



**EL TELSİZLERİNDE KUTU TASARIMININ HOPARLÖR AKUSTİK
PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN SAYISAL VE DENEYSEL
ANALİZİ**

Ahmet Selim ERGÜN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet Selim ERGÜN

16/09/2022

EL TELSİZLERİNDE KUTU TASARIMININ HOPARLÖR AKUSTİK PERFORMANSI
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN SAYISAL VE DENEYSEL ANALİZİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet Selim ERGÜN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2022

ÖZET

Taşınabilir el cihazlarının gelişimi ile beraber elektronik cihazlarda küçülme ihtiyacı doğmuştur. Elektronik cihazlardaki bu küçülme ihtiyacının sonucunda cihazlarda kullanılan hoparlörler de küçülmüştür. Hoparlörlerdeki küçülmeler SPL davranışının bozulmasına ve dolayısı ile melodik seslerin elde edilmesinin zorlaşmasına neden olmaktadır. Teknolojik gelişmeler sonucunda daha küçük hoparlör kullanarak daha küçük cihazlar üretmek ve bu cihazlarda melodik seslerin elde edilmesi önemli bir tasarım hedefi haline gelmiştir. Ayrıca elektronik devre elemanlarındaki teknolojik gelişmelerden dolayı da daha sıkı kart dizgileri mümkün hale gelmiş ve bunun sonucunda daha küçük boyutlu kart üretimi yapılabilmesinin önü açılmıştır. Bu gelişmeler neticesinde daha kompakt ve küçük boyutlarda cihaz tasarımı yapılması ihtiyacından dolayı cihazların hoparlör önü ve iç tasarımları kritik bir süreç haline dönüşmüştür. Taşınabilir el cihazlarında ürün doğrudan kullanıcının elinde kullanıldığı için özellikle cihaz kalınlığının ergonomik tutuşu sağlayabilecek ölçüde olması gerekmektedir. Kullanıcı istekleri de göz önüne alındığında cihaz kalınlıklarının küçültülmesi de hedeflenmektedir. Cihaz kalınlıkları azaltıldığında ise hoparlörün şaseye olan mesafesi, hoparlörün arka kısmı ile elektronik kartlar arasındaki mesafeler ciddi oranda azalmaktadır. Elemanlar arasındaki mesafelerin azalması akustik performansı önemli derecede etkilediğinden dolayı bu çalışmada bir el telsizinde hoparlör önündeki ön açıklık miktarı, ön açıklığın hoparlöre olan mesafesi, ön açıklığın kalınlığı, hoparlör ile kart arasındaki mesafe ve kart üzerinde açılan boşaltmaların cihaz akustik performansına olan etkileri incelenmiştir. İnceleme için taşınabilir el telsizi COMSOL programının akustik modülü kullanılarak modellenmiş ve sayısal olarak analiz edilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar akustik yankısız odada yapılan deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen verilerin yardımı ile tasarımda dikkat edilmesi gereken hususlar paylaşılmış ve tartışılmıştır.

Bilim Kodu : 91403
Anahtar Kelimeler : Hoparlör, akustik analiz, muhafaza parametreleri
Sayfa Adedi : 67
Danışman : Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY
İkinci Danışman : Dr. Akif Türker GÜRER

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF ENCLOSURE DESIGN IN
HAND-HELD RADIOS ON THE ACOUSTIC PERFORMANCE OF THE SPEAKER

(M. Sc. Thesis)

Ahmet Selim ERGÜN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2022

ABSTRACT

With the development of handheld radios, the need of smaller size electronics has arisen. Following this trend, speakers shank in size as well. The smaller size of speakers causes deterioration of SPL characteristics and results in difficulties of obtaining melodic sounds. In the light of technological advancements, by using smaller speakers, manufacturing smaller radios, and obtaining melodic sounds in these radios has become an important design objective. Furthermore, due to the advancements in electronic components, more dense PCB structures became possible, which led to smaller and denser PCB design. The need of smaller and compact products designs helped speaker front and interior design to become critical processes. Since the final handheld radio product is used directly in the hand, especially thickness of the product should be in range to satisfy ergonomics. When the customer's requirements are concerned, it is aimed to decrease the thickness of the parts. When such a decrease is performed, the distance of speaker to chassis and back side of the speaker to PCB (printed circuit board). Since the decreasing distance between the components effect the acoustic performance, in this study, the effects of front opening rate on the speaker, distance between speaker and front openings, thickness of front opening, distance between speaker and PCB and openings on the PCB on acoustic performance have been observed. For observation, a model is created by using acoustics module of COMSOL and has been numerically analyzed. Obtained numerical values were verified by experiments done in acoustics echo-less room. Depending on the obtained data, important design points has been shared and discussed.

Science Code : 91403

Key Words : Speaker, acoustic analysis, enclosure parameters

Page Number : 67

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Tuncay KARAÇAY

Co Supervisor : Dr. Akif Türker GÜRER

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sırasında akademik bilgi birimini paylaşması, yaşamış olduğum her türlü soruna yapıcı bir şekilde yaklaşıp çözüm bulması, çalışmalarımın tüm aşamasında bana destek olan tez danışmanım Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY'a, tecrübelerine başvurduğum ve bana her zaman yol gösteren Dr. Akif Türker Gürer ve Kazım Doğru'ya, değerli iş arkadaşlarıma, çalışmanın ortaya çıkabilmesine imkan sunan Gazi Üniversitesi ve ASELSAN A.Ş'ye, motivasyonumu yüksek tutup her zaman yanımda olan arkadaşlarıma, beni yetiştirip büyüten, desteklerini esirgemeyen, çalışmam sırasında her türlü destek veren ve sabrı gösteren, hayatın her aşamasında varlıkları ile bana güç veren saygıdeğer aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. SAYISAL ÇALIŞMALAR.....	11
3.1. Telsizin Modellenmesi	11
3.2. Hoparlörün Modellenmesi	15
3.3. Malzemelerin Tanımlanması.....	16
3.4. Hava ve Mükemmel Eşlenmiş Katman Alanlarının Tanımlanması.....	18
3.5. Elektromanyetik (Sürücü) Kuvvetin Tanımlanması	19
3.6. Problem Fiziğinin FEM Kullanılarak Tanımlanması.....	20
3.6.1. Akustik ortamın tanımlanması	20
3.6.2. Yapısal ortamın tanımlanması	24
3.7. Geometrilere İçin Çözüm Ağı Oluşturulması	27
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
5. BULGULAR, YORUMLAMA VE TARTIŞMA.....	35
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	55
KAYNAKÇA.....	57

	Sayfa
EKLER.....	59
EK-1. Frekansa bağılı olarak ölçülen indüktans ve direnç değerleri	60
EK-2. Ön kapak açıklık oranı sayısal- deneysel karşılaştırmalı sonuçlar ve hata oranları	62
EK-3. Ön kapak kalınlık etkisi sayısal- deneysel karşılaştırmalı sonuçlar ve hata oranları	63
EK-4. Ön kapak mesafe etkisi sayısal- deneysel karşılaştırmalı sonuçlar ve hata oranları	64
EK-5. Kart seviye etkisi sayısal- deneysel karşılaştırmalı sonuçlar ve hata oranları	65
EK-6. Kart boşaltma etkisi sayısal- deneysel karşılaştırmalı sonuçlar ve hata oranları .	66
ÖZGEÇMİŞ	67

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Doğrudan radyatör tipi hoparlörün kısımları.....	2
Çizelge 3.1. Hoparlörün teknik bilgileri	16
Çizelge 3.2. COMSOL programına tanımlanan hoparlör parametreleri	16
Çizelge 3.3. Bakır malzemenin COMSOL Multiphysics ortamında tanımlanması	17
Çizelge 3.4. Polietilen tereftalat (Mylar) malzemenin COMSOL Multiphysics ortamında tanımlanması	17
Çizelge 3.5. Dolgulu epoksi reçine malzemenin COMSOL Multiphysics ortamında tanımlanması.....	17
Çizelge 3.6. A333 (Sınıf 6) malzemesinin COMSOL Multiphysics ortamında tanımlanması.....	17
Çizelge 3.7. 6061 malzemenin COMSOL Multiphysics ortamında tanımlanması	17
Çizelge 3.8. Polikarbonat malzemenin COMSOL Multiphysics ortamında tanımlanması.....	18
Çizelge 3.9. Hava ortamının COMSOL Multiphysics ortamında tanımlanması.....	18
Çizelge 3.10. Elektromanyetik kuvveti elde etmek için COMSOL Multiphysics programına girilen parametreler	19
Çizelge 3.11. İç delikli levha sınır koşulu için COMSOL Multiphysics programına girilen parametreler	23
Çizelge 3.12. Elektromanyetik kuvvet bileşenleri	25
Çizelge 3.13. Çözüm ağı oluşturulurken kullanılan boyut ve parametreler	29
Çizelge 4.1. Rigol DG 5352 genel teknik bilgiler	31
Çizelge 4.2. B&K 2250 Light genel teknik bilgiler.....	31
Çizelge 4.3. Akustik yankısız oda genel teknik bilgiler	32

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Doğrudan radyatör tipi hoparlörün kesit görünüşü.....	1
Şekil 2.1. Sonsuz hoparlör ekranı tipi muhafaza	7
Şekil 2.2. Sonlu hoparlör ekranı tipi muhafaza.....	7
Şekil 2.3. Kapalı muhafaza	8
Şekil 2.4. Havalandırılmalı muhafaza.....	8
Şekil 2.5. Pasif radyatör tipi muhafaza	9
Şekil 2.6. İletim hattı tipi muhafaza.....	9
Şekil 2.7. Bant geçirici muhafaza	10
Şekil 3.1. Telsizin genel birimleri.....	11
Şekil 3.2. Ön açıklık miktarı denemelerinde kullanılan ön kapak parçaları.....	12
Şekil 3.3. Farklı kalınlıklardaki ön kapak parçaları.....	13
Şekil 3.4. Aralayıcı ile mesafeleri ayarlanabilen ön kapak parçaları.....	13
Şekil 3.5. Farklı seviyelere monte edilecek kartlar.....	14
Şekil 3.6. Kart-1 seviyesinde yer alan boşaltılmalı kartlar	15
Şekil 3.7. Hoparlörün genel birimleri	15
Şekil 3.8. Hava alanı ve mükemmel eşlenmiş katman.....	19
Şekil 3.9. Simetri sınır koşulu.....	21
Şekil 3.10. Diyaframın hareketsiz yüzeyine tanımlanan iç ses sert sınır (duvar) koşulu	22
Şekil 3.11. Muhafazanın iç yüzeyine tanımlanan iç ses sert sınır (duvar) koşulu	22
Şekil 3.12. Uzak alan sınır koşulu	23
Şekil 3.13. İç delikli levha sınır koşulu.....	24
Şekil 3.14. Ses bobini üzerine etkiyen elektromanyetik kuvvet	25
Şekil 3.15. Sabit kenar sınır şartı	25
Şekil 3.16. Serbest sınır şartı.....	26

Şekil	Sayfa
Şekil 3.17. Hoparlörün ses bobini kısmında yay tanımlanması.....	26
Şekil 3.18. Çözüm ağı oluşturulmuş geometrinin genel görünüşü	27
Şekil 3.19. Serbest dörtyüzlü eleman eklenen parçalar	27
Şekil 3.20. Sınır tabakası ağı eklenen kısımlar	28
Şekil 3.21. İnce sınır tabakası eklenen yüzeyler	28
Şekil 3.22. Mükemmel eşlenmiş katman üzerine çözüm ağı eklenmesi.....	29
Şekil 4.1. Deney düzeneğine ait şema görüntüsü	32
Şekil 5.1. Ön kapak açıklık miktarı sayısal sonuçlar.....	36
Şekil 5.2. %6 ön açıklık durumunda 2500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları....	36
Şekil 5.3. %30 ön açıklık durumunda 2500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları...	37
Şekil 5.4. %6 ön açıklık durumunda 5000 Hz değeri için akustik basınç sonuçları....	37
Şekil 5.5. %30 ön açıklık durumunda 5000 Hz değeri için akustik basınç sonuçları...	37
Şekil 5.6. Ön kapak açıklık miktarı deneysel sonuçlar.....	38
Şekil 5.7. Ön kapak kalınlık etkisi sayısal sonuçlar	39
Şekil 5.8. 2,5 mm ön kapak kalınlığı durumunda 3550 Hz değeri için akustik basınç sonuçları	40
Şekil 5.9. 0,5 mm ön kapak kalınlığı durumunda 3550 Hz değeri için akustik basınç sonuçları	40
Şekil 5.10. Ön kapak kalınlık etkisi deneysel sonuçlar	41
Şekil 5.11. Ön kapak mesafe etkisi sayısal sonuçlar	42
Şekil 5.12. 5 aralayıcılı ön kapak durumunda 2500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları	43
Şekil 5.13. Aralayıcısız ön kapak durumunda 2500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları	43
Şekil 5.14. 5 aralayıcılı ön kapak durumunda 5000 Hz değeri için akustik basınç sonuçları	44
Şekil 5.15. Aralayıcısız ön kapak durumunda 5000 Hz değeri için akustik basınç sonuçları	44
Şekil 5.16. Ön kapak mesafe etkisi deneysel sonuçlar	45

Şekil	Sayfa
Şekil 5.17. Kart seviye etkisi sayısal sonuçlar	46
Şekil 5.18. Kart 1 durumunda 2500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları	47
Şekil 5.19. Kart 4 durumunda 2500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları	47
Şekil 5.20. Kart 1 durumunda 4500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları	47
Şekil 5.21. Kart 4 durumunda 4500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları	47
Şekil 5.22. Kart seviye etkisi deneysel sonuçlar	49
Şekil 5.23. Kart boşaltma etkisi sayısal sonuçlar	50
Şekil 5.24. Az boşaltmalı kart durumunda 2500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları	51
Şekil 5.25. Çok boşaltmalı kart durumunda 2500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları	51
Şekil 5.26. Az boşaltmalı kart durumunda 4500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları	51
Şekil 5.27. Çok boşaltmalı kart durumunda 4500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları	51
Şekil 5.28. Az boşaltmalı kart durumunda 3150 Hz değeri için akustik basınç sonuçları	52
Şekil 5.29. Çok boşaltmalı kart durumunda 3150 Hz değeri için akustik basınç sonuçları	52
Şekil 5.30. Kart boşaltma etkisi deneysel sonuçlar	53

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Akustik yankısız oda içerisindeki genel görüntü.....	33
Resim 4.2. Deney düzeneği	33

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
atm	Atmosferik basınç
BL	Kuvvet faktörü
dB	Desibel
dBm	Desibel miliwatt
F_e	Elektromanyetik kuvvet
H	Henry
Hz	Hertz
K	Kelvin
Kg	Kilogram
kHz	Kilohertz
L_b	İndüktans
m	Metre
m/s	
m³	Metreküp
MHz	Megahertz
mm	Milimetre
mm²	Milimetrekare
N	Newton
P	
Pa	Pascal
ρ_c	Yoğunluk
P_t	Toplam basınç
q_d	Çift kutuplu kaynak
R_b	Direnç
Q	Kalite faktörü
S	Saniye
μHz	Mikrohertz

Simgeler**Açıklamalar** **μPa**

Mikropascal

 v

Hız

 V

Volt

 Wb

Weber

 Z_b

Empedans

 Ω

Ohm

 i

İmajiner kısım

 ω

Açısal frekans

Kısaltmalar**Açıklamalar****AWA**

Amalgamated Wireless (Australasia)

BEM

Boundary Element Method

EMA

Elektro Mekano Akustik

FEM

Finite Element Method

IRE

Institution of Radio Engineer

JAES

Journal of the Acoustical Society of America

SPL

Sound Pressure Level

THD

Total Harmonic Distortion

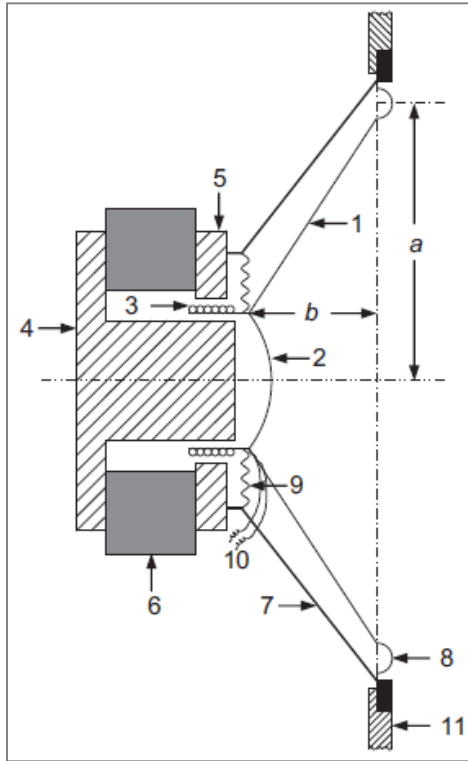
1. GİRİŞ

Hoparlörler, bir elektriksel giriş sinyaline yanıt olarak ses üreten dönüştürücülerdir [1].

Hoparlörler, elektriksel giriş sinyallerini titreşen bir diyafram aracılığıyla mekanik hareketlere çevirir, bu titreşimleri havaya bağlar ve böylece akustik dalgaları yayar [2].

İki ana hoparlör türü vardır. Bunlar; titreşen yüzeyin (diyafram) sesi doğrudan havaya yaydığı radyatör tipi hoparlörler ve diyafram ile hava arasına bir korna yerleştirilen korna tipi hoparlörlerdir. Doğrudan radyatör tipi hoparlörler mobil ve küçük tip cihazlarda kullanılırken, korna tipi hoparlörler büyük ses sistemleri ve anons sistemlerinde kullanılmaktadır [3].

Şekil 1.1’de tipik bir hoparlör sürücüsünün kesit görüntüsü verilmiştir. Hoparlörün kısımları ise Çizelge 1.1’de açıklanmıştır [3].



Şekil 1.1. Doğrudan radyatör tipi hoparlörün kesit görünüşü

Çizelge 1.1. Doğrudan radyatör tipi hoparlörün kısımları

Birim numarası	Birim Tanımı
1	Membran (diyafram)
2	Toz kapağı
3	Ses bobini
4	Kutup parçası
5	Kutup plakası
6	Kalıcı mıknatıs
7	Sepet
8	Diyafram eşiği
9	Süspansiyon (Örümcek)
10	Elektriksel bağlantılar
11	Sonsuz hoparlör ekranı

Tez çalışması kapsamında elektrodinamik (hareketli bobinli) hoparlör kullanılmıştır.

Elektrodinamik hoparlör kullanımı Rice tarafından alınan patente kadar dayanmaktadır [4].

Taşınabilir el cihazlarının gelişimi ile beraber elektronik cihazların küçülmesi ihtiyacı doğmuştur. Elektronik cihazlardaki bu küçülme ihtiyacının sonucunda cihazlarda kullanılan hoparlör gibi elemanların da küçülmesi zorunlu bir hale gelmiştir.

Resim 1.1'deki gibi büyük hoparlörlerde yer alan süspansiyon parçası kaldırılarak hoparlörler sadeleştirilebilir ve bunun sonucunda hoparlörler küçülebilir. Küçük hoparlörlerde diyafram hem radyatör olarak kullanılmakta hem de süspansiyon görevini yerine getirmektedir [5].

Taşınabilir el cihazlarında kullanılan hoparlörlerin küçülmesi hoparlörlerden elde edilen SPL değerlerinin azalmasına neden olmaktadır. Teknolojik gelişmeler sonucunda daha küçük hoparlör kullanarak daha küçük cihazlar üretmek ve bu cihazlardan daha yüksek seviyelerde SPL değerlerinin elde edilmek istenmesi önemli bir tasarım hedefi haline gelmiştir.

Elektronik devre elemanlarındaki teknolojik gelişmeler sonucunda daha sıkı kart dizgilerinin yapılması mümkün hale gelmiştir. Bu gelişmeler neticesinde daha kompakt ve

küçük boyutlarda cihaz içi tasarımı yapılması ihtiyacından dolayı cihazların iç tasarımları kritik bir süreç haline dönüşmüştür. Taşınabilir el cihazlarında ürün doğrudan kullanıcının elinde kullanıldığı için özellikle cihaz kalınlığının ergonomik tutuşu sağlayabilecek ölçüde olması gerekmektedir. Kullanıcı istekleri de göz önüne alındığında cihaz kalınlıklarının azaltılması hedeflenmektedir. Cihaz kalınlığındaki bu azalma hoparlör ile elektronik kartların birbirlerine yaklaşmasına neden olmaktadır. Hoparlörün arka kısmındaki boşluk akustik performansı etkilediğinden dolayı bu çalışmada cihaz içerisindeki kartların seviyeleri ve kart üzerinde hoparlörün arka kısmında yapılan boşaltmaların cihazın akustik performansına olan etkileri incelenecektir.

Cihaz içi tasarımın kritik olduğu kadar hoparlörün cihaz içerisindeki konumu (ön şase ile mesafesi), hoparlörün monte edildiği ön kısımdaki açıklık miktarı ve bu açıklıkların yer aldığı kısımdaki et kalınlığı da diğer önemli parametrelerdir. Bu çalışmada bu parametrelerin de akustik performansa olan etkileri detaylı olarak incelenecektir.

Bu çalışma sırasında FEM kullanılarak COMSOL programının akustik modülü ile akustik analizler yapılacak ve elde edilen sonuçlar akustik yankısız odada yapılacak deneysel ölçümler ile karşılaştırılacaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Hoparlörler ve akustik üzerine yayınlanan ilk kitaplardan biri Harry F. Olson tarafından hazırlanmış olan “Elements of Acoustical Engineering” kitabıdır [6]. Bu kitapta elektriksel eşdeğer devre, diferansiyel hareket denklemi, lineer olmayan süspansiyon için denklemler, bozulma ve süreksiz karakteristikleri, diyafram titreşimleri vb. gibi çeşitli hoparlör hususları incelenmiştir. Bu kitapta muhafaza tasarımı ile ilgili ayrıntıya girilmemiştir.

Beranek tarafından 1954 yılında “Acoustics” kitabı yayımlanmıştır [7]. Bu kitapta elektriksel eşdeğer devreler detaylı olarak tanımlanmış ve açık hoparlör ekranı, kapalı kutu hoparlör ekranı, bas yansıma ve diğer muhafaza çeşitleri ele alınmıştır.

1959 yılında Novak eşdeğer devreleri kullanarak kapalı kutu ve bas-yansıma kutuları tanımlamıştır [8]. Novak kutu tasarımları için rehber olacak Q değerlerini oluşturmuştur. Bas-yansıma kutusundaki bozulmanın kapalı kutudan daha az olduğunu öne sürmüştür.

Thiele bütün sistemi oluşturmak için hoparlör muhafaza modeli ile beraber ele alarak filtre teorisini öne sürmüştür. Hem transdüser hem de hoparlör parametrelerini kullanarak sistem frekans ve davranışının öngörülebileceğini belirtmiştir. Bu yöntem 1961 yılında AWA Konferansında sunulmuş ve aynı yıl IRE Avustralya Raporlarında yayımlanmıştır [9].

1966 yılında Novak tarafından “Designing A Ducted-Port Bass-Reflex Enclosure” isimli makale yayımlanmıştır [10]. Optimum hacim tasarımı olarak bilinen ve en iyi geçici performans ve maksimum verimliliğe ulaşmayı hedefleyen yöntemi detaylı olarak açıklamıştır. Yöntem eklenen açıklığın her zaman transdüserin serbest hava rezonansına ayarlanması gerektiğini öne sürmüştür.

Benson 1968-1972 yılları arasında hoparlör sistemleri ile ilgili AWA Teknik İncelemelerinde yayımlanan kapsamlı makaleler yazmıştır [11,12]. Bu makaleler “Theory&Design of Loudspeaker Enclosure” isimli kitabın temelini oluşturmaktadır.

Small tarafından 1969-1974 yılları arasında yapılan doktora çalışmalarının bulguları JAES’te yayımlanmıştır. Özellikle bas-yansıma kutuları ile ilgili 1973 yılındaki makaleleri

[13,14] ilgi çekerek büyük bir başarı kazanmıştır. Bu makalelerde yer alan yöntemleri halen geçerliliğini korumaktadır.

Shiah ve arkadaşları muhafaza hacmi (arka hacim), ön açıklık miktarı, diyafram kalınlığı, ses bobini kütlesi ve hoparlörün iç boşluğu gibi farklı parametrelerin akustik performansa olan etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada EMA yöntemi kullanılarak elektrik ve akustik sinyaller mekanik sinyallere çevrilerek tek bir ortamda incelenmiştir. Entegre edilmiş EMA, seri-paralel devrelerin birleşimi şeklinde ifade edilerek bütün hoparlör parametreleri LMS paket uygulamasında nümerik olarak hesaplanmıştır. Nümerik sonuçları doğrulamak amacı ile yankısız odada deneyler yapılmıştır [15].

Büyük hoparlörlerde kullanılan süspansiyon mikro hoparlörlerde kullanılmadığı ve diyafram ses radyatörü görevinin yanı sıra süspansiyon görevini de yerine getirdiğinden dolayı diyafram tasarımı mikro hoparlörlerin genel davranışları ve performansları için önem arz etmektedir. Bai ve arkadaşları mikro hoparlörlerdeki diyafram tasarımının optimizasyonu ile ilgili çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada FEM ve EMA'nın kombine edildiği hibrit yaklaşım kullanılmıştır. FEM kullanımı ile diyafram-ses bobininin mekanik empedansı hesaplanırken diyaframın küçük detayları da dikkate alınabilmektedir [5].

Onishi ve arkadaşları ses deliği konumu, titreşim ve akustik boşluk (ön ve arka hacim) gibi parametrelerin akustik performans üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda EMA yaklaşımını kullanmışlardır [16].

Zhong ve arkadaşları muhafaza duvarı titreşiminin mikro hoparlör sistemlerinin frekans tepkisi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Muhafaza duvarı titreşimini ve akustik frekans tepkisini hesaplamak için hem analog bir devre modeli hem de FEM-BEM modeli kullanmışlardır. Simülasyonlar, titreşim ölçümü ve akustik frekans tepkisi ölçümü ile doğrulanmıştır. Son olarak bozulmaların nasıl azaltılabileceğini göstermek için gerçek tasarım modelinin muhafaza duvarındaki değişikliklerden önceki ve sonraki halini ölçmüşlerdir [17].

Chang ve Wang mobil cihazlar için ön ve arka hacim, ön açıklık oranı ve ön açıklığın konumu gibi değişik muhafaza parametrelerinin hoparlör akustik performansı üzerindeki etkisi ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarda iki yöntem kullanılmıştır. Bunlardan

ilki muhafaza etkisinin dağıtım modeli ile birlikte mikro hoparlörün EMA modelidir. İkincisi ise muhafaza parametrelerine sahip mikro hoparlörün dağıtım modelinin hesaplanmasında diyafram detaylarını dikkate alır. Çalışmada simülasyonlar deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır [18].

Hoparlör muhafaza tipleri ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar bu kısımda ele alınacaktır.

Sonsuz hoparlör ekranı teorik bir konsepttir. Hoparlör sonsuza kadar uzandığı varsayılan düz bir plakaya monte edilir. Bu konseptte hoparlörün önünden ve arkasından gelen radyasyonlar birbirlerinden tamamen izoledir ve bundan dolayı herhangi bir kırınım yoktur (mekanik ve akustik olarak rezonans oluşturacak herhangi bir duvar yoktur) [1].



Şekil 2.1. Sonsuz hoparlör ekranı tipi muhafaza

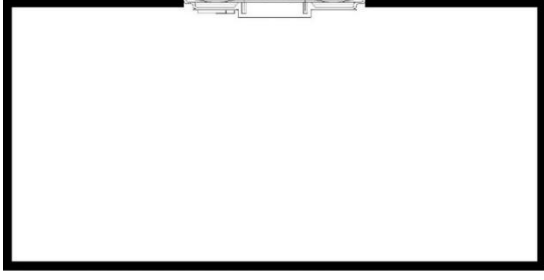
Sonlu hoparlör ekranı yapısında hoparlör sonlu boyuta sahip bir yapıya monte edilir. Yapı sonlu olduğu için hoparlörün önünden ve arkasından gelen radyasyonlar birbirlerinden izole değildir. Bundan dolayı kırınım mevcuttur.

Bir bölmenin kenarlarında meydana gelen akustik kırınım olayı hem deneysel hem de teorik olarak incelenmiştir [19].



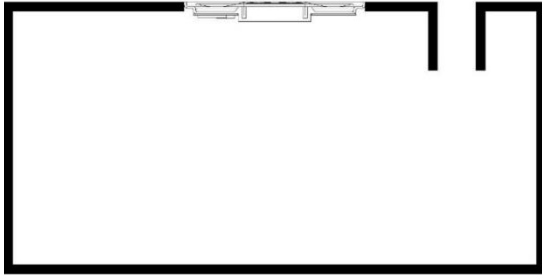
Şekil 2.2. Sonlu hoparlör ekranı tipi muhafaza

Hoparlör kapalı bir kutu içerisine monte edilir. Kapalı kutu muhafazada hoparlörün arkasından gelen radyasyon hoparlörün önünden gelen radyasyondan izoledir. Ancak hoparlörün arkasındaki radyasyon iç yansımalar ile diyaframın içerisinden sekebilir veya kutu tarafından ikincil titreşimleri oluşturabilir [20].



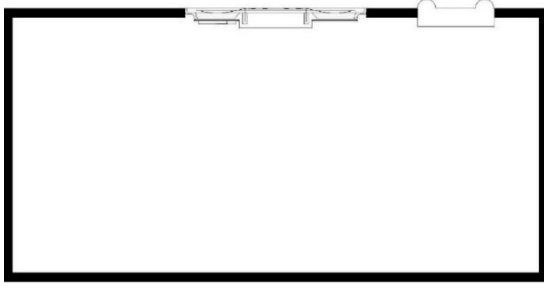
Şekil 2.3. Kapalı muhafaza

Kapalı hoparlör kutusunda bir delik açılırsa kutu içerisinde yer alan hava bir yay gibi hareket etme yeteneğini korurken, delikteki hava başka bir piston gibi hareket eder. Bu hava pistonu bazı frekanslarda diyafram ile aynı fazda bazılarında ise faz dışında titreşir. Üzerinde delik bulunduran kutu Hemholtz rezonatörü olarak da bilinen rezonatör davranışı gösterir. Eklenen açıklığın genişliği veya uzunluğu değiştirilerek kutunun frekans davranışları belirlenebilir [21].



Şekil 2.4. Havalandırılmalı muhafaza

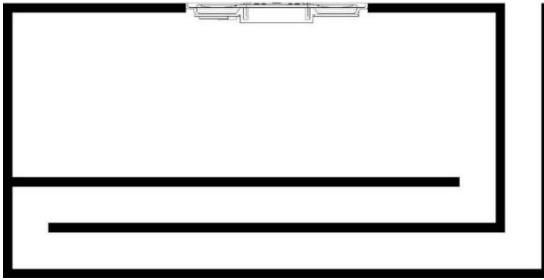
Havalandırılmalı kutularda açıklıktaki partikül hızının nispeten düşük olacağı şekilde geniş kesit alanına sahip bir açıklık sağlamak zordur. Eğer açıklığın uzunluğu yeteri miktarda uzatılırsa açıklıkta istenilen atalet oluşturulabilir. Bu yapıldığında ise açıklık çok fazla uzar ve viskoziteden kaynaklanan kayıplar artar. Bu tip zorlukları ortadan kaldırmak amacı ile pasif radyatörler kullanılabilir. Pasif radyatörler ile havalandırılmalı kutulara göre daha geniş frekans aralığında daha büyük çıkış elde edilebilir. Bunun nedeni pasif radyatörlerde açıklıkta meydana gelen kayıpların daha az olmasıdır [22].



Şekil 2.5. Pasif radyatör tipi muhafaza

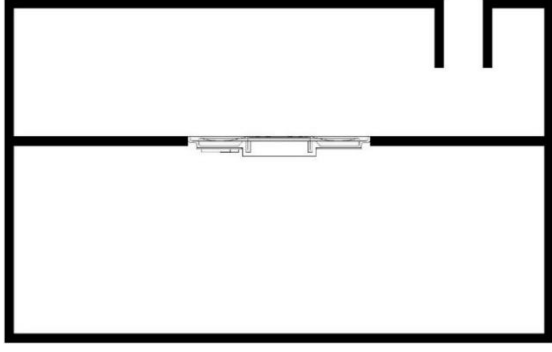
İletim hattı, hoparlör tarafından üretilen arka dalgaları alıp fazlarını tersine çevirerek ön dalgalar ile birleştirmek için onları hoparlörün önüne geri atar.

İletim hattı tipi muhafazaların diğer muhafaza tiplerine göre dezavantajı ses dalgalarının çıkış kısmından kaynağa doğru geri yansımasıdır. Bu durumu ortadan kaldırmak için iletim hattı boyunca akustik olarak sönümleyici malzeme döşenir [23].



Şekil 2.6. İletim hattı tipi muhafaza

Hoparlör sürücüsü muhafazanın içerisine muhafazayı iki farklı bölmeye ayıracak şekilde monte edilir. Sürücünün arka kısmı kapalı muhafaza, ön kısmı ise havalandırılmalı muhafaza şeklindedir. Hoparlörün arkası kapalı kutu olduğundan dolayı ön kısma radyasyon gelmemektedir. Bant geçirici muhafazalarda arka kısma açıklık eklenerek bant geçirici muhafazanın derecesi değiştirilebilmektedir [1].

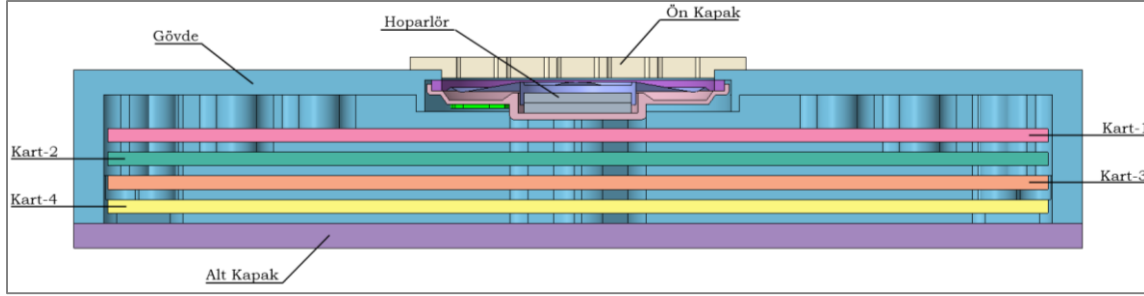


Şekil 2.7. Bant geçirici muhafaza

3. SAYISAL ÇALIŞMALAR

3.1. Telsizin Modellenmesi

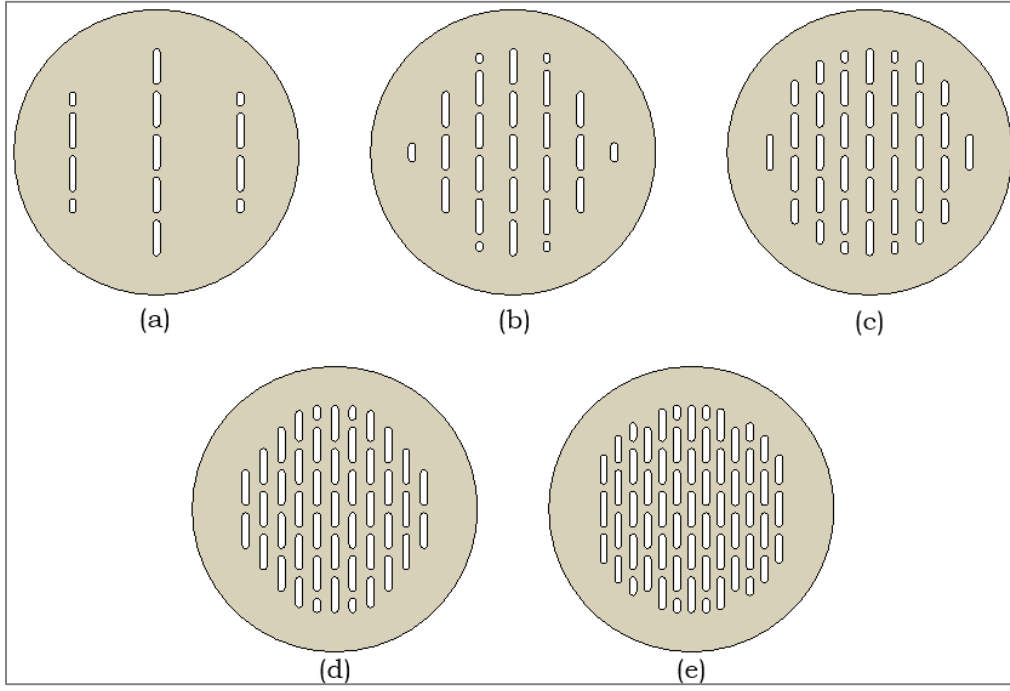
Akustik analizlerde ve deneyde kullanılmak üzere Şekil 3.1’de gösterilen telsiz tasarımı yapılmıştır.



Şekil 3.1. Telsizin genel birimleri

Telsiz çalışmalar kapsamında yapılacak olan denemelerin rahatlıkla yapılabilmesi için modüler bir yapıda tasarlanmıştır. Telsiz gövdesi üzerinde dört farklı kart seviyesinin de denenebilmesi için dört farklı kart oturma yüzeyleri oluşturulmuştur. Hoparlörün ön tarafında yapılacak olan denemelerin daha kolay ve rahat yapılabilmesi için açıklıkların yer aldığı farklı ön kapak tasarımları yapılmıştır.

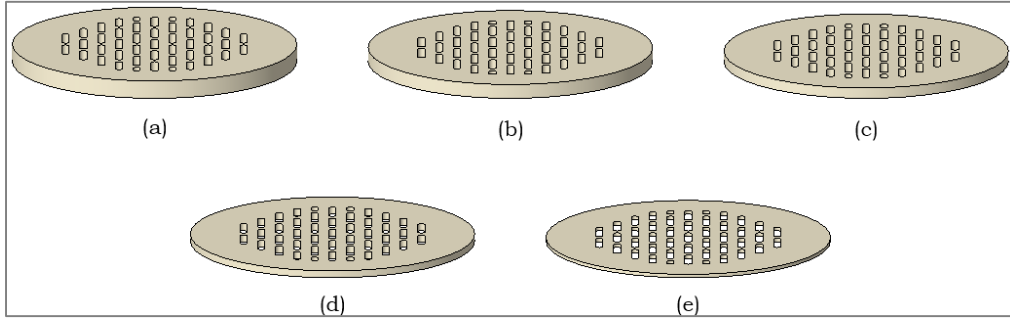
Hoparlörün ön kısmında yer alan şase üzerinde yer alan açıklıkların hoparlörün akustik performansına olan etkisini incelemek için Şekil 3.2’de gösterilen ön kapak parçaları tasarlanmıştır.



Şekil 3.2. Ön açıklık miktarı denemelerinde kullanılan ön kapak parçaları

Hoparlörün ön kısmındaki açıklık oranları hoparlör diyafram alanı yüzdesine göre belirlenmiştir. Resim 3.2’de (a), (b), (c), (d) ve (e) parçaları sırası ile %6, %12, %18, %24 ve %30 açıklık değerine sahiptir. Parçaların kalınlıkları 1,50 mm değerindedir. Ön açıklık parçalarında açıklık genişliği ise 1,00 mm değerine sahiptir. Bu değer seçilmesinin nedeni cihazların BS standardına uygun olarak 1 mm değerinden büyük katı nesnelere karşı koruma sağlamasıdır [24].

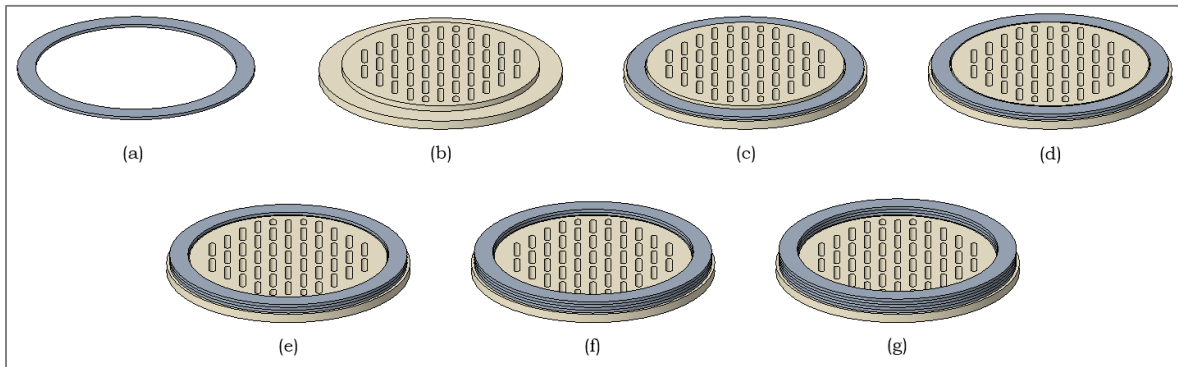
Rose hoparlör önünde açılması gereken açıklık oranının diyafram alanının en az %20’si olması gerektiğini belirtmiştir [25]. Yapılan tasarım çalışmalarında hem mekanik dayanım (açılan detayların kalınlığı vb.) hem de üretilebilirlik kısıtları da göz önüne alınarak ön açıklık ile ilgili denenecek olan diğer parametrelerde ön açıklık değeri %24 olacak şekilde devam edilmiştir. Hoparlörün ön kısmında yer alan şasenin kalınlığının hoparlörün akustik performansına olan etkisini incelemek için Şekil 3.3’te gösterilen ön kapak parçaları tasarlanmıştır.



Şekil 3.3. Farklı kalınlıklardaki ön kapak parçaları

Şekil 3.3'te (a), (b), (c), (d) ve (e) parçalarının kalınlıkları sırası ile 2,5 mm, 2,0 mm, 1,5 mm, 1,0 mm ve 0,5 mm değerine sahiptir.

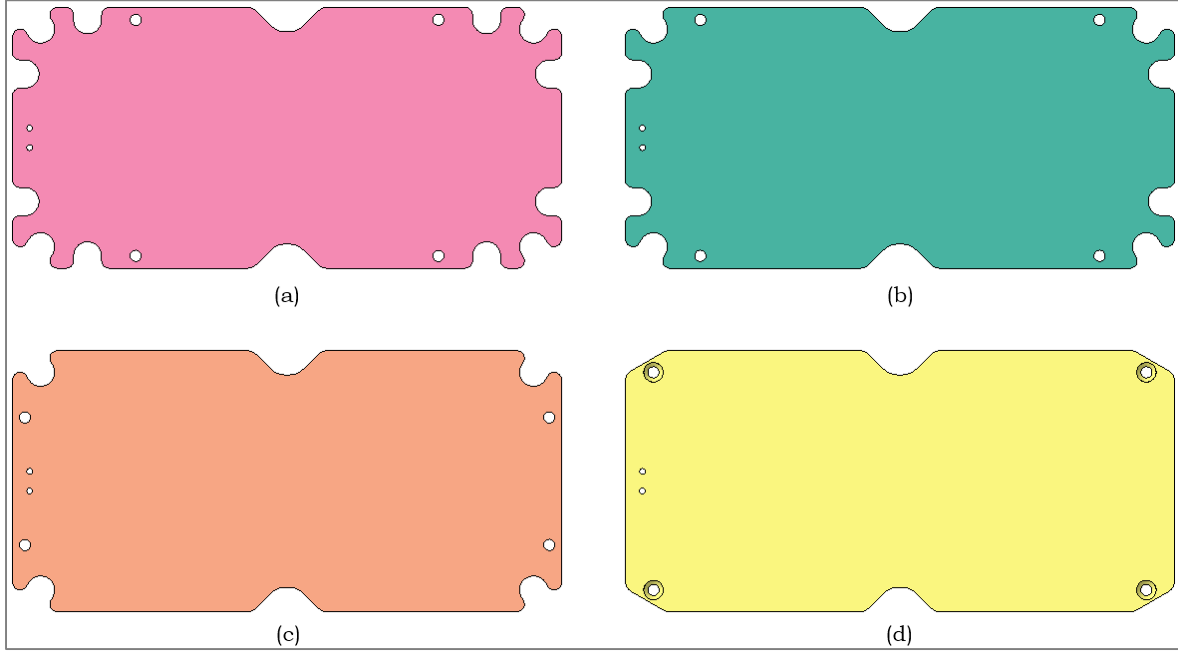
Hoparlörün ön kısmında yer alan şasenin hoparlör diyaframına olan mesafesinin hoparlörün akustik performansına olan etkisini incelemek için Şekil 3.4'te gösterilen ön kapak ve aralayıcı parça tasarlanmıştır. Aralayıcı parçaların kullanımı ile ön kapak parçasının hoparlör diyaframına olan mesafesi ayarlanabilmektedir. Faturalı ön kapağın hoparlör diyaframına olan mesafesi 0,44 mm değerindedir. Tasarlanan aralayıcının kalınlığı ise 0,50 mm değerindedir. Aralayıcı kullanılarak hoparlörün diyaframına olan 0,44 mm, 0,94 mm, 1,44 mm, 1,94 mm, 2,44 mm ve 2,94 mm mesafeleri incelenebilmektedir.



Şekil 3.4. Aralayıcı ile mesafeleri ayarlanabilen ön kapak parçaları

Şekil 3.4'te (a), (b), (c), (d), (e), (f) ve (g) parçaları sırası ile aralayıcı, faturalı ön kapak, tek aralayıcılı ön kapak, iki aralayıcılı ön kapak, üç aralayıcılı ön kapak, dört aralayıcılı ön kapak ve beş aralayıcılı ön kapaktır.

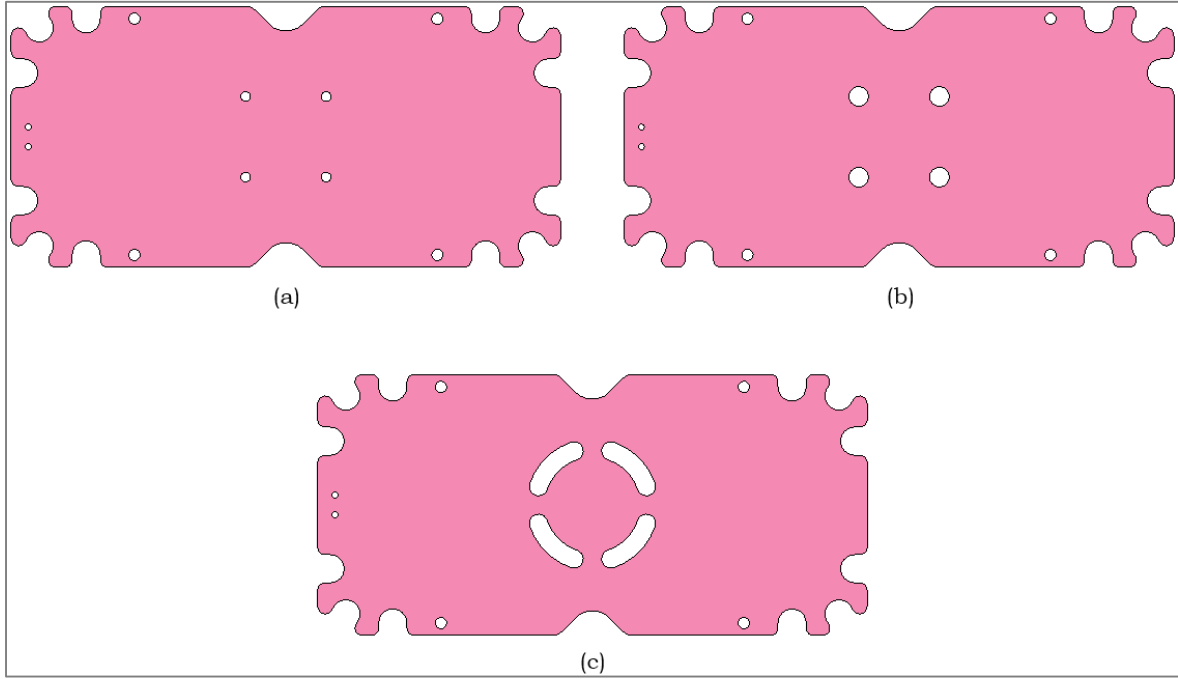
Hoparlörün arkasında yer alan kartların hoparlörün akustik performansına olan etkisini incelemek için Şekil 3.5'te gösterilen farklı seviyelerdeki kartlar tasarlanmıştır.



Şekil 3.5. Farklı seviyelere monte edilecek kartlar

Şekil 3.5'te (a), (b), (c) ve (d) sırası ile kart-1, kart-2, kart-3 ve kart-4 parçalarıdır. Kart-1 parçasının ön şaseye mesafesi 4,0 mm ve hoparlör ile en yakın mesafesi 1,10 mm değerindedir. Her bir kartın kalınlığı 1,60 mm değerindedir. Ayrıca her bir kart arasındaki mesafe ise 1,20 mm değerindedir.

Kart-1 parçasının monte edildiği seviye hoparlöre çok yakın olduğu için bu seviyede Şekil 3.6'da gösterilen boşaltmalı kartlar tasarlanmıştır.

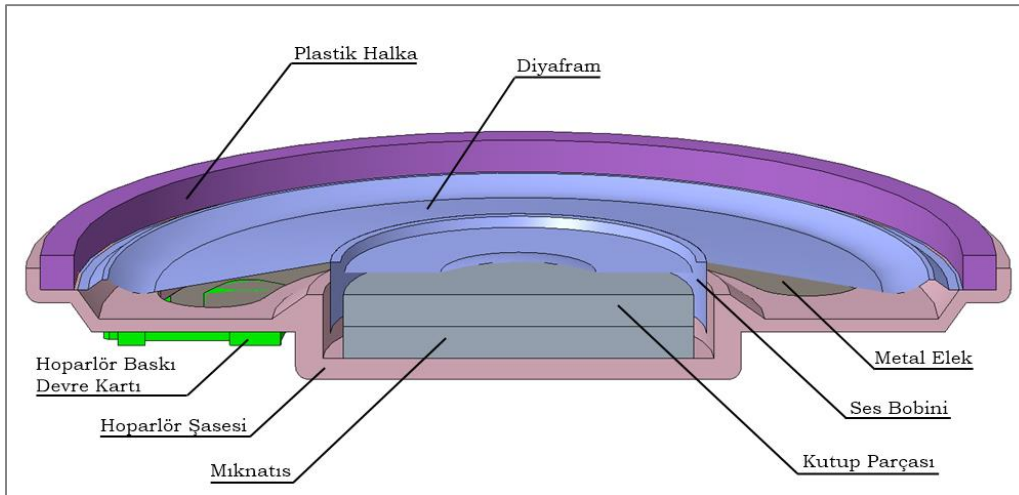


Şekil 3.6. Kart-1 seviyesinde yer alan boşaltmalı kartlar

Şekil 3.6’da (a), (b) ve (c) sırası ile kart-1 az boşaltmalı, kart-1 orta boşaltmalı ve kart-1 çok boşaltmalı parçalarıdır. Hoparlörün arkasında yer alan hava açıklıklarına denk gelecek şekilde yapılan boşaltmaların boyutları sırası ile 2,0 mm, 4,0 mm ve 3,75 mm değerindedir. Açıklıkların alanları ise sırası ile $12,6 \text{ mm}^2$, $50,25 \text{ mm}^2$ ve $203,5 \text{ mm}^2$ değerindedir.

3.2. Hoparlörün Modellenmesi

Akustik analizlerde ve deneyde kullanılan hoparlör Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Hoparlörün genel birimleri

Kullanılan hoparlör VECO firmasının bir hoparlördür. Hoparlöre ait genel teknik bilgiler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Hoparlörün teknik bilgileri

Tanım	Değer
Dış boyutu (çap)	36,5 mm
Ağırlık	8,2 mm
Yükseklik	4,8 mm
Nominal özgül güç	1,5 Watt
Çıkış SPL değeri	92±3 dB (@ 1 Watt x 0,5 m)
Bozulma	%5 maks. (@ 1 Watt x 0,5 m)
Frekans aralığı	0-1,4e4 Hz

Ses bobini direnç ve indüktans olarak modellenenbilir. Ses bobininin empedansı Eş 3.1’deki gibi yazılabilir.

$$Z_b = R_b + i. \omega. L_b \quad (3.1)$$

Direnç ve indüktans frekansa bağlı olarak değişmektedir. VECO firmasından yapılan talep neticesinde direnç ve indüktans değeri deneysel olarak ölçülmüş ve elde edilen değerler EK-1’de paylaşılmıştır. Hoparlör ile ilgili COMSOL programına tanımlanan parametreler Çizelge 3.2’de yer almaktadır.

Çizelge 3.2. COMSOL programına tanımlanan hoparlör parametreleri

Parametre tanımı	İfade	Değer	Açıklama
V0	4[V]	4 V	Sürücü voltajı
BL	5,633[N/A]	5,633 Wb/m	Kuvvet faktörü
f_loss	676,7[Hz]	676,6 Hz	Kayıp faktörünün frekansı
omega_loss	2*pi*f_loss	4251,8 Hz	Kayıp faktörü açısal frekansı
lambda_min	343[m/s]/6000[Hz]	0,057167 m	6000 Hz’deki dalga boyu

3.3. Malzemelerin Tanımlanması

Çalışmalar kapsamında kullanılan gövde, ön kapak, kart ve alt kapak parçalarının malzemesi 6061 serisi alüminyum malzemedir. Hoparlörün alt parçaları olan plastik halka,

diyafram, hoparlör baskı devre kartı, hoparlör şasesi ve ses bobininin malzemeleri sırası ile polikarbonat, polietilen tereftalat (mylar), dolgulu epoksi reçine, A333 (Sınıf 6) ve bakırdır.

COMSOL Multiphysics programına tanımlanan malzeme parametreleri Çizelge 3.3-3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Bakır malzemenin COMSOL Multiphysics ortamında tanımlanması

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	8960	kg/m ³
Young Modülü	110e9	Pa
Poisson Oranı	0,35	1

Çizelge 3.4. Polietilen tereftalat (Mylar) malzemenin COMSOL Multiphysics ortamında tanımlanması

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	$\rho(T[1/K])$	kg/m ³
Young Modülü	$E(T[1/K])$	Pa
Poisson Oranı	0,38	1

Çizelge 3.5. Dalgulu epoksi reçine malzemenin COMSOL Multiphysics ortamında tanımlanması

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	$\rho(T[1/K])$	kg/m ³
Ses hızı	200	m/s

Çizelge 3.6. A333 (Sınıf 6) malzemesinin COMSOL Multiphysics ortamında tanımlanması

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	$\rho(T[1/K])$	kg/m ³
Ses hızı	5000	m/s

Çizelge 3.7. 6061 malzemenin COMSOL Multiphysics ortamında tanımlanması

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	$\rho(T[1/K])$	kg/m ³
Ses hızı	6420	m/s

Çizelge 3.8. Polikarbonat malzemenin COMSOL Multiphysics ortamında tanımlanması

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	$\rho(T[1/K])$	kg/m^3
Ses hızı	970	m/s

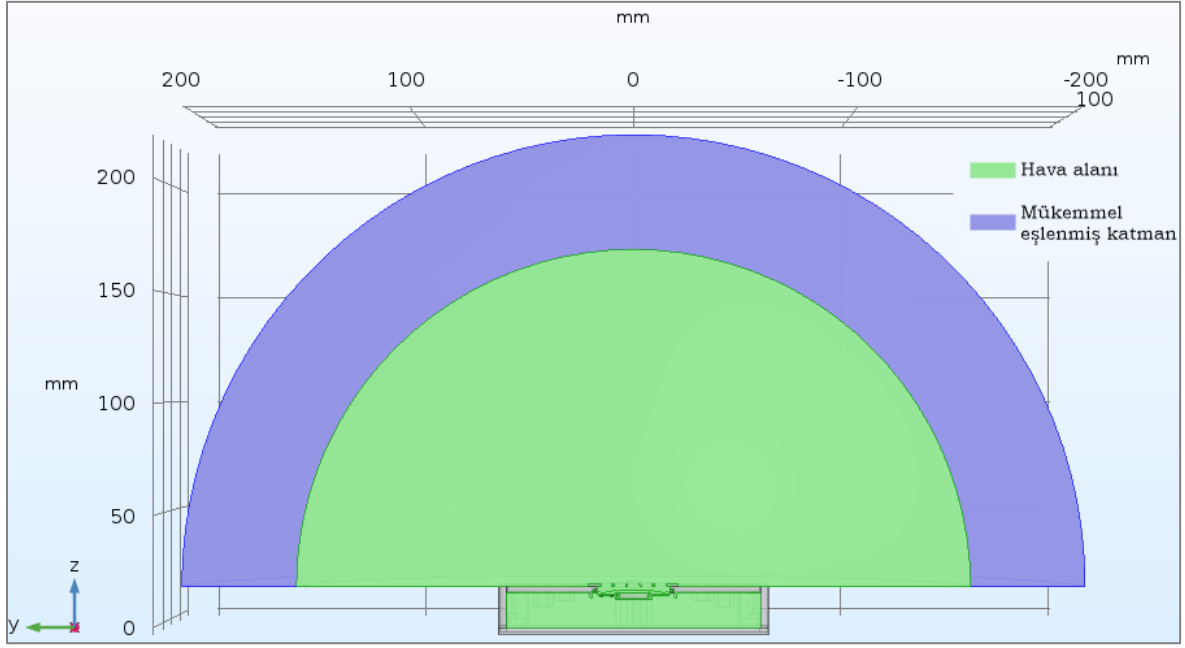
3.4. Hava ve Mükemmel Eşlenmiş Katman Alanlarının Tanımlanması

Ses dalgaları hava içerisinde yayıldığı için COMSOL Multiphysics ortamında telsizi ve ölçümün alındığı noktaları içerecek şekilde hava ortamı modellenmiştir. Hava ve mükemmel eşlenmiş katman için COMSOL Multiphysics ortamında tanımlanan malzeme Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Hava ortamının COMSOL Multiphysics ortamında tanımlanması

Özellik	Değer	Birim
Dinamik viskozite	$\eta(T[1/K])$	Pa.s
Yoğunluk	$\rho(pA[1/Pa], T[1/K])$	kg/m^3
Ses hızı	$c_s(T[1/K])$	m/s

Ses dalgaları herhangi bir engel ile karşılaştıklarında dalgaın bir kısmı diğer ortama geçerken geri kalan kısmı yansiyarak geri döner. Simülasyonlarda hava alanı dışarısına mükemmel eşlenmiş katman alanı eklenir. Mükemmel eşlenmiş katman sayesinde hava alanından çıkan dalgalar herhangi bir yansıma yapıp geri dönemez. Böylece yapılan simülasyonlarda yansıma kaynaklı hata problemi ortadan kalkacaktır. Şekil 3.8’de COMSOL ortamında modellenen hava alanı ve mükemmel eşlenmiş katman görülmektedir.



Şekil 3.8. Hava alanı ve mükemmel eşlenmiş katman

3.5. Elektromanyetik (Sürücü) Kuvvetin Tanımlanması

COMSOL tarafından yayınlanan [26] ve [27] uygulama kılavuzlarında belirtilen ses bobini üzerine etki eden elektromanyetik kuvvet denklemi Eş 3.2’de verilmiştir.

$$F_e = \frac{BLV_0}{Z_b} - v \frac{(BL)^2}{Z_b} \quad (3.2)$$

Elektromanyetik kuvvetin elde edilmesi için COMSOL Multiphysics programına Çizelge 3.10’daki parametreler girilmiştir.

Çizelge 3.10. Elektromanyetik kuvveti elde etmek için COMSOL Multiphysics programına girilen parametreler

Parametre	İfade	Birim	Tanım
Zb	$R_b(\text{freq}) + acpr.i\omega * L_b(\text{freq})$	Ω	Bobin empedansı
v0	$av_apex(shell.u_tZ)$	m/s	Diyafram hızı
Fe	$BL * V_0 / Z_b - v_0 * BL^2 / Z_b$	N	Sürücü kuvveti
vol_apex	$2 * \text{int_apex}(shell.d)$	m^3	Bobin hacmi

3.6. Problem Fiziğinin FEM Kullanılarak Tanımlanması

COMSOL Multiphysics programı ile birden fazla fizik ortamı beraber ele alınarak incelenebilmektedir. Muhafaza içerisine monte edilmiş hoparlörün akustiğini inceleyebilmek için akustik ve yapısal mekanik modülleri birlikte kullanılmıştır. Sayısal çalışmalarda kabuk arayüzünü içeren yapısal modülü ve akustik modülü kullanılmıştır.

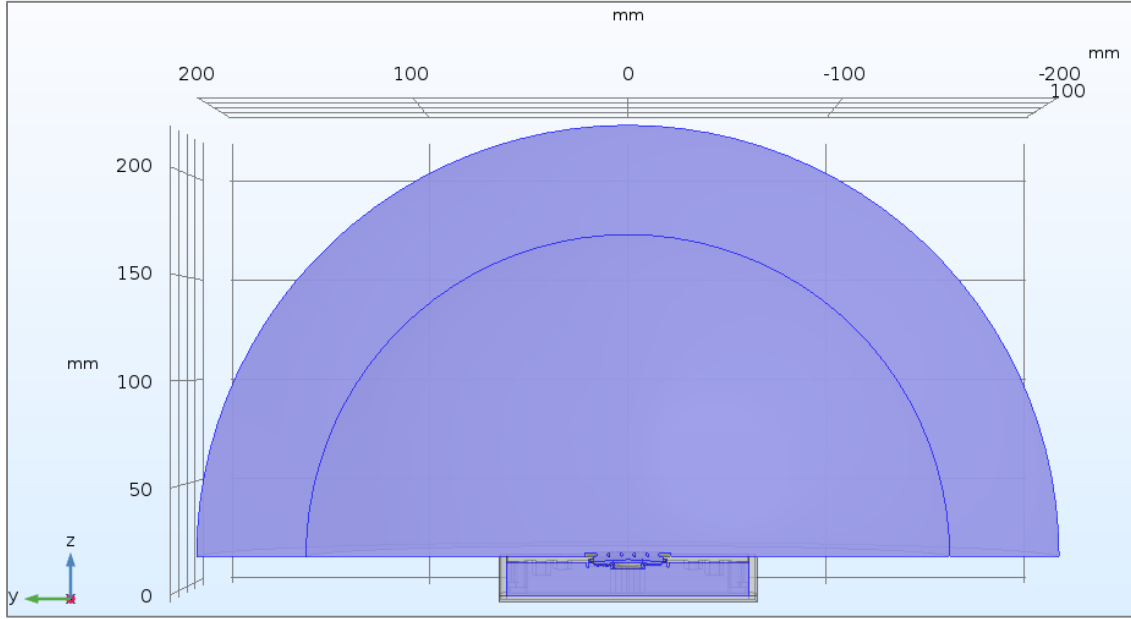
3.6.1. Akustik ortamın tanımlanması

Akustik ortamın tanımlanması için akustik modül içerisinde yer alan frekans bazında basınç akustiği modülü kullanılmıştır.

Basınç akustiği modülünde akışkan modeli olarak lineer elastik model kullanılmıştır. Lineer elastik akış modeli tanımlanırken yoğunluk ve ses hızı parametreleri kullanılır. Yoğunluk ve ses hızı parametreleri malzeme tanımlanırken girilmektedir. Modelde sıcaklık olarak 293,15 K ve mutlak basınç olarak da 1 atm değerleri girilmiştir. Yapılan hesaplamalarda SPL değeri için referans değer olarak 20 μ Pa basınç değeri kullanılmıştır.

Çalışmaları yapılan telsiz yapısı ve hoparlör parçaları orta eksene göre simetriktir. Hesaplama zamanını ve problem boyutunu azaltabilmek amacı ile COMSOL Multiphysics programında simetri sınır koşulu kullanılmıştır.

Şekil 3.9’da simetri sınır koşulu tanımlanan yüzeyler mavi ile gösterilmiştir.



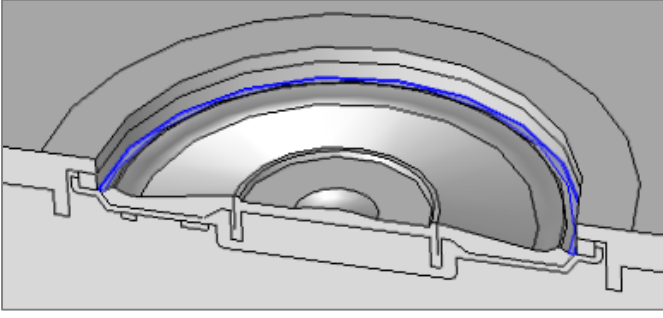
Şekil 3.9. Simetri sınır koşulu

Muhafazada iç yüzeylere ve membranin hareketsiz yüzeyine iç ses sert sınır (duvar) koşulu tanımlanmıştır. Bu sınır şartı genel olarak içeride yer alan duvarlara verilmektedir. İç ses sert sınır, ivmenin normal bileşeninin sıfır olduğu bir sınırdır. Eş 3.3 ve Eş 3.4'te ivmenin normal bileşenleri yukarı ve aşağı yönde olmak üzere tanımlanmıştır.

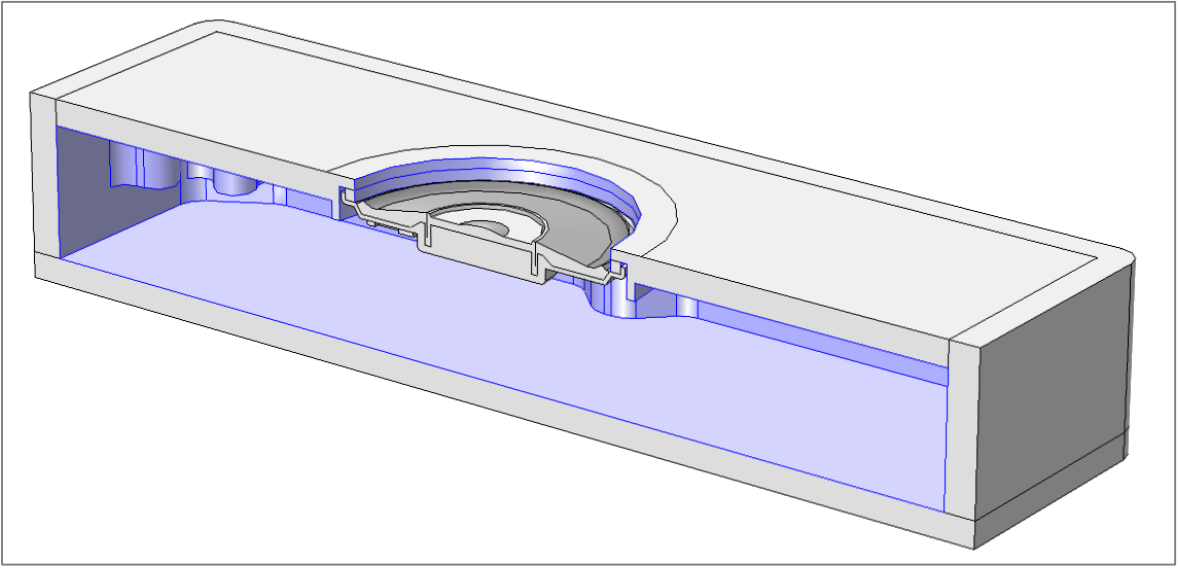
$$-n \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla_{P_t} - q_d) \right)_{yukarı} = 0 \quad (3.3)$$

$$-n \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla_{P_t} - q_d) \right)_{aşağı} = 0 \quad (3.4)$$

Çift kutuplu kaynak q_d ve sabit sıvı yoğunluğu ρ_c için bu, basıncın normal türevinin sınırdaki sıfır olduğu anlamına gelir. Çift kutuplu kaynak bir alan hacimsel kuvveti temsil eder. Mevcut çalışmada çift kutuplu kaynak bulunmamaktadır. İç ses sert sınır (duvar) koşulunun eklendiği diyaframın hareketsiz yüzeyi ve muhafaza yüzeylerinin görüntüleri sırası ile Şekil 3.10 ve 3.11'de mavi renk ile gösterilmiştir.

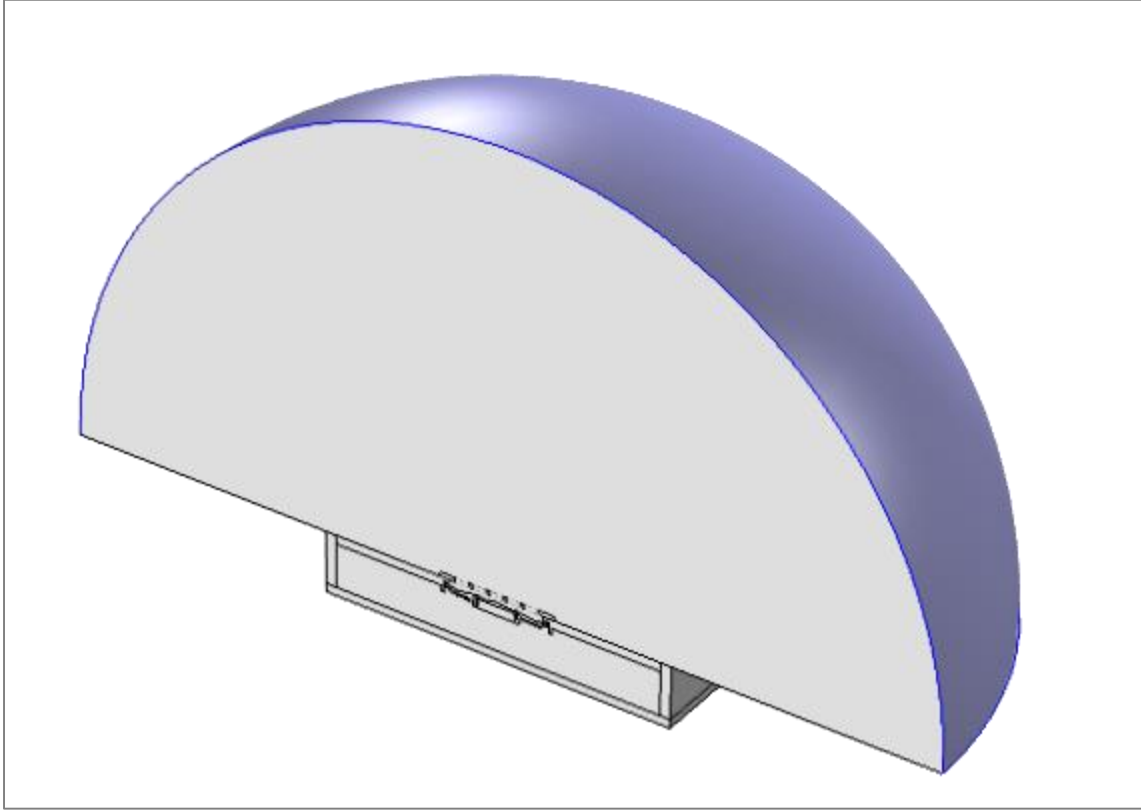


Şekil 3.10. Diyaframın hareketsiz yüzeyine tanımlanan iç ses sert sınır (duvar) koşulu



Şekil 3.11. Muhafazanın iç yüzeyine tanımlanan iç ses sert sınır (duvar) koşulu

Modelde hava sınırının bittiği yerde uzak alan sınır koşulu eklenmiştir. Bu özellik herhangi bir mesafede basınç alanının hesaplanmasına izin vermektedir. Uzak alanın sınırının tüm kaynakları ve saçılmaları kapsamalı gerekir. Uzak alan sınır koşulunun eklendiği yüzey Şekil 3.12’de mavi renk ile gösterilmiştir.



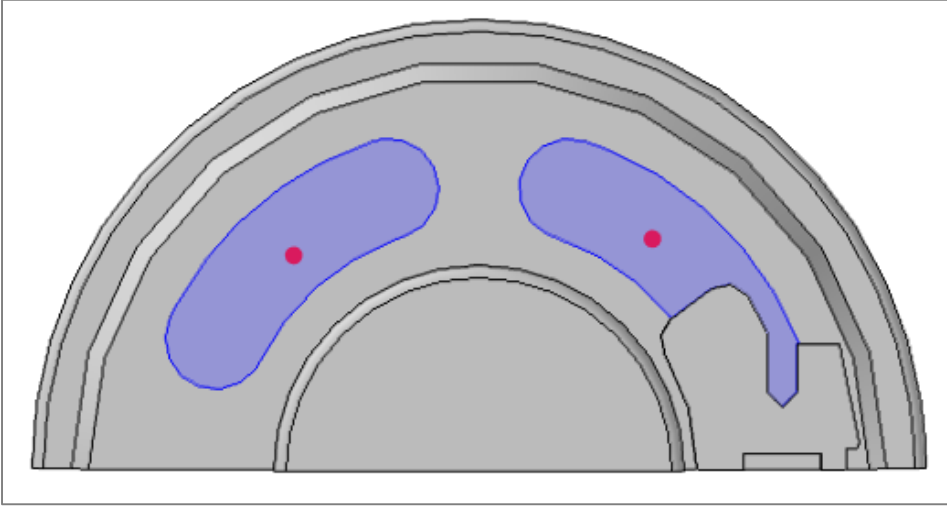
Şekil 3.12. Uzak alan sınır koşulu

Hoparlörün arka kısmında yer alan metal elek parçası iç delikli levha sınır koşulu kullanılarak modellenmiştir. Hoparlörün arka kısmındaki metal elek parçası ölçülmüş ve COMSOL Multiphysics programına Çizelge 3.11’deki parametreler tanımlanmıştır.

Çizelge 3.11. İç delikli levha sınır koşulu için COMSOL Multiphysics programına girilen parametreler

Özellik	Değer	Birim
Delik çapı	0,25	mm
Levha kalınlığı	0,1	mm
Boşluk alanı	0,4	1

İç delikli levha sınır koşulu tanımlanan yüzeyler Şekil 3.13’te mavi renk ile gösterilmiştir.



Şekil 3.13. İç delikli levha sınır koşulu

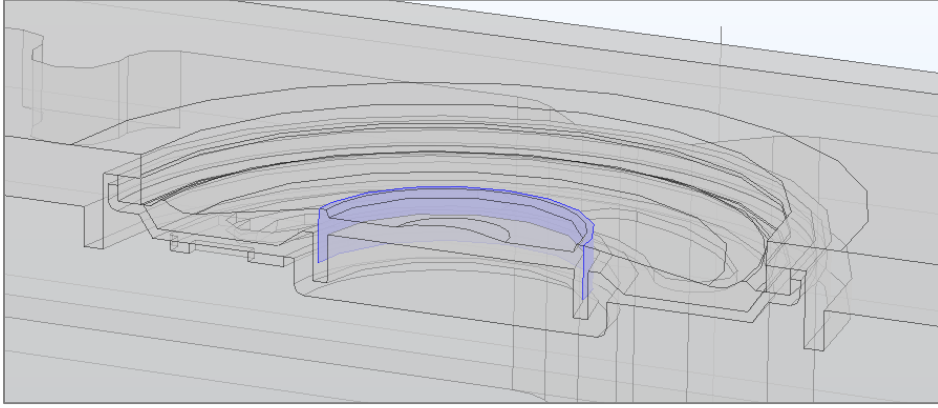
3.6.2. Yapısal ortamın tanımlanması

Hoparlörde bulunan membran ve ses bobini gibi yapılar çok ince kabuk şeklindeki yapılar olduğundan dolayı COMSOL Multiphysics programında yer alan yapısal mekanik modülü altında yer alan kabuk arayüzü yardımı ile mekanik model fizik ortamında modellenmiştir.

Kabuk arayüzünde lineer elastik malzeme kısmında izotropik katı model kullanılmıştır. İzotropik, lineer elastik malzemeler için bütün yönlerde aynı özellikleri gösterdiğini ifade etmektedir. Lineer elastik malzeme modeli tanımlanırken Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluk parametreleri kullanılır. Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluk parametreleri malzeme tanımlanırken girilmektedir. Modelde sıcaklık olarak 293,15 K ve mutlak basınç olarak da 1 atm değerleri girilmiştir.

Kabuk arayüzünde membran ve ses bobini için sırası ile 0,4 ve 0,1 mm kalınlık değeri girilmiştir.

Ses bobini üzerine etkiyen elektromanyetik kuvvet Şekil 3.14'te gösterilmiş olup kuvvetin bileşenleri ise Çizelge 3.12'de belirtilmiştir.

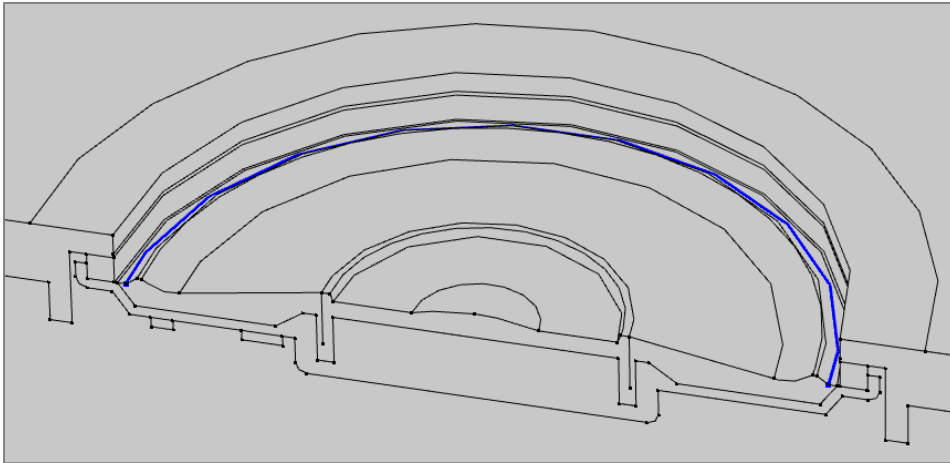


Şekil 3.14. Ses bobini üzerine etkiyen elektromanyetik kuvvet

Çizelge 3.12. Elektromanyetik kuvvet bileşenleri

Kuvvet Bileşeni (Koordinatı)	Değer	Birim
x	0	N/m ³
y	0	N/m ³
z	Fe/vol_apex	N/m ³

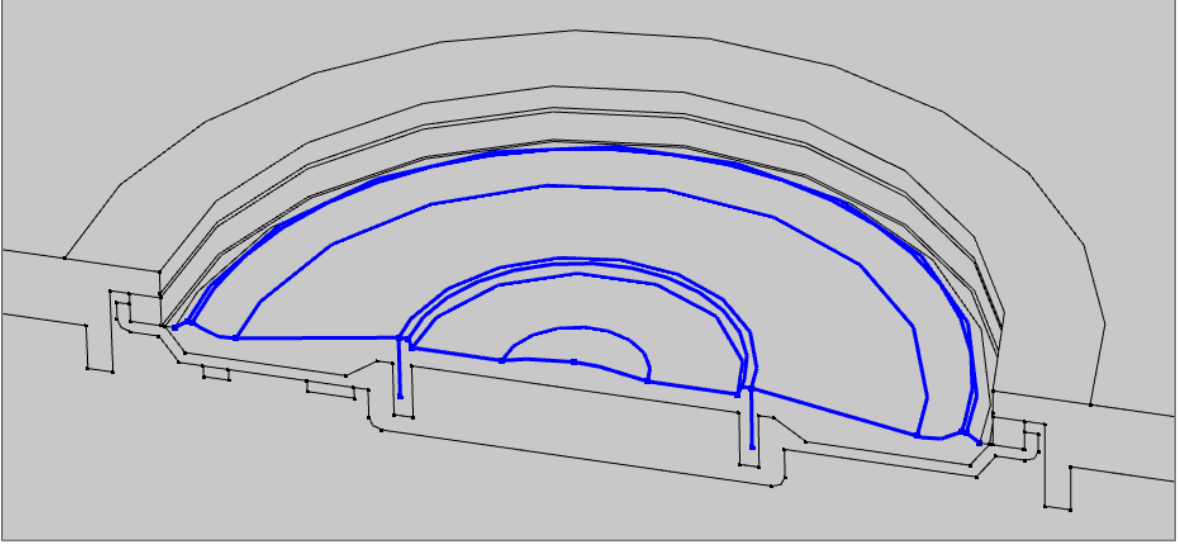
Membranın hareketsiz yüzeyindeki kenar için sabit kenar sınır şartı eklenmiştir. Bu sınır şartı ile seçilen kenarda bütün yönlerde yer değiştirme ve dönme hareketleri kısıtlanmıştır. Sabit kenar sınır şartı girilen kenar Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Sabit kenar sınır şartı

Membranın ve ses bobinini hareketli kısımlara sahip oldukları için hareket eden kenarlara serbest sınır koşulu eklenmiştir. Serbest sınır koşulu hareket için herhangi bir kısıt olmadığı anlamına gelmektedir. Böylece elektromanyetik kuvvet uygulandığında ilgili kısımlar bu

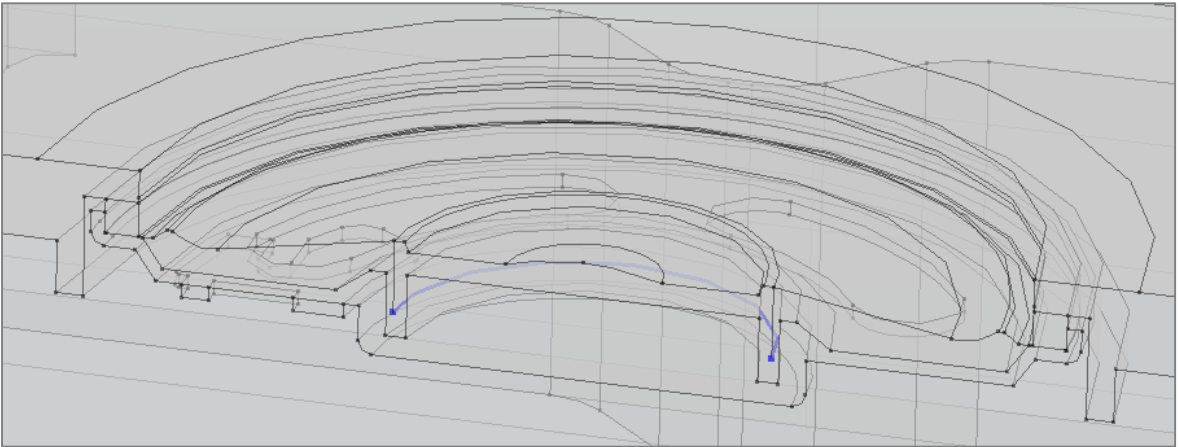
kuvvetin etkisi ile hareket edebileceklerdir. Serbest sınır koşulu girilen kenarlar Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Serbest sınır şartı

Hoparlör birimi demonte edilerek membran ve ses bobini parçalarının ağırlıkları 1'er gram olarak ölçülmüştür.

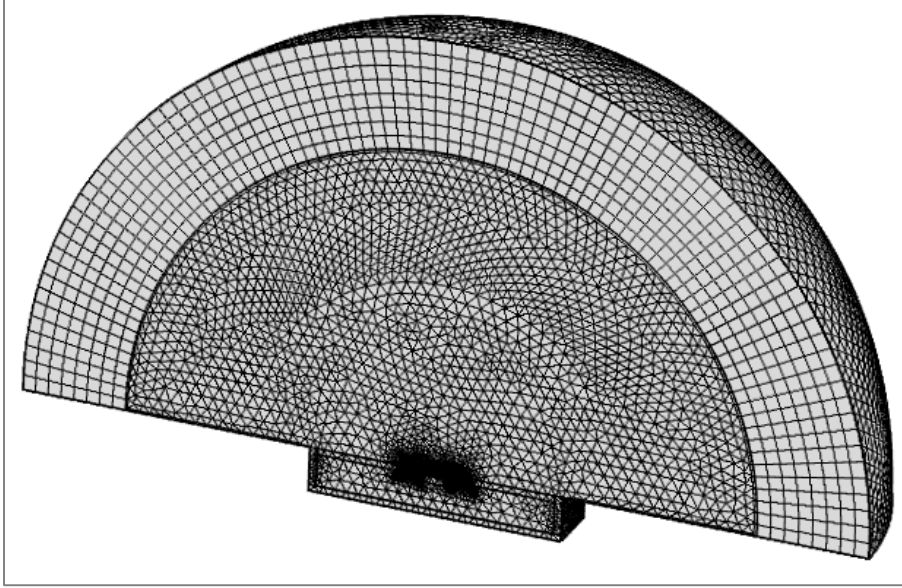
Hoparlörün üretici firmasından alınan teknik verilere göre hoparlörün ses bobininin alt kenarı seçilerek bu kısma 60000 N/m değerinde yay sabiti tanımlanmıştır. Yay sabiti tanımlanan kenar Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Hoparlörün ses bobini kısmında yay tanımlanması

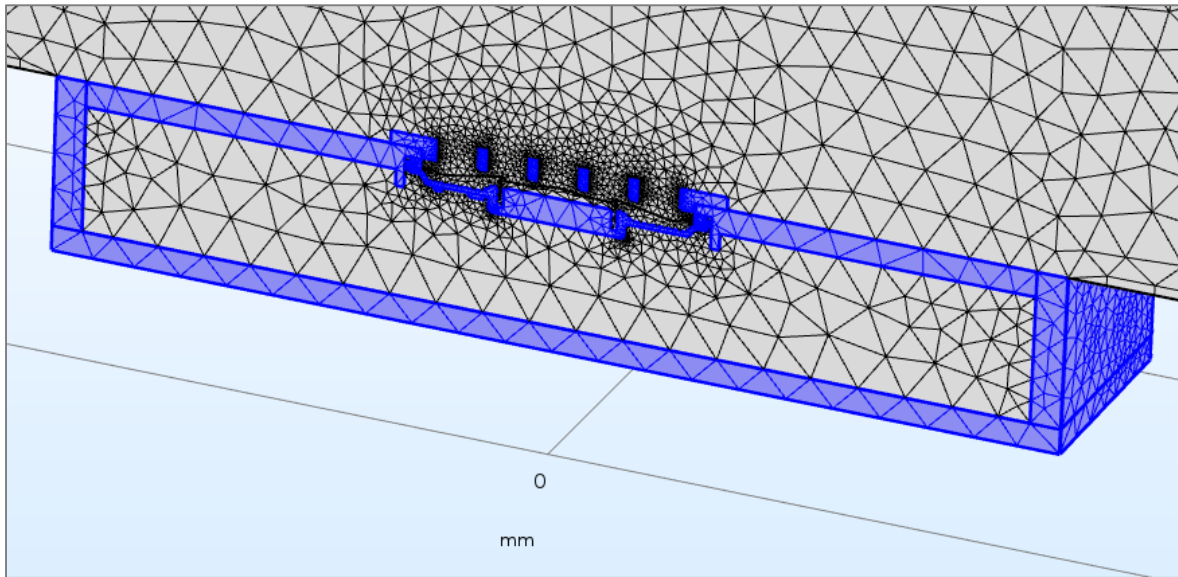
3.7. Geometriler İçin Çözüm Ağı Oluşturulması

Problemin çözümü için oluşturulmuş çözüm ağının genel görünüşü Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



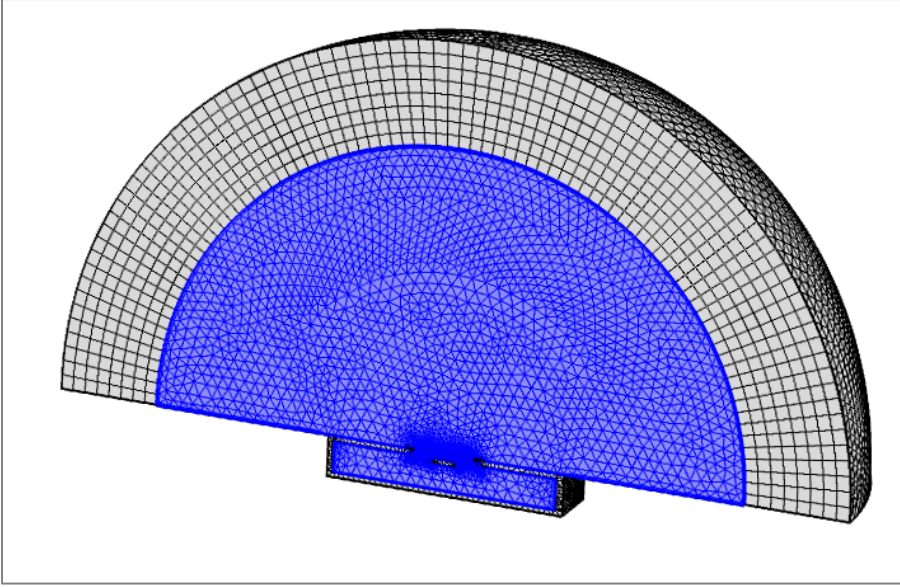
Şekil 3.18. Çözüm ağı oluşturulmuş geometrinin genel görünüşü

Rijit yapılar olan muhafaza ve hoparlör parçalarına çözüm ağı eklenmesi sırasında serbest dörtyüzlü elemanlar tercih edilmiştir. Serbest dörtyüzlü eleman eklenen parçalar Şekil 3.19’da gösterilmiştir.

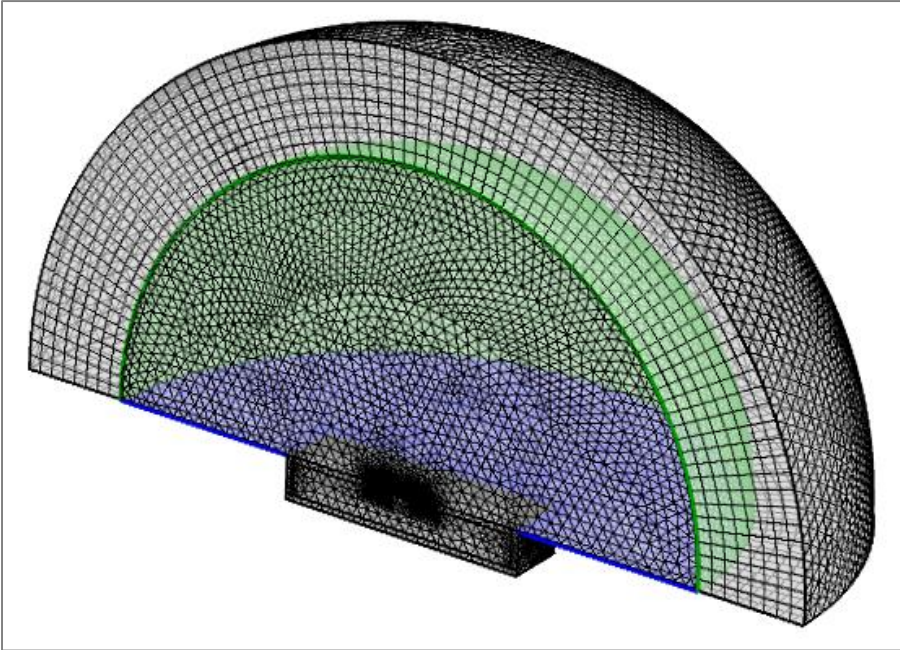


Şekil 3.19. Serbest dörtyüzlü eleman eklenen parçalar

Sınır tabakası ağı, belirli sınırlar boyunca normal yönde yoğun eleman dağılımına sahip bir ağıdır. Problemde yer alan hava tabakasında sınır katmanı ağı kullanılmıştır. Ayrıca dış alan incelemesini iyileştirmek için mükemmel eşlenmiş katman ile arayüz olan yüzeylerde tabaka kalınlığı $\lambda_{min}/5/10$ olan ince bir sınır tabakası eklenmiştir. Sınır tabakası ağı eklenen kısımlar Şekil 3.20’de gösterilmiştir. Ayrıca ince sınır tabakası eklenen yüzeyler Şekil 3.21’de mavi ve yeşil renkte gösterilmiştir.

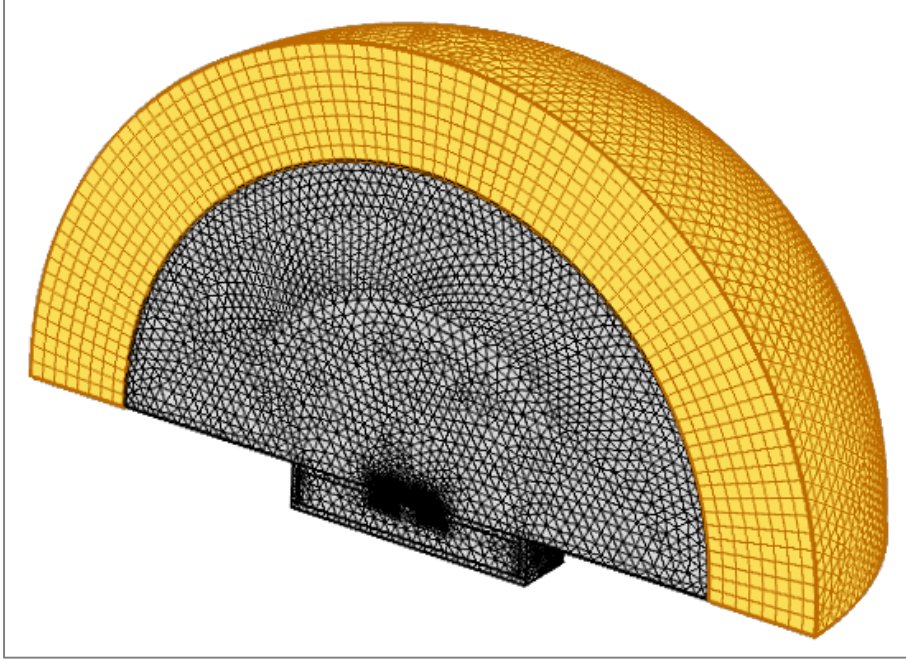


Şekil 3.20. Sınır tabakası ağı eklenen kısımlar



Şekil 3.21. İnce sınır tabakası eklenen yüzeyler

COMSOL Multiphysics programının kullanıcı dokümanlarında mükemmel eşlenmiş katman tabakasının en az 8 katman halinde süpürülmüş olarak çözüm ağı oluşturulması önerilmektedir. Önerilere uygun olarak hazırlanmış olan mükemmel eşlenmiş katman çözüm ağı Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Mükemmel eşlenmiş katman üzerine çözüm ağı eklenmesi

Geometrilere çözüm ağı eklenirken kullanılan boyutlar ve parametreler Çizelge 3.13’te yer almaktadır.

Çizelge 3.13. Çözüm ağı oluşturulurken kullanılan boyut ve parametreler

Parametre	Değer	Birim
Maksimum eleman boyutu	$\lambda_{\min}/10$	mm
Minimum eleman boyutu	0,1	mm
Maksimum eleman büyüme oranı	1,5	
Eğrilik faktörü	0,6	
Dar bölgelerin çözünürlüğü	0,5	

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Sayısal çalışmaların doğrulanması amacı ile üretilen parçalar akustik yankısız odada deneysel olarak test edilmiştir. Deneylerde hoparlörün çalıştırılması için Rigol DG 5352 sinyal üretici kullanılmıştır. Rigol DG 5352 ile ilgili genel teknik bilgiler Çizelge 4.1’de paylaşılmıştır. Sinyal üreticide üretilen sinyaller bir ucu BNC konektör olan çatal kablo vasıtası ile muhafaza içerisine monte edilmiş olan hoparlöre gönderilebilmektedir. Sinyal üretici tarafından gönderilen elektrik sinyalleri hoparlör tarafından ses dalgasına çevrilmektedir. Hoparlörden çıkan bu ses dalgalarının ölçülmesi için B&K 2250 Light ses ölçüm cihazı kullanılmıştır. B&K 2250 Light ile ilgili genel teknik bilgiler Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. B&K 2250 Light cihazı aralayıcı bir kablo ile akustik oda dışarısında yer alan bilgisayara bağlanarak alınan ölçümler eş zamanlı olarak bilgisayar sisteminde kaydedilebilmiştir. Akustik yankısız oda ile ilgili genel teknik bilgiler Çizelge 4.3’de gösterilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda gürültü oluşturulabilecek sinyal üretici cihazı akustik yankısız odanın dışarısına konularak ölçümleri etkilememesi sağlanmıştır.

Çizelge 4.1. Rigol DG 5352 genel teknik bilgiler

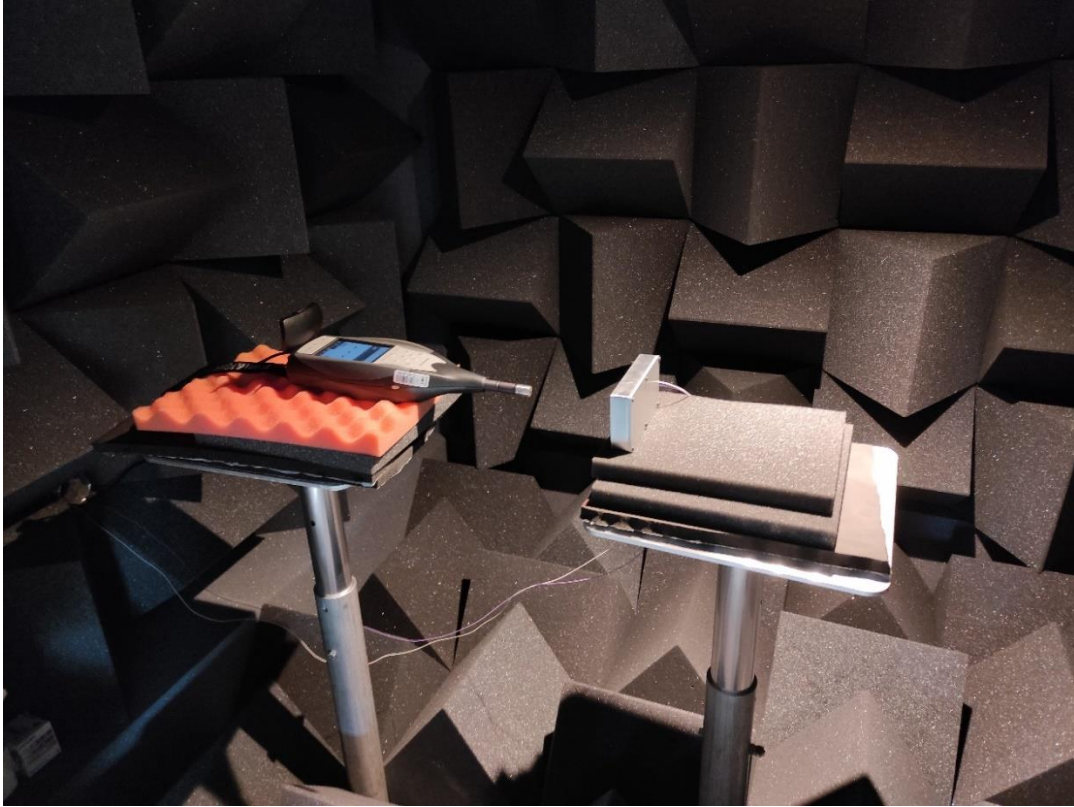
Tanım	Değer
Maksimum frekans	350 MHz
Kullanılan dalga formu, aralığı	Sinüs, 1 μ Hz-350 MHz
Toplam harmonik bozulma	<0,5% (10 Hz-20 kHz, 0 dBm)
Empedans	50 Ω (nominal)

Çizelge 4.2. B&K 2250 Light genel teknik bilgiler

Tanım	Değer
Mikrofon önyükselteç zayıflaması (nominal)	0,3 dB
Cihaz tarafından oluşturulan gürültü seviyeleri (A-Ağırlıklandırma)	Mikrofon: 14,0 dB, Elektriksel: 12,7 dB (Toplam: 16,4 dB)
Genişbant frekans aralığı	5 Hz – 20 kHz



Resim 4.1. Akustik yankısız oda içerisindeki genel görüntü

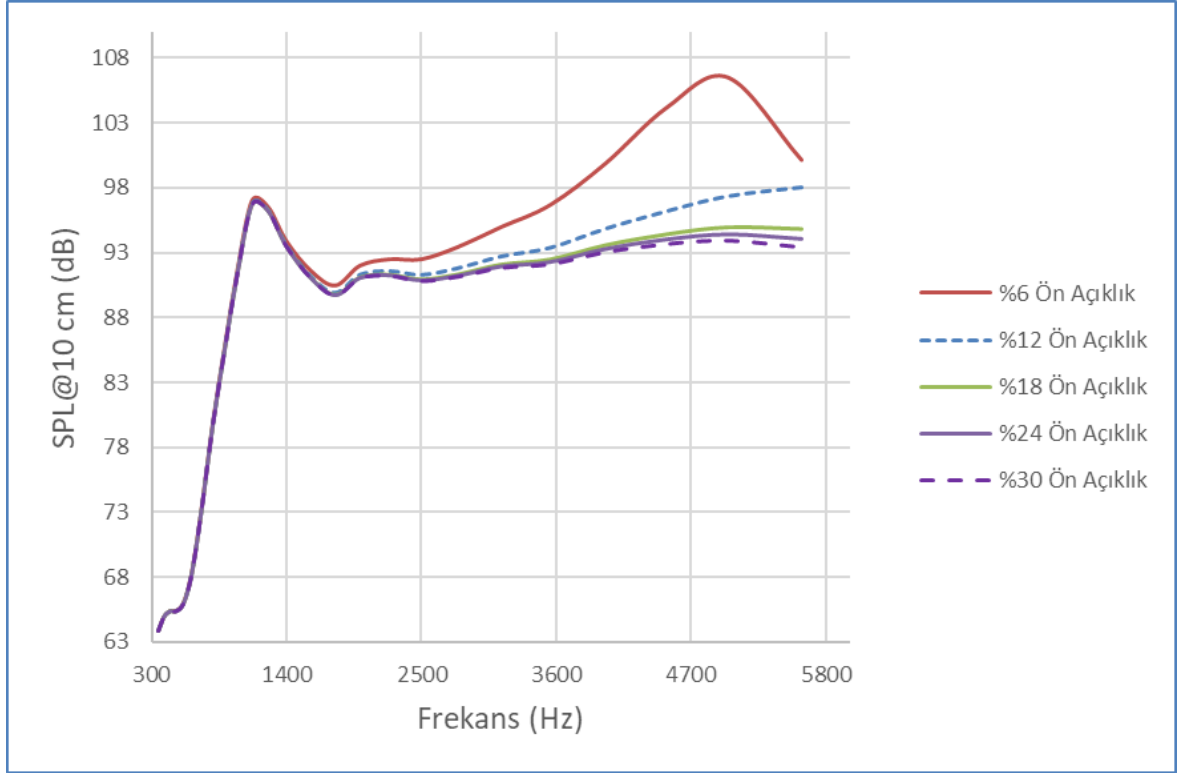


Resim 4.2. Deney düzeneği

5. BULGULAR, YORUMLAMA VE TARTIŞMA

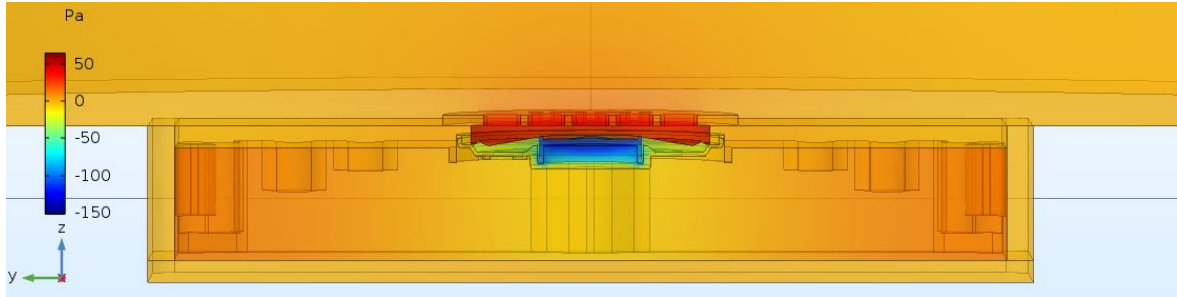
Bu bölümde COMSOL Multiphysics programı kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar ve deneysel olarak elde edilen ölçüm sonuçları incelenecek ve karşılaştırılacaktır.

Ön kapak açıklık miktarının akustik performansa olan etkisi incelenmiş ve sayısal sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 5.1’de verilmiştir. Hoparlörün ön kısmında yer alan açıklığın azaltılması sonucunda SPL eğrisi yassı olan frekans davranışını kaybetmektedir. Ayrıca hoparlörün önünde yer alan ön açık miktarının azalması ile ek bir rezonans frekansı oluşmaktadır. Şekil 5.1’de de görüleceği gibi özellikle %6 ön açıklık değerinde 5000 Hz frekansında ek bir rezonans frekansı gözlemlenmiştir. %12 ön açıklık değerinde ise tam bir rezonans frekansı meydana gelmemiş olsa olsa da yassı frekans davranışı ortadan kaybolmuştur. Ön açıklık değerinin %18, %24 ve %30 olduğu durumlarda ise istenilen yassı frekans tepkisine yakın bir sonuç elde edilmiştir. Melodik sesler için yassı yani düz bir frekans tepkisi olması beklenmektedir. Bu durumda %18 ön açıklık değeri burada sınır değer olarak kabul edilebilir. Elde edilen sonuçlara göre tercih edilmesi gereken ön açıklık miktarı sıralamasının sırası ile %30, %24, %18, %12 ve %6 ön açıklık değeridir. Bunun sebebi %30 ön açıklıkta yassı olan frekans davranışının %6 ön açıklık değerine doğru yassı frekans davranışını kaybetmesidir. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen verilere göre hoparlörün önünde yer alan açıklık miktarının %18 altında olması önerilmemektedir.

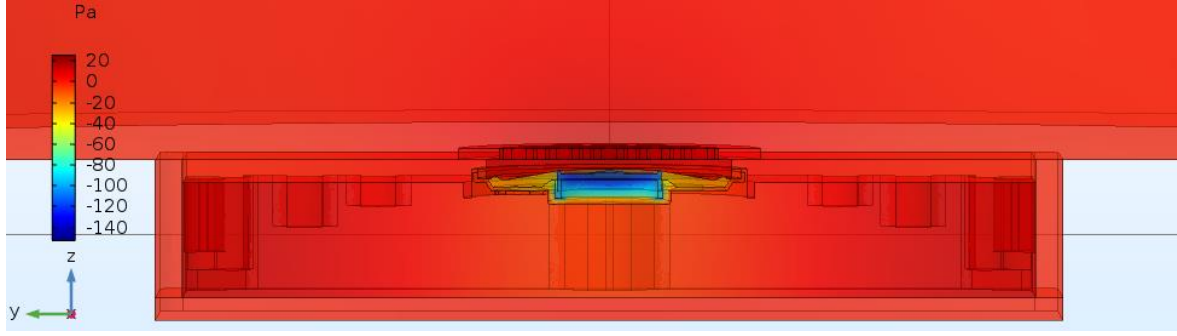


Şekil 5.1. Ön kapak açıklık miktarı sayısal sonuçlar

Şekil 5.1’de görüldüğü üzere 2500 Hz ve 5000 Hz frekans değerlerinde %6 ön açıklık değerinde diğer durumlara göre beklenmeyen yassı olmayan bir frekans davranışı gözlemlenmiştir. Şekil 5.2 incelendiğinde hoparlörün önü ile kapak parçasının dışarısında akustik basınç farkının yaklaşık olarak 40 Pa olduğu, Şekil 5.3 incelendiğinde ise hoparlörün önü ile kapak parçasının dışarısında akustik basınç farkının yaklaşık 10 Pa olduğu gözlemlenmiştir. Ön açıklık değerinin çok az olduğu durumda hoparlörün önü ile kapak parçasının dışarısında akustik basınç farkı değeri fazladır. İç ve dış kısımlardaki bu ciddi akustik basınç farklılığı frekans davranışını bozmaktadır.

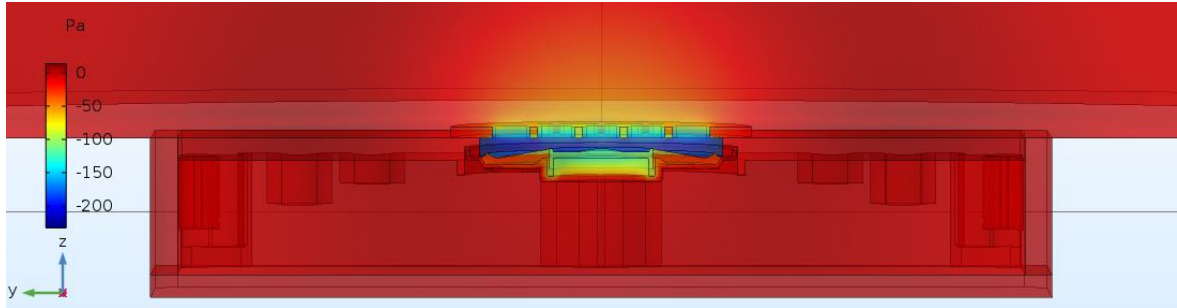


Şekil 5.2. %6 ön açıklık durumunda 2500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları

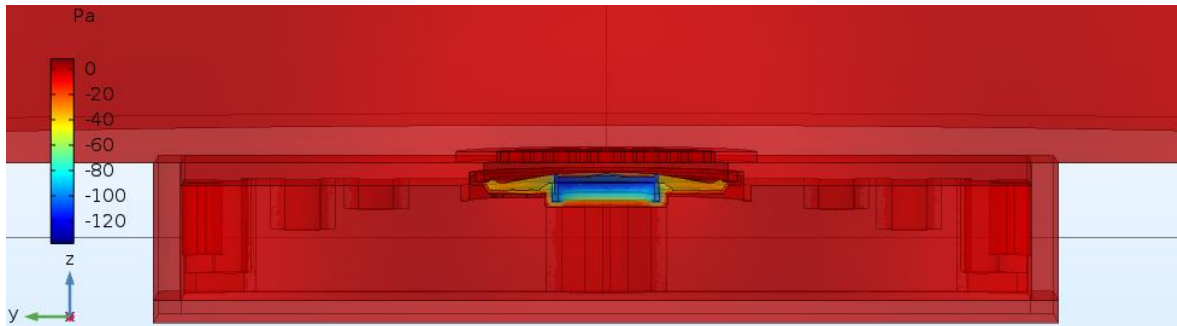


Şekil 5.3. %30 ön açıklık durumunda 2500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları

Şekil 5.1’de %6 ön açıklık durumu için 5000 Hz değerinde ikinci bir rezonans frekansı gözlemlenmiştir. Şekil 5.4 incelendiğinde hoparlörün önü ile kapak parçasının dışarısında akustik basınç farkının yaklaşık olarak 100 Pa olduğu, Şekil 5.5 incelendiğinde ise hoparlörün önü ile kapak parçasının dışarısında akustik basınç farkının yaklaşık 5 Pa olduğu gözlemlenmiştir. %6 ön açıklık için gözlemlenen bu ciddi basınç farkının frekans eğrisinde ikincil bir rezonans frekansı oluşturduğu tespit edilmiştir.



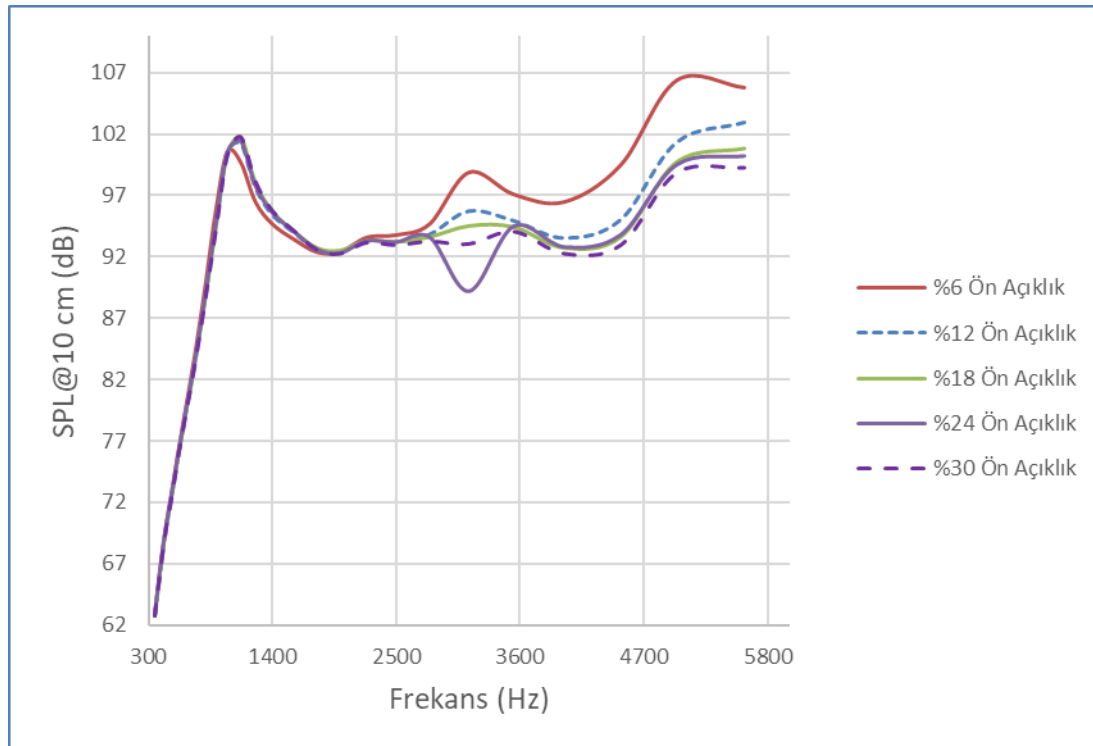
Şekil 5.4. %6 ön açıklık durumunda 5000 Hz değeri için akustik basınç sonuçları



Şekil 5.5. %30 ön açıklık durumunda 5000 Hz değeri için akustik basınç sonuçları

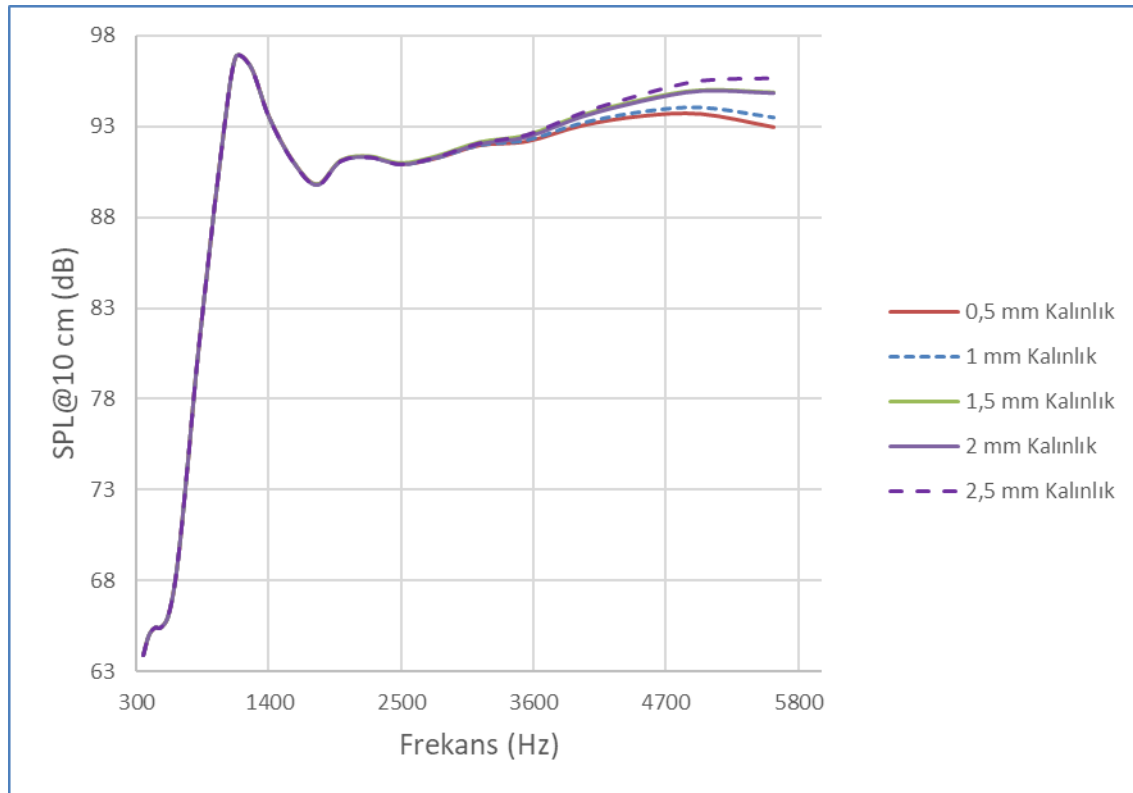
Yapılan sayısal çalışmaların doğrulanması amacı ile üretilen parçalar akustik yankısız odada test edilmiş ve Şekil 5.6’daki sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 5.1 ve Şekil 5.6 incelendiğinde

rezonans frekansının sayısal sonuçlar için 1120 Hz iken deneysel sonuçlar için 1000 Hz civarlarında olduğu gözlemlenmiştir. 250-500 Hz arası akustikte düşük orta aralık olarak bilinmekte olup bu aralıkta sayısal ve deneysel simülasyon sonuçları birbirleri ile uyumludur. Bu aralık ile rezonans frekansı arasında kalan bölgede sonuçlar arasında farklılıklar mevcuttur. Bunun sebebinin hoparlörün THD değerinin %5 olması ve bu bölgede harmonik bozulmanın fazla olması olduğu düşünülmektedir. %6 ön açıklık durumunda rezonans frekansının üzerinde ise 4500 ve 5600 Hz frekansları haricinde bütün frekanslarda sayısal simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla uyumlu olup doğrulanmıştır. 4500 ve 5600 Hz frekanslarında ise sapma değeri sırası ile 4,5 ve 5 dB değerindedir. Diğer ön açıklık durumlarında ise rezonans frekansından 5000 Hz değerine kadar olan frekanslarda sayısal simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar birbirleri ile uyumludur. 5000 Hz ve 5600 Hz frekanslarındaki SPL değerleri yaklaşık olarak 6 dB sapma göstermektedir. Hoparlörün SPL toleransı ± 3 dB değerinde olduğu ve genel eğri uyumlu olduğu için bu sapmaların kabul edilebilir değerler olduğu düşünülmektedir. Ayrıca düşük ve yüksek frekanslardaki uyumsuzlukların da daha önceki literatür çalışmaları ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir değerler olduğu tespit edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak hata oranları da hesaplanarak EK-2’de verilmiştir.



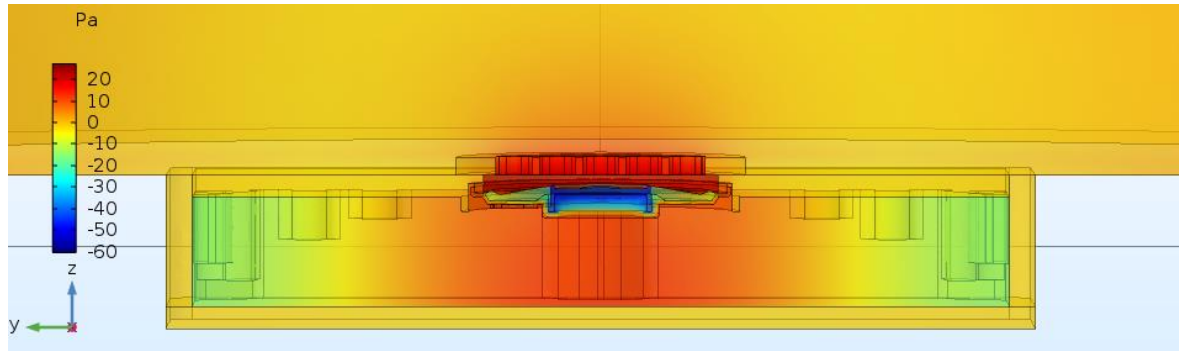
Şekil 5.6. Ön kapak açıklık miktarı deneysel sonuçlar

Ön kapak kalınlığının akustik performansına olan etkisi incelenmiş ve sayısal sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 5.7’de verilmiştir. Ön kapak kalınlığının artırılmasının sonucunda SPL eğrisi yassı olan frekans davranışını kaybetmektedir. Şekil 5.7’de görüldüğü üzere özellikle 3550 Hz sonrasında SPL eğrisindeki yassı olan davranış kaybolmaya başlamıştır. Beş farklı ön kapak kalınlığı için de 3550 Hz frekans değerinin altında birbirleri ile benzer SPL eğrisi davranışları gözlemlenmiştir. Bu nedenle 3550 Hz frekans değeri SPL davranışı açısından ön kapak kalınlık değeri için bir sınır frekans değeridir. Bu frekansın üzerindeki ön kapak kalınlığı arttıkça frekans eğrisi yassı davranışını kaybetmeye başlamaktadır. Ön kapak kalınlığı 0,5 mm ve 1 mm olduğu durumlarda istenilen yassı frekans tepkisine yakın bir sonuç elde edilmiştir. Melodik sesler için yassı yani düz bir frekans tepkisi olması beklenmektedir. Bu durumda 1 mm ön kapak kalınlık değeri burada sınır değer olarak kabul edilebilir. Elde edilen sonuçlara göre tercih edilmesi gereken ön kapak kalınlık değerleri sırası ile 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm ve 2,5 mm ön kapak kalınlığı değeridir. Bunun sebebi 0,5 mm ön kapak kalınlığında yassı olan frekans davranışının 2,5 mm ön kapak kalınlık değerine doğru yassı frekans davranışını kaybetmesidir. Yapılan çalışmada elde edilen verilere göre üretim yetenekleri ve fiziksel koruma kabiliyeti açısından ön kapak kalınlığının 1 mm değerinde olması önerilmektedir.

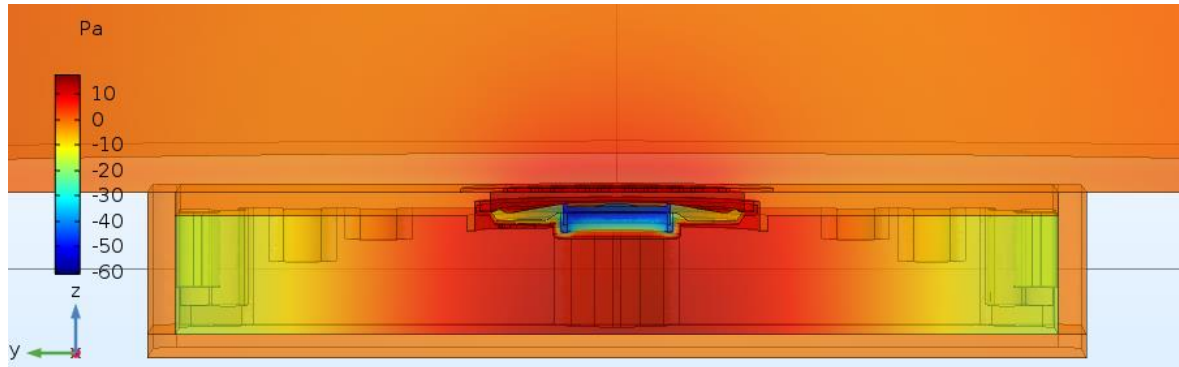


Şekil 5.7. Ön kapak kalınlık etkisi sayısal sonuçlar

Şekil 5.7’de 2,5 mm ön kapak kalınlığı durumu için 3550 Hz değeriinde SPL eğrisinin yassı davranışını kaybettiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.8 incelendiğinde hoparlörün önü ile kapak parçasının dışarısında akustik basınç farkının yaklaşık olarak 10 Pa olduğu, Şekil 5.9 incelendiğinde ise hoparlörün önü ile kapak parçasının dışarısında akustik basınç farkının yaklaşık 5 Pa olduğu gözlemlenmiştir. Ön kapak kalınlığı değeriinin fazla olduğu durumda hoparlörün önü ile kapak parçasının dışarısında akustik basınç farkı değeri fazladır. İç ve dış kısımlardaki bu ciddi akustik basınç farklılığı frekans davranışını bozmaktadır.



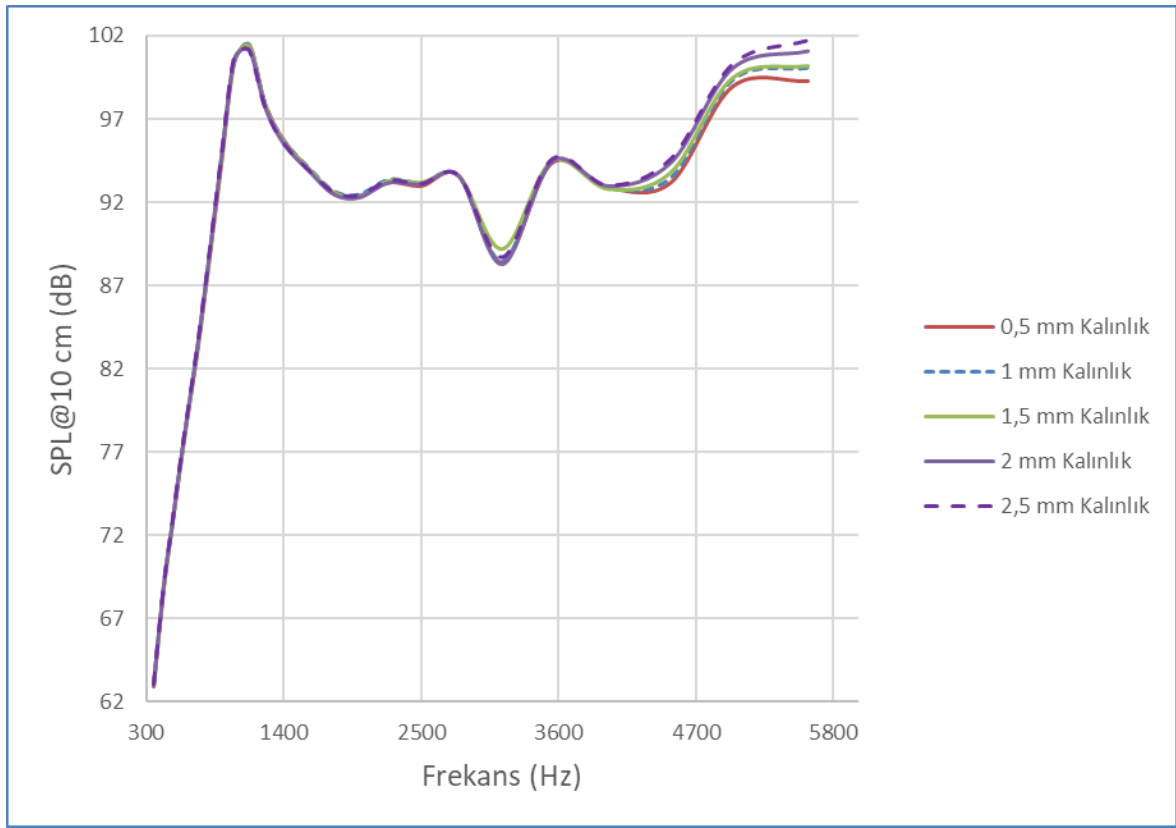
Şekil 5.8. 2,5 mm ön kapak kalınlığı durumunda 3550 Hz değeri için akustik basınç sonuçları



Şekil 5.9. 0,5 mm ön kapak kalınlığı durumunda 3550 Hz değeri için akustik basınç sonuçları

Yapılan sayısal çalışmaların doğrulanması amacı ile üretilen parçalar akustik yankısız odada test edilmiş ve Şekil 5.10’daki sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 5.7 ve Şekil 5.10 incelendiğinde rezonans frekansının hem sayısal sonuçlar hem de deneysel sonuçlar için 1120 Hz olduğu gözlemlenmiştir. 250-500 Hz arası akustikte düşük orta aralık olarak bilinmekte olup bu aralıkta sayısal ve deneysel simülasyon sonuçları birbirleri ile uyumludur. Bu aralık ile rezonans frekansı arasında kalan bölgede sonuçlar arasında farklılıklar mevcuttur. Bunun sebebinin hoparlörün THD değeriinin %5 olması ve bu bölgede harmonik bozulmanın fazla olması olduğu düşünülmektedir. Bütün durumlar için rezonans

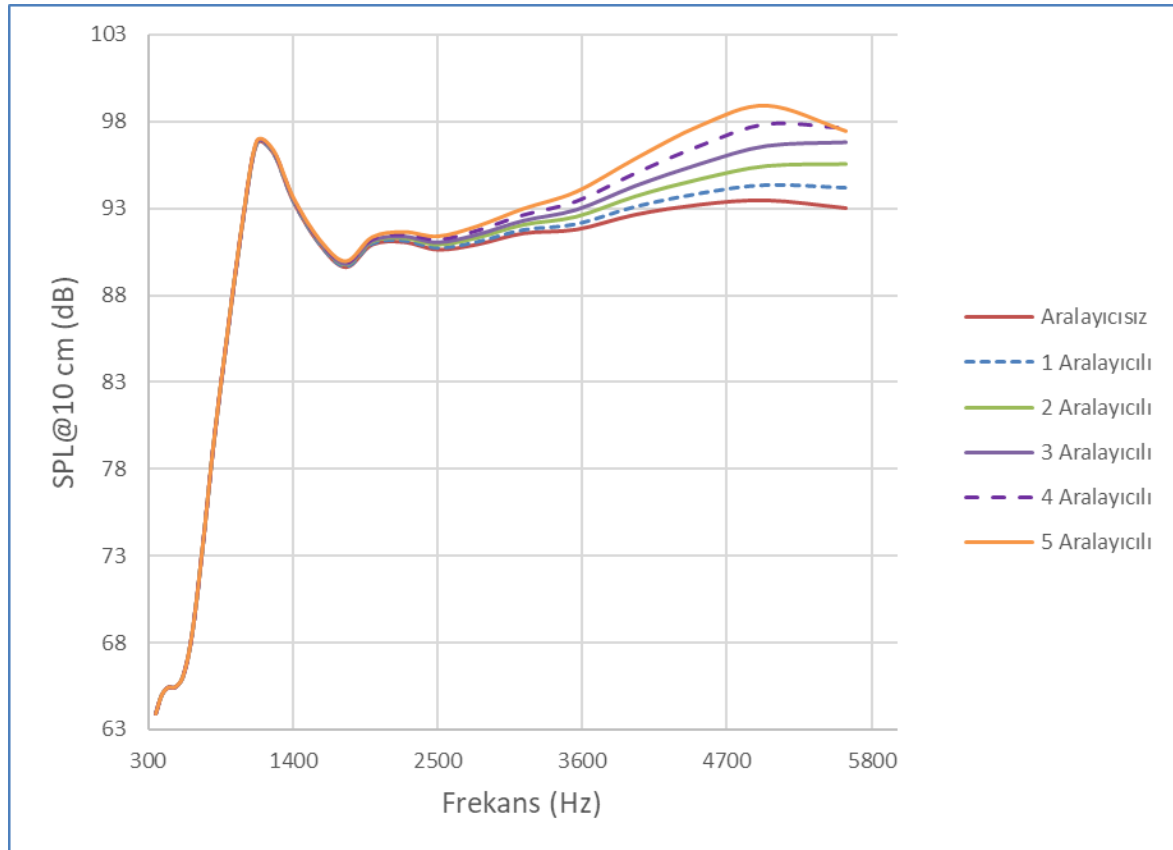
frekansının üzerinde 5000 Hz ve 5600 Hz frekansları haricinde bütün frekanslarda sayısal simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla uyumlu olup doğrulanmıştır. 5000 Hz ve 5600 Hz frekanslarında ise sapma değeri sırası ile 5,5 ve 6,5 dB değerindedir. Hoparlörün SPL toleransı ± 3 dB değerinde olduğu ve genel eğri uyumlu olduğu için bu sapmaların kabul edilebilir değerler olduğu düşünülmektedir. Ayrıca düşük ve yüksek frekanslardaki uyumsuzlukların da daha önceki literatür çalışmaları ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir değerler olduğu tespit edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak hata oranları da hesaplanarak EK-3'te verilmiştir.



Şekil 5.10. Ön kapak kalınlık etkisi deneysel sonuçlar

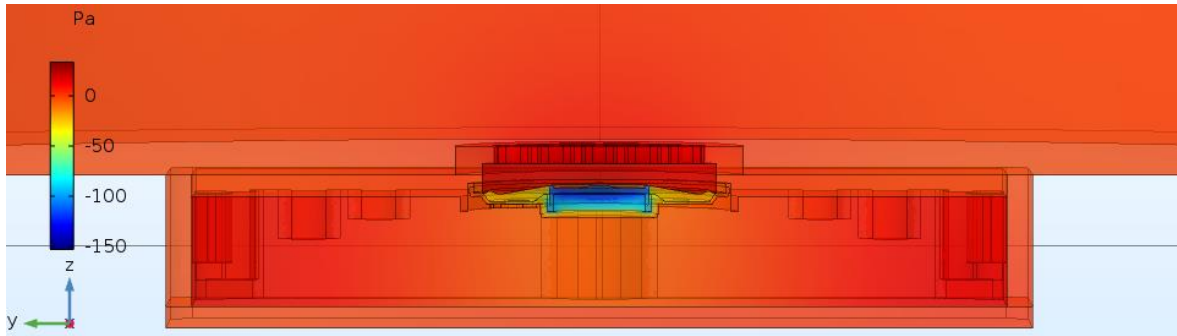
Ön kapak mesafesinin akustik performansa olan etkisi incelenmiş ve sayısal sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 5.11'de verilmiştir. Ön kapak ile hoparlör arasındaki mesafenin artırılmasının sonucunda SPL eğrisi yassı olan frekans davranışını kaybetmektedir. Mesafe miktarı arttıkça özellikle 4 ve 5 aralayıcı kullanıldığı durumda ekstra bir rezonans frekansı oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.11'de görüldüğü üzere özellikle 2500 Hz sonrasında SPL eğrisindeki yassı olan davranış kaybolmaya başlamıştır. Beş farklı ön kapak mesafesi için de 2500 Hz frekans değerinin altında birbirleri ile benzer SPL eğrisi davranışları gözlemlenmiştir. Bu nedenle 2500 Hz frekans değeri SPL davranışı açısından

ön kapak mesafesi değeri için bir sınır frekans değeridir. Bu frekansın üzerinde ön kapak mesafesi arttıkça frekans eğrisi yassı davranışını kaybetmeye başlamaktadır. Ön kapak mesafesi için aralayıcısız ve 1 aralayıcı kullanıldığı durumlarda istenilen yassı frekans tepkisine yakın bir sonuç elde edilmiştir. Melodik sesler için yassı yani düz bir frekans tepkisi olması beklenmektedir. Bu durumda 1 aralayıcı kullanıldığı durum ön kapak mesafesi için sınır değer olarak kabul edilebilir. Elde edilen sonuçlara göre tercih edilmesi gereken ön kapak mesafe değerleri sırası ile aralayıcısız, 1 aralayıcılı, 2 aralayıcılı, 3 aralayıcılı, 4 aralayıcılı ve 5 aralayıcılı ön mesafe değerleridir. Bunun sebebi aralayıcı kullanılmayan durumda ön kapak mesafesinde yassı olan frekans davranışının 5 aralayıcı kullanılan ön kapak mesafe değerine doğru yassı frekans davranışını kaybetmesidir. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre hoparlör diyaframı ile ön kapak arasındaki mesafenin düşük tutulması önerilmektedir. Bu değer az olması istenilen bir durumken burada göz ardı edilmemesi gereken bir durum mevcuttur. Hoparlör diyaframının ön kapak ile arasındaki mesafe azaltılırken diyaframın titreşirken ön kapak duvarına vurmaması yani takırtı seslerinin engellenmesi ve diyaframın rahatlıkla titreşebileceği bir mesafe ayarlanmalıdır.

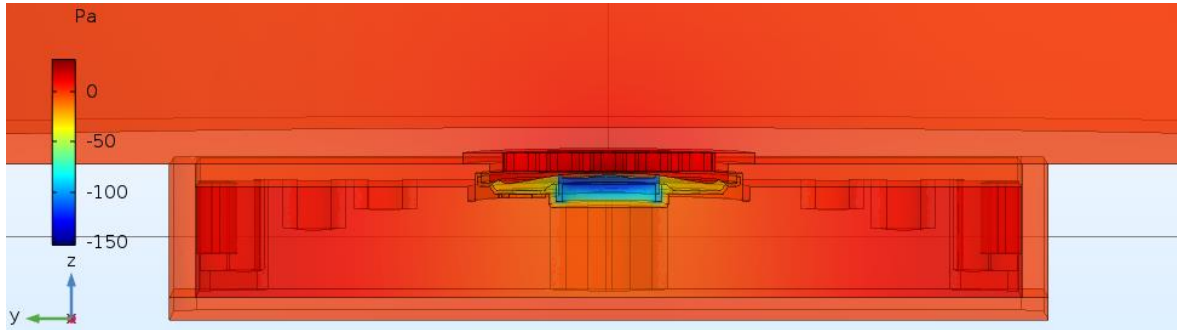


Şekil 5.11. Ön kapak mesafe etkisi sayısal sonuçlar

Şekil 5.11’de 5 aralayıcılı ön kapak mesafesi durumu için 2500 Hz değerinde SPL eğrisinin yassı davranışını kaybettiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.12 incelendiğinde hoparlörün önü ile kapak parçasının dışarısında akustik basınç farkının yaklaşık olarak 15 Pa olduğu, Şekil 5.13 incelendiğinde ise hoparlörün önü ile kapak parçasının dışarısında akustik basınç farkının yaklaşık 8 Pa olduğu gözlemlenmiştir. Ön kapak mesafesi değerinin fazla olduğu durumda hoparlörün önü ile kapak parçasının dışarısında akustik basınç farkı değeri fazladır. İç ve dış kısımlardaki bu ciddi akustik basınç farklılığı frekans davranışını bozmaktadır.

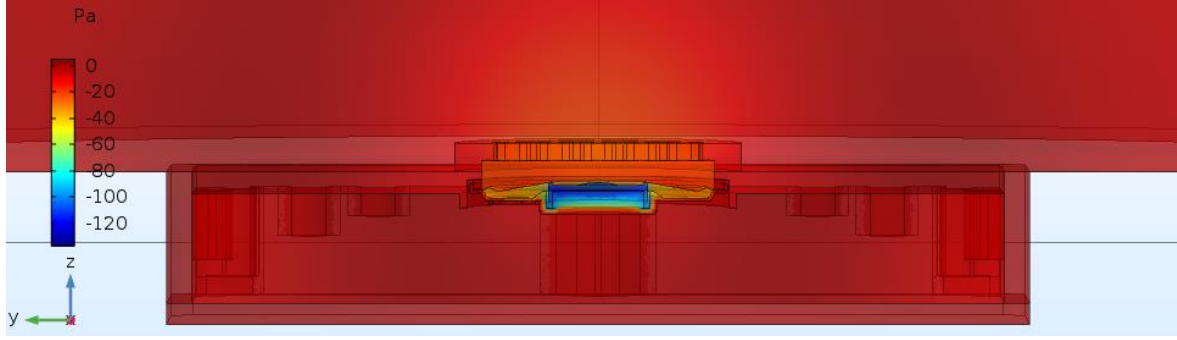


Şekil 5.12. 5 aralayıcılı ön kapak durumunda 2500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları

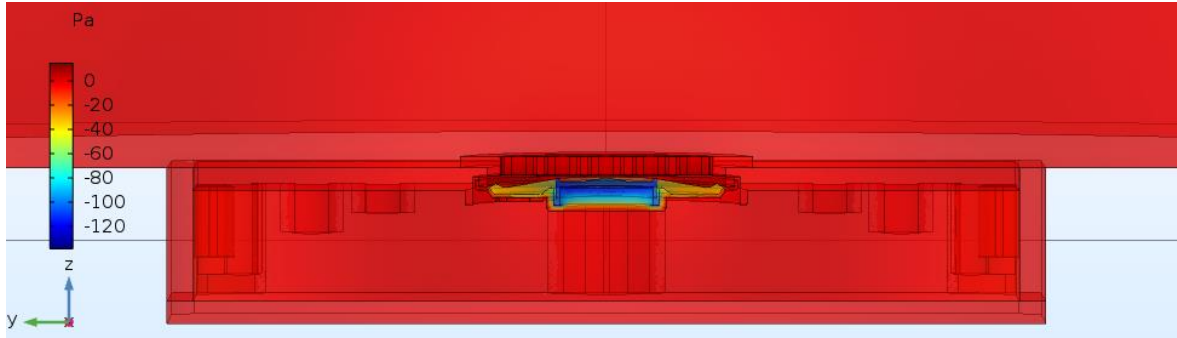


Şekil 5.13. Aralayıcısız ön kapak durumunda 2500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları

Şekil 5.11’de 5 aralayıcılı ön kapak mesafesi durumu için 5000 Hz değerinde ikinci bir rezonans frekansı gözlemlenmiştir. Şekil 5.14 incelendiğinde hoparlörün önü ile cihazın içindeki akustik basınç bölgelerinin pozitif ve negatif olarak ayrılması gerekirken her ikisinin de negatif olduğu, Şekil 5.15 incelendiğinde ise hoparlörün önü ile cihazın içindeki basınç bölgelerinin pozitif ve negatif olarak iki farklı bölgeye ayrıldığı gözlemlenmiştir. 5 aralayıcılı ön kapak mesafesi durumu için basınç bölgelerinin farklılaşmaması nedeni ile frekans eğrisinde ikincil bir rezonans frekansı oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu durumun hoparlörün ön kısmındaki fazla olan boşluk nedeni ile ses dalgalarının kapak içerisinde sekerek hoparlörün ön bölgesine tekrar gelmesi nedeni ile olduğu düşünülmektedir.

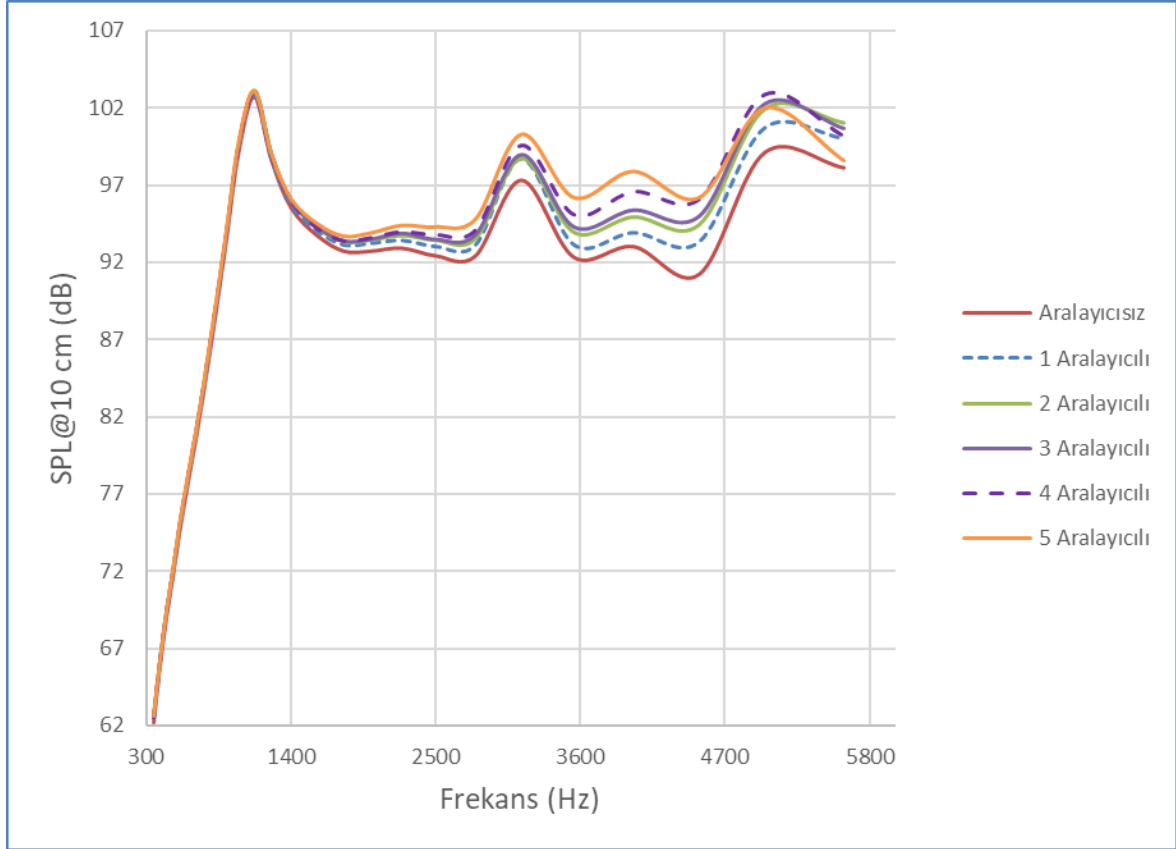


Şekil 5.14. 5 aralayıcılı ön kapak durumunda 5000 Hz değeri için akustik basınç sonuçları



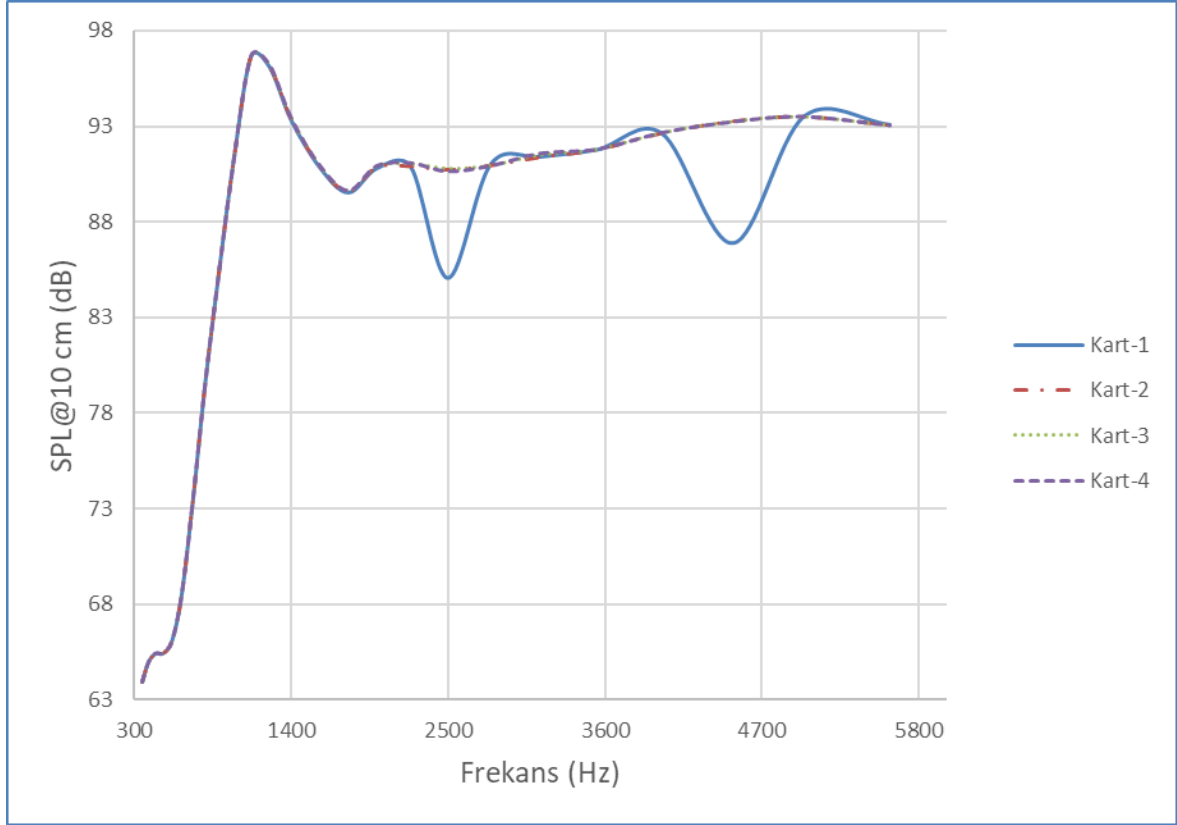
Şekil 5.15. Aralayıcısız ön kapak durumunda 5000 Hz değeri için akustik basınç sonuçları

Yapılan sayısal çalışmaların doğrulanması amacı ile üretilen parçalar akustik yankısız odada test edilmiş ve Şekil 5.16'daki sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 5.11 ve Şekil 5.16 incelendiğinde rezonans frekansının hem sayısal sonuçlar hem de deneysel sonuçlar için 1120 Hz olduğu gözlemlenmiştir. 250-500 Hz arası akustikte düşük orta aralık olarak bilinmekte olup bu aralıkta sayısal ve deneysel simülasyon sonuçları birbirleri ile uyumludur. Bu aralık ile rezonans frekansı arasında kalan bölgede sonuçlar arasında farklılıklar mevcuttur. Bunun sebebinin hoparlörün THD değerinin %5 olması ve bu bölgede harmonik bozulmanın fazla olması olduğu düşünülmektedir. Bütün durumlar için rezonans frekansının üzerinde 3150 Hz, 5000 Hz ve 5600 Hz frekansları haricinde bütün frekanslarda sayısal simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla uyumlu olup doğrulanmıştır. 3150 Hz, 5000 Hz ve 5600 Hz frekanslarında ise sapma değeri ortalama olarak 7 dB değerinin altındadır. Hoparlörün SPL toleransı ± 3 dB değerinde olduğu ve genel eğri uyumlu olduğu için bu sapmaların kabul edilebilir değerler olduğu düşünülmektedir. Ayrıca düşük ve yüksek frekanslardaki uyumsuzlukların da daha önceki literatür çalışmaları ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir değerler olduğu tespit edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak hata oranları da hesaplanarak EK-4'de verilmiştir.



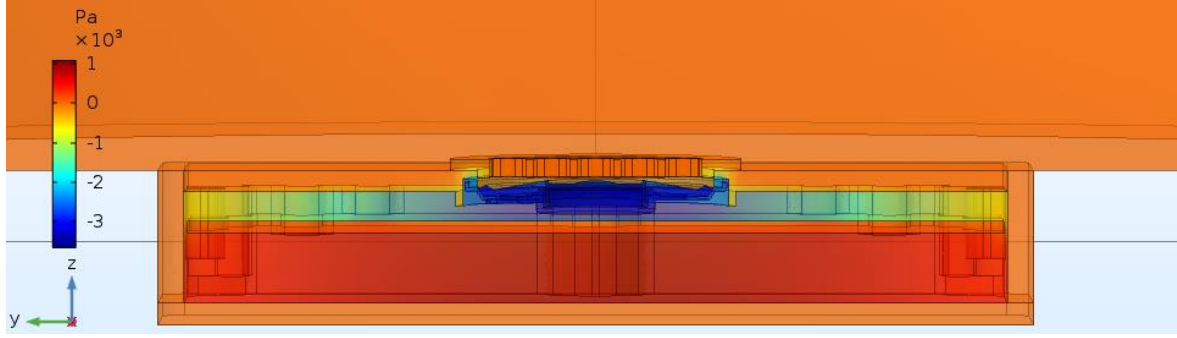
Şekil 5.16. Ön kapak mesafe etkisi deneysel sonuçlar

Kart mesafesinin akustik performansa olan etkisi incelenmiş ve sayısal sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 5.17’de verilmiştir. Kart ile hoparlörün arasındaki mesafenin azaltılması sonucunda SPL eğrisi yassı olan frekans davranışını kaybetmektedir. Mesafe miktarının en az olduğu Kart 1 durumunda ekstra rezonans frekansları olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.17’de görüldüğü üzere 2500 Hz ve 4500 Hz değerlerinde gözlemlenen rezonanslar nedeni ile SPL eğrisindeki yassı olan davranış kaybolmuştur. Diğer kart seviyelerinde birbirleri ile çok benzer SPL eğrisi davranışı gözlemlenmiştir. Melodik sesler için yassı yani düz bir frekans tepkisi olması beklenmektedir. Bu durumda Kart 2 kullanıldığı durum kart mesafesi için sınır değer olarak kabul edilebilir. Elde edilen sonuçlara göre tercih edilmesi gereken ön kapak mesafe değerleri sırası ile Kart 4, Kart 3, Kart 2 ve Kart 1’dir. Bunun sebebi Kart 1 kullanıldığı durumda hoparlörün SPL eğrisi davranışının ciddi oranda bozulması ve yassı davranışını kaybetmesidir. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre hoparlör ile kart arasındaki mesafenin mümkün olduğunca uzak olması önerilmekte ve Kart 1 seviyesinde kullanım önerilmemektedir.

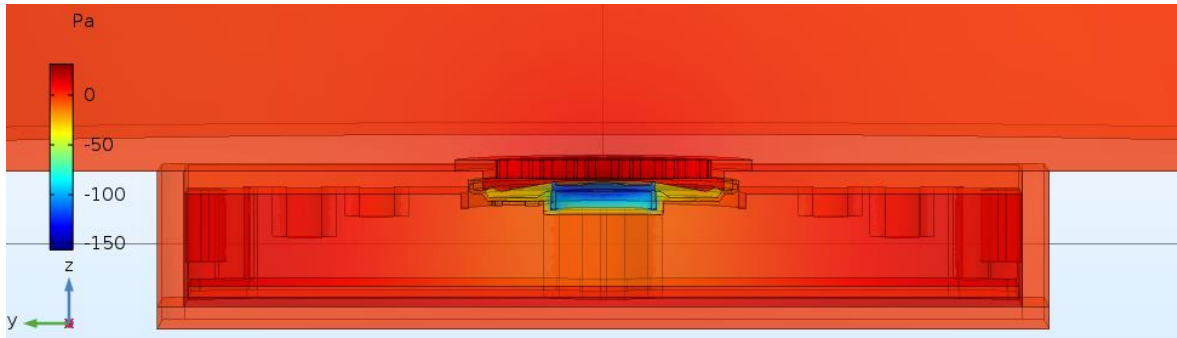


Şekil 5.17. Kart seviye etkisi sayısal sonuçlar

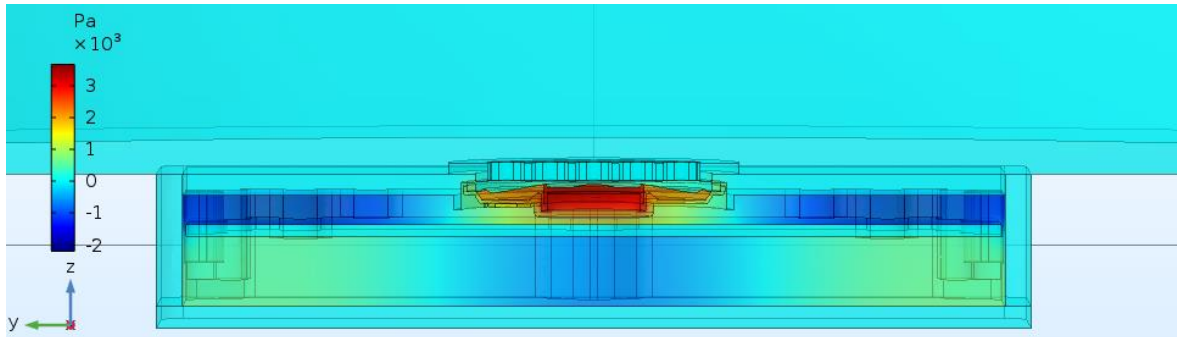
Şekil 5.17'de Kart 1 durumu için 2500 Hz ve 4500 Hz değerlerinde rezonans frekanslarının oluşturduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.18 ve Şekil 5.20 incelendiklerinde kart seviyesinin hoparlöre çok yakın olmasına bağlı olarak kart çevresinde de boşlukların az olması nedeni ile belirtilen frekans değerlerinde hoparlör arkasında ve cihaz içerisinde yüksek basınç değerleri oluşturduğu gözlemlenmiştir. Gerek bu yüksek basınç değerleri gerekse karttan yansıyıp geri gelen ses dalgaları nedeni ile rezonans frekanslarının oluştuğu düşünülmektedir. Şekil 5.19 ve Şekil 5.21'de görüleceği üzere hoparlör ile kart arasında yeterli mesafe olduğundan dolayı cihazın içerisinde daha dengeli basınç değerleri olduğu ve hava hacminin hoparlörün çalışması için yeterli olduğu gözlemlenmiştir.



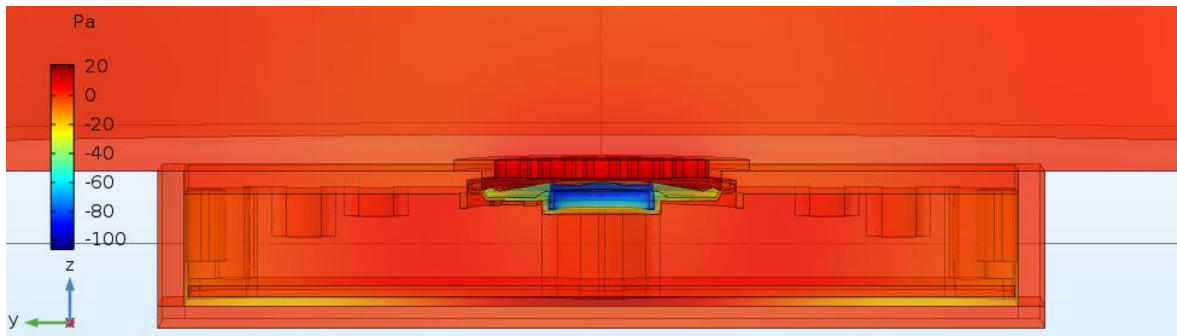
Şekil 5.18. Kart 1 durumunda 2500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları



Şekil 5.19. Kart 4 durumunda 2500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları

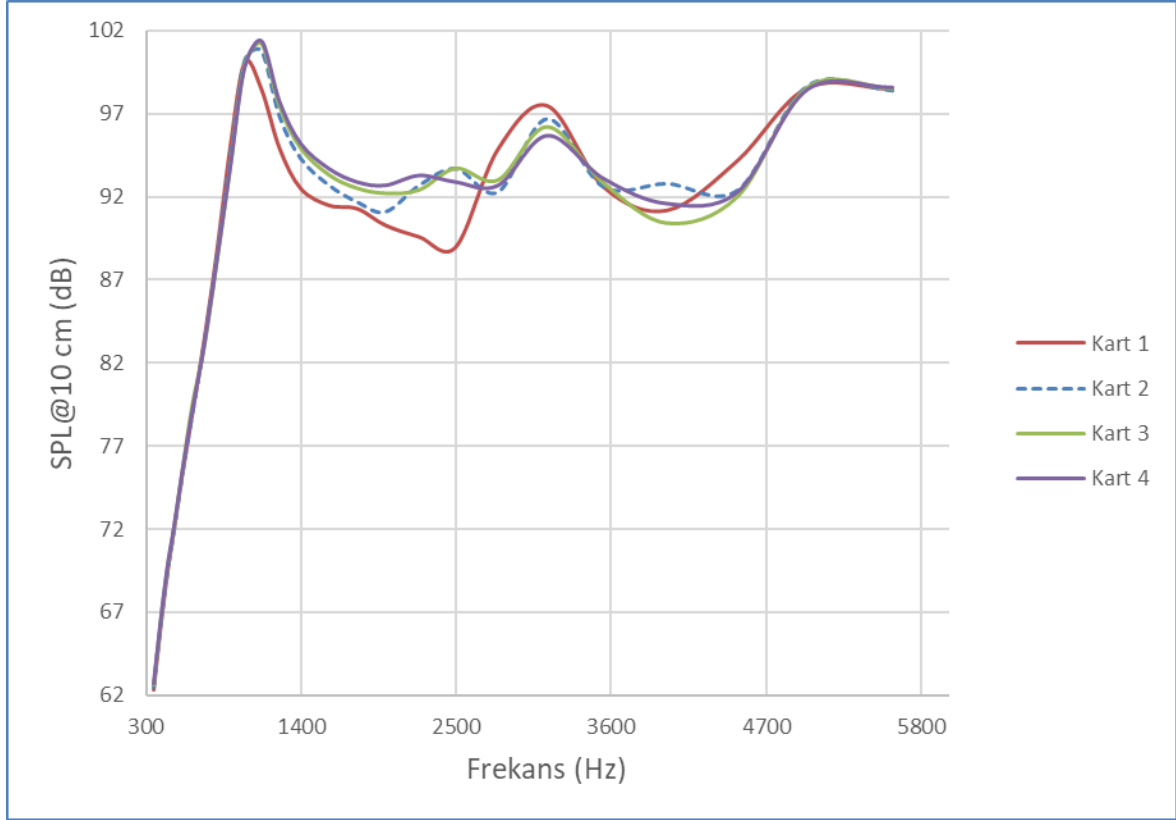


Şekil 5.20. Kart 1 durumunda 4500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları



Şekil 5.21. Kart 4 durumunda 4500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları

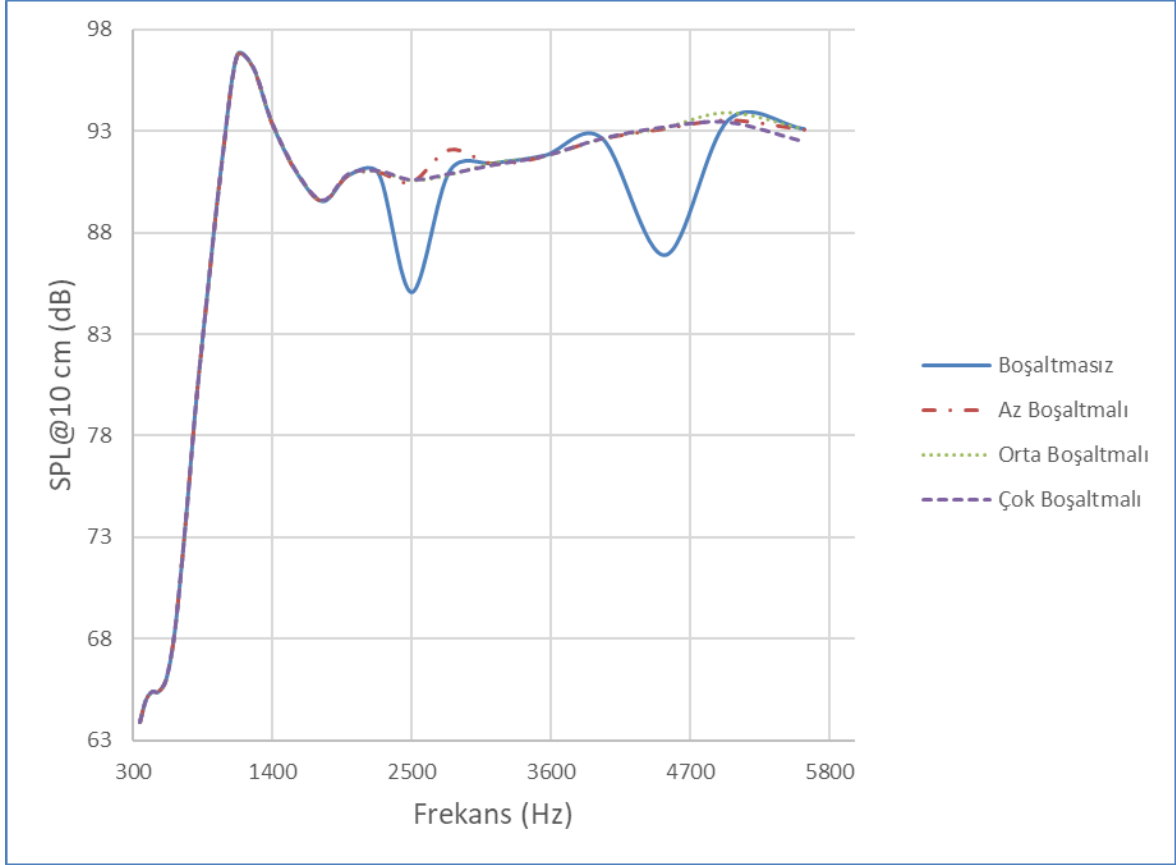
Yapılan sayısal çalışmaların doğrulanması amacı ile üretilen parçalar akustik yankısız odada test edilmiş ve Şekil 5.22'deki sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 5.17 ve Şekil 5.22 incelendiğinde rezonans frekansının hem sayısal sonuçlar hem de deneysel sonuçlar için Kart 1 durumu haricinde 1120 Hz olduğu gözlemlenmiştir. Kart 1 durumunda rezonans frekansı sayısal sonuçlar için 1120 Hz, deneysel sonuçlar için ise 1000 Hz değerinde gözlemlenmiştir. Kart 1 durumunda gözlemlenen bu farklılığın sebebinin üretim toleranslarından dolayı kart seviyesinin yakın olması nedeni ile deneysel ölçümlerde rezonans frekansının daha önce olduğu değerlendirilmektedir. 250-500 Hz arası akustikte düşük orta aralık olarak bilinmekte olup bu aralıkta sayısal ve deneysel simülasyon sonuçları birbirleri ile uyumludur. Bu aralık ile rezonans frekansı arasında kalan bölgede sonuçlar arasında farklılıklar mevcuttur. Bunun sebebinin hoparlörün THD değerinin %5 olması ve bu bölgede harmonik bozulmanın fazla olması olduğu düşünülmektedir. Bütün durumlar için rezonans frekansının üzerinde 3150 Hz, 5000 Hz ve 5600 Hz frekansları haricinde bütün frekanslarda sayısal simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla uyumlu olup doğrulanmıştır. Ayrıca Kart 1 durumu için sayısal ve deneysel sonuçlar 4500 Hz değerinde yaklaşık 7 dB değerinde bir sapma mevcut olup buna ek olarak diğer bütün durumlar için ise 3150 Hz, 5000 Hz ve 5600 Hz frekanslarında ise sapma değeri ortalama olarak 6 dB değerinin altındadır. Hoparlörün SPL toleransı ± 3 dB değerinde olduğu ve genel eğri uyumlu olduğu için bu sapmaların kabul edilebilir değerler olduğu düşünülmektedir. Ayrıca düşük ve yüksek frekanslardaki uyumsuzlukların da daha önceki literatür çalışmaları ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir değerler olduğu tespit edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak hata oranları da hesaplanarak EK-5'te verilmiştir.



Şekil 5.22. Kart seviye etkisi deneysel sonuçlar

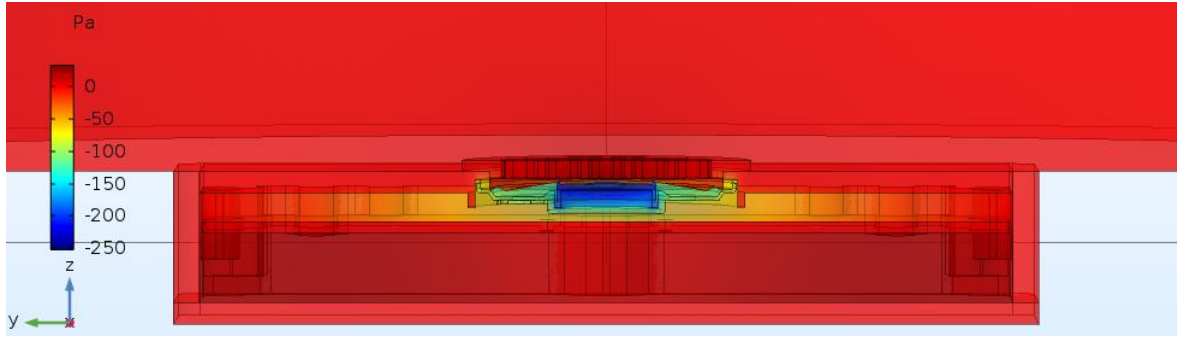
Kart üzerinde yapılan boşaltmaların akustik performansa olan etkisi incelenmiş ve sayısal sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 5.23'te verilmiştir. Kart üzerinde yer alan boşaltma oranının azaltılması sonucunda SPL eğrisi yassı olan frekans davranışını kaybetmektedir. Şekil 5.23'te görüldüğü üzere mesafe miktarının en az olduğu Kart 1 durumunda yer alan ekstra rezonans frekansları kart üzerine eklenen boşaltmalar sonucunda kaybolmuştur. Buna ek olarak boşaltma miktarının en az olduğu az boşaltmalı durumda 3150 Hz frekansında ikincil rezonans frekansı olduğu gözlemlenmiştir. Az boşaltmalı kart durumunda 3150 Hz değerinde gözlemlenen rezonans nedeni ile SPL eğrisindeki yassı olan davranış kaybolmuştur. Diğer boşaltmalı kart durumlarında birbirleri ile çok benzer SPL eğrisi davranışı gözlemlenmiştir. Melodik sesler için yassı yani düz bir frekans tepkisi olması beklenmektedir. Bu durumda orta boşaltmalı kart kullanıldığı durum kart boşaltma miktarı için sınır değer olarak kabul edilebilir. Elde edilen sonuçlara göre tercih edilmesi gereken boşaltma miktarları sırası ile çok boşaltmalı, orta boşaltmalı, az boşaltmalı ve boşaltmasız karttır. Bunun sebebi boşaltma bulunmayan kart durumunda hoparlörün SPL eğrisi davranışının ciddi oranda bozulması ve yassı davranışını kaybetmesidir. Yapılan çalışmalar sonucunda kart seviyesinin hoparlöre çok yakın olduğu durumlarda hoparlörün hava açıklığı

izdüşümüne denk gelen kısımlarda yapılan boşaltmalar ile istenilen frekans davranışı elde edilebileceği gözlemlenmiştir.

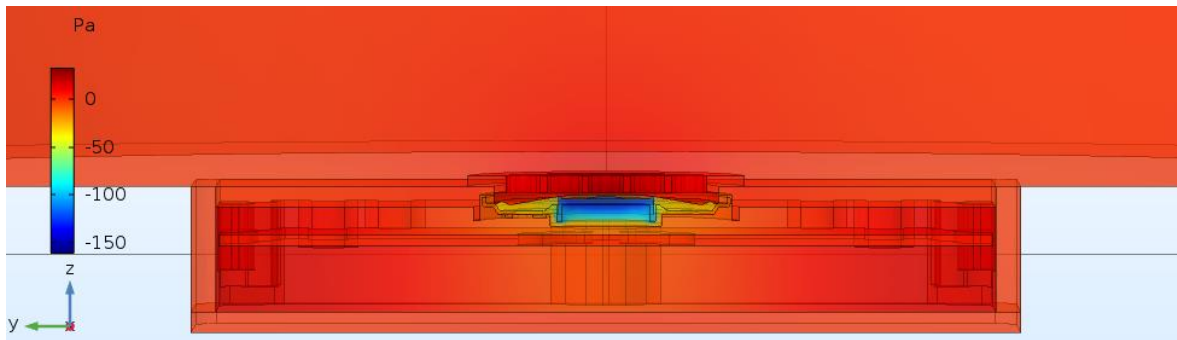


Şekil 5.23. Kart boşaltma etkisi sayısal sonuçlar

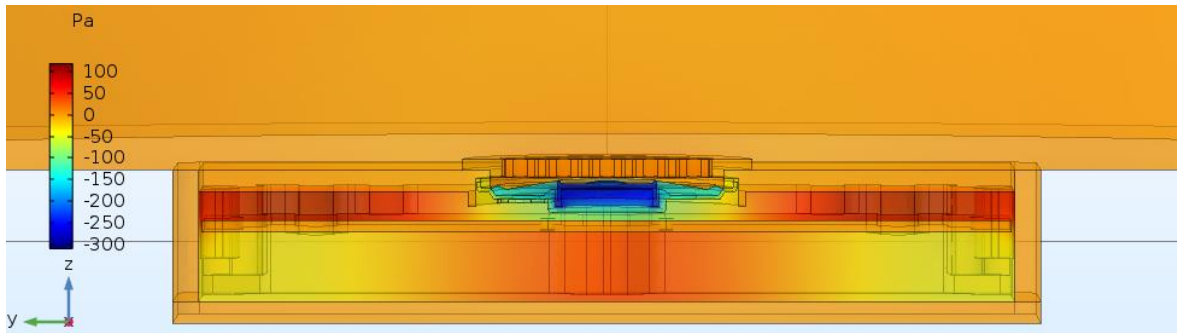
Şekil 5.23'de boşaltmasız (Kart 1) durumu için 2500 Hz ve 4500 Hz değerlerinde, az boşaltmalı kart durumu için ise 3150 Hz frekans değerinde rezonans frekanslarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.18 ve Şekil 5.20 incelendiğinde kart seviyesinin hoparlöre çok yakın olmasına bağlı olarak kart çevresinde de boşlukların az olması nedeni ile belirtilen frekans değerlerinde hoparlör arkasında ve cihaz içerisinde yüksek basınç değerleri oluştuğu gözlemlenmiştir. Gerek bu yüksek basınç değerleri gerekse karttan yansıyıp geri gelen ses dalgaları nedeni ile rezonans frekanslarının oluştuğu düşünülmektedir. Şekil 5.24, Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27 incelendiğinde kart üzerinde yapılan boşaltmalar ile boşaltmasız durumda meydana gelen rezonans frekansları elimine edilmiştir. Bunun sebebi kart üzerinde yapılan boşaltmalar sayesinde hoparlörün arka kısmındaki basınç değerlerinin boşaltmasız duruma göre daha dengeli olması ve kart üzerinden yansıyan ses dalgalarının azalması olduğu düşünülmektedir.



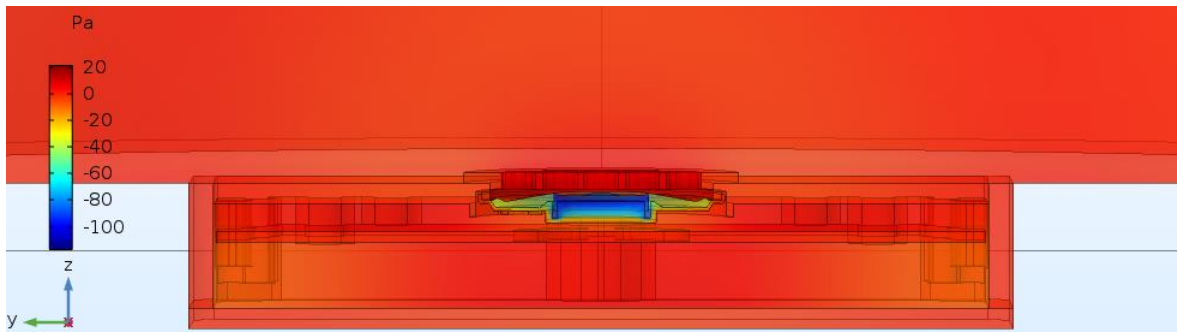
Şekil 5.24. Az boşaltmalı kart durumunda 2500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları



Şekil 5.25. Çok boşaltmalı kart durumunda 2500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları

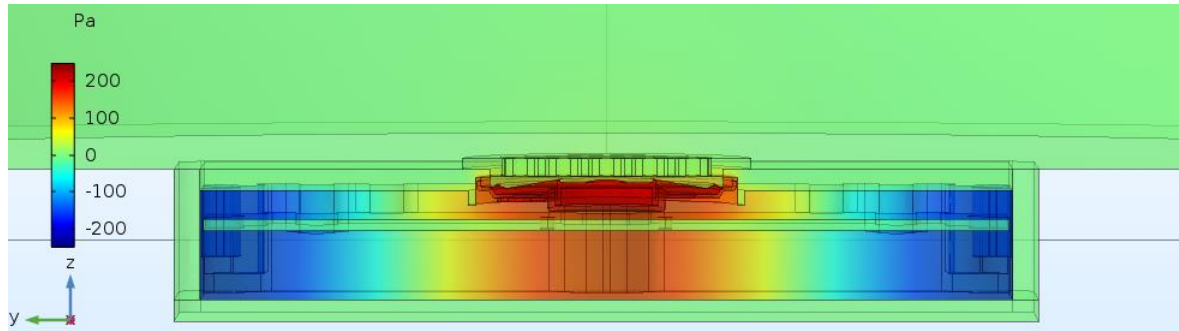


Şekil 5.26. Az boşaltmalı kart durumunda 4500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları

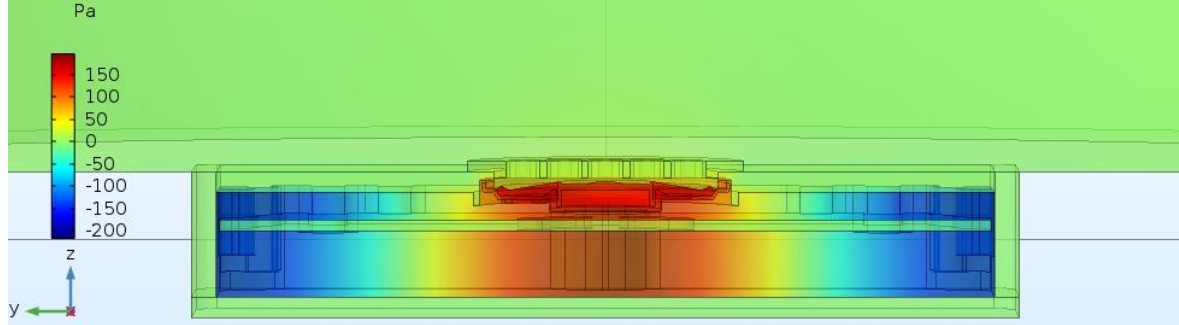


Şekil 5.27. Çok boşaltmalı kart durumunda 4500 Hz değeri için akustik basınç sonuçları

Şekil 5.23’de az boşaltmalı kart durumu için 3150 Hz frekans değerinde rezonans frekansı olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.28 incelendiğinde boşaltmanın az olmasından dolayı belirtilen frekans değerlerinde hoparlör arkasındaki basınç değerinin 250 Pa olduğu, Şekil 5.29 incelendiğinde ise çok boşaltmalı kart durumunda belirtilen frekansta hoparlörün arka kısmındaki basınç değerinin yaklaşık 185 Pa olduğu gözlemlenmiştir. Az boşaltmalı durumda gerek bu yüksek basınç değeri gerekse karttan yansıyıp geri gelen ses dalgaları nedeni ile rezonans frekansının olduğu düşünülmektedir.



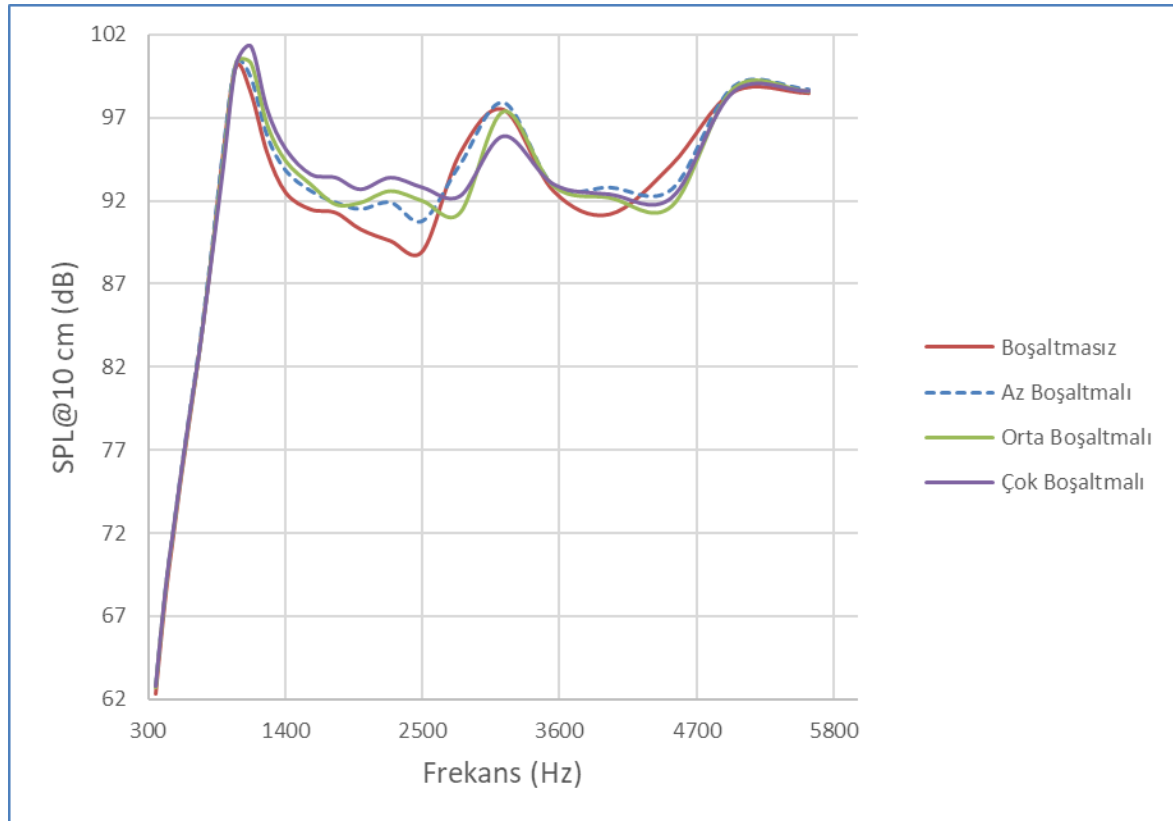
Şekil 5.28. Az boşaltmalı kart durumunda 3150 Hz değeri için akustik basınç sonuçları



Şekil 5.29. Çok boşaltmalı kart durumunda 3150 Hz değeri için akustik basınç sonuçları

Yapılan sayısal çalışmaların doğrulanması amacı ile üretilen parçalar akustik yankısız odada test edilmiş ve Şekil 5.30’daki sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 5.22 ve Şekil 5.30 incelendiğinde rezonans frekansının hem sayısal sonuçlar hem de deneysel sonuçlar için boşaltmasız ve az boşaltmalı kart durumları haricinde 1120 Hz olduğu gözlemlenmiştir. Boşaltmasız ve az boşaltmalı kart durumunda rezonans frekansı sayısal sonuçlar için 1120 Hz, deneysel sonuçlar için ise 1000 Hz değerinde gözlemlenmiştir. Boşaltmasız ve az boşaltmalı kart ve durumlarında gözlemlenen bu farklılığın sebebinin üretim toleransları nedeni ile kart seviyesinin yakın olması nedeni ile deneysel ölçümlerde rezonans frekansının daha önce olduğu değerlendirilmektedir. 250-500 Hz arası akustikte düşük orta aralık

olarak bilinmekte olup bu aralıkta sayısal ve deneysel simülasyon sonuçları birbirleri ile uyumludur. Bu aralık ile rezonans frekansı arasında kalan bölgede sonuçlar arasında farklılıklar mevcuttur. Bunun sebebinin hoparlörün THD değerinin %5 olması ve bu bölgede harmonik bozulmanın fazla olması olduğu düşünülmektedir. Bütün durumlar için rezonans frekansının üzerinde 3150 Hz, 5000 Hz ve 5600 Hz frekansları haricinde bütün frekanslarda sayısal simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla uyumlu olup doğrulanmıştır. Ayrıca boşaltmasız kart durumu için sayısal ve deneysel sonuçlar 4500 Hz değerinde yaklaşık 7 dB değerinde bir sapma mevcut olup buna ek olarak diğer bütün durumlar için ise 3150 Hz, 5000 Hz ve 5600 Hz frekanslarında ise sapma değeri ortalama olarak 6 dB değerinin altındadır. Hoparlörün SPL toleransı ± 3 dB değerinde olduğu ve genel eğri uyumlu olduğu için bu sapmaların kabul edilebilir değerler olduğu düşünülmektedir. Ayrıca düşük ve yüksek frekanslardaki uyumsuzlukların da daha önceki literatür çalışmaları ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir değerler olduğu tespit edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak hata oranları da hesaplanarak EK-6'da verilmiştir.



Şekil 5.30. Kart boşaltma etkisi deneysel sonuçlar

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında hoparlör önündeki ön açıklık miktarı, ön açıklığın hoparlöre olan mesafesi, ön açıklığın kalınlığı, hoparlör ile kart arasındaki mesafe ve kart üzerinde açılan boşaltmaların cihaz akustik performansına olan etkilerini inceleyebilmek amacı ile bir el telsizi tasarlanmıştır. Tasarlanan el telsizinde COMSOL programının akustik modülü kullanılarak tüm durumlar için ayrı ayrı sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Yapılan sayısal simülasyonların doğrulanabilmesi amacı ile el telsizi ve denenecek durumlar için gerekli olan parçaların tamamı üretilmiştir. Sayısal simülasyonlarda çözdürülen durumlar ayrı ayrı olarak akustik yankısız oda içerisinde yapılan deneysel olarak doğrulanmıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar özet halinde aşağıda sıralanmıştır.

- Ön kapak %6 açıklık durumunda 5000 Hz frekansında ek bir rezonans frekansı gözlemlenmiştir. Ön açıklık miktarının az olmasının ekstra rezonans frekansı oluşması nedeni ile yassı frekans davranışını bozduğu sonucuna varılmıştır.
- Ön kapak %18 açıklık durumunun yassı frekans davranışı için sınır bir değer olduğu görülmüştür. Bu değer altında ön açıklık oranı değerinin kullanılmaması gerektiği sonucuna varılmıştır.
- Ön kapak kalınlığı için 1,0 mm değerinin yassı frekans davranışı için sınır bir değer olduğu görülmüştür. Bu değer altındaki ön kapağın akustik performansına olan etkisi olumlu yönde olsa da imalatının zor olması ve cihaz koruması için yetersiz olacağı düşünüldüğü için 1,0 mm değerinin kullanımının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.
- Ön kapak ile hoparlör arasındaki mesafe arttıkça yassı olan frekans davranışının bozulduğu görülmüştür. Özellikle 5 aralayıcı kullanılan durumda 5000 Hz frekansında ek bir rezonans frekansı oluştuğu gözlemlenmiştir. Hoparlör ile ön kapak arasındaki mesafenin minimumda tutulması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle ön kapağın 1 aralayıcıdan fazla yükseklikte kullanılmaması önerilmektedir. Minimum boşluk değeri ayarlanırken diyaframın hareket edebileceği mesafe ayarlanarak takırtı gibi seslerin önüne geçilmelidir.
- Kart mesafesinin hoparlörün arka kısmına çok yakın olduğu durumda birden fazla rezonans frekansının oluştuğu ve yassı frekans davranışının bozulduğu görülmüştür. Bu nedenle Kart 1 seviyesinde kart kullanımının uygun olmadığı gözlemlenmiştir.

- Hoparlöre çok yakın bir seviyede kart kullanılmasının zorunlu olduğu durumlarda hoparlörün arka kısmında yer alan hava açıklıklarının iz düşümlerine gelecek şekilde kart üzerinde yapılan boşaltmaların yassı frekans davranışı için olumlu bir etkisi olduğu görülmüştür. Boşaltma oranı arttıkça yassı frekans davranışı elde edilmektedir.
- Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında düşük frekans aralığında (ilk rezonans frekansına kadar) sonuçların birbirlerinden farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin hoparlörün harmonik bozulma değerlerinin bu frekanslarda fazla olmasıdır.
- Deneysel sonuçlarda 3150 Hz frekans değerinde sayısal sonuçlardan farklı olarak rezonans meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin rijit olarak varsayılan parçalarda ekstra titreşim meydana geldiği ve bu durumunda deneysel çalışmalarda ekstra rezonans frekansı oluşturduğu düşünülmektedir.

Çalışmada elde edilen bilgilerden yararlanılarak sonraki çalışmalar için öneriler aşağıda sunulmuştur.

Çalışma kapsamında incelenen durumlarda hoparlörün ön tarafında hesaplanan sonuçlar incelenmiştir. Burada kullanıcının dış dünyada telsizden duyduğu ses basıncı seviyeleri üzerinde durulmuştur. Daha sonra yapılacak olan çalışmalar için telsizin içerisinde yer alan gürültünün telsiz içerisinde yer alan mikrofon gibi diğer elemanlar üzerindeki etkileri incelenebilir. Akustikte yankı olarak bilinen olayın mikrofon gibi diğer elemanlar üzerindeki etkisi incelenerek bu tip elemanların akustik performansları optimize edilebilir. Başka bir çalışma alanı olarak muhafaza duvarı titreşiminin akustik performansa olan etkileri incelenerek cihaz akustik performansını optimize etmeye yönelik çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKÇA

1. Borwick, J. (2001). Loudspeaker and headphone handbook (Third Edition). Great Britain: Reed Educational and Professional Publishing Ltd., 1-309.
2. Newell, P., and Holland, K. (2007). Loudspeaker for music recording and reproduction (First Edition). UK: Elsevier Ltd., 1.
3. Beranek, L. L., and Mellow, T., J. (2012). *Acoustics: Sound Fields and transducers* (First Edition). UK: Elsevier Ltd., 242-243.
4. Rice, C. W., Kellogg, E., W. (1929). Loud-Speaker. U.S. Patent No.1,707,570.
5. Bai, M. R., Liu, C., Chen, R. (2008). Optimization of microspeaker diaphragm pattern using combined finite element-lumped parameter models. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Magnetics*, 44, 2049-2057.
6. Olson, H. F. (1947). *Elements of acoustical engineering* (Second Edition). U.S.: Van Nostrand Company Inc, 1-53.
7. Beranek, L. L. (1954). *Acoustics* (First Edition). U.S.: Bolt Beranek and Newman Inc. 1-47.
8. Novak, J. F. (1959). Performance of enclosures for low resonance high compliance loudspeakers. *Journal of the Acoustical Society of America*, 7(1), 29-37.
9. Thiele, A. N. (1961). Vented-box loudspeaker systems. *Institution of Radio Engineer*, 22, 487-508.
10. Novak, J. F. (1966). Designing a ducted-port bass-reflex enclosure. *Electronics World*, 75(1), 25-29.
11. Benson, J. E. (1971). Theory and design of loudspeaker enclosures, part 2 – response relationships for infinite baffle and closed box systems. *Amalgamated Wireless (Australasia)*, 14(3), 225-293.
12. Benson, J. E. (1972). Theory and design of loudspeaker enclosures, part 3 – introduction to synthesis of vented systems. *Amalgamated Wireless (Australasia)*, 14(4), 369-484.
13. Small, R. H. (1973). Vented-box loudspeaker systems--part 1: Small-signal Analysis. *Journal of the Acoustical Society of America*, 21(5), 363-372.
14. Small, R. H. (1973). Vented-box loudspeaker systems, part 3: Synthesis. *Journal of the Acoustical Society of America*, 21(7), 549-554.
15. Shiah, Y., C., Her, H., C., Huang, J., H., Huang, B. (2008). Parametric analysis for a miniature loudspeaker used in cellular phones. *Journal of Applied Physics*, 104(10).
16. Onishi, Y., Kuroda, J., Murara, Y., Komoda, M., Tsunoda, K., Yokoyama, Y., Oikawa, Y., and Yamasaki, Y. (2010). The acoustical design of mobine phones. *Incorporating Proceedings of the 2010 Annual Conference of the Australian Acoustical Society*, 5(1), 1250-1257.

17. Zhong, X. Wu, Q., and Li, X. (2015). Influence of enclosure wall vibration on the frequency response of miniature loudspeakers. *Applied Acoustics*, 93, 9-14.
18. Chang, J. R., and Wang, C. (2019). Acoustical analysis of enclosure design parameters for microspeaker system. *Journal of Mechanics*, 35(1), 1-12.
19. Hughes, W. J. (1977). *Diffraction effect of baffles on acoustic directivity patterns*. Doctoral thesis, Pennsylvania State Univ University Park Applied Research Lab, Pennsylvania.
20. Talbot-Smith, M. (2013). *Audio engineer's reference book* (Second Edition). Great Britain: Reed Educational and Professional Publishing Ltd., 2-62.
21. Weems, D., B. (1997). *Designing, building, and testing your own speaker system with projects* (Fourth Edition). U.S.: Mc Graw Hill Education, 13-15.
22. Olson, H., F. (1957). *Acoustical engineering* (First Edition). U.S.: Van Nostrand Company Inc., 161-162.
23. Capel, V. (1988). *An introduction to loudspeakers and enclosure design* (First Edition). England: Bernard Babani (publishing) Ltd., 73-74.
24. İnternet: British Standard. (2013). *Degrees of protection provided by enclosures* (BS EN 60529, 1992+A2:2013). Web: https://www.en-standard.eu/bs-en-60529-1992-a2-2013-degrees-of-protection-provided-by-enclosures-ip-code/?gclid=Cj0KCQjwpeaYBhDXARIsAEzItbF6omI00uCQZ1S1wNPNNCrD17dR5BAz7J1HufFH_aPc9Z92OKTepw8aAijbEALw_wcB, Son Erişim Tarihi: 11.09.2022.
25. İnternet: Rose, B. (2022). *How to design a micro speaker enclosure*. Web: <https://www.cuidevices.com/blog/how-to-design-a-micro-speaker-enclosure>, Son Erişim Tarihi: 11.09.2022.
26. İnternet: COMSOL. *Loudspeaker driver – frequency domain analysis*. Web: https://www.comsol.com/model/download/898161/models.aco.loudspeaker_driver.pdf, Son Erişim Tarihi: 11.09.2022.
27. İnternet: COMSOL. *Loudspeaker driver in a vented enclosure*. Web: https://www.comsol.com/model/download/899271/models.aco.vented_loudspeaker_enclosure.pdf, Son Erişim Tarihi: 11.09.2022.

EKLER

EK-1. Frekansa bağı olarak ölçülen indüktans ve direnç değerleri

Çizelge 1.1. Frekansa bağı olarak ölçülen indüktans ve direnç değerleri

Frekans (Hz)	İndüktans (Lb,H)	Frekans (Hz)	Direnç (Rb,Ω)
100,00	0,000024483	100,00	8,09816
107,90	0,000024482	107,90	8,15791
116,42	0,000024482	116,42	8,22031
125,61	0,000024481	125,61	8,25922
135,53	0,000024480	135,53	8,31872
146,24	0,000024479	146,24	8,39053
157,78	0,000024478	157,78	8,47368
170,24	0,000024477	170,24	8,60719
183,69	0,000024476	183,69	8,65843
198,20	0,000024474	198,20	8,86471
213,85	0,000024472	213,85	8,93272
230,73	0,000024470	230,73	9,23581
248,96	0,000024468	248,96	9,40201
268,62	0,000024465	268,62	9,72537
289,83	0,000024462	289,83	10,11717
312,72	0,000024458	312,72	10,62941
337,42	0,000024454	337,42	11,16552
364,06	0,000024450	364,06	11,91294
392,81	0,000024445	392,81	13,10386
423,83	0,000024439	423,83	14,75718
457,31	0,000024433	457,31	17,42687
493,42	0,000024426	493,42	21,15469
532,39	0,000024418	532,39	24,29571
574,43	0,000024410	574,43	28,46234
619,79	0,000024400	619,79	28,74655
668,74	0,000024389	668,74	25,89097
721,55	0,000024378	721,55	21,72639
778,53	0,000024365	778,53	17,08563
840,02	0,000024350	840,02	14,65168
906,36	0,000024334	906,36	12,93823
977,93	0,000024317	977,93	11,69495
1055,20	0,000024298	1055,20	10,83566
1138,50	0,000024277	1138,50	10,20742
1228,40	0,000024254	1228,40	9,72174
1325,40	0,000024229	1325,40	9,33586
1430,10	0,000024201	1430,10	9,03695
1543,00	0,000024171	1543,00	8,80524
1664,90	0,000024139	1664,90	8,61750

EK-1. (devam) Frekansa bağı olarak ölçülen indüktans ve direnç değerleri

Çizelge 1.1. (devam) Frekansa bağı olarak ölçülen indüktans ve direnç değerleri

Frekans (Hz)	İndüktans (Lb,H)	Frekans (Hz)	Direnç (Rb,Ω)
1796,40	0,000024103	1796,40	8,47174
1938,20	0,000024065	1938,20	8,35372
2091,30	0,000024024	2091,30	8,25809
2256,40	0,000023980	2256,40	8,18000
2434,60	0,000023933	2434,60	8,11939
2626,90	0,000023882	2626,90	8,07388
2834,30	0,000023828	2834,30	8,04363
3058,20	0,000023770	3058,20	8,02465
3299,70	0,000023709	3299,70	8,01779
3560,30	0,000023644	3560,30	8,01993
3841,40	0,000023575	3841,40	8,03264
4144,80	0,000023502	4144,80	8,05745
4472,10	0,000023424	4472,10	8,09610
4825,30	0,000023342	4825,30	8,14966
5206,40	0,000023255	5206,40	8,20517
5617,50	0,000023163	5617,50	8,24149
6061,20	0,000023067	6061,20	8,26246
6539,80	0,000022965	6539,80	8,28520
7056,30	0,000022859	7056,30	8,33246
7613,50	0,000022747	7613,50	8,40220
8214,80	0,000022630	8214,80	8,48551
8863,50	0,000022508	8863,50	8,58106
9563,50	0,000022382	9563,50	8,68649
10319,00	0,000022250	10319,00	8,80402
11134,00	0,000022114	11134,00	8,93344
12013,00	0,000021973	12013,00	9,07545
12962,00	0,000021828	12962,00	9,22975
13985,00	0,000021678	13985,00	9,39689
15090,00	0,000021524	15090,00	9,57946
16281,00	0,000021366	16281,00	9,77587
17567,00	0,000021203	17567,00	9,98560
18954,00	0,000021036	18954,00	10,21426
		20000,00	10,38981

EK-2. Ön kapak açıklık oranı sayısal- deneysel karşılaştırmalı sonuçlar ve hata oranları

Çizelge 2.1. Ön kapak açıklık oranı sayısal- deneysel karşılaştırmalı sonuçlar ve hata oranları

Frekans (Hz)	%6 Ön Açıklık Sayısal Sonuçlar	%6 Ön Açıklık Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı	%12 Ön Açıklık Sayısal Sonuçlar	%12 Ön Açıklık Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı	%18 Ön Açıklık Sayısal Sonuçlar	%18 Ön Açıklık Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı	%24 Ön Açıklık Sayısal Sonuçlar	%24 Ön Açıklık Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı	%30 Ön Açıklık Sayısal Sonuçlar	%30 Ön Açıklık Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı
355	63,893	62,9	1,58	63,886	62,8	1,70	63,878	62,9	1,55	63,878	63	1,39	63,874	62,8	1,71
400	64,972	66,5	2,30	64,96	66,2	1,91	64,949	66,3	2,04	64,949	66,5	2,33	64,945	66,2	1,90
450	65,433	69,9	6,39	65,406	69,6	6,41	65,396	69,7	6,18	65,392	69,8	6,32	65,388	69,6	6,05
500	65,454	72,6	9,84	65,417	72,3	10,52	65,402	72,3	9,54	65,401	72,5	9,79	65,397	72,2	9,42
560	66,046	76	13,10	65,999	75,7	14,70	65,981	75,7	12,84	65,977	75,8	12,96	65,973	75,6	12,73
630	68,488	79,7	14,07	68,426	79,3	15,89	68,404	79,3	13,74	68,4	79,4	13,85	68,394	79,2	13,64
710	73,501	84	12,50	73,419	83,4	13,59	73,391	83,3	11,90	73,385	83,5	12,11	73,377	83,2	11,81
800	79,93	89,4	10,59	79,821	88,6	11,00	79,786	88,4	9,74	79,777	88,6	9,96	79,768	88,3	9,66
900	85,97	95,9	10,35	85,824	94,7	10,34	85,779	94,5	9,23	85,767	94,8	9,53	85,755	94,3	9,06
1000	91,691	100,6	8,86	91,505	100,5	9,83	91,448	100,4	8,92	91,433	100,5	9,02	91,418	100,3	8,86
1120	97,034	99,7	2,67	96,829	101,2	4,51	96,768	101,7	4,85	96,752	101,4	4,58	96,736	101,8	4,97
1250	96,529	96,5	0,03	96,322	97,6	1,33	96,261	98	1,77	96,247	97,8	1,59	96,236	98,2	2,00
1400	93,891	94,7	0,85	93,612	95,4	1,91	93,532	95,7	2,27	93,511	95,6	2,19	93,497	95,8	2,40
1600	91,597	93,4	1,93	91,197	93,9	2,96	91,088	94	3,10	91,057	94	3,13	91,037	94,1	3,26
1800	90,482	92,4	2,08	89,947	92,5	2,84	89,802	92,7	3,13	89,761	92,6	3,07	89,734	92,6	3,10
2000	92,016	92,4	0,42	91,34	92,4	1,16	91,137	92,5	1,47	91,087	92,3	1,31	91,043	92,3	1,36
2240	92,502	93,6	1,17	91,616	93,3	1,84	91,352	93,3	2,09	91,285	93,3	2,16	91,228	93,2	2,12
2500	92,501	93,8	1,38	91,324	93,2	2,05	90,985	93,2	2,38	90,896	93,2	2,47	90,823	93	2,34
2800	93,458	94,7	1,31	91,844	93,8	2,13	91,381	93,6	2,37	91,263	93,6	2,50	91,162	93,3	2,29
3150	94,982	98,9	3,96	92,743	95,7	3,19	92,131	94,5	2,51	91,973	89,2	3,11	91,84	93,1	1,35
3550	96,678	97,1	0,43	93,414	94,9	1,59	92,528	94,4	1,98	92,313	94,5	2,31	92,12	94,1	2,10
4000	99,864	96,5	3,49	94,873	93,5	1,45	93,616	92,7	0,99	93,318	92,8	0,56	93,046	92,3	0,81
4500	104,17	99,5	4,69	96,23	95	1,28	94,469	93,6	0,93	94,058	93,8	0,28	93,681	93	0,73
5000	106,49	106,4	0,08	97,382	101,3	4,02	95,004	99,7	4,71	94,442	99,5	5,08	93,947	98,9	5,01
5600	100,14	105,8	5,35	98,066	102,9	4,93	94,872	100,8	5,88	94,095	100,2	6,09	93,429	99,3	5,91

EK-3. Ön kapak kalınlık etkisi sayısal- deneysel karşılaştırmalı sonuçlar ve hata oranları

Çizelge 3.1. Ön kapak kalınlık etkisi sayısal- deneysel karşılaştırmalı sonuçlar ve hata oranları

Frekans (Hz)	0,5 mm Ön Kapak Kalınlığı Sayısal Sonuçlar	0,5 mm Ön Kapak Kalınlığı Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı	1 mm Ön Kapak Kalınlığı Sayısal Sonuçlar	1 mm Ön Kapak Kalınlığı Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı	1,5 mm Ön Kapak Kalınlığı Sayısal Sonuçlar	1,5 mm Ön Kapak Kalınlığı Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı	2 mm Ön Kapak Kalınlığı Sayısal Sonuçlar	2 mm Ön Kapak Kalınlığı Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı	2,5 mm Ön Kapak Kalınlığı Sayısal Sonuçlar	2,5 mm Ön Kapak Kalınlığı Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı
355	63,871	62,9	1,54	63,874	63,1	1,21	63,878	63	1,39	63,881	63	1,40	63,89	63,1	1,25
400	64,94	66,3	2,05	64,945	66,5	2,39	64,949	66,5	2,33	64,953	66,5	2,33	64,961	66,6	2,46
450	65,382	69,7	6,20	65,387	69,9	6,90	65,396	69,8	6,31	65,396	69,9	6,44	65,404	70	6,57
500	65,391	72,4	9,68	65,397	72,5	10,86	65,402	72,5	9,79	65,406	72,5	9,78	65,414	72,6	9,90
560	65,978	75,7	12,84	65,984	75,9	15,03	65,981	75,8	12,95	65,992	75,9	13,05	66	76	13,16
630	68,39	79,3	13,76	68,396	79,5	16,23	68,404	79,4	13,85	68,404	79,5	13,96	68,412	79,6	14,06
710	73,375	83,3	11,91	73,381	83,5	13,79	73,391	83,5	12,11	73,389	83,6	12,21	73,396	83,7	12,31
800	79,768	88,5	9,87	79,774	88,7	11,19	79,786	88,6	9,95	79,781	88,8	10,16	79,788	88,9	10,25
900	85,758	94,5	9,25	85,764	94,8	10,54	85,779	94,8	9,52	85,77	94,9	9,62	85,777	95	9,71
1000	91,423	100,4	8,94	91,43	100,5	9,92	91,448	100,5	9,01	91,435	100,6	9,11	91,443	100,7	9,19
1120	96,75	101,5	4,68	96,752	101,5	4,91	96,768	101,4	4,57	96,751	101,2	4,40	96,755	101,1	4,30
1250	96,261	97,9	1,67	96,252	97,9	1,71	96,261	97,8	1,57	96,244	97,7	1,49	96,24	97,6	1,39
1400	93,529	95,7	2,27	93,519	95,7	2,33	93,532	95,6	2,16	93,507	95,5	2,09	93,502	95,5	2,09
1600	91,079	94	3,11	91,067	94,1	3,33	91,088	94	3,10	91,052	93,9	3,03	91,046	93,9	3,04
1800	89,785	92,5	2,94	89,772	92,7	3,26	89,802	92,6	3,02	89,755	92,5	2,97	89,749	92,6	3,08
2000	91,104	92,4	1,40	91,094	92,5	1,54	91,137	92,3	1,26	91,082	92,3	1,32	91,08	92,4	1,43
2240	91,301	93,2	2,04	91,291	93,4	2,31	91,352	93,3	2,09	91,283	93,2	2,06	91,285	93,3	2,16
2500	90,903	93	2,25	90,898	93,2	2,53	90,985	93,2	2,38	90,9	93,1	2,36	90,909	93,1	2,35
2800	91,239	93,6	2,52	91,249	93,6	2,58	91,381	93,6	2,37	91,288	93,6	2,47	91,311	93,6	2,45
3150	91,931	88,4	3,99	91,948	88,5	3,75	92,131	89,2	3,29	92,013	88,3	4,20	92,065	88,7	3,79
3550	92,158	94,4	2,38	92,231	94,5	2,46	92,528	94,5	2,09	92,412	94,5	2,21	92,531	94,6	2,19
4000	93,018	92,9	0,13	93,16	92,9	0,28	93,616	92,8	0,88	93,506	93	0,54	93,719	93	0,77
4500	93,547	93,2	0,37	93,786	93,5	0,30	94,469	93,8	0,71	94,376	94,4	0,03	94,743	94,6	0,15
5000	93,661	99	5,39	94,024	99,4	5,72	95,004	99,5	4,52	94,933	100,1	5,16	95,503	100,3	4,78
5600	92,936	99,3	6,41	93,474	100,1	7,09	94,872	100,2	5,32	94,817	101,1	6,21	95,643	101,7	5,96

EK-4. Ön kapak mesafe etkisi sayısal- deneysel karşılaştırmalı sonuçlar ve hata oranları

Çizelge 4.1. Ön kapak mesafe etkisi sayısal- deneysel karşılaştırmalı sonuçlar ve hata oranları

Frekans (Hz)	Aralıcsız		1 Aralayıcı		2 Aralayıcı		3 Aralayıcı		4 Aralayıcı		5 Aralayıcı		% Hata Oranı				
	Ön Kapak Durumu Sayısal Sonuçlar	% Hata Oranı	Ön Kapak Durumu Sayısal Sonuçlar	Ön Kapak Durumu Deneysel Sonuçlar	Ön Kapak Durumu Sayısal Sonuçlar	% Hata Oranı	Ön Kapak Durumu Sayısal Sonuçlar	% Hata Oranı	Ön Kapak Durumu Sayısal Sonuçlar	% Hata Oranı	Ön Kapak Durumu Sayısal Sonuçlar						
355	63,882	62,2	2,70	63,885	62,5	2,17	63,886	62,5	2,22	63,91	2,26	63,92	62,5	2,27	63,931	62,6	2,13
400	64,95	65,7	1,14	64,955	66	1,61	64,957	66	1,58	64,98	1,55	64,991	65,9	1,38	65,002	66	1,51
450	65,39	68,9	5,09	65,394	69,2	5,82	65,4	69,2	5,49	65,42	5,46	65,432	69,2	5,45	65,445	69,3	5,56
500	65,396	71,6	8,66	65,403	71,9	9,93	65,41	71,9	9,03	65,429	9,00	65,441	71,9	8,98	65,455	72	9,09
560	65,979	75	12,03	65,977	75,3	14,13	65,986	75,3	12,37	66,005	12,36	66,019	75,3	12,33	66,033	75,5	12,54
630	68,387	78,4	12,77	68,398	78,7	15,06	68,408	78,7	13,08	68,427	13,16	68,442	78,8	13,14	68,459	78,9	13,23
710	73,372	82,3	10,85	73,38	82,7	12,70	73,392	82,6	11,15	73,412	11,23	73,429	82,7	11,21	73,447	82,8	11,30
800	79,754	87,2	8,54	79,769	87,6	9,82	79,783	87,6	8,92	79,805	8,90	79,825	87,7	8,98	79,845	87,8	9,06
900	85,737	93	7,81	85,755	93,4	8,91	85,772	93,3	8,07	85,796	8,14	85,819	93,4	8,12	85,842	93,6	8,29
1000	91,396	99,1	7,77	91,416	99,6	8,95	91,436	99,5	8,10	91,463	8,17	91,49	99,6	8,14	91,517	99,8	8,30
1120	96,699	102,7	5,84	96,724	102,8	6,28	96,75	103,1	6,16	96,781	6,13	96,812	103	6,01	96,844	103,1	6,07
1250	96,173	98,6	2,46	96,205	98,7	2,59	96,239	99	2,79	96,275	2,75	96,311	98,9	2,62	96,349	99	2,68
1400	93,421	95,5	2,18	93,459	95,7	2,40	93,501	96	2,60	93,545	2,56	93,589	96	2,51	93,635	96,1	2,57
1600	90,942	93,7	2,94	90,991	94	3,31	91,044	94,2	3,35	91,1	3,39	91,157	94,2	3,23	91,217	94,5	3,47
1800	89,621	92,7	3,32	89,681	93,1	3,81	89,745	93,3	3,81	89,815	3,84	89,888	93,4	3,76	89,964	93,7	3,99
2000	90,917	92,7	1,92	90,994	93,2	2,42	91,074	93,4	2,49	91,162	2,50	91,256	93,6	2,50	91,354	93,9	2,71
2240	91,068	92,9	1,97	91,17	93,4	2,45	91,278	93,7	2,58	91,396	2,67	91,52	94	2,64	91,652	94,4	2,91
2500	90,628	92,4	1,92	90,759	93	2,47	90,901	93,4	2,68	91,056	2,61	91,221	93,8	2,75	91,399	94,3	3,08
2800	90,934	92,4	1,59	91,106	93,1	2,19	91,298	93,5	2,36	91,509	2,44	91,737	94,1	2,51	91,986	94,8	2,97
3150	91,575	97,3	5,88	91,794	98,7	7,52	92,048	98,7	6,74	92,312	6,76	92,634	99,6	6,99	92,991	100,3	7,29
3550	91,785	92,3	0,56	92,123	93,1	1,06	92,506	93,9	1,48	92,932	1,45	93,415	95,1	1,77	93,962	96,2	2,33
4000	92,65	93	0,38	93,132	93,9	0,82	93,683	94,9	1,28	94,312	1,14	95,037	96,6	1,62	95,869	97,9	2,07
4500	93,234	91,2	2,23	93,909	93,3	0,65	94,69	94,4	0,31	95,598	0,63	96,64	96,1	0,56	97,797	96,2	1,66
5000	93,475	99,1	5,68	94,378	100,7	6,70	95,429	101,9	6,35	96,617	5,56	97,862	102,9	4,90	98,919	102	3,02
5600	93,025	98,1	5,17	94,216	100	6,14	95,543	101	5,40	96,823	3,85	97,622	100,2	2,57	97,456	98,6	1,16

EK-5. Kart seviye etkisi sayısal- deneysel karşılaştırmalı sonuçlar ve hata oranları

Çizelge 5.1. Kart seviye etkisi sayısal- deneysel karşılaştırmalı sonuçlar ve hata oranları

Frekans (Hz)	Kart 1 Durumu Sayısal Sonuçlar	Kart 1 Durumu Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı	Kart 2 Durumu Sayısal Sonuçlar	Kart 2 Durumu Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı	Kart 3 Durumu Sayısal Sonuçlar	Kart 3 Durumu Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı	Kart 4 Durumu Sayısal Sonuçlar	Kart 4 Durumu Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı
355	63,915	62,3	2,59	63,916	62,5	2,22	63,888	62,6	2,06	63,89	62,7	1,90
400	64,975	65,8	1,25	64,976	66	1,58	64,954	66,1	1,73	64,956	66,2	1,88
450	65,408	69,2	5,48	65,41	69,3	5,95	65,392	69,5	5,91	65,393	69,6	6,04
500	65,409	72	9,15	65,41	72	10,07	65,397	72,1	9,30	65,397	72,2	9,42
560	65,979	75,4	12,49	65,98	75,4	14,28	65,968	75,6	12,74	65,969	75,6	12,74
630	68,396	79	13,42	68,396	79	15,50	68,386	79,5	13,98	68,387	79,2	13,65
710	73,378	83,2	11,81	73,375	83	13,12	73,366	82,8	11,39	73,366	82,9	11,50
800	79,77	88,5	9,86	79,762	88,2	10,58	79,753	87,9	9,27	79,752	88	9,37
900	85,764	95,1	9,82	85,748	94,5	10,21	85,737	93,9	8,69	85,734	93,9	8,70
1000	91,436	100,1	8,66	91,411	100,2	9,61	91,396	99,9	8,51	91,392	99,8	8,42
1120	96,703	98,5	1,82	96,702	100,8	4,24	96,698	101,2	4,45	96,698	101,4	4,64
1250	96,092	94,9	1,26	96,143	96,8	0,68	96,164	97,4	1,27	96,174	97,7	1,56
1400	93,336	92,5	0,90	93,388	94,3	0,98	93,41	94,9	1,57	93,42	95,2	1,87
1600	90,864	91,5	0,70	90,91	92,7	1,97	90,931	93,3	2,54	90,941	93,7	2,94
1800	89,542	91,3	1,93	89,584	91,7	2,36	89,608	93,3	3,96	89,619	92,9	3,53
2000	90,811	90,3	0,57	90,862	91,1	0,26	90,899	92,2	1,41	90,915	92,7	1,93
2240	90,881	89,6	1,43	90,905	92,7	1,97	91,032	92,4	1,48	91,065	93,3	2,40
2500	85,07	89	4,42	90,724	93,7	3,28	90,778	93,7	3,12	90,625	92,9	2,45
2800	91,03	94,9	4,08	90,954	92,3	1,48	90,942	93	2,21	90,922	92,7	1,92
3150	91,413	97,5	6,24	91,391	96,7	5,81	91,494	96,2	4,89	91,574	95,7	4,31
3550	91,794	92,6	0,87	91,782	92,6	0,89	91,787	92,8	1,09	91,789	93,1	1,41
4000	92,647	91,2	1,59	92,644	92,8	0,17	92,646	90,4	2,48	92,649	91,6	1,15
4500	86,897	94,2	7,75	93,263	92,4	0,93	93,243	92	1,35	93,231	92,3	1,01
5000	93,547	98,6	5,12	93,5	98,7	5,56	93,486	98,6	5,19	93,498	98,5	5,08
5600	93,096	98,5	5,49	93,052	98,4	5,75	93,042	98,5	5,54	93,034	98,6	5,65

EK-6. Kart boşaltma etkisi sayısal- deneysel karşılaştırmalı sonuçlar ve hata oranları

Çizelge 6.1. Kart boşaltma etkisi sayısal- deneysel karşılaştırmalı sonuçlar ve hata oranları

Frekans (Hz)	Boşaltmasız Kart Durumu Sayısal Sonuçlar	Boşaltmasız Kart Durumu Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı	Az Boşaltmalı Kart Durumu Sayısal Sonuçlar	Az Boşaltmalı Kart Durumu Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı	Orta Boşaltmalı Kart Durumu Sayısal Sonuçlar	Orta Boşaltmalı Kart Durumu Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı	Çok Boşaltmalı Kart Durumu Sayısal Sonuçlar	Çok Boşaltmalı Kart Durumu Deneysel Sonuçlar	% Hata Oranı
355	63,915	62,3	2,59	63,890	62,8	1,71	63,891	62,7	1,90	63,886	62,8	1,73
400	64,975	65,8	1,25	64,955	66,3	2,07	64,956	66,2	1,88	64,953	66,3	2,03
450	65,408	69,2	5,48	65,393	69,7	6,59	65,394	69,6	6,04	65,392	69,7	6,18
500	65,409	72	9,15	65,395	72,4	10,71	65,397	72,3	9,55	65,396	72,4	9,67
560	65,979	75,4	12,49	65,968	75,8	14,90	65,969	75,6	12,74	65,968	75,7	12,86
630	68,396	79	13,42	68,388	79,4	16,10	68,388	79,2	13,65	68,386	79,3	13,76
710	73,378	83,2	11,81	73,370	83,5	13,81	73,368	83,2	11,82	73,366	83,2	11,82
800	79,77	88,5	9,86	79,760	88,8	11,33	79,757	88,5	9,88	79,752	88,3	9,68
900	85,764	95,1	9,82	85,749	95,2	11,02	85,743	94,6	9,36	85,736	94,2	8,99
1000	91,436	100,1	8,66	91,418	100,3	9,72	91,406	100,3	8,87	91,395	100,2	8,79
1120	96,703	98,5	1,82	96,700	99,4	2,79	96,699	100,3	3,59	96,698	101,3	4,54
1250	96,092	94,9	1,26	96,120	95,9	0,23	96,145	96,6	0,47	96,167	97,5	1,37
1400	93,336	92,5	0,90	93,366	93,8	0,46	93,392	94,4	1,07	93,413	95,1	1,77
1600	90,864	91,5	0,70	90,893	92,6	1,88	90,916	93	2,24	90,935	93,6	2,85
1800	89,542	91,3	1,93	89,574	91,9	2,60	89,597	91,8	2,40	89,614	93,4	4,05
2000	90,811	90,3	0,57	90,861	91,5	0,70	90,89	91,9	1,10	90,91	92,7	1,93
2240	90,881	89,6	1,43	90,994	91,9	1,00	91,036	92,6	1,69	91,06	93,4	2,51
2500	85,07	89	4,42	90,515	90,8	0,31	90,592	92	1,53	90,618	92,8	2,35
2800	91,03	94,9	4,08	92,113	94,2	2,27	90,872	91,3	0,47	90,917	92,3	1,50
3150	91,413	97,5	6,24	91,416	97,9	7,09	91,469	97,4	6,09	91,36	95,9	4,73
3550	91,794	92,6	0,87	91,792	92,9	1,21	91,794	92,9	1,19	91,796	93	1,29
4000	92,647	91,2	1,59	92,647	92,8	0,17	92,647	92,2	0,48	92,648	92,4	0,27
4500	86,897	94,2	7,75	93,149	92,7	0,48	93,206	91,7	1,64	93,225	92,2	1,11
5000	93,547	98,6	5,12	93,572	98,9	5,69	93,938	98,8	4,92	93,453	98,6	5,22
5600	93,096	98,5	5,49	93,098	98,7	6,02	93,111	98,6	5,57	92,49	98,6	6,20



GAZİ GELECEKTİR..