

T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ

**BAĞLAMA GÖVDESİNİN AKUSTİK ANALİZİ VE
İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

AYDIN AKALTAN

İSTANBUL, 2017

**TC.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SES TEKNOLOJİLERİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**BAĞLAMA GÖVDESİNİN AKUSTİK ANALİZİ VE
İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

AYDIN AKALTAN

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Namık ÇIPLAK

Yrd. Doç. Dr. Yahya Burak TAMER

İSTANBUL, 2017

T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SES TEKNOLOJİLERİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

Tezin Adı: Bağlama Gövdesinin Akustik Analizi ve İncelenmesi
Öğrencinin Adı Soyadı: Aydın Akaltan
Tez Savunma Tarihi: 25.08.2017

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları yerine getirmiş olduğu Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nafiz ARICA
Enstitü Müdürü

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları yerine getirmiş olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Yahya Burak TAMER
Program Koordinatörü

Bu Tez tarafımızca okunmuş, nitelik ve içerik açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak yeterli görülmüş ve kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı:

Yrd. Doç. Dr. Namık ÇIPLAK

Ek Danışman:

Yrd. Doç. Dr. Yahya Burak TAMER

Üye:

Doç. Dr. Can KARADOĞAN

Üye:

Yrd. Doç. Dr. Güven ÇATAK

Üye:

Doç. Dr. Koray K. ŞAFAK

ÖZET

Bu çalışmada, bağlama kapağının nümerik ve gitar kapağının deneysel ve nümerik kıyaslamaları ile karşılaştırılarak, bağlama gövdesi için de nümerik bir analiz sunulurak, gövdedeki parçalar için rezonans modlarındaki doğal frekanslar karşılaştırılmıştır. Gitar kapağının deneysel ve nümerik sonuçları kıyaslanarak, sonlu eleman metodu kullanılarak bağlamanın kapak ve gövdesi için de nümerik analiz ile doğal frekanslar ve rezonans modu şekilleri çözümlenmiştir. Bağlama kapağı ve gövdesi, örnek seçilen bir bağlamadan ölçümler referans alınarak MATLAB’de dış kenar noktaları (sınırlar) olarak kaydedilip ANSYS’e aktararak modellenmiştir. ANSYS’te modal analiz seçeneği kullanılarak, gerekli parametreler ve sınır koşulları sağlanarak, kullanılan tahta tiplerinin yoğunluk, elastik modülleri ve Poisson oranları ortotropik malzeme tanımlaması ile girilerek, bağlama kapağı, gövdesi ve gitar kapağı için ilk altı doğal frekans hesaplanmıştır.

Bu çalışma bağlamanın ses renginin anlaşılması, incelenmesi ve gitar gibi diğer enstrümanlardan farkını sağlayan sebeplerin açıklaması olarak, gövde, gövde kapağı, şekli ve kullanılan malzeme ile bağdaştırılmaktadır. Bağlamanın gitar ile farkına dair, iki enstrümanın doğal frekansları kıyaslanarak bir analiz getirilmiştir.

Gitar için yapılan telli ve telsiz deneyler ve tellerin uyguladığı kuvvet ile kapak üzerinde oluşan gerilim, gerinim ve deformasyon SOLIDWORKS kullanılarak analiz edilerek, doğal frekans üzerindeki etkisine değinilmiştir. Çalışma içerisinde alınan sonuçlar doğrultusunda, bağlama ve gitar kapakları için kıyaslandığında, doğal frekanslar üzerinde şeklin ve malzemelerin mekanik özelliklerinin yanı sıra tellerin uyguladığı kuvvetin de etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

ABSTRACT

The numerical and experimental results of the natural frequency of the soundboard of the guitar are compared and these results are compared with the previous studies of plate-like shapes and wooden instruments like guitar. The soundboard natural frequency results are analogised and a model of the body of the bağlama is created. The natural frequencies and mode shapes are obtained from this model using ANSYS. The models are derived from the boundary measurements of a guitar and a bağlama soundboard. Using the ANSYS modal analysis option and defining linear elastic orthotropic material (wood), providing the necessary conditions and parameters like density, elastic modulus, shear modulus and Poisson's ratios, the first six natural frequencies are obtained for bağlama soundboard, body and guitar soundboard.

This study aims to investigate and analyse the sound color of bağlama, deduce the reasons of the difference between bağlama and other instruments like guitar. These differences are connected to the shape of the soundboard, body, the material used and shape in general within this study. The comparison of the natural frequencies are also linked with the sound difference.

The difference within the experimental results of the guitar soundboard with and without the strings and stress-strain and deformation analyses results (SOLIDWORKS) with applying the string tensions are unveiling the effect of the string forces on the natural frequencies of the soundboard. The results of this study suggests that the string tensions have a significant effect on the natural frequency besides the shape and the mechanical properties of the material used.

İÇİNDEKİLER

TABLOLAR	vi
ŞEKİLLER.....	vii
KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	2
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	4
2.1 DOĞAL FREKANS VE REZONANS.....	4
2.1.1 Basit Harmonik Hareket	4
2.2 MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	7
2.2.1 İzotropik Malzemeler	7
2.2.2 Ortotropik Malzeme	7
2.2.3 Anizotropik Malzeme	8
2.2.4 Tahtanın Ortotropik Özelliği	8
2.3 SONLU ELEMEN METODU	10
2.3.1 Nodlar	10
2.3.2 Mod Şekilleri	11
3. VERİ VE YÖNTEM	13
3.1 NÜMERİK ANALİZ.....	13
3.1.1 Gitar Gövde Kapağının Geometrisinin Oluşturulması	13
3.1.2 Ansys Kullanılarak Yapılan Bağlama Kapak Çözümlemesi	19
3.1.3 Bağlama Kapağının Geometrisinin Oluşturulması	19
3.1.4 Ansys Kullanılarak Yapılan Bağlama Kapak Çözümlemesi	22
3.1.5 Bağlama Gövdesinin Geometrisinin Oluşturulması.....	23
3.2 DENEYSEL METOT	24
4. BULGULAR	33
4.1 GİTAR GÖVDE KAPAĞI BULGULARI.....	33
4.2 BAĞLAMA KAPAĞI BULGULARI.....	37
4.3 BAĞLAMA GÖVDE BULGULARI	38
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	41
KAYNAKÇA.....	44

TABLÖLAR

Tablo 3.1: ANSYS analizlerinde kullanılan mekanik özellikler.....	15
Tablo 3.2: Gitar tellerinin (D’addario EJ47 Klasik Gitar Tel Seti) standart akortta (EADGBE) oluşturdukları tansiyon (N)	18
Tablo 3.3: Kağıt üzerindeki bağlama fotoğrafından ölçülen sınır koordinatları.....	20
Tablo 3.4: Excel’de yapılan optimizasyon ile hesaplanan yeni değerler.....	21
Tablo 4.1: Deney ve ANSYS bulguları.....	33
Tablo 4.2: Farklı EL değerlerine oranla değişen mekanik özelliklere göre ilk doğal.... frekanslar.....	33
Tablo 4.3: Farklı açılarda tellerin yaptığı çökertme etkisinin nümerik sonuçları (maksimum çökme).....	35
Tablo 4.4: Bağlama kapağının (ses tahtası) ilk 6 doğal frekansı	37
Tablo 4.5: Bağlama gövde kapağının farklı koşullarda ve kalınlıklarda rezonans modlarının değişim yüzdeleri.....	37
Tablo 4.6: Farklı sınır koşullarına göre ilk altı rezonans modları.....	39

ŞEKİLLER

Şekil 2.1: Pendulum-Sarkaç Örneği	5
Şekil 2.2: Farklı stres-gerinim grafikleri; (a) lineer elastik, (b) lineer olmayan elastik, (c) viskoelastik/plastik/viskoplastik (Kelly (2005))	7
Şekil 2.3: Tahta Üzerinde Eksenler	9
Şekil 2.4: Çizgisel bir cisim üzerinde oluşan nodlar	10
Şekil 2.5: Dairesel bir plakanın mod şekilleri	11
Şekil 2.6: Elips şeklinde bir plakanın rezonans mod şekilleri	12
Şekil 3.1: Gitar gövde kapağının kenar mesafelerinin ölçümü	13
Şekil 3.2: Gitar gövde kapağının simetrik diğer yarısını eklemek için MATLAB'de.... hazırlanan kod	14
Şekil 3.3: MATLAB'de oluşturulan gitar kapağı nın ("cm") grafiği	14
Şekil 3.4: ANSYS yazılımında, "geometri" kısmında oluşturulmuş gitar kapağı..... geometrisi	15
Şekil 3.5: Gitarın kapak kalınlığı doğrultusundaki dik kısmı için MATLAB'de yazılan kod.....	16
Şekil 3.6: Gitarın kapak kalınlığı doğrultusundaki dik kısmı için oluşturulan noktalar.....	17
Şekil 3.7: Dik kısmı ile oluşturulan kapak geometrisi	17
Şekil 3.8: Gitar tellerinin gitarın gövde kapağı üzerine uyguladığı kuvvetler	18
Şekil 3.9: Kenar koordinatlarının hesaplanmasında kullanılan bağlamanın fotoğrafı.....	19
Şekil 3.10: Bağlama ses tahtasının ölçülen değerlerinin grafiği (x, y)	20
Şekil 3.11: Optimizasyon sonrası oluşturulan bağlamanın ses tahtasının şekli	22
Şekil 3.13: Modellenen ile taranan bağlama gövdesi arasındaki hata payı.....	23
Şekil 3.13: Ters açıdan, modellenen ile taranan bağlama gövdesi arasındaki hata payı	24
Şekil 3.14: Mesafe ölçüm lazeri için dizayn edilen platformun ana iskeleti; (a) yan, (b) ön, (c) izometrik, (d) üst.....	25
Şekil 3.16: (a) Masafe ayarlı matkap ucu , (b) çekme, (c) çekme işaretleyici, (d) alyen	26

Şekil 3.15: (a) Havşa matkap ucu, (b) havşa baş cıvata, (c) matkap.....	26
Şekil 3.18: (a) 30*28 tahta, (b) 40*20 tahta, (c) 40*28 tahta,	
(d) 200*20 tahta, (e) (e) raylar, (f) M3.5*10 vidalar	27
Şekil 3.19: (a) Mekanik fare, (b) pinyon, (c) ray, (d) farklı boylarda teyp lastikleri .	28
Şekil 3.19: MATLAB üzerinden ses çıkışı ile frekans taraması yapan kod	29
Şekil 3.20: Deney düzeneğinin illüstrasyonu.....	30
Şekil 3.21: Deney düzeneğinin fotoğrafı	30
Şekil 3.22: Üstten bakarak deneylerde kapak üzerinde lazerin hedeflendiği yer	31
Şekil 3.23: Lazer verilerinin temizlenmesi için yazılan makro.....	32
Şekil 4.1: Gitar kapağının (ses tahtasının) telsiz (mavi) ve telli (turuncu)	
deney sonuçları.....	33
Şekil 4.2: Gitar gövde kapağının ANSYS analizi rezonans mod şekilleri;.....	
(a) mod 1, (b) mod 2, (c) mod3, (d) mod 4, (e) mod 5, (f) mod 6	34
Şekil 4.3: Gitar tellerinin gitarın gövde kapağı üzerine uyguladığı kuvvetler	35
Şekil 4.4: Açığa göre oluşan maksimum çökme grafiği	35
Şekil 4.5: Gitar kapağında belirtilen açılarda oluşan deformasyonun	
normalize edilmiş hali	36
Şekil 4.6: Deformasyonun izometriğe yakın gösterimi.....	36
Şekil 4.7: Bağlama kapağında farklı koşullarda oluşan doğal frekansların grafiği ...	38
Şekil 4.8: Bağlama gövde kapağının rezonans mod şekilleri; (a) 1. mod,.....	
(b) 2. mod, (c) 3. mod, (d) 4. mod, (e) 5. mod, (f) 6. mod	38
Şekil 4.9: Bağlama gövdesinin rezonans mod şekilleri; (a) 1. mod,.....	
(b) 2. mod, (c) 3. mod, (d) 4. mod, (e) 5. mod, (f) 6. mod	39
Şekil 4.10: Tek dosya uzantısı üzerinden farklı sınır koşullarında	
bağlama gövdesinin rezonans modlarının grafiği	40

KISALTMALAR

ANSYS : Analysis of Systems (Program)

CAD : Computer-Aided Design

cm : Santimetre

Hz : Hertz

mm : Milimetre



1. GİRİŞ

Bu çalışmada amaçlanan, bağlama kapağının gitar kapağı deneyleri ve nümerik analizleri ile kıyaslanarak, bağlama gövdesinin de nümerik ve deneysel olarak incelenmesi, doğal frekanslarının bulunması ve ses rengi üzerindeki etkilerinin araştırılmasıdır. Enstrümanlarda genellikle esas amaçlanan, bir titreşimin arttırılması, çoğaltılması veya uzatılmasıdır. Müzikal enstrümanlar, insanlarda kompleks psiko-akustik etkilere sebep olan ve karmaşık tanımlamalar ile betimlemeye gereksinim duyulan, geçmişten bugüne kadar deneme yanılma yolu ile en kabul gören hallerine gelmiş aletlerdir. Yapımlarında kullanılan malzemenin kalitesinin ve amaçlanan frekans aralıklarında daha iyi titreşiminin sağlanabilmesi sonucu bu hallerine gelen enstrümanlarda, fiziksel şekil, yapım tekniği veya icra tekniği ile de istenilen ses sonucu sağlanmaya çalışılmaktadır. Öncelikle amaçlanan, bir enstrümanın belli frekanslarda çınlaması/tınlaması rezonans olmasıdır. Batı Müziği enstrümanlarının akustiğine nazaran bazı başka geleneksel enstrümanlar kendilerine has ses karakterleri ve armonik yapıları (ör. mikrotonal müzik) nedeniyle önemli ve özgün bir çalışma alanı sunaktadırlar.

Bağlama klasik bir Türk Folk Müziği enstrümanıdır ve genellikle yedi tellidir. Birden fazla parçadan oluştuğu kabul edilen bağlama, gövde, kapak, klavye ve teller olmak üzere dört ana parçadan oluşmaktadır. Sesin kuvvetlendirilmesi açısından önemli olan parçalar gövde ve kapak kabul edilerek, bu çalışmada, bu iki parça üzerine odaklanılmıştır. Farklı akort sistemleri olmak ile birlikte, üç sıra, tel gruplarından oluşmaktadır. Tellere tezene ile vurma ve çekme hareketi, tellerin küçük genlikli bir salınım yapmasına neden olmaktadır. Tellerden gelen düşük enerjili titreşimler, tellerin basınç uygulamakta olduğu köprü aracılığı ile kapağa iletilir ve oradan da gövdeye ve gövdenin içinde kalan boşluğa iletilir. Fletcher ve Rossing (2010) telli enstrümanların psiko-akustik prensiplerini detaylandırmaktadır. Jannson (1983) gitaristler için, bir gitarda en önemli unsurun, tonal güç ya da “taşıma gücü” olduğunu belirtmektedir. Meyer’e (Jannson (1983)) göre ise üçüncü ve ikinci rezonans frekansı ve üçüncü rezonans frekansının sivriliği (Q-değeri) bir gitar için kalite ile ilişkili bulunmaktadır.

Obataya, Ono & Norimoto (2000) müzikal enstrümanlarda ses tahtasının önemine değinerek, ladin ağacı için örnekler üzerinde birinci rezonans modunun frekansı ile boylamsal yönde elastik modülün ilişkisi üzerine değinmektedir. Gorrostieta-Hurtado, Pedraza-Ortega, Ramos-Arreguin, Sotomayor-Olmedo & Perez-Meneses (2012) gitarda farklı bölgelerin doğal frekans özelliklerini vurgulayarak, gitar sesinin karakteristiğini tanımlayıp, akustik gitar için nümerik (ANSYS) ve deneysel yöntemlerle kıyaslama sunmaktadır. Becache, Chaigne, Derveaux & Joly (2005) gitar kapağını Kirchoff-Love plaka modeline uyarlayarak akustik gitar için sonlu eleman metodu ile nümerik çözümleme yapmıştır. Tapia (2002) çalışmasında izotropik ve ortotropik malzeme farkına değinerek, kapak kalınlığı, elastik modül ve yoğunluk değerlerindeki farklılıkların gitar kapağının doğal frekansları üzerindeki etkisini incelenmektedir. Ono (1999) çalışmasında, sazlı ladinden yapılmış bir numunenin bir impuls ile dürtülmesini analiz etmektedir. Aizawa, Obataya, Ono, & Norimoto (1998) çalışmalarında müzikal enstrümanların ses tahtası yapımında kullanılan tahtaların akustik dönüşüm verimliliklerinin önemi ile tahta malzemesinin izotropiden farklılığını vurgulamaktadır.

Bu çalışma, bağlamanın ses renginin anlaşılabilmesi için gövde ve gövde kapağının doğal frekanslarının etkisinin önemini vurgulamaktadır. Statik, armonik ve modal analizlerde etkin olan ANSYS yazılımında gitar (gövde kapağı) ve bağlama (gövde ve gövde kapağı) modellemesi yapılarak modal analiz çözümlemesi ile doğal frekanslar ve rezonans mod şekilleri incelenmesi tercih edilmektedir. Enstrüman yapımında veya geliştirilmesinde fikir verici unsurlar bu yöntemler ile analiz edilmektedir. Bu çalışma, doğal frekans ve rezonans tanımlaması, tahta malzemesinin mekanik özellikleri ve diğer malzemelere göre farkı, gitar kapağının modellenmesi ve nümerik analizi, bağlama kapağının modellenmesi ve nümerik analizi ve bu konuları takiben bağlama gövdesinin modellenmesi ve nümerik analizi, sonuçlar, sonuçların literatür ile ve bu çalışmanın kendi içerisindeki kıyaslamaları, yorumlanmaları ve önermeleri içermektedir. ANSYS programında, modal analiz için sonlu eleman metodu kullanılarak gövde için de çözümlemeler bulunmaktadır. Deneysel metot için kurulan düzenek anlatılmaktadır. Gitar kapağında tellerin farklı açılarda bağlanarak oluşan etkideki farklılıklar SOLIDWORKS kullanılarak analiz edilmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 DOĞAL FREKANS VE REZONANS

Bir titreşimin birim zamandaki salınım sayısına frekans, salınım süresine de periyot adı verilmektedir. Denge hali ile titreşim salınımının en uç noktası arasındaki mesafe farkına genlik (amplitüd) denilmektedir. Titreşen cisimlerin normal frekanslarına tabii frekans da denilebilir. Bütün cisimlerin bir doğal frekansı bulunmaktadır. Doğal frekans ise bir sistemin fazladan bir etki altında (ek bir kuvvet ya da sönümleme gibi) olmadığına salınmaya ya da titremeye meyilli olduğu frekans olarak kabul edilmektedir. Her sistem, tahrik edildiğinde ya da uyarıldığında, titreşmeye daha meyilli olduğu bir veya birden fazla doğal frekansa sahiptir. Basit bir mekanik sistem üzerinden düşünersek; kütle-yay sistemi göz önünde bulundurularak, sistemdeki kütle ve yay sabiti, sistemin doğal frekansının belirlenmesindeki en temel faktörlerdir.

2.1.1 Basit Harmonik Hareket

$$F_{net} = m \cdot a \quad (2.1)$$

$$-k \cdot x = m \cdot a \quad (2.2)$$

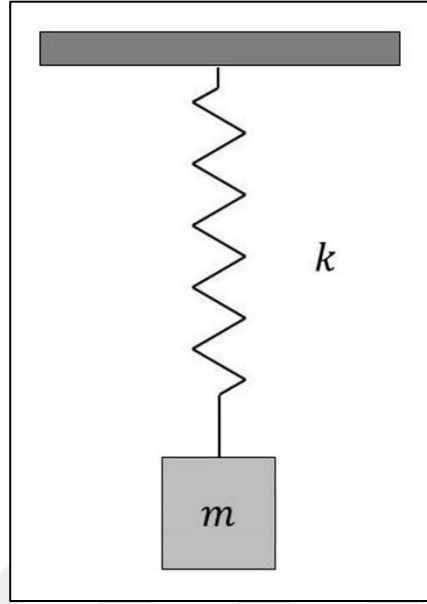
$$x = A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.3)$$

$$a = x'' = \frac{d^2x}{dt^2} = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.4)$$

$$-\omega^2 \cdot x = -\frac{k}{m}x \quad (2.5)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.6)$$

Şekil 2.1: Pendulum-Sarkaç Örneği

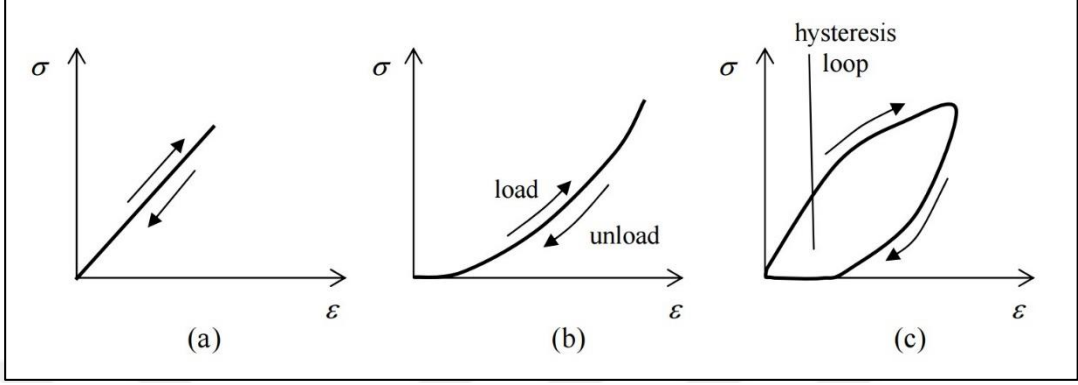


Kütle-yay sistemi, aynı kuvvet altında, kuvvetin frekansı, doğal frekansına denk geldiğinde en büyük salınımını, yani en yüksek genliğine ulaşmaktadır. Bu bir rezonans örneğidir. Rezonans, her zaman istenilen bir durum olmamaktadır. Fiziki sistemlerde, uyarıcının tesiriyle titreşen cisimlerin genliği, uyarıcı etkisini kaldırdığı takdirde, sürtünme gibi sebeplerden dolayı azalarak sifıra inmektedir. Bu olaya sönümlenme denilmektedir. Mekanik sistemlerde rezonans genellikle sönümlenmesi gereken bir durum olarak görülmektedir. Mesela bir arabanın motoru ya da çamaşır makinesinin rezonansı sönümlenmesi gereken bir durumdur. Depremlerde de binaların zarar görmesinde, depremin salınımı binaların doğal frekansına yakın olduğunda, artan genlik büyük etki göstererek, rezonans örneği olarak gösterilmektedir. Bazı durumlarda, depremin salınımı binaların doğal frekansına eşit olduğunda, bina artan genliğe ve bunun neden olduğu gerilime direnemeyerek yıkılabilmektedir. Radyoların çalışma prensibi, verici ile alıcının frekansı uyduğunda genliğin artması ile, başka bir örnek sayılabilmektedir.

Müzikal enstrümanlarda da rezonans aranan bir durum olarak düşünülmektedir. Mesela bir gitarın gövdesi tellerden gelen sesi rezonans edip kuvvetlendirmek üzere tasarlanmaktadır. Fletcher ve Rossing (1998) gitar gövdeleri için, yapımlarında, iskelet sistemi kurularak bu rezonansın kontrollü bir hale getirilmesinden bahsetmektedir. Bir gitar teline vurulduğunda, tel titremeye başlamaktadır. Kaç kere tekrar edilirse edilsin, faktörler değiştirilmedikçe, bir gitar teline vurulduğunda, tel aynı frekansta salınım yapmak istemektedir. Kütle-yay örneğinde olduğu gibi tel, vurulduğunda, doğal frekansında salınım yapmaktadır.

2.2 MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Şekil 2.2: Farklı stres-gerinim grafikleri; (a) lineer elastik, (b) lineer olmayan elastik, (c) viskoelastik/plastik/viskoplastik (Kelly (2005))



Kaynak: Kelly, P. (2005). *Solid Mechanics Part I*. Auckland

Malzeme içindeki gerinimler genellikle küçük olduğunda ve stres, gerinim ile direkt orantılı olduğunda lineer elastik bir model tanımlanmaktadır. Lineer elastik bir malzeme yüklenirken takip ettiği gerinim yolunu yükleme kaldırılırken de ters yönde takip etmektedir. Lineer elastik malzemeler genel olarak üç başlıkta incelenmektedir;

- a) İzotropik
- b) Ortotropik
- c) Anizotropik

2.2.1 İzotropik Malzemeler

İzotropik bir malzeme yön gözetmeksizin eşit mekanik ve termal özellik göstermektedir. Elmas, metaller veya yöne göre özelliği değişmeyen bütün malzemeler izotropik malzeme sınıfına girmektedir. Örneğin çelik, mikroskobik yapısı homojen olmasa da izotropik özellik gösteren bir malzemedir.

2.2.2 Ortotropik Malzeme

Ortotropik malzemeler, üç birbirine dik eksen doğrultusunda mikro-yapısal simetri barındıran ve bu eksenlere göre ayrı özellik gösteren malzemeler olarak kabul edilmektedir. Malzeme özelliği eksen üzerinde kalındıkça sabit kalmaktadır. Cam

elyafı/camyünü, kağıt katmanları, çoğu polimer zinciri gibi tanecikli, laminar (ince tabakalar halinde) ya da lifli yapıya sahip malzemeler ortotropik özellik göstermektedir.

2.2.3 Anizotropik Malzeme

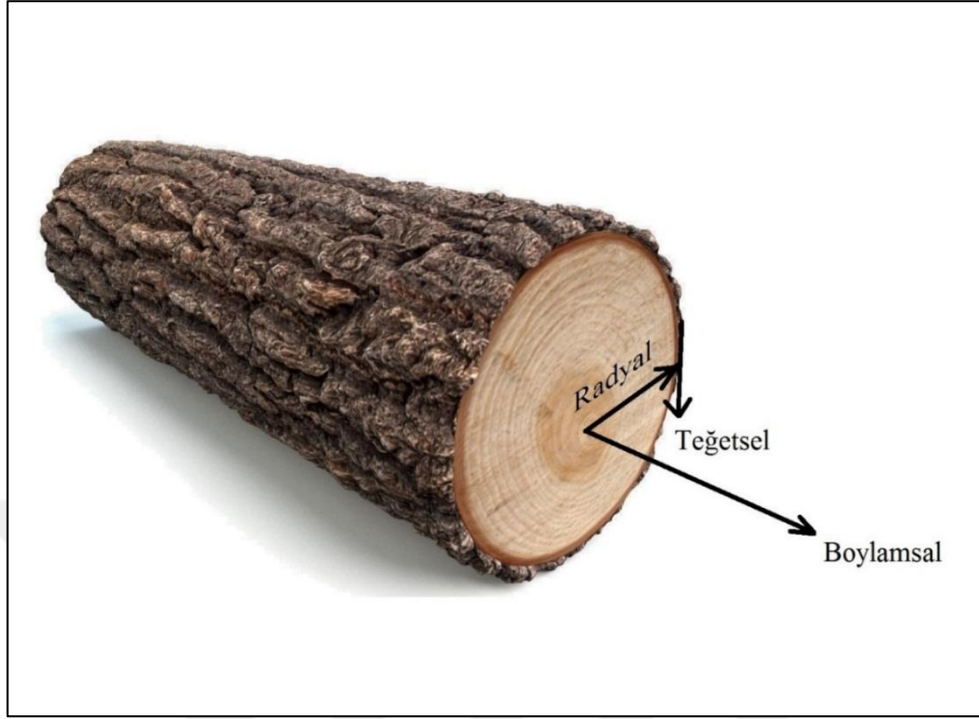
Anizotropik bir malzeme, herhangi yöndeki bir eksene bağlı olarak değişen malzeme özelliği göstermektedir. Farklı yönlerde analiz edildiğinde, malzeme özelliği değişmektedir. Teknik olarak ortotropik malzemeler, anizotropik ve izotropik arasında yer almaktadır.

2.2.4 Tahtanın Ortotropik Özelliği

Tahta, üç ortogonal simetrik düzlem ile tanımlanmakta olduğu için, ortotropik malzeme kabul edilmektedir. Bu üç eksen, liflere paralel olan boylamsal eksen, bu boylamsal eksene ve ağacın yaşını gösteren büyüme halkalarına dik olan yarıçapsal eksen ve yaş halkalarına teğet olan teğetsel eksenlerdir (Green, Winandy, & Kretschmann (1999)).

Ortotropik bir malzeme boylamsal bir etki altında kaldığında, teğetsel bir etkiye verdiği tepkiden farklı bir tepki vermektedir. Tahta, özel ortotropik bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Ortotropik malzemelerden farklı olarak, eksenleri, kartezyen koordinat sistemi yerine polar koordinat sistemine (silindirik) göre şekillenmektedir.

Şekil 2.3: Tahta Üzerinde Eksenler



Tahta üzerindeki her eksenin (boylamsal, teğetsel ve radyal) bağımsız ve kendine özgü mekanik özellikleri bulunmaktadır. Yaklaşık olarak, boylamsal eksen üzerindeki elastik modülün %5'i teğetsel eksen üzerindeki elastik modüle ve radyal eksen üzerindeki elastik modül ise boylamsal eksenin %10'una tekabül etmektedir. Diğer mekanik özellikler gibi her eksen üzerinde ses hızı da farklı olmaktadır. Morais, Xavier, Dourado & Lousada (2001) tarafından yapılan çalışmada, tahtanın ortotropik yönler göre mekanik davranışı analiz edilmiştir. Sahil Çamı olarak isimlendirilen “Pinus Pinaster” tahta tipinin gerilme mukavemeti üzerine çalışmalar içermektedir. Lineer sonlu eleman modeli ile stres-gerinim ölçümleri karşılaştırılmıştır.

Touze, Camier, Favraud & Thomas (2008) tahtada titreşimi ve öz-frekansı (“eigenfrequency”) etkileyen önemli bir faktör olarak da ağaç içerisinde oluşan kusurlar olarak gösterilmiştir. Von Karman yüksek bükülme teorisi kullanılarak dairesel plaka ve içi boş küresel kabuk şekilleri modellenerek, lineer olmamaları üzerine değinilmiştir.

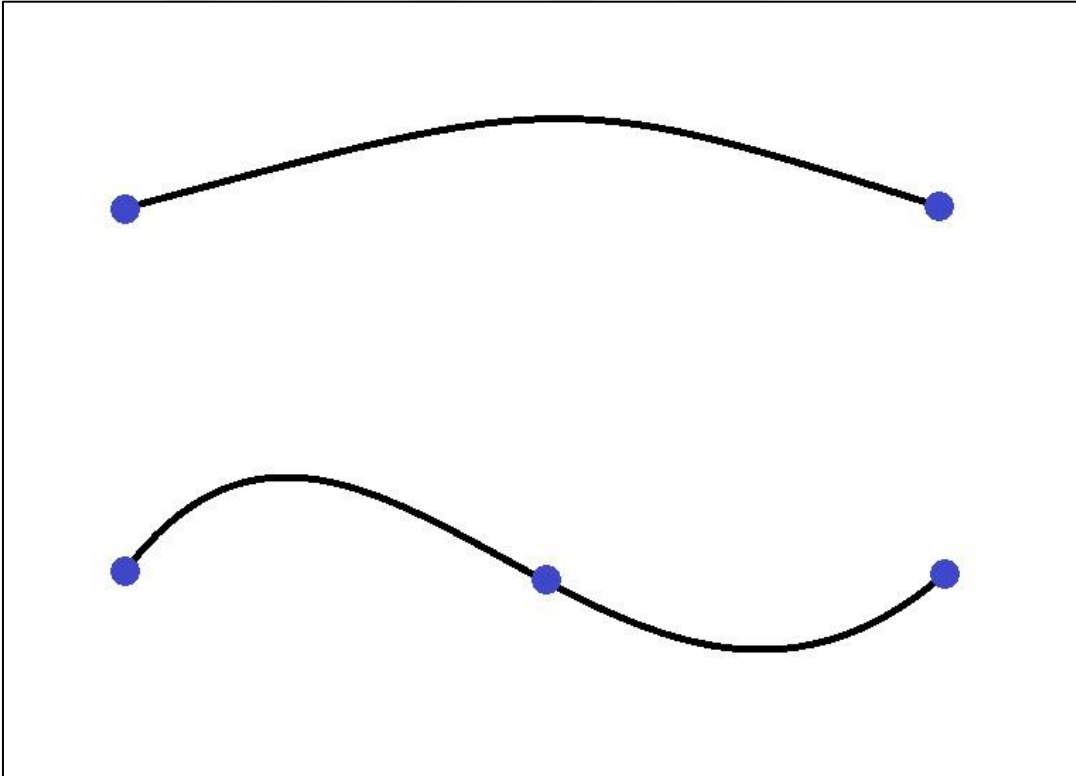
2.3 SONLU ELEMAN METODU

Sonlu eleman metodu kullanılarak, bir sistemi küçük ve ayrık elemanlara bölerek analiz etmek mümkün olmaktadır. Ayrık elemanlar karmaşık bir fiziksel sistem ya da geometriye sahip bir cismin analizini kolaylaştırmaktadır. Doğal frekans hesaplamada sonlu eleman metodu nümerik çözüm için kullanılmaktadır.

2.3.1 Nodlar

Nodlar, bir cismin, doğal frekansında titreşmesi ya da bir kuvvete veya etkiye maruz kaldığı durumlar baz alındığında, hareket etmeyen noktalarıdır. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi mavi noktalar, tel örneği gibi çizgisel bir yapı üzerinde oluşan nodları göstermektedir.

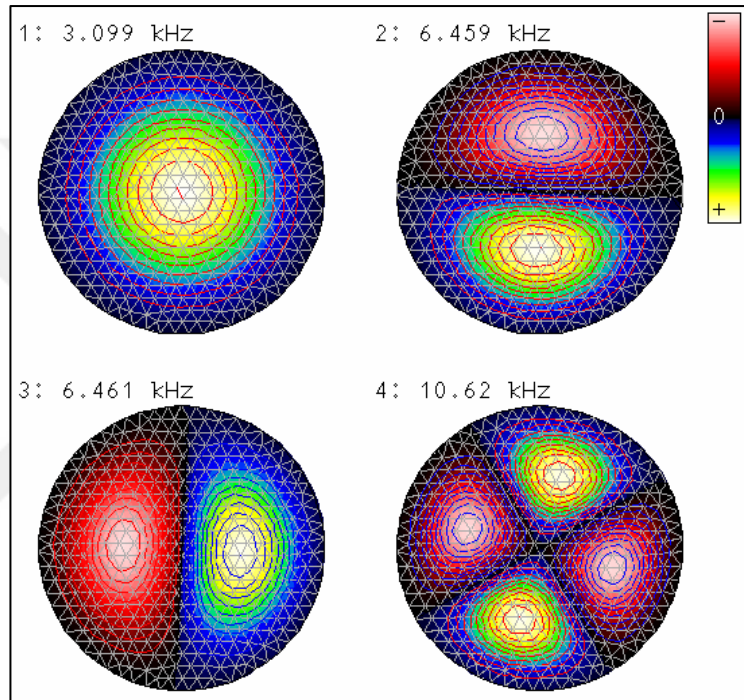
Şekil 2.4: Çizgisel bir cisim üzerinde oluşan nodlar



2.3.2 Mod Şekilleri

Bir cismin, doğal frekansına yakın bir frekansta dürtülmesi sonucu cismin üzerinde oluşan, ya da cismin aldığı şekillere “mod şekli” denilmektedir. Dairesel bir plakanın doğal frekansları ve bu doğal frekanslarda üzerinde oluşan mod şekilleri Şekil 2.5’te nümerik olarak gözükmemektedir (Funnel (2016)).

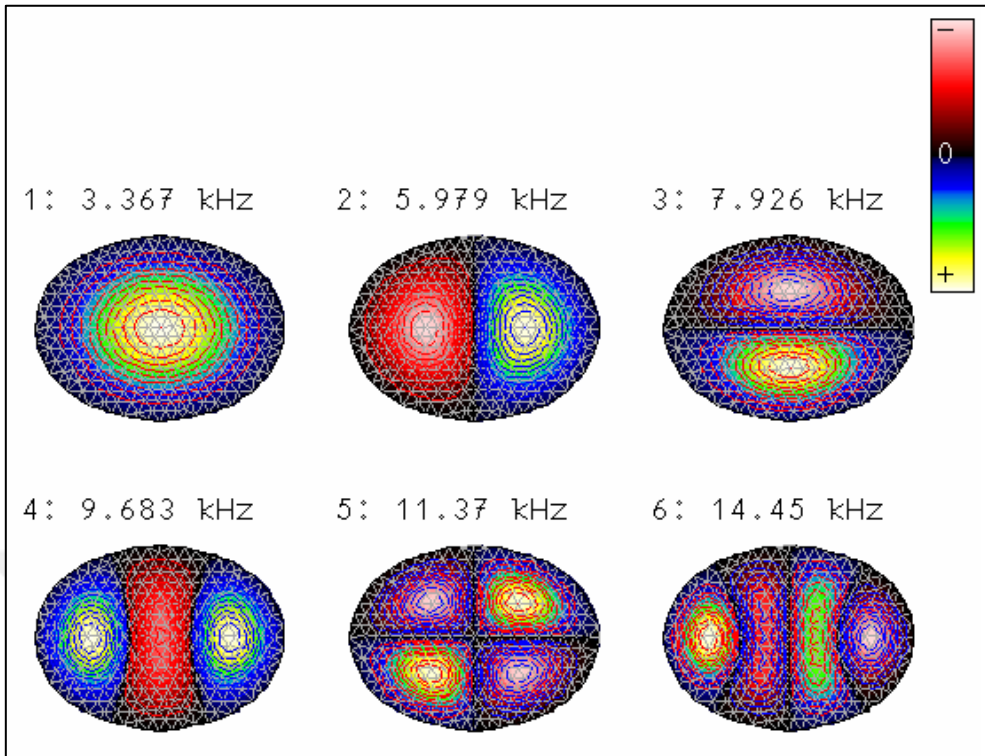
Şekil 2.5: Dairesel bir plakanın mod şekilleri



Kaynak: Funnel, R., Auditory Mechanics Laboratory. *Modelling middle-ear mechanics*. (2016).
[online] http://audilab.bmed.mcgill.ca/AudiLab/teach/me_mod/ [erişim 10 Şubat 2017]

Şekil 2.5’te kenarları kısıtlanmış daireysel bir plakanın mod şekilleri gösterilmektedir.

Şekil 2.6: Elips şeklinde bir plakanın rezonans mod şekilleri



Kaynak: Funnell, R., Auditory Mechanics Laboratory. *Modelling middle-ear mechanics*. (2016). [online] http://audilab.bmed.mcgill.ca/AudiLab/teach/me_mod/ [erişim 10 Şubat 2017]

Şekil 2.6’da kenarları kısıtılmış elips şeklinde bir plakanın mod şekilleri gösterilmektedir. Bu çalışmanın konusu olan bağlama gövdesinin ve kapağının şekli elips şekline daha çok benzemektedir.

3. VERİ VE YÖNTEM

3.1 NÜMERİK ANALİZ

3.1.1 Gitar Gövde Kapağının Geometrisinin Oluşturulması

Gitarda, tellerin bir ucunun üzerinde bulunduğu köprü üzerinde gitarı iki eşit ve simetrik parçaya bölen bir orijin noktası seçilerek, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi kapağın sınır kenarı 75 eşit parçaya bölünmüştür. Bütün noktaların orijine olan uzaklıkları, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi, x-ekseni ve y-ekseni olarak, kesişen dik açı eksenlerden oluşabilecek hata payı en az olması için iletke ve cetvel yardımı ile ölçülmüştür. Bu veriler MATLAB adlı programa yeni bir değişken olarak işlem yapılabilme üzere aktarılmıştır. Simetrisi alınarak, Şekil 3.3’te gösterildiği gibi son şekil oluşturulmuştur.

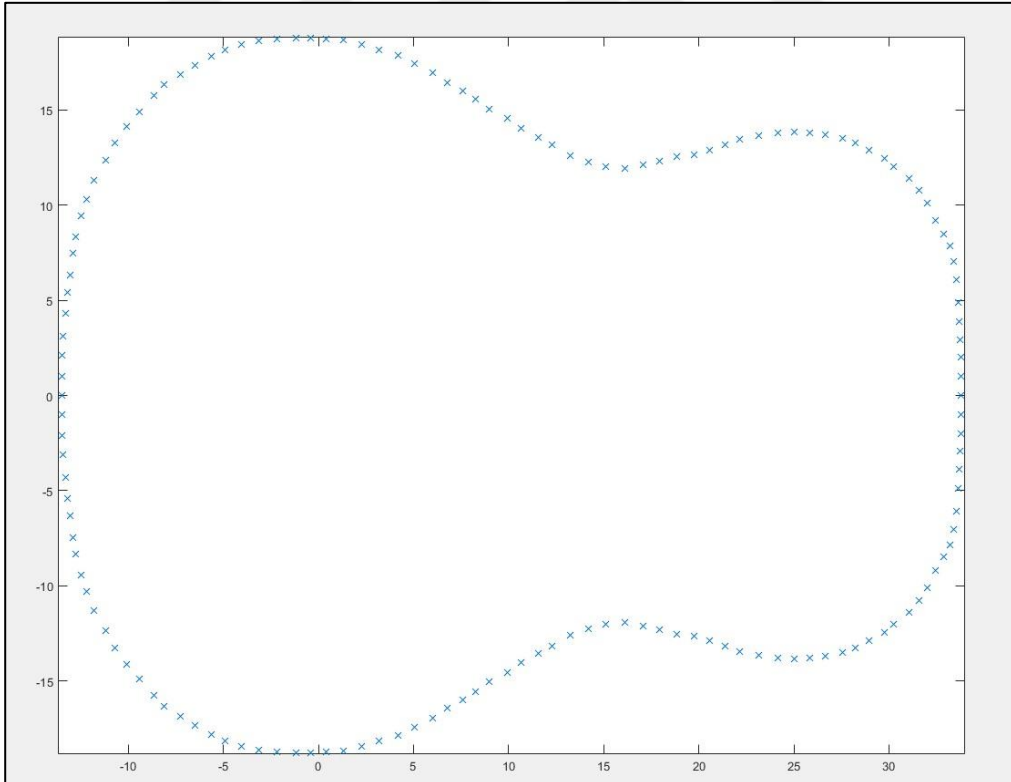
Şekil 3.1: Gitar gövde kapağının kenar mesafelerinin ölçümü



Şekil 3.2: Gitar gövde kapağının simetrik diğer yarısını eklemek için MATLAB'de hazırlanan kod

```
x(76)=33.8;  
y(76)=0;  
a=1;  
while a<=75  
    x(75+a+1)=x(75-a+1);  
    y(75+a+1)=-y(75-a+1);  
    a=a+1;  
end  
a=1;  
while a<=152  
    b(a)=1;  
    c(a)=a;  
    z(a)=0;  
    a=a+1;  
end  
x(152)=-13.5;  
y(152)=0;  
plot(x,y,'x')  
axis equal  
d=[b.' c.' x.' y.' z.'];
```

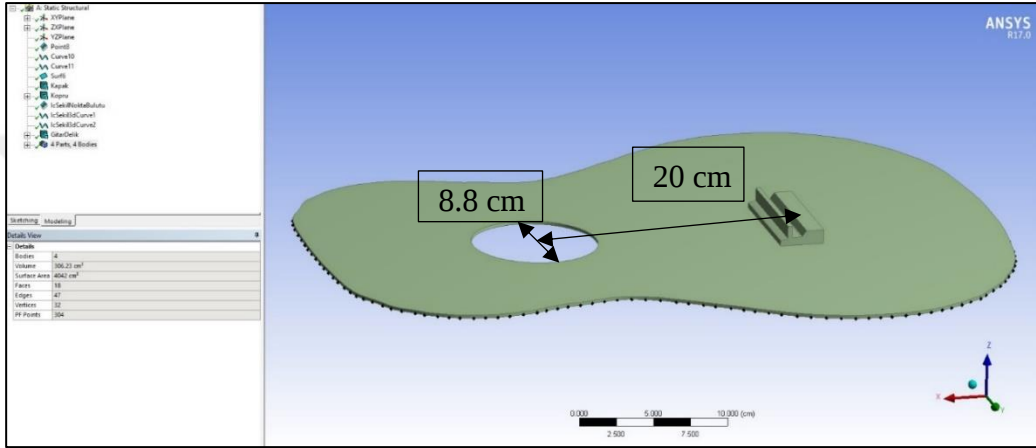
Şekil 3.3: MATLAB'de oluşturulan gitar kapağı nın (“cm”) grafiği



Bu değerler, ANSYS yazılımında, modal analiz seçilerek geometri kısmında, 3-B eğri formatında, koordinat verisini dosyadan alma işlemine uygun olarak aktarılabilir.

üzere “.txt” dosya uzantısına kaydedilmiştir. Noktalar ANSYS’e aktarılıp, 3-B eğriye, 3-B eğri yüzeye ve yüzey ise deneyde kullanılan gitar kapağının ortalama kalınlığı olan 2.2 mm kabul edilerek, “extrude” özelliği ile Şekil 3.4’de gösterildiği gibi hacim haline getirilmiştir. Deliğin çapı 8.8 cm, köprünün ortası ile deliğin orta noktasının uzaklığı 20 cm olarak, deneyde kullanılan gitardan (genel gitar ölçülerine uygun olarak) ölçülen değerler kullanılmıştır.

Şekil 3.4: ANSYS yazılımında, "geometri" kısmında oluşturulmuş gitar kapağı geometrisi



Mühendislik verileri olarak “Engineering Data” kısmında, ortotropik malzeme tanımlanarak, gitar gövde kapağı/ses tahtası yapımında kullanılan “Sitka Spruce” (Sıtka Ladini/Sazlı Ladin) ağacının mekanik özellikleri (Denklem 3.1 ve Tablo 3.1) girilmiştir.

$$\rho = 450 \text{ kg/m}^3 \quad (3.1)$$

Ex EL	Ey/Ex (ER/EL)	Ez/Ex (ET/EL)	Gxy/Ex (GLR/EL)	Gyz/Ex (GRT/EL)	Gxz/Ex (GLT/EL)	Vxy VLR	Vyz VRT	Vxz VLT
7920	0.078	0.043	0.064	0.003	0.061	0.44241	0.439 71	0.5242

analizlerinde kullanılan mekanik özellikler

**Tablo
3.1:
ANSYS**

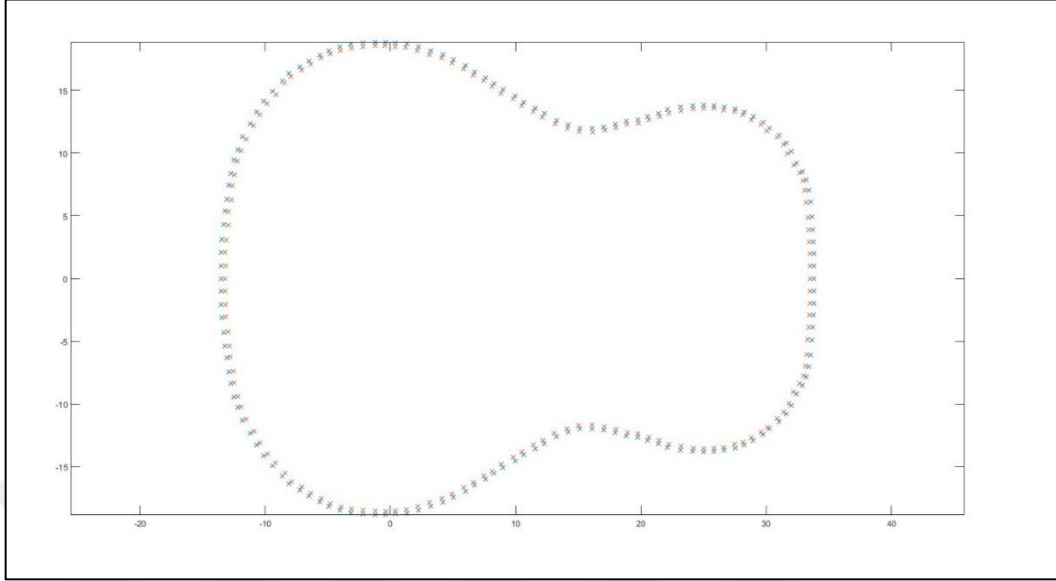
E_L değeri 9900 MPa, 9000 MPa, 8000 MPa ve 7000 MPa olarak değiştirilip diğer değerler Tablo 3.1'deki oranlardan hesaplanarak analiz yapıldıktan sonra, lineer interpolasyon yöntemi ile bulunan değere yakın olduğu görülen 7920 MPa deney sonuçlarına yakın sonuç vermiştir.

Geometri kısmında, gitarda, gövde üzerinde tellerin birleştiği bölge olan köprü bölgesi de modellenmiştir. Gitar gövde kapağının, literatürde geçen deneysel ve modelleme ile yapılan nümerik çalışmalar ile kıyaslanmak üzere, birkaç farklı şekilde modal analizi yapılmıştır. Farklı sınır koşulları ile çözümlemeler yapılmıştır. Modellemede, kapak kalınlığı olarak deneyde kullanılan gitardan ölçülen 2.2 mm kalınlık kabul edilmiştir. “Mesh” için eleman büyüklüğü olarak 0.003 m alınmıştır. Şekil 3.5'te gösterilen kod ile dik kısımda (Şekil 3.6'da gösterilen) sabit kalınlık sağlamak için nokta oluşumu sağlanmaktadır.

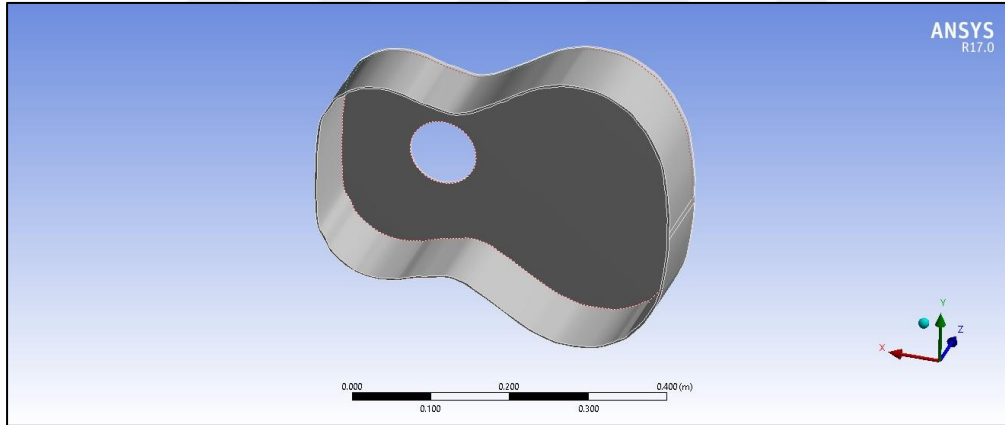
Şekil 3.5: Gitarın kapak kalınlığı doğrultusundaki dik kısmı için MATLAB'de yazılan kod

```
[theta,rho]=cart2pol(x,y);
rnx=rho.*cos(theta);
rny=rho.*sin(theta);
i=1;
while i<numel(rho)
    dsx(i)=rnx(i+1)-rnx(i);
    dsy(i)=rny(i+1)-rny(i);
    dsmagn(i)=sqrt((dsx(i))^2+(dsy(i))^2);
    i=i+1;
end
tx=dsx./dsmagn;
ty=dsy./dsmagn;
nx=-ty.*(dsmagn);
ny=tx.*(dsmagn);
rnx2=rnx(1:151)-nx*0.3;
rny2=rny(1:151)-ny*0.3;
rnx2(152)=-13.5+0.3;
rny2(152)=0;
```

Şekil 3.6: Gitarın kapak kalınlığı doğrultusundaki dik kısmı için oluşturulan noktalar



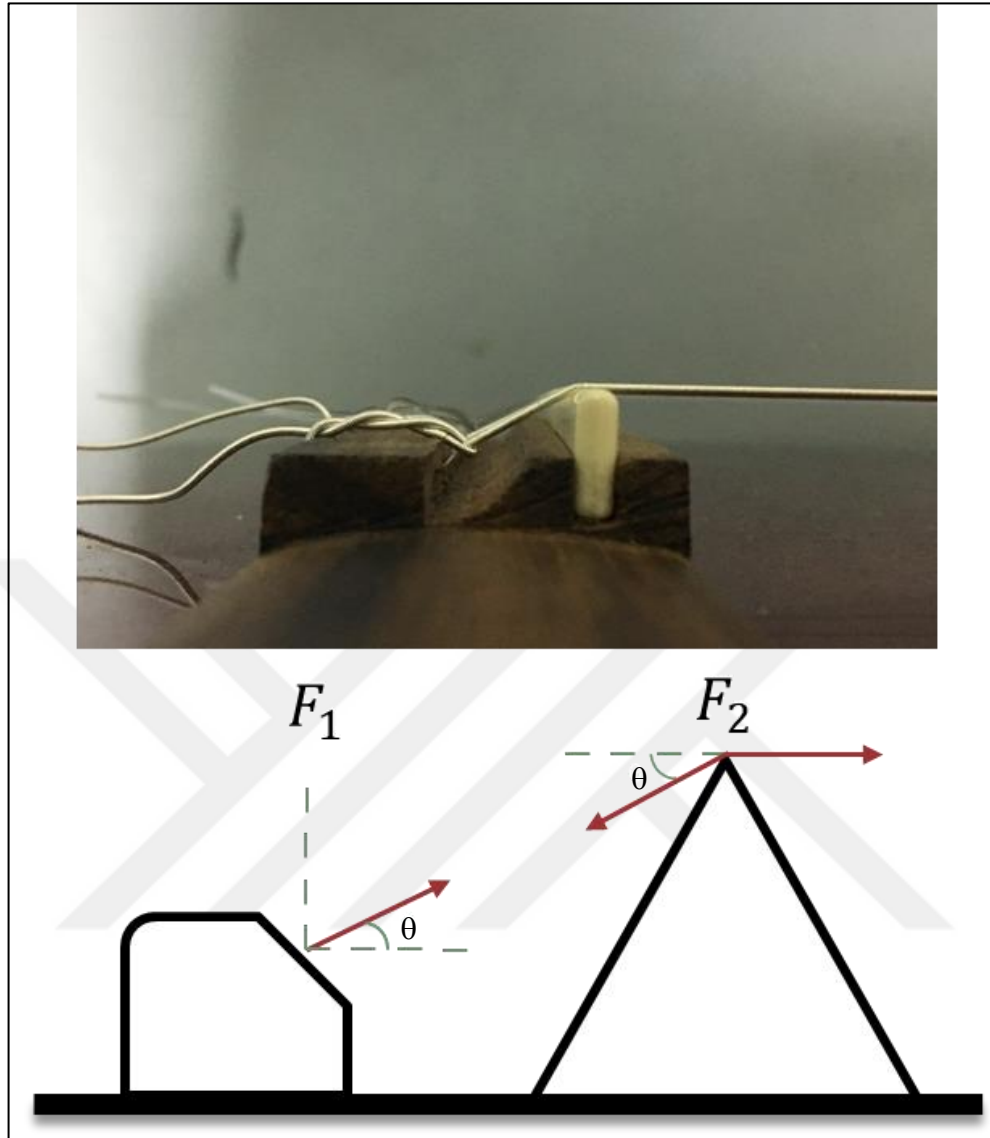
Şekil 3.7: Dik kısmı ile oluşturulan kapak geometrisi



Dik kısım modellenmesi yapılarak da farklı sınır koşullarında Şekil 3.7’de gösterildiği gibi dik kısmın (z-ekseni doğrultusunda) boştaki ucundan sabit olarak sınır koşulları ile farklı uzunluklarda modal analizler yapılmıştır.

Tellerin farklı açılarda (Şekil 3.8’de gösterildiği gibi) bağlandıklarında (10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80°) gövde kapağına uyguladıkları kuvvet SOLIDWORKS kullanılarak modellenerek, kapakta oluşan gerilim-gerinim ve deformasyon incelenmektedir.

Şekil 3.8: Gitar tellerinin gitarın gövde kapağı üzerine uyguladığı kuvvetler



Tablo 3.2: Gitar tellerinin (D'addario EJ47 Klasik Gitar Tel Seti) standart akortta (EADGBE) oluşturdıkları tansiyon (N)

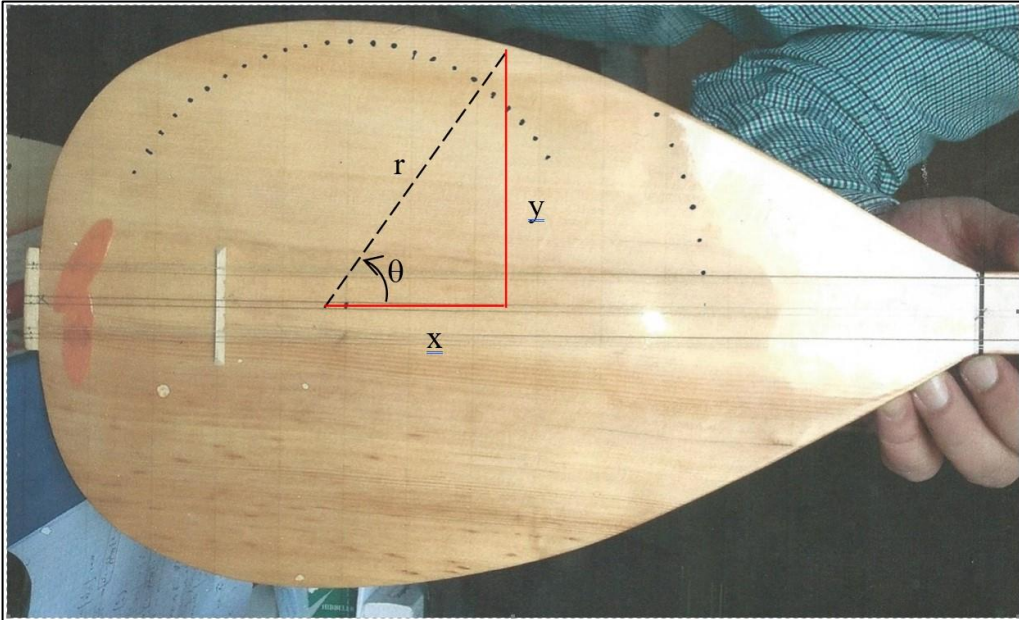
Tel	E	A	D	G	B	E	Toplam
Tansiyon (N)	59.03	61.875	65.344	52.845	53.423	72.195	≈360

3.1.2 Ansys Kullanılarak Yapılan Bağlama Kapak Çözümlemesi

3.1.3 Bağlama Kapağının Geometrisinin Oluşturulması

Bağlamanın kapağı karşıdan dik bir şekilde fotoğraflanmıştır, fotoğrafta bağlamanın üzerine denk gelen (şekil 3.10) bir orijin noktası belirlenmiştir. Fotoğraf üzerine iletke yardımı 5° aralıklar ile bütün sınır noktaları işaretlenmiştir ve bu işaretler üzerinden kenar ve orijin arasındaki mesafeler ölçölmüştür. şekil 3.10’da kullanılan bağlama, fotoğraf ve kenar koordinatlarının ölçüm tekniği gösterilmiştir.

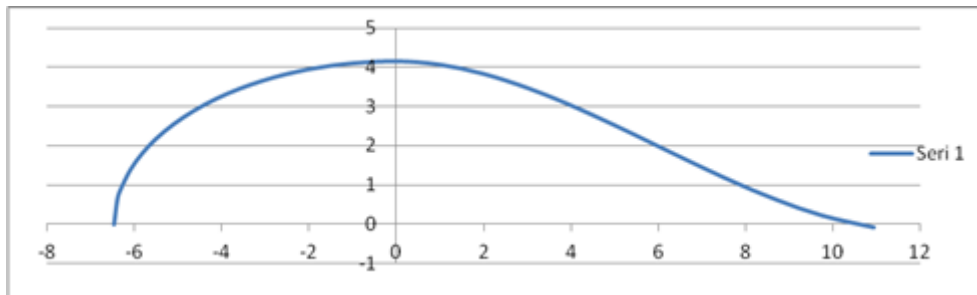
şekil 3.9: Kenar koordinatlarının hesaplanmasında kullanılan bağlamanın fotoğrafı



Elde edilen veriler (koordinatlar), gerçek uzunluk hesaplamalarının yapılması için MS Excel’e aktarılmıştır.

Tablo 3.3: Kağıt üzerindeki bağlama fotoğrafından ölçülen sınır koordinatları

theta	r	X	Y	theta	r	x	y
	13.35	13.35	0	95	5.65	-0.49243	5.6285
5	12.60	12.55205	1.098162	100	5.75	-0.99848	5.662645
10	11.1	10.93137	1.927495	105	5.75	-1.48821	5.554074
15	10.1	9.755851	2.614072	110	5.85	-2.00082	5.497202
20	9.25	8.692157	3.163686	115	6	-2.53571	5.437847
25	8.5	7.703616	3.592255	120	6.15	-3.075	5.326056
30	7.95	6.884902	3.975	125	6.25	-3.58485	5.1197
35	7.55	6.184598	4.330502	130	6.4	-4.11384	4.902684
40	7.1	5.438916	4.563792	135	6.55	-4.63155	4.631549
45	6.85	4.843681	4.843681	140	6.65	-5.0942	4.274538
50	6.55	4.210259	5.017591	145	6.7	-5.48832	3.842962
55	6.35	3.64221	5.201615	150	6.7	-5.80237	3.35
60	6.1	3.05	5.282755	155	6.7	-6.07226	2.831542
65	5.95	2.514579	5.392531	160	6.7	-6.29594	2.291535
70	5.85	2.000818	5.497202	165	6.6	-6.37511	1.708206
75	5.75	1.48821	5.554074	170	6.5	-6.40125	1.128713
80	5.7	0.989795	5.613404	175	6.5	-6.47527	0.566512
85	5.7	0.496788	5.67831	180	6.45	-6.45	7.9E-16
90	5.65	3.46E-16	5.65				

Şekil 3.10: Bağlama ses tahtasının ölçülen değerlerinin grafiği (x, y)

Şekil 3.11’de Tablo 3.3’de gösterilen ölçülmüş değerlerin grafiği çizilmiştir. Denklem 3.2, 3.3 ve 3.4’de gösterilen trigonometrik denklemler kullanılarak “x” ve “y” değerleri hesaplanmıştır.

$$x = r * \cos(\theta), y = r * \sin(\theta) \quad (3.2)$$

Uygun bir polinom fonksiyonu, ölçülmüş değerlere uygulanmıştır. Denklem 3.1’de gözüktüğü gibi, üçüncü dereceden tek bilinmeyenli bir denklem kullanılmıştır.

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (3.3)$$

“a”, “b”, “c” ve “d” Excel üzerinde uygulanan bir optimizasyon çalışmasından sonra, ölçülmüş verilere en çok uyan değerleri bulmak için hesaplanmıştır.

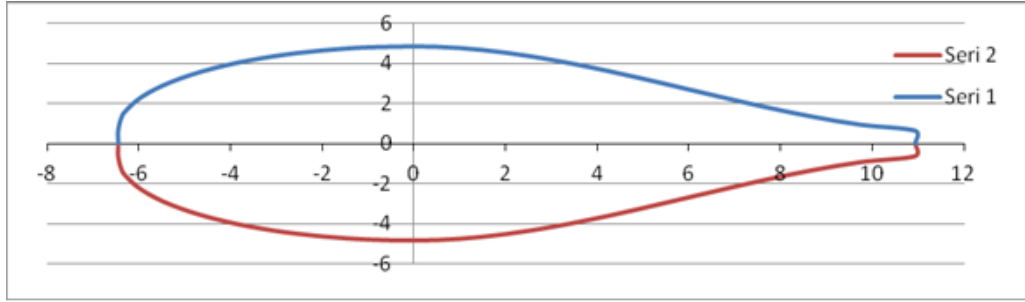
$$a = 5 * 10^{-3}, b = -9 * 10^{-2}, c = -2.7 * 10^{-12}, d = 4.15 \quad (3.4)$$

Tablo 3.4: Excel’de yapılan optimizasyon ile hesaplanan yeni değerler

X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
10.93137	0	-0.49243	4.829858	-6.45	-0.70228	0.989795	-4.76896
10.93137	0.628955	-0.99848	4.802252	-6.37511	-1.33284	1.48821	-4.66943
9.755851	0.929027	-1.48821	4.740303	-6.29594	-1.60389	2.000818	-4.53203
8.692157	1.336074	-2.00082	4.647559	-6.07226	-2.10163	2.514579	-4.3627
7.703616	1.797048	-2.53571	4.518127	-5.80237	-2.51471	3.05	-4.15684
6.884902	2.217896	-3.075	4.350303	-5.48832	-2.88238	3.64221	-3.89995
6.184598	2.592627	-3.58485	4.152265	-5.0942	-3.24775	4.210259	-3.63008
5.438916	2.994381	-4.11384	3.898601	-4.63155	-3.59056	4.843681	-3.30896
4.843681	3.30896	-4.63155	3.590559	-4.11384	-3.8986	5.438916	-2.99438
4.210259	3.630075	-5.0942	3.247753	-3.58485	-4.15227	6.184598	-2.59263
3.64221	3.899948	-5.48832	2.882374	-3.075	-4.3503	6.884902	-2.2179
3.05	4.156917	-5.80237	2.514711	-2.53571	-4.51813	7.703616	-1.79705
2.514579	4.362699	-6.07226	2.101624	-2.00082	-4.64756	8.692157	-1.33608
2.000818	4.532033	-6.29594	1.603888	-1.48821	-4.7403	9.755851	-0.92903
1.48821	4.66943	-6.37511	1.332843	-0.99848	-4.80225	10.93137	-0.62896
0.989795	4.768955	-6.45	0.702279	-0.49243	-4.84017	10.93137	0
0.496788	4.83068	-6.45	0	3.46E-16	-4.85228		
3.46E-16	4.852279	-6.45	0	0.496788	-4.83068		

Bu optimizasyon, bağlamanın şekli Şekil 3.10’daki eğrinin şekline benzetildiğinden, ölçüm hatalarını en aza indirmek için yapılmıştır. Tablo 3.4’de hesaplanan yeni değerler, klavyenin gövde ile birleştiği yerdeki düz kısmı da eklemek için biraz yukarı (+y yönünde) kaydırılarak ve oluşan bütün şeklin x-ekseni etrafında alınan simetrisi ile birleştirilerek oluşturulmuştur.

Şekil 3.11: Optimizasyon sonrası oluşturulan bağlamanın ses tahtasının şekli



Bu değerler MATLAB kullanılarak bir değişkene aktarılmış ve bağlamanın gerçek boyutları ile oranlanarak, kağıttan ölçülen boyutlar, gerçekteki boyutlara esnetilmiştir. Bu değerler, ANSYS programı üzerinde geometri oluşturma formatına uygun olarak “.txt” dosyasına dönüştürülmüştür.

3.1.4 Ansys Kullanılarak Yapılan Bağlama Kapak Çözümlemesi

ANSYS yazılımının Modal Analiz seçeneği kullanılmak üzere seçilerek, bağlama ses tahtası yapımında kullanılan Ak Ladin’in (“white spruce-picea glauca”) mekanik özellikleri lineer elastik, ortotropik malzeme özelliği seçilerek girilmiştir. Bu özellikler Denklem 3.5, 3.6, 3.7, 3.8’de gösterilmektedir. Boylamsal (Longitudinal) (L) - X-ekseni, Radyal (R) – Y-ekseni, Teğetsel (T) – Z-ekseni benzerliği kabul edilmiştir. Kalınlık olarak 4 ile 5 mm arası değişen bağlama kapak kalınlığı göz önünde bulundurularak, kapak 4.5 mm kalınlıkta olarak modellenmiştir.

$$\rho = 480 \text{ kg/m}^3 \quad (3.5)$$

$$E_{L(X)} = 13 \text{ GPa}, E_{R(Y)} = E_{T(Z)} = 1.2 \text{ GPa} \quad (3.6)$$

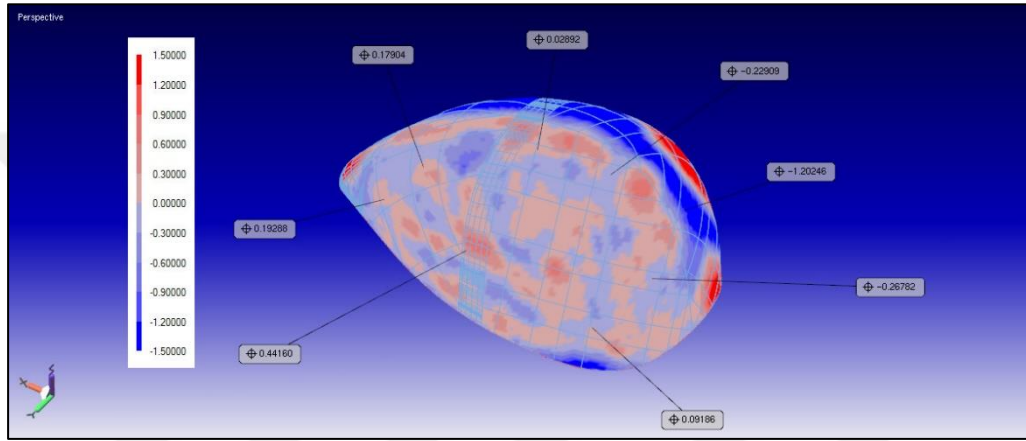
$$G_{LT(XY)} \approx G_{LR(XZ)} = 740 \text{ MPa}, G_{RT(XZ)} = 45 \text{ MPa} \quad (3.7)$$

$$\nu_{LR(XY)} = 0.382, \nu_{RT(YZ)} = 0.328, \nu_{LT(XZ)} = 0.292 \quad (3.8)$$

Geometri kısmına girilerek, MATLAB'den “.txt” dosyası olarak alınan koordinatlar, XY-düzlemi üzerine, yapım şekli göz önünde bulundurularak yerleştirilmiştir. Bu noktalar, 3-B bir eğriye dönüştürülüp, bu eğri yüzeye, yüzeyden de kalınlık verilerek hacme dönüştürülmüştür. Modal analiz için gerekli olan kenar/sınır koşulları girilerek, ilk altı rezonans modu için çözümleme yapılmıştır.

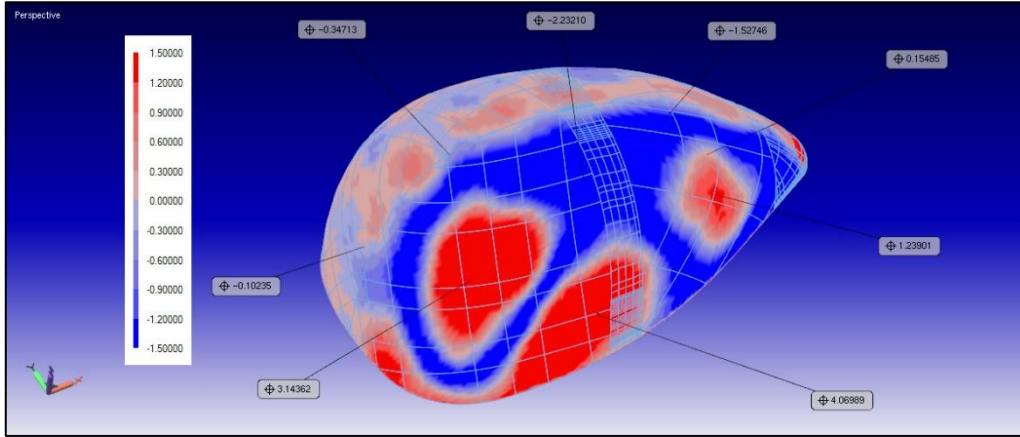
3.1.5 Bağlama Gövdesinin Geometrisinin Oluşturulması

Şekil 3.12: Modellenen ile taranan bağlama gövdesi arasındaki hata payı



Bağlama gövdesinin, bilgisayar ortamına aktarılabilmesi için tersine mühendislik metodu kullanılmıştır. Bağlama gövdesi, 3-B tarayıcı ile ölçümlendirilerek elde edilen nokta bulutu verileri referans alınarak, 3-B modellemesi yapılmıştır. Bu işlemde bağlama gövdesindeki kusurlar ve deformasyonlar göz ardı edilerek ve bağlama gövdesinin eksenel simetrik olduğu varsayıp tek tarafı referans alınarak CAD model oluşturulmuştur. Şekil 3.13'te görülen taraf referans alınarak yüzey modellemesi yapılmıştır ve bağlamanın sabit et kalınlığı (5 mm) olduğu varsayılmıştır. Şekil 3.12'de gösterilen taraf, 3-B taramadan gelen veriler yerine, referans alınan tarafın simetriği alınarak oluşturulmuştur. Bu şekillerde nokta bulutu ve analizde kullanılan katı model arasındaki hata miktarları gösterilmektedir.

Şekil 3.13: Ters açıdan, modellenen ile taranan bağlama gövdesi arasındaki hata payı

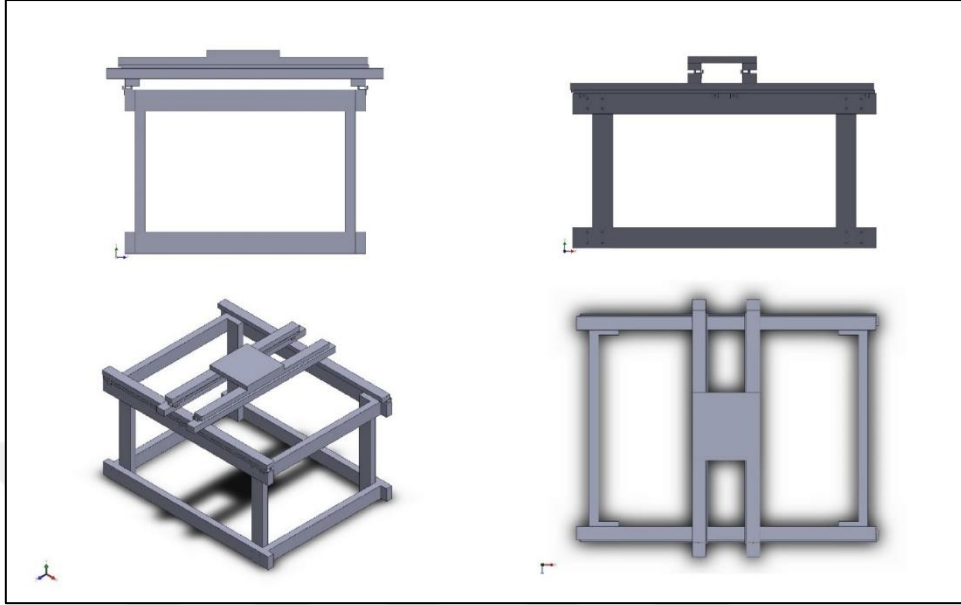


Bu model “.igs” ve “.stp” dosya uzantısı ile kaydedilerek ANSYS üzerinde geometri kısmına yüklenmiştir. Ortotropik malzeme özellikleri seçilip, kapakta da olduğu gibi, eksenler gövdenin yapımında ağaç üzerinde uygulanan biçimlendirme yönlerine göre dikkat edilerek yerleştirilmiştir. Modal analiz kısmında gerekli sınır koşulları verilerek analiz yapılmıştır.

3.2 DENEYSEL METOT

Deneysel metot için ZICK deplasman lazeri kullanılmak üzere bu lazeri gitar kapağı üzerinde iki eksenle serbestçe gezdirebilmek için bir düzenek hazırlanmıştır. Bu düzeneğin iskelet yapısı önce SOLIDWORKS kullanılarak Şekil 3.14’te gösterildiği gibi çizilmiştir.

Şekil 3.14: Mesafe ölçüm lazeri için dizayn edilen platformun ana iskeleti; (a) yan, (b) ön, (c) izometrik, (d) üst



Şekil 3.8’de z-ekseni mavi, x-ekseni kırmızı ve y-ekseni yeşil renk ile çizimlerin sol alt kısmında gösterilmiştir. 886 mm boyundaki 60 mm * 20 mm ön bakışta gözüken yatay tahtalar, 6 mm çaplı matkap ucu ile önden bakışta gözüken yerlerden delinmiştir. Havşa başlı cıvatalar kullanıldığı için, havşa baş açan matkap ucu ile havşa başın denk geldiği bütün deliklere, havşa açılmıştır. Z-eksenine paralel olan dört parça, X-Y düzlemini gören yüzeylerinden, önden bakışta yatay parçaların deliklerine (iç kısımlara) hizalanabilecek şekilde 10 mm boyunda, 8 mm çap ile delinmiştir. Çekmeler, uygun alyen kullanılarak bu deliklere yerleştirilip, gömülecek şekilde sıkıştırılmıştır. Bu tahtalar alt ve üst iskeleti oluşturacak şekilde M6*30’luk cıvatalar ile önce X-eksenine paralel olan ve

Şekil 3.15: (a) Havşa matkap ucu, (b) havşa baş civata, (c) matkap



Şekil 3.16: (a) Masafe ayarlı matkap ucu , (b) çekme, (c) çekme işaretleyici, (d) alyen



6 mm olan deliklerden geçerek, Z-eksenine paralel olan ve ucunda çekmeler olan tahtalar, birbirlerine sıkıştırılarak birleştirilmiştir. Y-eksenine paralel olan dikmeler, sütun olarak kullanılan tahtalar üzerinde yine X-eksenine paralel olan tahtalar üzerindeki iç kısımda kalan deliklere hizalanarak, 8 mm çap ile delinerek, deliklere çekmeler sıkıştırılmıştır. X-Z düzlemindeki çerçeveler, sırasıyla önce ilki sonra ikincisi olarak, dikmelerdeki çekmelere M6*30 civatalar ile birleştirilip ana iskelet oluşturulmuştur. X-

eksenine paralel olan ve üstte kalan iki 886 mm uzunluğundaki tahtaya, ikişer eş ray M6*20 somun cıvata ile sabitlenmiştir.

Üst platform oluşturulmasına, 200*200*20 mm boyutlarında kare bir parça, köşelere eşit uzaklıkta dört yerinden 8 mm çap ile delinerek, çekmeler yerleştirilmiş ve sıkılmıştır. Çekmeler yerleştirilip, içlerine Şekil 3.16 (c)'de gösterilen çekmelere has işaretleyici parçalar yerleştirilip bantlarla sabitlenmiştir. İki adet 685*28*40 ebatlarında 40'lık yüzey üstte kalacak şekilde, ortası hesaplanarak, 200*200*20 olan kare parça, çekme işaretleyiciler altta kalıp 40'lık yüzeye bakacak ve işaretleyecek şekilde bastırılmıştır. İşaretlenen 685*28*40 tahtalar 6 mm çap ile işaretli dört yerden delinip ters yüzeyden havşa açılmıştır. 685*28*40 tahtalar 200*200*20 ile işaretli yerlerden M6*30 cıvata ile birleştirilmiştir. 760*40*28 iki tahta daha raylar ile M6*20 somun cıvata ile birleştirilmiştir. Bu raylar uçlara açılarak, 200*200*20 parçanın altındaki 685*28*40 tahtalara paralel, altlarına gelecek şekilde M3.5*16 vidalarla vidalanmıştır. 760*40*28

Şekil 3.17: (a) 30*28 tahta, (b) 40*20 tahta, (c) 40*28 tahta, (d) 200*20 tahta, (e) raylar, (f) M3.5*10 vidalar



tahtaların uç kısımlarına 40 olan yüzeye alt taraftan 8 mm çap delinerek, çekmeler yerleştirilmiştir. 885*20*40 iki tahta daha, 760*40*28 tahtaların uç kısımlarındaki çekmelere işaretleyici yerleştirilip bantlanarak, orta kısımlarına hizalanıp bastırılarak delinecek yerler işaretlenmiştir ve 885*20*40 ile 760*40*28 tahtalar M6*30 cıvatalar ile birbirlerine birleştirilmiştir. 885*20*40 tahtalar ve üst kısmın düzeneği, ana iskelet üstünde kalan raylar sırasıyla iki uçtan açılarak M3.5*16 vidalar ile sabitlenmiştir.

Şekil 3.18: (a) Mekanik fare, (b) pinyon, (c) ray, (d) farklı boylarda teyp lastikleri



Mekanik fare düzeneğin üst kısmında, köşeye hareket etmeyecek şekilde sabitlenmiştir. Farenin üstü açılmış ve tekerin iki ekseninde de dönmesini sağlayan silindirler, iki eş pinyona, teyp lastikleri ile tutturulmuş ve ray ile temas halinde olup, rayların doğrusal hareketini dairesel olarak mekanik fareye dönme hareketi olarak iletmektedir. İki ekseninden de hareketi alıp, bilgisayara, fare imleci hareketi olarak aktarılmaktadır. Mekanik fareye aktarılan hareket ile ileriki çalışmalarda lazerin konumu takip edilebilecektir.

Şekil 3.19: MATLAB üzerinden ses çıkışı ile frekans taraması yapan kod

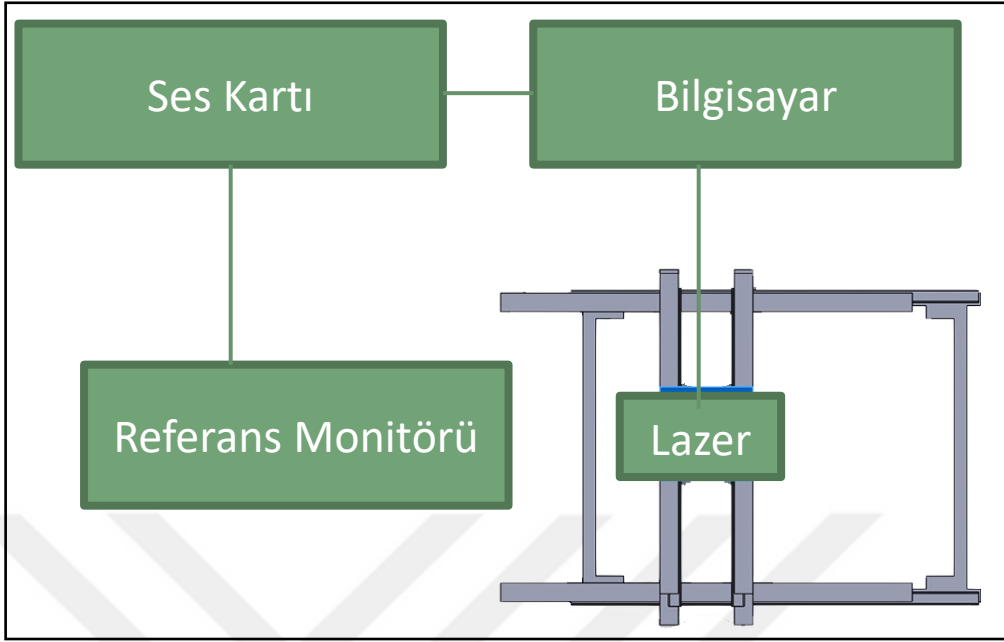
```
fs = 44100;
t_sweep = 0:1/fs:240;
f0 = 40;
f3 = 280;
y = chirp(t_sweep,f0,max(t_sweep),f3);

t_incline=0.1;
c=1;
b=numel(y);
while c<=(t_incline*fs)
    y(c)=0+(c/(t_incline*fs))*y(c);
    y(b-t_incline*fs+c)=y(b-t_incline*fs+c)
        -(c/(t_incline*fs))*y(b-t_incline*fs+c);
    c=c+1;
end

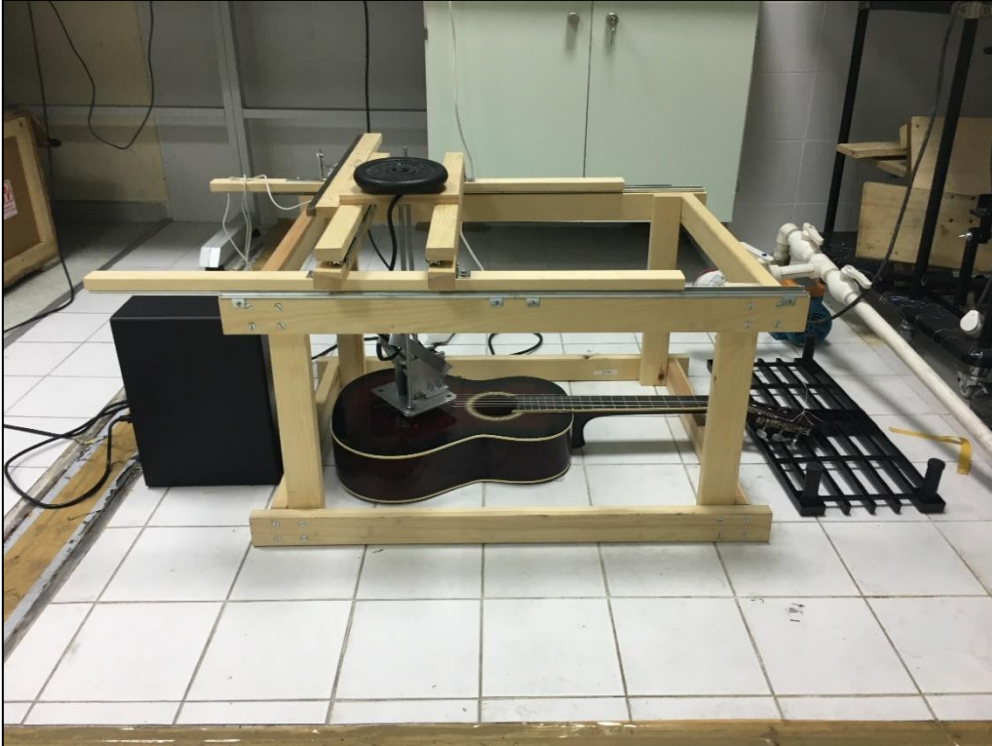
sound(y,fs,16), timestamp=clock;
```

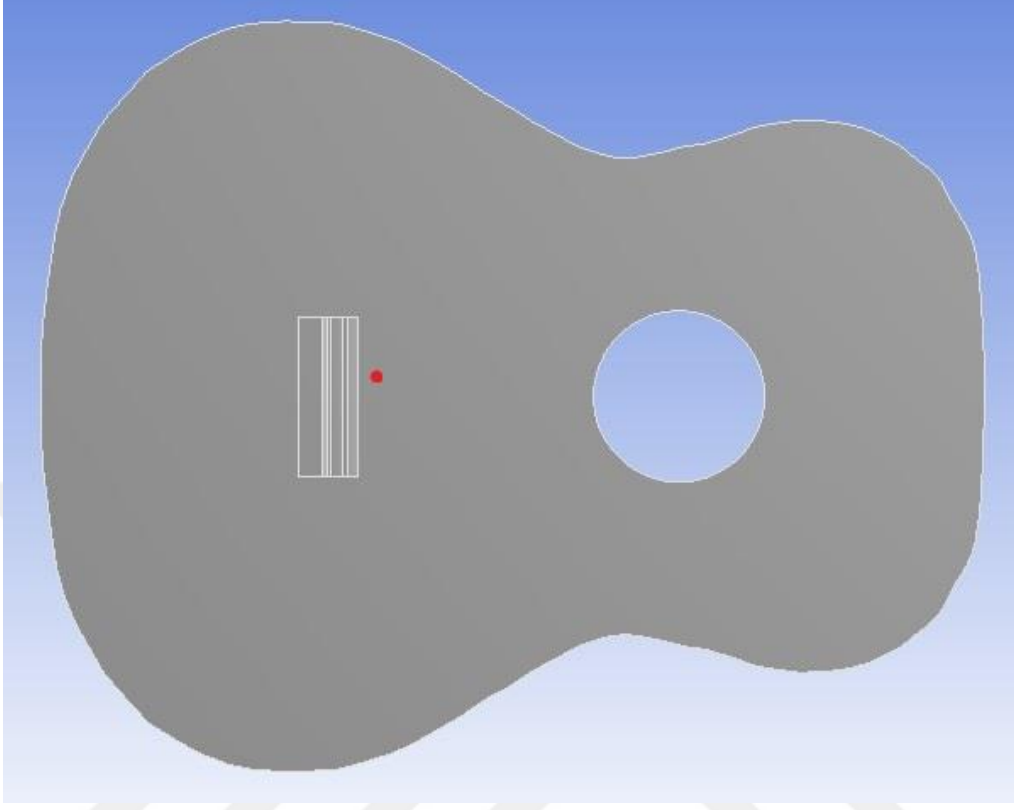
Şekil 3.20’de gösterilen kod, 40-280 Hz frekans aralığını yalın bir sinüs tonu olarak, 240 saniyede lineer bir şekilde tarayarak, ses başlangıç anında yıl-ay-gün-saat-dakika-saniye şeklinde milisaniye hassasiyetinde zaman damgası atmaktadır. Lazerin yazılımı da aynı şekilde her verinin zaman damgasını atmaktadır. Aynı bilgisayardan başlatılan bu iki işlem, zaman damgaları kullanılarak eşlenmiştir ve frekans başlangıcı ile bitiş yerleri lazer verisi ile eşleştirilmiştir. Yapılan deneyler, kronometre ve akort cihazı ile de takip edilmiştir. Deneyde lazerin hedeflenmesinde, ANSYS üzerinden yapılan nümerik analizlerin sonuçlarında gözlemlenen mod şekilleri esas alınmıştır. Deney sürecinde lazerin hedeflediği yer işaretlenerek, mümkün olduğunca aynı tutulmaya çalışılmıştır. Kullanılan hoparlörün (sesi etkilememesi açısından SAMSON Resolv A6 referans monitörü kullanılmıştır) fazla ısınmamasına dikkat edilmiştir. Ek gürültülere engel olmak için ses başlangıcı 100 milisaniyede artarak başlamakta ve sonu da aynı şekilde 100 milisaniyede azalarak bitmektedir (Şekil 3.20).

Şekil 3.20: Deney düzeneğinin illüstrasyonu



Şekil 3.21: Deney düzeneğinin fotoğrafı





Şekil 3.22: Üstten bakarak deneylerde kapak üzerinde lazerin hedeflendiği yer

Lazer mesafe ölçüm cihazından alınan verinin işlenmesi için ilk olarak, peş peşe aynı olan değerlerin ilkinin tutulup devamının temizlenmesi için EXCEL üzerinde bir makro yazılmıştır.

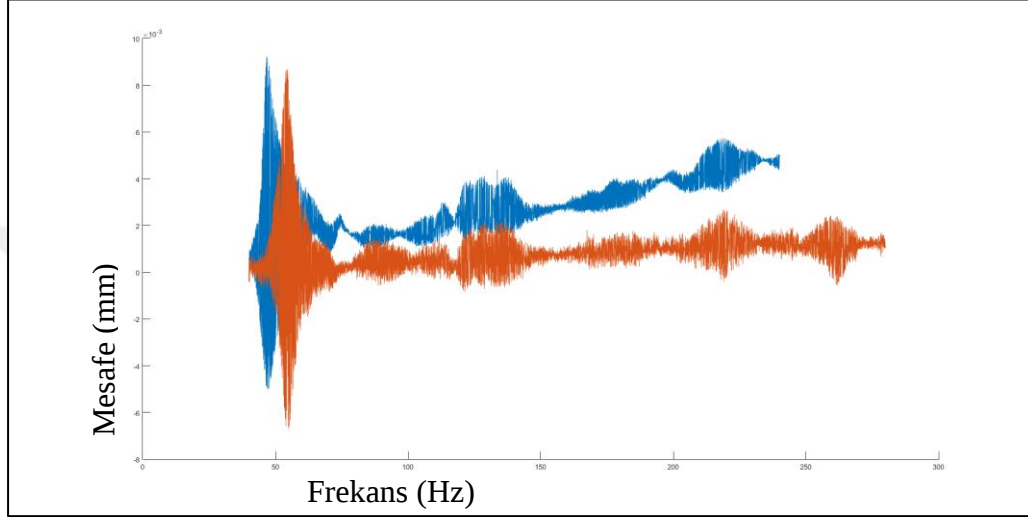
Şekil 3.23: Lazer verilerinin temizlenmesi için yazılan makro

```
Sub cleanup()  
  Dim thisSh As Worksheet, ismore As Boolean  
  Set thisSh = Worksheets("Cleanup")  
  With thisSh  
    ismore = True  
    cnt = 2  
    currF = .Cells(cnt, 2)  
    While ismore  
      If .Cells(cnt + 1, 1) = 24 Then  
        DoEvents  
      End If  
      nextF = .Cells(cnt + 1, 2)  
      If nextF = "" Then  
        ismore = False  
      Else  
        If nextF = currF Then  
          .Rows(CStr(cnt + 1) + ":" + CStr(cnt + 1)).Delete Shift:=xlUp  
        Else  
          cnt = cnt + 1  
          currF = .Cells(cnt, 2)  
        End If  
        DoEvents  
      End If  
    Wend  
  End With  
End Sub
```

4. BULGULAR

4.1 GİTAR GÖVDE KAPAĞI BULGULARI

Şekil 4.1: Gitar kapağının (ses tahtasının) telsiz (mavi) ve telli (turuncu) deney sonuçları



Tablo 4.1: Deney ve ANSYS bulguları

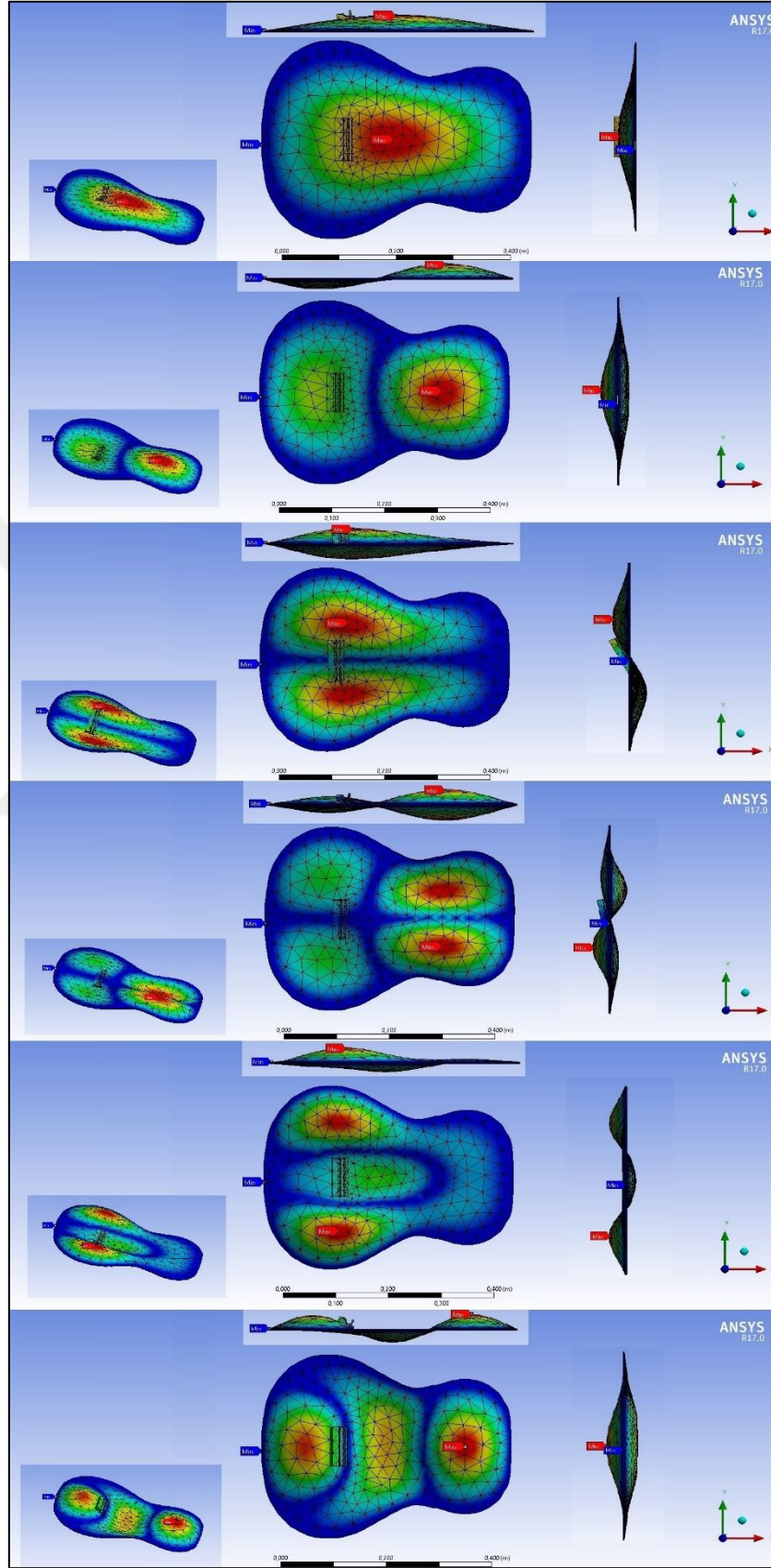
Rezonans Modu (#)	1	2	3	4	5	6
Ansys	46.69	89.971	93.742	141.15	166.68	175.86
Deney	46.7	88.05	106.9	133.6	177	218.3

Tablo 4.2: Farklı E_L değerlerine oranla değişen mekanik özelliklere göre ilk doğal frekanslar

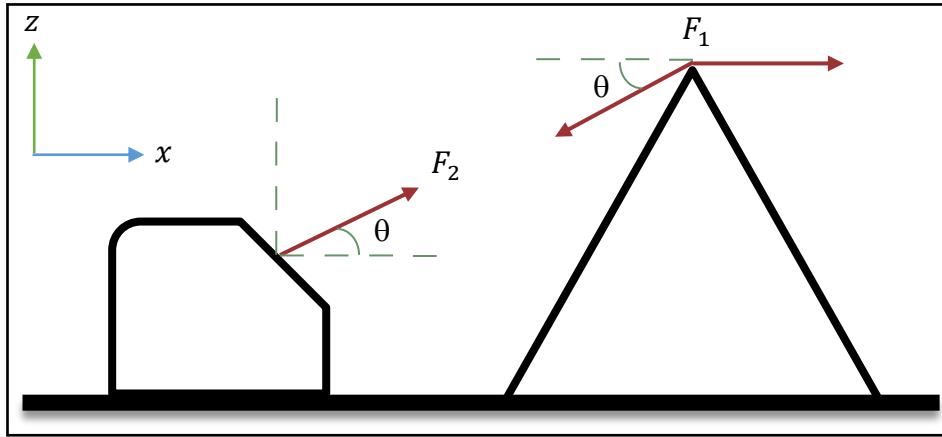
E_L (MPa)	9900	9000	8000	7000
1. Doğal Frekans (Hz)	52	49.77	46.93	43.894

Şekil 4.2: Gitar gövde kapağının ANSYS analizi rezonans mod şekilleri;

(a) mod 1, (b) mod 2, (c) mod3, (d) mod 4, (e) mod 5, (f) mod 6



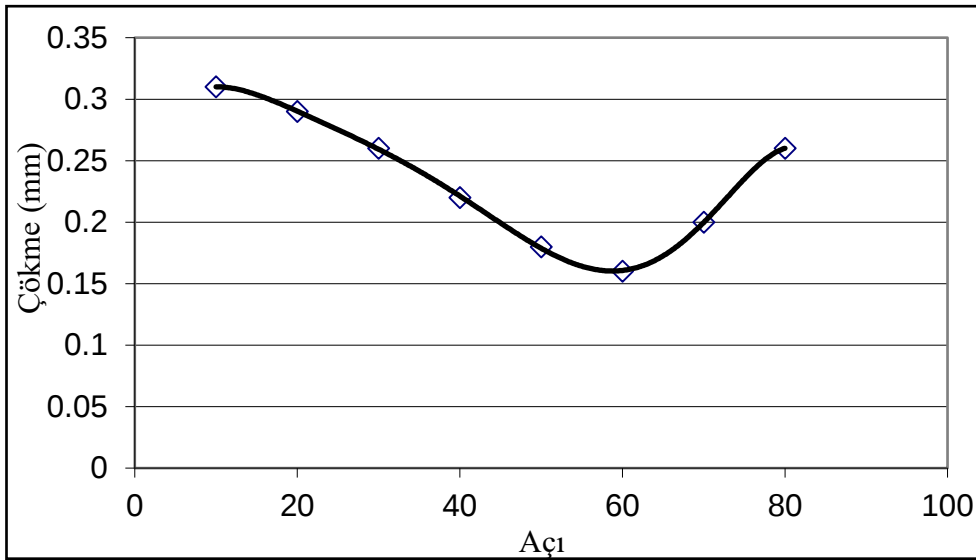
Şekil 4.3: Gitar tellerinin gitarın gövde kapağı üzerine uyguladığı kuvvetler



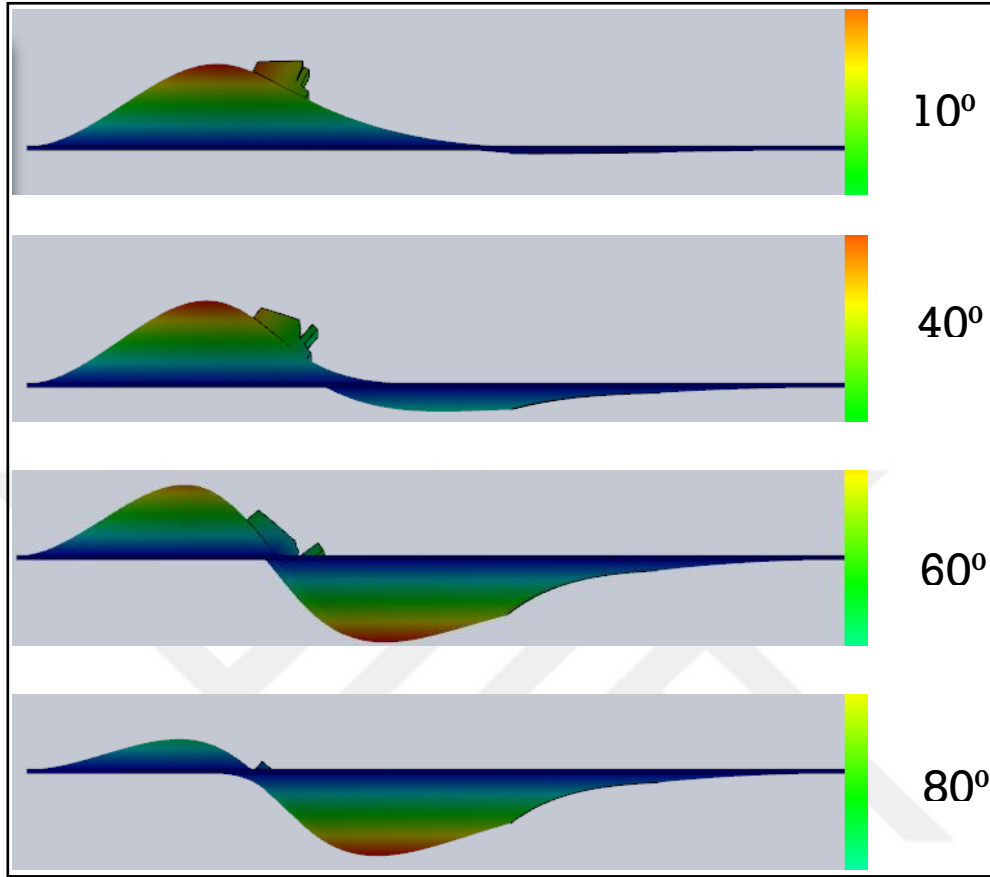
Tablo 4.3: Farklı açılarda tellerin yaptığı çökertme etkisinin nümerik sonuçları (maksimum çökme)

Theta (θ)	F_{1x} (N)	F_{1z} (N)	Çökme (mm)	F_{2x} (N)	F_{2z} (N)
10	5	-63	0.31	355	63
20	22	-123	0.29	338	123
30	48	-180	0.26	312	180
40	84	-231	0.22	276	231
50	129	-276	0.18	231	276
60	180	-312	0.16	180	312
70	237	-338	0.2	123	338
80	297	-355	0.26	63	355

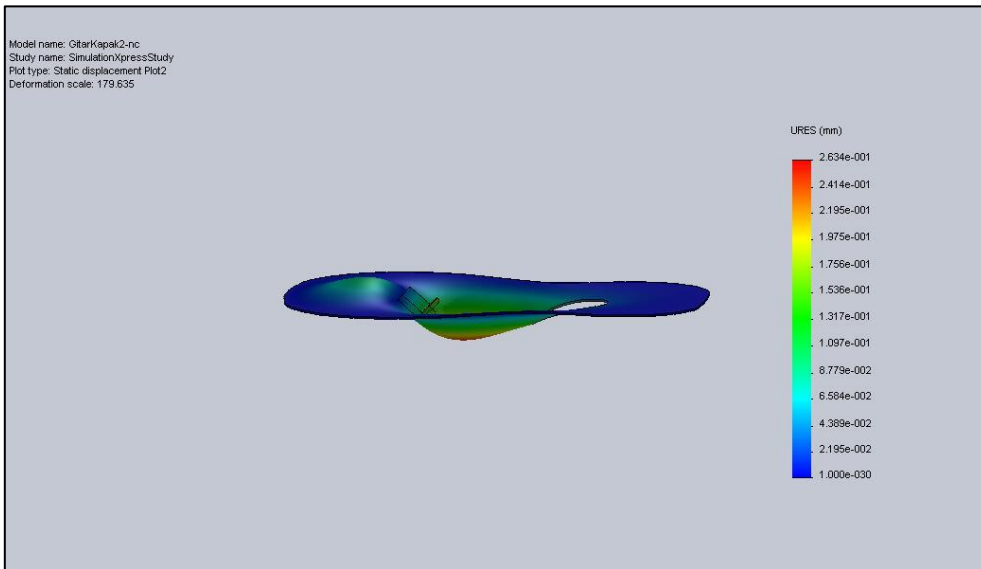
Şekil 4.4: Açıya göre oluşan maksimum çökme grafiği



Şekil 4.5: Gitar kapağında belirtilen açılarda oluşan deformasyonun normalize edilmiş hali



Şekil 4.6: Deformasyonun izometriğe yakın gösterimi



4.2 BAĞLAMA KAPAĞI BULGULARI

Bağlama kapağı kalınlığı 4 ile 5 mm arasında değişmektedir. Farklı sınır koşulları kabul edilerek elde edilen sonuçlar Tablo 4.5’de gösterilmektedir. Bu sonuçları grafiksel kıyaslaması da Şekil 4.7’de gösterilmektedir.

Tablo 4.4: Bağlama kapağının (ses tahtası) ilk 6 doğal frekansı

Rezonans Modu (#)	1	2	3	4	5	6
Frekans (Hz)	230.42	429.93	473.06	793.12	794.7	829.51

Tablo 4.5: Bağlama gövde kapağının farklı koşullarda ve kalınlıklarda rezonans modlarının değişim yüzdeleri

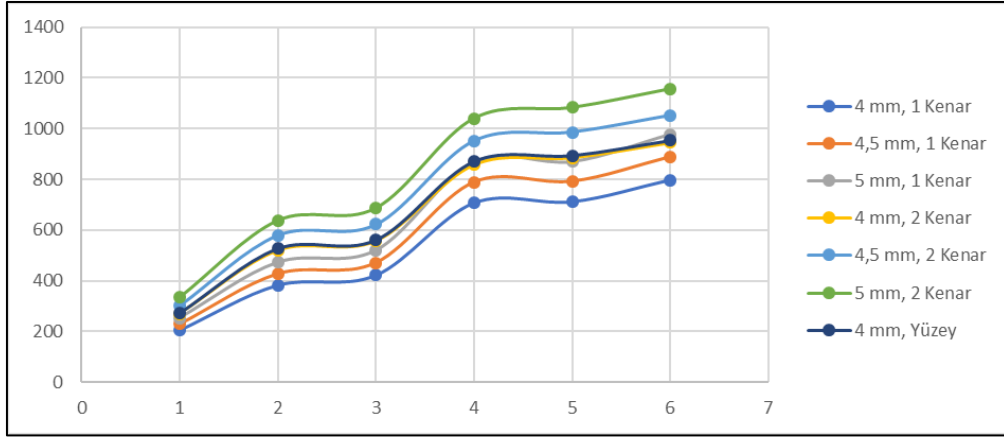
Kapak Kalınlığı (mm)	Sınır Koşulları	Mod 1 (%)	Mod 2 (%)	Mod 3 (%)	Mod 4 (%)	Mod 5 (%)	Mod 6 (%)
----------------------	-----------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

4	1 Kenar Sabit	-10.7	-10.6	-10.5	-10.4	-10.2	-10.3
5	1 Kenar Sabit	10.5	10.4	10.3	10.1	9.7	9.9

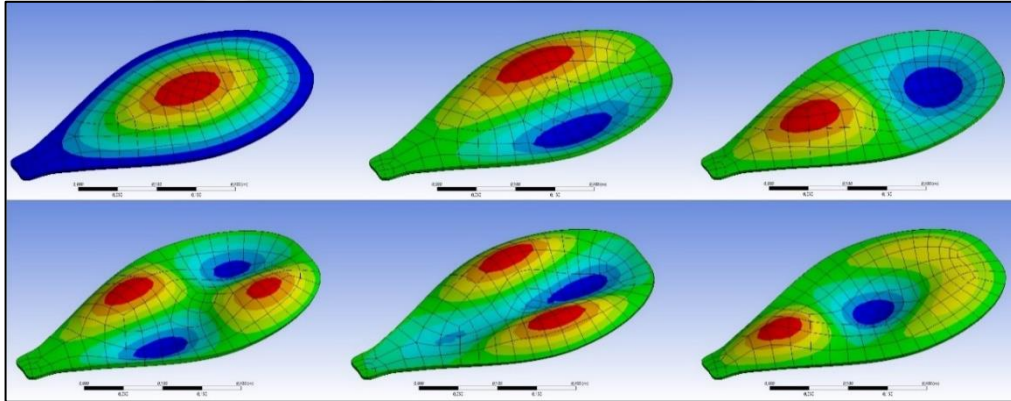
4	2 Kenar Sabit	17.7	21.5	18.2	8.7	11.8	6.3
4,5	2 Kenar Sabit	31.9	35.5	32.1	20.7	24.5	18.4
5	2 Kenar Sabit	45.8	49	45.7	31.8	36.7	30.1

4	Kenar Yüzeyi Sabit	19.1	23.3	19.2	10.3	12.9	7.3
---	--------------------	------	------	------	------	------	-----

Şekil 4.7: Bağlama kapağında farklı koşullarda oluşan doğal frekansların grafiği



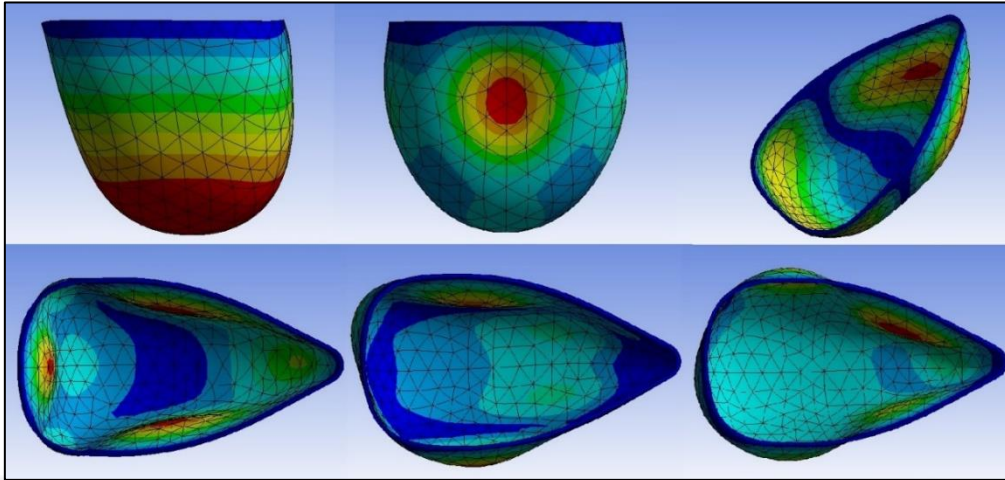
Şekil 4.8: Bağlama gövde kapağının rezonans mod şekilleri; (a) 1. mod, (b) 2. mod, (c) 3. mod, (d) 4. mod, (e) 5. mod, (f) 6. mod



4.3 BAĞLAMA GÖVDE BULGULARI

Bağlama gövde modeli “.stp” ve “.igs” olarak iki farklı dosya uzantısı ile ANSYS’e aktarılarak rezonans modları Şekil 4.9’da, doğal frekans değerleri ise Tablo 4.10’da gösterildiği gibi bulunmuştur.

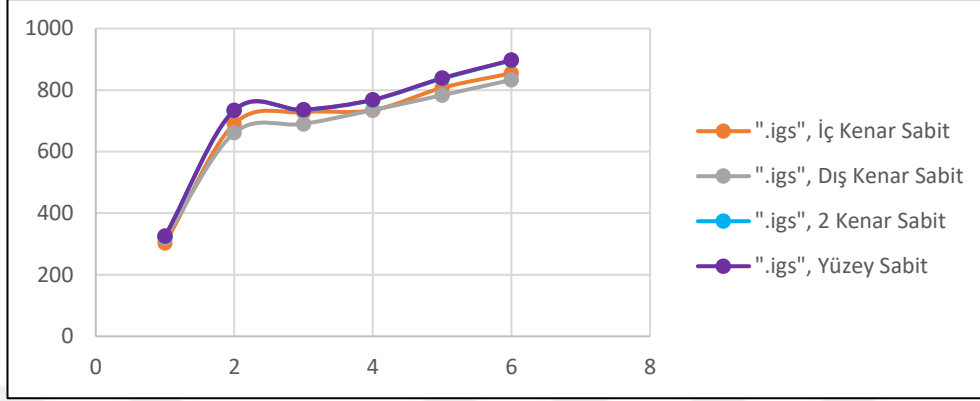
Şekil 4.9: Bağlama gövdesinin rezonans mod şekilleri; (a) 1. mod, (b) 2. mod, (c) 3. mod, (d) 4. mod, (e) 5. mod, (f) 6. mod



Tablo 4.6: Farklı sınır koşullarına göre ilk altı rezonans modları

	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5	Mod 6
".igs", İç Kenar Sabit	302,6	690,3	728,22	734,6	807,32	854,69
".stp", İç Kenar Sabit	302,3	693,2	727,68	736,82	808,81	854,45
".igs", Dış Kenar Sabit	318,86	660,93	689,94	734,8	783,56	832,92
".stp", Dış Kenar Sabit	318,34	666,23	688,08	736,33	785,43	835,12
".igs", 2 Kenar Sabit	324,53	733,5	735,01	767,82	837,06	896,46
".stp", 2 Kenar Sabit	324,4	734,62	739,44	774,31	838,85	897,09
".igs", Yüzey Sabit	325,74	734,63	736,25	768,75	838,76	897,07
".stp", Yüzey Sabit	325,57	735,85	740,68	775,3	840,69	897,71

Şekil 4.10: Tek dosya uzantısı üzerinden farklı sınır koşullarında bağlama gövdesinin rezonans modlarının grafiği



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, bağlamanın gövde kapağı ve gövdesinin doğal frekanslarını bulmak üzere nümerik ve deneysel yaklaşımlar kullanılarak, bağlamanın ses renginin oluşumu ve bu ses renginin oluşumunu etkileyen faktörlerden bazılarının üzerinde durulmuştur. Bu çalışmalar, literatürde bulunan gitar gövde kapağı üzerine yapılan çalışmalar ile bağlama için yapılan modellemenin aynısı gitar için de yapılarak kıyaslamalar da yapılmıştır. Gıtarıda tellerin tansiyonu sonucu kapaktaki şekil değışikliğı üzerinde durulmuştur.

Elips şeklinde bir plakanın rezonans mod şekillerinin, bağlamanın gövde kapağının rezonans mod şekilleri ile olan benzerliğı de gözlenmiştir. Bu konulardaki benzerliğın, bağlama gövdesi için yapılan analizin uygunluğunu belirtebileceğı önerilmektedir. Şekil 2.6’da gösterilen, kenarlarından kısıtılmış bir plakanın mod şekilleri ile Şekil 4.8’de gösterilen bağlama gövde kapağının rezonans mod şekilleri beklendiğı gibi birbirlerine benzemektedir. Şekil 2.6’da gösterilen elips şeklindeki plaka üzerinde siyah yerler hareket etmeyen yerleri, yani nodları göstermektedir. Renkler, şeklin üzerinde belirtildiğı gibi maksimum salınım anındaki deplasmanlara göre değışmektedir.

Bağlama gövde kapağında gözlemlenen üçüncü rezonans mod şekli, ikinci rezonans mod şeklinin 90 derece z-ekseni etrafında dönmüş hali gibi gözükmeğtedir. Tablo 4.6 ve Şekil 4.10’da görüldüğü gibi, bağlama gövde kapağı kenarlarında hareket kısıtlaması arttıkça ve/veya kapak kalınlığı arttıkça, sertlik artmakta ve salınım zorlaşmaktadır. Bunların sonucu olarak doğal frekansın yükseldiğı gözlemlenmiştir. 4.5 mm kalınlıkta ve tek kenardan sabitlenmiş (“clamped”) gövde kapağının doğal frekanslarının, Akaltan & Sancer (2014) deneysel sonuçlar ile uyuştugu gözlemlenmiştir. Gitar gövde kapağında gözlemlenen sonuçlar literatürde geçen (Richardson (1994), Elejabarrieta, Ezcurra & Santamaria (2002), Gore (2016)) sonuçlar ile beklenildiğı kadar uyuşmaktadır.

Deneyler sonucu, gitar kapağına tellerin köprüden bağlandığı yerde oluşan gerilim sonucu kapakta oluşan çökmenin, doğal frekans üzerinde (özellikle ilk iki doğal

frekansta) bir farka sebep olduğu görülmektedir. Tellerin yaptığı çökertme etkisinin en az olduğu açı 60° 'de bulunarak, telsiz halde beklenen sonuca en yakın konfigürasyona ulaşılabilceği düşünölmektedir. Artmış olan doğal frekansların ise, teller bu açı ile optimize edildiğinde, kapağın teller olmayan haline yakınsanacağı beklenmektedir. Bağlama için de tel bağlama şekli olarak böyle bir yöntem uygulanabileceği varsayılabilmektedir.

Malzeme seçimi, işlenme şekli, yapım tekniğı, nem oranları, kimyasala maruz kalma, iklim koşulları, kullanılan ağacın nerede yetiştiğine kadar birçok faktör, ağacın sertliğini ve/veya kusurluluğunu etkileyerek doğal frekansı etkilemektedir. Ağacın özel ortotropik, yani Silindirik Koordinat sistemine göre şekillenen bir malzeme oluşu ama ANSYS'te yapılan analizlerde böyle bir seçenek olmayışından dolayı Kartezyen Koordinat sistemine göre ortotropi özelliğı tanımlanması da sonuçları etkilemektedir.

Bağlamanın kendine özgü sesi ve gitar ile olan farkı ortaya çıkmaktadır. Gitarda gövde kapağının ilk doğal frekansı, kalın tellerin temel frekansı ile uyum içerisinde iken bağlama gövde kapağının ilk doğal frekansı, kalın (bam) tellerin temel frekansının bir üst oktavına (tellerin temel frekansının iki katına) denk gelmektedir. Bu çalışmanın sonucunda, bu farkın, bağlamanın ses rengini oluşturan en önemli faktörlerden biri olduğu kanaatine varılmıştır. Gitar gövde kapağındaki deliğın, Şekil 4.2(a), (b) ve (f) de “kırmızı” ile gösterilen yerlere denk gelmesi ve bağlama gövdesindeki deliğın de Şekil 4.9 (b) ve (d)'de gösterilen ikinci ve dördüncü rezonans mod şeklinde en fazla deplasmanın olduğu yere denk gelmesi gözlemlenmiştir.

Bağlama gövde kapağına tellerin uyguladığı kuvvet de eklenerek kapağın doğal frekanslarının değışeceğı düşünölmektedir. Bu sonuçlar gözetilerek, bağlama kapağı ve gövdesi için önermeler yapılabilmektedir. Bu önermeler, istenilen sonuca göre değışebileceğı gibi, enstrüman yapımında kullanılan malzeme ve tekniklere göre de şekillendirilebilmektedir.

Eski akustik gitarlarda tellerin bağlanma şekli ile klasik gitarların ve yeni akustik gitarların tel bağlanma şeklinin farkı gözetildiğinde, bu şekilde bir tel bağlama farkı ile

tellerin uyguladığı kuvvetin etkisi azaltılmıştır. Bağlamalarda da eski akustik gitarlarda olduğu gibi bir tel bağlama şekli gözlemlenmektedir. Tellerin kapağa bağlanış şekli ve açısı ayarlanarak, kapaktaki tel etkisi ile oluşan doğal frekans değişiminin optimize edilebileceği ve telsiz hale yaklaştırılabileceği öne sürülmektedir.



KAYNAKÇA

Kitaplar

Fletcher, N. & Rossing, T. (2010). *The physics of musical instruments*. 1st ed. New York: Springer.

Jansson, E. (1983). *Function, construction and quality of the guitar*. Stockholm.

Kelly, P. (2005). *Solid Mechanics Part I*. Auckland.

Green, D. W., Winandy, J. E. & Kretschmann, D. E. (1999). *Mechanical properties of wood*. 1st ed. Madison, WI: U.S. Dept. Of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Bucur, V. (2011). *Acoustics of wood*. Berlin: Springer

Süreli Yayınlar

- Touze, C., Camier, C., Favraud, G. & Thomas, O. (2008). Effect of imperfections and damping on the type of nonlinearity of circular plates and shallow spherical shells. *Mathematical problems in engineering*. **1** (2) pp.17
- Elejabarrieta, M. J., Ezcurra, A. & Santamaria, C. (2002). Coupled modes of resonance box of the guitar. *The Journal of The Acoustical Society of America*. **111** (5) pp. 2286-2289
- Richardson, B. E. (1994). The acoustical development of the guitar. *Journal of the Catgut Acoustical Society*. **2** (5) pp. 4-7
- Obataya, E., Ono, T. & Norimoto, M. (2000). Vibrational properties of wood along the grain. *Journal of Materials Science*. **35** (2000) pp. 2993-3001
- Gorrostieta-Hurtado, E., Pedraza-Ortega, J.-C., Ramos-Arreguin, J.-M., Sotomayor-Olmedo, A. & Perez-Meneses, J. (2012). Vibration analysis in the design and construction of an acoustic guitar. *International Journal of Physical Sciences*. **7** (13) pp. 1986-1997
- Becache E., Chaigne A., Derveaux G. & Joly P. (2005). Numerical simulation of a guitar. *Computers & Structures*. **83** (2-3) pp.107-126
- Ono, T. (1999). Transient response of wood for musical instruments and its mechanism in vibrational property. *The Journal of the Acoustical Society of Japan*. **20** (2) pp. 117-124
- Ono, T. (1996). Frequency responses of wood for musical instruments in relation to the vibrational properties. *The Journal of the Acoustical Society of Japan*. **17** (4) pp. 183-193
- Aizawa, H., Obataya, E., Ono, T. & Norimoto, M. (1998). Acoustic converting efficiency and anisotropic nature of wood. *Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute Kyoto University*. **85** pp. 81-83

Diğer Yayınlar

- Morais, J. L., Xavier, J. C., Dourado, N. M. & Lousada, J. L. (2001). *Mechanical behaviour of wood in the orthotropic directions*. Building Materials Laboratory, Materials Science and Engineering Department, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne. Lausanne.
- Tapia, E. R. G. (2002). *Simulating a classical acoustic guitar, finite element and multiphysics modelling*. KTH CSC School of Computer Science and Communication, Stockholm.
- Moore, J. (2011). *Wood properties and uses of sitka spruce in Britain*. Forestry Commission, Edinburgh.
- Funnel, R., Auditory Mechanics Laboratory. *Modelling middle-ear mechanics*. (2016). [online] http://audilab.bmed.mcgill.ca/AudiLab/teach/me_mod/ [accessed 10 February 2017]
- D'Addario Classical Guitar Strings. (2017). [online] http://www.daddario.com/DADProductFamily.Page?ActiveID=3768&familyid=26&productname=Pro_Art_Nylon_Core&sid=9ca0fc59-16fe-4c06-b755-7623f0273950 [accessed 13 February 2017]
- Gore, T., *Modal tuning*. (2016). [online] http://www.goreguitars.com.au/main/page_about_design_modal_tuning.html [accessed 9 February 2017]
- Akaltan, A. & Sancer, C. (2014). *Vibration and acoustic properties of bağlama (numerical and experimental)*. Yeditepe Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi.