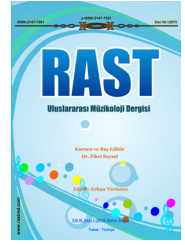




RAST MÜZİKOLOJİ DERGİSİ
Uluslararası Müzikoloji Dergisi
www.rastmd.com

Doi:10.12975/rastmd.2017.05.03.000113



TELLİ ÇALGI YAPIMINDA KULLANILAN TİTREŞİM ÖLÇÜM TEKNİKLERİNİN DENEYSEL ANALİZİ¹

Emir Değirmenli²

ÖZET

Telli çalgılardaki ses oluşumu, büyük ölçüde çalgıya ait bölümlerin titreşim karakterleri tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle çalışmada, telli çalgı yapımında kullanılan titreşim testleri ele alınmıştır. Bu testlerin gerçekleştirilmesi için gerekli ölçüm düzenekleri ve yazılımlar incelenmiştir. Bu amaçla, ladin ağacından dikdörtgen bir tabla üzerinde ve serbest titreşim koşulları altında çeşitli ölçümler yapılmıştır. Benzer ölçüm yöntemlerinden elde edilen test verileri birbirleriyle karşılaştırılarak, yöntemlerin üstün ve zayıf oldukları noktalar ortaya koyulmuştur. Bunun için, özellikle titreşim şekillerinin gözlenmesi amacıyla kullanılan Chladni metodu, gezici darbe testi ve sonlu elemanlar analizi bir grupta incelenmiştir. Diğer grupta ise tap-ton testinin incelenmesi amacıyla, Autacity programından elde edilen spektrum analizleri ile Pulse-FFT analiz yazılımından elde edilen frekans tepki fonksiyonları karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara dayanarak, çalgı yapım atölyelerinde rahatlıkla kullanılacak ölçüm yöntemlerinin, Chladni metodu ve spektrum analizi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmanın sonucu doğrultusunda ağaç malzemenin elastikiyet hesapları ve serbest tabla akordu gibi, çalgı yapımıyla ilgili önemli konuların yanı sıra çalgı akustiği çalışmalarında, bu yöntemlerin kullanımı önerilebilir.

Anahtar Kelimeler: Çalgı Yapımı, Çalgı Akustiği, Telli Çalgılar, Titreşim Analizleri, Ses Spektrumları

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF VIBRATION MEASUREMENT TECHNIQUES USED IN STRINGED MUSICAL INSTRUMENT MAKING

ABSTRACT

Sound production in stringed instruments is largely determined by the vibrational characteristics of the parts of the instrument. The major objective of this study was to

¹ Bu çalışma, 60/2017-01 ve 60/2015-01 kod numaralı projeler kapsamında, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

² Gazi Üniversitesi Türk Müziği Devlet Konservatuvarı, Öğretim Görevlisi, Türkiye, emirdegirmenli@gazi.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-8164-1448>.

investigate vibration measurement techniques used in musical instrument making. The necessary measurement equipment and software for carrying out these techniques have been examined. For this, various measurements were made on a spruce rectangular plate which is under vibration-free conditions. The test data obtained from similar measurement techniques are compared with each other to reveal the superiority and weakness of these methods. For this, the Chladni method, roving impact test, and finite element analysis—which is used to observe the vibration patterns, in particular—have been examined in a group. In the other group, the frequency response functions obtained from Pulse-FFT analysis software and the spectrum analysis obtained from the Audacity program were compared in order to examine the tap-tone test. From the obtained results, the measurement methods that can be easily used in the instrument making workshops were determined as the Chladni method and spectrum analysis. In addition, some suggestions have been made about how to use these methods in determining the elasticity properties of wood materials and in the important processes related to instrument construction, such as free plate tuning, and instrumental acoustic studies.

Keywords: Musical Instrument Making, Acoustics of Musical Instruments, Stringed Musical Instruments, Vibrating Analysis, Sound Spectrum

GİRİŞ

Çalgı akustiği ve çalgı yapıma yönelik çalışmalar araştırmacılar tarafından genellikle birlikte yürütülen konulardır. Çalgı akustiğinde yapılan matematiksel ve deneysel çalışmalar, çalgı yapımcılarına bilgi sağlamakta, aynı şekilde yapımcıların kendi uygulamalarından elde ettikleri sonuçlar ve belirledikleri ihtiyaçlar ise çalgı akustiğini yönlendirmektedir. Bu bağlamda uluslararası düzeyde birçok çalışma, McGill gibi önemli üniversitelerde bulunan özel laboratuvarlarda (The Computational Acoustic Modeling Laboratory, CAML) gerçekleştirilmektedir. Ülkemizde de çalgı akustiği üzerine özel olarak şekillenmiş titreşim ve akustik laboratuvarlarının kurulması bu doğrultuda ihtiyaç olarak görülmüş ve Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri biriminin desteği ile yıllar içinde çeşitli projelerle önemli ölçüde oluşturulmuştur. Şu an içerisinde barındırdığı ölçüm sistemleri ile çalgıların akustik özellikleri uluslararası düzeyde ölçülebilmektedir. Ayrıca imkanlarının geliştirilebilmesi yönünde çalışmalara devam edilmektedir.

Çalgı akustiği çalışmalarının tüm çalgı türleri üzerinden yürütülmesine karşın, telli çalgılar üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Araştırmaların tarihsel sürecinde, özellikle keman üzerine yapılan çalışmalar önemli yer tutmaktadır. Çünkü keman akustiği çalışmaları, Felix Savart'tan (1791-1841) günümüze yaklaşık olarak iki asırdır sürmektedir. Bu süreçte Erns F.F. Chladni (1756-1824), Hermann L.F. Helmholtz (1821-1894) ve daha birçok bilim adamının çalışmalarından faydalanılmış (Hutchins, 1983, s. 4-6), Carleen Hutchins (1911-2009) tarafından yapılan araştırmalar ile yeni bir boyut kazanmıştır. Günümüzde ise Martin Schleske gibi modern ölçüm teknikleri kullanan önemli yapımcı ve araştırmacılar tarafından bu çalışmalar devam etmektedir. Bu yönüyle keman akustiği, sadece keman değil tüm telli çalgıların akustik gelişimine katkı sağlamaktadır.

Çalgılarda ses oluşum sürecinin anlaşılması ve bu sürecin çalgı yapımcıları tarafından kontrol edilebilmesi amacıyla uluslararası düzeyde birçok çalışma yapılmaktadır. Çalgı gövdelerinin titreşim şekillerinin görüntülenmesi, bu çalışmalarda sıklıkla yer bulan konulara arasındadır.

Bunlardan lazer interferometri (Bakarezos ve diğerleri, 2006; Richardson, 2010, s. 129-130) ve çeşitli modal analiz yöntemleri (Marshall, 1985; Scheske, 2002, s. 59) kullanan çalışmaların yanında, çalgı yapım atölyelerinde rahatlıkla uygulanabilen Chladni metodunu konu alan (Curtu, Stanciu, Cretu, ve Rosca, 2009, s. 31; Hutchins, 1981, s. 5) çalışmalara da rastlamak mümkündür. Ayrıca bilgisayar teknolojisinde yaşanan gelişmelere bağlı olarak, sonlu elemanlar analizi gibi çeşitli matematiksel modeller üzerinden yapılan araştırmalar (Molin, Tinnsten, Wiklund, ve Jansson, 1984; Paiva ve Dos Santos, 2014, s. 235), günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanında, çalgıların titreşimlerinden kaynaklanan seslerin ölçülmesi üzerine şekillenen çeşitli çalışmalar (Bader, 2012; Perry, 2014), çalgılardaki ses oluşumuyla ilgili yeni ve çok önemli bilgiler sağlamaktadır.

Türkiye’de çalgı yapıcılığını değişik yönleriyle ele alan çok sayıda çalışmaya ulaşmak mümkündür. Bu çalışmalarda genellikle çalgı yapım teknikleri, çalgı yapımında kullanılan ağaçlar ve çeşitli organolojik araştırmaların konu edildiği görülmektedir (Tetik Işık ve Uslu, 2012, s. 35-38; Tetik Işık, 2015 s.197-220). Bunun yanında, çalgıların akustik özellikleri konu eden sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Bozkır, 2002; Yılmaz ve Belenli, 2011). Çalgıların ses tablalarının titreşim özellikleri üzerine yapılan çalışmalar ise yok denecek kadar azdır. Bu çalışmalardan biri Taçoğlu (1997) tarafından yapılan ‘Tanburda Kullanılan Ses Tablasında Rezonans Özelliklerinin İncelenmesi’ isimli yüksek mühendislik tezidir. Diğerleri ise ud çalgısı üzerinde yapılan çeşitli titreşim ve ses analizlerini içeren çalışmalardır (Değirmenli, 2014, 2015, 2017).

Ülkemizde üretilmekte olan çalgıların malzemeleri ve yapısal özellikleri ile ses karakterleri arasındaki ilişki, genellikle tamamlanmış çalgılar üzerinden yapılan ses analizleri ile araştırılmaktadır. Bu yöntem belirli bir oranda fayda sağlamakla beraber tek başına çalgı yapımçıların ihtiyaç duyduğu bilgiyi sağlamamaktadır. Çünkü çalgı yapımçıların çalgı akustiği araştırmalarından beklentileri; hedeflenen bir ses için hangi fiziksel özelliklerdeki malzemenin, hangi boyutsal tasarımla kullanılması gerektiği hakkında bilgi vermesidir. Bunun için gerek tamamlanmış çalgılarda, gerekse çalgının üretim sürecinde titreşim analizlerinden de faydalanmak oldukça önemlidir. Bu nedenle çalışmada, çalgı yapımında kullanılan titreşim analizlerinin neler olduğu ve ne şekilde uygulandığı üzerinde durulmuştur. Farklı test teknikleriyle ölçümler yapılarak, elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu yönüyle çalışma, hem çalgı yapımçıları için bir yöntem önerisi niteliğinde olup hem de çalgı akustiği alanındaki Türkçe kaynak eksikliğini belirli bir oranda gidermeyi hedeflemektedir.

METODOLOJİ

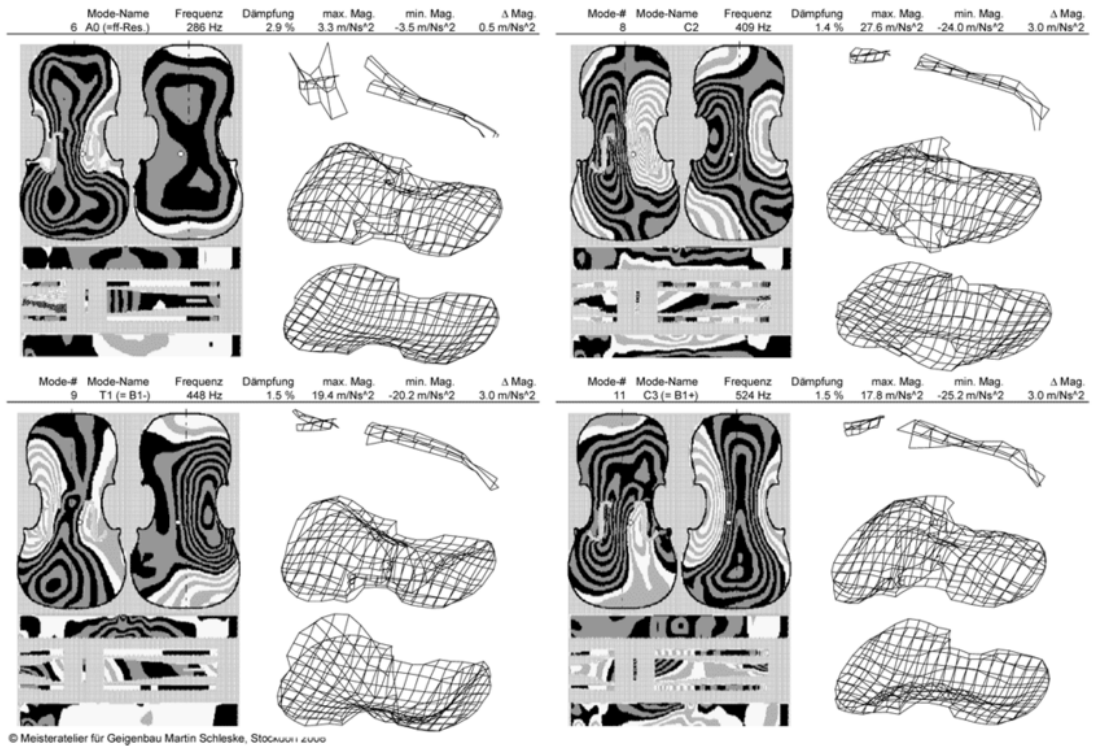
Telli çalgı yapımında kullanılan titreşim ölçüm tekniklerini karşılaştırmak amacıyla yapılan bu çalışmada ilk olarak kaynak tarama yöntemi kullanılmıştır. Böylece telli çalgı yapımında kullanılan çeşitli güncel titreşim ölçüm teknikleri ortaya koyulmuştur. Daha sonra telli çalgı yapımında kullanılan titreşim ölçüm tekniklerinin birbiriyle karşılaştırılması amacıyla deneysel yönetime başvurulmuştur. Bunun için 504 mm boyunda, 186 mm eninde ve 3 mm kalınlığında ladin ağacından yapılmış bir tabla üzerinde serbest titreşim koşullarında titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

ARAŞTIRMANIN TERMİNOLOJİSİ

Çalgı Rezonansları: Normal Modlar

Telli çalgılar gibi karmaşık yapılar, çok farklı titreşim özelliklerine sahiptirler. Bunlardan en önemlisi doğal titreşim modları ya da normal modlar olarak da bilinen çalgının rezonanslarıdır (Şekil 1). Schleske'ye (2002) göre bu rezonans bölgelerinin ölçülmesi, adeta çalgının parmak izinin ortaya çıkarılması anlamı gelmektedir. Bu yönüyle çalgının normal modları, ses karakterinden, icra özelliklerine kadar birçok önemli noktada oldukça belirleyici olmaktadır. Bu nedenle, çalgı akustiği üzerine yapılan çalışmaların bir çoğunun, çalgıların rezonans özelliklerinin araştırılması üzerine şekillendiği görülmektedir.

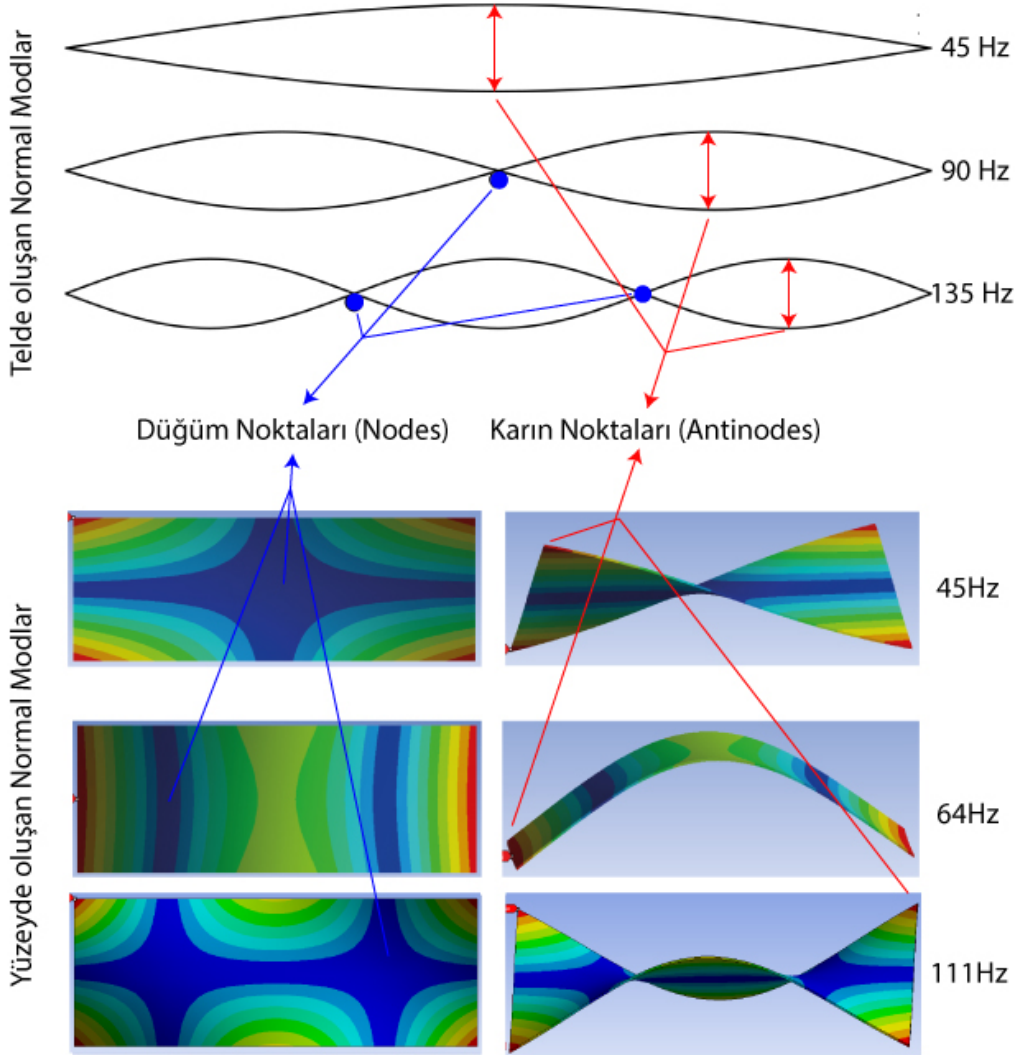
Typische Korpusresonanzen einer Geige



Şekil 1. Stradivarius (1717) yapımı bir kemanın normal modlarının titreşim şekilleri (Schleske, 2002).

Normal modlar, doğadaki tüm yapıların sahip olduğu doğal bir titreşim özelliğidir. Geometrik şekle ve malzeme özelliklerine bağlı olarak çeşitli frekanslarda oluşurlar. Bu frekanslara doğal frekanslar denir. Havacılık ve çeşitli birçok sektörde yapısal modların frekansları tespit edilerek, çalışma aralığından uzak tutulmaya çalışılmaktadır. Çünkü bir yapı doğal frekansına denk gelen bir frekansta uyarılırsa çok yüksek genlikli titreşim oluşabileceğinden yapı ya zarar görür ya da aşırı gürültü meydana gelir. Çalgı yapımında da bu modların tespiti çok önemlidir. Ama farklı olarak çalgı yapımcıları, bu modları çalgının çalışma frekansı içinde tutmaya

çalışırlar ki, telden gelen titreşimler rahatlıkla sese dönüşebilsin. Bu durum aslında rezonans³ olarak bilinir. Bu nedenle çalgının normal modları, aynı zamanda çalgının rezonansları olarak da bilinmektedir.



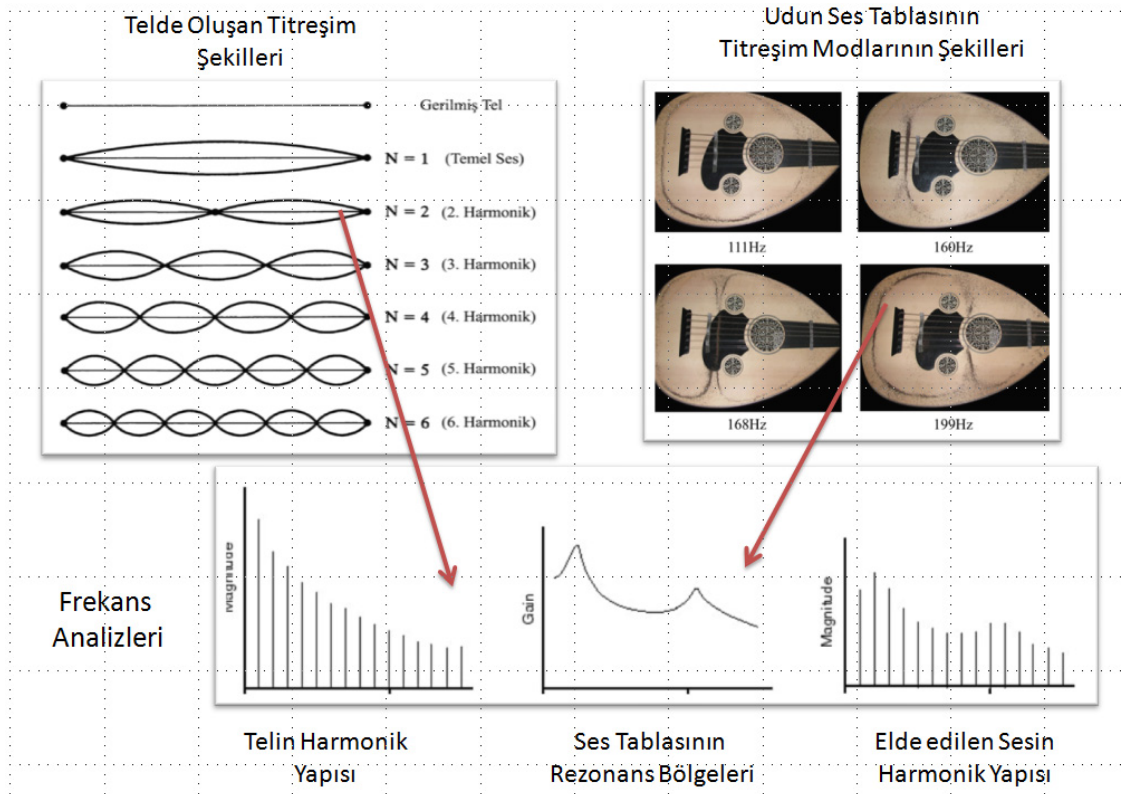
Şekil 2. Tel ve plakada oluşan normal mod şekilleri üzerinde, düğüm (node) ve karın (antinode) bölgelerinin gösterimi.

Normal modlar, yapıya kısa süreli bir etki uygulanması ve geri çekilerek yapının kendi halinde hareket etmesine izin verilmesi durumunda görülmektedir. Örneğin tele vurulduğunda,

³ Rezonans, özellikle uyarıcı kuvvetin frekansı ile uyarılan sistemin doğal frekansının aynı olduğunda oluşan özel bir durumdur. Bu koşulda uyarılan sistemin titreşim genliği, rezonans dışı duruma göre çok büyük değerlere ulaşabilir.

uygulanan bu kısa süreli etki sonucunda tel kendine özgü titreşimlerini yapmaya devam etmektedir. Bu titreşimlerin oluşumu tek boyut üzerinde olduğu için frekans değerleri birbirlerinin tam katı⁴ şeklinde oluşmakta ve harmonikler olarak bilinmektedir (şekil 2). Aslında harmonikler telin normal modlarıdır. Burada titreşimin en yüksek olduğu bölgeler karın (antinode), durağan olanlar ise düğüm (node) noktaları olarak isimlendirilmektedir (Zeren, 2007, s. 32).

Çalgıların ses tablaları ve gövdeleri gibi iki boyutlu yapılarda ise normal modların hem şekilleri oldukça karmaşıklaşmakta hem de frekans değerleri teldeki gibi düzenli değişmemektedir. Ayrıca düğüm noktaları çizgi şeklinde oluşarak, ya karın bölgesini boydan boya takip etmekte ya da o bölgeyi çevrelemektedir. Şekil2’de serbest titreşim koşullarındaki ladin bir plakanın ilk üç normal modu görülmektedir. Burada mavi ile görülen bölgeler hareket etmeyen düğüm çizgilerini, kırmızı ile görülenler ise en yüksek titreşimin olduğu yerleri göstermektedir. Buna göre, hem tel hem de çalgı yüzeylerinin yapmış oldukları doğal titreşimlerin ses oluşumuna katkılarını gösteren şematik bir gösterim Şekil 3’de verilmiştir.



Şeki 3. Telli çalgılarda ses oluşumuna, tel ve ses tablası titreşim etkilerinin şematik gösterimi (Değirmenli, 2015, s. 144).

⁴ Bu ideal tel koşullarında geçerli olan bir durumdur. Telli çalgılarda üst harmoniklerde tam sayılı katlardan sapma görülebilir. Bu durum inharmoniklik (inharmonicity) olarak isimlendirilmektedir.

Telli Çalgı Yapımında Kullanılan Titreşim Ölçüm Teknikleri

Çalgıların normal modlarının araştırılmasında kullanılan birçok farklı titreşim ölçüm tekniği bulunmaktadır. . Bu yöntemlerin genel adı Modal Analiz olarak bilinmekte ve havacılık, otomotiv gibi önemli alanlarda uzun yıllardır kullanılmaktadır. Normal modların doğal frekanslarının, sönüm faktörlerinin ve mod şekillerinin belirlenmesi modal analizin temelini oluşturmaktadır.

Ölçümler deneysel yöntemlerle yapıldığında deneysel modal analiz, matematiksel modeller üzerinden yapıldığında ise matematiksel modal analiz olarak isimlendirilmektedir. Deneysel yöntemde yapı bir darbe çekici veya sarsıcı ile uyarılmakta ve yapının cevabı ivme ölçer, mikrofon ya da görsel olarak elde edilmektedir. Böylece FFT analizi ve çeşitli hesaplamalar sonucunda yapının normal modları belirlenebilmektedir. Matematiksel modal analizde ise en çok bilinen yöntem sonlu elemanlar analizidir (finite element anaysis, FEA). Bu yöntemde, bilgisayar ortamında modellenmiş bir çalgının titreşim karakteristiği yine bilgisayar ortamında matematiksel çözümlerle elde edilmektedir.

Bu çalışmada ele alınacak modal analiz yöntemleri, laboratuvar ve atölye imkanları doğrultusunda belirlenmiştir. Çünkü çalışmanın temel amacı, çalgı atölyelerinde rahatlıkla kullanılacak ölçüm yöntemlerini ortaya koymak ve laboratuvar ölçümleri ile karşılaştırmaktır. Bu amaçla belirlenen ilk yöntemler; sonlu elemanlar analizi, gezici darbe testi ve Chladni metodudur. Ayrıca tap-ton (tap-tone) testi, hem Spektrum analizleri (Audacity) hem de frekans tepki fonksiyonları (frequency response function, FRF) üzerinden incelenmiştir.

Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar analizinin (Finite Element Analysis, FEA) birçok uygulama alanından birisi de modal analizdir. Bu yöntem ile fiziksel özellikleri bilinen bir sistemin titreşim davranışı önceden hesaplanarak, üretim süreci bu bilgiler doğrultusunda şekillendirilebilmektedir. Özellikle çalgı yapımı gibi üretim süreci çok meşakkatli ve uzun süren bir üretimde, bu yöntemin sağlayacağı faydalar çok daha önem kazanmaktadır. Ancak ağaç malzeme ortotropik (orthotropic) özelliğe sahiptir. Yani her yönde farklı fiziksel özellikler gösterir. Ayrıca her bir ağaç numunesi için elastikiyet ve özkütle değerleri birbirinden farklıdır. Bu nedenle sonlu elemanlar analizinin başarılı olabilmesi için ilk olarak modellenecek bölümde kullanılan ağaç malzemenin fiziksel özellikleri mümkün olan en iyi şekilde ölçülmelidir.

Bu çalışmada kullanılan ladin plakanın Young modülü hem liflere paralel $E_{//}$ hem de radyal yönde E_r ölçülerek, modelin fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Programın ihtiyaç duyduğu diğer Shear Modülü ve Poisson oranları ise farklı bir çalışmadan (Lu, 2013, s. 32) alınmıştır. Aynı zamanda deneysel olarak ölçülen tablanın ilk üç modu temel alınarak, fiziksel özellikler üzerinden bazı değişikliklere gidilmiş ve ladin plaka için Tablo 1'deki sonuçlara ulaşılmıştır. Çalışmada tüm modelleme ve sonlu elemanlar analizinde ANSYS 18.0 yazılımı kullanılmıştır.

Tablo 1. Matematiksel modelde kullanılan ladin plakanın fiziksel özellikleri (x yönü liflere paralel ($E_{//}$), y yönü radyal (E_r) ve z yönü teğet (E_T) olarak kabul edilmiştir.)

Parametreler	Değer
ρ (Özkütle)	490 Kg m^{-3}
E_x (x yönündeki Young modülü)	12.5 GPa
E_y (y yönündeki Young modülü)	1.38 GPa
E_z (z yönündeki Young modülü)	1.38 GPa
G_{xy} (xy yönündeki Shear modülü)	0.80 GPa
G_{yz} (yz yönündeki Shear modülü)	0.0059 GPa
G_{xz} (xz yönündeki Shear modülü)	0.80 GPa
ν_{xy} (xy yönündeki Poisson oranı)	0.3
ν_{xz} (xz yönündeki Poisson oranı)	0.3
ν_{yz} (yz yönündeki Poisson oranı)	0.3

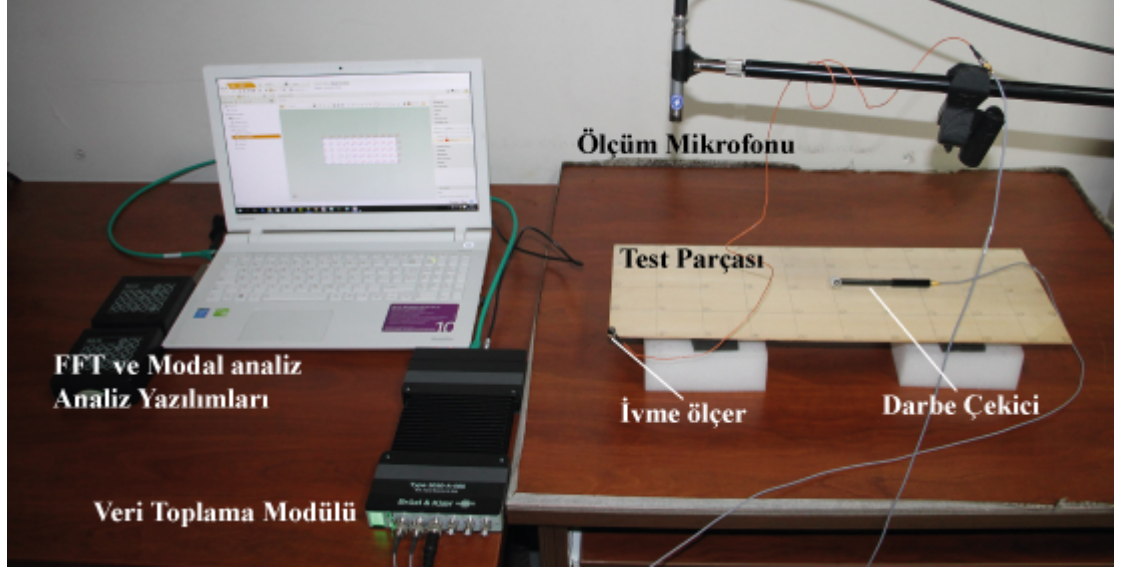
Gezici Darbe Testi

Bu analiz yöntemi, kullanım kolaylığı ve göreceli olarak düşük maliyetleri nedeniyle modal analiz uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Temelde modal analiz yazılımı (Pulse Reflex) üzerinden yürütülen bu yöntem için ilk olarak ön ölçümler yapmak gerekmektedir. Bu ölçümler frekans tepki fonksiyonu (frequency response function, FRF) olarak isimlendirilmektedir. Bunun için titreşim davranışı incelenecek yapı üzerinde noktalar belirlenmekte ve bu noktaların birine ivmeölçer yerleştirilmektedir (Şekil 4). Ayrıca tüm noktalar, ucunda kuvvet sensörü olan bir darbe çekici ile uyarılmakta (Şekil 5) ve en az iki kanallı bir FFT analizörü ile bu iki sinyal birbirine oranlanarak her bir nokta için bir FRF elde edilmektedir. FRF işleminin temel gösterimi Eşitlik 1’de verilmiştir.

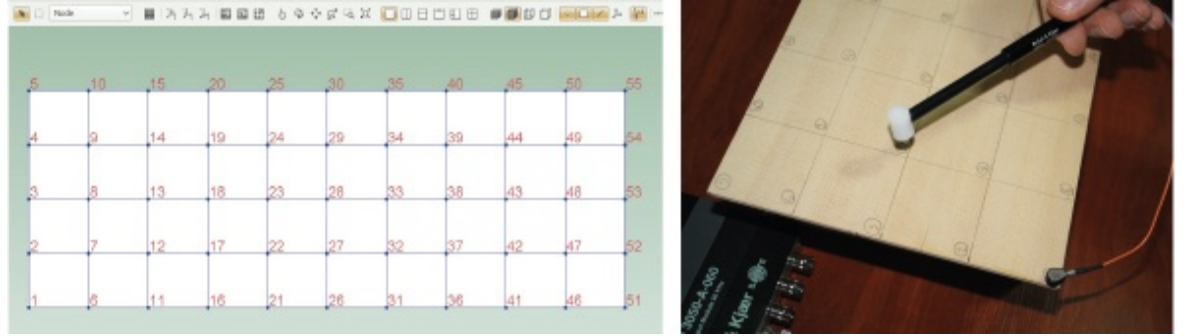
$$H(w) = \frac{X(w)}{F(w)} \quad (\text{Eşitlik 1})$$

Eşitlik 1’de, $H(w)$ frekans tepki fonksiyonu, $X(w)$ frekans uzayında sistem çıktısı, $F(w)$ ise giriş kuvvetidir (Schwarz ve Richardson, 1999, s. 2). Buna göre frekans tepki fonksiyonu, uygulanan birim kuvvet başına sistemin cevabı (yer değiştirme, ivme, hız) olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada gezici darbe testi için, B&K 3050-A-060 Veri Toplama Modülü, B&K 8204 Minyatür Darbe Çekici, B&K 4517-002 Minyatür İvme Ölçer, B&K 7781-N6

Pulse Access FFT Analiz Yazılımı ve B&K 8720-A-NS Pulse Reflex Modal Analiz Yazılımı kullanılmıştır.



Şekil 4. Gezici darbe testi düzeneği

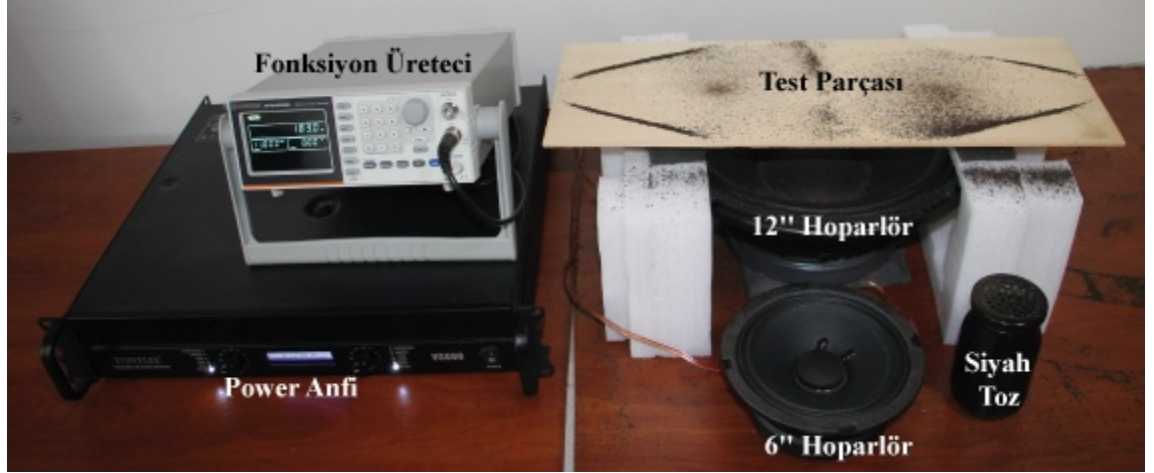


Şekil 5. Gezici darbe testi uygulaması.

Chladni Metodu

Ernst Chladni tarafından bulunan bu metot ile incelenen yüzeylerin mod şekilleri ve doğal frekanslar temassız bir şekilde, yani yapıya herhangi bir ekstra ağırlık eklemeyen elde edilebilmektedir. Ölçüme başlamadan önce yüzeye hafif bir toz (kuru inceltilmiş çay taneleri) serpilmekte ve bir hoparlör yardımıyla, tablaya ilgilenilen frekans aralığında ses dalgaları uygulanmaktadır. Bu frekanslar ile tablanın herhangi bir doğal frekansı çakıştığı anda tabla rezonansa girerek titreşmeye başlamakta ve yüzeydeki toz taneleri titreşmeyen düğüm çizgilerine kaymaktadır. Böylece hem düğüm çizgilerinin yerleri, dolayısıyla mod şekilleri belirlenmekte hem de doğal frekanslar tespit edilmektedir (Şekil 6). Bu yöntem hem üretim sürecinde çalgıların serbest yüzeylerinde, hem de tamamlanmış çalgılarda kullanılmaktadır.

Bu çalışmada Chladni testinin gerçekleştirilebilmesi için; GW Instek AFG-2005 fonksiyon jeneratörü, Tonylee VS600 power anfi, RCF 12'' ve Eminence 6'' hoparlörler kullanılmıştır. Bu cihazlar aynı zamanda farklı testlerde de kullanılmaktadır. Sadece Chladni metodunun uygulanması için daha düşük maliyetli ve çalgı yapım atölyelerinde kullanıma uygun bir sistem Değirmenli (2014, s.49-52) tarafından 'Akustik Ölçüm Teknikleri Kullanılarak Üretilen Ud Ses Tablasının Titreşim Özelliklerinin Kontrolü Üzerine Yeni Bir Yöntem Önerisi' isimli çalışmada ayrıntılarıyla belirtilmiştir.



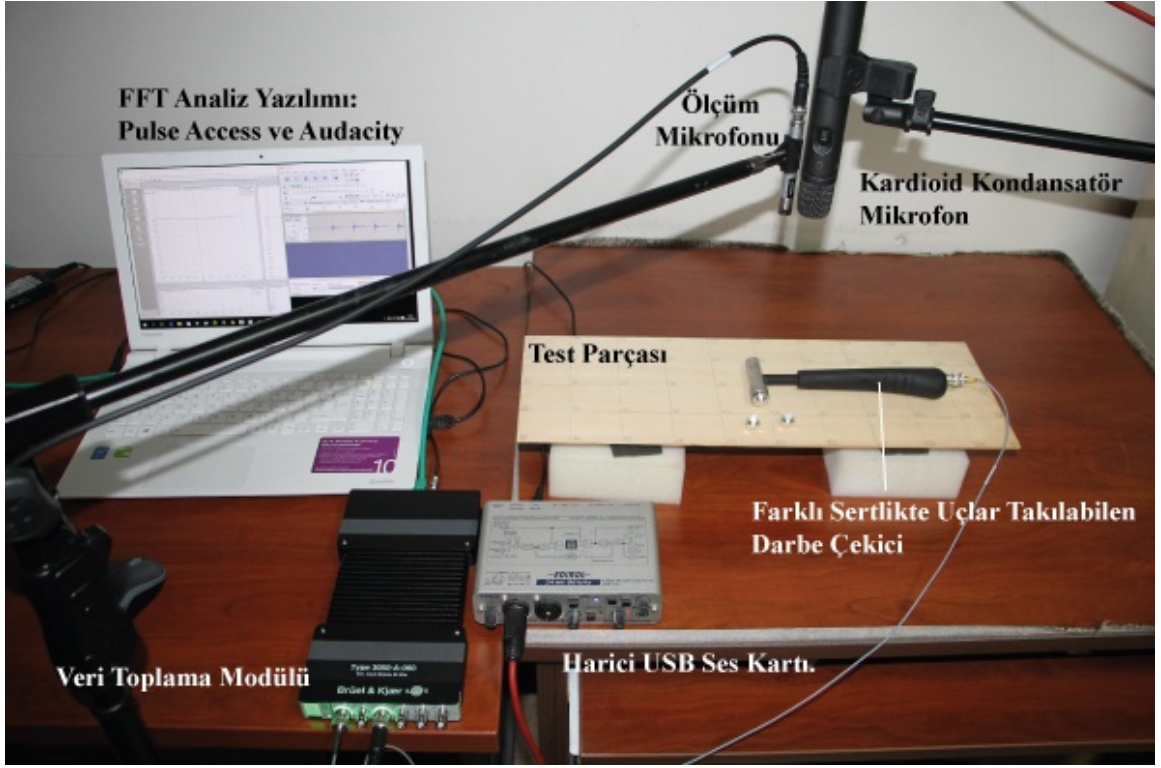
Şekil 6. Chladni metodu ölçüm düzeneği

Tap-Ton (Tap-Tone) Metodu

Bu yöntem aslında çalgıların ses tablası gibi yüzeylerine parmakla vurulup çıkan sesi dinleme ve değerlendirme temeline dayanmaktadır. Çalgı yapımında geleneksel olarak kullanılan bu yöntem, başarılı çalgıların yapımında önemli rol oynamıştır. Aslında uygulamada yapılan şey modal analizin öznel, sezgiye dayalı şeklidir. Bu çalışmada ise aynı yöntem, frekans ölçüm ve analiz istemleri üzerinden yürütülerek, bilgilerin daha objektif ve depolanabilir bir şekilde dönüştürülmesi sağlanmıştır.

Çalışmada tap-ton metodu iki farklı ölçüm yöntemi kullanılarak aynı anda gerçekleştirilmiştir. Ses tablasına sırasıyla alüminyum, plastik ve kauçuk uca sahip darbe çekiciyle, dikdörtgen plakanın merkezinden vurulmuştur. Bir taraftan ses kartı ve condenser mikrofon ile ses cevabı toplanmış, Audacity programında ses spektrumları hesaplanmıştır. Diğer taraftan ise modal analiz ölçüm ekipmanları ve ölçüm mikrofonu kullanılarak ses FRF'leri elde edilmiştir.

Tap-ton testinin gerçekleştirilmesi aşamasında ses spektrumların hesaplanması için ücretsiz Audacity yazılımı, Edirol UA-25 ses kartı ve Rode M3 kondenser mikrofon kullanılmıştır. Ses FRF'lerinin elde edilmesi için, B&K 3050-A-060 Veri Toplama Modülü, B&K 8206-002 Darbe Çekici (üç farklı sertlikte uç ile), B&K 4189-A-021 Ölçüm Mikrofonu, B&K 7781-N6 Pulse Access FFT Analiz Yazılımı kullanılmıştır.



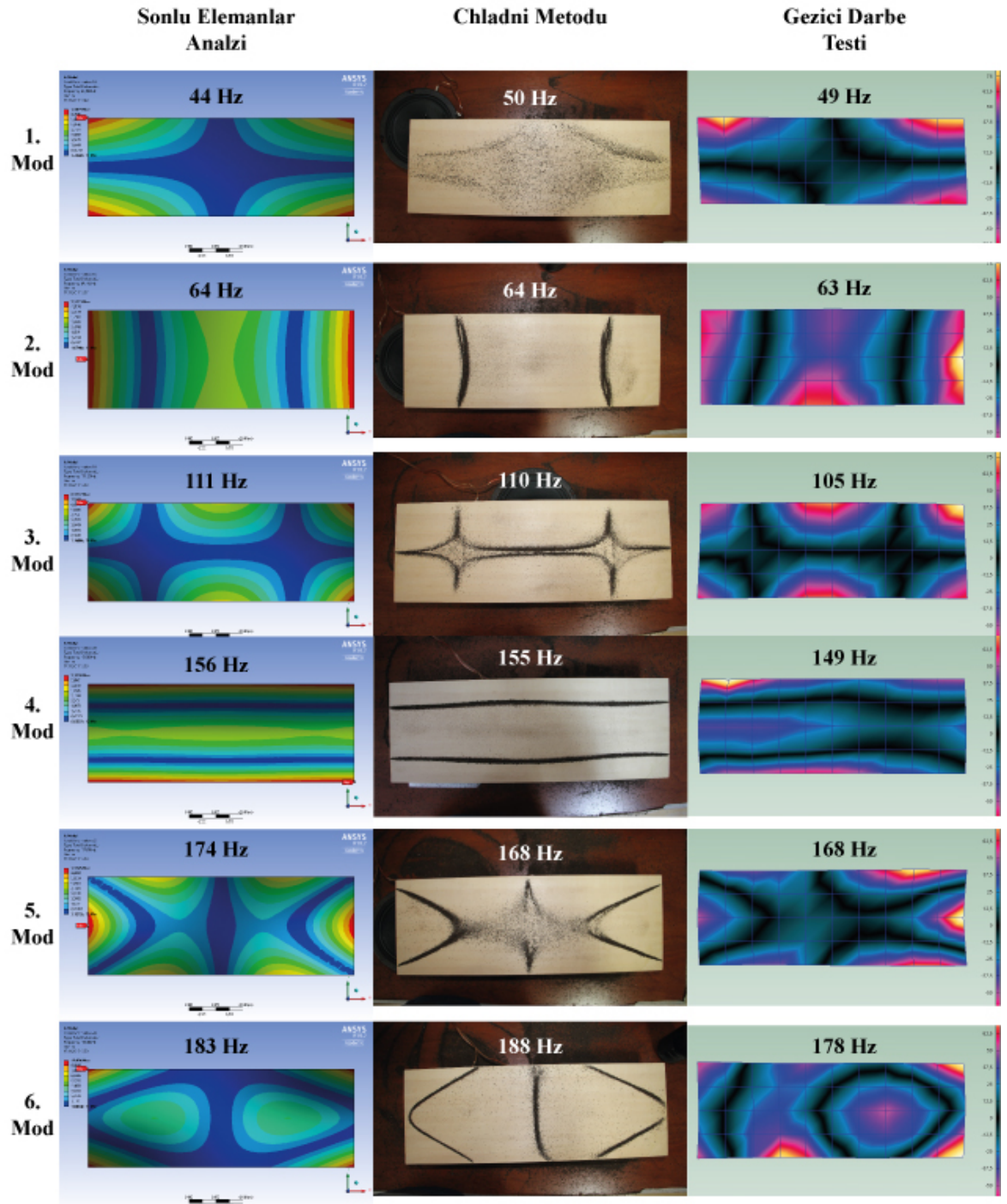
Şekil 7. Tap-Ton metodu ölçüm düzeneği

BULGULAR

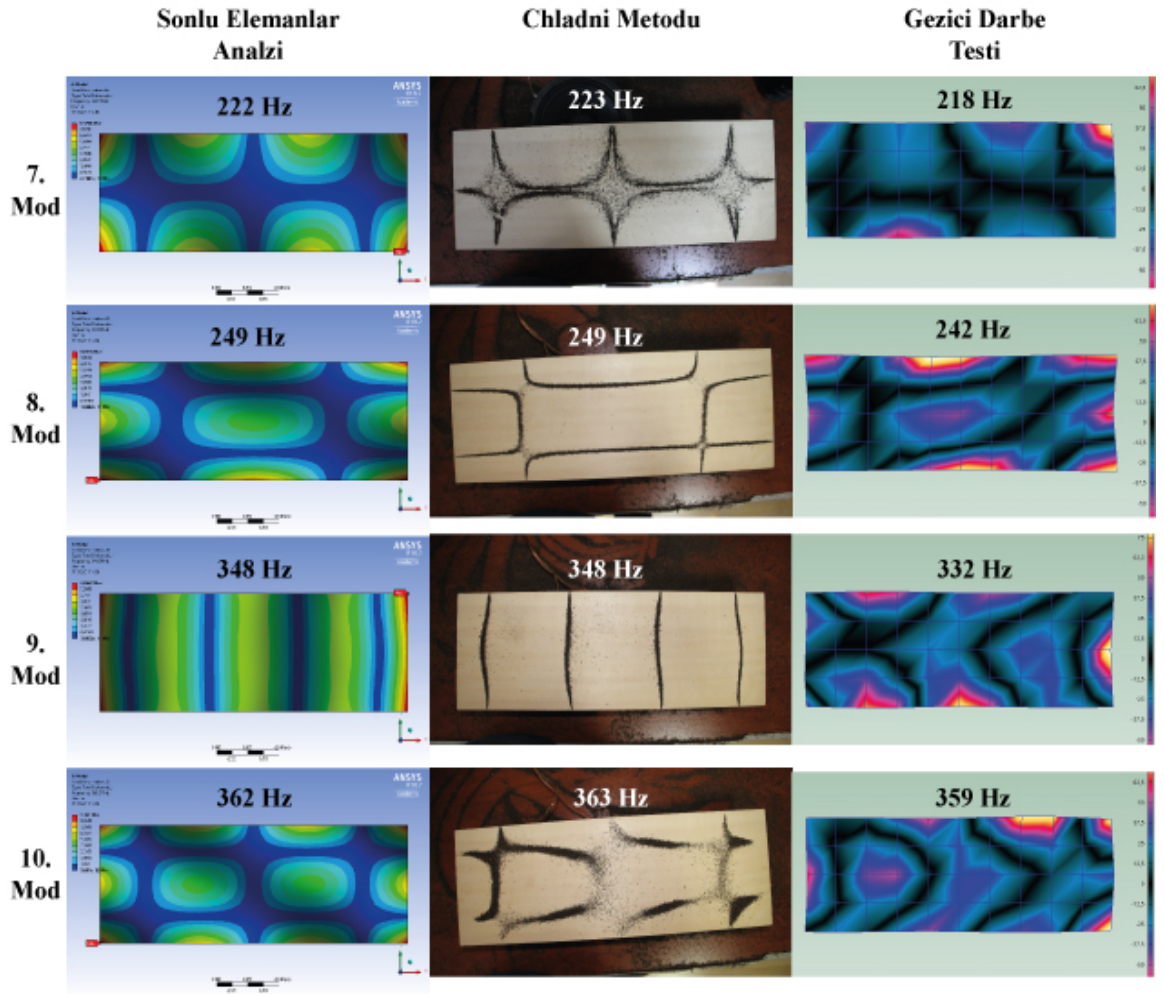
Bu çalışmada çalgı yapımcılığında kullanılabilir titreşim analiz yöntemleri ele alınmıştır. Bu amaçla, 504 mm boyunda 186 mm eninde ve 3 mm kalınlığında ladin ağacından bir plaka üzerinde çeşitli ölçümler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, yöntemlerin kullanım şekilleri ile birbirlerine göre üstün ve zayıf oldukları yönler bu bölümde belirtilmiştir.

İlk olarak mod şekillerinin ve doğal frekansların belirlendiği sonlu elemanlar analizi, Chladni metodu ve gezici darbe testinden elde edilen veriler incelenmiştir. Sonrasında tap-ton testi için iki farklı ölçüm türünden elde edilen sonuçlar tartışılmış ve çalgı yapım alanındaki kullanımları üzerine çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

Normal Mod Şekilleri Ve Doğal Frekansları



Şekil 8. Dikdörtgen plakanın üç farklı ölçüm yöntemiyle elde edilmiş mod şekilleri ve doğal frekansları.



Şekil 8. (devamı) Dikdörtgen plakanın üç farklı yöntemle elde edilmiş mod şekilleri ve doğal frekanslar.

Sonlu elemanlar analizi (FEA), Chladni metodu ve gezici darbe testi ile elde edilen mod şekilleri, doğal frekans değerleriyle birlikte Şekil 8’de verilmiştir. Özellikle FEA ile Chladni sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmüş, darbe testinden elde edilen sonuçlarda ise bazı farklar tespit edilmiştir. Buna göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

- Sonlu elemanlar analiz sonuçları deneysel verilerle oldukça yakın çıkmıştır. Bu durum çalgıların ses tablası gibi bölümlerinin, bilgisayar ortamında gerçeğine yakın modellenebildiğini göstermektedir. Böylece malzeme özellikleri ve yapısal değişimlerin, tablanın serbest titreşimleri üzerindeki etkilerini, model üzerinde dakikalar içinde görmek mümkün olacaktır. Bu şekilde bir çalışmanın, zaman ve malzemeden önemli kazanç sağlayacağı düşünülmektedir.
- Darbe testinden elde edilen sonuçlarda, diğer test yöntemlerine göre farklı değerler görülmüştür. Bu farklılıklar incelendiğinde, doğal frekanslarda düşüşler ve bazı mod şekillerinde kaymalar tespit edilmiştir. Sadece 5. Mod frekansında değişiklik olmamıştır. Bunun sebebin, darbe testi için tablaya yapıştırılan (tablanın sol alt köşesi) ivmeölçerin bu modun düğüm çizgisi üzerinde olmasıdır. Diğer tüm modlarda ise karın, yani titreşim bölgesinde denk gelmiştir. Yani titreşim bölgesine eklenen ağırlık nedeniyle 5 dışındaki tüm modların frekasları düşmüş, hatta 2. ve 6. Modlarda açıkça görülebileceği gibi düğüm çizgileri ağırlık eklenen bölgeye doğru kaymıştır. Bu tablanın serbest haldeyken ağırlık ve gerginlik değişimlerine çok duyarlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle birçok keman yapımcısı serbest tabla üzerinde çalışmayı tercih etmektedir. Ancak eklenen en küçük ağırlık titreşim davranışını etkilediğinden, bu aşama için Chladni metodunu kullanmak uygun olacaktır. Çünkü Chladni metodunda, gezici darbe testinde olduğu gibi yapıya herhangi bir ağırlık eklenmemektedir. Ancak mod şekillerinin ve doğal frekanslarının yanında, faz ilişkileri ve özellikle modların sönüm sabitleri elde edilmek istendiğinde, bu bilgileri ancak darbe testinden almak mümkün olacaktır. Bu durumda ise en uygun çözümün yapıya temas etmeyen lazerli ivme ölçer kullanmak en olduğu düşünülmektedir.

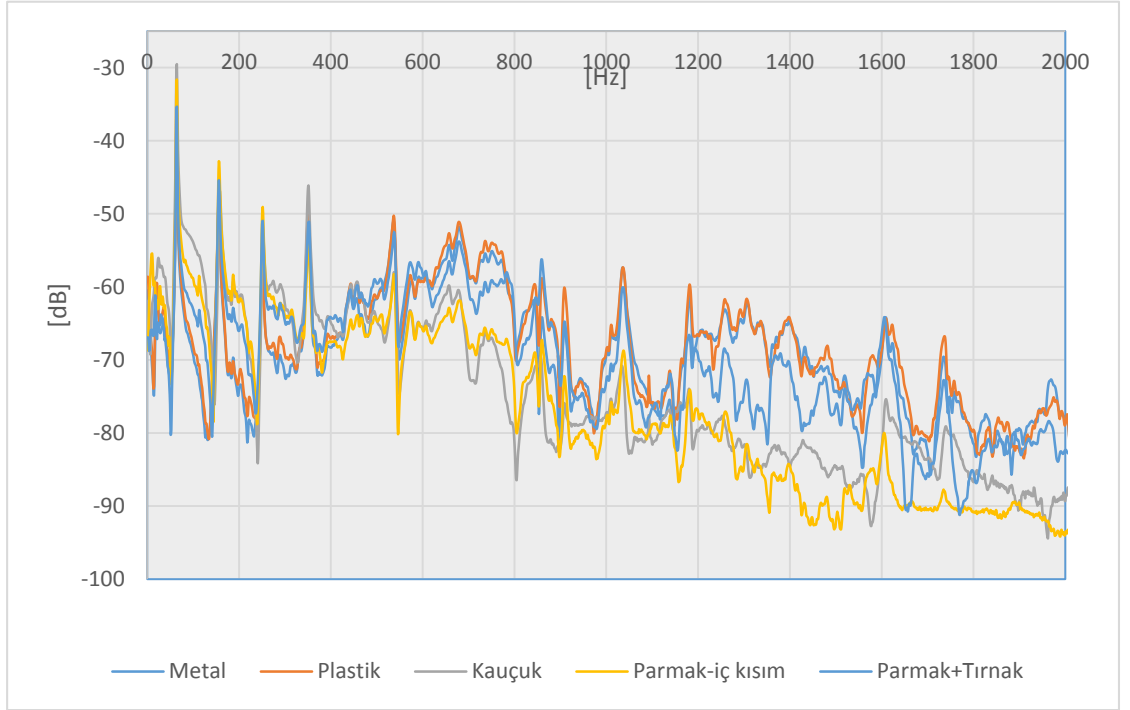
Deneysel uygulamalarda tercih edilen her yöntemin kendi içinde bazı güçlü ve zayıf olduğu noktalar vardır. Bu çalışmada, mod şekillerin görüntülenmesi amacıyla kullanılan sonlu elemanlar analizi, Chladni metodu ve gezici darbe testinin, bu bağlamda karşılaştırması aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 2’ye göre deneysel olarak hızlı sonuç alınabilen, herhangi bir ön çalışma gerektirmeyen ve düşük-orta fiyat aralığında kurulabilen Chladni test düzeneğinin, özellikle çalgı yapım atölyeleri için uygun olduğu düşünülmektedir. Bu yöntem, üretim sürecine çok kolay adapte olmakta, titreşim desenlerinin fotoğraflarının çekilmesi ve doğal frekansların not edilmesiyle, bilgiler kolaylıkla saklanabilmektedir.

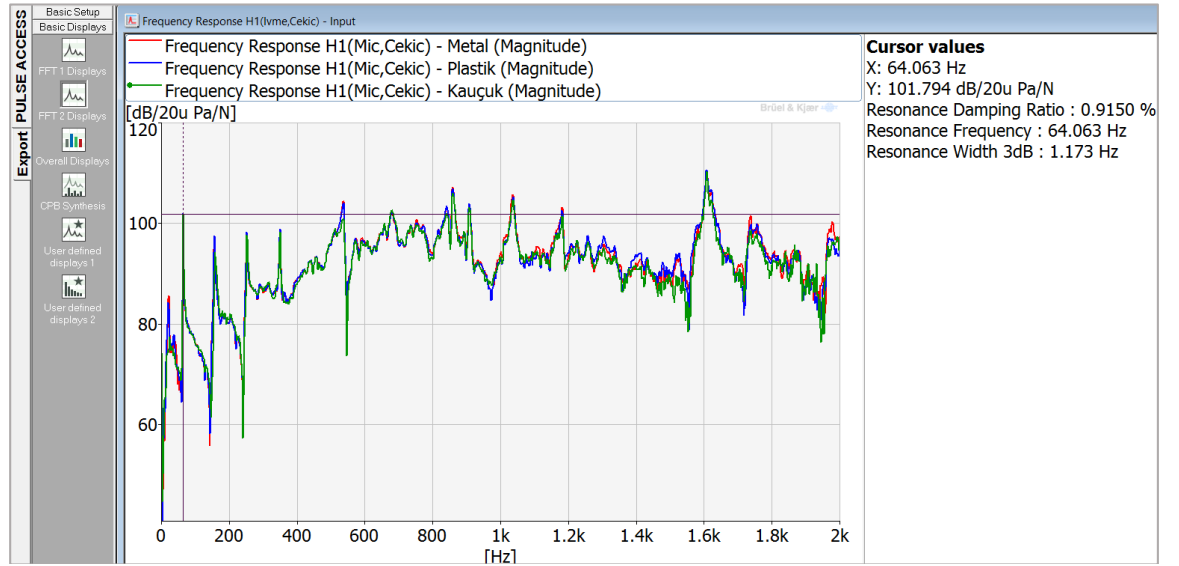
Tablo 2. Normal mod şekillerini görüntüleme yöntemlerinin karşılaştırılması

	Sonlu elemanlar Analizi	Chladni Metodu	Gezici Darbe Testi
Genel Ölçüm Sonuçları	Deney sonuçlarını almak çok hızlı ve pratiktir ancak ön çalışma gerektirir.	Deney sonuçlarını almak hızlı ve pratiktir. Herhangi bir ön çalışma gerekmez.	Deney sonuçlarını almak ölçüm nokta sayısına bağlı olarak zaman almaktadır. Ayrıca ön çalışma gerektirir.
Doğal Frekanslar	Malzemenin fiziksel özelliklerinin doğru şekilde girilmesi gereklidir, sonuçların doğruluğu büyük oranda buna bağlıdır.	Titreşimlerin en yoğun olduğu frekans değeri seçilmelidir, çünkü genellikle mod şekli belirli bir frekans bandında görülür.	Eğri uydurma yöntemiyle birçok farklı noktadan alınan ölçümleri karşılaştırarak doğal frekanslar belirlediğinden çok güvenilirdir. Ancak ivme ölçerin kütlesi nedeniyle yapıya uyguladığı etki göz önünde bulundurulmalıdır.
Mod şekilleri	Tüm titreşim davranışı değişik görüntüleme açılarından elde edilebilir. Yani titreşen bölgelerin birbirlerine göre konumları belirlenebilir.	Sadece titreşim yapan karın bölgeleri ile düğüm çizgileri gözlemlenebilir. Titreşim yapan bölgelerin birbirlerine göre konumları belirsizdir.	Tüm titreşim davranışı değişik görüntüleme açılarından elde edilebilir. Yani titreşen bölgelerin birbirlerine göre konumları belirlenebilir.
Maliyet	Orta	Düşük	Yüksek
Sonuç	Doğru modelleme ve malzeme bilgisi ile çok kısa zamanda birçok farklı tasarım denenebilir.	Özellikle çalgı yapım atölyelerinde hızlı sonuç almak için oldukça elverişlidir.	Bu sistem ile sadece mod şekli ve doğal frekansları değil aynı zamanda modların sönüm değerleri, faz farkları ve birçok modal özellik elde edilebildiğinden, çalgı akustiği araştırmaları için oldukça uygun bir yöntemdir.

Tap-ton test sonuçları



Şekil 9. Çeşitli sertlikte uçlarla ladin plakanın uyarılmasından elde edilen ses spektrumları (Audacity yazılımı)



Şekil 10. Çeşitli sertlikte uçlarla plakanın uyarılmasından elde edilen frekans tepki fonksiyonları (Pulse yazılımı)

Tablo 3. Tap-ton analizinden elde edilen ladin tablanın doğal frekansları

	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod	6. Mod	7. Mod	8. Mod	9. Mod	10. Mod
Ses Spektrumları	X	64	X	158	X	X	X	252	351	X
Frekans Tepki Fonksiyonu	X	64	X	156	X	X	X	251	350	X

Çalgı yapımında sıklıkla kullanılan tap-ton testi için, iki ölçüm sistemi üzerinden elde edilen sonuçlar grafik halinde incelenmiştir. Şekil 9'deki grafik Audacity tarafından elde edilen spektrum analiz sonuçlarını, Şekil 10'deki grafik ise Pulse tarafından hesaplanan FRF analiz sonuçlarını içermektedir. Her iki grafikte de, titreşim modlarının doğal frekansları hem birbirleriyle hem de diğer test sonuçlarıyla uyumlu olmasına rağmen tüm modlar görülmemektedir. Ayrıca grafikler arasında önemli büyüklük farkları bulunmaktadır. Buradan varılabilecek sonuçlar şu şekildedir;

- Tap-ton testinin her iki ölçüm yönteminden elde edilen sonuçlarında da sadece 2,4,8 ve 9. modların frekanslarına denk gelen pikler olduğu görülmektedir. Diğer modlar yapıda var olmalarına karşın uyarının yapıldığı merkez noktada düğüm çizgileri olduğu için yeterince uyarılamamıştır. Buradan iki önemli sonuca varılmıştır. Birincisi tap-ton testinde sistemin nereden tutulduğu ve sisteme nereden vurulduğunun büyük önemi vardır. Bu nedenle eğer titreşim şekli bilinen bir modu duymak ya da spektrum analizinde görmek istendiğinde, o modun düğüm çizgisinden tutmak ve karın bölgesinden vurmak gerekmektedir. Bu durum aynı şekilde tamamlanmış çalgılar için de düşünülebilir. Yani eşik eğer bir modun karın bölgesinde ise o mod tel tarafından daha kolay harekete geçirilebileceğinden bu mod ses oluşumuna katkı sağlayacaktır. Eğer eşik titreşim modunun düğüm çizgisinde ise bu modun uyarılması ve toplam sese katkısı çok daha az olacaktır.
- Her iki yöntemde de doğal frekans değerleri aynı ölçülmüştür (Tablo 3). Ancak Audacity ölçümlerini içeren grafikte eğrilerin büyüklükleri arasında farklar vardır. Burada her bir eğri farklı sertlikte bir uçla uyarılan tabladan elde edilen sesin spektrum analiz sonucunu göstermektedir. Şekil 9'deki grafik incelendiğinde 400 Hz'den sonra eğrilerde ayrışma ve özellikle kauçuk ve parmak içiyle yapılan vuruşların büyüklüklerinde düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeni, yumuşak malzemelerin yapıyı yüksek frekanslarda uyaramaması ve sonucunda bu frekans bölgesinden düşük titreşim cevabı elde edilmesidir. Bu etki darbe çekicinin farklı uçlarıyla yapılan test sonuçlarında açıkça görülmektedir. Bu nedenle Audacity kullanılarak spektrum analiz sonuçları incelenirken ve bilgiler depolanırken, uyarının hep aynı sertliğe sahip bir uçla yapılması, sonuçların daha karşılaştırılabilir olmasını sağlayacaktır. Ayrıca plastik gibi sert malzeme kullanımı, düşük frekanslardaki etkiyi değiştirmedeği gibi, üst frekanslı titreşimlerin daha net uyarılmasını sağlamaktadır.
- Şekil 10'deki grafik incelendiğinde ise farklı uca sahip darbe çekiciyle yapılan uyarılardan elde edilen sonuçların aynı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, ses spektrumdan farklı olarak bu yöntemden elde edilen sonuçlar, ses ölçümü yanında

aynı zamanda yapıya uygulanan kuvveti de içermekte ve sonuçlar birbirine oranlı olarak verilmektedir. Böylece farklı sertlikte yani farklı frekans aralığında uyarı yapılsa da bu bilgi hesaba katılarak sonuç elde edilmektedir. Bu uygulama, uyarıcının sonuç üzerindeki etkisi en aza indirdiği için oldukça detaylı ve güvenilir sonuçlar vermektedir.

Tablo 4. Tap-ton test yöntemlerinin karşılaştırılması

	Audacity Spektrum Analizi	Frekans Tepki Fonksiyonu
Genel Ölçüm Sonuçları	Deney sonuçlarını almak çok hızlı ve pratiktir.	Deney sonuçlarını almak çok hızlı ve pratiktir.
Doğal Frekanslar	Uyarının yapıldığı yere bağlı olarak doğrulukla elde edilebilir	Uyarının yapıldığı yere bağlı olarak doğrulukla elde edilebilir
Uyarı şekli	Uyarı sürecinde kuvvet ölçümü yapılamadığı için elde edilen sonuçlar yüksek oranda uyarıcının türüne bağlıdır	Uyarı sürecinde kuvvet ölçümü ayrı bir kanaldan yapılarak sonuçlar birim kuvvet üzerinden belirlenir. Böylece sadece yapının frekans cevabı alınır yani uyarıcı sonuçları etkilemez.
Uyarı şekli	Modların çok önemli özelliklerinde olan sönüm oranları doğrudan elde edilememektedir. Rezonans piklerinin dar(düşük sönümlü) veya geniş oluşu (yüksek sönümlü) belirli bir oranda fikir vermekte, değerlerin hesaplanması için ancak Matlab gibi farklı bir yazılıma ihtiyaç duyulmaktadır.	Modların sönüm değerleri grafiğin sağ bölümündeki sütunda görülebildiği gibi program tarafından otomatik olarak hesaplanabilmektedir
Maliyet	Düşük	Yüksek
Sonuç	Sürekli aynı uyarıcı cisim kullanıldığı takdirde, özellikle çalgı yapım atölyelerinde veri toplama ve depolama için elverişlidir.	Çalgı akustiğinde sadece frekans değerleri değil modların sönüm katsayıları da çok önemlidir. Bu sistem ile hem bu anlamda birçok özellik elde edilebilmekte hem de sonuçlar uyarıcıdan bağımsız olduğu için daha güvenli bir ölçüm olanağı sağlamaktadır.

Ortaya çıkan verilere göre top-tone ölçümünde test edilen iki analiz yönteminin karşılaştırması yukarıda ki tablo 4’de verilmiştir.

Elde edilen sonuçlar ve karşılaştırma tabloları incelendiğinde, çalgı yapım atölyeleri için Chladni metodu ve ses spektrumları üzerinden tap-ton testinin oldukça kullanışlı olduğu görülmektedir. Bu yöntemlerle, çalgı yapımında kullanılacak ağaç plakaların ya da çubukların doğal frekansları elde edilerek, elastikiyet hesapları kolaylıkla yapılabilmektedir (Değirmenli, 2014, s. 49-55). Tabla akordu olarak bilinen, yani serbest haldeki tablaların üretim sürecindeki kütle-gerginlik özelliklerinin ayarlanmasında, yine her iki yöntem de kullanılabilir (Hutchins, 1981). Ayrıca kemanın üretim sürecinde tuşesinin akortlanması ve daha birçok çalgının benzer uygulamalarında, tap-ton testinin kolaylıkla kullanılabilmesi görülmüştür.

SONUÇ

Bu çalışmada, çalgı yapımında kullanılan titreşim testleri ele alınmış, uygulama şekilleri ve kullanım amaçları hakkında bilgi verilmiştir. Çalgı yapım atölyeleri için hangi yöntemlerin daha uygun olduğunun araştırılması amacıyla, serbest titreşim koşullarındaki dikdörtgen bir ladin tabla üzerinde çeşitli ölçümler yapılmıştır. Ölçümlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, yöntemlerin üstün ve zayıf oldukları noktalar ortaya konmuştur. Buna göre Chladni metodunun ve ses spektrumu yöntemiyle elde edilen tap-ton testinin, uygulama kolaylığı ve maliyeti açısından, atölye ortamı için daha uygun olduğu görülmüştür. Çalışmada konu edilen modal analiz altyapısına sahip diğer ölçüm yöntemlerinin ise, çalgı akustiği laboratuvarlarında ve daha ayrıntılı ölçümlerde kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Bader, R. (2012). Radiation characteristics of multiple and single sound hole vihuelas and a classical guitar. *Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1), 819-828.
- Bakarezos, M., Gymnopoulos, S., Brezas, S., Orfanos, Y., Maravelakis, E., Papadopoulos, C. I., . . . Papadogiannis, N. A. (2006). *Vibration Analysis Of The Top Plates Of Traditional Greek String Musical Instruments*. Paper presented at the ICSV13, Vienna.
- Bozkır, B. (2002). *Bağlamada Malzeme Tını İlişkisi ve Dinamik Analizler*. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Curtu, I., Stanciu, M. D., Cretu, N. C., & Rosca, C. I. (2009). Modal Analysis of Different Types of Classical Guitar Bodies. *Amta '09: Proceedings of the 10th Wseas International Conference on Acoustics and Music: Theory and Applications*, 30-35.
- Değirmenli, E. (2014). *Akustik Ölçüm Teknikleri Kullanılarak Üretilen Ud Ses Tablasının Titreşim Özelliklerinin Kontrolü Üzerine Yeni Bir Yöntem Önerisi*. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü,

- Değirmenli, E. (2015). *Telli Çalgılarda Ses Tablası Titreşimlerinin Tını Üzerindeki Etkileri - Ud Örneği*. Paper presented at the VI. Uluslararası Hisarlı Ahmet Sempozyumu, Kütahya.
- Değirmenli, E. (2017). Türk Müziği Telli Çalgılarının Akustik Analizlerinde Kullanılan Yöntemler. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ*, 5(2), 23-35.
- Hutchins, C. M. (1981). The Acoustics of Violin Plates. *Scientific American*, 245(4), 170
- Hutchins, C. M. (1983). A History of Violin Research. *Journal of the Acoustical Society of America*, 73(5), 1421-1440.
- Lu, Y. (2013). *Comparison of Finite Element Method and Modal Analysis of Violin Top Plate*. (Unpublished Master's Thesis), McGill University Music Technology Area, Department of Music Research Schulich School of Music
- Marshall, K. D. (1985). Modal-Analysis of a Violin. *Journal of the Acoustical Society of America*, 77(2), 695-709.
- Molin, N.-E., Tinnsten, T., Wiklund, U., & Jansson, E. V. (1984). FEM-Analysis Of An Orthotropic Shell To Determine Material Parameters Of Wood And Vibration Modes Of Violin Plates. *STL-QPSR*, 25(4), 11-37.
- Paiva, G., & Dos Santos, J. M. C. (2014). *Modal Analysis of a Brazilian Guitar Body*. Paper presented at the ISMA 2014, Le Mans, France.
- Perry, I. (2014). *Sound Radiation Measurements On Guitars And Other Stringed Musical Instruments*. (Doctoral Thesis), Cardiff University, England.
- Richardson, B. (2010). *Mode Studies Of Plucked Stringed Instruments: Application Of Holographic Interferometry*. Paper presented at the Proceedings of the Second Vienna Talk, Vienna, Austria.
- Scheske, M. (2002). Empirical Tools in Contemporary Violin Making: Part I. Analysis of Design, Materials, Varnish, and Normal Modes. *CASJ*, 4(5 (series II)), 50-64.
- Schwarz, B. J., & Richardson, M. H. (1999). *Experimental Modal Analysis*. Paper presented at the CSI Reliability Week, Orlando, Florida.
- Taçoğlu, A. (1997). *Tanburda Kullanılan Ses Tablalarında Rezonans Bölgelerinin İncelenmesi*. (Yayımlanmamış Yüksek Mühendislik Tezi), Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Tetik Işık, S., & Uslu, R. (2012). Türk Müziğinde Ağaç ve Çalgı Yapım Bibliyografyası. *Acta Turcica*, 4(2-2), 24-41.

Tetik Işık, S. (2015). Türkiye'de Organoloji Çalışmaları. *Mukaddime*, 6(1), 210.

Yılmaz, S., & Belenli, İ. (2011). *Kanun'da Ses Tablası Kalınlığının Tını Üzerine Etkisinin Analizi*. Paper presented at the 9. Ulusal Akustik Kongresi, Ankara.

Zeren, A. (2007). *Müzik Fiziği*. İstanbul: Pan Yayıncılık.