



KONTROLLÜ EKSENEL GERİLME ALTINDA AKORT EDİLEBİLİR NANOTEL ÇINLACIN ELEKTROMEKANİK TASARIMI

M. Yılmaz, M. N. Esfahani, B. E. Alaca

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

ABSTRACT

Mechanical resonators have been used as frequency references displaying high sensitivity and stability as a part of electronic circuits since the late 19th century. With the advances in micro and subsequently in nano technologies, resonators have become smaller and lead to oscillators working at beyond GHz frequencies. In this study, the oscillation of a double clamped nanowire resonator under axial loading is studied and the use of axial loading as a tuning technique is investigated. Nanowire resonators are modelled with mechanical equilibrium principles and the frequency shifts that occur with axial loading is determined. In the next step of this study, the mutual behavior of this nanowire resonator with actuator and sensor electronics will be evaluated and a layout design for a successful oscillator will be accomplished. The resulting design approach is thought to be a path forward for future nanowire-based oscillators.

ÖZET

Mekanik çınlaçlar (rezonatörler), 19. yy'in sonundan itibaren elektrik devreleri ile tümleştirilerek yüksek hassasiyet ve kararlılık gösteren frekans referansları olarak kullanılmaya başlanmıştır. Mikro ve sonrasında nano teknolojiler sayesinde gittikçe küçülen çınlaç boyutları, GHz ve üzerinde frekans değerlerinde çalışan salınmaçlar (osilatörler) ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmada, iki ucundan bağlı ankastre giriş şeklindeki bir nanotel çınlacın ekselel gerilmeler altındaki salınımları incelenerek gerilmenin akort tekniği olarak kullanımı değerlendirilmiştir. Nanotel çınlaç sistemi öncelikle mekanik denge prensipleri çerçevesinde modellenerek, ekselel kuvvet varlığında meydana gelen frekans kaymaları belirlenmiştir. Çalışmanın bir sonraki basamağında bu nanotel çınlacın tümleştirildiği tahrik ve okuma elektroniği ile ortak davranışı değerlendirilerek başarılı bir salınmaç için serim tasarımı yapılacaktır. Ortaya çıkacak tasarım yaklaşımının nanotel tabanlı salınmaçlar konusunda yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

1. GİRİŞ

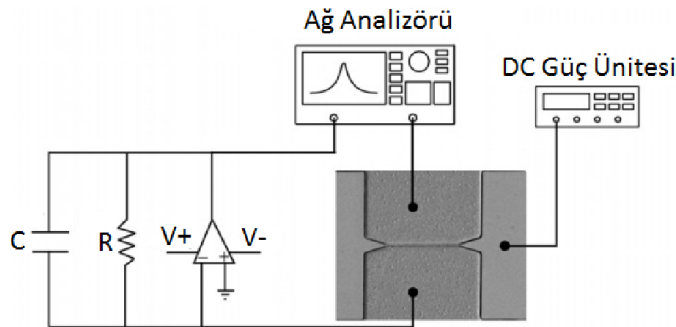
Nanomekanik çınlaçlar genellikle radyo frekansları seviyesinde doğal salınım davranışı gösteren mekanik titreşim sistemleridir [1]. Mekanik çınlaç sistemlerinin kullanım alanlarının başında bant geçirici filtre bulunmaktadır. Bu amaçla kullanılan çınlaç sistemleri elektronik bir yonga içerisinde filtre görevi görerek sadece belirli frekanslardaki (doğal

salınım frekanslarında) sinyallerin sistemden alınmasına imkan sağlar. Bu kullanımda, çınlaç sistemi elektronik yonga ortamı ile bağlantılı olmalıdır [2]. Nanoteller, çınlaç mimarilerinde yoğunlukla denenilen yapıların başında gelmektedir.

İmalat teknolojilerinden kaynaklı kısıtlara bağlı olarak, çınlaçların üretimlerinden sonraki salınım frekans değerleri, sistemin tasarımında hesap edilen salınım frekans değerlerinden sapma gösterir. Bundan dolayı nanomekanik çınlaçların salınım frekanslarının daha sonradan kontrol edilebilir olması (akort edilebilir olması) oldukça önemlidir [3]. Bu konuda yapılan araştırmalar sonucunda geliştirilen akort yöntemleri iki temel kategoriye ayrılırlar:

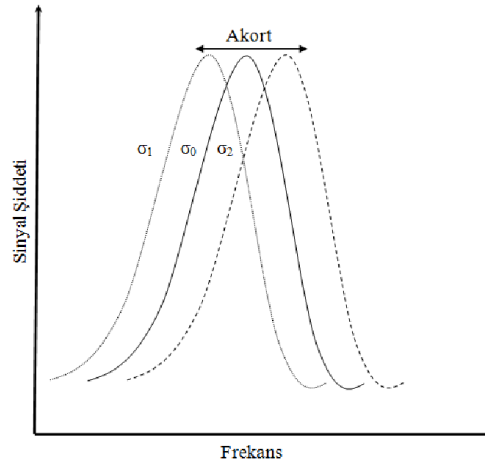
- Kalıcı yapısal değişiklikler: (i) Çınlaç etkin kütlelerinin kalıcı olarak değiştirilmesi [4,5], (ii) çınlaç etkin boyutunun kalıcı olarak değiştirilmesi [6,7] veya (iii) çınlaç malzeme özelliklerinin kalıcı olarak değiştirilmesi ile akort edilmeleridir [8].
- Geçici etkin değişiklikler: (i) Elektrostatik kuvvetlerden (eksenel [9,10] veya enine [11]) faydalanılması, (ii) elektrotermal etkilerden faydalanılması [12,13], (iii) çınlaç etkin kütlelerinin değiştirilmesi [14] veya (iv) çınlaç etkin boyutunun değiştirilmesi ile akort edilmeleridir [9,15].

Bu çalışmada, yukarıda belirtilen genel metotlara alternatif olarak, iki ucundan bağlı ankastre giriş şeklinde nanotel çınlaç yapısı üzerinde tek eksenli mekanik gerilme oluşturmak suretiyle bir akort tekniği önerilmektedir. Çınlaç sistemi ve çalışma düzenine ait ölçüm düzeneği, Şekil 1’de görülmektedir. Bu sistemde uygulanan tek eksenli gerilme vasıtasıyla çınlaç salınım frekansı kayarak, sistemin akort edilmesi sağlanmış olacaktır. Uygulanan akort gerilmesinin frekans davranışı üzerindeki etkisi sembolik olarak Şekil 2’de gösterilmiştir.



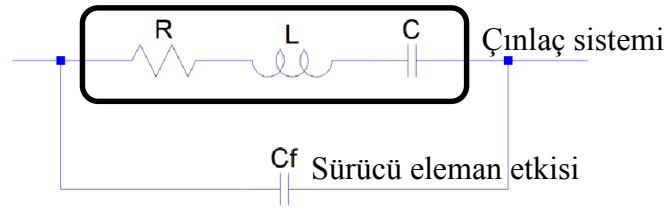
Şekil 1. Çınlaç sisteminin şematik gösterimi. DC potansiyel ile kutuplanan nanotel çınlaç, iki elektrot arasına yerleştirilmiştir. Tahrik elektrodu ile salınıma sokulan nanotel çınlacın hareketleri okuma elektrodu üzerinden bir ağ analizörü yardımıyla okunabilir.

Nanotel çınlacın geçireceği yer değiştirmelerin çok küçük olması sebebiyle tahrik ve özellikle de okuma elektroniği çok önemli bir hale gelmektedir. Zira nm mertebesinde oluşan yer değiştirmelerin dikkatli tasarlanmış bir çevirici (transduser) teknolojisi ile elektriksel sinyal haline dönüştürülmesi gerekir. Salınım genliğinin okunabilir düzeyde olması için çınlaç sisteminin mekanik tasarımın yanı sıra elektronik olarak eyleyiciye ait veriler de (C_f : Tahrik elektrodundan kaynaklı parazitik kapasite değeri) tanımlanarak tasarlanmalıdır. Çınlaç sistemi, elektronik olarak Şekil 3’te görüldüğü üzere RLC devre temelinde tasarlanır.

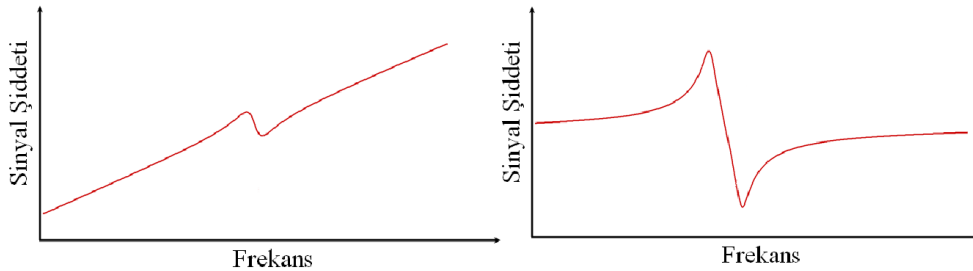


Şekil 2. Tek eksenli gerilme etkisiyle (çekme veya basma etkileri) çınlacın doğal frekansında meydana gelen kayma.

Eyleyicinin etkisiyle okuma sinyalinde meydana gelen iki uç durum Şekil 4'te gösterilmektedir. Örneğin Şekil 4a'daki durumda C_f ile gösterilen parazitik etkinin baskın olması, çınlanım esnasında oluşan nanotel hareketinin sinyale dönüşmesini engeller. Bunun sonucunda sağlıklı bir frekans okuması yapılamaz. Şekil 4b'deki ise parazitik etkinin azalması sonucunda harekete bağlı sinyalin artması sayesinde sağlıklı çınlanım okuması mümkün hale gelmektedir.



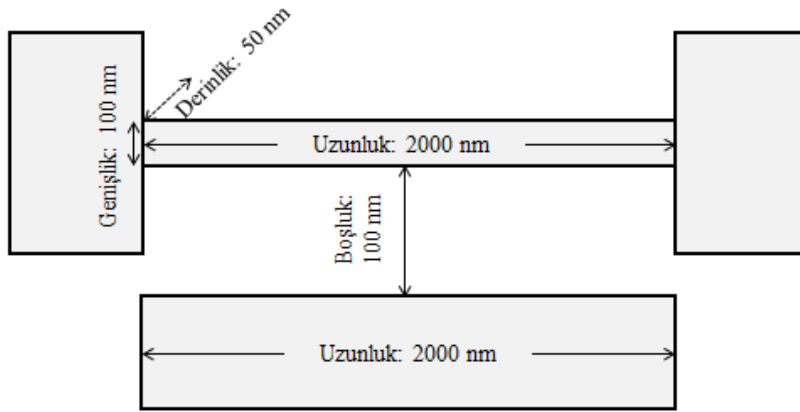
Şekil 3. Çınlaç sisteminin elektronik karşılığı olan RLC devresi



Şekil 4. (a) Parazitik etkinin baskın olduğu ve dolayısıyla tespit edilmesi zor çınlaç sinyali, (b) Harekete bağlı sinyalin baskın olduğu ve tespit edilmesi kolay çınlaç sinyali.

2. Çınlaç Sisteminin Mekanik Tasarımı

Çınlaç yapısının her iki ucundan sabitlenmiş ankastre kiriş şeklinde olması, sistemin rijitliğinin artmasına ve bu nedenle de sistemin doğal salınım frekans değerlerinin daha yüksek seviyelerde olmasına imkan sağlamaktadır. Mekanik bir çınlaçın doğal salınım frekansı Denklem 1'de görüldüğü üzere yapının etkin kütlesi ve etkin rijitliğine bağlıdır [16].



Şekil 6. Nanotel çınlaç sistemine ait ikinci mekanik tasarım.

Şematik olarak gösterilen bu sistemlere ait yapılan modelleme çalışmaları sonucunda elde edilen frekans sapma sonuçları şekil 7 ve 8'de verilen grafikler ile verilmektedir. Bu grafikler yardımıyla, nanotel çınlaç sisteminin frekansındaki sapmanın yaklaşım formüllerinde olduğu gibi eksenel gerilmelerin karekök'üyle bağlantılı olduğu görülebilmektedir.

3. Çınlaç Sisteminin Elektronik Tasarımı

Yapılan bu çalışmada, iki ucundan ankastre bağlı nanotel çınlaç, elektronik olarak tasarlanacaktır. Herhangi bir eksenel gerilmenin uygulanmadığı çınlaç sistemleri için elektromekanik enerji dönüşümü Nguyen tarafından yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada, mekanik özellikler olan etkin kütle, yay rijitliği ve sönümlenme değerleri sırasıyla endüktans, kapasite ve direnç ile aşağıdaki gibi ilişkilendirilmiştir [2].

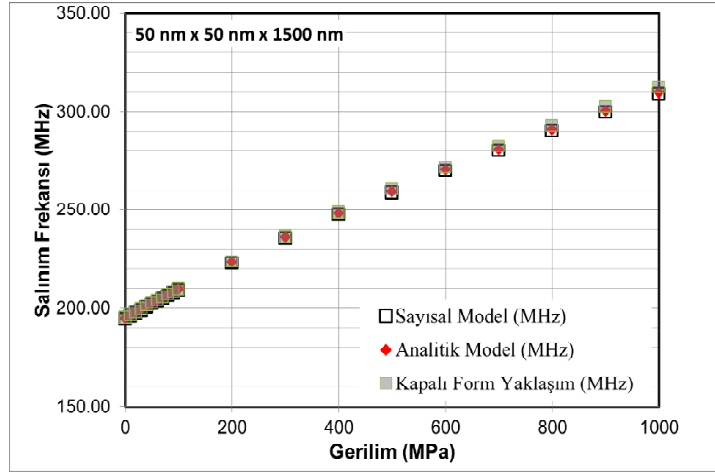
$$L_x = \frac{m_{re}}{\varphi_e^2}, \quad C_x = \frac{\varphi_e^2}{k_{re}}, \quad R_x = \frac{\sqrt{k_{re} m_{re}}}{Q \varphi_e^2} = \frac{c_{re}}{\varphi_e^2} \quad (4)$$

L_x : Çınlaç kütesinin elektronik karşılığı olarak endüktans değeri, m_{re} : Çınlacın etkin kütlesi, φ_e^2 : Mekanik enerjiden elektronik enerjiye dönüşüm katsayısı, C_x : Çınlaç rijitliğinin elektronik karşılığı olarak kapasite değeri, k_{re} : Çınlacın etkin rijitliği, R_x : Çınlaç sönümlenmesinin elektronik karşılığı olarak direnç değeri, Q : Çınlacın içerisinde bulunduğu çevresel koşullara ait kalite çarpanı, c_{re} : Çınlacın mekanik sönümlenmesi

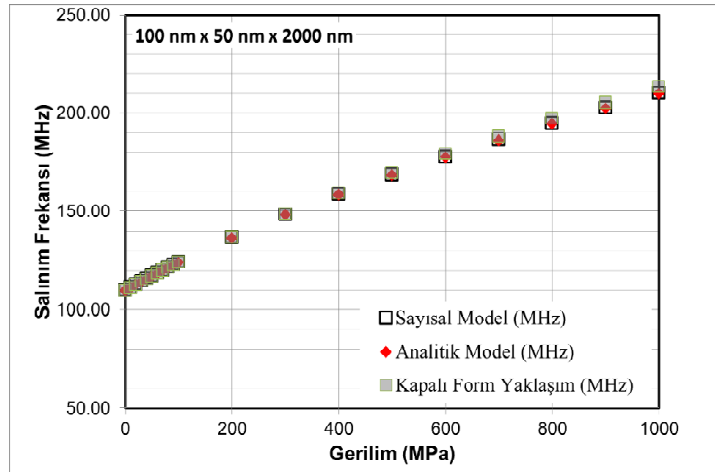
Yapılan bu çalışmanın asıl çıktısını oluşturan bu kısımda, eksenel gerilmelerin etkisiyle iki ucundan ankastre giriş şeklinde bağlı nanotel çınlaçların salınım mod yapılarında meydana gelen değişimlerin, sistemin etkin kütle ve etkin rijitliğine olan etkisinin, elektromekanik dönüşüm katsayısını nasıl değiştirdiği belirlenmiş ve buna göre çınlaç sistemlerine ait etkin endüktans, etkin kapasite ve etkin direnç değerleri tespit edilmiştir.

Yapılan modelin doğruluğu, SPICE elektronik devre analiz programı ve teorik frekans sapması göz önüne alınarak teyit edilmiştir.

Çınlaç sisteminin elektromekanik tasarımı genel hatlarıyla toparlanacak olursa, sistemin eksenel gerilmeler varlığında gerçekleştirilen mekanik tasarımıyla çınlacın yer değiştirme



Şekil 7. Birinci mekanik tasarım nanotel çınlaç için salınım frekansının uygulanan aksel çekme kuvvetiyle değişimi.



Şekil 8. İkinci mekanik tasarım nanotel çınlaç için salınım frekansının uygulanan aksel çekme kuvvetiyle değişimi.

denklemleri ve salınım mod yapıları elde edilmektedir. Elde edilen mod yapıları kullanılarak çınlacın aksel kuvvet sonucunda elde edilen etkin kütlesi tespit edilmektedir. Mekanik nanotel sisteminin toplam rijitliği, mekanik ve elektronik bileşenlerden oluşmaktadır. Elektronik bileşenin hesaplanmasında sistemin tahrik elektroduna olan etkin uzaklığı kullanılmaktadır. Mekanik rijitlik ise, aksel gerilmelerin hesaba katılmasıyla tekrar modellenir. Bütün bu işlemlerden sonra sisteme ait elektromekanik dönüşüm katsayısı tespit edilir.

Aşağıda verilen Tablo 1'de farklı aksel gerilmeler için birinci mekanik çınlaç tasarımının elektronik karşılığı verilmektedir.

Geometrik tasarımın bir parçası olan nanotel çınlaç ve elektrot arası mesafenin RLC değerlerine olan etkisi Tablo 2'de görülebilmektedir. Bu veriler nanotel ve elektrot arası uzaklığın 200 nm'den 50 nm'ye indirilmesiyle elde edilmiştir ve SPICE analizleri vasıtasıyla sisteme olan etkileri tam olarak görülebilmektedir.

Tablo 1. Birinci mekanik tasarıma ait sistemin farklı eksenel gerilmeler altındaki elektronik parametre karşılığı.

Eksenel Gerilmeler	R (Ω)	L (H)	C (F)
0 Pa	1.35627e+008	1106.28	6.01415e-022
50 Mpa	1.40049e+008	1100.28	5.60972e-022
100 Mpa	1.44107e+008	1093.46	5.26537e-022
500 Mpa	1.66698e+008	1022.63	3.6801e-022
1 Gpa	1.80446e+008	927.932	2.84985e-022

Tablo 2. Birinci mekanik tasarıma ait sistemin farklı nanotel – elektrot açıklıkları altındaki elektronik parametre karşılığı.

Elektrot Çınlaç Açıklığı	R (Ω)	L (H)	C (F)
50 nm (1GPa Gerilme)	6.86931e+005	3.55114	7.5256e-020
200 nm (1 GPa Gerilme)	1.80446e+008	927.932	2.84985e-022
50 nm (100 MPa Gerilme)	5.47273e+005	4.1997	1.4022e-019
200 nm (100 MPa Gerilme)	1.44107e+008	1093.46	5.26537e-022

Elde edilen R, L, C değerleri SPICE ortamında tasarlanan devreye tanımlanırsa, çınlaç sisteminin salınım frekansı tespit edilebilir. R, L, C değerleri, sadece çınlaç sistemini modellemektedir. Sistemin tamamının modellenmesi sonucunda ise, nanotel çınlaç sisteminden alınabilecek sinyal seviyesi tespit edilerek tasarımın uygulanabilir olup olmadığı tespit edilebilir. Bunun gerçekleştirilmesi için çınlaç sisteminin çevresinde bulunan etkin kapasitelerin sisteme dahil edilmesi gerekmektedir. Çınlaç sisteminin çalışma ortamının şematik gösterimi Şekil 9'daki gibidir. Çalışma koşulu altındayken sistem üzerinde AC ve DC gerilimi iletmek üzere ve okuma elektrodundan sinyal almak üzere 3 adet sonda bulunacaktır.

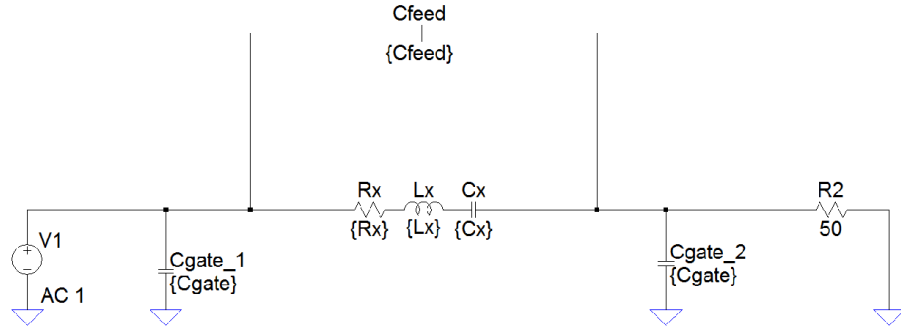
Sistemde bulunan diğer etkin kapasite değerleri aşağıdaki gibidir; (Elektrotlar birbirinin aynısıdır)

- Nanotel çınlaç ve tahrik elektrodu arasında, AC sinyalin çınlaça iletilmesinden önce etkin olan {Cgate_1} kapasitesi
- Nanotel çınlaç ve okuma elektrodu arasında, salınım sinyalinin elektroda iletilmesinden önce etkin olan {Cgate_2} kapasitesi
- Çınlaç hariç tüm sistem elemanlarının (Tahrik elektrodu, okuma elektrodu ve probler) {Cfeed} kapasitesi



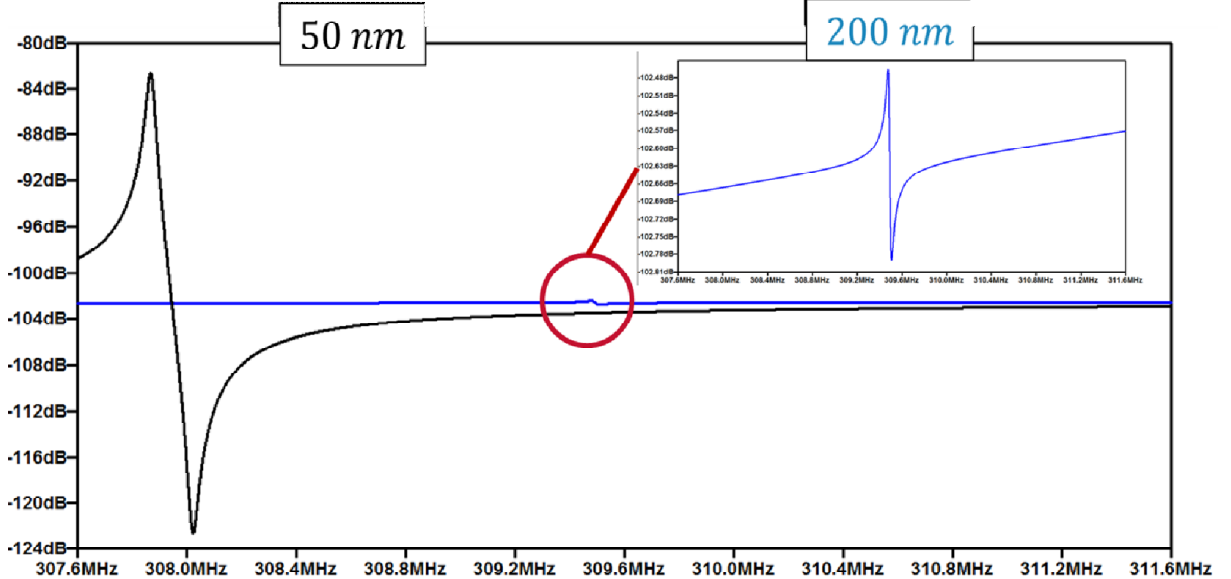
Şekil 9. Nanotel çınlaç sisteminin çalışma ortamının şematik gösterimi.

Sisteme ait elektronik devre tasarımı Şekil 10’da gösterilmektedir.



Şekil 10. Nanotel çınlaç sisteminin çevre elemanlarının varlığındaki eşlenik devresi.

1 GPa aksel çekme gerilmesinin uygulandığı Şekil 5’te görülen 50 nm x 50 nm x 1500 nm geometrisine sahip çınlaç sisteminin SPICE çıktısı, nanotel – elektrot arası uzaklığın 50 nm ve 200 nm olması durumunda Şekil 11’de verilmektedir.



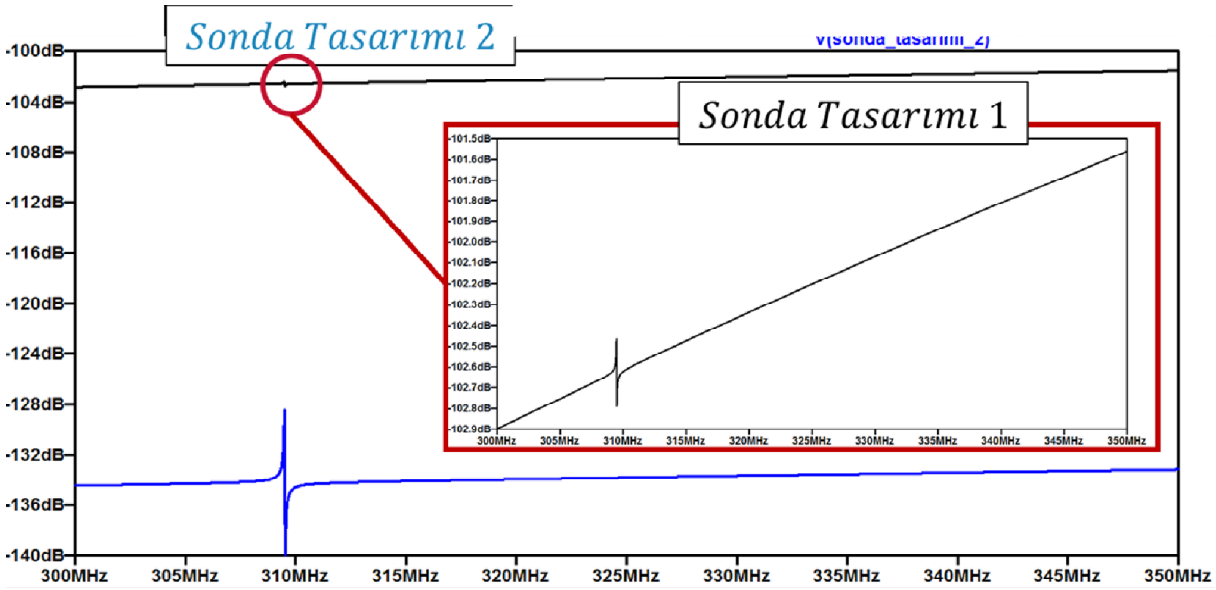
Şekil 11. Nanotel – Elektrot açıklığının sinyal seviyesine ve okuma frekansına olan etkisi.

Sinyal seviyesi belirli bir değerin üzerinde olmalıdır ki sistemde okuma gerçekleştirilebilsin. Bu nedenle sisteme ait sinyal hat gürültülerinin sinyal seviyesine etkisinde incelenmelidir. Sinyal hat gürültüleri, sistemde bulunan çevresel kapasite olan {Cfeed}’e dahil olmaktadır. Nümerik olarak 2 farklı sonda yerleşimi modellenmiş ve çevresel kapasite değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler Tablo 3’te verilmektedir.

Tablo 3. Sonda tasarımının çevresel kapasiteye olan etkisi.

	Cfeed (F)
Sonda tasarımı 1 (Sondalar arası 2 μm)	$\sim 7.6\text{e-}017$
Sonda tasarımı 2 (Sondalar arası $>15 \mu\text{m}$)	$\sim 2\text{e-}018$

Elde edilen bu değerlerin SPICE çalışması gerçekleştirildiğinde Şekil 12'deki sonuç elde edilmektedir. Sisteme ait frekans değerinde bir değişiklik söz konusu değilken, sistemin sinyal seviyesinde oldukça ciddi bir değişim gözlemlenmektedir.



Şekil 12. Çevresel kapasite değerinin sinyal seviyesine olan etkisi.

4. SONUÇ

Yapılan çalışmada, iki ucundan bağlı ankastre kiriş şeklindeki nanotel çınlaç sistemlerinin salınım frekanslarının aksel gerilmeler ile akort edilebilmesi için mekanik ve elektronik sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Üretimden kaynaklı olarak çınlaç sisteminde meydana gelen veya kontrollü olarak sisteme uygulanan aksel gerilmelerin elektronik yongaya bütünleşik olarak çalışacak olan nanotel çınlaç sistemlerinin sinyal seviyelerine olan etkisinin üretimden önce bilinmesi ve nanotel çınlaç tasarımının bu prensiplerle yapılması öngörülmektedir.

5. TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma, Tübitak tarafından 112E058 sayılı ve “MEMS Tabanlı, Geniş Bant Aralığında Aktif Frekans Ayarlı Nanomekanik Çınlaç Geliştirilmesi” başlıklı proje kapsamında desteklenmektedir.

REFERANSLAR

- [1] Javaheri, H., Barbiellini, B. ve Noubir, G., "Energy transfer performance of mechanical nanoresonators coupled with electromagnetic fields," *Nanoscale Research Letters*, 7:572, 2012
- [2] Bannon, F.D., sClark, J.R. ve Nguyen, C.T.C., "High-Q HF Microelectromechanical filters," *IEEE Journal of Solid State Circuits*, vol. 35, no. 4, 512-526, 2000
- [3] Lee K.B. ve Cho, Y.H., "A triangular electrostatic comb array for micromechanical resonant-frequency tuning", *Sensors and Actuators. A, Physical*, 70(1-2), pp. 112-117, 1998
- [4] Chiao, M. ve Lin, L., "Post-packaging tuning of microresonators by pulsed laser deposition," *TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 12th International Conference on, 2003* , vol.2, no., pp.1820,1823 vol.2, 8-12 June 2003
- [5] Joachim, D. ve Liwei L., "Characterization of selective polysilicon deposition for MEMS resonator tuning," *Microelectromechanical Systems, Journal of* , vol.12, no.2, pp.193,200, Apr 2003
- [6] Enderling, S., Hedley, J. *et al.*, "Characterization of frequency tuning using focused ion beam platinum deposition," *J. Micromech. Microeng.* 17 213, 2007
- [7] Syms, R.R.A., Moore, D.F., "Focused ion beam tuning of in-plane vibrating micromechanical resonators," *Electronics Letters*, vol.35, no.15, pp.1277,1278, 22 Jul 1999
- [8] Courcimault, C.G., Allen, M.G., "High-Q mechanical tuning of MEMS resonators using a metal deposition -annealing technique," *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCERS '05. The 13th International Conference on* , vol.1, no., pp.875,878 Vol. 1, 5-9 June 2005
- [9] Jensen, K., Weldon, S., Garcia, H. ve Zettl, A., "Nanotube radio," *Nano Lett.*, 7(11), 3508 – 3511, 2007
- [10] Purcell, S.T., Vincent, P., Journet, C. ve Binh, V.T., "Tuning of nanotube mechanical resonances by electric field pulling," *Phys Rev Lett.*, 89(27):276103, 2002
- [11] Kuen, K.O., Yeong, L.G., Jung, H.H. ve Won, K.J., "Molecular dynamics modeling and simulations to understand gate-tunable graphene-nanoribbon-resonator," *Physica E, Volume 45*, p. 194-200, 2012
- [12] Seong, C. J., Hyungbin S., Baik, C.W., *et al.*, "Electrothermal noise analysis in frequency tuning of nanoresonators," *Solid-State Electronics, Volume 52, Issue 9, Pages 1388-1393*, September 2008
- [13] Remtema, T. ve Lin, L., "Active frequency tuning for micro resonators by localized thermal stressing effects," *Sensors and Actuators A-Phys*, vol. 91, no. 3, 326-332, 2001
- [14] Je, S.S., Harrison, J. C. *et al.*, "In situ tuning of a MEMS microphone using electrodeposited nanostructures," *J. Micromech. Microeng.*, 19, 035015, 2009
- [15] Kang, J.W., Kim, K.S. ve Park, J., "Study on tunable resonator using a cantilevered carbon nanotube encapsulating a copper nanocluster," *Physica E: Low-dimensional*

Systems and Nanostructures, Volume 43, Issue 4, Pages 909-913, 2011

- [16] Arkan, E.F., Sacchetto, D., Yildiz, I., Leblebici, Y. ve Alaca, B.E., "Monolithic integration of Si nanowires with metallic electrodes: NEMS resonator and switch applications," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 21, 125018 (2011).
- [17] Bokaian, A., "Natural frequencies of beams under tensile axial loads," *Journal of Sound and Vibration*, 142(3), 482 – 498, 1990
- [18] Bokaian, A., "Natural frequencies of beams under compressive axial loads," *Journal of Sound and Vibration*, 126(1), 49-65, 1988
- [19] Bouwstra, S. ve Geijselaers, B., "On the resonance frequencies of microbridges," *Solid-State Sensors and Actuators, 1991. Digest of Technical Papers, TRANSDUCERS '91., 1991 International Conference on*, vol., no., pp.538,542, 24-27 June 1991
- [20] Liu C., *Foundations of MEMS* (Upper Saddle River, NJ: Pearson Education Inc.), 2006
- [21] Bloch, A., "Electromechanical analogies and their use for the analysis of mechanical and electromechanical system," *Electrical Engineers - Part I: General, Journal of the Institution of*, vol.92, no.52, pp.157,169,1945