

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ NANO ŞERİTLERİN SİLİNDİRİK EĞİLME TİTREŞİMİ

Mustafa ARDA^{1, a)}

¹Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü 22130, EDİRNE

^{a)}mustafaarda@trakya.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada fonksiyonel derecelendirilmiş nano şeritlerden oluşan kompozit plakların serbest titreşim analizi yapılmıştır. Nano şerit klasik lamine plak teorisinin silindirik eğilme denklemleri ve Eringen'in yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak modellenmiştir. Silindirik eğilme hareketi nano şeritin yanal doğrultuda sonsuz uzunluğa sahip olduğu varsayımıyla tanımlanmıştır. Nano şerit malzeme özelliklerinin kalınlık doğrultusunda üstel fonksiyonla değiştiği kabul edilmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş nano şeritlerin serbest titreşim analizi iki kenarında basit destekli sınır şartı için yapılmıştır. Yerel olmayan elastisite parametresinin, fonksiyonel malzeme değişimi katsayısının ve nano şerit uzunluğunun serbest titreşim frekansına etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları fonksiyonel derecelendirilmiş nano kompozitlerin modellenmesinde faydalı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Silindirik eğilme, Yerel olmayan elastisite, Nano şerit

ABSTRACT

Free vibration analysis of a functionally graded nano plate which consist of nano strips have been studied in the present study. Cylindrical bending governing equations of motion for classical laminated plate theory and Eringen's nonlocal elasticity theory have been used for modeling of the functionally graded nano strips. Cylindrical bending equations have employed with the assumption of infinitely long nanostrip in the lateral direction. Free vibration analysis of functionally graded nano plate has been carried out for simply supported boundary conditions in both edges. Effects of the nonlocal parameter, material grading parameter and nano strip length to the free vibration frequency of the functionally graded nano plate have been investigated. Results of the present study could be useful for designing of advanced functional nanocomposites.

Keywords: Cylindrical bending, Nonlocal elasticity, Nano strip

1. GİRİŞ

Nanoteknoloji son otuz yılda önemli gelişmeler kaydetmiştir. Nano boyuttaki yapıların duyulan ihtiyaca göre modellenmesi, düzenlenmesi ve üretilmesi önceden imkansız gibi gözükken birçok uygulamanın gerçekleştirilebilmesini sağlamıştır. Nano şeritler ise yüksek potansiyele sahip ve birçok uygulama alanı olan nano yapılardan bir tanesidir. Manyetik [1], süperiletken [2,3], optik [4] ve diğer üstün

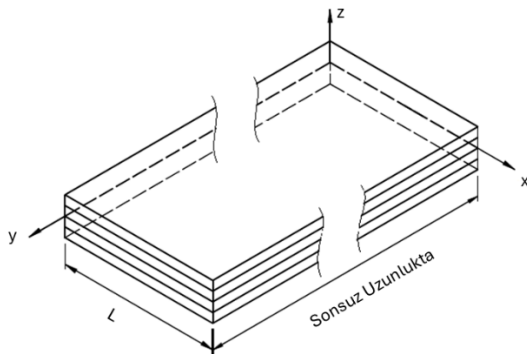
fiziksel özellikleri [5,6] nedeniyle nano şeritlerin çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılması mümkün görülmektedir. Nano şerit yapısı yanal doğrultuda sonsuz uzunluğa sahip ve çok ince kalınlığa sahip yapılar olarak tanımlanır. Farklı fiziksel özelliklere sahip nano şeritlerin üst üste dizilerek sıralanmasıyla kalınlık doğrultusunda malzeme özelliklerinin değiştiği katmanlı nano kiriş yapısı oluşur. Bu tür yapılar fonksiyonel derecelendirilmiş nano plak olarak adlandırılmaktadır. Literatürde

fonksiyonel derecelendirilmiş nano kirişler ve nano plaklarla ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır [7–25]. Fonksiyonel derecelendirilmiş nano yapıların kullanıldığı enerji hasadı [26,27], piezoelektrik [28], elektrokimyasal [29] ve rezonatör[30,31] uygulamaları araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada üst üste dizilmiş nano şeritlerden oluşan fonksiyonel derecelendirilmiş nano plakların üç boyutlu titreşimi incelenmiştir. Klasik lamine plak teorisi ve Eringen'in yerel olmayan elastisite teorisi nano şerit yapısının üç boyutlu modellenmesinde kullanılmıştır. Nano plağın kalınlık doğrultusunda değişen malzeme özellikleri üstel fonksiyonla tanımlanmıştır. Nano kirişin her iki kenarında sabit destekli mesnetlerin olduğu varsayılmıştır. Malzeme değişimi parametresi, yerel olmayan parametre ve nano şerit uzunluğunun serbest titreşim frekansına olan etkisi araştırılmıştır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, nano plağın katmanlı silindirik plaklardan (nano şerit) oluştuğu düşünülerek modelleme yapılmıştır. Genellikle kiriş yapıları Euler-Bernoulli ve Timoshenko-Ehrenfest teorileri kullanılarak modellenir. Bu çalışmada ise çok ince plakların üst üste dizilmesiyle oluşan nano kiriş yapısı üç boyutlu klasik lamine plak teorisi kullanılarak modellenmiştir.

2. ANALİZ

Nano şeriti dikdörtgen plak şeklinde ele alalım. Plak, yanal (y) doğrultuda sonsuz uzunluğa ve aksenal (x) doğrultuda sonlu uzunluğa sahip olsun. Şekil-1'de nano plak yapısının şematik çizimi görülmektedir.



Şekil 1 Nano şeritlerden oluşan fonksiyonel derecelendirilmiş plak yapısı [32]

Bu durumda, üç boyutta yer alan yer değiştirmeler (x,y,z) sadece x doğrultusunun fonksiyonu olarak ifade edilir. Böylece y değişkenine bağlı tüm türevler sıfır olur ve plak

silindirik yüzey olarak eğilme hareket yapar. Bu durum literatürde daha önceden de bahsedilmiş olan silindirik eğilme davranışını temsil eder [33].

Nano ölçekteki boyut etkisini göz önüne almak için Eringen'in tanımladığı yerel olmayan elastisite temel bünye denklemi, gerilme gradyanı elastisite teorisi için aşağıdaki gibi ifade edilir [34].

$$(1 - \mu \nabla^2) \tau_{kl} = \lambda \varepsilon_{rr} \delta_{kl} + 2G \varepsilon_{kl} \quad (1)$$

burada τ_{kl} yerel olmayan gerilme tensörünü, ε_{kl} gerinim tensörünü, λ ve G ise Lamé sabitlerini, μ yerel olmayan elastisite parametresini ifade etmektedir. Eşitlik (1), gerilme-gerinim ilişkisine aşağıda görüldüğü şekliyle uygulanır [35]:

$$\left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) \tau_{kl} = E \varepsilon_{kl} \quad (2)$$

burada E elastisite modülünü ifade etmektedir.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler en az iki veya daha çok malzemenin bir araya getirilerek karışmasıyla oluşur. Malzeme karışım oranlarının matematiksel fonksiyon olarak tanımlanması mümkündür. Bu çalışmada malzeme özelliklerinin (elastisite modülü, kayma modülü, Poisson oranı, yoğunluk) fonksiyonel değişiminin üstel fonksiyonla olduğu kabul edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} E(z) \\ G(z) \\ \nu(z) \\ \rho(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_0 \\ G_0 \\ \nu_0 \\ \rho_0 \end{bmatrix} e^{\lambda z} \quad (3)$$

burada λ malzeme değişim parametresini ve E_0 , G_0 , ν_0 , ρ_0 nano kiriş alt yüzeyindeki malzeme özelliklerini tanımlamaktadır. Silindirik eğilme hareketinin yönetici denklemi klasik lamine plak teorisi ve Eringen'in yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir:

$$A_{11} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - B_{11} \frac{\partial^3 w(x,t)}{\partial x^3} = \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) \left(I_0 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} - I_1 \frac{\partial^3 w(x,t)}{\partial x \partial t^2}\right) \quad (4)$$

$$A_{66} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) \left(I_0 \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2}\right) \quad (5)$$

$$B_{11} \frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial x^3} - D_{11} \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} = \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left(I_0 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} - I_2 \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^2 \partial t^2} + I_1 \frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial x \partial t^2} \right) \quad (6)$$

Yukarıda belirtilen malzeme özellikleri ve atalet terimleri aşağıda belirtildiği şekliyle tanımlanır:

$$\begin{bmatrix} A_{11} \\ B_{11} \\ D_{11} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{(1-\nu(z)^2)} \begin{bmatrix} 1 \\ z \\ z^2 \end{bmatrix} dz \quad (7)$$

$$A_{66} = \int_{-h/2}^{h/2} G(z) dz \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \rho(z) \begin{bmatrix} 1 \\ z \\ z^2 \end{bmatrix} dz \quad (9)$$

Üç boyuttaki yer değiştirme fonksiyonları harmonik titreşim varsayımıyla aşağıda görüldüğü şekliyle değişkenlerine ayrılabilir:

$$\begin{bmatrix} u(x,t) \\ v(x,t) \\ w(x,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U(x) \\ V(x) \\ W(x) \end{bmatrix} e^{i\omega t} \quad (10)$$

Burada i karmaşık sayıyı ($i = \sqrt{-1}$), ω titreşim frekansını, t ise zamanı ifade etmektedir.

Bu çalışmada silindirik eğilme hareketine maruz kalan kiriş yapısının $x=0$ ve $x=L$ noktalarında yer alan kenarlarının basit destekli olduğu kabulü yapılmıştır. Basit destekli için uygulanacak sınır şartları aşağıda Tablo-1'de belirtilmiştir.

Tablo 1 Fonksiyonel derecelendirilmiş nano plak için basit destekli sınır şartları

$x = 0$	$\frac{dU(0)}{dx} = 0$	$\frac{dV(0)}{dx} = 0$	$\begin{matrix} W(0) = 0 \\ \frac{d^2W(0)}{dx^2} = 0 \end{matrix}$
$x = L$	$\frac{dU(L)}{dx} = 0$	$\frac{dV(L)}{dx} = 0$	$\begin{matrix} W(L) = 0 \\ \frac{d^2W(L)}{dx^2} = 0 \end{matrix}$
	$U(x) = A \cos\left(\frac{m\pi x}{L}\right)$	$V(x) = B \cos\left(\frac{m\pi x}{L}\right)$	$W(x) = C \sin\left(\frac{m\pi x}{L}\right)$

Tablo 2 Silindirik eğilme hareketi boyutsuz frekansına(Ω) malzeme özelliklerinin etkisi

		$\lambda=0$ $\mu=0$	$\lambda=1$ $\mu=0$	$\lambda=0$ $\mu=0.01$	$\lambda=1$ $\mu=0.01$
$E_0=1$ $\rho_0=1$	$G_0=0$ $\eta_0=0$	4.4541	4.4245	4.0540	4.0270
	$G_0=0$ $\eta_0=0.25$	9.8696	10.0757	8.9830	9.1706
	$G_0=0.4$ $\eta_0=0$	4.7510	4.8109	4.3242	4.3787
	$G_0=0.4$ $\eta_0=0.25$	10.5280	11.0555	9.5819	10.0624
	$G_0=0.4$ $\eta_0=0$	3.9478	4.0303	3.5932	3.6682
	$G_0=0.4$ $\eta_0=0$	4.4541	4.4245	4.0540	4.0270
	$G_0=0.4$ $\eta_0=0$	9.8696	10.0757	8.9830	9.1706
	$G_0=0.4$ $\eta_0=0.25$	3.9478	3.9478	3.5932	3.6682
		4.7510	4.7125	4.3242	4.3787
		10.5280	10.8290	9.5819	10.0624

3. SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde belirtilen basit destekli sınır şartları için fonksiyonel derecelendirilmiş nano şeritlerden oluşan nano kiriş yapısının serbest titreşim parametrik analizi yapılacaktır. Malzeme özellikleri Tablo-2'de belirtildiği üzere boyutsuz olarak nano plağın en altında yer alan nano şerit için kabul edilmiştir. Parametrik analizde edilen boyutsuz frekans parametresi

ise Eşitlik (11)'de belirtilen bağıntıya göre hesaplanmıştır:

$$\Omega = \omega L^2 \sqrt{\frac{I_0}{E_0 h^3}} \quad (11)$$

Burada h toplam plak kalınlığını ifade etmektedir.

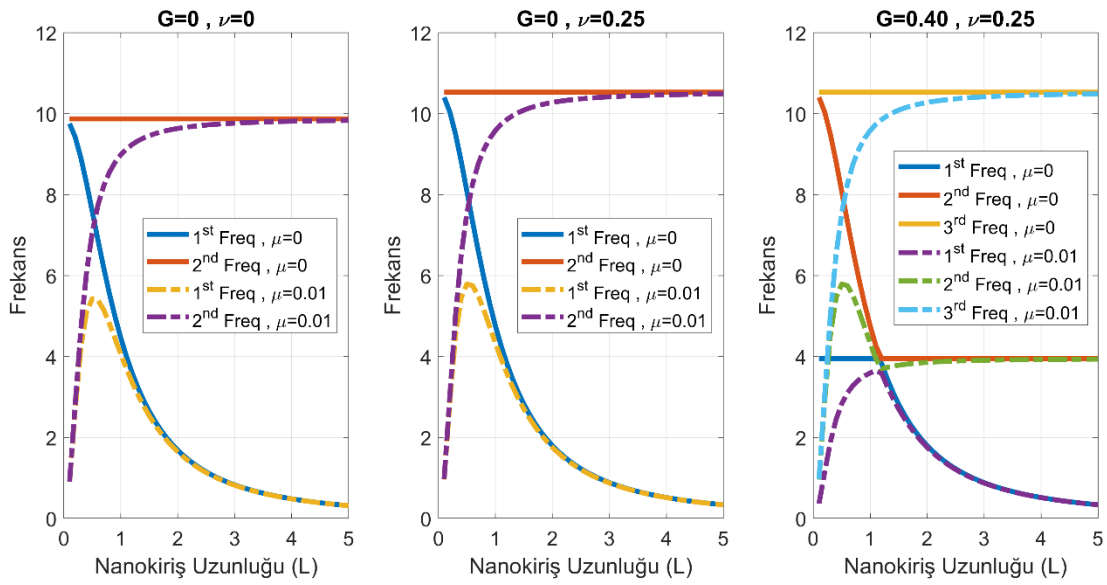
Tablo-2'de fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzeme özelliklerinin ve

silindirik eğilme denklemlerinde çeşitli kabullerin yapılmasıyla titreşim frekanslarının değişimi görülmektedir. Kayma modülünün sıfır olarak kabul edilmesiyle Eşitlik (5) ve Eşitlik (8)'den anlaşılacağı üzere yanal titreşim etkisi kaybolmaktadır. Dolayısıyla elde edilen frekanslar eksenel ve radyal doğrultuda gerçekleşen titreşim hareketlerine aittir. Yerel olmayan etki ile frekans değerlerinde azalma görülmüş, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme özelliklerinin artmasıyla frekans değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

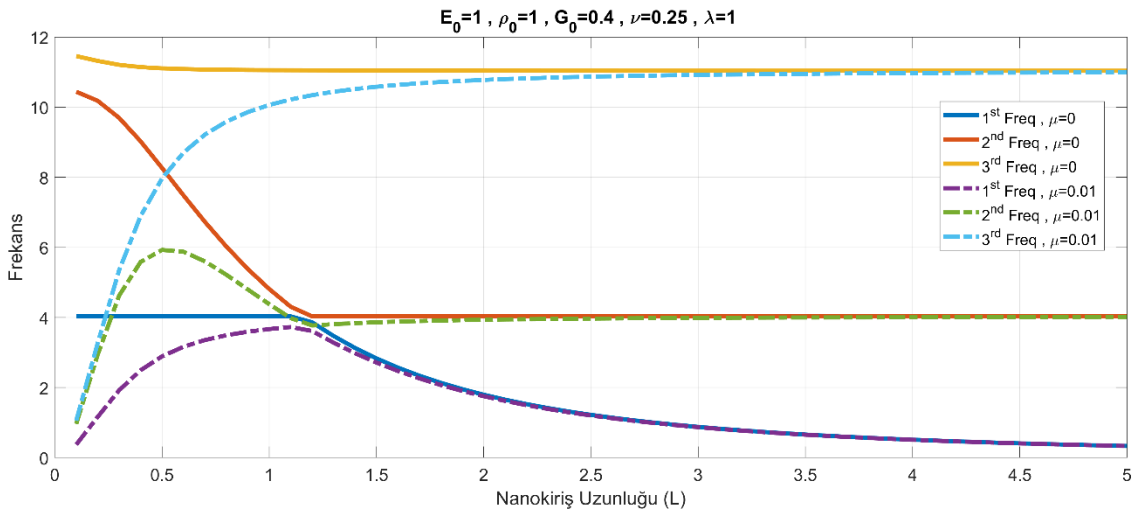
Parametrik analizlerde nano şerit uzunluğu ve kalınlığı boyutsuz olarak ele alınmıştır. Her iki uzunluk da kalınlık değerine bölünerek (L/h)

boyutsuzlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Buradan yola çıkılarak nano şerit kalınlığının da boyutsuz olarak "1" kabul edilmiş olur.

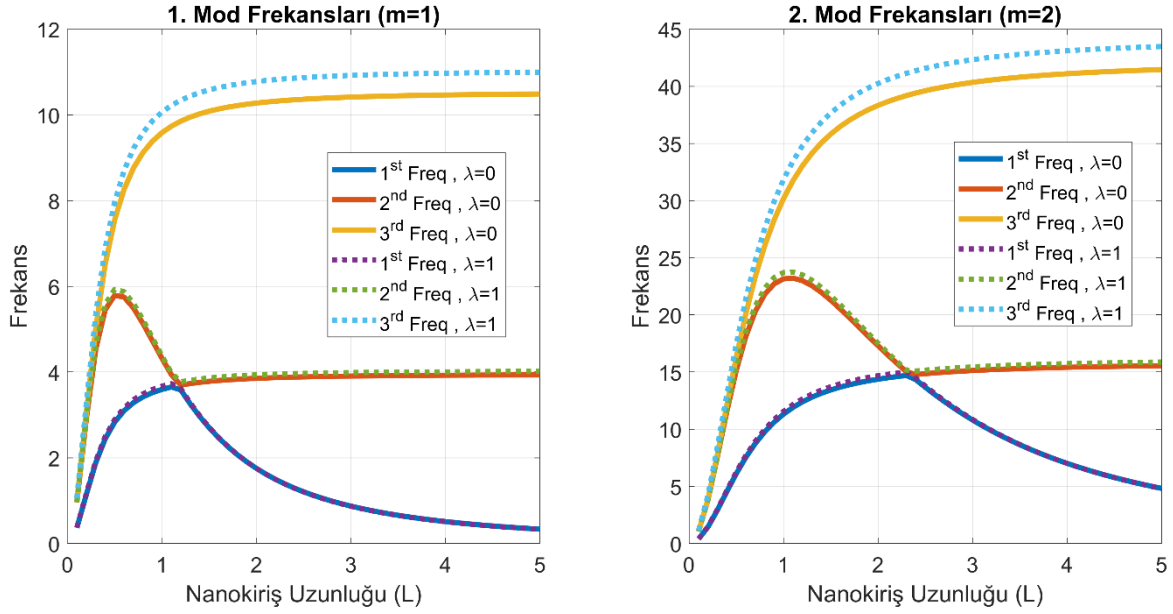
Eksenel ve radyal frekansları belirleyebilmek için Şekil-2'deki grafiği incelemek gerekir. Artan nano şerit uzunluğuyla(L) frekansların değişimi çeşitli malzeme kabulleri için belirtilmiştir. Kayma modülü yanal yer değiştirmeyi hareket denklemlerine dahil ederken, Poisson oranı eksenel ve radyal yer değiştirmelerin birbirleriyle olan ilişkisini tanımlamaktadır. Poisson oranı eksenel ve radyal frekansları artırırken yanal titreşim frekansı bundan etkilenmez.



Şekil 2 Silindirik eğilme hareketine malzeme özelliklerinin etkisi ($\lambda=0$)



Şekil 3 Nano şerit genişliğinin frekanslar üzerindeki etkisi



Şekil 4 Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme özelliklerinin birinci ve ikinci mod frekansları üzerindeki etkisi

Yerel olmayan elastisite teorisi kısa nano şerit uzunluklarında etkinken artan uzunlukla birlikte yerel olmayan etki kaybolur ve yerel frekans değerlerine yaklaşır. Şekil-2’de azalan mavi ve sarı renkli eğrilerde yer alan frekanslar nano plak genişliğinin aksel yönde artışıyla azalmaktadır. Aksel yöndeki uzunluk artışı plak yapısının aksel yönde rijitliğini artırır ve frekans değeri sıfır değerine doğru azalır.

Şekil-3’de silindirik eğilme hareketinin yerel olmayan elastisite ile değişimi görülmektedir. Nano şerit uzunluğunun “1(bir)” değerini hemen geçmesinden sonra frekanslar arasında sapma denilen “veering” yani frekansların yer değiştirmesi görülmektedir. Yanal doğrultudaki frekans değişmezken aksel doğrultudaki frekans azalma davranışı gösterir. Radyal yöndeki frekans ise yerini korumaktadır. Yerel olmayan elastisite çok küçük nano kiriş uzunluğu değerlerinde bütün frekansları azaltmışken artan nano plak genişliği ile bu etki kaybolur yerel elastisite sonuçlarına yaklaşır. Belirtilmesi gereken bir diğer nokta ise yanal titreşim frekansının sadece yerel olmayan parametre etkisi ile azalması ve fonksiyonel malzeme özellikleri değişimi ile artmasıdır.

Şekil-4’de ise kalınlık doğrultusunda fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme özelliklerinin 1. ve 2. mod frekansları üzerindeki etkisi görülmektedir. Benzer sapma ve değişim karakteristikleri görülmekle birlikte 2. mod frekanslarındaki sapma yaklaşık olarak

2.2L nano şerit genişliğinde oluşmuştur. Artan mod sayısı ile frekanslar arasındaki sapma davranışı daha geniş nano şerit uzunluklarında meydana gelmektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada fonksiyonel derecelendirilmiş nano şeritlerden oluşan nano plakların basit destekli sınır şartlarındaki serbest titreşimi incelenmiştir. Nano şeritlerin yanal doğrultuda sonsuz uzunlukta olduğu kabulüyle silindirik eğilme hareket denklemleri kullanılmıştır. Nano ölçekteki boyut etkisini göz önüne almak için yerel olmayan elastisite teorisinden faydalanılmıştır. Malzeme özelliklerinin kalınlık doğrultusunda üstel fonksiyonla değiştiği varsayılmıştır. Malzeme değişimi parametresi, yerel olmayan parametre ve nano kiriş uzunluğunun fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik eğilen nano plak serbest titreşimine olan etkisi araştırılmıştır.

Yerel olmayan elastisite teorisi frekansları azaltırken malzeme özelliklerinin üstel olarak artması frekans değerlerini artırmaktadır. Aksel ve radyal frekanslar Poisson oranından etkilenirken, yanal frekans kayma modülünden etkilenir.

Bu çalışmanın sonuçları fonksiyonel derecelendirilmiş nano kompozitlerin plakların ve kirişlerin modellenmesinde faydalı olacaktır.

REFERANSLAR

- [1] Leliaert, J., Van De Wiele, B., Vansteenkiste, A., Laurson, L., Durin, G., Dupré, L., and Van Waeyenberge, B. (2016). Creep turns linear in narrow ferromagnetic nanostrips, *Scientific Reports 2016 6:1*, 6(1), 1–9. DOI:10.1038/srep20472.
- [2] Wang, Y.-L., Glatz, A., Kimmel, G.J., Aranson, I.S., Thoutam, L.R., Xiao, Z.-L., Berdiyrov, G.R., Peeters, F.M., Crabtree, G.W., and Kwok, W.-K. (2017). Parallel magnetic field suppresses dissipation in superconducting nanostrips, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(48). DOI:10.1073/pnas.1619550114.
- [3] Mawatari, Y. (2023). Kinetic inductance of superconducting nanostrips with turns, DOI:10.1063/5.0142045.
- [4] Razzhivina, M.E., Rukhlenko, I.D., and Tepliakov, N. V. (2023). Chiral Optical Properties of Möbius Graphene Nanostrips, *The journal of physical chemistry letters*, 4426–4432. DOI:10.1021/ACS.JPCLETT.3C00925.
- [5] Areshkin, D.A., Gunlycke, D., and White, C.T. (2007). Ballistic Transport in Graphene Nanostrips in the Presence of Disorder: Importance of Edge Effects, *Nano Letters*, 7(1), 204–210. DOI:10.1021/nl062132h.
- [6] Guedas, R., Raposo, V., and Prieto, J.L. (2021). Micro and nanostrips in spintronics: How to keep them cool, *Journal of Applied Physics*, 130(19), 191101. DOI:10.1063/5.0071900/992640.
- [7] Hadji, L., Avcar, M., and Civalek, Ö. (2021). An analytical solution for the free vibration of FG nanoplates, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(9), 418. DOI:10.1007/s40430-021-03134-x.
- [8] Jalaei, M.H., Thai, H.T., and Civalek (2022). On viscoelastic transient response of magnetically imperfect functionally graded nanobeams, *International Journal of Engineering Science*, 172. DOI:10.1016/j.ijengsci.2022.103629.
- [9] Gantayat, A.K., Sutar, M.K., and Mohanty, J.R. (2022). Dynamic characteristic of graphene reinforced axial functionally graded beam using finite element analysis, *Materials Today: Proceedings*, 62(P10), 5923–5927. DOI:10.1016/J.MATPR.2022.04.636.
- [10] Fang, J., Zheng, S., Xiao, J., and Zhang, X. (2020). Vibration and thermal buckling analysis of rotating nonlocal functionally graded nanobeams in thermal environment, *Aerospace Science and Technology*, 106, 106146. DOI:10.1016/J.AST.2020.106146.
- [11] Shafiei, N., Hamisi, M., and Ghadiri, M. (2020). Vibration Analysis of Rotary Tapered Axially Functionally Graded Timoshenko Nanobeam in Thermal Environment, *Journal of Solid Mechanics*, 12(1), 16–32. DOI:10.22034/JSM.2019.563759.1273.
- [12] Liu, D., Chen, D., Yang, J., and Kitipornchai, S. (2021). Buckling and free vibration of axially functionally graded graphene reinforced nanocomposite beams, *Engineering Structures*, 249, 113327. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.113327.
- [13] Uzun, B., and Yaylı, M.Ö. (2020). A Solution Method for Longitudinal Vibrations of Functionally Graded Nanorods, *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(2), 78–87. DOI:10.24107/ijeas.782419.
- [14] Uzun, B., and Yaylı, M.Ö. (2022). Porosity dependent torsional vibrations of restrained FG nanotubes using modified couple stress theory, *Materials Today Communications*, 32, 103969. DOI:10.1016/J.MTCOMM.2022.103969.
- [15] Mohammadian, M., and Hosseini, S.M. (2022). A size-dependent differential quadrature element model for vibration analysis of FG CNT reinforced composite microrods based on the higher order Love-Bishop rod model and the nonlocal strain gradient theory, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 138, 235–252. DOI:10.1016/J.ENGANABOUND.2022.02.017
- [16] Khalaf, A.L., Hasan, T.S., Abdulbari, H.A., Kadhim, W.A., and Yaacob, M.H. (2021). CNT-based tapered optical fiber for ethanol remote sensing over 3-km optical fiber, *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1738–1746. DOI:10.1016/J.JMRT.2021.03.103.
- [17] Shakhilavi, S.J., Hosseini-Hashemi, S., and Nazemnezhad, R. (2020). Torsional vibrations investigation of nonlinear nonlocal behavior in terms of functionally graded nanotubes, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 124, 103513. DOI:10.1016/J.IJNONLINMEC.2020.103513.
- [18] Jalaei, M.H., Thai, H.T., and Civalek (2022). On viscoelastic transient response of magnetically imperfect functionally graded nanobeams, *International Journal of Engineering Science*, 172, 103629. DOI:10.1016/J.IJENGSCI.2022.103629.
- [19] Yang, Z., Hurdoganoglu, D., Sahmani, S., Nuhu, A.A., and Safaei, B. (2023). Nonlocal

strain gradient-based nonlinear in-plane thermomechanical stability of FG multilayer micro/nano-arches, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 23(2), 1–16. DOI:10.1007/S43452-023-00623-9/FIGURES/6.

[20] Dastjerdi, S., Akgöz, B., and Civalek, Ö. (2020). On the effect of viscoelasticity on behavior of gyroscopes, *International Journal of Engineering Science*, 149. DOI:10.1016/j.ijengsci.2020.103236.

[21] Liu, H., and Lyu, Z. (2020). Modeling of novel nanoscale mass sensor made of smart FG magneto-electro-elastic nanofilm integrated with graphene layers, *Thin-Walled Structures*, 151(March), 106749. DOI:10.1016/j.tws.2020.106749.

[22] Shariati, A., Jung, D.W., Mohammad-Sedighi, H., Zur, K.K., Habibi, M., and Safa, M. (2020). On the vibrations and stability of moving viscoelastic axially functionally graded nanobeams, *Materials*, 13(7). DOI:10.3390/ma13071707.

[23] Civalek, Ö., and Avcar, M. (2022). Free vibration and buckling analyses of CNT reinforced laminated non-rectangular plates by discrete singular convolution method, *Engineering with Computers*, 38(S1), 489–521. DOI:10.1007/s00366-020-01168-8.

[24] Al-Furjan, M.S.H., Safarpour, H., Habibi, M., Safarpour, M., and Tounsi, A. (2020). A comprehensive computational approach for nonlinear thermal instability of the electrically FG-GPLRC disk based on GDQ method, *Engineering with Computers*, (0123456789). DOI:10.1007/s00366-020-01088-7.

[25] Barati, A., Hadi, A., Nejad, M.Z., and Noroozi, R. (2020). On vibration of bi-directional functionally graded nanobeams under magnetic field, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 1–18. DOI:10.1080/15397734.2020.1719507.

[26] Alshenawy, R., Sahmani, S., Safaei, B., Elmoghazy, Y., Al-Alwan, A., and Nuwairan, M. Al (2023). Surface stress effect on nonlinear dynamical performance of nanobeam-type piezoelectric energy harvesters via meshless collocation technique, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 152, 104–119. DOI:10.1016/J.ENGANABOUND.2023.04.003

[27] Alshenawy, R., Sahmani, S., Safaei, B., Elmoghazy, Y., Al-Alwan, A., and Sobhy, M. (2023). Nonlinear dynamical performance of

microsize piezoelectric bridge-type energy harvesters based upon strain gradient-based meshless collocation approach, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 151, 199–215.

DOI:10.1016/J.ENGANABOUND.2023.03.002

[28] Alshenawy, R., Sahmani, S., Safaei, B., Elmoghazy, Y., Al-Alwan, A., and Nuwairan, M. Al (2023). Three-dimensional nonlinear stability analysis of axial-thermal-electrical loaded FG piezoelectric microshells via MKM strain gradient formulations, *Applied Mathematics and Computation*, 439, 127623. DOI:10.1016/J.AMC.2022.127623.

[29] Karimzadeh, S., Safaei, B., and Jen, T.C. (2023). Investigation on electrochemical performance of striped, β 12 and χ 3 Borophene as anode materials for lithium-ion batteries, *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 120, 108423. DOI:10.1016/J.JMGM.2023.108423.

[30] Alibakhshi, A., Dastjerdi, S., Akgöz, B., and Civalek, Ö. (2022). Parametric vibration of a dielectric elastomer microbeam resonator based on a hyperelastic cosserat continuum model, *Composite Structures*, 287, 115386. DOI:10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.115386.

[31] Alibakhshi, A., Rahmanian, S., Dastjerdi, S., Malikan, M., Karami, B., Akgöz, B., and Civalek, Ö. (2022). Hyperelastic Microcantilever AFM: Efficient Detection Mechanism Based on Principal Parametric Resonance, *Nanomaterials 2022, Vol. 12, Page 2598*, 12(15), 2598. DOI:10.3390/NANO12152598.

[32] Tahani, M. (2007). Analysis of laminated composite beams using layerwise displacement theories, *Composite Structures*, 79(4), 535–547. DOI:10.1016/J.COMPSTRUCT.2006.02.019.

[33] Reddy, J.N. (2003). *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells*, (CRC Press) DOI:10.1201/b12409.

[34] Eringen, A.C. (2004). *Nonlocal Continuum Field Theories*, A. C. Eringen, ed. (New York, NY: Springer New York) DOI:10.1007/b97697.

[35] Arda, M., and Aydogdu, M. (2022). Vibration analysis of carbon nanotube mass sensors considering both inertia and stiffness of the detected mass, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 50(3), 841–857. DOI:10.1080/15397734.2020.1728548.