

Gurtin yüzey elastisite modeli kullanılarak nano-küresel partikülün serbest burulma titreşim analizi

Seyed Alireza SADROLODABAE¹

Geliş / Received: 1/12/2021

Revize / Revised: 30/12/2021

Kabul / Accepted: 05/01/2022

ÖZET

İthalat için Gurtin-Murdoch modeli ile hassas üç boyutlu elastisite teorisi kullanılarak küresel nanopartiküllerin burulma serbest titreşimlerinin analitik çözümü Yüzey etkileri incelenmiştir. Hareket denklemlerini elde etmek için navir denklemleri maddi bir ortam için yazılır ve Helmholtz izolasyonunu kullanarak navir denklemleri dalga vektör denklemlerine dönüştürülür ve daha sonra burulma hareketi için varsayımlar kullanılır Küre, küresel koordinat sistemindeki dalga vektör denklemlerinin doğru bir şekilde çözüldüğü ve yer değiştirme alanlarının ve gerilme tensörlerinin çıkarıldığı varsayılmaktadır Oluyor. Aşağıda, Gurtin-Murdoch teorisini kullanarak, bir şekilde kürenin için Nano boyutunu temsil eden yüzey enerjisinin etkileri, problem sınır koşullarına girilirOlmak. Son olarak, frekans karakteristiği denklemleri sınır koşulları uygulanarak çıkarılır. Alüminyumdan Nano kürenin ve iki tip yüzey alarak Çeşitli kristalografik yönler yüzey enerjisini ve özellikle iç yarıçapın boyutunu etkilemek için çeşitli sayısal örnekler araştırılmıştır Nano-kürenin sistemin normal burulma frekanslarında gösterilir. 50 Nm'den küçük boyutlu alüminyum nano kürenin için gözlemlendi. Yüzey enerjisinin doğal frekans üzerindeki etkileri fark edilir.

ANAHTAR KELİMELEER: - Normal frekans, Nano küre, Nanopartikül, Yüzey enerjisi

¹ Seyed Alireza SADROLODABAE İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Aydın Üniversitesi, İSTANBUL

*Corresponding author: alireza_sadr19@yahoo.com

Free torsional voting analysis of nanospheres thanks to the Gurtin surface elasticity model

ABSTRACT

The analytical solution of torsion-free vibrations of spherical nanoparticles using the sensitive three-dimensional elasticity theory with the Gurtin-Murdoch model for import has been studied for its surface effects. To obtain the equations of motion equations and Helmholtz wave equations using the isolation material environment is written for navir are converted to vector equations, and then torsion for the movement, the assumptions used, SPHERE, spherical vector wave equations in the coordinate system of the stress tensor and the displacement field is solved correctly assume that S has been removed. Below, using the Gurtin-Murdoch theory, the effects of surface energy, which in some way represents the nanoscale for the sphere, the problem boundary conditions are introduced. Finally, the frequency characteristic equation is deduced by applying boundary conditions. Various crystallographic aspects of taking the surface of the nano-sphere from aluminum and two types of nano-sphere have been investigated in various numerical examples to influence the surface energy and especially the size of the inner radius, the normal torsion frequencies of the system are shown. It was observed for an aluminum nanosphere with a size of less than 50 Nm. The effects of surface energy on the natural frequency are noticeable.

KEYWORDS: - *Normal frequency, Nano sphere, Nanoparticle, Surface energy*

1. GİRİŞ

Toplumsal Nanopartiküllerin keşfi ve ardından Nanoteknolojinin Devrimi, bilimsel metinlerin hacmi ve Artan nanopartiküllerin titreşim davranışının farklı yönlerini araştırmak etrafında mühendislik Ve dinamik davranış çalışması ile ilgili uygulama sayısı Nanometre ölçekli sistemler büyümeye devam ediyor. Daha iyi anlamak gerekir Nanopartiküllerin dinamik özellikleri ile ekipmanlarda ölçüm tekniklerinin ilerlemesi Atomik kuvvet mikroskobu, elektron iletim mikroskobu gibi nano ölçekli ve Raman spektroskopisi daha belirgin hale geldi ve diğer yandan benzersiz titreşim özellikleri Nanopartiküller, yeni cihazların ve nano aletlerin üretiminde kullanılmasına neden olur. Sensörler aktüatörler rezonatörler yüksek frekanslı osilatörler ve Saha çalışması da nanopartikülleri etkilemeye başladı Gelişmekte olan bazı alanlarda, hibrit malzemeler gibi nanobiyoteknolojiler Biyo-sentetik ve kanser tedavisi . Kore'de serbest titreşimler alanındaki bilimsel kaynakları araştırarak Teoriye dayalı homojen küresel nesnelere serbest titreşimi üzerine birçok çalışma Levhalar ve ince kabuklar için ince kabuklar veya geliştirilmiş teoriler Nispeten kalın levhalar yapılır. Çağdaş endüstrilerin hızla ilerlemesi Mühendislik uygulamalarında yüksek doğruluk, davranışın daha doğru tahmin edilmesini gerektirir Dinamik mekanik sistemler. Buna göre, daha verimli yöntemlerle Serbest titreşimlerin üç boyutlu yapısal elemanların şekillerle analitik ve bilgisayar analizi Son yıllarda farklı doğrusal elastisite teorisi artmıştır Üç boyutlu esnekliğe dayalı çalışmalarda problemin kinematığı üzerine hipotez bulunmamaktadır.

Kesin sonuçlar uygulanmaz ve diğer yaklaşık yöntemler sunulur Bunu tahmin edebilirler Esneklik kullanarak sorunların doğru çözümü Üç boyutlu güvenilir çözüm ama nitelemesi sağlamak değil Fiziksel sorunu iyileştirir [1] lam, cheri [2,3] serbest titreşimler için iki tür titreşim modu sunuldu -Kore titreşimleri. Titreşimler ilk burulma titreşimleri türüdür. Burulma titreşimlerinde küre, sıfır radyal yer değiştirmenin yanı sıra kürenin hacminde değişmeyen bir burulma hareketine sahiptir. Titreşimler tip II küresel titreşimler (Bükme ve bükme arasında vurma veya eşleştirme Mukavemetli) Oluyor. Küresel titreşimler küreyi deforme eder, böylece titreşir Radyal yön. Bu konuda daha sonra yapılan görevlerin çoğu aşağıdakilere dayanmaktadır Çalışma üssü kuzuydu. Örneğin, Sato ve yosami [4] tam aralık Serbest titreşim frekans değerleri için yağ Frekanslar ayrıca ilgili modların şeklini de gösterdi. Sonra Sha ve ark. [5] tablolarına sığar ve buna uyar İçi boş kürenin serbest titreşim davranışı, aşağıdakiler kullanılarak incelenir ve analiz edilir Bessel fonksiyonları açısından üç boyutlu frekans karakteristik denklemi küresel tip 1 ve tip İkincisi, bir dizi Yarıçap oranı için sayısal sonuçlar elde eder Kalınlığı kavisli. Son yıllarda karbon nanotüpler gibi nanopartiküllerin yapılarının uygulanması vb. ekipmanın bileşenlerindeki nano tabakalar, teknolojik sürecin büyümesine neden olabilir ve bu da nano ölçekte malzemelerin davranışlarının anlaşılması etrafında talebin artmasına neden olmuştur. Malzemelerin Nano boyutlardaki özelliklerini incelemek için "atom modelleme teorisi" ve "boyuta bağlı elastisite teorisi" ifade edilmiş ve geliştirilmiştir. Boyuta bağlı elastikiyet teorilerinden biri, ilk olarak 60'lı yıllarda eringen tarafından önerilen ve daha sonra 70'li yıllarda kendisi tarafından geliştirilen yerel olmayan elastikiyet teorisidir [9-12]. Wang ve ark [13]. Kabuk için yerel olmayan elastikiyet teorisini geliştirdi Karbon nanotüplerde dalgaların yayılması incelenmiştir. Son zamanlarda, fazelzade vogamli [14] 2012 yılında, yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak, sıvıya batırılmış küresel kabuğun simetrik titreşimleri incelenmiştir. Ayrıca, [15] 2013 yılında, yerel olmayan elastisite teorisini kullanarak Nano küre radyal serbest titreşim hareketi denklemlerini çıkardılar ve yerel olmayan parametre, Poisson katsayısı ve küre yarıçapı açısından normal frekans spektrumunu elde ettiler. Yüzey elastikiyeti teorisi, malzemelerin nano ile karşılaştırıldığında davranışlarını araştırmak için boyuta bağlı elastikiyetin başka bir teorisidir. Bir parçacıdaki

hacim seviyesinin artırılması, maddenin maddenin deforme olmuş doğası üzerinde önemli ve bazen baskın bir etkiye sahip olmasına neden olur [17, 16]. Yüzey enerjisine dayanan boyutun bağımlı elastikiyet teorisi ilk olarak Gortin tarafından sunuldu ve 1975'te [18] tarihlendirildi ve daha sonra 1998[19]'de Gortin tarafından geliştirildi..shinoy [20] 2005'te elastik sabitlerin atomik hesaplamaları kullanılarak. Elde düzeyleri. shinoy [21] 2002 yılında, nano boyutta bir dizi elemanın şeklini değiştirmek), tatar yayı gibi, tüp ve levha(elastikiyet teorisini kullanarak, yüzey elastikiyet teorisinin sonuçları incelenmiş ve rapor, yüzey "atom teorisi" ile iyi maç olduğunu. Hey ve ark. 2008'de yüzey geriliminin doğal nano tel frekansları üzerindeki etkisi euller bernolinin teorisini kullanarak çalıştılar [22]. Hasheminejad ve onun yerine Mohammadi 2009'da yansıyan dalgalar sıkıştırıcıdır ve Nanoların küresel boyutlarının heterojenliğinin kesilmesi ve yüzey geriliminin sırasıyla gerilme konsantrasyonu, heterojenliğin dinamik çevresi üzerindeki etkileri incelenmiştir [23].

Wang [24] lokal olmayan elastikiyet teorisi kullanılarak, sıvı içeren nanotüplerin serbest titreşim seviyelerinin etkileri incelenmiştir. 2015 Yılında Altaher ve ark.yüzey enerjisi ve lokal olmayan elastikiyetin nanotir titreşimleri üzerindeki korelasyonlu etkilerini sonlu elemanlar yöntemi ile araştırdı. Aşağıda, Ansari ve ark. [25] yüzey geriliminin titreşimli profil üzerindeki etkisi ve nanotüp içeren sıvının vaka çalışmasına sürdürülebilirliği, Temmuz Timoşenko teorisinin modellenmesi ve yöntemin çözümü için onları zorladı koadriçer genelleştirilmiş çıkar grupları ve farklı parametreler farklı hız, kritik ve doğal frekans üzerindeki etkisi, çalışma yaptılar. Sonra Ansari ve ark. [26] kullanımı ile Tir Timoşenko teorisi ve varsayımlar van-Carmen, vb. vaka çalışmasına nanotüp içeren sıvının serbest titreşimleri, yöntemin çözümü için bastırıldı kuardriçer genelleştirilmiş ilgi çeşitli parametrelerin ve çeşitli sınır koşullarının stabilite ve doğal frekans gösterimi üzerindeki etkisiydi, sırasıyla. Ansari ve diğ. [27] yılında, sıvı içeren nanotüplerde dalgaların yayılmasını incelediler Denklemlerin çözümünde Timoşenko Tir teorisinin modellenmesi ve kuadracher yöntemi kullanılmıştır. Ensari ve nevruzzade [28] Eringen'in yerel olmayan teorisi ve Gortin'in yüzey elastikiyeti teorisini kullanarak, Nano tabaka burkulması fonksiyonel dereceli malzemeleri inceledi ve yüzey etkilerinin nano tabaka burkulması üzerinde önemli etkileri olduğunu gösterdi. Nevruzzade ve diğ. [29] aksenal hareketli ışının harmonik kuvvetin etkisi altında ve termal ortamda zorlanmış doğrusal olmayan titreşimleri araştırıldı. Tir Timoşenko teorisinin hareketli pivot ilgisinin temeli için modellenmesi için denklemler ve sınır koşulları vardı, diferansiyel genelleştirilmiş çözümü karelemek için istenen yöntem belirlendi ve hız, itme vb. Arasında değişen çeşitli parametrelerin etkisi belirlendi. kuvvet enine giriş geldi zayıflama katsayısı ve tepki frekansındaki sıcaklık farkı, atış oyunları, sınır koşullarıyla hareketli itme, basit iki üstsüzün dayanağı araştırıldı. Ansari ve diğ. [30] Visko-Pasternak'ın elastic substratı üzerinde sabit hızda ve yaygın dış harmonik kuvvet altında iç akışkan içeren karbon nanotüplerin titreşimleri incelenmiştir. Ayrıca nanotüplerin frekans tepkileri üzerine nanotüplerin, akışkan hızı, enine kuvvet ve elastik yatak parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Küresel nanopartiküllerin serbest titreşimlerinin yüzey elastikiyeti teorisi kullanılarak araştırılmadığı kuvvetle görülmektedir. Ayrıca Koreli kullanılan [34-31] şeyler başvuruları gibi Nano titreşimli-çıkarma tercihin gözden geçirilmesi için bir referans olarak kullanılabilir değil sadece, dikkate nano titreşimler ayaklar meselesi, ama bunun sonuçları bazı uygulamalar için kullanılabilir mevcut çalışmalardan bahsetmek gerekirse, teknolojikDalgaların yayılmasıyla ilgili [35], malzemelerin elastik Tensörünü ölçmek için kullanılan bir cihaz olan "ultrasonik titreşim mikroskobu" [36], Nano-mekanik kütle sensörü [38,37]

2. DENKLEMLER VE TEMEL İLİŞKİLER

2.1. Hareket Denklemleri

Problem geometrisi, iç yarıçapı r_1 olan kürenin merkezi ve Kürenin merkezi (r, θ, ϕ) olarak kabul edilen dış yarıçapı r_2 'dir. Koordinat eksenleri sistemi küreseldir. Dış kuvvetlerin yokluğunda alan yer değiştirmesini düzenleyen ve elastik malzeme varsayan denklemler vb., doğrusal, vb. homojen ve izotropik, klasik Navier denkleminin kullanımı ile aşağıdaki ifade vardır [39]

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 U + (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot U) \quad (1)$$

İki vektör u_1 ve u_2 toplamı için yer değiştirme U Helmholtz prensibini [40] kullanarak, bu yazılır, Bu u_1 Bölümü yer değiştirme alanı, ve dalga basıncı ve yer değiştirme u_2 bölümü Döner alanı ile ilgili, ve dalga kesme ile ilgili.

$$U = u_1 + u_2 \quad (2)$$

$\nabla \times u_1 = 0, \nabla \cdot u_2 = 0$. Helmholtz'un izolasyonu, dinamik hareket denklemlerini sırayla sağlama imkanı (1) iki kategoriye denklem vektör dalgası izole edilmiş bir harmonik olduğu varsayılarak frekans denklemleri ile hareket eden vektör dalgası, aşağıdakilerin geldiğini.

$$\begin{aligned} \nabla^2 u_1 + \alpha^2 u_1 &= 0 \\ \nabla^2 u_2 + \beta^2 u_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$\beta^2 = \omega^2/c_s^2$, $\alpha^2 = \omega^2/c_p^2$ ve $c_p^2 = (\lambda + 2\mu)/\rho$ ve $c_s^2 = \mu/\rho$. Kesme dalgası hızı ve sıkıştırma dalgası sırasıyla elastik malzemedir. Dalga vektör denklemlerinin çözümü (3) aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} u_1 &= L = \nabla \varphi \\ u_2 &= M + N = \nabla \times (e_r r \psi) + \nabla \times \nabla \times (e_r r \chi) \end{aligned} \quad (4)$$

Küre burulma titreşimlerinde yer değiştirme alanı sadece kesme dalgalarından ψ etkilenir $\chi = \varphi = 0$ oluyor [40]. Yani Denklem 2'de, $u_1 = 0$ ve dönme yer değiştirme teriminden etkilenen sistemin yer değiştirme alanı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$U = u_2 = \nabla \times (e_r r \psi) \quad (5)$$

Olarak belirtilen ψ skaler fonksiyon kesme dalgası ve skaler denklemdir dalga aşağıdakileri karşılar.

$$(\nabla^2 + \beta^2)\psi = 0 \quad (6)$$

Gerilim Tensör alanı yer değiştirme alanı açısından aşağıdaki gibidir [40]

$$\sigma = \lambda(\nabla \cdot U)I + \mu(\nabla U + U\nabla) \quad (7)$$

matris birimdir. Gerilme tensörünün yanı sıra gerilme tensörünü ve σ gerilme tensörüne göre yüzey gerilme Tensörünün aşağıdaki ilişkiden çıkarıldığını:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2\mu} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \delta_{ij} \sigma_{kk} \quad (8)$$

δ_{ij} Kronecker Deltası , Poisson katsayısı , E Elastisite modülü ve

$i = j = k = 1,2,3$ oluyor.

2.2. Seviye Etkileri

Yüzeydeki atomların statik dengesi nedeniyle yüzey etkileri ortaya çıkar. Daha önce de açıklandığı gibi, mevcut tüm malzemelerdeki etkilerin ve bunların ölçeğine ve boyutuna olan iletişimin, ancak bu etkilerin önemi, yüzeyin parçanın hacmine oranının önemli ölçüde arttığını ve bunun esas olarak parçanın hacminin azaltılmasıyla olduğunu bulduğunda olduğunu söyleyebiliriz. Başka bir deyişle, parçanın boyutlarını Nano mertebeye indirerek, yüzey-hacim oranı artar, böylece yüzey etkilerinden dışlanamaz.

Elastik cisimlerde bu etkilerin varlığı 1974 yılında Gortin ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır [18] ve bunları temel dayanaklara göre hesaplıyoruz, nesnenin yüzeyi, örneğin, makale için ideal olan dikkate alınan yorumlarda ince bir tabaka, yapışma ve sabitler, elastik malzemenin sabitleri olan elastik yüzey farklıdır. Klasik ilişkileri kullanarak maddenin denge ve yapısal denklemlerini formüle ettiler ve maddenin sınır koşullarında yüzey gerilmeleri olarak yüzey etkilerini tanıttılar. Denge denklemi Yüzey aşağıdaki gibi yazılmıştır [13].

$$(\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-)n_i n_j = \sigma_{\alpha\beta}^s \kappa_{\alpha\beta} \quad (9)$$

Yukarıdaki ilişkide, σ_{ij}^+ ve σ_{ij}^- malzemenin yüzeyindeki yüksek ve düşük gerilmeleri temsil eder. n_i ayrıca yüzeydeki dış doğru normal vektör bileşenleridir. $\sigma_{\alpha\beta}^s$ ve $\kappa_{\alpha\beta}$ ayrıca sırasıyla yüzey gerilimini ve yüzey eğriliğini gösterir. Bu bağlamda, bunlar $i = j = 1, 2, 3$ ve $\alpha = \beta = 1, 2$ dir. İzotropik yüzey için yüzey gerilmeleri aşağıdaki gibi elde edilir[13].

$$\sigma_{\alpha\beta}^s = 2\mu^s \varepsilon_{\alpha\beta}^s + \lambda^s \varepsilon_{\gamma\gamma}^s \delta_{\alpha\beta} \quad (10)$$

$\delta_{\alpha\beta}$ Kronecker Deltası, $\varepsilon_{\alpha\beta}^s$ Yüzey gerilimi μ^s , λ^s Yüzey smear sabitliği ve $\alpha = \beta = \gamma = 1, 2$ oluyorlar.

3. POTANSİYEL ALANIN GENİŞLETİLMESİ VE SINIR KOŞULLARININ UYGULANMASI

Dalganın skaler denklemini (6) çözerek, kesme dalgası alanının sonucu aşağıdaki gibi elde edilir[40]:

$$\psi(r, \theta, \phi, \omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n (a_{nm} j_n(\beta r) + b_{nm} y_n(\beta r)) p_n^m(\cos\theta) e^{im\phi} \quad (11)$$

a_{nm} , ve b_{nm} , birinci ve ikinci tipteki madalya y_n ve j_n bessel fonksiyonlarının ve efsanevi fonksiyonun $p_n^m(\cos\theta)$ 'nin bilinmeyen katsayılarıdır. Denklem (11) denklemin (5) içine yerleştirilmesiyle yer değiştirme alanının bileşenleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$u_r = 0,$$

$$u_\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n (a_{nm} l_n^{(1)}(\beta r) + b_{nm} l_n^{(2)}(\beta r)) \frac{im}{r \sin(\theta)} p_n^m(\cos\theta) e^{im\phi}$$

$$u_\phi = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n (a_{nm} l_n^{(1)}(\beta r) + b_{nm} l_n^{(2)}(\beta r)) \frac{d}{d\theta} (p_n^m(\cos\theta)) e^{im\phi} \quad (12)$$

İçinde $l_n^{(i)} = \begin{cases} j_n & (i = 1) \\ y_n & (i = 2) \end{cases}$, $i = 1, 2$ r. Yer değiştirme vektörü bileşenlerinin

(7) 'ye göre yerleştirilmesiyle gerilme Tensörü bileşenleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= 0, \\ \sigma_{\theta\theta} &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \frac{2\mu}{r^2} \left(a_{nm} S_{1n}^{(1)}(\beta r) + b_{nm} S_{1n}^{(2)}(\beta r) \right) \frac{im}{\sin\theta} \left(\frac{d}{d\theta} (p_n^m(\cos\theta)) - \cot\theta p_n^m(\cos\theta) \right) e^{im\phi} \\ \sigma_{\phi\phi} &= -\sigma_{\theta\theta}, \\ \sigma_{r\theta} &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \frac{2\mu}{r^2} \left(a_{nm} S_{2n}^{(1)}(\beta r) + b_{nm} S_{2n}^{(2)}(\beta r) \right) \frac{im}{\sin\theta} p_n^m(\cos\theta) e^{im\phi} \\ \sigma_{r\phi} &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \frac{-2\mu}{r^2} \left(a_{nm} S_{2n}^{(1)}(\beta r) + b_{nm} S_{2n}^{(2)}(\beta r) \right) \frac{d}{d\theta} (p_n^m(\cos\theta)) e^{im\phi}\end{aligned}\tag{a-13}$$

$$\sigma_{\theta\phi} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \frac{\mu}{r^2} \left(a_{nm} S_{1n}^{(1)}(\beta r) + b_{nm} S_{1n}^{(2)}(\beta r) \right) e^{im\phi} \left(\cot\theta \frac{d}{d\theta} (p_n^m(\cos\theta)) - \frac{d^2}{d\theta^2} (p_n^m(\cos\theta)) - \frac{m^2}{\sin^2\theta} p_n^m(\cos\theta) \right)$$

$$S_{1n}^{(i)} = r l_n^{(i)}(\beta r)\tag{b-13}$$

$$S_{2n}^{(i)}(\beta r) = 0.5r ((n-1)l_n^{(i)}(\beta r) - \beta r l_{n+1}^{(i)}(\beta r))$$

Denge seviyesi denkleminin genişlemesi ile(9) koordinat sisteminde, küresel, vb. sınır koşulları genel durumda klasik değildir, çünkü aşağıdaki ekstrakt, nano Kore'nin iç nano-Kore ve dış sınırının sınırında olması gerektiğidir[13]:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \frac{1}{r} (\sigma_{\theta\theta}^s + \sigma_{\phi\phi}^s), \\ \sigma_{r\theta} &= \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \sigma_{\theta\theta}^s}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial \sigma_{\theta\phi}^s}{\partial \phi} + (\sigma_{\theta\theta}^s - \sigma_{\phi\phi}^s) \cot\theta \right) \\ \sigma_{r\phi} &= \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \sigma_{\theta\phi}^s}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial \sigma_{\phi\phi}^s}{\partial \phi} + 2\sigma_{\theta\phi}^s \cot\theta \right)\end{aligned}\tag{a-14}$$

Bu $\sigma_{\theta\theta}^s$, $\sigma_{\phi\phi}^s$, $\sigma_{\theta\phi}^s$, yüzey geriliminin bileşenleridir. Yüzey gerilmelerini hesaplamak için (10) denklemini kullanarak, gerinim Tensörünün (8) aşağıdaki ilişki kullanılarak elde edildiği gerinim Tensörünün hesaplanmasını gerektirir[13]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\theta\theta}^s &= \frac{1}{E}(\sigma_{\theta\theta} - \nu\sigma_{rr} - \nu\sigma_{\phi\phi}) \\ \varepsilon_{\phi\phi}^s &= \frac{1}{E}(\sigma_{\phi\phi} - \nu\sigma_{rr} - \nu\sigma_{\theta\theta}) \\ \varepsilon_{\theta\phi}^s &= \mu\sigma_{\theta\phi}\end{aligned}\tag{b-14}$$

Gerinim bileşenlerini ilişkiden (14) ilişkiye (10) sokarak, yüzey gerilimi Tensör bileşenleri aşağıdaki gibi çıkarılır.

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta\theta}^s &= k_1\sigma_{\theta\theta} + k_2\sigma_{\phi\phi} = (k_1 - k_2)\sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{\phi\phi}^s &= k_2\sigma_{\theta\theta} + k_1\sigma_{\phi\phi} = (k_2 - k_1)\sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{\theta\phi}^s &= \frac{\mu^s}{\mu}\sigma_{\theta\phi}\end{aligned}\tag{15}$$

$k_1 = (2\mu^s + \lambda^s(1 - \nu))/E$ ve $k_2 = (-2\nu\mu^s + \lambda^s(1 - \nu))/E$ oluyorlar ve sonuçta $k_1 - k_2 = \mu^s/\mu$ oluyor.

Son olarak, yüzey gerilimi Tensörünün bileşenleri, malzeme gerilimi Tensörünün alt sistemi olacaktır:

$$\sigma_{\theta\theta}^s = \frac{\mu^s}{\mu}\sigma_{\theta\theta}, \quad \sigma_{\phi\phi}^s = -\frac{\mu^s}{\mu}\sigma_{\theta\theta}, \quad \sigma_{\theta\phi}^s = \frac{\mu^s}{\mu}\sigma_{\theta\phi}\tag{16}$$

Denklemin (16) yüzey gerilme Tensör bileşenlerini a - 14'e göre yerleştirerek, klasik olmayan sınır koşulları aşağıdaki gibi elde edilecektir:

$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{\mu^s}{\mu} \left(\frac{\partial\sigma_{\theta\theta}}{\partial\theta} + \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial\sigma_{\theta\phi}}{\partial\phi} + 2\sigma_{\theta\theta} \cot\theta \right)\tag{17}$$

$$\sigma_{r\phi} = \frac{1}{r} \frac{\mu^s}{\mu} \left(\frac{\partial\sigma_{\theta\phi}}{\partial\theta} - \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial\sigma_{\theta\theta}}{\partial\phi} + 2\sigma_{\theta\phi} \cot\theta \right)\tag{18}$$

Sınır koşullarını uygulamak için, aşağıdaki adımları uygulayarak elde edilecek olan yukarıdaki ilişkileri basitleştirmeniz gerekir.

$\sigma_{\theta\theta}$ ve $\sigma_{\theta\phi}$ gerilme bileşenleri, kesme dalgası fonksiyonuna göre aşağıdaki gibi ifade edilir[39]:

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta\theta} &= \frac{2\mu}{r} \frac{\partial}{\partial\theta} \left(\frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial\psi}{\partial\phi} \right) \\ \sigma_{\theta\phi} &= \frac{2\mu}{r} \frac{\partial}{\partial\theta} \left(\cot\theta \frac{\partial\psi}{\partial\theta} - \frac{\partial^2\psi}{\partial\theta^2} + \frac{1}{\sin^2\theta} \frac{\partial^2\psi}{\partial\phi^2} \right)\end{aligned}\quad (19)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2\psi}{\partial\phi^2} &= -m^2\psi \\ \frac{\partial\psi}{\partial\phi} &= im\psi\end{aligned}$$

Sonuç olarak, denklem (19) aşağıdaki gibi basitleştirilmiştir:

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta\theta} &= \frac{2im\mu}{r} \frac{\partial}{\partial\theta} \left(\frac{1}{\sin\theta} \psi \right) \\ \sigma_{\theta\phi} &= \frac{2\mu}{r} \frac{\partial}{\partial\theta} \left(\cot\theta \frac{\partial\psi}{\partial\theta} - \frac{\partial^2\psi}{\partial\theta^2} - \frac{m^2}{\sin^2\theta} \psi \right)\end{aligned}\quad (20)$$

İlişkiye (20) göre, kesme dalgası fonksiyonuna göre denklemin (17) sağ tarafı aşağıdaki gibi çıkarılır:

$$\frac{1}{r} \frac{\mu^s}{\mu} \left(\frac{\partial\sigma_{\theta\theta}}{\partial\theta} + \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial\sigma_{\theta\phi}}{\partial\phi} + 2\sigma_{\theta\theta} \cot\theta \right) = \frac{im\mu^s}{r^2 \sin\theta} \left(\cot\theta \frac{\partial\psi}{\partial\theta} + \frac{\partial^2\psi}{\partial\theta^2} + \left(2 - \frac{m^2}{\sin^2\theta} \right) \psi \right) \quad (21)$$

İlişkinin (11) kesme dalgası fonksiyonu yukarıdaki denkleme konularak ve aşağıdaki ilişkinin hesaplamaları yapılarak çıkarılır:

$$\begin{aligned}\frac{1}{r} \frac{\mu^s}{\mu} \left(\frac{\partial\sigma_{\theta\theta}}{\partial\theta} + \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial\sigma_{\theta\phi}}{\partial\phi} + 2\sigma_{\theta\theta} \cot\theta \right) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \frac{\mu^s}{r^2} \left(a_{nm} S_{3n}^{(1)}(\beta r) + b_{nm} S_{3n}^{(2)}(\beta r) \right) \frac{im}{\sin\theta} p_n^m(\cos\theta) e^{im\phi} \\ S_{3n}^{(i)}(\beta r) &= (-n^2 - n + 2) l_n^{(i)}(\beta r)\end{aligned}\quad (22)$$

Son olarak, denklem (17) aşağıdaki gibi elde edilecektir:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \frac{\mu}{r^2} (a_{nm} V_n^{(1)}(\beta r) + b_{nm} V_n^{(2)}(\beta r)) \frac{im}{\sin\theta} p_n^m(\cos\theta) e^{im\phi} = 0 \quad (23)$$

$$V_n^{(i)}(\beta r) = 2S_{2n}^{(i)}(\beta r) - \frac{\mu^s}{\mu} S_{3n}^{(i)}(\beta r)$$

Denklem (18) için yukarıdaki aynı yöntemi uygulayarak, Son olarak denklem (18) aşağıdaki gibi çıkarılır:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \frac{-\mu}{r^2} (a_{nm} V_n^{(1)}(\beta r) + b_{nm} V_n^{(2)}(\beta r)) \frac{im}{\sin\theta} \frac{d}{d\theta} (p_n^m(\cos\theta)) e^{im\phi} = 0 \quad (24)$$

Bu nedenle, Kore'nin iç ve dış sınırında sınır koşulları uygulanarak ilişkiler kurulacak:

$$\begin{aligned} a_{nm} V_n^{(1)}(\beta R_i) + b_{nm} V_n^{(2)}(\beta R_i) &= 0 \\ a_{nm} V_n^{(1)}(\beta R_o) + b_{nm} V_n^{(2)}(\beta R_o) &= 0 \end{aligned} \quad (25)$$

Son olarak, yukarıdaki spesifik değerlerin denklemini aşağıdaki matris formunda ifade edilebilir:

$$[M]\{C\} = 0 \quad (26)$$

$\{C\} = [a_{nm}, b_{nm}]^T$ Modal vektör, $[M]$ 2×2 kare matris, frekans parametresinin bir fonksiyonudur. Sıfıra eşit determinan doğal frekansı Matris karesini hesaplamak ve elde edilecek karakteristik frekans sisteminin denklemini oluşturmak için ortak kök vb. Yöntemleri kullanın. denklemin kökleri, aynı frekansların karakteristik frekansı, doğal sistem iyotun geometrik problemine dayanır. Aşağıda birkaç sayısal örnek ele alınacak ve sistemin normal frekansları görüntülenecektir.

4. SAYISAL SONUÇLAR

Yüzey geriliminin nano-kürenin titreşim davranışı üzerindeki etkisini göstermek için bu bölümde çeşitli sayısal örnekler sunulmuştur. Bu amaçla, dış-iç yarıçap oranına sahip Nano kürenin keyfi olarak kabul edilir ve alüminyumdan yapılmış nano kürenin fiziksel özelliklere sahiptir $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 34.7 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $\lambda = 52 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ Seçili. Hesaplama alüminyum için Kristalografi yönü [100] (Seviye A) ve [111] (seviye B) ile ilgili iki yüzey özelliği kümesi kullanılır. Yukarıdaki kristalografik yönler karşılık gelen elastik sabitler referans olarak [6] Seviye A (SA) , $E^s = -8.95 \text{ N/m}$ ve seviye B(SB) , $E^s = 6.08 \text{ N/m}$ olarak verilmiştir. Ayrıca seviye C(SC), $E^s = 0 \text{ N/m}$ klasik koşullara sahip seviyeyi ifade eder.

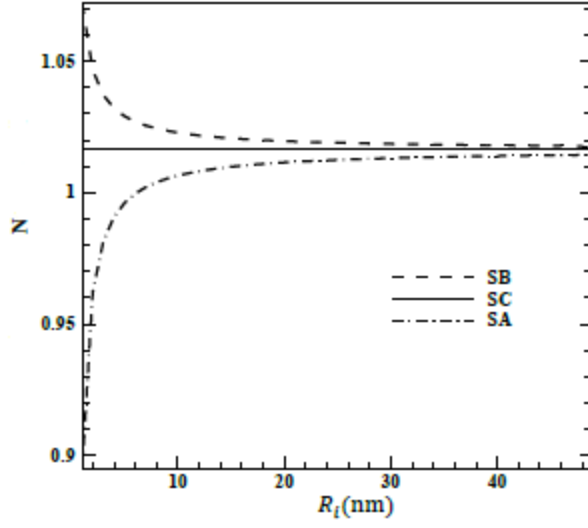
Tablo 1'de moda için ilk normalize edilmiş ω_{cp}/R_i 'nin normal frekansı şekil n = 2, üç tip seviye "SA" ve "SB", "SC" ve $R_o/R_i = 2$ oranı gösterilmiştir. İç nano'nun yarıçapının artmasıyla bilindiği gibi, SA ve SB'nin her iki seviyesi için doğal frekans normalleştirilmiş Nano kürenin miktarı, doğal frekans normalleştirilmiş bir klasik referansları ile de dampinge karşı gelir.

Şekil 1 ila 4", şekil n = 2,3 için sırasıyla $R_o/R_i = 1.1$ dış-iç yarıçap oranı için iç yarıçap nanokrifleri açısından ω_{cp}/R_i 'nin normal burulma frekansı değişimlerini gösterir. Bu diyagramlar üç farklı seviye tipi "SA" ve "SB", "SC" için çizilmiştir.

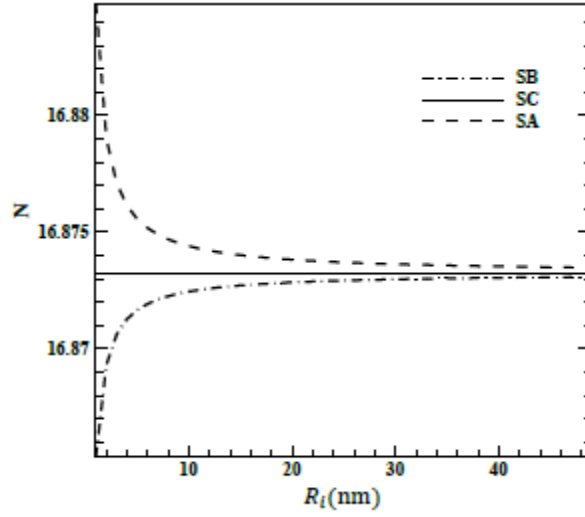
Şekle göre, doğal frekans normalize edilmiş Nano kürenin klasik değerlerle sonuçlandırabilir, genel durumda farklıdır ve tip seviyesine ve sipariş frekansına göre, doğal frekans normalize edilmiş Nano kürenin miktarı, az ya da çok, bir klasik miktardır. Ancak yüzeyin türüne bakılmaksızın, (SA veya SB) veya İç nano-Korenin yarıçapının artmasıyla gözlenen sipariş frekansı, doğal Nano kürenin seviyesini ve frekansını klasik yakın miktarına kadar etkiler. Bir diğer dikkat çekici nokta, seviyenin etkilerinin frekans sırasına bağlı olmasıdır, örneğin ilk frekansta SB seviyesinin etkileri tetiklenir. Klasik miktardan normalize edilen doğal frekans daha fazladır, ancak ikinci frekansta, ilk önce aynı nano kürenin, SB seviyesinin etkileri, klasik miktardan normalize edilen doğal frekansa daha az neden olur. Grafiklerden, frekanslar için seviyenin etkilerinin daha görünür olduğu ve aynı zamanda SA "için mutlak, sabit seviye miktarının "SB" den büyük olması nedeniyle, bu nedenle, bir seviye için klasik moddan daha fazla fark frekansı olduğu görülmektedir. daha fazla.

Tablo 1 n = 2, $R_o/R_i = 2$ ve üç yüzey tipi için ilk boyutsuz burulma doğal frekansı

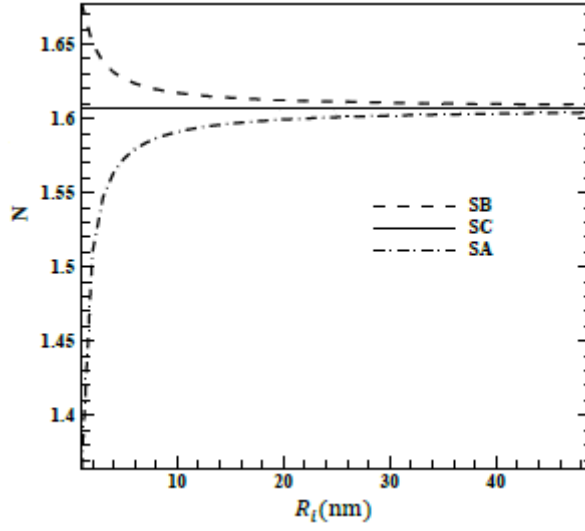
R_i (nm)	SB	SC Ref.[4]	SA
1	0.682	0.651	0.596
10	0.654	0.651	0.646
20	0.653	0.651	0.649
30	0.652	0.651	0.649
40	0.651	0.651	0.650



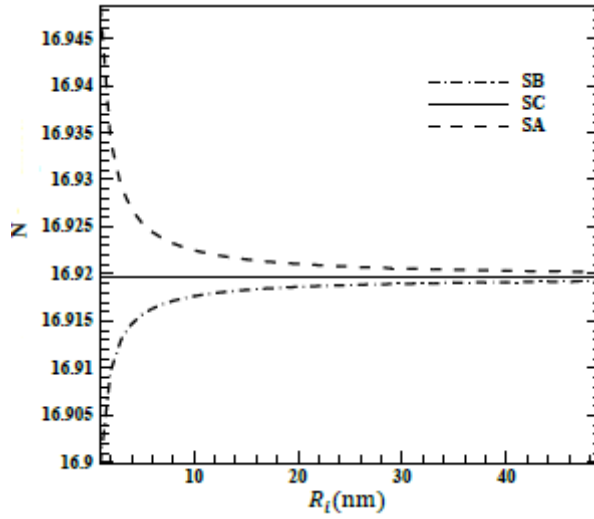
Şekil. 1 $n=2$, $R_o/R_i = 1.1$ ve üç yüzey tipi için ilk boyutsuz burulma doğal frekansları



Şekil.2 $n=2$, $R_o / R_i = 1.1$ ve üç yüzey tipi için saniyelik boyutsuz burulma doğal frekansları



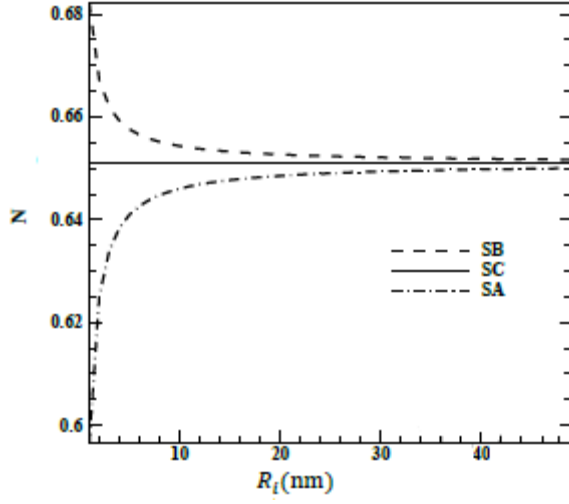
Şekil.3 $n=3$, $R_o / R_i = 1.1$ ve üç yüzey tipi için birinci boyutsuz burulma doğal frekansları



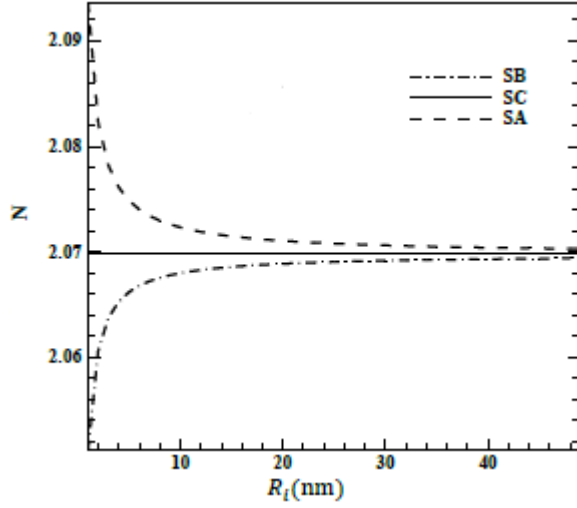
Şekil.4 $n=3$, $R_o / R_i = 1.1$ ve üç yüzey tipi için ikinci boyutsuz burulma doğal frekansları

"Şekil "5 ila 8", nano kürenin iç yarıçapı açısından sırasıyla iç $R_o / R_i = 2$ 'ye dış yarıçap oranı için normal burulma frekansı varyasyonlarını göstermektedir. şekil $n = 2,3$. Bu diyagramlar üç farklı seviye tipi "SA", "SB" ve "SC" için çizilmiştir.

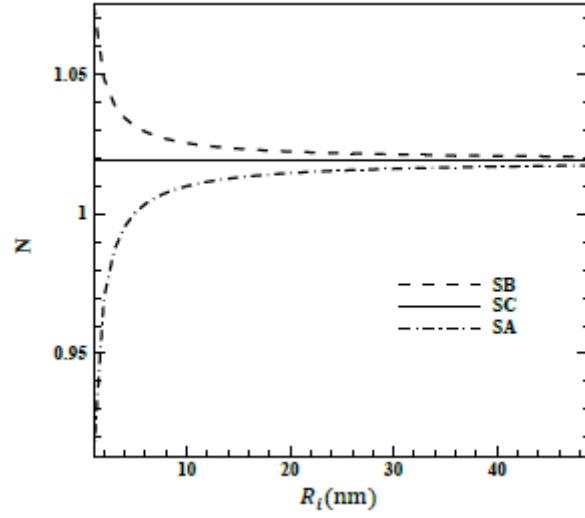
Benzer sonuçlar "Şekil 1-4" olarak görülmektedir.



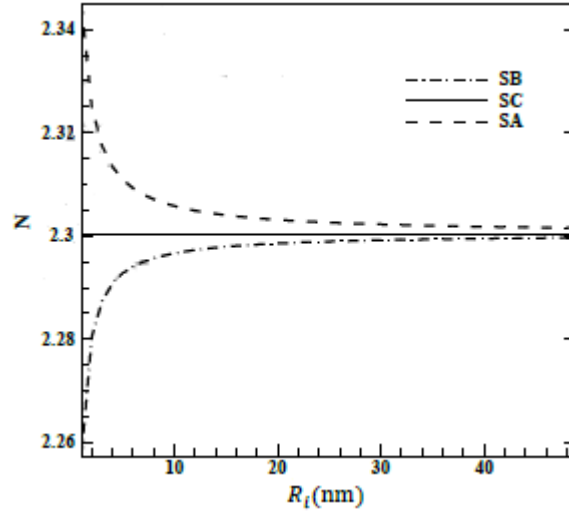
Şekil.5 $n=2$, $R_o / R_i = 2$ ve üç yüzey tipi için birinci boyutsuz burulma doğal frekansları



Şekil.6 $n=2$, $R_o / R_i = 2$ ve üç yüzey tipi için ikinci boyutsuz burulma doğal frekansları



Şekil.7 $n=3$, $R_o / R_i = 2$ ve üç yüzey tipi için birinci boyutsuz burulma doğal frekansları



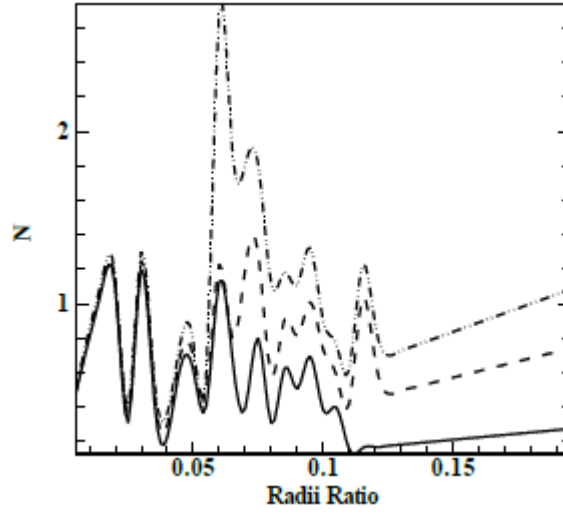
Şekil.8 $n=3$, $R_o / R_i = 2$ ve üç yüzey tipi için ikinci boyutsuz burulma doğal frekansları

"Şekil 9",

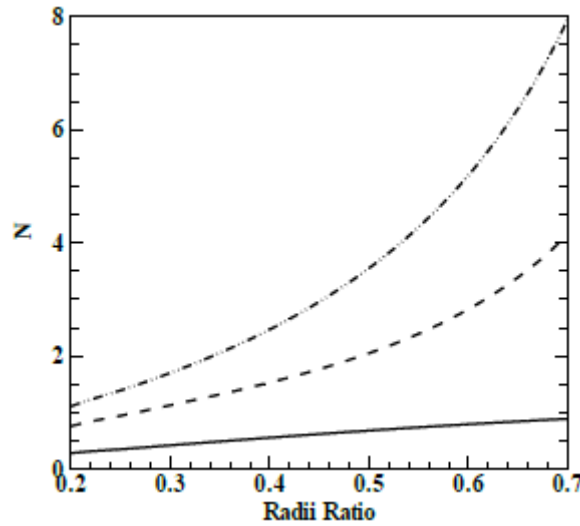
nano kürenin

dış yarıçapı R_i / R_o 'ya iç yarıçap oranı açısından üç normal burulma frekansı ω_{cp}/R_i 'nin değişimini göstermektedir. Bu diyagramlar, 2 nm'lik dış yarıçap, moda Formunun SB yüzeyi $n=2$ ve ilk üç frekansı için çizilir. $R_i / R_o > 0.15$ yarıçapı oranı için belirtildiği gibi doğal boyutsuz frekansların yarıçap oranı artırılarak artırılmış ve ayrıca birinci, ikinci ve üçüncü frekanslar arasındaki mesafe artırılmıştır. Bununla birlikte, $R_i / R_o < 0.15$ oranı için, birinci, ikinci ve üçüncü üç frekansın davranışı aynı olmasına rağmen, yarıçap oranını artırarak değişimleri salınmaktadır.

Moda $n=2$ için burulma frekansını temsil eden "Şekil 9" daki ani değişiklikler olgusu ile ilgili olarak, tüm modların radyal, burulma ve içermesi dikkat çekicidir... Modların sayısı (n) Farklı olduğunda, modanın Şekli ne olursa olsun ve n sayısı küçükten büyüğe düzeni düzenlemek ve iç yarıçapın artmasıyla ilk sistemin frekansındaki değişiklikleri çizmek için genellikle önemli olan, bazen tüketen ilk sistemin frekansı olacaktır. Bazen, modanın değiştirilmesinin de mümkün olduğu burulma sorunu, örneğin, sadece moda tasarım numarasının sadece moda 2 olduğu düşünüldüğünde, yer değiştirme düzenleme modlarından kaynaklanabilecek ani değişiklikler sıklığı görülür, burulma, bir dizi farklı mod ile veya yer değiştirme düzenleme modlarının nedeninin, burulma dışı modlarla burulma olup olmadığıdır. Daha fazla ayrıntı için Haşimi ve Mirzai makalesine bakınız [41].

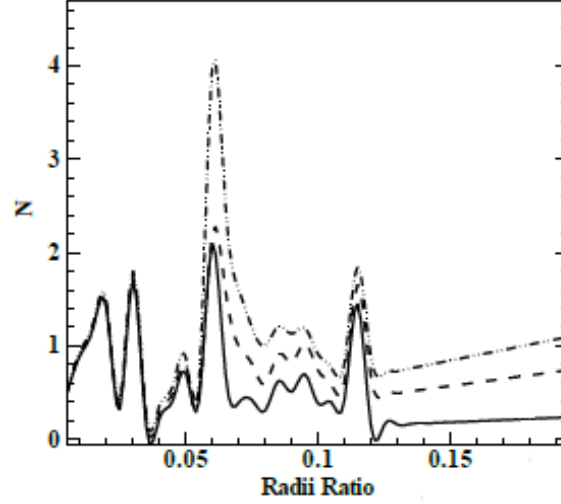


Şekil.9a $n=2$, $R_o=2$ nm ve SB yüzey yüzeyi için R_i /R_o 'ye karşı boyutsuz burulma doğal frekansları

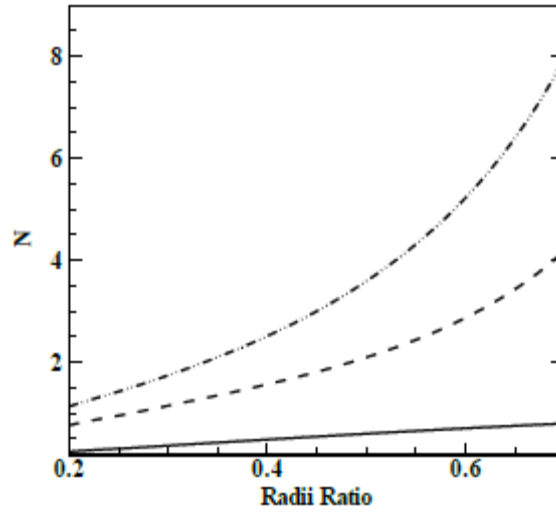


Şekil.9b $n=2$, $R_o=2$ nm ve SB yüzey yüzeyi için R_i /R_o 'ye karşı boyutsuz burulma doğal frekansları

"Şekil 10", nano kürenin dış yarıçapı R_i / R_o 'ya iç yarıçap oranı açısından normal burulma frekansı ω_{cp}/R_i 'nin üç varyasyonunu göstermektedir. Bu diyagramlar 2 nm'lik dış yarıçap, sa seviyesi ve moda Şekli $n=2$ ve ilk üç frekans için çizilir. Benzer sonuçlar "Şekil 9" olarak görülmektedir.

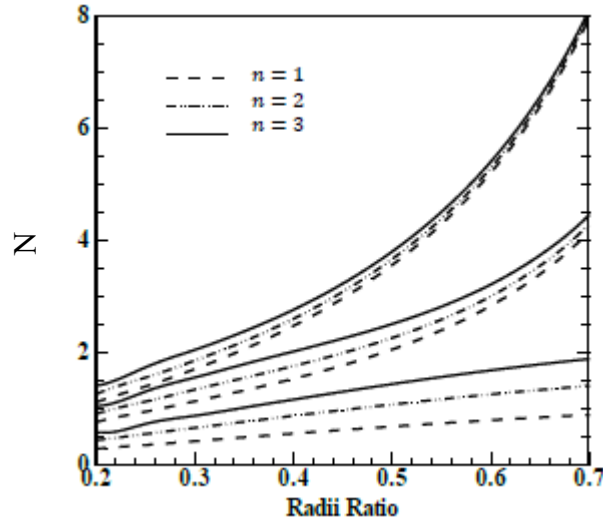


Şekil.10a $n=2$, $R_o=2$ nm ve SA yüzey yüzeyi için R_i / R_o 'ye karşı boyutsuz burulma doğal frekansları

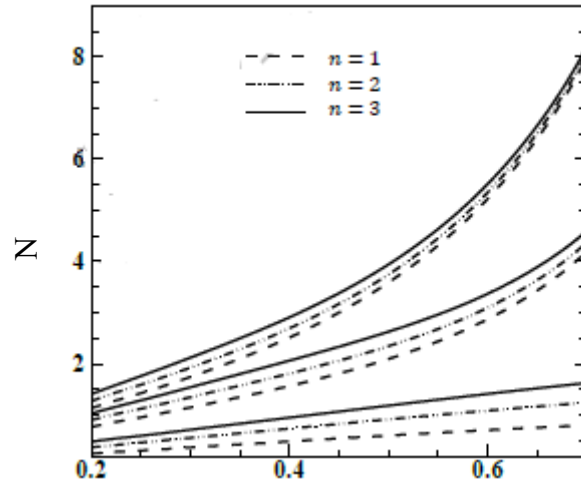


Şekil.10b $n=2$, $R_o=2$ nm ve SA yüzey yüzeyi için R_i / R_o 'ye karşı boyutsuz burulma doğal frekansları

"Şekil 11 ve 12", normal burulma frekansının üç kategorisini değiştirir Nanosferin iç yarıçapının dış yarıçapa oranı 0,3'tür.gösteriyor. Bu diyagramlar 2 nanometrelik dış yarıçap ve moda R_i / R_o şekli içindir çizilmiştir. Bilindiği gibi birinci kategori $n = 2,3,4$ iken



Şekil 11 Ri/Ro olarak normalize edilmiş normal burulma frekansı değişiklikler $Ro = 2$ nm için ve SB yüzey



Şekil 12 Ri/Ro olarak normalize edilmiş normal burulma frekansı değişiklikler $Ro = 2$ nm için ve SA yüzey

Ro

Frekanslar artan yarıçap oranıyla farklılık gösterir, ancak üçüncü kategori her moda numarasının üçüncü doğal frekansına karşılık gelen frekans artar yarıçap oranları birbirine yaklaşıyor.

5. SONUÇ

Bu yazıda ilk önce elastik kürenin titreşimleri vb. üzerinde çalışıyoruz. Nanosfer titreşimleri alanındaki özellikleri ve son olarak titreşimlerin analitik çözümünü gözden geçirin. Kesin elastikiyet teorisinin uygulanmasıyla birleştirilmiş serbest burulma küresel nanoparçacıkları. Yüzey etkilerinin modellenmesi Gortin Murdoch'un teorisi ile araştırıldı.

Doğal burulma frekanslarının analizi için çeşitli sayısal örnekler nanosfer çözüldü ve normalleştirilmiş burulma frekansı değişiklikleri buna göre normalleştirildi birkaç dış-iç yarıçap oranı için, nanosferin iç yarıçapı $R_o / R_i = 1.1, 2$ ve üç farklı seviye için "SA", "SB" ve "SC"

$n=2,3$ iki tür moda çizilmiştir . Sonuç olarak, yüzey etkileri daha düşük frekanslarda ve daha kalın kürelerde daha belirgindir. artan iç yarıçap ile Nanokürelerde bu etkiler kademeli olarak azaltılır ve doğal frekans boyutlandırılı klasik doğal frekans çok yakındır. Ayrıca her biri gözlemlendi

Yüzeyin elastisite modülünün mutlak değeri ne kadar yüksek olursa, frekans farkı o kadar yüksek olur.Klasik moddan daha fazlası.

Nano-kürenin iç-dış yarıçap oranını arttırmak, çünkü yarıçap oranı 0.2'den önce, iç boşluğun genişlemesinin (yarıçap oranının genişlemesi) farklı modların sertliği üzerindeki etkisi farklıdır.Bu nedenle, doğal frekanstaki değişiklikler, yarıçapın bir dizi ayırt edici moda oranının artmasıyla birlikte sallanır ve yarıçapın oranı 0.2 inç olduğundan. yarıçapın artmasıyla birlikte, doğal sinyal frekansı artmış ve buna ek olarak, birinci, ikinci ve Üçüncü frekanslar arasındaki mesafe de artmaktadır.

6. İŞARETLERİN LİSTESİ

a_{nm}	Modal bilinmeyen katsayılar
b_{nm}	Modal bilinmeyen katsayılar
c_s	Enine dalga yayılma hızı(ms^{-1})
c_p	Boyuna dalga yayılma hızı(ms^{-1})
E	Elastisite modülü (N/m)
E_s	Yüzey elastikiyeti
I	Birim Matrisi
$j_n(r)$	Birinci Dereceden küresel Bessel fonksiyonu
$y_n(r)$	İkinci mertebeden küresel Bessel fonksiyonu
$p_n^m(\cos\theta)$	Legendre değiştirilmiş polinom
R_i	Küre'nin iç yarıçapı(nm)
R_o	Küre'nin dış yarıçapı(nm)
U	Yer değiştirme vektörü(m)
U_1	Yer değiştirme vektörünün dönmeyen kısmı(m)
U_2	Yer değiştirme vektörünün döner kısmı(m)

Yunan belirtileri

∇^2	Laplacian operatörü
ρ	Malzeme yoğunluğu(kg/m^3)
χ, ψ, φ	Potansiyel yer değiştirme fonksiyonları
λ, μ	Tutarlılık(N/m^2)
σ	Gergi Tensörü(N/m^2)
ν	Poisson katsayısı
δ_{ij}	Kronecker Deltası

$\sigma_{\alpha\beta}$

Yüzey gerilimleri(N/m²)

$\kappa_{\alpha\beta}$

Yüzey eğrileri

KAYNAKÇA

- [1] K. P. Soldatos, Review of three dimensional dynamic analyses of circular cylinders and cylindrical shells, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 47, No. 10, pp. 501–516, 1944.
- [2] H. Lamb, On the vibrations of an elastic sphere, *Proceedings London Mathematical Society*, Vol. 13, No. 1, pp. 189-212, 1882.
- [3] C. Chree, The equations of an isotropic elastic solid in polar and cylindrical coordinates, their solutions and applications, *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. 14, pp. 250–309, 1889.
- [4] Y. Sato, T. Usami, Basic study on the oscillation of a homogeneous elastic sphere, part I, frequency of the free oscillations, *Geophysics Magazine*, Vo.31, No. 1, pp. 15-24, 1962.
- [5] A. H. Shah, C. V. Ramakrishnan, S. K. Datta, Three dimensional and shell theory analysis of elastic waves in a hollow sphere, Part I: Analytical foundation, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 36, No. 3, pp. 431–439, 1969.
- [6] J. Eskandari, Y. Mirzaei, B. Gheghlaghi, R. Avazmohamadi, Size-dependent free vibration analysis of infinite nanotubes using elasticity theory, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 7, No. 2, pp. 137-144, 2012.
- [7] Keivan Kiani, Free dynamic analysis of functionally graded tapered nanorods via a newly developed nonlocal surface energy-based integrodifferential model, *Composite Structures*, Vol. 139, pp. 151-166, 2016.
- [8] M. R. Ilkhani, A. Bahrami, S. H. Hosseini-Hashemi, Free vibrations of thin rectangular nano-plates using wave propagation approach, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 40, No. 2, pp. 1287-1299, 2016.
- [9] A. C. Eringen, Nonlocal polar elastic continua, *International Journal of Engineering and Science*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-16, 1972.
- [10] A. C. Eringen, Linear theory of nonlocal elasticity and dispersion of plane waves, *International Journal of Engineering and Science*, Vol. 10, No. 5, pp. 425-435, 1972.
- [11] A. C. Eringen, On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves, *Journal of Applied Physics*, Vol. 54,

No. 3, pp. 4703-4710, 1983.

[12] A. C. Eringen, D. G. B. Edelen, On nonlocal elasticity, *International Journal of Engineering and Science*, Vol. 10, No. 3, pp. 233-248, 1972.

[13] G. F. Wang, X. Q. Feng, S. W. Yu., Interface effects on the diffraction of plane compressional waves by a nano-sized spherical inclusion, *Journal of Applied Physics*, Vol. 102, No. 4, pp. 0435331-6, 2007.

[14] S. A. Fazelzadeh, E. Ghavanloo, Coupled axisymmetric vibration of nonlocal fluid-filled closed spherical membrane shell, *Acta Mechanica*, Vol. 223, No.9, pp. 2011-2020, 2012.

[15] E. Ghavanloo, S. A. Fazelzadeh, Nonlocal elasticity theory for radial vibration of nanoscale spherical shells, *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. 41, pp. 37-42, 2013.

[16] S. Cuenot, C. Fretigny, S. D. Champagne, B. Nysten, Surface tension effect on the mechanical properties of nanomaterials measured by atomic force microscopy, *Physical Review B*, Vol. 69, No. 16, pp. 165410-5, 2004.

[17] E. Wong, P. E. Sheehan, C. M. Lieber, Nano-beam mechanics: Elasticity, strength, and toughness of Nano-rods and nanotubes, *Science*, Vol. 277, No.5334, pp. 1971-1975, 2004.

[18] M. E. Gurtin, A. I. Murdoch, A continuum theory of elastic material surfaces, *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, Vol. 57, No. 4, pp. 291–323,1975.

[19] M. E. Gurtin, J. Weissmuller, F. Larche, A general theory of curved deformable interfaces in solids at equilibrium, *Philosophical Magazine A*, Vol. 78, No. 5, pp. 1093–1109, 1998.

[20] V. B. Shenoy, Atomistic calculations of elastic properties of metallic fcc crystal surfaces, *Physical Review B*, Vol. 71, No. 9, pp. 094104-11, 2005.

[21] V. B. Shenoy, Size-dependent rigidities of nano-sized torsional elements, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 39, No. 15, pp. 4039-4052, 2002.

[22] J. He, C. M. Lilley, Surface stress effect on bending resonance of nanowires with different boundary conditions, *Applied Physics Letters*, Vol. 93, No. 26,pp. 263108-3, 2008.

[23] S. M. Hasheminejad, R. Avazmohammadi, Size-dependent effective dynamic properties of unidirectional nanocomposites with interface energy effects, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, pp. 2538-2546, 2009.

[24] L.Wang, Vibration analysis of fluid-conveying nanotubes with consideration of surface effects, *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, Vol. 43, No. 1, pp. 437-439, 2010.

- [25] R. Ansari , R. Gholami, A. Norouzzadeh, M. A. Darabi, Surface stress effect on the vibration and instability of nanoscale pipes conveying fluid based on a size-dependent Timoshenko beam model, *Acta Mechanica Sinica*, Vol. 31, No. 5, pp. 708-719, 2015.
- [26] R. Ansari, A. Norouzzadeh, R. Gholami, M. Faghih Shojaei, M. A. Darabi, Geometrically nonlinear free vibration and instability of fluid-conveying nanoscale pipes including surface stress effects, *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 20, No. 1, pp. 28-37, 2016.
- [27] R. Ansari , R. Gholami, A. Norouzzadeh, M. A. Darabi, Wave characteristics of nanotubes conveying fluid based on the non-classical Timoshenko beam model incorporating surface energies, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 41, No. 11, pp. 4359-4369, 2016.
- [28] R. Ansari, A. Norouzzadeh, Nonlocal and surface effects on the buckling behavior of functionally graded nanoplates: An isogeometric analysis, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Vol. 84, pp. 84-97, 2016.
- [29] A. Norouzzadeh, R. Ansari, M. Darvizeh, Nonlinear forced vibration of axially moving Timoshenko beam in thermal environment via the harmonic balance method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 137-143, 2014. (In Persian)
- [30] R. Ansari, A. Norouzzadeh, R. Gholami, Forced vibration analysis of conveying fluid carbon nanotube resting on elastic foundation based on modified couple stress theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 27-34, 2015. (In Persian)
- [31] E. Duval, A. Boukenter, B. Champagnon, Vibration eigenmodes and size of microcrystallites in glass: Observation by very-low-frequency raman scattering, *Physical Review Letter*, Vol. 56, No. 19, pp. 2052-2055, 1986.
- [32] E. Duval, A. Boukenter, B. Champagnon, Electron-phonon coupling dynamics in very small (between 2 and 8 nm diameter) Au nanoparticles, *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 112, No. 13, pp. 8613, 2000.
- [33] M. Nisoli, S. De Silvestri, A. Cavalleri, A. M. Malvezzi, A. Stella, G. Lanzani, P. Cheyssac, R. Kofman, Coherent acoustic oscillations in metallic nanoparticles generated with femtosecond optical pulses, *Physical Review B*,

Vol. 55, No. 20, pp. 13424–13427, 1997.

[34] H. E. Saucedo, D. Mongin, P. Maioli, A. Crut, M. Pellarin, N. Del Fatti, F.

Vallée, I. L. Garzn, Vibrational properties of metal nanoparticles: Atomistic simulation and comparison with time-resolved investigation, *The Journal of Chemical Physics C*, Vol. 116, No. 47, pp. 25147–25156, 2012.

[35] C. Voisin, D. Christofilos, N. Del Fatti, F. Vallée, Environment effect on the acoustic vibration of metal nanoparticles, *Physica B: Condensed Matter*, Vol.316, No. 5, pp. 89–94, 2002.

[36] J. Tian, H. Ogi, M. Hirao, Vibration analysis of an elastic-sphere oscillator contacting semi-infinite viscoelastic solids in resonant ultrasound microscopy, *Journal of Applied Physics*, Vol. 95, No. 12, pp. 8366-8374,2004.

[37] T. Natsuki, J. Shi, Q. Ni, Vibration analysis of nanomechanical mass sensor using double-layered graphene sheets resonators, *Journal of Applied Physics*, Vol. 114, No. 9, pp. 1-6 ,2013.

[38] K. Jensen, K. Kim, A. Zettl, An atomic-resolution nanomechanical mass sensor, *Nature nanotechnology*, Vol. 3, pp. 533-537, 2008.

[39] Y. H. Pao, C. C. Mow, *Diffraction of Elastic Waves and Dynamics Stress Concentration*, pp. 420-435, New York: Crane Russak, 1973.

[40] A. C. Eringen, E. S. Şuhubi, *Elastodynamics: Linear Theory*, pp. 804-840, New York: Academic Press, 1975.

[41] Seyyed M. Hasheminejad, Y. Mirzaei, Exact 3D elasticity solution for free vibrations of an eccentric hollow sphere, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, No. 2, pp. 229-244, 2011.