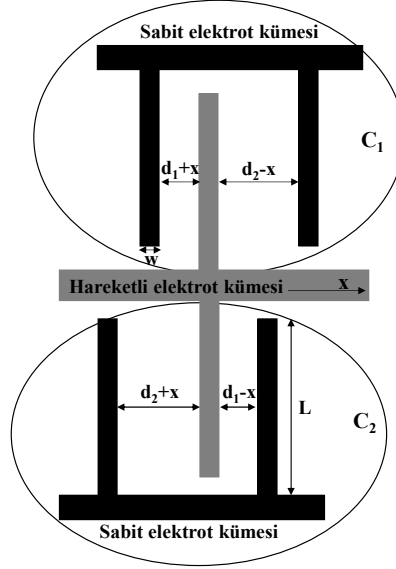
Bu çalışmada tasarlanan kuvvet algılayıcısı dışarıdan gelen tahrik sayesinde oluşan yer değiştirmeyi gerilime çevirebilen bir çevirici (transdüser) olarak da düşünülebilir. Tasarlanan çevirici, yer değiştirmeyle meydana gelen hareketi iki sabit ve arada kalan bir hareketli algılayıcı elektrot kümesi arasında diferansiyel sığa farkı meydana getirir. Literatürde bu geometriye üçlü plaka geometrisi adı verilmektedir [5]. Şekil 1’de gösterildiği üzere, söz konusu geometri, birbiri içine geçmiş yatay yönde asimetrik, hareketli ve sabit algılayıcı elektrotlardan meydana gelir. Şekilde “ $w$ ” ile gösterilen uzunluk elektrotların enini, “ $L$ ” elektrotların boyunu, “ $d_1$ ” ve “ $d_2$ ” ise başlangıçtaki elektrotlar arasındaki boşlukları simgeler. Tahrik sonucunda meydana gelen “ $x$ ” kadar yer değiştirme sonrası elektrot arası mesafelerde değişim, Şekil 1’de gösterildiği gibidir. Algılayıcının kalınlığı “ $h$ ” ile ve toplam algılayıcı elektrot sayısı “ $N$ ” ile gösterilecek olursa, “ $x$ ” kadar tahrik sonucu meydana gelen sığa farkı ( $\Delta C$ ) şu şekilde yazılabilir:

$$\Delta C = N(C_1 - C_2)$$

$$C_1 = \epsilon_0 \frac{hL}{(d_1 + x)} + \epsilon_0 \frac{hL}{(d_2 - x)}$$

$$C_2 = \epsilon_0 \frac{hL}{(d_2 + x)} + \epsilon_0 \frac{hL}{(d_1 - x)}$$

$$\Delta C = 2NhL\epsilon_0 x \left[ \frac{1}{d_1^2 - x^2} - \frac{1}{d_2^2 - x^2} \right] \quad (1)$$

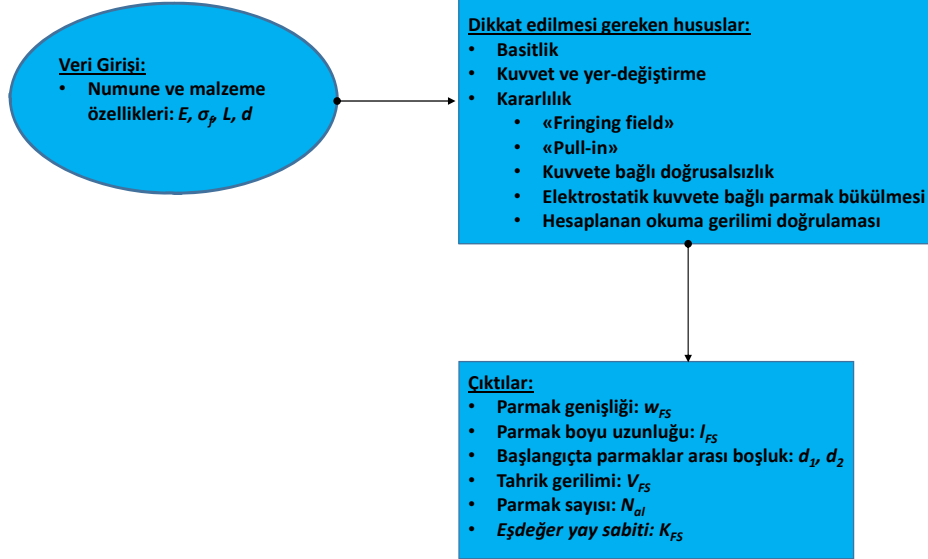


**Şekil 1.** Algılayıcı elektrotların şematik gösterimi

Sabit plakalara  $180^\circ$  faz farkı ile ve düşük frekansta bir AC sinyal uygulandığında, sığa farkı hareketli parmak üzerinde AC sinyale dönüştürülebilir ve ölçüm, AC potansiyel şeklinde yapılabilir. Bu ölçüm değeri,  $V_{okuma}$ , şu şekilde yazılabilir:

$$V_{okuma} = aV_{FF}\Delta C = 2aN\epsilon_0hLV_{FF}\left(\frac{1}{d_1^2 - x^2} - \frac{1}{d_2^2 - x^2}\right)x \quad (2)$$

Algılayıcı tasarımı Şekil 2'de gösterilen algoritma ile yapılmaktadır. Ölçülmesi istenen numune ve malzeme bilgileri kullanılarak, sonraki başlıklarda anlatılacak olan denklemlerle ve kriterlerle nihai tasarımlara ulaşılmaktadır.



**Şekil 2.** Algılayıcı tasarım algoritması

(2) numaralı denklemde,  $V_{okuma}$  algılayıcıdan ölçülen voltaj değerini,  $V_{FS}$  sabit parmaklar üzerine uygulanan AC sinyal genliğini,  $a$  ise arayüz dinamiklerine bağlı olarak değişen bir katsayıyı belirtmektedir.

## 2.1. Analitik İşlemler

Küçük ölçekteki bir numunenin, örneğin bir nanotelin, üzerine etkiyen kuvveti ölçmek için kullanılacak olan algılayıcıların tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar bu paragrafta tartışılacaktır. Kuvvet ölçümü yapılacak olan numunenin yarıçapı  $d_s$ , uzunluğu  $l_s$ , kırılma kuvveti  $\sigma_f$ , kesit alanı  $A$  ile gösterilmektedir.

Tasarımlar bir dizi formülün MATLAB yardımı ile bir araya getirilmesi ile belirlenmiştir. MATLAB ortamında yazılan kodda ilk olarak numune malzeme bilgileri (kırılma mukavemeti & elastisite), tasarımı yapılacak numune bilgileri (yarıçap- $d_s$ -, uzunluk- $l_s$ -), kullanılacak SOI (Silicon-on-insulator) pulun üst tabaka kalınlığı ve önceden kullanılacağı düşünülen cihazın ölçebileceği en küçük gerilim bilgisi yazılır.

Bilgilerin girilmesi ile birlikte, ilk olarak (3) numaralı denklem ile, numunenin kırılması için gereken kuvvet hesaplanır.  $F_s$  numunenin kırılma kuvveti,  $\sigma_f$  numunenin kırılma gerilimi,  $A$  ise numunenin kesit alanını belirtir.

$$F_s = \sigma_f A \quad (3)$$

Numune ile algılayıcı birbirlerine seri bağlı olduğundan üzerlerindeki kuvvet de aynı olacağından, numunenin kırılma kuvveti aynı zamanda algılayıcı üzerine aynen aktarılacaktır. Sonraki hesaplamalarda (4) numaralı denklemdeki eşitlik kullanılmıştır.  $F_{fs}$ , algılayıcı üzerindeki kuvveti belirtmektedir.

$$F_s = F_{fs} \quad (4)$$

Bu aşamadan itibaren geri kalan tüm işlemler MATLAB ortamında *for* döngüsü içerisinde yapılmaktadır. Yedi adet iç içe döngü ve bu döngüler içindeki kontrol kriterleri ile nihai tasarım değerlerine ulaşılmaktadır. Yapılan her bir döngüde parmak genişliği ( $w_{FS}$ ), parmak uzunluğu ( $l_{FS}$ ), veri sayısı ( $N_{data}$ ), Şekil 1’de belirtilen  $d_1$  ve  $d_2$ , algılayıcı yay sabiti ve algılayıcıya uygulanacak olan AC gerilimi değiştirilerek hesaplamalar tekrar edilmektedir.

İşlemlerin çokluğu bakımından genel bilgi kısmında “x” olarak kullanılan algılayıcı yer değiştirmesi sonraki formüllerde  $x_{FS}$  ve  $x_{FSmax}$  olarak kullanılacaktır. İç içe yapılan döngülerde ilk olarak (5) numaralı denklem ile numunenin kırılma anına kadar olan süre içerisinde algılayıcının toplam hareket miktarı hesaplanır ( $x_{FSmax}$ ). Bulunan değer sonradan kullanılmak üzere  $d_1$  ile oranlanır, (6). Bu değer algılayıcının kuvvete bağlı doğrusalsızlığının hesaplanması sırasında kullanılmaktadır. Bununla birlikte, (7) numaralı denklem ile ise her bir veri adımına karşılık gelen algılayıcı hareketi hesaplanır.

$$x_{FSmax} = \frac{F_{FS}}{k_{FS}} \quad (5)$$

$$\bar{x}_{max} = \frac{x_{FSmax}}{d_1} \quad (6)$$

$$x_{FSstep} = \frac{x_{FSmax}}{N_{data}} \quad (7)$$

Sonrasında, algılayıcının parmak sayısını hesaplamak için (8) numaralı denklem kullanılır. Bu formülde  $\Delta C_{\min}$ , gerekli cihazlar kullanılarak ölçülebilecek minimum sığa değerini belirtmektedir. Birim harekette elde edilmesi gereken  $\Delta C_{\min}$  sığa değerini vermesi gereken parmak sayısı hesaplanmaktadır. Bulunan parmak sayısı, hareket sonunda oluşacak olan sığa değişiminin hesaplanmasında kullanılmıştır.

$$N = \frac{\Delta C_{\min}}{\frac{1}{d_1^2 - x_{FFS_{atey}}^2} - \frac{1}{d_2^2 - x_{FFS_{atey}}^2}} \frac{1}{2\epsilon_0 h L x_{FFS_{atey}}} \quad (8)$$

Algılayıcının denge analizi, 3'lü plaka sisteminden dolayı karmaşıktır. Algılayıcı için elektrostatik kuvvet ( $F_{es\_al}$ ) ve dengeleyici mekanik kuvvet şu şekilde yazılabilir:

$$F_{es\_al} = 2N\epsilon_0 h L x_{FFS} V_{FS}^2 \left( \frac{d_1}{(d_1^2 - x_{FFS}^2)^2} + \frac{d_2}{(d_2^2 - x_{FFS}^2)^2} \right) \quad (9)$$

$$F_{mek} = k_{FFS} x_{FFS} \quad (10)$$

Denklemlerde  $F_{mek}$  mekanik dengeleyici kuvvet,  $k_{al}$  algılayıcı eşdeğer yay sabitini,  $x_{FFS}$  algılayıcının, numunenin kırılma anına kadar yaptığı, herhangi bir andaki yer değişimini göstermektedir.

Pull-in voltaj ve yer değiştirme değerlerinin hesabı için bir kaç varsayım yapılmıştır.  $\delta$ , elektrostatik kuvvet ve dengeleyici mekanik kuvvetin birbirine oranıdır.  $F_t=ma$  harici kuvvet,  $b$  değeri  $d_2$  ve  $d_1$ 'in oranı,  $\tilde{x}$  ise  $x$  ve  $d_1$ 'in oranı olarak ele alınmıştır. Yeni değişkenler hesaba katıldığında, sistem denklemleri şu şekilde indirgenebilir, (11) ve (12):

$$\delta = \frac{2V_{FS}^2 N \epsilon_0 A}{k_{FFS} d_1^2} \quad (11)$$

$$\frac{F_t}{k_{al} d_1} = \tilde{x} \left( 1 - \delta \left[ \frac{1}{b^2 \left(1 - \frac{\tilde{x}^2}{b^2}\right)^2} + \frac{1}{(1 - \tilde{x}^2)^2} \right] \right) \quad (12)$$

$\frac{F_t}{k_{al} d_1}$  bir fonksiyon gibi düşünülüp grafik çizildiğinde ya da denklemin analitik çözümü ile cihazın yer değiştirmedeki kritik noktası bulunabilir.

Algılayıcının kuvvete bağlı doğrusalsızlığı (13) ve elektrostatik kuvvete bağlı parmak bükülmesine bağlı yer değiştirme hesaplamaları (14) da bir sonraki başlıkta gösterilecek olan kontrol kriterleri bakımından önemlidir.

$$NL_F(\tilde{x}) = \frac{\tilde{x}}{\tilde{x}_{\max}} \left\{ \frac{\left( \frac{1}{1 - \tilde{x}^2} - \frac{1}{b^2 - \tilde{x}^2} \right)}{\left( \frac{1}{1 - \tilde{x}_{\max}^2} - \frac{1}{b^2 - \tilde{x}_{\max}^2} \right)} \left[ 1 - \delta \left( \frac{b}{(b^2 - \tilde{x}^2)^2} + \frac{1}{(1 - \tilde{x}^2)^2} \right) \right]}{\left[ 1 - \delta \left( \frac{b}{(b^2 - \tilde{x}_{\max}^2)^2} + \frac{1}{(1 - \tilde{x}_{\max}^2)^2} \right) \right]} \right\} \quad (13)$$

$$k_{vakülasyon} = \frac{3L^3 \epsilon_0 V_{FS}^2}{k_{al}} \left( \frac{d_1}{(d_1^2 - x_{FFS_{\max}}^2)^2} + \frac{d_2}{(d_2^2 - x_{FFS_{\max}}^2)^2} \right) \frac{x_{FFS_{\max}}}{EW^3} \quad (14)$$

Algılayıcı tasarımında son olarak, cihazın toplam kapasitansı (15), hareket sonucu oluşan okuma potansiyeli (2) ve yer değiştirmeye bağlı algılayıcı hassasiyeti (16) hesaplanmıştır.

$$C_{\text{top}} = 2N\epsilon_0 Lh \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right) \quad (15)$$

$$S = \frac{V_{\text{okuma}}}{\frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{max}} k_{\text{st}}}{k_s l_s}} \quad (16)$$

## 2.2. Tasarım Kriterileri

Algılayıcı tasarımı yapılırken çeşitli kriterler dikkate alınmalıdır. En önemli kriterler, ölçüm yapılacak numunenin kırılması için gereken kuvvet ve yer değiştirme verileri, cihazın sadeliği, cihazın dengesi, ve ölçümlerdeki doğrusalsızlıklar olarak belirtilebilir.

### 2.2.1. Kuvvet ve Yer Değiştirme Verileri

Numunenin boyutları, kırılma için gereken kuvvet ve neticesinde oluşacak olan yer değiştirme verilerini direkt olarak etkilemektedir. Dolayısıyla kullanılacak olan numunenin boyutlarını önceden bilmek tasarımda kullanılacak parmak sayısı, genişliği, boyu vb. bilgileri uygun bir şekilde düzenlemeye olanak sağlayacaktır.

### 2.2.2. Cihaz Basitliği

Tarak parmakları sayısındaki artma, cihazın karmaşıklığının artmasına sebep olur. Bu karmaşıklık üretim sırasında meydana gelebilecek hataların artmasına yol açacaktır ve sonuç olarak hatalı çalışan ve/veya hiç çalışmayan cihaz üretimine sebep olacaktır. Bu nedenle, parmak sayısını olabildiğince düşük tutmak bu tip sorunların üstesinden gelecektir. Bu sebeple (8) numaralı denklem ile hesaplanan parmak sayısı numunenin boyutlarına göre farklılık göstermek üzere, birinci tasarım için en çok 3500, diğer tasarımlar için ise 1000 olarak belirlenmiştir. İlk tasarım daha küçük mertebedeki kuvvet ölçümü için tasarlandığından algılayıcının doğru ve güvenilir bir şekilde veri alabilmesi için parmak sayısı yüksek tutulmuştur.

### 2.2.3. Cihaz Kararlılığı

Tasarım sırasında kullanılan denklemlerden çıkan sonuçlar, cihaz kararlılığını sağlayabilmek amacı ile bir dizi kontrol mekanizmasına tabii tutulmaktadır. Bu mekanizma, fringing field, pull-in, kuvvete bağlı doğrusalsızlık, elektrostatik kuvvete bağlı parmak bükülmesi ve hesaplanan okuma gerilimi doğrulaması kontrollerini kapsar.

#### *Fringing field*

Önceden 6 numaralı denklem ile hesaplanan  $\bar{x}_{\text{max}}$  değeri 0.5'ten büyük olmamalıdır. 0.5 değeri önceden yapılan bir dizi grafik analizi sonucunda öngörülmüştür.

#### *Pull-in*

Cihaz çalışma prensibi elektrostatığe dayanmasından dolayı dengelilik bir problem olarak ortaya çıkabilmektedir. Elektrostatik kuvvet, parmaklar arası mesafenin tersinin karesi ile orantılı olarak artar iken, dengeleyici mekanik kuvvet doğrusal olarak artmaktadır. Dolayısıyla, parmakların yer değiştirmesinin belirli bir anında voltaj değişimine bağlı olarak, parmakların birbirine uyguladığı çekim kuvveti dengeleyici mekanik kuvvetten fazla olur ve

cihaz işlevini yerine getiremez duruma gelir. Bu duruma pull-in adı verilmektedir. Bu yüzden, (12) numaralı denklemin sonucunu bir dizi gibi düşünürsek, bu dizinin en büyük değerine karşılık gelen indeks değeri  $\tilde{x}_{max}$  'tan büyük olmamalıdır.

### ***Kuvvete Bağlı Doğrusallıktan Sapış***

(13) numaralı denklem kullanılarak hesaplanan doğrusalsızlık yüzdesinin, %5'i geçmemesi öngörülmüştür.

### ***Elektrostatik Kuvvete Bağlı Parmak Bükülmesi***

(14) numaralı denklem sonucu bulunan parmak bükülmesi  $d_1$  ile algılayıcı hareketinin farkından küçük olmalıdır.

### ***Hesaplanan Okuma Gerilimi Doğrulaması***

Hesaplanan okuma gerilim değeri ( $V_{okuma}$ ), önceden belirlenmiş olan en küçük gerilim değeri ( $V_{out\_min}$ ) ile alınması istenen veri sayısının ( $N_{data}$ ) çarpımından büyük olmalıdır. Tasarımı tamamlanan kuvvet algılayıcısı daha sonra çeşitli mikro üretim süreçleri kullanılarak temizoda koşullarında üretilenlerdir. Üretimleri için izlenecek adımlar, Şekil 3'te verilmiştir.

## **3. ELDE EDİLEN TASARIMLAR**

Yukarıda izlenen yöntem ve uygulanan kontrol mekanizmaları ile dört ayrı kuvvet algılayıcı tasarımı yapılmıştır. Bu algılayıcılar için belirlenen geometriler, Tablo 1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Tasarım geometrileri

	w [ $\mu\text{m}$ ]	L [ $\mu\text{m}$ ]	$d_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d_2$ [ $\mu\text{m}$ ]	$k_{FS}$ [N/m]	Uygulanan Gerilim [ $V_{FS}$ ]	Hassasiyet [ $V/(\mu\text{m}/\mu\text{m})$ ]	N
Algılayıcı 1	5	200	4.5	23.75	4.5	2	0.65	3169
Algılayıcı 2	5	200	2.25	11.25	10	2	3.26	395
Algılayıcı 3	5	200	2	10	18	2	5.46	220
Algılayıcı 4	5	200	2	10	76	2	3.74	314

## **4. MİKRO- İMALAT**

Mikro imalat, 4'' SOI (Silicon-on-Insulator) pul kullanılarak yapılmaktadır. SOI pul, 10  $\mu\text{m}$  cihaz katmanı, 1  $\mu\text{m}$  gömülü silisyumdioksit (BOX) ve 380  $\mu\text{m}$  alttaş katmanından oluşmaktadır. Üretim aşamasında yapılan ilk işlem, HMDS ile SOI pulun hazırlanmasıdır. HMDS sonrasında, SOI pulun cihaz katmanı 5  $\mu\text{m}$  AZ 92xx isimli pozitif fotorezist ile kaplanmak üzere EVG 150 cihazına yerleştirilir. Fotorezist kaplaması bitimiyle birlikte, fotolitografi adımına geçilmeden önce fotorezistin kuruması için beklenir ve fotolitografide sorun olmaması için baloncuk olup olmadığı kontrol edilir. Fotolitografi, önceden yazılmış olan krom maskedeki yapıların fotorezist üzerine işlenmesi ile gerçekleşir. Bu işlem için Süss MA6/BA6 çift taraflı maske hizalayıcısı kullanılmaktadır. Cihaz katmanı fotorezist kaplı SOI pul, bu cihaz içerisinde 17.5 saniye boyunca "hard contact" ile UV ışımına maruz bırakılır ve

krom maske üzerindeki yapılar fotoreziste aktarılır. “Hard contact” kullanılması daha iyi bir çözünürlük sağlanabilmesi içindir, (Şekil 3-i).

Fotolitografi sonrasında krom maskedeki yapıların fotorezist üzerine baskılanmasının tamamlanabilmesi için SOI pulu tekrar EVG 150 cihazına yerleştirilir. Uygun yazılım ile birlikte fotorezistin fotolitografi sırasında kimyasal değişime uğramamış kısımları bu basamakta ortadan kaldırılır. UV ışını etkisiyle kimyasal değişikliğe uğramış olan fotorezist ise ileriki basamakta maske olarak kullanılır.

Cihaz katmanında bulunan 10 µm silisyum'un, maskenin belirlediği yapı kalmak koşulu ile aşındırılması için SOI pul, Alcatel AMS 200 DSE cihazına yerleştirilir. SOI accurate ++ programı ile aşındırma işlemi gerçekleştirilir (BOSCH süreci). Aşındırma için gereken süre, cihazın o hafta başında yapılan kalibrasyonuna göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu proses sonucunda üretilmesi planlanan cihaz ortaya çıkar, (Şekil 3-ii).

Sonraki üretim basamaklarında yürütülecek işlemlerde SOI pul ters çevirilip cihaz katmanı üzerine yerleştirileceği için, bir önceki basamakta silisyum aşındırması ile elde edilen cihazların zarar görmemesi ve alttaş katmanı silisyum aşındırması sırasında oluşacak olan yüksek gerilmeye karşı SOI pulun rijitliğinin korunması adına cihaz katmanının Parylene adlı malzeme ile kaplanması gerekir. Bu malzeme pul üzerinde diğer üretim basamakları süresince muhafaza edilecektir, (Şekil 3-iv).

SOI pulun alttaş katmanı için izlenecek olan yöntem cihaz katmanında uygulananlar ile aynıdır. Sadece, kaplama kalınlığı ve süresi gibi etmenler değişmektedir. Kaplaması biten fotoreziste maske özelliği kazandırabilmek için yapılan fotolitografi Süss MA6/BA6 cihazında gerçekleştirilmektedir. Fakat, cihaz katmanında yapılan fotolitografiden farklı olarak bu kısımda hizalama yapılması gerekir. Alttaş katmanı silisyum aşındırması için gereken maske fotoreziste aktarılmış olur. Bu maske ile üretilen cihazların hareketli kısımlarının altında kalan alanın açılması amaçlanmıştır. Fotorezist üzerine yapılan maske baskılamasının son aşaması olarak, SOI pul tekrar EVG 150 cihazına yerleştirilir ve uygun program ile fotolitografi sırasında UV ışınına maruz kalmayan kısımlar AZ92xx puldan uzaklaştırılır. Böylece pulda sadece maske kalmış olur, (Şekil 3-v).

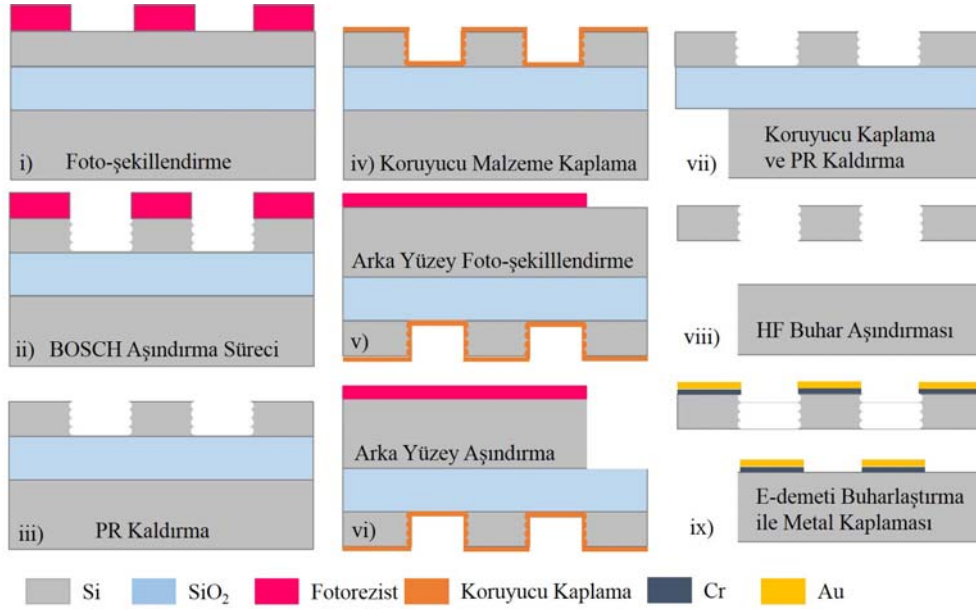
Arka yüzeyde aşındırılması gereken silisyum kalınlığı 380 µm'dur. Aşındırma için gereken süre Alcatel AMS 200 DSE cihazının o haftaki kalibre edilmiş aşındırma hızına göre SOI accurate ++ programı ile 115 dakika 20 saniyedir. Bu süre sonunda, cihaz katmanında ortaya çıkan cihazların altı açılmış olur, (Şekil 3-vi).

Bir sonraki basamak fotolitografi ile kimyasal değişikliğe uğratarak maske görevi gören fotorezist ile birlikte cihazları ve pul içi gerilme dengesini korumakla görevli Parylene tabakasının kaldırılmasıdır. Tepla GiGAbatch isimli cihazda oksijen plazma yardımı ile bu malzemelerin kaldırılması sağlanır. Bu aşamada, bir kesici yardımı ile SOI pul, çipler halinde kesilir ve sonraki mikro imalat aşamalarına çip seviyesinde devam edilir, (Şekil 3-vii).

SOI pulun her iki tarafındaki silisyum aşındırma işlemi de bittikten sonra, sıra gömülü silisyumdioksit (BOX) tabakasının kaldırılmasına gelir. BOX katmanının kaldırılması için HF buharı kullanılır. Bu, kuru bir işlemdir. Üretilen yapıdaki parmakların kimyevi sıvılar ile birbirine yapışmasını engellemek amacı ile silisyumdioksit'in kuru aşındırılması tercih edilir. 3 saatlik kuru aşındırma ile silisyumdioksit tabakası yok olur ve cihaz katmanında üretilen



cihazlar yay çapalarından ve parmak duvarlarından destekli olmak üzere havada yüzmeye başlarlar, (Şekil 3-viii).



**Şekil 3.** Kuvvet algılayıcı üretim süreç adımları

Son aşama, üretimi tamamlanmış olan çip seviyesindeki cihazların karakterizasyonunun yapılabilmesi için iletken özelliğe sahip olan altın ile kaplanmasıdır. Laybold Optics LAB 600H cihazında e-demeti evaporasyonu ile 3 saatlik işlem sonucunda, altta 10 nm krom olmak üzere, 300 nm altın kaplaması tamamlanır, (Şekil 3-ix).

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, küçük ölçekli uygulamalarda kullanılmak üzere, mikro-Newton seviyesindeki kuvvet değerlerini ölçebilmek için kullanılan MEMS tabanlı üçlü plaka sistemine dayanan algılayıcı tasarımı için gerekli yöntem, tasarım kriterleri ve mikro imalatı anlatılmıştır. Tasarım sonucunda oluşturulan algılayıcıların kuvvet çalışma aralıkları ve hassasiyetleri Tablo 2' de verilmiştir. Hassasiyetleri yaklaşık olarak 1 [V/ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )] ile 6 [V/ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )] arasında değişmektedir. Öngörülen mikro imalatın gerçekleştirilmesini takiben, söz konusu MEMS tabanlı kuvvet algılayıcılarının karakterizasyonu ve kalibrasyonu gerçekleştirilecektir.

**Tablo 2.** Tasarlanan algılayıcıların kuvvet çalışma aralığı ve hassasiyetleri

	Kuvvet Çalışma Aralığı [ $\mu\text{N}$ ]	Hassasiyet [V/ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )]
<b>Algılayıcı 1</b>	1	0.65
<b>Algılayıcı 2</b>	5	3.26
<b>Algılayıcı 3</b>	10	5.46
<b>Algılayıcı 4</b>	30	3.74

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Willemsen O. H. *et al.*, “Biomolecular Interactions Measured by Atomic Force Microscopy”, *Biophysics Journal*, 79, 3267-3281, 2000.
- [2] Hemker K.J. ve Sharpe W.N., “Microscale Characterization of Mechanical Properties”, *Annu.Rev. Mater. Res.*, 37, 93-126, 2007.
- [3] Hertlein C., Helden L. *et al.*, “Direct Measurement of Critical Casimir Forces”, *Nature Letters*, 451 (10), 2008.
- [4] Bressi G. *et al.*, “Measurement of the Casimir Force between Parallel Metallic Surfaces”, *Physical Review Letters*, 88 (4), 2002.
- [5] Sun Y. *et al.*, “Characterization of a Fruit Fly Flight Behavior using a Microforce Sensor with a New Comb-drive Configuration”, *J. MicroelectroMech. Syst.* 14 (1), 4-11, 2005.