

KOMPOZİT KONSOL KİRİŞ YAPILARIN MİKRO-ÇINLAÇ OLARAK KÜTLE ÖLÇÜMÜNDE KULLANIMI

M. Salih Kılıç¹, B. Erdem Alaca^{1,*}, Serhat Yavuz¹, Hakan Urey²

¹ Koç Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Rumeli Feneri Yolu, 34450 Sarıyer, İstanbul

² Koç Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Rumeli Feneri Yolu, 34450 Sarıyer, İstanbul
*ealaca@ku.edu.tr

ABSTRACT

Micro-resonators find a wide area of applications as sensitive mass sensors. Decreasing mass and increasing resonant frequency of the sensors, as the scale becomes smaller, have lowered the limit for the minimum detectable amount of mass to the order of zepto (10^{-21})grams under high vacuum conditions, and femto (10^{-15})grams under atmospheric pressure. It has been a widely used method to observe the effects of possible structural changes of a cantilever beam on its resonant frequency. Uniform adsorption of a second material on the resonating micro-cantilever beam not only increases the mass of the cantilever but also changes its stiffness. While increasing mass causes a decrease in resonant frequency, increasing stiffness, on the other hand, increases the resonant frequency. In literature, it is an accepted practice to assume the dependence of the frequency shift on the mass change only without taking the increase in stiffness into account. In this study, a theoretical approach to isolate stiffness and mass effects has been developed. The approach has theoretically and experimentally been verified.

ÖZET

Mikro ölçekli çınlaçlar, kütle ölçümünde hassas terazi olarak geniş uygulama alanı bulmaktadırlar. Küçülen ölçek ile beraber azalan çınlaç kütlesi ve artan çınlanım frekansı, ölçülebilecek en düşük kütle sınırını, yüksek vakum ortamında zepto (10^{-21}), atmosferik basınç altında femto (10^{-15}) gram mertebesine indirmiştir. Mikro ölçekli çınlaçlar için en sık

kullanılmakta olan konsol giriş yapılar çınlanımdayken, yapı üzerinde oluşabilecek herhangi bir değişimin çınlanım frekansındaki etkilerini gözlemlemek, yaygın olarak kabul görmüş bir yöntem haline gelmiştir. Salınım yapan bir mikro çubuğun üzerine bir-örnek biriken ikinci bir madde, bir yandan çubuğun kütlelerini arttırırken diğer yanda ise eğilme rijitliğini değiştirmektedir. Kütle artışı, çınlanım frekansında azalmaya yol açarken, artan eğilme rijitliği ise çınlanım frekansını arttırmaktadır. Literatürde, genel olarak artan rijitliğin hesaba katılmadığı ve frekans değişiminin yalnızca kütle değişimine doğrudan bağlandığı bir yaklaşım kabul görmektedir. Bu çalışmada, kütle ve rijitlik etkilerini ayıran kuramsal bir yaklaşım geliştirilmiş olup kuramsal ve deneysel olarak sınanmıştır.

1 GİRİŞ: Mikro Ölçekli Kütle Ölçümünde Rijitlik ve Kütlenin Yarışan Etkileri

Kütle ölçümünde hassas terazi olarak geniş uygulama alanı bulan mikro ölçekli çınlaçlar için en sık kullanılan yapı, konsol giriş yapılarıdır. Bu yapıların çınlanım frekansındaki değişimler gözlenerek kaymaya sebep olan etki ölçülmeye çalışılmaktadır. Ne var ki farklı parametrelerin, bazen birbirleriyle çelişen etkileri, frekans kaymasının yorumlanmasını zora sokmaktadır. Örneğin, salınım yapan bir mikro çubuğun üzerine bir-örnek biriken ikinci bir madde, bir yandan çubuğun kütlelerini arttırıp çınlanım frekansında azalmaya yol açarken diğer yanda ise eğilme rijitliğini arttırıp çınlanım frekansını arttırır. Literatürde, genel olarak kabul gören artan rijitliğin hesaba katılmaması ve frekans kaymasının yalnızca kütle değişimine doğrudan bağlandığı bir yaklaşım kabul görmektedir. Fakat bu yaklaşımdaki eksik taraflar, ölçülmeye çalışılan kütle azaldıkça kendisini daha fazla hissettirmeye başlamıştır. Escherichia coli bakterisinin ^[1] ya da protein moleküllerinin ^[2] Si çubuklar üzerine seçmeli yerleştirilmesi de dahil, birçok deneysel sınamada, rijitlik etkisinin de hesaba katılmasını gerektirecek şekilde, pozitif frekans kaymaları gözlemlenmiş bulunmaktadır. Dolayısıyla, kütle ve rijitlik etkilerini ayıran kuramsal bir yaklaşım gerekmektedir.

1.1 Kuramsal Modelleme

Deney ve sonuçlara geçilmeden önce kuramsal modellemeyi bahsedilmesi uygun olacaktır. Modelleme için hem bir-örnek çift katmanlı (Ni/Au) yapının hem de girişim ızgarasının etkileri gözönüne alınmıştır. Öncelikle, serbest uçta bulunan ızgara dikkate alınmadan, L uzunluğunda çift katmanlı bir çubuğun çınlanım frekansı (herbir katman yoğunluğunun sabit olduğu düşünüldüğünde, kütle ve kalınlık arasındaki ilişki de kullanılarak) şu şekilde formüle edilir ^[3]:

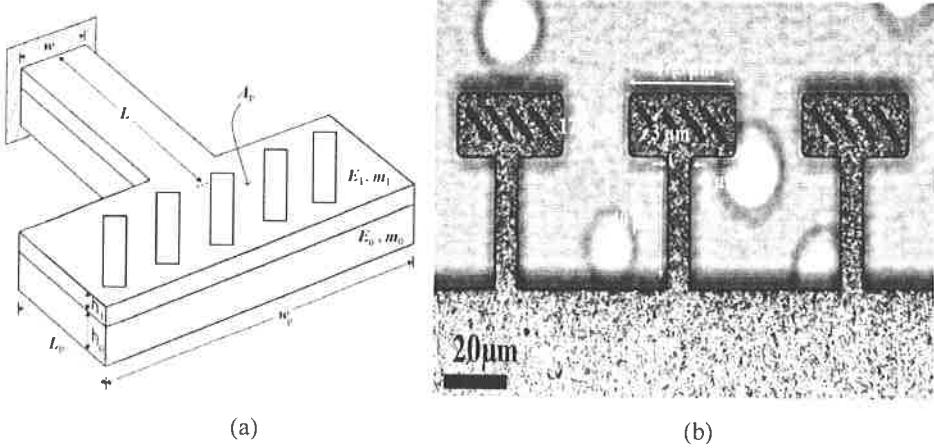
$$f = \left(\frac{1.8751^2}{4\pi} \right) \frac{m_0}{\rho_0 A L^2} \sqrt{\frac{E_0}{3\rho_0} \frac{(\rho_r^4 + 4\rho_r^3 E_r m_r + 6\rho_r^2 E_r m_r^2 + 4\rho_r E_r m_r^3 + E_r^2 m_r^4)}{(1+m_r)(\rho_r + E_r m_r)}} \quad (1)$$

Benzer şekilde ızgara kısmının çubuğun ucunda (mesnet noktasından L uzaklıkta) yer

alan bir kütle olduğu varsayılırsa ^[4], ızgaralı çubuk için de çınlanım frekansı şu şekli alır:

$$f = \left(\frac{1.732}{4\pi} \right) \frac{m_0}{\rho_0 A L^2} \sqrt{\frac{E_0 \left(\rho_r^4 + 4\rho_r^3 E_r m_r + 6\rho_r^2 E_r m_r^2 + 4\rho_r E_r m_r^3 + E_r^2 m_r^4 \right)}{3\rho_0 \left(\frac{A_p}{wL} + 0.236 \right) (1 + m_r) (\rho_r + E_r m_r)}} \quad (2)$$

Burada kullanılan parametrelerin bir tarifi Şekil 1’de verilmektedir. A toplam yüzey alanı, E elastik modül, L çubuk uzunluğu, ρ kütle yoğunluğu olarak kullanılmıştır. p indeksi ızgara platformu, θ indeksi alttaş, l indeksi kaplama, r indeksi ise kaplamanın alttaşa oranı tarifinde kullanılmıştır.



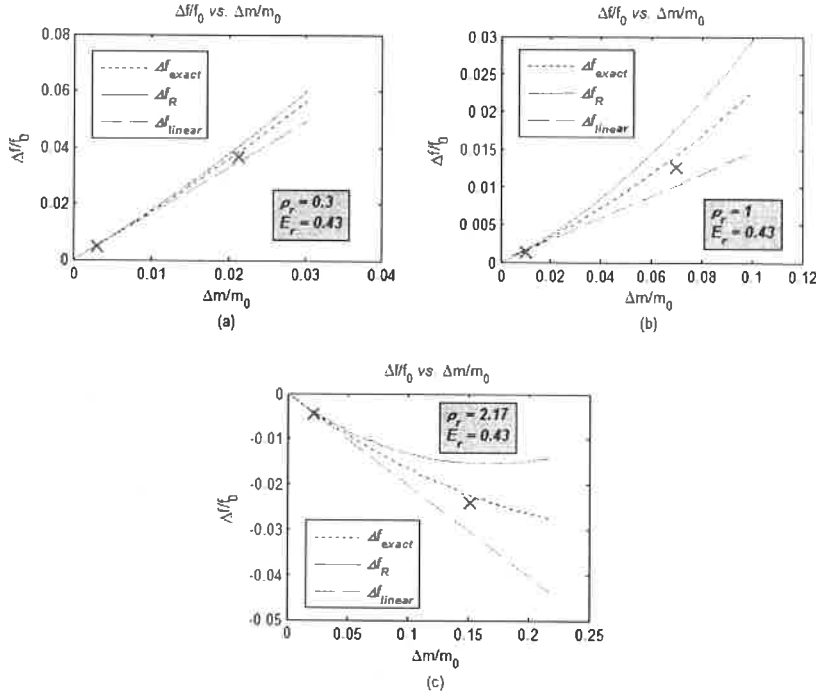
Şekil 1. Mikro çınlaç modellemesinde kullanılan parametreler ve numunelerin bir mikrofrafı.

Böylece çubuğun doğrusal kütle ölçüm hassasiyet sabitinin, R , üst katmanı oluşturan malzemenin kütlesindeki değişime göre birinci mertebeden yaklaşımla hesabı da kolaylıkla yapılabilir: $\Delta f \approx \frac{\partial f}{\partial m} \Delta m = R(E_0, \rho_0; E_r, \rho_r) \Delta m$. Bu da çok küçük üst katman kütle oranı,

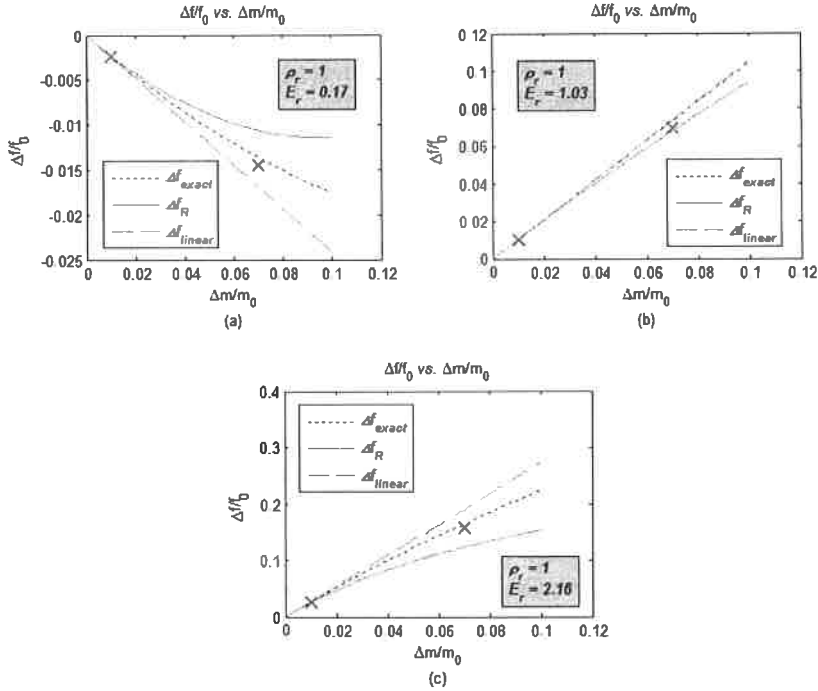
$m_r \ll 0.01$ için doğrusallaştırıldığında $R \approx R_l = \frac{f_0}{2m_0} \frac{-\rho_r + 3E_r}{\rho_r}$ şeklini alır.

1.2 Modelleme Örnekleri

Bu yaklaşımdan yola çıkılarak eğilme rijitliği ve kütledeki değişimlerin farklı etkileri öncelikle kuramsal iki ayrı durum için gösterildi. Şekil.2 sabit bir E_r için artan ρ_r 'nin etkisini göstermektedir. Şekil.2a ve b'deki pozitif frekans kayması, ρ_r Şekil. 1c'de daha da artırıldığında negatif olmaktadır. Herbir diyagramda, tam çözüm, birinci-derece yaklaşım (R) ve bunun doğrusallaştırılmış yaklaşımı, (R)'ye karşılık gelen üç grafik hazırlanmıştır. Çarpılar ise sonlu-elemanlar modellemesiyle elde edilen sonuçlara karşılık gelmektedir. Benzer şekilde, Şekil.3 de sabit bir ρ_r için artan E_r etkisini göstermektedir. Burada, Şekil.3a'da görülen negatif frekans kayması E_r artırıldığında pozitif olmaktadır.



Şekil. 2: Frekans kaymasının sabit elastik modül oranı için birikmiş kütle yoğunluğuna bağlı değişimi. Artan birikmiş kütle yoğunluğuyla pozitif kaymadan negatife dönüş gerçekleşmekte. (x'lar sonlu-elemanlar analizi sonuçlarını gösteriyor). Eğriler sırasıyla (...) tam çözüm, (—) birinci mertebeden yaklaşım ve (---) bu yaklaşımın küçük kütle artışı için doğrusallaştırılmış hali kullanılarak elde edilmiş frekans kaymalarını göstermektedirler.



Şekil. 3: Frekans kaymasının sabit birikmiş kütle yoğunluğu oranı için elastik modül oranına bağlı değişimi. Artan elastik modülle negatif kaymadan pozitif dönüş gerçekleşmekte. (x'lar sonlu-elemanlar analizi sonuçlarını gösteriyor). Eğriler sırasıyla (...) tam çözüm, (—) birinci mertebeden yaklaşım ve (---) bu yaklaşımın küçük kütle artışı için doğrusallaştırılmış hali kullanılarak elde edilmiş frekans kaymalarını göstermektedirler.

Şekil 2. sabit elastik modül oranı için birikmiş kütle yoğunluğuna bağlı frekans kaymasının değişimi görülmektedir. Artan birikmiş kütle yoğunluğuyla pozitif kaymadan negatife dönüş gerçekleşmekte. Şekil 3.te ise sabit birikmiş kütle yoğunluğu için elastik modül oranına bağlı frekans kaymasının değişimi görülmektedir. Artan birikmiş kütle yoğunluğuyla pozitif kaymadan negatife dönüş gerçekleşmekte. Tam analitik çözüm yapıldığı için iki durum için de dönüş noktası analitik olarak bulunabilir.

2 İNORGANİK UYGULAMA

2.1 Deney Düzeneği

Rijitlik ve kütle etkilerini birbirlerinden ayırtetmek maksadıyla bir deney düzeneği tasarlandı. Silisyum alttaş üzerine, litografi yoluyla çizilmiş çubuk şekilleri, elektrokimyasal kaplama yöntemi ile nikel malzeme kullanılarak dolduruldu. Daha sonra, çubukların alt kısımlarındaki Si, ıslak aşındırma yöntemi ile kaldırılarak, havada asılı çubuk yapısı elde edildi. Frekans ölçümü için, mikro çubukların uçlarına bir girişim ızgarası eklendi (Şekil 1). Girişim ızgarasına düşürülen laser ışınının, ızgara yüzeyinde yansıyan kısmı ile alttaş yüzeyinden yansıyan kısmı, bir girişim deseni oluşturur. Bir fotodedektör ile birinci mertebe girişimin şiddeti ölçülerek, salınım yapan çubuğun frekansını takip etmek mümkündür. Tasarlanan düzeneğin, çalışma hassasiyeti, ticari bir Doppler vibrometre ile karşılaştırmalı olarak kanıtlanmıştır^[5].

2.2 Deney Prosedürü:

Bir-örnek çift katmanlı mikro-çınlaç çubuk modellemesinin geçerliliğini deneysel olarak sınamak ve örnek bir hassasiyet sabiti hesaplayarak bununla karşılaştırılabilecek deneysel veriyi elde etmek üzere aşağıda adım adım belirtilen deney tasarlandı ve gerçekleştirildi:

- i. Öncelikle tek katman bir-örnek nikel mikro-çubukların çınlanım frekansları ölçüldü. (3µm genişliğinde 3 yarıkli ızgaraya sahip; 2 µm kalınlığında, 6µm eninde, ızgaraya kadar 60µm boyunda)
- ii. Buradan yola çıkılarak aygıt nikel katman için kalibre edildi (diğer bir deyişle, nikel katmanın elastik modülü hesaplandı: 112.53 ± 2.27 GPa).
- iii. Bunların üzerine, 482 nm kalınlığında altın malzeme, RF magnetron saçtırma yöntemiyle kaplandı ve tekrar çınlanım frekansları ölçüldü.
- iv. Buradan da aygıt altın katman için kalibre edildi (altın katmanın elastik modülü hesaplandı: 44.79 ± 1.38 GPa).
- v. Daha sonra iki ayrı kaplama seansında, sırasıyla 30 ve 40 nm'lik altın kaplamaları gerçekleştirildi ve yine çınlanım frekansları iki seans için de ölçüldü.
- vi. Bu son iki kaplamanın yarattığı deneysel frekans kaymaları ile kuramsal hesaplar karşılaştırıldı.

3 SONUÇLAR

Tablo 1'de deneysel sonuçlar ile kuramsal hesaplama sonucu beklenen/elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Burada, " R_{kur} " sütunları, yapılan son iki kaplama sırasında biriktirilmiş kütle miktarları 2. denklemde kullanılarak hesaplanan frekanslardaki kaymalar kullanılarak, " R_{den} " sütunları ise yine son iki kaplama sonunda ölçülmüş olan frekans kaymaları kullanılarak elde edilmiştir; 1 ve 2 indeksleri sırasıyla birinci ve ikinci kaplama sonundaki

durumları ifade etmektedir. Görüldüğü gibi, kuramsal hesaplama sonucu elde edilen hassasiyet değerleri ile deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen karşılıkları birbirlerine oldukça yakındır. Ayrıca ikinci kaplama sonunda elde edilen kuramsal ve deneysel değerlerdeki artış oranları da, yine beklendiği üzere, çok yakındır: R_{kur} %11.23 artarken, R_{den} %12.54 artmıştır. Sınanan bütün durumlarda, kütle artışına rağmen, ölçülen frekans kaymasının pozitif olması ve kullanılan yöntem ile modellemenin yapılabilmiş olması önemlidir.

Tablo 1

R_{kur1} (Hz/pg)	R_{den1} (Hz/pg)	R_{kur2} (Hz/pg)	R_{den2} (Hz/pg)
0.393	0.383	0.437	0.431
Hata = %2.49		Hata = %1.35	

$$R_{kur1} = \frac{\Delta f_{kur1}}{\Delta m_{den1}} \quad R_{den1} = \frac{\Delta f_{den1}}{\Delta m_{den1}}$$

$$R_{kur2} = \frac{\Delta f_{kur2}}{\Delta m_{den2}} \quad R_{den2} = \frac{\Delta f_{den2}}{\Delta m_{den2}}$$

Şekil 4. İnorganik uygulamada elde edilen terimler ve bunların yorumlamada kullanımı

4 DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada öncelikle çınlanım frekansındaki kaymanın mikro-çubuk çınlaç üzerine eklenmiş kütle miktarına bağlı ifadesi, eklenen kütlenin rijitlik etkisi de gözönüne alınarak, bir-örnek kaplı mikro çubuk modeli kapsamında konu edilmiş ve tam çözüm elde edilmiştir. Kuramsal örnek bağlamında elde edilen sonuçlar rijitlik ve kütle değişimlerinin çınlanım frekansı değişimi üzerindeki (yakın mertebelerde) yarışan etkilerini ortaya koymuştur. Ayrıca bu etkiler deneysel uygulama kapsamında da gözlenmiş ve kuramsal hesaplamalar deneysel sonuçlara çok yakın bulunmuştur. Böylelikle, mikro ölçekli çınlanım uygulamalarında, özellikle bir-örnek kaplanarak kütle eklenmesi sözkonusu olduğunda, frekans kaymasında sadece beklenen kütle değişiminin değil ayrıca gerçekleşen rijitlik artışının da etkili olduğu düşünülerek hareket edilmesinin doğru olacağı kuramsal ve deneysel olarak gösterilmiştir.

BİLGİ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiş olan Proje No: 105E148 kapsamında yapılmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] D. Ramos, et al, "Origin of The Response of Nanomechanical Resonators to Bacteria Adsorption", J. Applied Physics, 100 Art. No. 106105, 2006.
- [2] A. K. Gupta, et al, "Anomalous Resonance in a Nanomechanical Biosensor", Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A. 103-36 13362-13367, 2006.
- [3] R Sandberg, et al, "Temperature and Pressure Dependence of Resonance in Multi-Layer Microcantilevers", Journal of Micromechanics and Microengineering 15 1454–1458, 2005.
- [4] Warren C. Young and Richard G Budynas, "Roark's Formulas for Stress and Strain, 7th Ed." McGraw-Hill Book Company-2002.
- [5] A. Ozturk, H. I. Ocakli, N. Ozber, H. Kavakli, H. Urey, and B. E. Alaca, "A Magnetically Actuated Resonant Mass Sensor with Integrated Optical Readout" IEEE Photonics Technology Letters Vol.20 1905-1907, 2008.