

Piezoelektrik Ara Malzemeli İnce Şeridin Dalga Hareketinin Simülasyon Tabanlı Analizi

Mehmet Emre Büyükçerçi¹, Serhat Adilak², Serhat Yeşilyurt³

¹Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Sabancı Üniversitesi, İstanbul
emreb@su.sabanciuniv.edu

²Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Sabancı Üniversitesi, İstanbul
sadirak@su.sabanciuniv.edu

³Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Sabancı Üniversitesi, İstanbul
syesilyurt@sabanciuniv.edu

Özetçe

Elastik bir şerit ya da kuyruğun hareketli dalgalanması çeşitli alanlarda kullanılabilir. Mikro kanallarda istenilen akışı yaratmak üzere kullanılabilmesi gibi mikroorganizmaların ilerlemesini sağlayan yapılardan biri de bu dalgalanma hareketidir. Kuyruğun bu hareketi organizmanın içinde bulunduğu akışkanda dalgalanma meydana getirerek hareketi sağlar. Bu çalışmada bükülen piezoelektrik (bending piezoelectric) malzemenin ince alüminyum plakalar arasına yerleştirilmesiyle elde edilen kuyruğun hareketli dalgalanmasının özellikleri simülasyonlarla incelenmiş, azami dalgalanma miktarı elde edilmeye çalışılmıştır. Simülasyonlar sonlu eleman analizi yöntemiyle yapılmış, dalga boyu, kuyruk uzunluğu ve kalınlığı, piezoelektrik malzeme sayısı gibi değişken değerler göz önünde bulundurularak incelenmiştir.

1. Giriş

Mikro akış elemanları tıbbi, biyoteknoloji ve uzay çalışmalarında kullanılması yaygınlaşmaktadır. Mikro pompaların kullanıldığı bu alanlarda istenilen akışı elde etmenin bir yolu da hareketli dalgalanmadır. Hareketli dalgalanmayı elde etmek için piezoelektrik malzemelerden yararlanır. Piezoelektrik malzemeler üzerine uygulanan mekanik zorlamaya gerilim üreterek tepki verir, malzemenin bu özelliği tersinirdir. Bükülme/sapma özelliklerine göre değişik türleri bulunan piezoelektrik malzemeler eyleyici olarak kullanılabilir. Örneğin bükülen piezoelektrik eyleyicilerin kullanımı özellikle pozisyon kontrolü gerektiren çeşitli alanlarda, hoparlörlerde, gürültü kontrolünde, basınç algılamasını gibi alanlarda gittikçe yaygınlaşmaktadır [1]. Bunun basit nedenlerinden biri ise piezoelektrik malzemelerin uygun yapısal özellikleri ve kontrol edilebilir sapma/saptırma/eğilme davranışlarıdır. Yapılan çalışmada bu özelliklerden yola çıkarak piezoelektrik malzemenin bükülmesi esas alınmış ve malzeme ince alüminyum tabakalar arasına eşit boşluklarla yerleştirilmiş ve kalan boşluklar da

köpükle doldurulmuştur. Üzerine potansiyel farkı uygulanan piezoseramikler yatay ekseninde sapsınma neden olmakta, bu sapsınmalar da ara dolgu malzemesi köpüklerin itilmesine ve saptırılmasını sağlamaktadır. Bu şekilde her piezoseramik ve köpük içine zincirleme meydana gelen olay alüminyum plakaların bükülmesine sebep olmuştur. Bükülmelerin sürekli olması esastır, kesikli veya yerel bükülmeler istenilen sonucu vermeyecektir. Şeridin bu sürekli bükülmeler sonucunda dalgalanması alçak ve yüksek basınç alanları oluşturur ve bu dalgalanma periyodik uygulanınca basınç alanları şeridin sapsınma yönünde değişerek dalgaların yayıldığı yönde net bir akış oluşturur [2]. Devamlı net akış sperm gibi mikroorganizmaların hareketini sağladığı gibi mikro kanallarda da kullanılabilir.



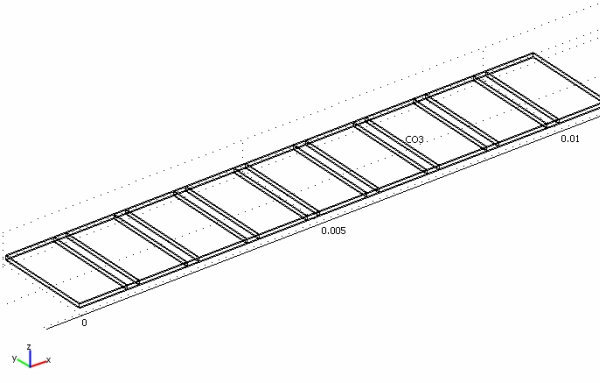
Şekil 1: 3 boyutlu sperm modeli

Belirtilen şekilde oluşturulan sistemin analizi bir dizi simülasyon üzerinden yapılmıştır. Çeşitli çözüm yöntemleri

kullanarak sonlu eleman analizi yapan COMSOL isimli bilgisayar programı kullanılarak çeşitli simülasyonlar elde edilmiş, şeridin boyutları, piezoelektrik malzemelerin sayısı, yeri ve arasındaki boşluk, voltaj, dalga boyu ve frekans gibi değişkenlerin farklı değerleri için sonuçlar bulunmuştur. Tüm çalışma boyunca üzerinde durulan konu azami kıvrılmayı/sapmayı, sürekli, düzgün ve tutarlı sinüzoidal dalga hareketini elde etmektir.

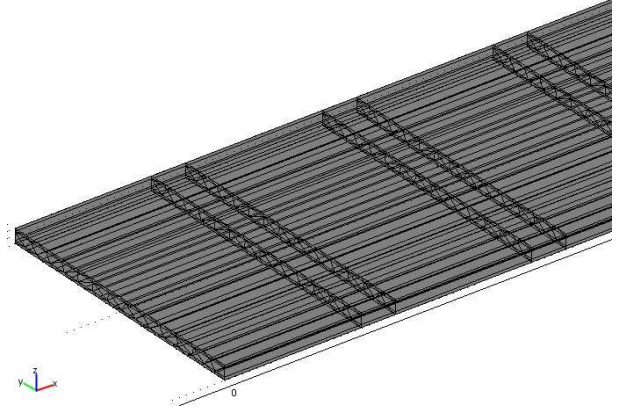
2. Metodoloji

Sistem fiziksel olarak piezoelektrik ve yapısal zorlama – gerinme özelliklerini barındırmaktadır. Piezoelektrik malzemelere uygulanan potansiyel farkı belirli bir oranda mekanik gerinmeye sebep olmaktadır. Bu sebepten dolayı COMSOL’da iki farklı model, *Piezo Solid* ve *Solid, Stres-Strain* modelleri birleştirildi. Üzerinde çalışılan sistemde piezoelektrik malzemenin yatay ekseninde en fazla miktarda şişmesi istenmiştir. Buna uygun seçilen piezoseramik PZT-5H’tır. Düşük yoğunluklu ve elastikiyet katsayısı yüksek bir metal olarak da alüminyum türevi 3003 H-18 kullanıldı. Her piezoseramiğe belirli faz farklı AA gerilimi şu şekilde uygulanmıştır: birinci seramiğin üst yüzeyi, ikinci seramiğin alt yüzeyi düzeninde olacak şekilde gerilime maruz bırakılmıştır. Gerilim verilmeyen diğer dikey yüzey –alt ya da üst topraklanıp yan yüzeyler elektrik alanından yalıtılmış, yükü sıfırlanmıştır. Anlaşılacağı üzere ardı ardına gelen piezoseramiklere gerilimin zıt yönde uygulanması z ekseninde zıt yönlü burkulma/sapma oluşturmaktadır. Modelin şekli aşağıda gösterilmiştir:



Şekil 2: Şeridin COMSOL'daki modeli

Elde edilen modelin y ve z eksenine doğrultusundaki yüzeyleri COMSOL programının kare örgüleme (mesh) özelliğiyle örgülenmiş, x eksenine doğrultusundaki yüzeyler ise üçgen örgülenmiştir. Örgülemenin sonucunda yaklaşık 4500 örgü noktası ve 30000 serbestlik derecesine sahip bir model elde edilmiş ve modelin zamana bağlı simülasyonları PARDISO çözüm yöntemiyle çözülmüştür. Diğer çözüm yöntemleri de denenmiş, elde edilen sonuçlar arasında dikkate değer farklar görülmediği için en hızlı çözüm yöntemi olan PARDISO kullanılmıştır. Örgülenmiş modelin ekran görüntüsü aşağıda gösterilmiştir:



Şekil 3: Modelin örgülenmiş hali

2.1. Modelin Özellikleri

- Sınır koşulları: $x=0$ 'da şerit sabitlenmiştir.
- Diğer tüm noktalarda serbest.
- Şeridin boyutları: 11x2x0.1 mm
- Piezoseramiklerin boyutu ve türü: PZT-5H, 0.25x2x0.996 mm
- Alüminyum plakaların boyutu ve türü: Alüminyum 3003 H-18, 11x2x0.02 mm
- Köpüklerin boyutları: 3.498x2x0.99 mm
- Uygulanan AA geriliminin büyüklüğü: 40V.

2.1.1. Maddelerin Özellikleri

Sistemde kullanılan malzemelerin özellikleri verilmiştir:

Alüminyum 3003 H-18:

- Elastikiyet Katsayısı (Young's modulus): 69e9 Pa
- Poisson katsayısı: 0.33
- Yoğunluk: 2730 kg/m³

Köpük:

- Elastikiyet Katsayısı (Young's modulus): 35e6 Pa
- Poisson katsayısı: 0.383
- Yoğunluk: 32 kg/m³

PZT – 5H: Piezoelektrik malzemeler modelde kullanılırken yapısal özelliklerini belirten matrisler oluşturuldu, bu matrisler oluşturulurken Hooke Yasası ve elektrik yer değiştirme formülleri birleştirildi.

$$D = \epsilon E \quad (1)$$

Yukarıdaki formüle (1) D elektrik alana bağlı yer değiştirme, ϵ dielektrik sabit olup E de elektrik alanı göstermektedir. Hooke Yasası ise:

$$S = sT \quad (2)$$

Formülüyle gösterilmiştir. Burada S gerinim (strain), s uyumluluk (compliance) ve T de zorlamadır (stres).

Bu iki formül birleştirilerek gerinim-yük ilişkisi kurulmuştur. Bu formüllere *bağlaşım formülleri* (coupled equations) denir.

$$\begin{cases} \{S\} = [s^E] \{T\} + [d_i] \{E\} \\ \{D\} = [d] \{T\} + [e^T] \{E\} \end{cases} \quad (3)$$

Bu iki formülde d piezoelektrik sabitini, ϵ elektrik alanını, ϵ T zorlama alanını, ϵ t de transpozunu gösterir.

Elastikiyet matrisi, S :

$$\begin{bmatrix} 1.26e11 & 7.95e10 & 8.41e10 & 0 & 0 & 0 \\ 7.95e10 & 1.26e11 & 8.41e10 & 0 & 0 & 0 \\ 8.41e10 & 8.41e10 & 1.17e11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.33e10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.33e10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.33e10 \end{bmatrix}$$

Bağlaşım matrisi (coupling matrix), d :

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 17 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17 & 0 & 0 \\ -6.5 & -6.5 & 23.3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Dielektrik sabiti (relative permittivity), ϵ :

$$\begin{bmatrix} 1698 & 0 & 0 \\ 0 & 1698 & 0 \\ 0 & 0 & 1468 \end{bmatrix}$$

2.1.2. Değişkenler ve Formüller

- Frekans, f
- Dalga boyu, λ
- Dalga sayısı, $k=2\pi/\lambda$
- Açısal frekans, $\omega=2\pi f$
- Faz, $k \cdot X_i$ (X_i =Piezoseramiklerin orta noktasının koordinatı)
- AA Gerilimi, $V_i = V_0 \cdot \sin(\omega t - k \cdot X_i)$

Alternatif akım gerilimi aşağıdaki formülle uygulanmıştır:

$$V_i = V_0 \cdot \sin(\omega t - k \cdot X_i) \quad (5)$$

Yukarıdaki (5) denkleminde bakılırsa her gerilim değeri için $k \cdot X_i$ oranında bir faz farkı konulduğu görülür. i piezoseramik sayısını belirtirken X_i seramiklerin orta noktalarının x koordinatıdır. Faz farkı her piezoseramiğe gerilimin aynı anda verilmesini engellemekte, seramiklerin mesafeleri oranında gecikme sağlayarak istenilen hareketli dalgalanmayı sağlamış, ayrıca dalga boyunu değiştirmeyi mümkün kılmıştır.

3. Sonuçlar

Sekiz piezoseramik içeren modelin simülasyonundan değişkenlere göre farklı sonuçlar elde edilmiştir. Değişkenlerin kullanılan değerleri ve modelin verilen boyutları yukarıda belirtilmişti, burada tablo olarak tekrar sunulmuştur.

Tablo 1: Boyutlar

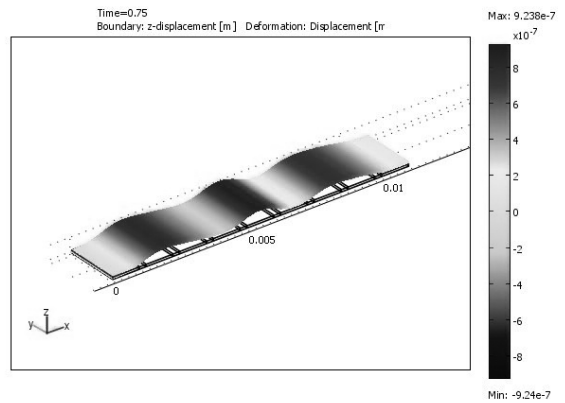
Geometrik Birimler	Değerler
Şeritin boyu	11 mm
Şeritin eni	2 mm
Şeritin yüksekliği	0.1 mm
Piezoseramiklerin boyu	0.25 mm
Piezoseramiklerin eni	2 mm
Piezoseramiklerin yüksekliği	0.996 mm
Alüminyum plakaların boyu	11 mm
Alüminyum plakaların eni	2 mm
Alüminyum plakaların yüksekliği	0.02 mm
Köpüklerin boyu	3.498 mm
Köpüklerin eni	2 mm
Köpüklerin yüksekliği	0.99 mm

Tablo 2: Piezoseramiklere uygulanan gerilimler

$$\begin{aligned} V_1 &= 40 \cdot \sin(\omega t - k \cdot 0.001125) \\ V_2 &= 40 \cdot \sin(\omega t - k \cdot 0.002375) \\ V_3 &= 40 \cdot \sin(\omega t - k \cdot 0.003625) \\ V_4 &= 40 \cdot \sin(\omega t - k \cdot 0.004875) \\ V_5 &= 40 \cdot \sin(\omega t - k \cdot 0.006125) \\ V_6 &= 40 \cdot \sin(\omega t - k \cdot 0.007375) \\ V_7 &= 40 \cdot \sin(\omega t - k \cdot 0.008625) \\ V_8 &= 40 \cdot \sin(\omega t - k \cdot 0.009875) \end{aligned}$$

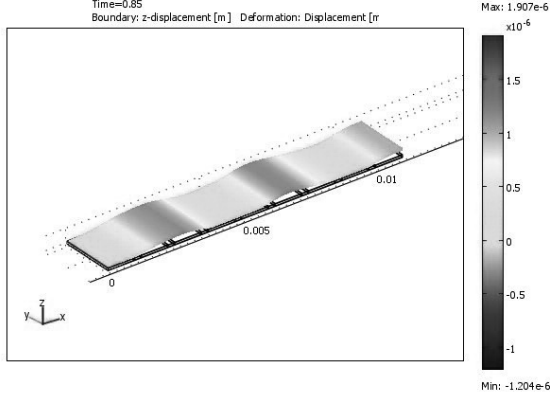
Görüldüğü üzere uygulanan gerilim dalga boyu ve sayısına, açısal frekansa bağlıdır. Simülasyonlarda frekans, 100 Hz ile 1kHz arasında değişen değerler için yapılmıştır. Dalga boyu için ise L , $L/2$, $L/4$ (L , şeridin boyu) değerleri verilmiştir.

$\lambda = L$ için yapılan simülasyonun şekli ve sonucu aşağıda gösterilmiştir. Maksimum sapma $9.143e-7$ m olarak ölçülmüştür ve bu miktar 0.75. saniyede elde edilmiştir.



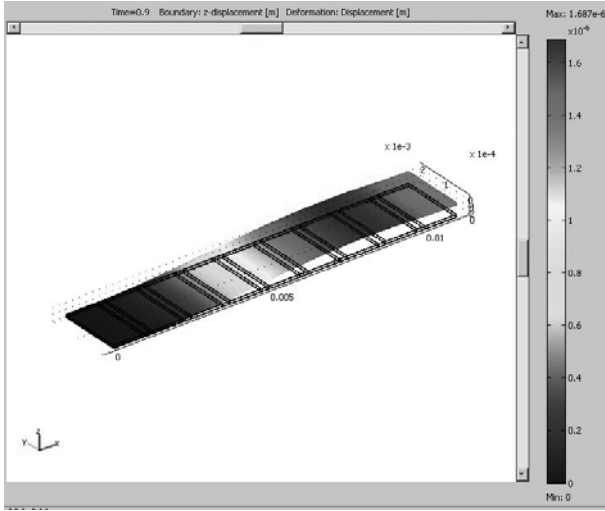
Şekil 4: $\lambda = L$ için şeridin sapması.

Bunun ardından $\lambda = 0.5*L$ için yapılan simülasyonun şekli ve sonucu aşağıda gösterilmiştir. Maksimum sapma $1.2e-6$ m civarında ölçülmüştür ve bu miktar 0.85. saniyede elde edilmiştir.



Şekil 5: $\lambda = 0.5*L$ için şeridin saptması.

Bir sonraki adımda $\lambda = 0.25*L$ olarak belirlenmiş ve yapılan simülasyonun şekli ve sonucu aşağıda gösterilmiştir. Maksimum sapma $1.686e-6$ m civarında ölçülmüştür ve bu miktar 0.95. saniyede elde edilmiştir.



Şekil 6: $\lambda = 0.25*L$ için şeridin saptması.

Bu denemelerin ardından görüldüğü üzere en iyi sapma $\lambda = 0.25*L$ için gerçekleşti. Bir diğer adımda yapılacak olan frekans analizi dalga boyunun bu değeri için sabit tutuldu ve 100-1000 Hz aralığında yapıldı. Elde edilen sonuçlara göre kritik özfrekanslara (eigenfrequency) ulaşmadığı sürece sapmanın miktarında ciddi bir artış gözlenmemekle beraber şeridin birim zamandaki dalgalanması artmıştır. Bu artış

şüphesiz ki şeridin içinde bulunduğu akışkanın davranışını etkileyecektir.

Tablo 3: Dalga boyuna göre maksimum sapma

Dalga boyu	Maksimum sapmanın büyüklüğü
$\lambda = L/4$	1.690E-06 m
$\lambda = L/2$	1,213E-06 m
$\lambda = L$	0,914E-06 m

Sperm gibi mikro organizmaların hareketini sağlayan kuyruk dalgalanması bu çalışmada modellenerek hareketli dalgalanma elde edilmeye çalışıldı. İnce metal plakalar arasına piezoseramiklerin yerleştirilmesiyle elde edilen model boyut, uygulanan gerilim, kullanılan metal, dalga boyu ve sayısı ve de frekans gibi değerlere bakılarak incelendi ve genel sonuçlar elde edilmeye çalışıldı. Şeritteki sapmanın uygulanan gerilimle doğru orantılı arttığı gözlemlenip piezoseramik üreticilerinin kataloglarından elde edilen bilgiyle, seramiklerin kaldırabileceği miktardaki gerilimler uygulanmıştır. Hareketli dalgalanmanın elde edilebilmesi için gerilimin sinüzoidal davranışı ve her seramiğe gelen gerilimin arasında faz farkı esas rol oynamıştır. Bu aşamadan sonra değişen dalga boyları için saptmalar incelenmiş, dalga sayısı azaldıkça saptmanın arttığı gözlenmiştir. Şeridin boyu saptmayı arttıran bir etken olurken kalınlığın belli bir noktaya kadar saptmayı azalttığı sonucuna varılmıştır.

4. Teşekkür

Bu çalışmanın yapılması için bizleri yönlendiren değerli hocamız Serhat Yeşilyurt'a ve yardım eden asistanımız Ahmet Fatih Tabak'a teşekkürlerimizi sunarız.

5. Kaynakça

- [1] L. Q. Yao, J. G. Zhang, L. Lu ve M. O. Lai, "Nonlinear Dynamic Characteristics of Piezoelectric Bending Actuators Under Strong Applied Electric Field" *Journal of Microelectromechanical Systems*, Sayı:13, No. 4, 2004.
- [2] A. F. Tabak ve S. Yeşilyurt, *Simulation-Based Analysis of Flow Due to Traveling-Plane-Wave Deformations on Elastic Thin Film Actuators in Micropumps*. Sabancı Üniversitesi, 2007.
- [3] R. J. Schilling ve S. L. Haris, *Applied Numerical Methods for Engineers Using MATLAB and C*. Brooks/Cole, 2004.
- [4] V. Piefort, *Finite Element Modeling of Piezoelectric Active Structures*. Doktora tezi, Faculty of Applied Sciences, Université Libre de Bruxelles'e sunulmuştur, 2001.