

Uç ağırlıklı Piezoelektrik Kirişlerin İvmeölçer Olarak Tasarımı ve Sayısal Analizi

Levent Beker*¹ 

*¹ Koç Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, İSTANBUL

(Alınış / Received: 12.11.2023, Kabul / Accepted: 29.12.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

Anahtar Kelimeler
Piezoelektrik, MEMS,
Algılayıcı tasarım

Öz: Bu araştırma, MEMS tabanlı ivmeölçerlerin tasarımı ve geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Günümüzde birçok cihaz, hareket ve oryantasyon algılama yetenekleri sayesinde daha işlevsel hale gelmiştir ve bu yetenekler büyük ölçüde ivmeölçerler sayesinde sağlanmaktadır. Çoğu durumda, cihazların hareketleri belirgin eksenler boyunca gerçekleşir ve bu nedenle, bu özel eksenleri algılayabilen sensörlerin geliştirilmesi genellikle yeterlidir. Literatürde, çok eksenli hareketleri algılayabilen sensörlerin geliştirilmesi önemli bir araştırma alanı olarak kabul edilse de, pratikte, belirli eksenlere odaklanan ivmeölçerlerin tasarım ve üretimi daha hızlı ve maliyet etkin olabilmektedir. Bu çalışmada, hem dikey hem de dönme eksenlerindeki ivmeleri algılayabilen yeni bir ivmeölçer yapısı tasarlanmıştır. Kiriş yapıları kullanılarak geliştirilen bu sensör, yaklaşımsal analizle incelenmiş ve geometrik etkiler detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, farklı eksenlerde çalışabilen daha ileri ivmeölçer tasarımlarına yol gösterici olabilir.

Design and numerical analysis of a piezoelectric cantilever type accelerometer

Keywords
Piezoelectric, MEMS, Sensor
design

Abstract: This research focuses on the design and development of MEMS-based accelerometers. Nowadays, many devices have become more functional due to their ability to detect motion and orientation, largely enabled by accelerometers. In most cases, the movements of these devices occur along distinct axes, making the development of sensors that can detect these specific axes often sufficient. Although the development of sensors capable of detecting multi-axial movements is a significant area of research in the literature, in practice, the design and production of accelerometers focused on specific axes can be faster and more cost-effective. In this study, a new accelerometer structure capable of detecting both vertical and rotational axis movements has been designed. Using beam structures, this sensor has been examined through an approximative analysis, emphasizing geometric effects in detail. The findings from this study could guide the development of more advanced accelerometers capable of operating on different axes.

*İlgili Yazar, email: lbeker@ku.edu.tr

1. Giriş

İvme ölçümü, genişleyen mikrosensör teknolojileri alanında çok önemli bir segmenti oluşturmakta ve bir dizi uygulamada artan taleple deneyimlenen bir alan olmaktadır. Entegre bileşenler olarak ivmeölçerler, cep telefonundan, otomotiv, çeşitli günlük ve endüstriyel aktivitelerde vazgeçilmezdir. Çok farklı alanlarda etkin olarak kullanılmalarının sebebi, sadece maliyet olarak ekonomik ve performans olarak güvenilir olmakla kalmayan aynı zamanda kompakt bir form faktörüne de sahip olmalarından kaynaklanmaktadır [1].

Özellikle otomotiv sektöründe, sağlam, yüksek performanslı ve ekonomik ivmeölçerlere olan talep özellikle belirgindir ve bu talep ulaşım, havacılık, endüstriyel otomasyon, tüketici elektroniği ve hatta biyotıp alanına kadar uzanan geniş bir trendi yansıtmaktadır [2]. Bu uygulamaların genişliği, ivmeölçerlerin günümüzdeki çağdaş teknolojideki merkezi rolünü net olarak vurgular.

Yakın zamanda mikro-üretim tarafındaki gelişmeler ile mikro-elektro-mekanik sistemler (MEMS) ivmeölçerlerin geliştirilmesi ve minyatürize edilmesinde önemli rol almıştır. İvme ölçümü için esas olarak üç yöntem bulunmaktadır: piezodirençli, kapasitif ve piezoelektrik, her biri farklı nitelikler ve kısıtlamalar içerir [3]. Örneğin, piezodirençli teknik yüksek hassasiyeti ile tanınırken, kapasitif yöntemler düşük güç tüketimi ve entegrasyon kapasiteleri açısından faydalar sunar. Buna karşılık, piezoelektrik tabanlı mekanizmalar basit üretim teknikleri ile üretilebilmeleri, geniş dinamik aralıkları ve tepki hızları ile ön plana çıkmaktadır [4]. Farklı uygulamalara yönelik kapsamlı araştırma ve geliştirme çabalarına rağmen, evrensel olarak uygulanabilir bir optimal çözüm arayışı sürmektedir [3].

Piezoelektrik çözümler bağlamında, toplu piezoelektrik seramik ivmeölçer sensörleri zaten ticari bir gerçekliktir [5]. Geçtiğimiz on yıl, özellikle ZnO, AlN ve PZT ($\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$) gibi malzemelerin sensör uygulamalarındaki potansiyelleri nedeniyle piezoelektrik ince filmlere yönelik yoğun araştırma çabalarına tanık oldu [6]. Bu filmlerin doğal avantajı, sensör ve elektronik bileşenlerin tek bir altlık üzerinde bir arada bulunduğu tek parça sistemlerin oluşturulmasını sağlayan silisyum pul teknolojisi ile uyumluluklarıdır, bu da güvenilirlikte gelişmeler ve maliyet ve boyutta azalmalar vaat eder [6].

Piezoelektrik ince filmlerin silisyum teknolojisi ile entegrasyonu, boyutları küçültme ve maliyeti düşürme yönünde sanayi trendiyle uyumlu bir adımdır, performans etkinliğini korurken sensör boyutlarını küçültme eğilimi ile uyum sağlar [7]. Bu ilerlemeler, hassas biyomedikal cihazlardan sağlam otomotiv sistemlerine kadar çok çeşitli teknolojilerde hafif, minyatür ivmeölçerlerin bir kritik bir ölçüm cihazı haline geleceğini önermektedir [7].

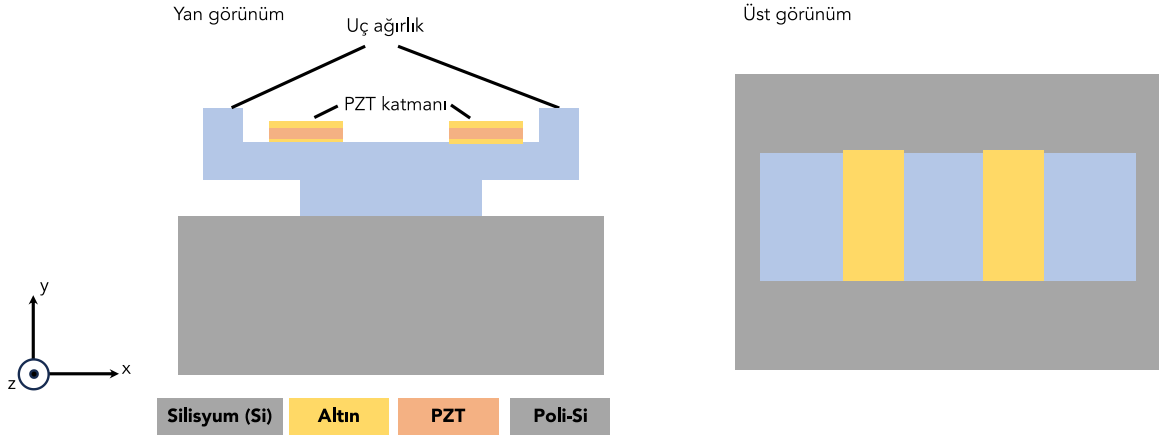
Buna ek olarak elektrostatik ivmelerölçerler, ataletsel sensörler alanında önemli bir kategori oluşturur ve genellikle uzay, otomotiv ve robotik uygulamalarda kullanılır [8]. Bu ivmelerölçerler, ivmeye bağlı olarak bir kanıt kütlesi hareketinin kapasitans değişikliğine neden olduğu elektrostatik kuvvet prensibi üzerine çalışır ve bu değişiklik daha sonra bir elektrik sinyaline dönüştürülür [9]. Bu ivmelerölçerler, yüksek hassasiyetleri, düşük gürültü seviyeleri ve geniş bant genişliği ile bilinirler, bu da onları dinamik ortamlarda hassas ölçümler için uygun kılar. Son dönemde MEMS teknolojisindeki gelişmeler, elektrostatik ivmelerölçerlerin küçültülmesini ve maliyet etkinliğini büyük ölçüde artırmıştır. Fakat kapasitans değişimini okumak için gerekli devrelerin komplike olmasından ötürü dezavantajlıdır [10].

Sonuç olarak, ivmeölçer teknolojisi alanı bir kavşak noktasındadır, etkin, küçük ölçekli ve ekonomik olarak uygulanabilir sensörler için sürekli artan talebi karşılamak üzere çeşitli yollar araştırılmaktadır. Bu makale basit bir mikro üretim metodu ile üretilebilecek piezoelektrik malzeme tabanlı bir ivmeölçerin üretim akışı ve simülasyonunu içermektedir. Varolan kapasitif algılayıcılara göre daha az kritik boyut içermesi ve daha az kritik yapıdan oluşması sebebiyle dinamik aralığı belirli olan uygulamalara yönelik ivmeölçer geliştirilmesinde faydalı olması beklenmektedir.

Piezoelektrik tabanlı ivmeölçerlerin modellenmesi farklı yazarlar tarafından çalışılmış bir konudur [11-14]. Örneğin Lee ve diğerleri piezoelektrik tabanlı bir ivmeölçeri sonlu elemanlar ve meta-modelleme yaklaşımıyla modellemiş ve çalışmalarında optimal sensör tasarımları rezonans frekansının geçerli aralığında (25-47,5 kHz) önerilmektedir bu analizler yardımıyla rezonans frekansını optimize ederek elektrik gerilimini %46,1 artırmıştır [13]. Başka bir çalışmada Altair sonlu elemanlar programı kullanılarak 4 kirise bağlı bir ağırlığın yarattığı etki ile piezoelektrik ivmeölçer tasarım çalışması yapılmıştır [14]. Çalışmada frekansa bağlı deplasman sonuçları verilmiştir ve sönümlenme katsayısının etkisine dikkat çekilmiştir. Fakat bu çalışmalarda tasarımımlar sonlu elemanlar gibi özelleşmiş programlar gerektirmektedir. Bu çalışmada ilk seviye analize uygun olacak şekilde yaklaşımsal bir analiz sunulmuştur.

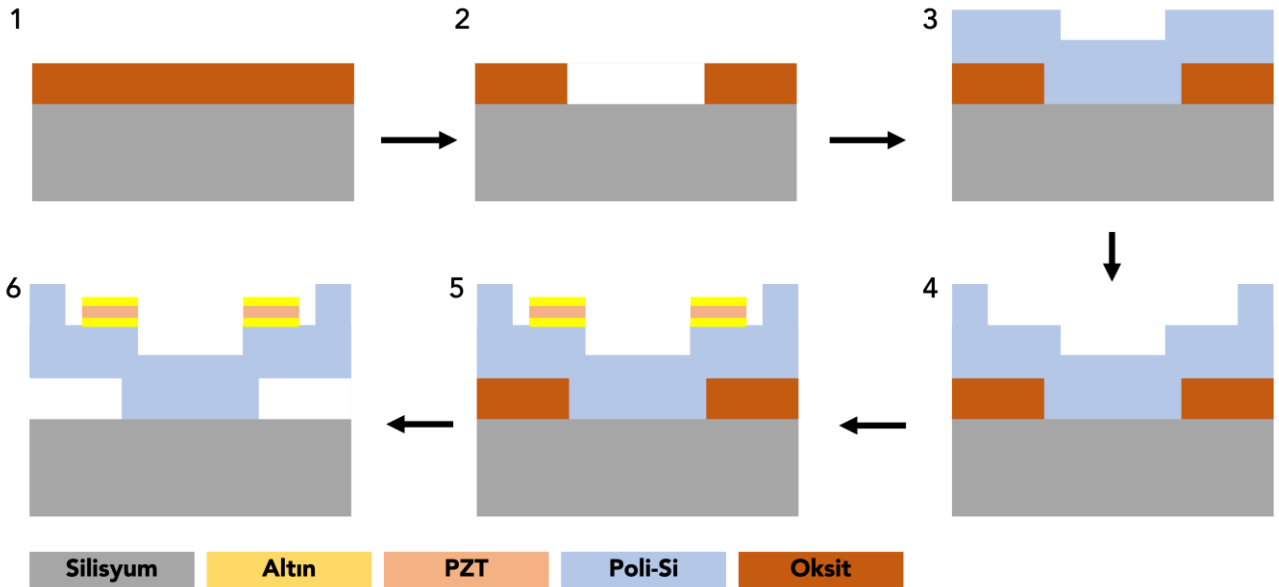
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada önerilen MEMS piezoelektrik ivmeölçer ince film teknolojisi veya tıraşlanmış seramik teknolojisi kullanılarak geliştirilebilen bir algılayıcıdır (Şekil 1). Bir eksenel sensör (33-modu) olmasının yanısıra, z yönündeki dönел ivmelere de hassas olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu kabiliyeti ile bir cep telefonunun dönme ve eksenel yöndeki hareketlerinin algılanmasında kullanılabilir. Eksenel ivme sırasında sismik ağırlık piezoelektrik katman üzerine bir kuvvet uygular, bu kuvvet piezoelektrik etki dolayısıyla katmanda bir yük oluşmasına sebep olur. Bu yük ve dolayısıyla elektrotlar arasındaki potansiyel fark uygulanan ivmenin ölçülmesinde kullanılır. Aynı şekilde bir dönел ivme oluştuğunda bir taraftaki piezoelektrik katmanda itme kuvveti uygulanırken diğer katmanda çekme kuvveti uygulanır ve bu da ters fazlı potansiyel oluşumuna sebep olur. MEMS sistemine ek olarak kullanılacak sinyal işleme blokları ile bu potansiyel farkı ve büyüklüğü kullanılarak uygulanan dönел ivmenin büyüklüğü belirlenir.



Şekil 1: Önerilen MEMS tabanlı piezoelektrik ivme ölçer mimarisinin şematik olarak yandan ve yukarıdan çizimi.

Önerilen MEMS algılayıcının bir diğer avantajı da kolay bir mikro-üretim akışına sahip olmasıdır. Bu üretim akışı önce bir silisyum puluna altın metali kaplayarak başlamaktadır. Ardından piezoelektrik malzeme farklı metotlarla kaplanabilir. Burada hem ince film hem de kalın film teknikleri kullanılabilir. Ardından piezoelektrik malzeme aşındırılır ve üstünden elektriksel kontak almak maksadıyla ikinci bir metal kaplama işlemi yapılır. Bu işlemin ardından sismik ağırlığın oluşturulması için geçici bir katman yapılması gereklidir. Bu aşamada mikro üretim tesisinde bulunan alt yapıya göre farklı malzemeler kullanmak olasıdır. Sıvı Aşındırıcılar ile kolaylıkla kaldırılabilmesi sebebiyle oksit buradaki kullanılacak malzemelerden bir tanesidir. Kaplama yapıldıktan sonra piezoelektrik katmanlardan kontak alınması sebebiyle ilgili kısım var litografi projesi ile aşındırılır. Ardından sismik ağırlığı oluşturan malzemenin kaplanması yapılabilir. Bu malzeme yine mikro üretim tesisinde bulunan altyapı çerçevesinde düşünülerek farklı malzemeler kullanılabilir. Örneğin poli-silisyum malzemesi kullanılarak bir kaplama yapıldıktan sonra geçici oksit katmanı kimyasal prensesler kullanılarak aşındırılır. Bu aşındırma prosesi bir sıvı kimyasal kullanılarak veya buhar fazında bir kimyasal kullanılarak da yapılabilir.



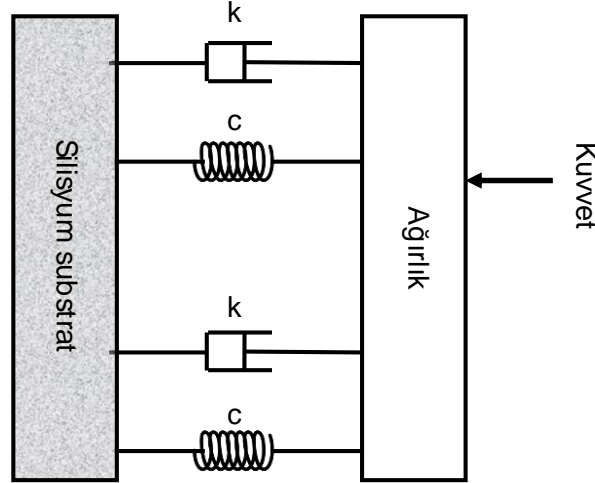
Şekil 2: Sismik ağırlıklı ivmeölçer tasarımının mikro-üretim akışı.

2.1. İvmeölçer tasarımı

İvmeölçerin tasarımında piezoelektrik malzeme kullanılması dolayısıyla ilgili malzeme denklemleri de hesaba katılmalıdır. Örneğin aksenal emeği düşünecek olursak en önemli faktör piezoelektrik katmanın katılığıdır. Piezoelektrik katmanın katılığını k ile gösterecek olursak aşağıdaki (1) numaralı denklemi kullanabiliriz.

$$k = \frac{Ac_{33}}{l} \quad (1)$$

Bu denklemde A toplam alanı, L yük olmayan durumda piezoelektrik katmanın kalınlığını, c_{33} piezoelektrik katmanın sabit elektrik alanda katılık katsayısını belirtir. İlk yaklaşımda kalınlıkları piezoelektrik katmandan birkaç faktör düşük olmasından dolayı metal katmanı katmandan da ilerlemek mümkündür. Aynı şekilde malzemenin hıza karşı olan direncini temsil sönümlenme katsayısı, c, tasarımda kullanılması gereken bir parametredir. Şekil 3'de parametreler kullanılarak oluşturulmuş sembolik olarak sismik ağırlık üzerine uygulanan kuvvetler ve elemanları gösteren sembolik bir şema hazırlanmıştır.



Şekil 3: Sismik ağırlıklı iki eksenli ivmeölçer tasarımının şematik olarak gösterimi.

Bu aşamada silisyum substrata uygulanan deplasmanı x_1 ve sismik ağırlığın kendi deplasmanını x_2 ile gösterecek olursak ve kuvvetler dengesini gözetirsek aşağıdaki (2) numaralı denklemi elde ederiz.

$$m\ddot{x}_2 + c_{eq}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_{eq}(x_2 - x_1 - l) = 0 \quad (2)$$

Bu ifadeyi deplasmanlar ve piezoelektrik katmanın kalınlığı arasındaki ilişkiyi düşünerek ve aşağıdaki ifadeleri kullanarak sadeleştirdikten sonra Fourier Transformasyonu uygulayarak sistemin frekans olarak dinamik yapısını anlayabiliriz:

$$\frac{\Delta l(\omega)}{\ddot{x}_1(\omega)} = \frac{1}{\left(\omega^2 - \frac{k_{eq}}{m}\right) - i\omega \frac{c_{eq}}{m}} \quad (3)$$

Bu denklemi kullanarak yapının farklı frekanslara cevabını görebileceğimiz bir analiz yapılabilirdi gibi aynı zamanda yapının doğal frekansını da bulabiliriz. Bir piezoelektrik malzeme tarafından frekansa bağlı olarak üretilen voltaj denklemini tüm geometrik ve malzeme faktörleriyle bütünleştirmek için farklı parametreleri göz önünde bulundurmamız gerekmektedir: 1) Piezoelektrik katsayılar (d_{ij}): Bu katsayılar, piezoelektrik etkinin malzeme eksenlerine göre yönelimine bağlıdır; 2) Dielektrik geçirgenlik (ϵ_{ij}): Bu da piezoelektrik malzemelerde yön bağımlıdır ve üretilen voltajı etkiler; 3) Elastik uyumluluk veya sertlik (S_{ijkl} veya C_{ijkl}): Bu tensör, malzemede gerilimi şekil değiştirmeye bağlar ve mekanik titreşimlerin elektrik enerjisine nasıl dönüştürüldüğünü etkiler. 4) Malzemenin geometrisi: Piezoelektrik elemanın uzunluğu (l), genişliği (w), ve kalınlığı (t) gerilim dağılımını ve elektrik alan üretimini belirler.

Piezoelektrik bir malzemedeki tam üç boyutlu elektromekanik etkileşim tensör notasyonu ile ifade edilebilir. Ancak basitlik adına, genellikle elektrik alanın uygulanan gerilimle aynı yönde üretildiği uzunlamasına bir etki için yaygın olan tek bir piezoelektrik katsayı d_{33} ile bir boyutlu bir durumu ele alabiliriz.

Bir kirişte, bükülme momenti M nedeniyle oluşan gerilim σ şu şekilde verilebilir:

$$\sigma(y) = \frac{My}{I} \quad (4)$$

Burada:

y, nötr ekseninden olan mesafedir,

I, kiriş kesitinin alan momenti inertisidir ($I=wt^3/12$ dikdörtgen bir kesit için).

Kirişe bağlı veya kirişe gömülü bir piezoelektrik malzeme için, malzemenin gerilimin maksimum olduğu bir mesafede yerleştirildiğini varsayabiliriz, genellikle yüzeyde ($y=t/2$).

Piezoelektrik malzemenin kalınlığı t boyunca indüklenen voltaj V, elektrik yer değiştirmesi D ile şu şekilde ilişkilendirilir:

$$V(t) = \frac{D(t)t}{\epsilon_{33}} \quad (5)$$

Gerilim ve piezoelektrik etkiyi kullanarak D'yi, ve gerilme nedeniyle oluşacak potansiyeli şöyle ifade edebiliriz:

$$V(t) = \frac{d_{33}My}{I\epsilon_{33}}t = \frac{d_{33}M(t)t/2}{wt^3/12\epsilon_{33}}t \quad (6)$$

Bu ifadede M, bükülme momentini ifade etmektedir, ve basit bir durum için $M = F.L$ ile ilişkilendirilebilir. Sonuç olarak, zaman ve frekans cinsinden elde edilen voltaj şöyle ifade edilebilir.

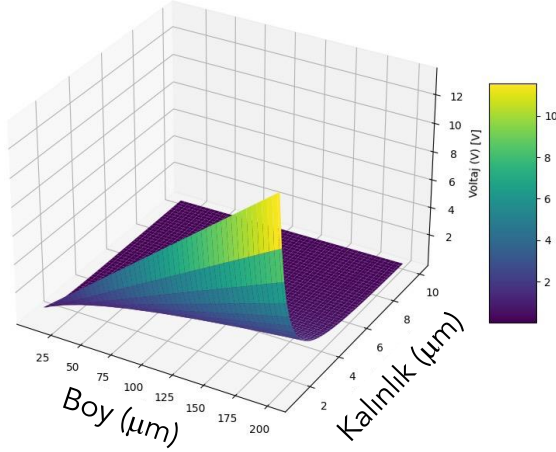
$$V(t) = \frac{6d_{33}M_{max}}{wt^3\epsilon_{33}}(\sin 2\pi ft) = \frac{6d_{33}FL}{wt^3\epsilon_{33}}(\sin 2\pi ft) \quad (7)$$

Belirli bir frekansta bir kuvvet uygulandığında bu ifadeyi kullanarak, farklı geometrik ve malzeme parametrelerinin nasıl potansiyel üreteceği hakkında fikir sahibi olma fırsatı sunacaktır.

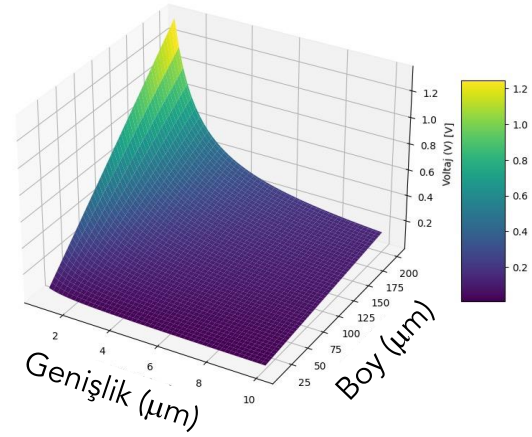
3. Bulgular

Boy (L), kalınlık (t) ve voltaj çıktısı (V) arasındaki ilişki, piezoelektrik malzemelerin temel özelliklerini yansıtır. Boy uzadıkça, malzeme üzerine uygulanan kuvvetin etkisi artar, bu da voltaj çıktısını artırır. Kiriş yapısında kullanılan uç ağırlığı bu etkiyi artırır. Öte yandan, kalınlık arttıkça, malzemenin içinden geçen elektrik alan azalır ve bu da voltaj çıktısını düşürür. Bu iki faktörün dengesi, piezoelektrik cihazların tasarımında kritik öneme sahiptir. İdeal voltaj çıktısını elde etmek için, boy ve kalınlığın dikkatlice ayarlanması ve malzemenin piezoelektrik özelliklerine uygun olarak optimize edilmesi gerekir. Bu, piezoelektrik cihazların verimliliğini ve etkinliğini doğrudan etkiler. MEMS tipi sistemlerin üretim koşulları ve limitasyonları hesaba alındığında kirişlerin boy aralığı 25 ve 200 μm , genişliği iki ila 10 μm ve kalınlığı ise iki ila 10 μm olarak belirlenmiştir. Örneğin kalınlığı belirleyecek üretim aşamasında yapısal bir malzeme kullanılacak olduğu var sayıldığında ve bunu yapabilecek üretim prosesleri düşünüldüğünde belirtilen aralık makul bir üretime şans tanımaktadır. Analiz bu limitasyonlara sınırlı olmadığı gibi daha geniş boyda üretim yapılma kapasitesindeki cihazlar için de yol gösterici olabilir.

Boy ve kalınlığın voltaja etkisi



Boy ve genişliğin voltaja etkisi



Şekil 4: Geometrik parametrelerin voltaj çıkışına etkisi.

Yukarıdaki grafiklerde bu ilişkinin nasıl olduğu gösterilmiştir. Kirişin boyu arttıkça, artan momentden dolayı piezoelektrik malzemedeki gerinim artmakta ve dolayısıyla potansiyel çıktısı da artmaktadır. Yapılan numerik yaklaşımların sonucuna bakarak olursak potansiyel çıktısını arttırmak için boyu arttırırken kalınlığı azaltmak gerekmektedir. Sebebi ise kalınlık arttıkça piezoelektrik malzemedeki gerinimin kirişin katıllığının artması dolayısıyla azalmaktadır. Benzer bir ilişki boy ile genişlik arasında da görülebilir. Bu ilişkide de yine boy arttıkça ve genişlik azaldıkça potansiyel artmaktadır. Dolayısıyla bu iki çıktıdan da anlaşılacağı üzere piezoelektrik malzeme seçim yapıldıktan sonra kullanılacak geometrik parametreler sisteme uygulanan ivmeyi voltaja çevirmede oldukça kritik olacaktır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada MEMS sensörlerden birisi olan ivmeölçerler üzerine odaklanılmıştır. Hareket ve oryantasyonun bir çok cihazda algılanması bu sensörlerin tasarım ve geliştirilmesi sonucu olmaktadır. Bir çok cihazda hareketler belirli oryantasyonda olmakta ve dolayısıyla bu dominant eksenlerin anlaşılması yeterli olmaktadır. Literatürde bir çok farklı eksenlerde gelecek inmeyi algılayan sensörlerinin geliştirilmesi oldukça popüler bir araştırma konusu olsa da gerçek hayatta kullanılan cihazlara bakıldığında bu dominant eksenlere odaklanan sensörlerin tasarım ve üretiminin çok daha hızlı ve az maliyetli olabileceği görülmektedir. Bu sebeple bu çalışmada kiriş yapıları kullanılarak bir hem dik eksen de dönme eksenindeki ivmeleri algılayabilecek bir ivmeölçer yapısı önerilmiştir. Bu çalışmada önerilen yapının yaklaşımsal analizi yapılmış ve geometri etkileri ön plana çıkarılmıştır. Bu çalışma temel alınarak farklı eksenlerde çalışabilecek ivmeölçerler geliştirilmesi olasıdır.

Kaynakça

- [1] Bao, M. H., Yang, H. 2007. Squeeze film air damping in MEMS. *Sensors and Actuators A: Physical*, 136(1), 3-27.
- [2] Bernstein, J., Cho, S., King, A., Kourepenis, A., Maciel, P., & Weinberg, M. 1999. A micromachined comb-drive tuning fork rate gyroscope. In *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems*.
- [3] - Lang, J. H. 2003. Integrated Ferroelectrics: Past, Present, and Future. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 50(9), 1064-1074.
- [4] Lee, B., & Choi, D. 2001. A temperature-compensated silicon accelerometer based on a piezoresistive sensing scheme. *Sensors and Actuators A: Physical*, 90(1-2), 38-42.
- [5] Liu, C. 2007. *Foundations of MEMS*. Pearson Prentice Hall.
- [6] Muralt, P. 2000. Ferroelectric thin films for micro-sensors and actuators: a review. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 10(2), 136.
- [7] Petersen, K. E. 1982. Silicon as a mechanical material. *Proceedings of the IEEE*, 70(5), 420-457.

- [8] Yu, H., Chen, B., & Xie, L. 2016. A review of MEMS capacitive accelerometers. *Sensors*, 16(8), 1161.
- [9] Yazdi, N., Ayazi, F., & Najafi, K. 2004. Micromachined inertial sensors. *Proceedings of the IEEE*, 92(1), 76-97.
- [10] Zhang, G., & Li, H. 2019. Advances in MEMS electrostatic accelerometers. *Micromachines*, 10(8), 522.
- [11] Lee, G.J., Hwang, W.J., Park, J.J. and Lee, M.K., 2019. Study of sensitive parameters on the sensor performance of a compression-type piezoelectric accelerometer based on the meta-model. *Energies*, 12(7), p.1381.
- [12] Lee, M.K., Han, S.H., Park, J.J. and Lee, G.J., 2020. A theoretical and empirical investigation of design characteristics in a Pb (Zr, Ti) O₃-based piezoelectric accelerometer. *Sensors*, 20(12), p.3545.
- [13] Lee, M.K., Han, S.H., Park, K.H., Park, J.J., Kim, W.W., Hwang, W.J. and Lee, G.J., 2019. Design optimization of bulk piezoelectric acceleration sensor for enhanced performance. *Sensors*, 19(15), p.3360.
- [14] Jency, J.G., Sekar, M. and Sankar, A.R., 2021. Damping analysis of a quad beam MEMS piezoresistive accelerometer. *International Journal of Modelling and Simulation*, 41(4), pp.256-264.