

10. ULUSAL AKUSTİK KONGRESİ
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ODİTORYUMU, İSTANBUL
16-17 Aralık 2013

HALKA ŞEKLİNDE BİR DURAĞAN DALGA AKUSTİK LEVİTASYON
DÜZENEGİNİN TASARIMI

Mehmet Hakan Kandemir¹, Mehmet Çalışkan²

¹**Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Çankaya, Ankara, Türkiye**

Tel: 312 210 72 31, e-posta: kandemir@metu.edu.tr

²**Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Çankaya, Ankara, Türkiye**

Tel: 321 210 25 72 e-posta: caliskan@metu.edu.tr

ÖZET

Durağan dalga ile akustik levitasyon yönteminde, bir ses kaynağı ile bir yansıtıcı arasında durağan dalga formu oluşturulur. Durağan dalga formunun düğüm noktaları etrafında akustik basınç bir doğrusal yay gibi davranarak parçacıkları düğüm noktalarına doğru çeker ve parçacıklar havada asılı tutulabilir. Bu çalışmada halka şeklinde bir durağan dalga akustik levitasyon düzeneği tasarlanmıştır. Düzenek iki adet langevin tipi piezoelektrik transdüser, iki adet dalga kılavuzu, bir adet halka şeklinde plaka ve bir adet halka şeklinde içbükey yansıtıcı içermektedir. Bir sinyal üretici ve yükseltici aracılığı ile transdüserlere 20 kHz’de gönderilen sinyal ile transdüserlerin dalga kılavuzlarını uyarması sağlanmıştır. Dalga kılavuzları dalganın genliğini artırarak halka şeklindeki plakayı titreştirir. Dalga kılavuzları 20 kHz’de bir eğilme titreşim biçimi bulunacak şekilde tasarlanan plakaya, ilgili titreşim biçiminde maksimum genlikte titreşimin gerçekleşeceği konumlardan bağlanmıştır. Eğilme titreşim biçiminde titreşen plaka temas ettiği havayı titreştirerek ses dalgası oluşumunu sağlar. İçbükey yansıtıcı plaka doğru konumlandırılarak titreşen plaka ve yansıtıcı plaka arasında durağan dalga oluşması sağlanır. Bu şekilde oluşacak durağan dalga formunun düğüm noktalarında küçük parçacıklar havada asılı tutulabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Akustik levitasyon, Durağan dalga.

DESIGN OF AN ANNULAR ACOUSTIC LEVITATION SETUP

ABSTRACT

In standing wave acoustic levitation a standing wave is obtained between a source and a reflector. The nodes of the standing wave act as a linear spring to attract the particles towards the pressure nodes, thus particles can be suspended in air. In this study an annular acoustic levitation setup is designed. The setup consists of two langevin type piezoelectric transducers, two waveguides, an annular plate and an annular concave reflector. The transducers are activated by 20 kHz signals generated by a signal generator and amplified by an amplifier to excite the waveguides. The waveguides amplify the vibration amplitude and in turn excite the annular plate at locations such that it is excited at a bending mode at 20 kHz. Maximum vibration amplitudes are obtained at the connection locations. As the plate vibrates

in bending mode, it excites the air and generate sound waves. With the right positioning of the reflector plate, standing waves are formed between the annular vibrating plate and the reflector plate. At the pressure nodes of the standing wave, small particles can be suspended in air.

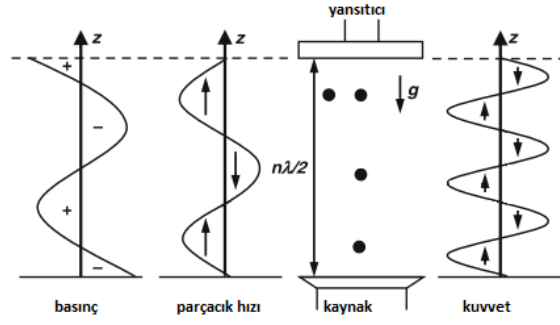
Keywords: *Acoustic levitation, standing wave.*

1. GİRİŞ

Akustik levitasyon küçük boyuttaki malzemelerin ses dalgaları kullanılarak havaya kaldırılması ve /veya havada asılı tutulması işlemidir. Ses dalgalarının bu özelliği ilk olarak Alman araştırmacı Kundt'un 1886 yılındaki impedans tübü deneyinde gözlenmiştir [1]. Tüp içinde bir durağan dalga formu elde edildiğinde ufak toz parçacıkları dalga formunun düğüm noktalarında toplanmıştır. Durağan dalga ile akustik levitasyon daha sonra piezoseramik kristallerin doğal frekanslarının belirlenmesinde kullanılmıştır [2]. Bir durağan dalga akustik levitasyon düzeneği aynı eksen üzerinde paralel konumlanmış ses kaynağı ve yansıtıcılardan oluşur. Durağan dalga formu birkaç eksenli bir düzenek ile elde edilebileceği gibi sürekli bir sistem ile de elde edilebilir. Tek eksen üzerinde bir ses kaynağı ve düz yüzeyli yansıtıcıdan oluşan düzenek 1975'te Whymark tarafından üretilmiştir [3]. 1992'de levitasyon bölgesinden ölçüm alarak olası değişimlerde rezonansın bozulmasını engelleyen bir sisteme sahip olan bir düzenek geliştirilmiştir [4]. Sürekli bir sistem ile durağan dalga akustik levitasyon çalışmaları 2010'da başlamıştır. Dikdörge şeklindeki bir plakanın eğilme titreşim biçiminde harekete geçirilmesi ile plaka ses kaynağı olarak davranmış ve yine dikdörge bir plaka olan yansıtıcı ile arada durağan dalga formu oluşturulmuştur [5]. Bu şekilde tek eksenli bir levitasyon düzeneğinde beklenenden çok daha fazla stabil levitasyon bölgesi elde edilmiştir. Dairesel bir plaka üzerinde levitasyon 2010 yılında gerçekleştirilmiştir [6]. Eğilme titreşim biçiminde titretilen plaka ile yine dairel bir plaka olan reflektör arasında durağan dalga formu elde edilip levitasyon sağlanmıştır. Literatürde halka şeklinde plaka üzerinde gerçekleştirilmiş herhangi bir levitasyon örneği bulunmamaktadır. Bu çalışmada halka şeklinde bir durağan dalga akustik levitasyon düzeneği tasarlanmıştır. Düzenek bir adet halka şeklinde plaka, bir adet halka biçiminde içbükey yansıtıcı plaka, iki adet langevin tipi piezoelektrik transdüser ve iki adet dalga kılavuzundan oluşmaktadır. Bu sistemle elde edilecek durağan dalga formunun düğüm noktalarında parçacıklar havada tutulabilecektir. Tasarımdaki geometriler karmaşık olduğundan, tasarım süreci boyunca gerektiğinde sonlu eleman yazılımları kullanılacaktır.

2. DURAĞAN DALGA İLE AKUSTİK LEVİTASYON

Durağan dalga ile akustik levitasyon gerçekleştirmek için ses kaynağına ve yansıtıcıya gerek vardır. Bu şekilde elde edilen durağan dalga formunun düğüm noktaları etrafında akustik basınç bir doğrusal yay gibi davranarak parçacıkları düğüm noktalarına doğru çeker ve ufak parçacıklar bu şekilde havada tutulabilir. Şekil 1'de de görüldüğü gibi akustik basıncın en az olduğu bölgelerde parçalara bir çekme kuvveti uygulanırken, en fazla olduğu yerde itme kuvveti uygulanmaktadır.



Şekil 1. Durağan dalga akustik levitasyonda basınç, hız ve kuvvet dağılımı

3. TASARIM

3.1 Halka biçiminde plaka

İç ve dış kenarları serbest olan halka şeklindeki plakaların eğilme titreşimindeki doğal frekanslarını bulmak için aşağıdaki determinantın sıfır olmasını sağlayan değerler kontrol edilmelidir.

$$\begin{vmatrix} M_A(\beta b) & M_B(\beta b) & M_C(\beta b) & M_D(\beta b) \\ V_A(\beta b) & V_B(\beta b) & V_C(\beta b) & V_D(\beta b) \\ M_A(\beta a) & M_B(\beta a) & M_C(\beta a) & M_D(\beta a) \\ V_A(\beta a) & V_B(\beta a) & V_C(\beta a) & V_D(\beta a) \end{vmatrix} = 0 \quad (1)$$

Bu determinannda b halkanın iç çapını, a halkanın dış çapını temsil etmektedir. Determinantın içindeki fonksiyonlar da aşağıdaki gibidir.

$$M_A(\beta r) = J_n''(\beta r) + \frac{\nu}{r} J_n'(\beta r) - n^2 \frac{\nu}{r} J_n(\beta r) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_A(\beta r) = & - \left(J_n'''(\beta r) - \frac{1}{r^2} J_n'(\beta r) + \frac{1}{r} J_n''(\beta r) \right) \\ & + n^2 \left(\frac{2}{r^3} J_n(\beta r) - \frac{1}{r^2} J_n'(\beta r) \right) \\ & + \frac{1}{r} (1 - \nu) n^2 \left(-\frac{1}{r^2} J_n(\beta r) + \frac{1}{r} J_n'(\beta r) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Diğer denklemler için gerekli değişiklikler yapılarak determinantı sıfır yapan β değerleri bulunabilir. İndisi B olan denklemlerde ikinci tip Bessel fonksiyonu, indisi C olan denklemlerde modifiye birinci tip Bessel fonksiyonu, indisi D olan denklemlerde modifiye ikinci tip Bessel fonksiyonu kullanılmalıdır. Denklemler (2) ve (3)'te:

$$D = \frac{1}{12} E h^3 (1 - \nu^2) \quad (4)$$

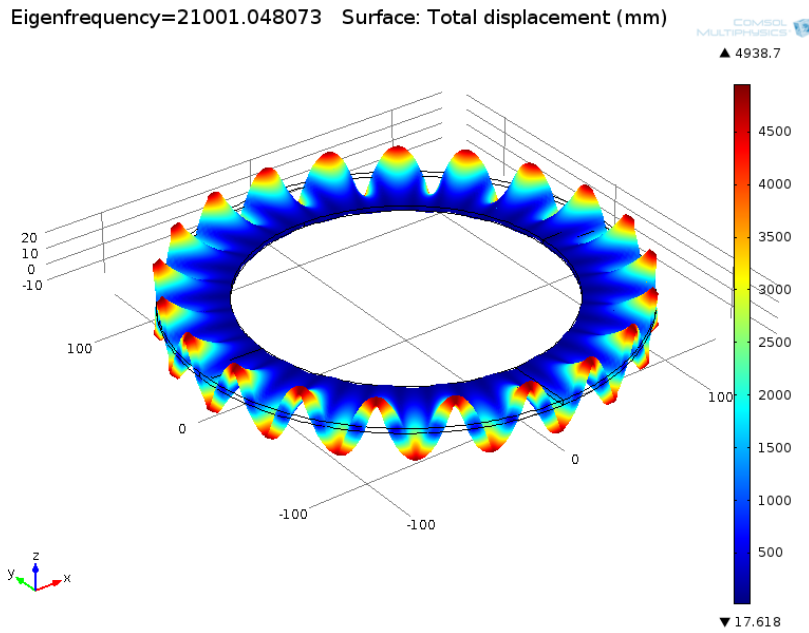
$$\beta^4 = \frac{\rho h \omega^2}{D} \quad (5)$$

Eşitlikleri kullanılarak ilgili doğal frekanslar bulunabilir. Bu projede kullanılacak halka şeklinde plakanın özellikleri Tablo 1’deki gibi bulunmuştur.

Tablo 1. Halka şeklindeki plakanın özellikleri

Özellik	Değer
Malzeme	Al7075
İç çap	190 mm
Dış çap	270 mm
Kalınlık	3 mm

Bu özelliklere sahip halka şeklindeki plakanın COMSOL Multiphysics ® programında yapılmış simülasyonu şekil 2’deki gibidir.



Şekil 2. Halka şeklindeki plakanın eğilme modu

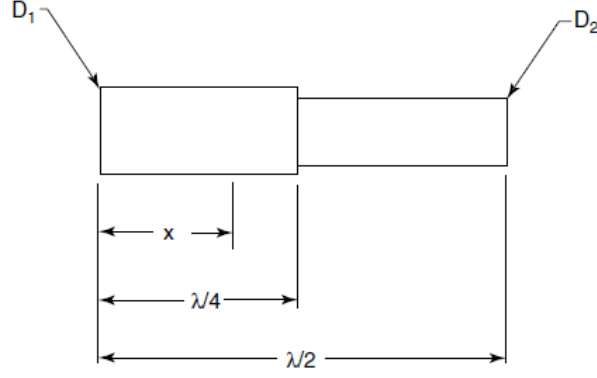
Bu plaka dışarıdan 20100 Hz’de harmonik bir kuvvete maruz kaldığında hareketi bu titreşim biçiminde olacaktır.

3.2 Transdüser ve dalga kılavuzu

Bu düzenekte kullanılacak olan transdüserler MPI Interconsulting firması tarafından üretilen MPI-5050F-20L kodlu ürünlerdir. Bu transdüserler Langevin tipi transdüser olarak adlandırılmaktadır. Transdüserin içerdiği piezoelektrik disklerin yüzeylerine istenen frekansta voltaj farkı uygulanarak titreşim elde edilir. Piezoelektrik disklerin iki tarafında titreşimi iletmesi için metal kütleler bulunur. Transdüser, metal kütlelerin uç yüzeylerinde en yüksek genlikli titreşimi elde etmek üzerine tasarlanmıştır. Bu düzenekte kullanılan modelin ideal çalışma frekans aralığı 20 kHz dolayındadır. Transdüser, tasarlanan dalga kılavuzuna gereken harmonik kuvveti uygulamak için kullanılacaktır. Dalga kılavuzları üzerlerine gelen titreşimleri odaklamak ya da genliklerini artırmak için kullanılırlar. Gerekli hesaplamaları yapmak için çubukların aksenal titreşimleri ile ilgili hesaplara başvurulur. Belirli bir frekansta rezonansa girmesi için tasarlanan bir çubukta aşağıdaki denklem geçerli olacaktır:

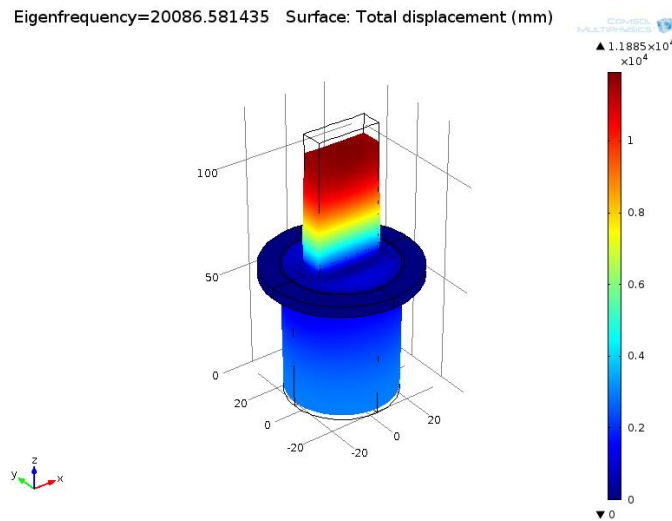
$$L = \frac{c_0 n}{f_n 2} = \lambda_n \frac{n}{2} \quad (6)$$

Burada c_0 çubuğun malzemesi içindeki ses hızını, f_n çubuğun n inci doğal frekansını, λ_n ise çubukta ilgili frekanstaki dalgaboyunu göstermektedir. Eşitlik (6)'den anlaşılacağı gibi çubuk kaçınıcı doğal frekansında titriyor ise, içinde o kadar sayıda yarım dalga boyu içerir.



Şekil 3. Kademeli boynuz tipi dalga kılavuzu

Kademeli boynuz tipi dalga kılavuzları kılavuzun tam ortasına denk gelen bir kademe içerir. Bu şekilde tasarlanmış bir dalga kılavuzunun içinde tasarım frekansında bir yarım dalga boyu bulunur. Titreşim genlikleri iki yüzeyde maksimumdur. Geniş yüzey transdüserle bağlıdır ve transdüser tarafından titretilir. Dar yüzey ise titreşim genliğini artırarak sonraki materyali titretilir. Elde edilen genlik artırımını yüzeylerin oranı kadardır. Dalga kılavuzunun kademenin olduğu noktasında bir düğüm noktası vardır. Tasarım frekansında bu bölgede titreşim olmayacağından dalga kılavuzu buraya konacak kulaklardan sabitlenecektir. Dar yüzey tarafından titretilen malzeme duruma göre hava olabilir, bu düzenekte ise halka şeklinde plaka titretililecektir. Halka şeklindeki plakanın istenen titreşim biçimine uygun olması için dalga kılavuzunun dar yüzeyi dikdörtgen şeklinde yapılacaktır. 20100 Hz'de içinde iki adet yarım dalgaboyu bulunduracak şekilde COMSOL Multiphysics® programında tasarlanmış dalga kılavuzu Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Dalga kılavuzunun aksenal titreşim modu

Dalga kılavuzunun toplam uzunluğu 124,4 mmdir ve tam ortasında kademe bulunur. Geniş kısmı 50 mm çapında ve 62.2 mm yüksekliğindedir. Bağlantı kısmı 70 mm çapında 5 mm yüksekliğinde bir silindir olup, geniş kısmına dahildir. Dar kısım 30 mm×10 mm×62.2 mm boyutlarında bir dikdörtgenler prizmasıdır ve geniş kısmın bittiği yerden başlar. Bu şekilde beklenen genlik artırımını 6.545'tir.

Tablo 2. Dalga kılavuzunun özellikleri

<i>Özellik</i>	<i>Değer</i>
Malzeme	Al6063
Toplam boy	124.4 mm
Genlik artırımını	6.545

Tasarlanan dalga kılavuzu transdüser tarafından titreştirilecektir. Bu şekilde piezoelektrik diskler ile elde edilen titreşimin genliği artırılıp halka şeklindeki plakaya dışarıdan harmonik kuvvet uygulanabilecektir. Transdüser ve dalga kılavuzunun halka üzerindeki etkisi dışarıdan etki eden bir uyarı kuvveti olarak modellenebilir.

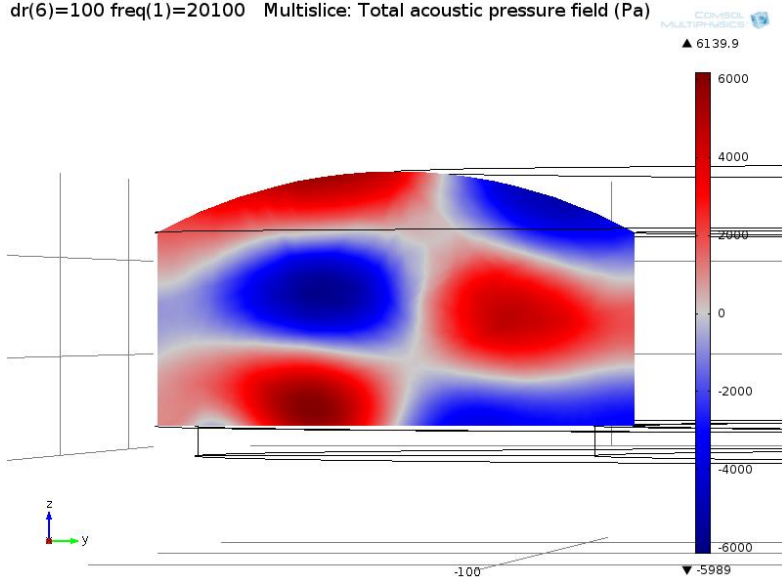
3.3 Yansıtıcı plaka

Ses kaynağı ve yansıtıcı plaka arasında durağan dalga oluşturmak için yansıtıcı plakanın konumu önemlidir. Eksenel titreşim halindeki bir çubuk gibi eğer hava boşluğu da belirli bir frekansta rezonansa sokulmak istenirse, boşluğun uzunluğunun ilgili frekanstaki titreşimin yarım dalga boyunun tamsayı katlarından herhangi biri kadar olması gerekir. Bu şekilde elde edilen basınç dağılımı akustik levitasyon için elverişli olacaktır. Yansıtıcı kaynaktan uzaklaştıkça daha fazla düğüm noktası oluşur, ancak bu da düğüm noktalarında elde edilebilecek levitasyon kuvvetinin azalmasına yol açacaktır. Bu nedenle en güçlü levitasyon için yansıtıcı kaynağa olabildiğince yakın olmalıdır. Bu düzenekte yansıtıcı kaynaktan üç yarım dalga boyu uzaklığa koyulacaktır. Reflektörler içbükey yapılarak yanal yönde stabilize sağlanacak, aynı zamanda daha büyük levitasyon kuvvetleri elde edilebilecektir. Plakanın titreşim biçimi karmaşık olduğundan reflektör özelliklerini belirlemek için analitik çözümler yapılamamaktadır. Bunun yerine COMSOL Multiphysics® programında gerçekleştirilmiş çeşitli analizlerin sonuçları aşağıda sunulmuştur. Dalga kılavuzundan plakaya 20100 Hz'de 10 N büyüklüğünde kuvvet uygulanan analizin sonuçlarına göre elde edilen maksimum basınçlar çeşitli yansıtıcı içbükeylik çaplarına göre Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Yansıtıcının içbükeylik çapına göre elde edilen maksimum basınç

<i>İçbükeylik çapı (mm)</i>	<i>Maksimum basınç (kPa)</i>
50	2.1
60	2.3
70	3.3
80	5.8
90	5.2
100	6.1
110	4.4
120	3.5
130	2.7

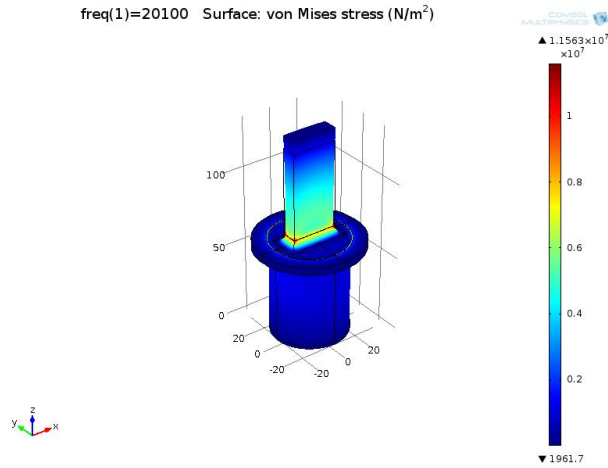
Buna göre 100 mm içbükeylik çapına sahip bir yansıtıcı kullanıldığında düzeneğin bir kesitinde ses basıncı dağılımı Şekil 5'teki gibi olacaktır. Şekil 5'teki beyaz hatlar stabil levitasyon bölgeleri olarak kullanılabilir.



Şekil 5. Düzeneğin bir kesitindeki basınç dağılımı

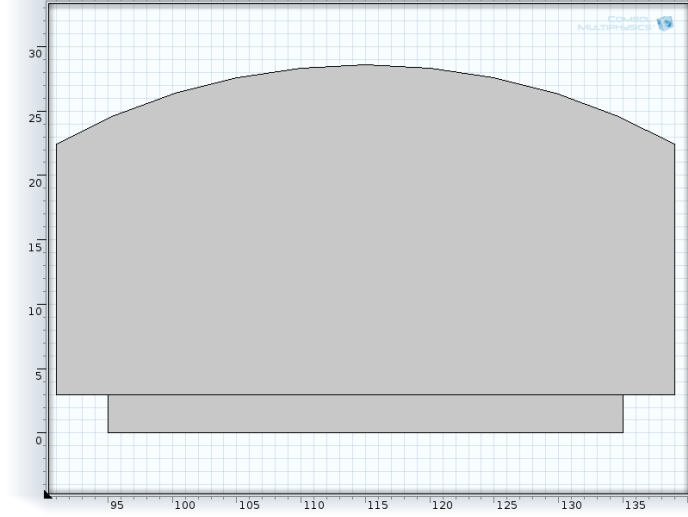
4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE BENZETİM ÇALIŞMASI

Yukarıda tarif edildiği şekilde tasarlanan düzeneğin bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemi ile benzetim çalışması COMSOL Multiphysics ® programında yapılmıştır. Transdüserde 20100 Hz’de gönderilen sinyal dalga kılavuzunun rezonansa girmesine neden olacak ve bu harmonik kuvvetten dolayı dalga kılavuzunda Şekil 6’da gösterilen stres dağılımı gerçekleşecektir. Transdüserden gelen 10 N’luk bir kuvvet sonucu dalga kılavuzu üzerinde görülen en büyük stres 115 MPa’dır ve bu malzemenin akma direncinin yarısından da düşüktür.



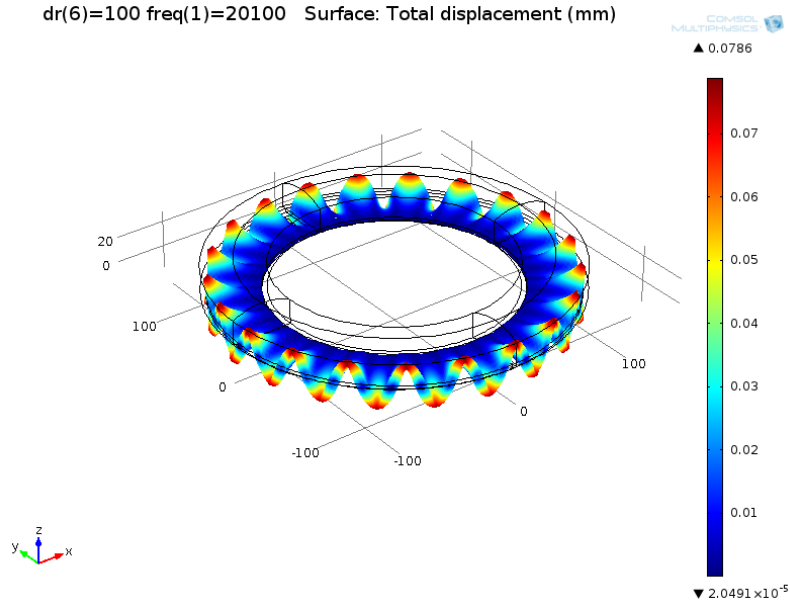
Şekil 6. Dalga kılavuzundaki stres dağılımı

Halka şeklindeki plaka ve plaka ile yansıtıcı arasındaki hava boşluğu COMSOL Multiphysics ® programında Şekil 7’deki gibi modellenmiştir. Alt taraftaki dikdörtgen plakanın kesitini, üst taraftaki kısım ise havayı temsil etmektedir. Yansıtıcının yüzeyi içbükey kenarla temsil edilmiş, yansıtıcıya ya da plakaya ait olmayan kenarların ses dalgalarının geçişine tamamen izin verdiği kabul edilmiştir. Yansıtıcı yüzey de gelen dalgaları tamamen yansıtmaktadır.



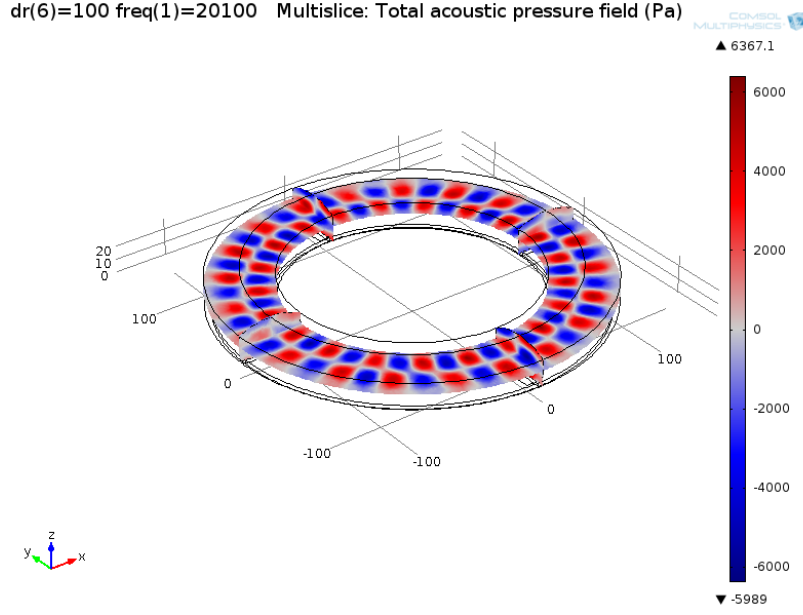
Şekil 7. Plaka ve hava boşluğunun bilgisayar modeli

Tasarlanan halka şeklinde plaka, dalga kılavuzundan gelen 10 N büyüklüğünde harmonik kuvvetin altında Şekil 8’de gösterilen titreşim biçiminde titreşecektir. Benzetim çalışmasında dalga kılavuzunun dar alan yüzeyi ile plakanın sürekli temas halinde kalacağı kabul edilmiştir.



Şekil 8. Plakanın harmonik kuvvet altında titreşimi

Halka şeklindeki plakanın bu şekilde titreşmesi sonucu ortaya çıkan basınç dağılımı Şekil 9’da gösterildiği gibi olacaktır.



Şekil 9. Düzenekte oluşacak basınç dağılımı

Bu şekilde oluşan basınç dağılımında birçok bölgede stabil olarak levitasyon gerçekleştirilebilecektir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada halka şeklinde bir durağan dalga akustik levitasyon düzeneği tasarlanmıştır. Bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemi ile benzetimler gerçekleştirilmiş ve sonuçları sunulmuştur. Analitik yöntemlerin kullanılmadığı yerlerde tasarım sonlu elemanlar yönteminin yardımı ile yapılmış, düzeneğin üretimi de göz önünde bulundurularak tasarım frekansından az bir sapma pahasına karmaşık boyutlardan ve yapılardan kaçınılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Kundt, A. (1866). Ueber eine neue Art akustischer Staubfiguren und über die Anwendung derselben zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern und Gasen. *Annalen Der Physik un Chemie*, (4).
- [2] Bücks, K., & Müller, H. (1933). Über einige Beobachtungen an schwingenden Piezoquarzen und ihrem Schallfeld.
- [3] Whymark, R. . R. (1975). Acoustic field positioning for containerless processing. *Ultrasonics*, (November), 251–261.
- [4] Zhuyou, C., Zhimin, L., & Shuqin, L. (1992). Development of an acoustic levitation reactor. *Powder Tehcnology*, 69, 125–131.
- [5] Koyama, D., & Nakamura, K. (2010). Noncontact ultrasonic transportation of small objects over long distances in air using a bending vibrator and a reflector. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 57(5), 1152–9.

- [6] Koyama, D., & Nakamura, K. (2010). Noncontact ultrasonic transportation of small objects in a circular trajectory in air by flexural vibrations of a circular disc. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 57(6), 1434–42.