

T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ÇEŞİTLİ FİZİKSEL BOYUTLARDAKİ SES DENKLEMLERİNDEN  
FARKLI ÇÖZÜM YÖNTEMLERİYLE SES ŞİDDETİNİN  
BELİRLENMESİNİN MATEMATİKSEL ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Taner KARASOY

İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı

İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı

HAZİRAN 2023

T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ÇEŞİTLİ FİZİKSEL BOYUTLARDAKİ SES DENKLEMLERİNDEN  
FARKLI ÇÖZÜM YÖNTEMLERİYLE SES ŞİDDETİNİN  
BELİRLENMESİNİN MATEMATİKSEL ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Taner KARASOY

İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı

İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAĞIMLI

HAZİRAN 2023



**T.C.**  
**İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ**

**Doktora Tez Onay Belgesi**

Enstitümüz, İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı (171215007) numaralı öğrencisi Taner KARASOY'un "Çeşitli Fiziksel Boyutlardaki Ses Denklemlerinden Farklı Çözüm Yöntemleriyle Ses Şiddetinin Belirlenmesinin Matematiksel Analizi" adlı tez çalışması 23.06.2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aşağıdaki jüri tarafından *Oy Birliği* ile Doktora tezi olarak *Kabul* edilmiştir.

**Öğretim Üyesi Adı Soyadı**

**Tez Savunma Tarihi:** 23/06/2023

- 1) Tez Danışmanı:** Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAĞIMLI
- 2) Jüri Üyesi:** Dr. Öğr. Üyesi H. Uğur ÖNCEL
- 3) Jüri Üyesi:** Prof. Dr. Bahaddin SİNSOYSAL
- 4) Jüri Üyesi:** Prof. Dr. Bülent MERTOĞLU
- 5) Jüri Üyesi:** Dr. Öğr. Üyesi Serap TEPE

## YEMİN METNİ

Doktora tezi olarak sunduğum ‘‘Çeşitli Fiziksel Boyutlardaki Ses Denklemlerinden Farklı Çözüm Yöntemleriyle Ses Şiddetinin Belirlenmesinin Matematiksel Analizi’’ adlı, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düőecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (23/06/2023)

Taner KARASOY



*“Ben matematiği insan aklını onurlandırmak için seçtim.”*

***Bu çalışmayı büyük matematikçi Carl Gustav Jacobi'nin bu muhteşem sözünü kendisine şiar edinmiş bütün matematikçi ve bilim insanlarına ithaf ediyorum....***

## ÖNSÖZ

Yeni gelişen ve bir çok bilimsel branşla multidisipliner bir bağ kurabildiği için çoğu araştırmacı için bakir sayılabilecek bir bilim dalı olan İş Sağlığı ve Güvenliği alanında olmanın yanı sıra akustik bilimine matematiksel ve fiziksel bir katkı sağlamayı hedeflemiş bu Doktora tezi çalışmasının tüm süreçlerinde bilgi ve tecrübeleriyle beni koordine eden, sadece danışman hocam olmakla kalmayıp eski mesai arkadaşlığımız sebebiyle her zaman ve her alanda sayısız desteğini gördüğüm değerli hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yağımlı'ya ve tez izleme komitesinde yer alan hepsi kendi alanında uzman çok değerli hocalarıma en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte her zaman yanımda olan bana maddi ve manevi destekleriyle adeta bir bilim insanı olduğumu hissettiren değerli annem emekli ilkökul öğretmeni Cemile Yüksel Karasoy'a, aynı zamanda bir akademisyen ve alanında tam bir uzman plastik cerrah olan değerli ablam Prof. Dr. Ayşin Karasoy Yeşilada'ya, şu anda hayatta olmayan ve matematik sevgisini bana aşıl原因an, varlığını ve yanımda olduğunu adeta matematik denklemlerinin şiirselliğinde hissettiğim değerli babam Matematik Öğretmeni Merhum Rahmi Karasoy'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Sadece doktora tezimi oluşturan bu bilimsel çalışmam sırasında değil, tüm akademik ve iş hayatım boyunca bana vermiş oldukları sınırsız desteklerinden dolayı eski yüksek lisans, şimdi ise mesai arkadaşlarım olan Dr. Öğr. Üyesi Işlay Bilgiç'e ve Dr. Öğr. Üyesi Leyla Başak Büklü'ye, entelektüel birikimi, bilimsel vizyonu ve sınırsız ufkuyla gerçek bir üniversite hocası olduğumu bana hissettiren değerli yöneticim sayın Prof. Dr. Ali Poyraz Gürson hocama, varlıklarıyla bana bir iş yerinde çalışıyormuş hissi değil, adeta bir aile ortamında olduğum hissini veren isimlerini saysam adeta sayfalar sürecektüm tüm değerli mesai arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2023

Taner KARASOY

Yüksek Makine Mühendisi  
Akademisyen

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Araştırmanın Konusu.....	1
1.2 Araştırmanın Amacı.....	1
1.3 Literatür Araştırması.....	1
1.4 Temel Akustik Terimleri.....	4
1.4.1 Dalga boyu.....	4
1.4.2 Frekans.....	4
1.4.3 Periyot.....	5
1.4.4 Genlik.....	6
1.4.5 Ses hızı.....	6
1.4.6 Ses düzeyi ve desibel (dB).....	6
1.4.7 Ses şiddeti.....	6
1.4.8 Ses gücü.....	7
1.4.9 Ses basıncı.....	7
1.4.10 Ses şiddeti düzeyi.....	7
1.4.11 Ses gücü düzeyi.....	7
1.4.12 Ses basıncı düzeyi.....	8
1.4.13 Ses düzeyleri arasındaki ilişki.....	8
1.4.14 Ses alanları.....	9
1.4.15 Arı ses, periyodik ve karmaşık sesler.....	9
1.4.16 Yönelme ve yönelme katsayısı.....	10
1.4.17 Sesin yayılması.....	10
1.4.18 Eşdeğer sürekli ses düzeyi ( $L_{eq}$ ).....	11
1.5 Ses ve Gürültünün İş Sağlığı ve Güvenliğinde Yeri.....	12
1.5.1 Risk etmenleri.....	13
1.5.1.1 Fiziksel risk etmenleri.....	13
1.5.1.2 Kimyasal risk etmenleri.....	14
1.5.1.3 Biyolojik risk etmenleri.....	14
1.5.1.4 Ergonomik risk etmenleri.....	14
1.5.1.5 Psikososyal risk etmenleri.....	14
1.5.2 Gürültü türleri.....	16
1.5.2.1 Frekansına göre gürültü.....	16
1.5.2.2 Zamansal değişime göre gürültü.....	16
1.5.2.3 Gürültünün insan sağlığı üzerindeki etkileri.....	17

1.5.3 Gürültünün fiziksel etkileri .....	18
1.5.4 Gürültünün fizyolojik etkileri.....	19
1.5.5 Gürültünün psikolojik etkileri .....	19
1.5.6 Gürültünün performans etkileri .....	20
1.6 Diferansiyel Denklemler Üzerine Temel Matematiksel Kavramlar .....	20
1.6.1 Genel açıklama .....	20
1.6.2 Diferansiyel denklemler .....	20
1.6.2.1 Adi diferansiyel denklemler.....	21
1.6.2.2 Kısmi diferansiyel denklemler .....	22
1.6.2.2.1 Eliptik kısmi türevli diferansiyel denklemler .....	24
1.6.2.2.2 Parabolik kısmi türevli diferansiyel denklemler.....	24
1.6.2.2.3 Hiperbolik kısmi türevli diferansiyel denklemler .....	24
1.6.3 Genel dalga denklemleri .....	24
1.6.4 Çok boyutlu dalga denklemi çözümleri .....	28
1.6.4.1 Kartezyen koordinatlardaki çözüm .....	29
1.6.4.2 Silindirik koordinatlardaki çözüm.....	29
1.6.4.3 Küresel koordinatlardaki çözüm .....	29
1.6.5 Küresel harmonik fonksiyonlar .....	30
<b>2. MATERİYAL VE METOT .....</b>	<b>33</b>
2.1 Amaç.....	33
2.2 Analitik ve Sayısal Yöntem .....	33
<b>3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>38</b>
<b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>49</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>52</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>56</b>

## KISALTMALAR VE SİMGELER

<b>Hz</b>	: Hertz,
<b>kHz</b>	: Kilo Hertz,
<b>dB</b>	: Desibel (A),
<b>Pa</b>	: Pascal,
<b><math>\mu</math>Pa</b>	: Mikro Pascal,
<b>WHO</b>	: World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü),
<b>ILO</b>	: International Labour Organization (Uluslararası Çalışma Örgütü),
<b>GAAY</b>	: Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi,
<b>KLY</b>	: Klasik Logaritmik Yaklaşım,
<b>WRM</b>	: Galerkin Weighted Residuel Method,
$\nabla$	: Nabla Operatörü (Gradient),
$\Delta$	: Küresel Koordinatlar için Laplasyen Operatörü,
$r$	: Yarıçap Koordinatı,
$\theta$	: Enlem Açısı Koordinatı (Azimut),
$\phi$	: Boylam Açısı Koordinatı (Zenit),
$p_0$	: Basınç Genlik Değeri,
$\Psi$	: Dalga Fonksiyonu,
$R$	: Radyal (Yarıçap) Fonksiyonu,
$\Phi$	: Boylam Açısı (Azimut) Fonksiyonu,
$\Theta$	: Enlem Açısı (Zenit) Fonksiyonu,
$T$	: Zaman Fonksiyonu,
$\dot{I}$	: Sanal Sayı ( $\sqrt{-1}$ ),
$k$	: Dalga Sayısı ( $\frac{\omega}{c}$ ),
$P_{-+}$	: Sağa ve Sola Giden Dalgaların Basınç Genlikleri,
$\omega$	: Açısal Hız,
$h_{1,2}$	: Sağ ve Sol Hankel Fonksiyonları,
$j_0$	: Birinci Türden Küresel Bessel Fonksiyonları,
$\gamma_0$	: İkinci Türden Küresel Bessel Fonksiyonları,
$Y_l^m$	: Küresel Harmonik Fonksiyon,
$m$	: Boylam Katsayısı,
$l$	: Enlem Katsayısı,
$R$	: Artık Fonksiyonu,
$[W]_{N \times 1}$	: Ağırlık Fonksiyonu Vektörü,
$N$	: Ağırlık Fonksiyonu Sayısı,
$n$	: İntegral Sınır Değerleri,
$L$	: Diferansiyel Operatörü,
$P_{in}$	: Başlangıç Ses Basıncı Koşulu,
$p_0$	: Referans Basıncı (20 $\mu$ Pa)
$L_P$	: Kaynaktan Belirli Bir Uzaklıktaki Ses Basıncı Düzeyi (dB),
$L_W$	: Kaynağın Ses Şiddeti Düzeyi (dB),
$Q$	: Yönelme Katsayısı $2^n$ ,

- $n$  : Yansıtıcı Yüzey Adeti,  
 $r$  : Mesafe (m),  
 $r_{kri}$  : Kritik Mesafe Eşiğı,  
 $r_{cri}$  : Critical Distance Threshold,  
 $A_{atm}$  : Havanın Yutma Etkisi ile Ses Basıncındaki Azalma (dB),  
 $f$  : İletilen Sesin Frekansı (Hz),  
 $\emptyset$  : Havadaki Bağıl Nem Miktarı (%),  
 $L_{pt}$  : Toplam Ses Basıncı Düzeyi (dB).



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1: Oktav Bantları ve Merkez Frekansları .....	10
Çizelge 1.2: Yansıtıcı Düzlem Sayıları ve Yönelme Katsayıları .....	10
Çizelge 1.3: İki Gürültü Kaynağının Karşılaştırılması .....	13
Çizelge 1.4: Psikososyal Risk Etmenleri ve Nedenleri .....	15
Çizelge 1.5: Uluslararası Gürültü Maruziyet Eylem ve Sınır Değerleri .....	18
Çizelge 1.6: Küresel Harmonikler .....	32
Çizelge 3.1: 90 dB Bir Ses Kaynağının 5 m Boyunca Ses Yayılım Değerleri. ( $Q = 1$ ) .....	40
Çizelge 3.2: 5 m Boyunca Ses Yayılım Değerlerinin Hata Payı Yüzdeleri .....	41
Çizelge 3.3: 0 ve 1 m Arasındaki Yakın Alan Ses Yayılım Değerleri .....	42
Çizelge 3.4: Yakın Alan Hata Payı Yüzdeleri .....	43
Çizelge 3.5: 5 ve 400 m arasındaki Uzak Alan Ses Yayılım Değerleri .....	45
Çizelge 3.6: Uzak Alan Hata Payı Yüzdeleri .....	46
Çizelge 3.7: 4 Adet Makinenin Birlikte Çalışarak Ürettiği 5 m Mesafedeki Ses Değerleri $A_{atm} = 0, Q = 2$ .....	47
Çizelge 3.8: 4 Adet Makinenin Birlikte Çalışarak Ürettiği 5 m Mesafedeki Ses Değerleri $A_{atm} \neq 0, Q = 2$ .....	47
Çizelge 3.9: 4 Adet Makinenin Birlikte Çalışarak Ürettiği 5 m Mesafedeki Fark Oranları .....	48

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Ses Dalgasının Zaman Parametresine Göre Değişimi .....	5
Şekil 1.2: Ses Dalgasının Yol Parametresine Göre Değişimi .....	5
Şekil 1.3: Ses Düzeyleri ve Ses basıncı ile Şiddeti Değerleri.....	8
Şekil 1.4: Noktasal Bir Ses Kaynağından Çıkan Sesin Mesafeye Göre Azalımı .....	11
Şekil 1.5: 2 Dakikalık Bir Ölçüm Sonucunda Elde Edilen Eşdeğer Sürekli Ses Düzeyi .....	12
Şekil 1.6: Küresel Harmonikler.....	30
Şekil 3.1: Yakın Alan Ses Yayılımında Kritik Mesafe Eşiği Etkisi.....	44
Şekil 3.2: Uzak Alan Ses Yayılımında Ağırlık Fonksiyonlarının Etkisi .....	45

# ÇEŞİTLİ FİZİKSEL BOYUTLARDAKİ SES DENKLEMLERİNDEN FARKLI ÇÖZÜM YÖNTEMLERİYLE SES ŞİDDETİNİN BELİRLENMESİNİN MATEMATİKSEL ANALİZİ

## ÖZET

Ses basınç düzeyinin tespiti, gürültülü ortamlarda çalışan bireyler için önemli bir etmendir. Ses şiddetini ölçmek için periyodik basınç değışikliklerinin belirlenmesi gerektiğinden bu konuda çok sayıda matematiksel analiz ve deneysel araştırma yapılmıştır. Sesin şiddet ölçümlerinde ve sesin mesafelere bağı dağılım, azalma ve maruziyet analizlerinde klasik logaritmik denklemler kullanılmaktadır.

Bu akademik çalışmada sesin periyodik basınç değerlerinin belirlenmesinde daha önce literatürde gözlemlenmemiş olan küresel koordinatlardaki ses dalga denklemlerinin çözümü için Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi (GAAY) ve son yıllarda ses problemlerinden sıklıkla kullanılmaya başlamış olan fakat ses düzeyi hesaplamalarında (desibel) hiç kullanılmamış olan Küresel Harmonik Fonksiyonlar kullanılmıştır. Yakın alanda ses basıncı seviyelerinin tespitinde yönelme katsayısı ve küresel harmonik fonksiyonlara dayanarak Kritik Mesafe Eşığı  $r_{kri}$  tanımlanmış ve GAAY'dan elde edilen verilerle birleştirilmiştir. Bu sayede elde edilen sayısal ses basıncı değerlerinin klasik logaritmik yaklaşımda kullanılan değerlere oldukça yakın olduğu tespit edilmiş ve bu sayısal veriler için yapılan logaritmik tutarlılık analizi sonucunda klasik logaritmik desibel denklemlerinden elde edilen verilerle yüksek oranda uygunluğu büyük oranda belirlenmiştir.

Klasik Logaritmik Yaklaşım referans alınarak yapılan hata payı analizi yüzde cinsinden hesaplanmıştır. Bu yüzde değerleri elde edilirken her N değeri için mesafeye bağı bulunan desibel değerleri ile Klasik Logaritmik Yaklaşım değerleri çıkartılıp o mesafedeki Klasik Logaritmik Yaklaşım değerleriyle oranlanarak yüzde değerleri tespit edilmiştir.

Sonuç olarak hem akustik (ses) bilimine hem de iş sağlığı ve güvenliği bilimine farklı yarı analitik matematiksel çözüm yöntemleri kullanılarak alışılanın dışında matematiksel bir bakış açısı getirilmesi hedeflenmiş ve sayısal verilerle bu bilimsel yaklaşım desteklenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** *Küresel Ses Dalga Denklemleri, Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi, Küresel Harmonik Fonksiyonlar, Ses Basıncı Düzeyi.*

# MATHEMATICAL ANALYSIS OF DETERMINING SOUND INTENSITY WITH DIFFERENT SOLUTIONS FROM SOUND EQUATIONS IN VARIOUS PHYSICAL DIMENSIONS

## ABSTRACT

Detection of sound pressure level is an important factor for individuals working in noisy environments. Since it is necessary to determine periodic pressure changes to measure sound intensity, many mathematical analyzes and experimental studies have been carried out on this subject. Classical logarithmic equations are used in the intensity measurements of the sound and in the distribution, reduction and exposure analyzes of the sound depending on the distance.

In this academic study, Galerkin Weighted Residues Method (WRM) has been used for the solution of sound wave equations in spherical coordinates, which has not been observed in the literature before, in determining the periodic pressure values of sound, and Spherical Harmonic Functions, which have been used frequently in sound problems in recent years, but have never been used in sound level calculations (decibels). Based on the directivity coefficient and spherical harmonic functions in detecting sound pressure levels in the near field, the Critical Distance Threshold  $r_{cri}$  was defined and combined with data from WRM. In this way, it was determined that the numerical sound pressure values obtained were very close to the values used in the classical logarithmic approach, and as a result of the logarithmic consistency analysis made for these numerical data, it was determined that a high level of compatibility with the data obtained from the classical logarithmic decibel equations was determined.

The margin of error analysis made with reference to the Classical Logarithmic Approach was calculated in percent. While obtaining these percentage values, the decibel values depending on the distance and the Classical Logarithmic Approximation values were subtracted for each N value and the percentage values were determined by dividing them with the Classical Logarithmic Approximation values at that distance.

As a result, different semi-analytical mathematical solution to both acoustic (sound) science and occupational health and safety science. It was aimed to bring an unusual mathematical point of view by using methods and this scientific approach was supported by numerical data.

**Keywords:** *Spherical Sound Wave Equations, Galerkin Weighted Residual Method, Spherical Harmonic Functions, Sound Pressure Level.*

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Araştırmanın Konusu

Bu tez çalışmasında, iş sağlığı ve güvenliğinde önemle üzerinde durulan, çalışanlar için risk etmenleri konusu içerisinde ve “Fiziksel Risk Etmenleri” başlığı altında yer alan “Gürültü” tespiti için önemli bir parametre olan desibel ölçümüne farklı bir matematiksel yaklaşım getirilmesi hedeflenmiştir. Literatürde daha önce denenmemiş matematiksel çözüm yöntemleri ile verimli sonuçlar elde edilmiş ve fiziksel bir terim olan kritik mesafe eşiği kavramı tanımlanmıştır.

## 1.2 Araştırmanın Amacı

Bu tezin ve araştırmanın amacı hem akustik hem de iş sağlığı güvenliği bilimlerine yeni sayısal ve fiziksel metotların uygulanabilirlik derecelerini arttırarak yeni alanlar açılması ve farklı bakış açılarına dayanarak değişik çözümlerin ortaya konulabileceğinin gösterilmesine olanak sağlanmıştır.

## 1.3 Literatür Araştırması

Ses, doğada yer alan fiziksel etmenler arasında en farklı bir şekilde meydana gelip yayılım gösteren, istenmeyen zamanlarda veya çok büyük miktarlarda ortaya çıktığında buna maruz kalabilecek canlıların veya bireylerin varlığını, sağlığını veya çalışan bir bireyse çalışma güvenliğini tehdit edebilecek, bu sebeple ölçülmesi ve kontrolü zorunlu olması gereken, en temel tanımlanmasıyla bir kaynaktan ortaya çıkıp herhangi bir elastik ortamda (gaz, sıvı, katı) meydana gelen periyodik basınç dalgalanmalarının işitme organları temel olacak şekilde vücuttaki titreşimsel etkilerle bile algılanması fark edilebilen bir enerji türüdür (Skudrzyk, 1971; Hansen, 2001; Müller ve Moser, 2013).

Bu tanımlamanın ışığında değerlendirilebilecek ve çıkartılabilecek en önemli fiziksel yaklaşım, hatta iş sağlığı ve güvenliği biliminin tanımladığı ölçekte gürültü maruziyet etkileri, ses salınımının ya da enerjisinin ortamda kalıcı bir deformasyona

yol açmayacak şekilde ortamın elastikiyetine bağlı bir yayılım seyretmesinin önemidir.

Bilinen ve birçok araştırmalara konu olmuş, gaz veya sıvı, hatta yaygın anlamda değerlendirilirse hava veya su ortamlarında ses dalgalanmalarının ortam elastikiyet deformasyonunun (türbülanslanma etkisi) çok net olarak tespit edebilmesi ancak farklı bağlamlardaki gürültü maruziyetleri sonucunda kısmen de olsa belirlenmesi mümkün olmuştur (Müller ve Moser, 2013).

Oldukça zor olsa da katı herhangi bir ortamın (Zemin, Duvar, v.s...) elastikiyet zorlanmasının çok yüksek frekanslı ve yüksek genlik değerli dalgalarla yapılan testler sonucunda belirleyebilmek bilimsel anlamlarda mümkünlüğü kaydedilmiş ve bu anlamdaki birçok araştırmalara konu olmuştur (Müller ve Moser, 2013).

Periyodik, tekrarlı ve dalgalı yapıya sahip bir fiziksel büyüklük olması, ses kaynağının ürettiği mili hatta mikro saniyeler mertebesinde dalga genliklerindeki değişimlerin yol açtığı basınç şiddet düzeylerindeki değişimlerin ölçümlendirilmesini, ayrıca detaylı analizlerinin yapılmasını gerekli kılmaktadır. Bu sebeple periyodik basınç değişimlerinin tespitinde birçok analiz metodu uygulanmış ve geliştirilmiştir (Williams, 2000).

Yapılan ilk çalışmalarda düzgün dairesel bir kanalda ses basıncı yayılımı problemini formüle etmek için Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yönteminin değerleri kullanmıştır. Bu denklemin sonuçlarından faydalanabilmek için ağırlık fonksiyonları trigonometrik seçmelerine rağmen genel dalga denkleminin imajiner üstel fonksiyonunu alarak iki boyutlu bir kanaldaki hem akış hem de dalga genlik değerlerini tespit etmişlerdir (Vo ve Eversman, 1978).

Diğer çalışmalarda Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemini iki boyutlu geometriler için hem akışın olmadığı hem de akışın olduğu durumlarda düzgün olmayan kanallarda ses iletimini araştırmak için başarıyla analiz edilmiştir. Bu geometrilerde kullanılacak uygun temel fonksiyonların trigonometrik olduğunu ve bu hesaplamalar sonucunda oldukça verimli sonuçların çıkacağı tespit edilmiştir. Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi, eksenel simetrik kanallara genişletildiğinde, çözümü temsil etmek için doğal olarak Bessel fonksiyonlarını kullanma eğilimi vardır. Fakat mevcut Bessel fonksiyonlarının bu modellerde verimsiz hesaplamaların ortaya çıktığı da tespit edilmiştir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, iki boyutlu durumda

üretilemlerle aynı tip trigonometrik fonksiyonların temel fonksiyonlar olarak kullanılarak asimetri problemler formüle edilmiştir. Bu durum hem alkışın olmadığı durumda hem de akışlı durumlarda geçerli bir hesaplama sistematüğini ortaya çıkarmış, ayrıca bunları sert duvarlı durumda ve yumuşak duvarlı durumda ses ötesi hızlar için değerlendirip Runge – Kutta nümerik yönteminden elde edilen “gerçek” değerlerle karşılaştırarak oldukça gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir (Eversman, 1977).

Ses enerjisinin küresel dalga yayılımı göstermesinden dolayı son yirmi yılda küresel harmonik fonksiyonlar hesaba katılarak yapılan bazı dikkate değer analizler göze çarpmaktadır. Bunlardan Park ve Rafaely (2005), küresel harmonik fonksiyonları kullanarak bir dizi ses kaynaklarından elde edilen sinyallerin yakın alan bilgisinin kullanımına odaklanarak, küresel bir mikrofon dizisi tarafından ölçülen sinyallerin işlenmesini analiz etmişlerdir. Küresel harmonik fonksiyonlara dayalı ses analizlerinde ve araştırmalarında sadece noktasal bir kaynaktan küresel ses yayılımında değil, huzme oluşturarak yayılımı konusunda da kayda değer çok fazla sayıda çalışma söz konusudur.

Bazı diğer çalışmalardan en dikkate değer şekilde farklı olarak küresel harmonik fonksiyonların ayrıştırmasından yararlanıp farklı bir akustik kaynak haritalama ve ses huzme dağılımlarına dikkat çekilmiştir Bu çalışmada en dikkate değer nokta, Tikhonov formülasyonu ile ilişkili düzenlileştirme faktörünü tahmin etmek için farklı yöntemler ve farklı düzenlileştirme seviyeleri tespit edilmiş olmasıdır (Battista G. ve Ark., 2018).

Koutny ve Ark. (2017), Küresel harmonik fonksiyonlara dayalı olarak ses kaynaklarının mesafelerini belirlemek için yaptıkları çalışmada küresel bir mikrofon dizisinin yakın alan bilgisinin kullanımına odaklanarak ölçülen sinyallerin işlenmesi ile ilgilenmektedir. Küresel harmonik fonksiyon ayrıştırmasına dayalı bu işlemde fonksiyonların düşük frekanslı yaklaşımı kullanılarak, kaynak mesafesi belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmalara genel bir perspektifle bakıldığında sesin yayılımında küresel kısmi türevli diferansiyel denklemlerin çok sık kullanılmadığı, kısmen küresel mikrofon dizileri ve huzme modellerinde sadece çözüm fonksiyonlarının kullanıldığı ve bu sebeple Galerkin Ağırlıklı Artıklar Metodunun sadece silindirik boruda ses ötesi ve ses altı akışlı durumlar için kullanıldığı net olarak fark edilmektedir. Bu çalışmada ses yayılım denklemlerinin çözümünde farklı

bir yaklaşım getirilmesi hedeflenmiştir. Küresel koordinatlara dayalı kısmi türevli diferansiyel akustik dalga denklemleri, küresel harmonik fonksiyonlar ve dalga fonksiyonu yardımıyla tek boyuta indirgenmiş ve sonrasında yapılan işlemlerle kısmi türevli diferansiyel denklemlerden tek değişkenli ve değişken katsayılı adi bir diferansiyel denklem türü olan Cauchy Euler denklemine dönüştürülmüştür. Bu tip denklemlerin çözüm sistemiği bağlamında mesafe parametresi  $r$ , logaritmik bölgeye taşınarak  $\tau$  parametresine bağlı ve sabit katsayılı bir adi diferansiyel denklem elde edilmiştir. Sonuç olarak bu denklemden ses şiddeti düzeylerinin hesaplanmasında literatürde çok nadir olarak ele alınan fakat birçok kısmi türevli diferansiyel denklemlere dayalı fiziksel problemin çözümünde etkili bir şekilde kullanılan Semi-Analitik bir matematiksel çözüm yöntemi olan Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi kaynaklı çözümler integral denklemleri yardımıyla tespit edilmiş ve literatürde yaygın olarak kabul gören, ses yayılımının hem matematiksel hem de fiziksel analizinde önemli bir yer edindiği için kabul görerek kullanılan Klasik Logaritmik Yaklaşım çözümlerinden elde edilen referans değerler ile sayısal karşılaştırmalar yapılmıştır.

## **1.4 Temel Akustik Terimleri**

### **1.4.1 Dalga boyu**

Bir dalganın iki üst veya alt tepe noktaları arasında bulunan uzaklığına dalga boyu denir. Simgesi, İngilizcede boy veya uzunluk anlamına gelen “length” kelimesinin baş harfi olan “L” harfinin Yunancadaki ifadesi olan “ $\lambda$ ” (lamda) harfiyle ifade edilir. Dalga boyu, bir uzunluk ölçüsü olduğu için birimi metredir (Brüel ve Kjaer, 1998).

### **1.4.2 Frekans**

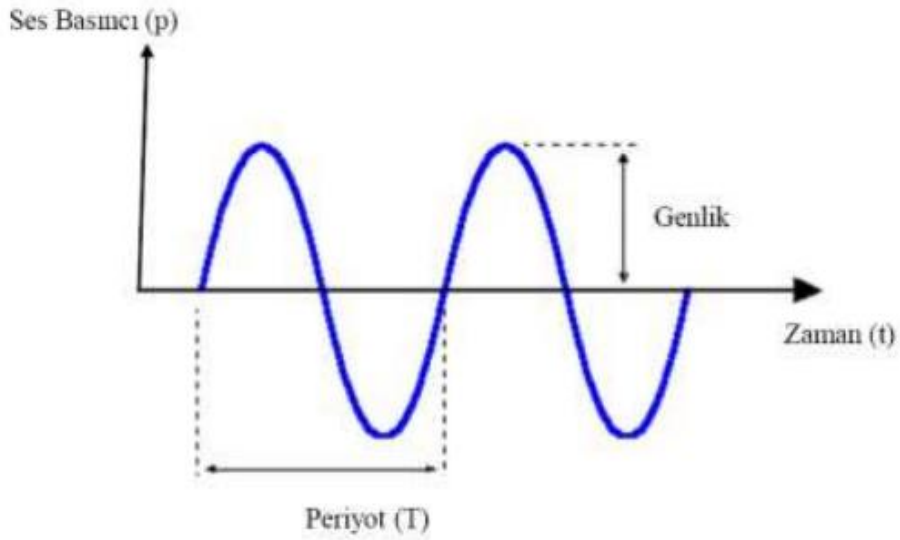
Tekrarlanma sayısı veya yaygın adıyla frekans, bir olayın, işlemin veya titreşimin (dalgalanma) referans alınan birim zamanda (dalga baz alındığında 1 saniye içinde) ne kadar sıklıkla ve ne kadar tekrarlandığının ölçümüdür. Simgesi  $f$  harfidir. Birimi, ünlü Alman bilim insanı Heinrich Rudolf Hertz’in ismine ithafen Hertz: Hz (1/saniye: 1/s)dir.

Bir olayın frekansını ölçmek için o olayın belirli bir zaman aralığında kendini kaç kere tekrar ettiği sayılır, sonra bu sayı zaman aralığına bölünerek frekans elde edilir.

Sağlıklı ve genç bir birey, 20 Hz ile 20 kHz frekansları arasında yer alan sesleri kolayca duyabilmektedir. Bu aralığa "İşitilebilir Frekans Aralığı" denir (Brüel ve Kjaer, 1998).

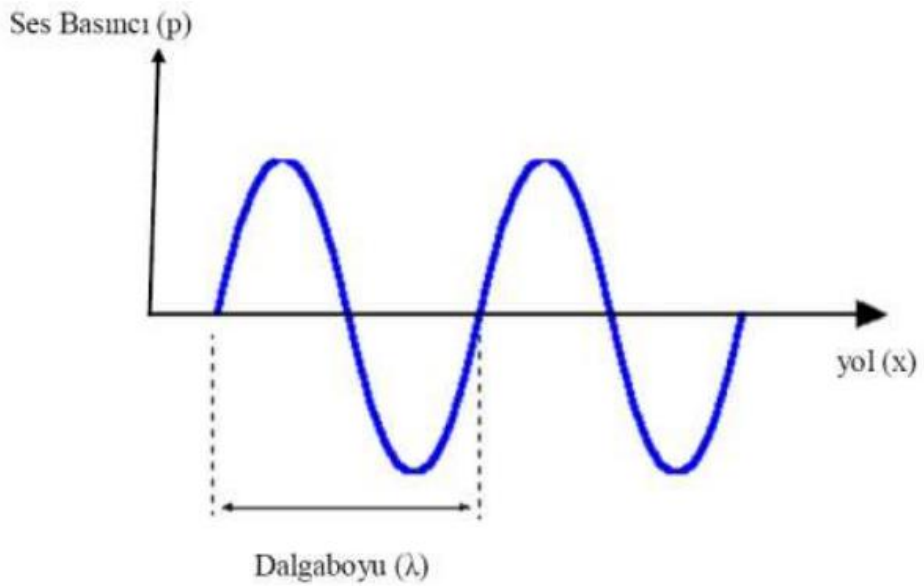
### 1.4.3 Periyot

Bir tam dalga oluşması için geçen süreye denir. Matematiksel ifadeyle de frekansın çarpmaya göre tersi periyot olarak adlandırılır. Birimi saniyedir. Periyot dalgayı oluşturan kaynağa bağlıdır. "T" ile gösterilir (Brüel ve Kjaer, 1998).



**Şekil 1.1:** Ses Dalgasının Zaman Parametresine Göre Değişimi

**Kaynak:** (Fişne, 2008)



**Şekil 1.2:** Ses Dalgasının Yol Parametresine Göre Değişimi

**Kaynak:** (Fişne, 2008)

#### 1.4.4 Genlik

Ses basınç değerinin en yüksek olduğu tepe değere genlik denir. Desibel hesabında dikkate alınan değer bu bölgelerdeki değerdir.

#### 1.4.5 Ses hızı

Ses enerjisinin yayılım hızıdır. Birimi m/s'dir.

Dalga boyu ve frekansa göre:

$$c = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{T} \quad (1.1)$$

Sıcaklığa göre (ideal gazlar için):

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT_K}{M}} = 20,05\sqrt{T_K} \quad (1.2)$$

Isı sığası oranı  $\gamma$ , sabit basınçtaki ısı sığasının  $C_p$  sabit hacimdeki ısı sığasına  $C_v$  oranıdır. İki atomlu gazlar için 1,4 değeri alınır. Evrensel gaz sabiti  $R = 8,3143 \frac{kJ}{kmol \cdot Kelvin}$ , Havanın Mol kütlesi  $M = 0,03895 \text{ kg/mol}$  alındığında  $T_k = 20C^0 = (273 + 20)K = 293 K$  sıcaklık değeri için  $c \cong 343 \text{ m/s}$  değeri hesaplanır.

#### 1.4.6 Ses düzeyi ve desibel (dB)

Ses düzeyini belirli bir ses şiddeti (gücü ya da basıncını) bu fiziksel parametreler için alınan referans değerleri ile oranlayıp 10 tabanına göre logaritmasının alınmasıyla elde edilen değerdir. Desibel boyutsuz bir büyüklüktür. Alexander Graham Bell'in telefonu icat etmesinden sonra bu tip bir fiziksel büyüklüğe ihtiyaç duyulduğu için onun adıyla anılmıştır. Ses düzeyi kavramının tam anlaşılabilmesi sesin şiddetinin, gücünün ve basıncının tam anlamıyla anlaşılması gerekmektedir.

#### 1.4.7 Ses şiddeti

Belirli belirli bir birim alana düşen ses enerji miktarı "Ses Şiddeti" olarak tanımlanır. Ses şiddetinin birimi watt/m<sup>2</sup>'dir. Ses herhangi bir engele maruz kalmadığı takdirde küresel yayılım gösterir ve şiddeti uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak azalır (Hansen, 2001; Barron, 2003). Ses şiddeti, gücü ve basıncı arasındaki ilişki aşağıdaki denklemde belirtildiği gibidir;

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{P^2}{\rho c} \quad (1.3)$$

$I$ : Ses şiddeti (watt/m<sup>2</sup>)

$W$ : Ses Gücü (watt)

$P$ : Ses basıncı (Pa)

$\rho$  : Ses dağılım ortam yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>)

$c$ : Ses hızı (m/s)

$r$ : Mesafe (m)

#### 1.4.8 Ses gücü

Belirli bir ses kaynağının birim zamanda yaratmış olduğu ses enerji miktarına “Ses Gücü” denir ve birimi ünlü bilim insanı James Watt’ın ismine ithafen Watt’dır. Bir ses kaynağının ne düzeyde bir akustik dalga enerjisi üreteceğinin temel ölçümü ses gücüyle belirlenir (Hansen, 2001; Barron, 2003).

#### 1.4.9 Ses basıncı

Ses basıncı veya akustik basınç, bir ses dalgasının neden olduğu ortam basıncındaki periyodik basınç sapmasıdır. Daha anlaşılabilir bir ifadeyle ses dalgasının kulak zarında meydana getirdiği basınç etkileşimidir. Simgesi İngilizce “pressure” kelimesinden gelen “ $P$ ”, birimi ise ünlü fizikçi Blaise Pascal’ın ismine ithafen Paskal’dır (Pa). Duyulabilir seslerin havada yarattığı basınçlar 20  $\mu$ Pa ( $20 \times 10^{-6}$  Pa) ile 200 Pa aralığında yer almaktadır (Hansen, 2001; Barron, 2003).

#### 1.4.10 Ses şiddeti düzeyi

Referans ses şiddeti değeri  $I_0 = 10^{-12} \text{ W / m}^2$  olmak üzere ses şiddet düzeyinin formülü:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (1.4)$$

#### 1.4.11 Ses gücü düzeyi

Referans ses gücü değeri  $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$  olmak üzere ses gücü düzeyinin formülü:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (1.5)$$

#### 1.4.12 Ses basıncı düzeyi

Referans ses basınç değeri  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa olmak üzere ses basınç düzeyinin formülü:

$$L_P = 10 \log \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad (1.6)$$

#### 1.4.13 Ses düzeyleri arasındaki ilişki

Ses düzey ölçüm parametreleri (Basınç, güç ve şiddet) denklem 1.3'ten de görüleceği gibi farklı fiziksel etmenler olmalarına karşın düzey ölçümlerinde referans oranların logaritmik değerleri hesaplanırken çok küçük hata payları söz konusu olmaktadır. Bu sebeple aynı tip ses enerji dalgasının düzey (desibel) ölçümlerinde insan kulağının algılayamayacağı küçüklükte hata payları meydana geldiği için bütün düzey değerleri yaklaşık olarak aynı kabul edilir.

$$L_I \cong L_W \cong L_P \quad (1.7)$$

Örnekler	Ses basıncı seviyesi $L_p$ dBSPL	Ses basıncı p $N/m^2 = Pa$	Ses şiddeti I $W/m^2$
Jet uçağı, 50 m uzakta	140	200	100
Ağrı eşiğı	130	63.2	10
Rahatsızlık eşiğı	120	20	1
Testere, 1m uzaklıkta	110	6.3	0.1
Disko, hoparlörden 1 m uzakta	100	2	0.01
Dizel kamyon, 10 m uzakta	90	0.63	0.001
İşlek caddenin yaya kaldırımı, 5 m	80	0.2	0.0001
Elektrik süpürgesi, 1 m uzaklık	70	0.063	0.00001
Sohbet, 1 m	60	0.02	0.000001
Ortalama ev	50	0.0063	0.0000001
Sessiz kütüphane	40	0.002	0.00000001
Gece sessiz yatak odası	30	0.00063	0.000000001
Televizyon stüdyosunda arka plan	20	0.0002	0.0000000001
Yaprak hışırdaması	10	0.000063	0.00000000001
Duyma eşiğı	0	0.00002	0.000000000001

**Şekil 1.3:** Ses Düzeyleri ve Ses basıncı ile Şiddeti Değerleri

**Kaynak:** (Okco, 2012)

#### 1.4.14 Ses alanları

Ses alanları aşağıda belirtildiği gibidir:

a. Yakın Alan

Bir kaynaktan başlayan ses enerjisinin uzaklığının çok az değiştiği fakat ses düzeyinin büyük oranda değiştiği alandır.

b. Uzak Alan

1. **Serbest Alan:** Sesin engelsiz ilerlediği alan.

2. **Yankılanma Alanı:** Duvar veya çevredeki cisimlerden oluşan yansımaların etkisiyle ses düzeyinin arttığı alanlardır.

#### 1.4.15 Arı ses, periyodik ve karmaşık sesler

Düzenli dalgalarla yayılan ses basıncı değişiminin oluşturduğu seslere arı ses veya saf ton denir. Değişik frekanslardaki iki ya da daha çok arı sesin birleşmesi sonucunda harmonik olmayan periyodik sesler elde edilir. Doğada arı sesi oluşturan, tek bir harmonikten oluşan seslere ender rastlanır. Periyodik sesler, doğada daha çok yaygındır.

Normal konuşma 200–10.000 hz

Anlaşılabilir konuşma 1.000-2.500 hz

Müzik konuşma 30-10.000 hz

Bu geniş frekans aralığını incelemek zor olduğundan incelenecek frekans aralığı oktav bandı adı verilen kısımlara bölünür. 1 oktav bandının üst sınır değeri, bir sonraki bandın alt sınır değeridir. Her merkez frekansı ise alt ve üst sınır değerinin geometrik ortalamasıdır.

$$f_1 \rightarrow \text{alt sınır frekansı } f_0 = \sqrt{2f_1}$$

$$f_2 \rightarrow \text{üst sınır frekansı } f_2/2 \quad \text{ve} \quad f_2 = 2f_1$$

$$f_0 \rightarrow \text{merkez sınır frekansı}$$

$$\text{Bant genişliği } f_2 - f_1 = \text{bir bant aralığı}$$

**Çizelge 1.1:** Oktav Bantları ve Merkez Frekansları

<u>Alt sınır (hz)</u>	<u>Üst sınır (hz)</u>	<u>Merkez (hz)</u>
22	44	315
44	88	63
88	117	125
117	355	250
355	710	500
710	1420	1000
1420	2840	
2840	5680	
5680	11360	
11360	22720	

**Kaynak:** (Yapar, 2020)

#### 1.4.16 Yönelme ve yönelme katsayısı

Sesin serbest alanda yayılımında önemli parametrelerden birisi de Yönelme Katsayısı,  $Q$  dır. Ses her yöne yayılma eğilimi gösterir. Yönelme katsayısı, bazı kaynaklarda geçtiği gibi Yönelme Faktörü olarak geçip farklı matematiksel formüllerle belirlense de ses yayılma serbest alanındaki yansıtıcı düzlem sayısına ( $n$ ) bağlı olarak  $2^n$  formülünden belirlenmektedir.

**Çizelge 1.2:** Yansıtıcı Düzlem Sayıları ve Yönelme Katsayıları

<u>Ses Kaynağının Konumu</u>	<u>Yansıtıcı Düzlem Sayısı (<math>n</math>)</u>	<u>Yönelme Katsayısı (<math>Q = 2^n</math>)</u>
Açık Alanda	0	1
Tek Düzlem Üzerinde	1	2
İki düzlemin kesişiminde	2	4
Üç düzlemin kesişiminde	3	8

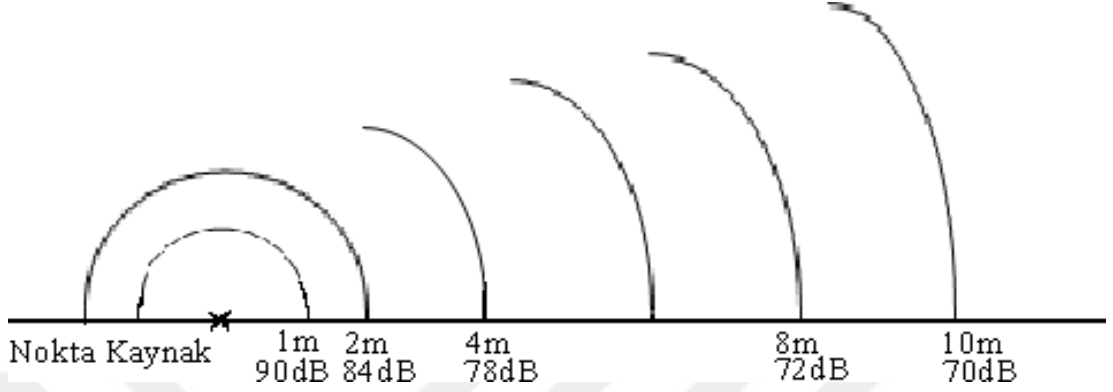
**Kaynak:** (Yapar, 2020)

#### 1.4.17 Sesin yayılması

Sesi yansıtacak hiçbir engelin bulunmadığı ve sesin düzgün olarak yayılabildiği alanlara serbest alan adı verilir. Uygulamada sesin düzgün yayılmasını önlemeyecek şekilde engellerin bulunduğu alanlar da serbest alan olarak kabul edilir. Serbest alanda yayılan ses dalgaları düzgündür. Ve kaynaktan  $r$  uzaklığında olan bir noktadaki ses şiddeti ile ters orantılıdır. Serbest alanda ses gücü düzeyinden ses basıncı düzeyi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$L_P = L_W + \log\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right)^{10} \quad (1.8)$$

Bu çalışmada bu denklem Klasik Logaritmik Yaklaşım olarak adlandırılmıştır ve referans karşılaştırma değerleri bu denklemle hesaplanacaktır.



**Şekil 1.4:** Noktasal Bir Ses Kaynağından Çıkan Sesin Mesafeye Göre Azalımı

**Kaynak:** (Yapar, 2020)

Atmosferik yutum ve herhangi bir engelle karşılaşılmadığı takdirde kaynağa olan uzaklık 2 misline çıktığında ses düzeyinde 6 dB, 10 misline çıktığında da 20 dB'lik azalma gerçekleşmektedir.

Atmosferik Yutumla Ses Basınç Düzeyinin Düşmesi Hava molekülleri, ses dalgalar halinde yayılırken ses enerjisinin bir kısmını yutar. Özellikle uzak mesafelerde bu yutum miktarının dikkate alınması gereklidir. Atmosferik yutum 20 °C için aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$A_{atm} = \frac{7,4 \cdot 10^{-8} f^2 \cdot r}{\phi} \quad (1.9)$$

Bu çalışma da Atmosferik yutum durumu da değerlendirilerek analizler yapılacaktır.

#### 1.4.18 Eşdeğer sürekli ses düzeyi ( $L_{eq}$ )

Gürültü ortamının sürekli olduğu ses dalgalarının düzensiz ve kararsız olduğu ortamlarda Eşdeğer Sürekli Ses Düzeyi kullanılmaktadır.

$$L_{eq} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P^2(t)}{P_0^2} dt \right] \quad (1.10)$$

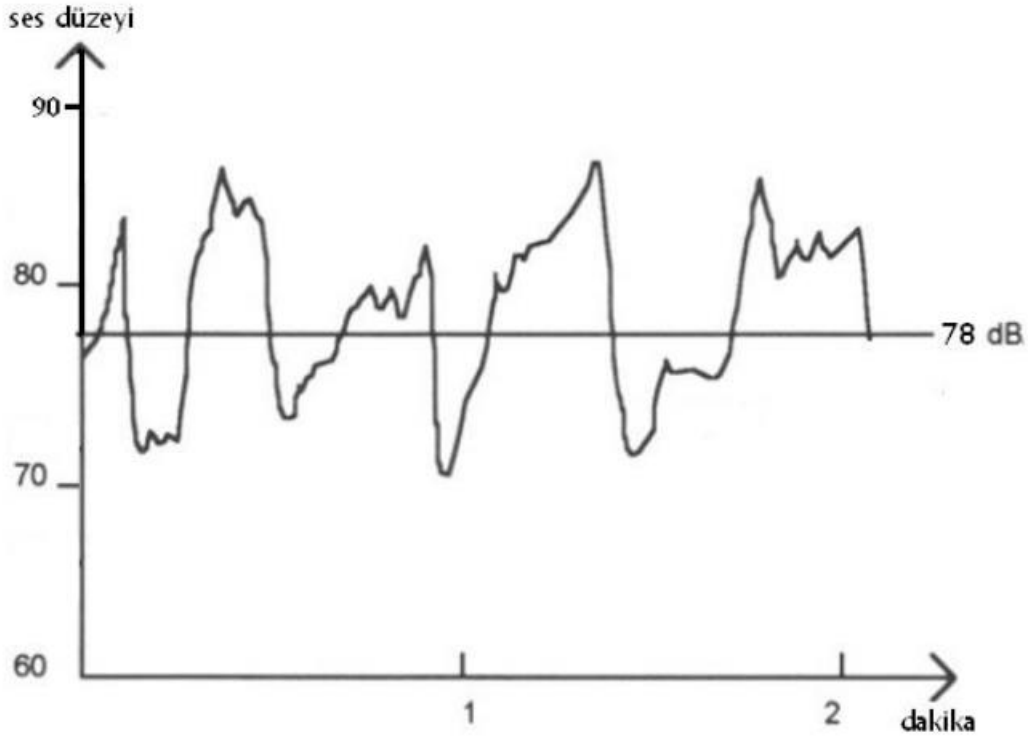
Burada;

$T$  : Ölçüm süresi

$P(t)$  : Ölçülen sesin a ağırlık ses basıncı

$P_0$  : Referans ses basıncı

2 dakika boyunca ses düzeyi ölçümü yapılmış ve Eşdeğer Sürekli Ses Düzeyi değeri 78 dB çıkan bir ölçüm grafiğinden de anlaşılacağı gibi aslında bu fiziksel terimin tam anlamıyla bir ortalama düzey değeri verdiği net olarak gözlemlenebilmektedir.



**Şekil 1.5:** 2 Dakikalık Bir Ölçüm Sonucunda Elde Edilen Eşdeğer Sürekli Ses Düzeyi

**Kaynak:** (Yapar, 2020)

### 1.5 Ses ve Gürültünün İş Sağlığı ve Güvenliğinde Yeri

İş sağlığı ve güvenliği, çalışanların işyerlerinde emniyetini, sağlığını ve rahatlığını sağlayan hukuk ve buna bağlı politika ve süreçleri inceleyen ve oluşturan multidisipliner bir bilim dalıdır. Farklı bir tariflerle işyerlerinde faaliyet gösterirken çeşitli sebeplerden dolayı çalışanların sağlığı açısından tehdit oluşturabilecek unsurlara karşı önlem amacıyla gerçekleştirilen sistematik ve bilimsel uygulamalar bütünüdür (Öktem, 2017).

Dünya Sağlık Örgütü (WHO)'nün ve Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO)'nun yapmış olduğu tanımlamaların bütününe göre göre İş Sağlığı ve Güvenliği, her iş kolu için çalışan veya o birimde bulunan bireylerin, psikolojik ve sosyal anlamda rahat bir çalışma yürütebilecek ölçüde olması, ayrıca bu durumun sürekli iyileştirme çalışmalarına paralel yürütülecek ölçekte devamlı ve gelişmeye açık olması için yapılan bütün faaliyetlerdir (Öktem, 2017).

**Çizelge 1.3: İki Gürültü Kaynağının Karşılaştırılması**

<b>İki Gürültü Kaynağının Bulunduğu Ortamlarda;</b>	
<b>Ses Düzeyleri Arasındaki Fark (dB)</b>	<b>Yüksek Düzeydeki Sese Eklenerek Miktar (dB)</b>
0	3.0
2	2.6
3	1.8
4	1.5
5	1.2
6	1.0
7	0.9
8	0.8
10	0.4
12	0.3
14	0.2
16	0.1

**Kaynak:** (Yapar, 2020)

### **1.5.1 Risk etmenleri**

İş Sağlığı ve Güvenliği biliminde risk etmenleri 5 ana başlıkta değerlendirilir:

#### **1.5.1.1 Fiziksel risk etmenleri**

Gürültü ve ses kaynaklı en önemli risk etmenlerinin de içinde dahil olduğu Fiziksel risk etmenleri grubu, aydınlatma, titreşim, radyasyon (UV, IR, Gama vs...), termal etkileşimler (sıcaklık artış veya azalışları) ve basınç dalgalanmaları (yüksek veya alçak basınç etkileşimleri) gibi bireye dışardan etkileşimde bulunacak risk etmenleridir (Çırpan, 2016).

### **1.5.1.2 Kimyasal risk etmenleri**

“Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkındaki Yönetmeliğe” göre; patlayıcı, alevlenmesi kolay, oksitleyici etkisi çok, toksik, zararlı, kanserojen, alerjik ve çevre adına tehlikeli olan özelliklerden bir ya da daha fazlasına sahip olan maddeler ve bileşenlerin yaratacağı, deri, üst solunum yolları veya gıdaya temas halinde sindirim yoluyla alındığında zehirleyici veya anlık her türlü etkinin meydana getirebileceği çalışanların veya iş yerinde bulunan kişilerin sağlıkları ve güvenliklerine ilişkin olarak tehlikeler oluşturabilecek maddeler” olarak belirtilen maddelerin yarattığı risk etmenleridir (Fişne, 2008).

### **1.5.1.3 Biyolojik risk etmenleri**

Hastalığa veya öldürücü etkiye çok açık, zehirlenmeye, enfeksiyona veya alerjiye sebep olabilecek, her türlü bakteri, mantar, virüs veya parazitlerin tamamının yarattığı risk etmenleridir (Fişne, 2008).

### **1.5.1.4 Ergonomik risk etmenleri**

Çalışanlarda iş yaşamındaki bulunduğu ortam kaynaklı kas ve iskelet sistemi rahatsızlıklarının temelini oluşturan, uzun zamanlı bu tip risk faktörlerine maruz kalındığında doğrudan veya dolaylı yoldan kalıcı kas ve iskelet sistemindeki hastalık ve rahatsızlıklara sebebiyet veren risk etmenleridir.

Ergonomi bilimi, çalışanların makine ve işin uyumunun iyileştirilmesi ve geliştirilmesi amacıyla, sürekli gelişime açık ve ilerleyen bir bilimsel daldır (Bilir, 2003).

### **1.5.1.5 Psikososyal risk etmenleri**

İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü'nün yayınlamış olduğu dokümana göre aşağıdaki çizelgede belirtilen risk etmenleridir.

**Çizelge 1.4:** Psikososyal Risk Etmenleri ve Nedenleri

<b>Kategoriler</b>	<b>İçerik</b>
<b>1. İşin mahiyeti</b>	İşte çeşitliliğin az olması İşin çok bölünmüş küçük bir parçasını yapma İşin çalışanın yeteneğine göre verilmemesi Belirsizliğin çok olması
<b>2. İş yükü ve iş temposu</b>	Fazla çalışma ya da atıl kalma Üretim hızının neden olduğu baskı Zaman baskısı İş bitim tarihlerinin baskısı
<b>3. İş programları</b>	Vardiyalı çalışma Gece çalışması Esnek olmayan çalışma programları Son anda belli olan fazla mesai programları Uzun saatler boyunca tek başına çalışma
<b>4. Kontrol</b>	Çalışanların kararlara düşük katılımı Çalışanların iş programları üzerinde kontrollerinin az olması
<b>5. Çevre ve ekipman</b>	Yeterli ekipmanın olmaması Yetersiz mekan, aydınlatma ve gürültü gibi olumsuz fiziksel ortam
<b>6. Kurum kültürü</b>	Yetersiz iletişim Sorunların çözümünde desteğin olmaması Kişisel gelişim için desteğin olmaması Şirket hedeflerinin çalışanlarca bilinmemesi, paylaşılmaması
<b>7. Kişilerarası ilişkiler</b>	Sosyal ya da fiziksel olarak izolasyon Çalışanlarla ya da yöneticilerle olan ilişkiler Kişilerarası çatışmalar Sosyal desteğin azlığı
<b>8. İşyerindeki görev</b>	Rol belirsizliği Rol çatışmaları İnsanlara ilişkin sorumluluklar
<b>9. Kariyer gelişimi</b>	Terfilerin olmaması ya da belirsiz olması Düşük ücretler İş güvencesinin olmaması İşin sosyal değerinin düşük olması
<b>10. İş ve iş dışı yaşam etkileşimi</b>	İş ve ev yaşamının birbiriyle çelişmesi Evdeki desteklerin azlığı Çift kariyer sorunları

**Kaynak:** (ÇYGM, 2016)

Bu bağlamda değerlendirilecek olursa Psikososyal risk etmenleri, çalışanların hem ruhsal hem maddi hem sosyal hem de fiziksel sorunlara neden olduğu kadar çalışma verimliliklerini ortadan kaldırmaktadır (Vatansever, 2014).

Bütün risk etmenlerinin değerlendirilmesinden de görüleceği aslında bütün risk etmenleri iş verimliliğinin temel gayesini oluşturmaktadır. Genel bir tanımlama yapacak olursak iş demek iş güvenliği ve sağlığı demektir. Bu tez çalışmasında fiziksel risk etmenli gürültü ve ses kavramları ön planda tutulacağı için iş güvenliği ve sağlığı açısından gürültü analizi önem taşımaktadır.

### 1.5.2 Gürültü türleri

Gürültü iki grupta değerlendirilmektedir (ÇYGM, 2016).

#### 1.5.2.1 Frekansına göre gürültü

Dar ve Geniş bant gürültüsü olarak iki şekilde değerlendirilen frekansa göre gürültü türleri şu şekilde değerlendirilmektedirler.

Geniş bant aralığındaki seslerin frekansları, geniş frekanslı ve değişten bir aralığı kapsamaktadır ve “Geniş Bant Gürültüsü” denilmektedir. Makine gürültüleri bu sınıfa girer.

Dar bant aralığındaki seslerin frekansları ise belirli bir frekans bandında “daraltılmış”tır. Genel olarak uğultu gibi tek tip sesler veya üfleçlerden veya HVAC aparatlarından çıkan sesler bu gürültü tipine örnektir.

#### 1.5.2.2 Zamansal değişime göre gürültü

Zamansal periyota göre değişimli sesleri içeren gürültü tipleridir.

- **Kararlı gürültü;** Belirli bir zaman dilimi içinde değişim miktarları 5 dB (A)’yı geçmeyen gürültü türüdür. Kararlı ve sürekli olarak çalışan HVAC sistemleri kararlı gürültüye örnek verilebilir.
- **Kararsız gürültü:** Zamanla ses seviyelerinde kayda değer değişimler meydana getiren gürültü tipleridir. Kendi içerisinde 3’e ayrılır:
- **Dalgah gürültü:** Sürekli ve önemli ölçüde değişiklikler olan gürültü tipi.
- **Kesikli gürültü:** Aniden durabilen veya belirli sürelerle sabit olarak devam eden gürültü tipidir. Durup tekrar çalışan makineler veya trafik örnek olarak verilebilir.

- **Darbeli gürültü:** Anlık olarak yüksek seslerin çıktığı ve periyodik olarak devam edebilecek gürültü tipleridir. Vurmalı çalışan tüm el aletleri veya makineleri (çekiç, pres, v.s...) örnek olarak verilebilir.

### 1.5.2.3 Gürültünün insan sağlığı üzerindeki etkileri

Başta işitme kayıpları olmak üzere gürültü ve ses fiziki risk etmenlerine bağlı olarak meydana gelen tüm meslek hastalıkları olarak tanımlanmaktadır (HİSAM, 2018).

Maruziyet süreleri, gürültünün çalışanların sağlığı üzerindeki olumsuz etkisinde en önemli faktörlerden birisidir. Ancak maruziyet etkilerinin kişilere göre farklı sonuçları olabilmektedir. Bireyin kulak sağlığı, önceden yaşadığı hastalıklar ve hassasiyetleri önemli olabilmektedir.

Gürültü maruziyetinin değerlendirilmesinde yaş da oldukça önemli bir faktördür. Bu sebeple duyma kaybı tespitlerinde yaş dikkate alınır. Duyma duyusunda 40 yaşından sonra duyma kayıpları yaşanabileceği bilindiği için işitme kaybı hesaplaması 40 yıl ile sınırlanmıştır (HİSAM, 2018).

ÇSGB (Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı) tarafından 28.07.2013 tarih ve 28721 sayılı Resmî Gazete’de yayınlanmış “Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik”e göre bireyleri korumaya yönelik gereksinimler açıklanmıştır.

Bunlar:

- a. En düşük maruziyet eylem düzeyi (LEX, 8saat) = 80 dB(A) veya (Ptepe) = 112 Pa [135 dB(C) re. 20 µPa] (20 µPa ölçüm aralığında 135 dB (C) şeklinde hesaplanmış olan değerler).
- b. En yüksek maruziyet eylem düzeyi: (LEX, 8saat) = 85 dB(A) ya da (Ptepe) = 140 Pa [137 dB(C) re. 20 µPa].
- c. Maruziyet sınır değeri: (LEX, 8saat) = 87 dB(A) veya (Ptepe) = 200 Pa [140 dB(C) re. 20 µPa] şeklinde yönetmeliklerde tespiti yapılmıştır (ÇSGB, 2016).

### Çizelge 1.5: Uluslararası Gürültü Maruziyet Eylem ve Sınır Değerleri

	<b>Düşük maruziyet eylem değerleri:</b> - Günlük veya haftalık kişisel maruz kalma düzeyi: 80 dB(A) - Peak Ses basıncı seviyesi: 135 dB(C)
HSE (Health and Safety Executive – İngiltere İş Sağlığı ve Güvenliği Kuruluşu)	<b>Yüksek maruziyet eylem değerleri:</b> - Günlük veya haftalık kişisel maruz kalma düzeyi: 85 dB(A) - Peak Ses basıncı düzeyi: 137 dB(C)
	<b>Maruziyet sınır değerleri:</b> - Günlük veya haftalık kişisel maruz kalma düzeyi; 87 dB(A) - Peak Ses basıncı seviyesi: 140 dB(C)
OSHA (Occupational Safety and Health Administration – Amerikan İş Sağlığı ve Güvenliği İdaresi)	8 saat maruz kalma değeri: 90 dB(A)
NIOSH (The National Institute for Occupational Safety and Health – Amerikan Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği Enstitüsü)	8 saat maruz kalma değeri: 85 dB(A)

Kaynak: (Fişne, 2008)

#### 1.5.3 Gürültünün fiziksel etkileri

Dünya Sağlık Örgütü, gürültünün insanların işitme organına zarar verdiğini net olarak yayınladığı raporlarla belirtmiştir. Dünya genelinde milyarlarca insan yüksek sesin olduğu mekanlar, spor müsabakaları, müzik festivalleri ve ses üreten cihazlar (telefon, bilgisayar, hoparlör v.s...) sebebiyle işitme kaybı riskini yaşamaktadır (WHO, 2018).

Bu tip riskler İnsan kulağında işitme kayıplarına sebep olur ve bu kayıplar 2 grup altında incelenmektedir;

- **İletim tipine dayalı işitme kaybı**

Orta kulak zarı için zararlı olabilecek ani, güçlü bir patlama sesinin sebep olduğu düşünülen bu işitme kaybı türü, Orta ve dış kulak yapısını etkiler Dış ve orta kulaktan geçen ses iç kulağa iletilemez.

- **Algı tipi işitme kaybı**

Bu tip işitme kaybı iç kulakta oluşmaktadır. Yüksek frekanslı gürültü maruziyeti sonucu olduğu düşünülmektedir (HİSAM, 2018).

#### **1.5.4 Gürültünün fizyolojik etkileri**

Gürültünün insan fizyolojisine ciddi anlamda etkileri vardır. Tansiyon yükselmesi, kalp atışında hızlanma, adrenalın seviyesinde yükselme, nefes alma hızında artış, kasların gerilmesi, uyku düzeninde bozulma hatta kolesterol seviyesinin yükselmesine yol açtığı bile gözlemlenmiştir. Gürültü maruziyetinin fizyolojik olarak bireylerde kalp hastalıklarını tetiklediği net olarak gözlemlenmiştir. 85 dB ve üzeri ses şiddetinde sürekli olarak gürültüye maruz kalanların, maruz kalmayanlara oranla daha yüksek tansiyona sahip oldukları belirlenmiştir. Bu tip araştırmalar net olarak göstermektedir ki gürültü maruziyeti bireyin kalp damar sağlığına ekstradan bir tehdit oluşturmaktadır (Bugliarello, 1976; Stephen, 2013).

#### **1.5.5 Gürültünün psikolojik etkileri**

Seviyesi çok yüksek ve ani gelişen nereden geldiği belirsiz gürültü bireylerde aşırı korku ve duygusal tepkilere yola açabilmektedir.

İnsanlarda ruh sağlığı ile gürültü arasındaki ilişkiyi inceleyen sayısız çalışma yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar bağlamında en çok şu psikolojik etkilere yol açtığı ortaya çıkmıştır (Büker, 2022):

- Kaygı
- Depresyon
- Sinir Bozukluğu
- Tedirginlik
- Öfkelenme
- Stres Hormonlarında Artma
- Korku

### **1.5.6 Gürültünün performans etkileri**

Gürültünün frekans aralığı iş performansının üzerinde oldukça etkilidir. Yüksek frekanslı gürültüler, düşük frekanslı gürültülere göre işi daha kesintiye uğratmaktadır (Fişne, 2008).

Bunların yanında işyerlerinde ve günlük yaşamımızda gürültü kaynaklı bireylerde meydana gelen rahatsızlıklar sebebiyle hem bireyleri hem iş verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Gürültü kaynaklı performans değişiklikleri üzerinde yapılan çalışmalar yıllardan bu yana devam etmektedir. Yapılan çalışmalar; gürültü değişikliklerine karşı gösterilen kişisel uyum, kişinin zekâsı, işin zorluk derecesi, yaş vb. performansı doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen çok sayıda değişkenin bulunması sebebiyle, iş verimliliğinin düşüşüne sebep olan gürültü seviyesinin çoğu zaman tam olarak belirlenmesi mümkün olmamıştır (Kavraz, 2006).

## **1.6 Diferansiyel Denklemler Üzerine Temel Matematiksel Kavramlar**

### **1.6.1 Genel açıklama**

Buraya kadar tez çalışması kapsamındaki yapılan araştırmayla doğrudan veya dolaylı olarak ilgili olan temel akustik bilgileri ve iş sağlığı güvenliği bilimi çerçevesinde ses ve gürültünün meydana getirdiği maruziyet kusurlarından bahsedilmiştir. Bu aşamadan sonra yapılan çalışmadaki matematiksel yönler ve yapılan hesaplamalarla ilgili temel bilgi verilecektir.

### **1.6.2 Diferansiyel denklemler**

Ünlü bilim insanı Isaac Newton ve ünlü matematikçi Gottfried Leibniz'in birbirlerinden bağımsız olarak buldukları calculus (türev, integral) hesaplarını bulduktan sonra geliştirilmiş, bir ya da daha fazla sayıdaki fonksiyonu ve bunların türevlerini içeren denklemlerdir (Zill, 2012).

Bu denklemler, tek değişkene bağlı olarak türevlendirilen adi diferansiyel denklemler ve bir değişkenden daha çok değişkene göre türevlendirilen kısmi türevli diferansiyel denklemler olmak üzere iki türde değerlendirilir.

Ayrıca hem adi hem kısmi diferansiyel denklemler lineer (doğrusal) ve non lineer (doğrusal olmayan) olarak da ikiye ayrılır. Adi diferansiyel denklemler bu konuda en önemli örnek, sınır tabaka problemlerinin çözümü için geliştirilmiş Blasius

Denklemleri, Kısmi türevli denklemler için de viskos akışkanların hareket denklemleri olan Navier Stokes Denklemleridir. Bu tez çalışmasının temelini oluşturan Akustik Dalga Denklemi ve çözüm metodunda kullanılacak değişken katsayılı Cauchy Euler denklemleri lineer diferansiyel denklemler oldukları için nonlinear diferansiyel denklemler için daha detaya girilmeyecektir.

### 1.6.2.1 Adi diferansiyel denklemler

Mertebesi  $n$  olarak tanımlanmış ve  $n \geq 1$  olmak üzere  $y = f(x)$  fonksiyonu bağlamında tanımlanmış türevli denklemlerdir.

**Genel gösterim:**

$$F(x) = a_0y + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n y^{(n)}) \quad (1.11)$$

Daha bilinen ve basit gösterimiyle denklemleri (1.11) şu şekilde gösterebiliriz:

$$F(x) = a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_2 y'' + a_1 y' + a_0 y \quad (1.12)$$

$F(x)$  fonksiyonu,  $y = f(x)$  fonksiyondan bağımsız olarak 0 değerine eşit veya herhangi bir fonksiyon olabilir.

$F(x)=0$  durumunda denklem, homojen denklem olarak adlandırılır. Tüm sabit katsayılı diferansiyel denklem çözümlerinde kullanılır. Çözüm önerisi olarak Leonard Euler'in yapmış olduğu  $r$  denklem öz değeri olmak üzere;

$$y = e^{rx} \quad (1.13)$$

olarak tanımlanır.

$F(x)=0$  olduğu dikkate alınarak (1.13) değeri, (1.12) denklemine uygulandığında:

$$a_n r^n + a_{n-1} r^{n-1} + \dots + a_2 r^2 + a_1 r + a_0 = 0 \quad (1.14)$$

denklemleri oluşur. Bu denklem dikkate edileceği gibi artık diferansiyel bir denklem değil, cebirsel bir denklemdir. Bu durumda denklem cebirsel sistem çözümlerine göre çözümlendikten sonra sonuç şu şekilde bulunacaktır:

$$y_h = c_1 e^{r_1 x} + c_2 e^{r_2 x} + \dots + c_n e^{r_n x} \quad (1.15)$$

özdeğerlerin  $r$  imajiner çıkması durumunda problemin fiziksel ihtiyaçları çerçevesinde üstel fonksiyon ( $e^{rx}$ ) yerine trigonometrik ( $\sin rx, \cos rx$ )

fonksiyonlar kullanılabilir. Özellikle birçok periyodik salınım problemlerinin çözümünde trigonometrik ifadeler kullanılır.

$F(x) \neq 0$  durumunda adi diferansiyel denklemin çözümü için homojen denklem çözümü yeterli gelmeyeceği için özel çözüme de ihtiyaç duyulacaktır ve bütün çözüm, genel çözüm olarak adlandırılıp özel çözüm ve homojen çözümün toplamı olarak verilmektedir.

Sabit katsayılı olmayan,  $(a_n(x))$  şeklinde katsayıya sahip olan denklemlerde özellikle Cauchy Euler denklemlerinde çözüm metodolojisi tamamen farklı şekilde değerlendirilmektedir.

Bu denklemlerin genel gösterimi şu şekildedir.

$$a_n x^n y^{(n)} + a_{n-1} x^{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_2 x^2 y'' + a_1 x y' + a_0 y = 0 \quad (1.16)$$

Burada sabit  $a$  katsayılarına ilaveten  $y$  fonksiyonun türevlerinin merteye büyüklüğü derecesinde  $x$  terimleri de bulunmaktadır. Bu tip denklemler genellikle kısmi türevli diferansiyel denklemlerin adi diferansiyel denklemlere indirgenmesinde karşımıza çıkmaktadır ve Materyal ve Metot bölümünde uygulaması gösterileceği için bu bölümde girilmeyecektir.

### 1.6.2.2 Kısmi diferansiyel denklemler

Kısmi türevli diferansiyel denklemler değişken sayısına, mertebesine hatta operatörlerinin işaretlerine göre adlandırılan ve sınır değerleri yardımıyla fiziksel problemlerin çözümlerinde kullanılan denklemlerdir.

$U(x, y, z)$  üç değişkenli bir fonksiyon olmak üzere diferansiyel 1. Mertebeden operatörler:

$$U_x = \frac{\partial U}{\partial x}, \quad U_y = \frac{\partial U}{\partial y}, \quad U_z = \frac{\partial U}{\partial z} \quad (1.17)$$

2. Mertebeden operatörler:

$$U_{xx} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, \quad U_{yy} = \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}, \quad U_{zz} = \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}$$
$$U_{xy} = \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y}, \quad U_{yz} = \frac{\partial^2 U}{\partial y \partial z}, \quad U_{zx} = \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial x} \quad (1.18)$$

olarak gösterilmektedir.

Farklı değişkene sahip kısmi türev operatörleri değişme özelliğine sahiptir. Yani:

$$\begin{aligned}U_{xy} &= \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} = U_{yx} = \frac{\partial^2 U}{\partial y \partial x}, \\U_{yz} &= \frac{\partial^2 U}{\partial y \partial z} = U_{zy} = \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial y}, \\U_{zx} &= \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial x} = U_{xz} = \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial z}\end{aligned}\tag{1.19}$$

olarak ifade edilebilmektedir.

Fiziksel problemlerin büyük çoğunluğu 2. mertebeden kısmi türevli diferansiyel denklemlerle çözümlenir.

Genel gösterim:

$$L(U) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{i,j} \frac{\partial^2 U}{\partial x_i \partial x_j}\tag{1.20}$$

Burada  $L$  diferansiyel operatörü olmak üzere genel toplam gösteriminde (1.20) iki adet ( $x$  ve  $y$ ) değişkeni gösteren 2. mertebeden kısmi türevli bir denklemi yazmanın zor olması sebebiyle  $x$  türünden iki ayrı şekilde gösterilmiştir.

Genel bir anlatım amacıyla ikinci mertebeden lineer kısmi türevli diferansiyel denklemler genellikle 3 durumda incelenmektedir.

Bu durumun analizinden önce ikinci mertebeden 2 değişkenli bir kısmi diferansiyel denklemi  $A$ ,  $B$  ve  $C$  sabit veya değişkenlere bağlı katsayılar olmak üzere tipik bir kuadratik (2. dereceden) cebirsel denklem gibi şu şekilde değerlendirelim:

$$AU_{xx} - 2BU_{xy} + CU_{yy} = 0\tag{1.21}$$

Bu denklem kuadratik bir denklem gibi düşünöldüğünde:

$$Ax^2 - 2Bxy + Cy^2 = 0\tag{1.22}$$

olacaktır.

Bu durumda tipik bir kuadratik denklem çözümlüne dayanan diskriminant ( $\Delta$ ) yaklaşımı gerekmektedir. Diskriminant değerinin 0 sayısal değeriyle ilişkisi kısmi türevli denklemin yapısı hakkında bilgi verecektir. Ek bir bilgi olarak özdeğerlerin yani denklemin çözümlüne dayanan sayısal sonuç değerlerinin adedini

belirleyen parametrenin denklemin boyutlarının verdiği bir kavram olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

#### 1.6.2.2.1 Eliptik kısmi türevli diferansiyel denklemler

$$B^2 - 4AC < 0 \quad (1.23)$$

Bu şartı sağlayan, özdeğerlerin tümünün pozitif veya tümünün negatif olduğu kısmi türevli denklemlerdir. En bilinen örnekleri Laplace denklemi, Poisson denklemi ve transsonik hızlar için Euler Troconi denklemleridir.

#### 1.6.2.2.2 Parabolik kısmi türevli diferansiyel denklemler

$$B^2 - 4AC = 0 \quad (1.24)$$

Bu şartı sağlayan, özdeğer çakışmalarının gözlemlenebildiği gibi sıfır olabilecek bir özdeğeri dışında diğer özdeğerlerinin tümü pozitif veya tümü negatif olabilecek diferansiyel denklemlerdir. Diğer kısmi türevli diferansiyel denklemlerden en önemli farkının değişkenlerden birinin mutlaka birinci mertebeden olduğu denklem türleridir. En bilinen örnekleri Difüzyon denklemleri ve Isı transferi denklemleridir.

#### 1.6.2.2.3 Hiperbolik kısmi türevli diferansiyel denklemler

$$B^2 - 4AC > 0 \quad (1.25)$$

Bu şartı sağlayan, yalnızca bir negatif özdeğeri var olduğunda geri kalan tüm özdeğerleri pozitif veya yalnızca bir pozitif özdeğeri var olduğunda geri kalan tüm özdeğerleri negatif olan kısmi türevli diferansiyel denklemlerdir. En bilinen örnekleri bu tez konusunun temellerini de oluşturan akustik dalga denklemlerinin de dahil olduğu bütün dalga denklemleridir.

### 1.6.3 Genel dalga denklemleri

Dalga denklemleri, bütün doğa bilimlerinde özellikle fiziksel ve sayısal bilimlerde oldukça öneme sahip kısmi türevli diferansiyel denklemlerdir. Bu denklemlerin çözümlerinden, ses, ışık, elektromanyetizma, su, kuantum hatta deprem dalgalarının hareketlerini ifade eden birçok fiziksel ve sayısal niceliklerin çıkması söz konusu olmuştur.

Dalga denklemlerinin kartezyen koordinatlarda en basit hali şu şekilde gösterilir:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = c^2 \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \right) \quad (1.26)$$

Burada  $f$  dalga fonksiyonunu,  $c$  dalga hızını verip zaman ( $t$ ) ve üç uzaysal boyuta ( $x, y, z$ ) göre dalganın hareketini tanımlandıran hiperbolik bir kısmi türevli diferansiyel denklemdir.

Bu dalga denklemi için çeşitli çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlardan ilki tek boyutlu dalga yayılımı için ünlü Fransız bilim insanı Jean Le Rond D'Alembert'in yapmış olduğu çözümdür.

Bu çözüm şu şekildedir:

$x$  boyutsal değerini referans nokta olarak alalım. Bu referans noktanın dalganın  $c$  hızının  $t$  zaman parametresiyle çapımı göz önüne alınarak dalganın artı ve eksi yönünde yayılımı göz önünde alınır iki ayrı parametre göz önüne alınacaktır:

$$\begin{aligned} \eta &\equiv x - ct \\ \xi &\equiv x + ct \end{aligned} \quad (1.27)$$

Zincir kuralı:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (1.28)$$

düşünüldüğünde bu değerleri (1.27)  $x$  değişkenine göre türevleri:

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial \xi}{\partial x} = 1 \quad (1.29)$$

olacağı için 2. Mertebeden  $x$  değişkenine göre türev şu şekilde tanımlanabilir:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial \eta^2} + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial \eta \partial \xi} + \frac{\partial^2 f}{\partial \xi^2} \quad (1.30)$$

Benzer şekilde  $t$  değişkenine göre şu şekilde tanımlayabiliriz:

$$\frac{\partial^2 f}{c^2 \cdot \partial t^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial \eta^2} - 2 \frac{\partial^2 f}{\partial \eta \partial \xi} + \frac{\partial^2 f}{\partial \xi^2} \quad (1.31)$$

Bu iki denklem (1.30 ve 1.31), (1.26) denkleminin tek boyutlu hali düşünülerek düzenlendiğinde:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 4 \frac{\partial^2 f}{\partial \eta \partial \xi} = 0 \quad (1.32)$$

şeklinde olacaktır.

Bu denklemin (1.32) genel çözümü:

$$f(\eta, \xi) = f_1(\eta) + f_2(\xi) = f_1(x - ct) + f_2(x + ct) \quad (1.33)$$

olur.

D'Alembert'in bu çözümü Kanonik form denilen daha sonra birçok farklı tip diferansiyel denklemin çözümünü sağlayacak olan fonksiyonel genel bir çözüm olmuştur.

Bir diğer tek boyutlu çözüm, ünlü bilim insanı Jean Baptiste Josef Fourier'in kendi ismiyle anılan dönüştürme yöntemiyle yaptığı çözümdür.

Bu çözüm yöntemine göre  $f$  dalga fonksiyonu  $x$  uzaysal boyutundan,  $k$  dalga sayısı bölgesine taşınarak (1.34) bir çözüm aranır.

$$f(x, t) \rightarrow F(k, t) \quad (1.34)$$

Diferansiyel operatörü Fourier dönüşümü sonunda:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \rightarrow (ik)^2 \quad (1.35)$$

olarak tanımlanacaktır.

(1.26) denkleminin tek boyutlu haline bu (1.34) ve (1.35) uygulandığında:

$$(ikc)^2 F(k, t) = \frac{\partial^2 F(k, t)}{\partial t^2} \quad (1.36)$$

denklem, 2. Mertebeden adi bir diferansiyel denkleme dönüşür. Normalde çözüm trigonometrik çıkar. Fakat Fourier dönüşümün yapısı itibariyle imajiner sonuç aranmalıdır. Bu durumda çözüm şu şekilde bulunur:

$$F(k, t) = C_1(k)e^{-ikct} + C_2(k)e^{-ikct} \quad (1.37)$$

Ancak bu çözüm konum uzayı  $x$  de değil, başka bir uzay olan  $k$  uzayındaki çözümdür. Fakat istediğimiz çözüm  $x$  bağlamında bir çözümdür. Bu nedenle konum uzaysallığında bulabilmemiz için bu sonuca (1.37) ters Fourier dönüşümü uygulamamız gerekmektedir. Bu dönüşüm şu şekilde uygulanır:

$$f(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(k, t) e^{ikx} dk = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} [C_1(k)e^{ikct} + C_2(k)e^{-ikct}] e^{ikx} dk \quad (1.38)$$

Gerekli ayrıştırma yapıldığında çözüm D'Alembert çözümünün bir benzeri çıkacaktır:

$$f(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} C_1(k) e^{-ik(x-ct)} dk + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} C_2(k) e^{-ik(x+ct)} dk \quad (1.39)$$

bu çözüm (1.39), (1.33) çözümünün başka bir yaklaşımıdır.

Bir başka tek boyutlu çözüm, ünlü bilim insanın Leonard Euler'in yapmış olduğu değişkenlere ayrıştırma yöntemidir ve bu çözüm, birçok kısmi türevli diferansiyel denklemlerin çözümü için kullanılmaktadır.

Bu yöntem şunu içermektedir:

Dalga denklemi, birçok fiziksel ve matematiksel denklemlerde olduğu gibi karışık türevler içermediği için değişkenlere ayırma yöntemi kullanılarak da bir çözüm arayışına gidilebilir. Bu durumda:

$$f(x, t) = X(x)T(t) \quad (1.40)$$

diye düşündüğümüzde bu yaklaşımı (1.40), tek boyutlu (1.26) denklemine uyguladığımızda:

$$T(t) \frac{d^2 X(x)}{dx^2} = X(x) \frac{1}{c^2} \frac{d^2 T(t)}{dt^2} \quad (1.41)$$

İki taraf bu denklemde (1.41), (1.40) denklemine bölünürse:

$$\frac{1}{X(x)} \frac{d^2 X(x)}{dx^2} = \frac{1}{T(t)} \frac{1}{c^2} \frac{d^2 T(t)}{dt^2} \quad (1.42)$$

olacaktır.

Birbirinden deęişken olarak baęımsız deęerler ancak bir sabit deęere eřit olabileceęi dűşünüldűęünde bir sabit olarak  $-k^2$  deęeri ile eřitleyelim.

Bu durumda denklemi çözümleriyle iki ayrı denklem olarak dűşünebiliriz:

$$\frac{d^2X(x)}{dx^2} + k^2X(x) = 0 \rightarrow X(x) = A\sin(kx) + B\cos(kx) \quad (1.43)$$

$$\frac{d^2T(t)}{dt^2} + (kc)^2T(t) = 0 \rightarrow T(t) = C\sin(kct) + D\cos(kct) \quad (1.44)$$

bulunur.

Sinűs ve kosinűs fonksiyonları çerçevesinde elde edilen çözümler, sınır koşullarını rahatça sağlayacaklarından genellikle sınır değer problemlerinde kullanılırlar. Eęer dalga boşlukta hareket eden bir fiziksel yapıysa o zaman çözümleri imajiner ve eksponansiyel bir çözümler fonksiyonu olarak vermek çözümler kolaylığı açısından daha rahat olacaktır. Bu durumda matematiksel olarak iki çözümler de doğru olmasına rağmen fiziksel kaidelere bağlı olarak imajiner olarak sınıflandırmak daha doğru olabilir. Bu durumda akustik dalga denklemlerini imajiner olarak değerlendirmek bu çözümler bağlamında daha sağlıklı olacaktır.

#### 1.6.4 Çok boyutlu dalga denklemi çözümleri

Kolay olması açısından tek uzaysal boyutta çözümler yapılmış bu denklem türünün fiziksel etkisi normalde 3 uzaysal boyutta yayılım gösteren bir yapıdır. Bu bağlamda 3 boyutlu çözümler daha gerçekte bir yaklaşım sağlaması mümkűn olmaktadır. Ses fiziksel yaklaşımı (akustik) üzerinden gidilirse  $f$  fonksiyonel değerini basınç  $P$  fonksiyonel değeri anlamında görmek daha doğru olacaktır.

Dalga denklemini (1.26) 3 boyutlu basınç fonksiyonu biçiminde yazdığımızda:

$$\nabla^2P - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2P}{\partial t^2} = 0 \quad (1.45)$$

olacaktır.

#### 1.6.4.1 Kartezyen koordinatlardaki çözüm

Üç uzaysal boyutu  $\vec{r}$  vektörüyle tanımlarsak bu denklemin kartezyen koordinatlardaki çözümü:

$$P(\vec{r}, t, k) = \text{Reel}[p(\vec{r}, k)e^{i\omega t}] \quad (1.46)$$

$$p(\vec{r}, k) = C \cdot p_0 e^{\pm ikr} \quad (1.47)$$

olarak ifade edilir. Burada  $C$  sabit terimi,  $p_0$  basınç genlik değerini vermektedir.

#### 1.6.4.2 Silindirik koordinatlardaki çözüm

Bu çözüm sistematüğinde Hankel fonksiyonlarından yararlanılmaktadır. Çözüm detaylarına burada girilmemiştir.

$$P(\vec{r}, k) = p_1 H^1(kr) + p_2 H^2(kr) \quad (1.48)$$

Burada Hankel fonksiyonları şu şekilde ifade edilmektedir:

$$H^1(kr) \cong \sqrt{\frac{2}{\pi kr}} e^{i(kr - \frac{\pi}{4})}$$

$$H^2(kr) \cong \sqrt{\frac{2}{\pi kr}} e^{-i(kr - \frac{\pi}{4})} \quad (1.49)$$

#### 1.6.4.3 Küresel koordinatlardaki çözüm

Küresel koordinatlarda dalga yayılımını kartezyen koordinatlardan elde ettiğimiz gibi uzaysal boyutları tek bir  $\vec{r}$  vektörüne bağlarsak denklemi (1.44) oldukça basit bir noktaya getiririz:

$$\frac{\partial^2 P(pr)}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P(pr)}{\partial t^2} \quad (1.50)$$

Bu denklemin çözümü oldukça basittir:


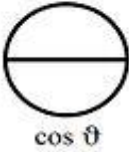






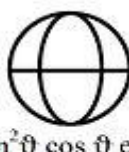






$$P(\vec{r}, t, k) = C \cdot \frac{p_0}{r} e^{\pm i(kr - \omega t)} \quad (1.51)$$

Bu çözüm aslında bize boşlukta küresel yayılım gösteren ses basınç dalgalarının mesafeye bağlı olarak azaldığını net olarak göstermektedir.

Fakat bu denklem genel bir gösterim olduğu için açılal koordinatlardan genel değerler,  $C$  sabit teriminin içerisinde adeta “gizlenmiştir”. O sebeple açılal fonksiyonları dikkate alarak yapılan çözümlerden gelen küresel harmonik fonksiyonları da hesaba katmak gerekmektedir.

### 1.6.5 Küresel harmonik fonksiyonlar

Küresel harmonikler veya küresel harmonik fonksiyonlar, küresel koordinatlarda yazılmış Laplace veya dalga denklemlerinin çözüm kümesinin açılal bölümüdür. Kuantum fiziğinde, elektromanyetik teoride, jeolojide ve birçok matematiksel hesaplamalarda kullanılmaktadır (Schwarzbach, 2006).

Harmoniques sphériques					
$l$ : nombre de parallèles ; $ m $ : nombre de méridiens					
$l$	$m = 0$	$m = \pm 1$	$m = \pm 2$	$m = \pm 3$	$m = \pm 4$
0 s	 1				
1 p	 $\cos \vartheta$	 $\sin \vartheta e^{i\varphi}$			
2 d	 $3 \cos^2 \vartheta - 1$	 $\cos \vartheta \sin \vartheta e^{i\varphi}$	 $\sin^2 \vartheta e^{i2\varphi}$		
3 f	 $(5 \cos^2 \vartheta - 3) \cos \vartheta$	 $(5 \cos^2 \vartheta - 1) \sin \vartheta e^{i\varphi}$	 $\sin^2 \vartheta \cos \vartheta e^{i2\varphi}$	 $\sin^3 \vartheta e^{i3\varphi}$	
4 g	 $(35 \cos^4 \vartheta - 30 \cos^2 \vartheta + 3)$	 $(7 \cos^2 \vartheta - 3) \sin \vartheta \cos \vartheta e^{i\varphi}$	 $(7 \cos^2 \vartheta - 1) \sin^2 \vartheta e^{i2\varphi}$	 $\cos \vartheta \sin^3 \vartheta e^{i3\varphi}$	 $\sin^4 \vartheta e^{i4\varphi}$

Şekil 1.6: Küresel Harmonikler

Kaynak: (Schwarzbach, 2006)

Bu fonksiyonlar, ünlü bilim insanı Pierre Simon de Laplace tarafından ilk 1782 yılında astronomiyle ilgili yazmış olduğu eserinde (*Mécanique Céleste*) tanıtılmıştır.

Küresel harmonikler, küresel koordinatlarda şu şekilde elde edilmektedirler:

$$\frac{1}{R} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dR}{dr} \right) = \lambda$$

$$\frac{1}{Y} \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial Y}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{Y} \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 Y}{\partial \phi^2} = -\lambda \quad (1.52)$$

Buradaki  $Y$ , küresel harmonik fonksiyondur. Değişkenlere ayırıştırma metoduna göre  $Y(\theta, \phi) = \Theta(\theta) \Phi(\phi)$  düşünürsek:

$$\frac{1}{\Phi} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \phi^2} = -m^2$$

$$\lambda \sin^2 \theta + \frac{\sin \theta}{\Theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial \Theta}{\partial \theta} \right) = m^2 \quad (1.53)$$

iki denklem haline getirilir.

İlk denklemin çözümü oldukça kolaydır. Genel olarak özellikle akustik denklemlerinin çözümünde trigonometrik fonksiyonlar kullanılır. Fakat baştan da belirtildiği gibi boşlukta giden bir dalgayı imajiner olarak ifade etmek daha kullanışlı olacaktır. Bu durumda sonuç:

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\pm im\phi} \quad (1.54)$$

bulunacaktır. Buradaki  $1/\sqrt{2\pi}$  katsayısı kuantum fiziğinde kullanılan dalga normalizasyonu işleminden bulunabilir.

1.52 deki ikinci denklem  $\lambda = l(l+1)$  olarak alındıktan sonra Legendre Polinomları yardımıyla çözülür.

Bütün bu işlemlerin sonucunda genel olarak küresel harmonik fonksiyon:

$$Y_l^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(2l+1)(l-m)!}{4\pi(l+m)!}} P_l^m(\cos \theta) e^{im\phi} \quad (1.55)$$

olarak bulunacaktır.

Küresel Harmonikler bu denklem yardımıyla hesaplanmıştır. Bazı en çok kullanılan küresel harmonik değerleri Çizelge 1.5'te görebiliriz.

**Çizelge 1.6:** Küresel Harmonikler

$$\begin{aligned}Y_0^0(\theta, \varphi) &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi}} \\Y_1^{-1}(\theta, \varphi) &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{2\pi}} \sin \theta e^{-i\varphi} \\Y_1^0(\theta, \varphi) &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{\pi}} \cos \theta \\Y_1^1(\theta, \varphi) &= \frac{-1}{2} \sqrt{\frac{3}{2\pi}} \sin \theta e^{i\varphi} \\Y_2^{-2}(\theta, \varphi) &= \frac{1}{4} \sqrt{\frac{15}{2\pi}} \sin^2 \theta e^{-2i\varphi} \\Y_2^{-1}(\theta, \varphi) &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{15}{2\pi}} \sin \theta \cos \theta e^{-i\varphi} \\Y_2^0(\theta, \varphi) &= \frac{1}{4} \sqrt{\frac{5}{\pi}} (3 \cos^2 \theta - 1) \\Y_2^1(\theta, \varphi) &= \frac{-1}{2} \sqrt{\frac{15}{2\pi}} \sin \theta \cos \theta e^{i\varphi} \\Y_2^2(\theta, \varphi) &= \frac{1}{4} \sqrt{\frac{15}{2\pi}} \sin^2 \theta e^{2i\varphi}\end{aligned}$$

**Kaynak:** (Schwarzbach, 2006)

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1 Amaç

Bu tez çalışmasındaki amaç, giriş bölümlerin de de belirtildiği gibi akustik biliminin temelini oluşturan ses düzeyi ölçümünün farklı matematiksel bakış açılarına dayanarak değişik çözümlerinin ortaya konulabileceğinin gösterilebilmesine olanak sağlanmıştır.

### 2.2 Analitik ve Sayısal Yöntem

Bu çalışmada D'Alembert dalga denklemindeki Laplasiyen operatörü aşağıdaki gibi küresel koordinatlara göre alınmıştır.

$$\nabla^2 = \Delta(r, \theta, \phi) = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \quad (2.1)$$

ve Laplasiyen operatörü (2.1), homojen basınç denklemine (2.2) uygulanacaktır.

$$\left( \nabla^2 - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) P = 0 \quad (2.2)$$

Bu denklemde P basınç fonksiyonu için analitik çözüm, değişkenlere ayırma yöntemi (2.3) ile bulunabilir.

$$P(r, \phi, \theta, t) = p_0 \Psi(r, \phi, \theta, t) = p_0 R(r) \Phi(\phi) \Theta(\theta) T(t) \quad (2.3)$$

Bu yaklaşımdan da görülebileceği gibi dalga (özdeğer) fonksiyonu ( $\Psi$ ) basınç genlik değerinden ( $p_0$ ) bağımsız olarak hareket eden ancak kartezyen koordinatlardan farklı olarak küresel koordinatlar bağlamı genlik değerini yönlendiren bir yapıya sahiptir.

Bu denklemin (2.2) genel analitik çözümü, gerçek (reel) sonuç olarak aşağıdaki genel biçimdedir:

$$P(r, \phi, \theta, t) = \text{Reel} \left[ (-ik [P_- h_1(kr) - P_+ h_2(kr)]) e^{-i\omega t} \cdot Y_l^m(\phi, \theta) \right]$$

$$h_1(kr) = j_0(kr) + i\gamma_0(kr)$$

$$h_2(x) = j_0(kr) - i\gamma_0(kr)$$

$$j_0(kr) = \frac{\sin kr}{kr}$$

$$\gamma_0(kr) = \frac{\cos kr}{kr}$$

(2.4)

sağa ve sola giden dalgaların basınç genliklerinin aynı olduğu hesaba katılıp denklemi (2.5) daha sade bir şekilde yazılırsa aşağıdaki biçimdedir:

$$P(r, t, Y_l^m) = \text{Reel} \left[ p_0 \frac{e^{(kr-\omega t)i}}{r} \cdot Y_l^m(\phi, \theta) \right] \quad (2.5)$$

Tek boyutlu küresel dalga denkleminde (2.6) basınç fonksiyonu (2.5) uygulanacaktır.

$$\frac{\partial^2 (r \cdot P(r, \phi, \theta, t))}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 (r \cdot P(r, \phi, \theta, t))}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

Bu durumda denklem, küresel harmonik fonksiyondan ve zaman bölgesinden bağımsız olarak;

$$r \cdot P''(r) + 2P'(r) + i[2k(r \cdot P'(r) + P(r))] = 0 \quad (2.7)$$

olur.

Fakat sonuç denkleminde de (2.7) görüleceği gibi bizim için önemli olan kısım reel (gerçek) kısımdır. Gerçek kısmı  $r$  ile genişletirsek Cauchy Euler denklemine dönüştürmüş oluruz.

Cauchy Euler denklemlerinin genel çözüm metodolojisi,  $r = e^\tau$  yani  $\tau = \ln r$  biçiminde  $r$  bölgesinden logaritmik  $\tau$  bölgesine taşıma biçiminde olacaktır. Bu durumda denkleminin gerçek kısmı, Robin Sınır Koşulları çerçevesinde şu şekilde dönüşür:

$$P''(\tau) + P'(\tau) = 0 \quad (2.8)$$

Robin Sınır Koşulları;

$$\begin{aligned} \tau = 0, \quad P(\tau = 0) &= P_{in} \\ \tau = 0, \quad P(\tau = 0) + P'(\tau = 0) &= 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Basınç başlangıç değeri,  $P_{in} = p_0 \cdot 10^{\frac{Lw}{20}}$  formülünden belirlenmiştir.

Bu çalışma bağlamında çözüm yapılacak diferansiyel denkleme (2.8) Robin Sınır Koşulları (2.9) çerçevesinde Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi (2.10) uygulanmıştır.

$$\int_n R \cdot [W]_{N \times 1} d\tau = 0 \quad (2.10)$$

Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemine göre yaklaşık basınç fonksiyonu, hesaplanacak katsayılar ve ağırlık fonksiyonlarını içerecek şekilde yazılmalıdır.

$$P(\tau) \cong c_0 + c_1 \cdot w_1 + c_2 \cdot w_2 + \dots + c_N \cdot w_N \cong c_0 + \sum_{i=1}^N c_i \cdot \tau^i \quad (2.11)$$

Ağırlık fonksiyonlarının polinomik olarak alınması, çözüm stabilliği açısından faydalı olacaktır. Çünkü bilindiği gibi her tür matematiksel fonksiyon (Trigonometrik, Logaritmik, Üstel, Hiperbolik v.s...) Taylor Serisi yardımıyla polinomik olarak ifade edilebilmektedir. Bu işlemlerin sonucunda elde edilen katsayılar,  $N$  ağırlık fonksiyonu sayısı çok miktarda alındıkça Taylor serisine yakınsama gösterip ulaşılmak istenen gerçek fonksiyon değerlerine yaklaşacaktır.

Bu durumda artık fonksiyon şu şekilde tanımlanır:

$$R = L(P) = \frac{d^2}{d\tau^2}(P) + \frac{d}{d\tau}(P) \quad (2.12)$$

Artık fonksiyondaki (2.12) türevli yaklaşık basınç fonksiyonu değerleri aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\frac{d}{d\tau}(P) \cong c_1 + \sum_{i=2}^N i \cdot c_i \cdot \tau^{i-1} \quad (2.13)$$

$$\frac{d^2}{d\tau^2}(P) \cong 2 \cdot c_2 + \sum_{i=3}^N i \cdot (i-1) \cdot c_i \cdot \tau^{i-2}$$

Bu değerler (2.13) artık fonksiyona (2.12) uygulandığında (2.14) biçiminde olacaktır.

$$R(\tau) = c_1 + \sum_{i=2}^N i \cdot c_i \cdot \tau^{i-1} + 2 \cdot c_2 + \sum_{i=3}^N i \cdot (i-1) \cdot c_i \cdot \tau^{i-2} \quad (2.14)$$

olur.

İntegral hesaplamaları genel olarak şu şekilde yazılır:

$$\begin{aligned} \int_n R \cdot \tau \, d\tau &= 0 \\ \int_n R \cdot \tau^2 \, d\tau &= 0 \\ &\vdots \\ \int_n R \cdot \tau^N \, d\tau &= 0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

Bu durumda elde edilen çözüm sistematığının matris gösteriminin (2.16) ve vektörel ortogonallık sebebiyle ortaya çıkacak skaler çarpım kaynaklı doğrusal denklem sisteminin istediğimiz nihai sonuçları vermesi mümkün olmalıdır.

$$[I]_{N \times N} \cdot [C]_{N \times 1} = [O]_{N \times 1}$$

$$\begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \cdots & I_{1N} \\ I_{21} & I_{22} & \cdots & I_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{N1} & I_{N2} & \cdots & I_{NN} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.16)$$

Fakat normal şartlarda 2. Robin Sınır Koşulundan oluşan  $c_I$  katsayı değeri dikkate almadan doğrusal denklem sistemini çözmek istersek bütün katsayı değerleri sıfır çıkar ki bu da istediğimiz bir sonuç değildir. Bu sebeple 2. Robin Sınır Koşuluna dayanarak  $c_I = -P_{\text{int}}$  alınıp  $w_1 = \tau$  değeri içeren integral terimi ihmal edildiğinde  $I_{\dots 1}$  integral sonuç terimleri değişse de tekrar yazılır ve doğrusal denklem sistemi bir satır ve sütun azalır sonuç vektörü 0'dan farklı olarak denklem sistemi şu şekilde yazılır:



### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yönteminde elde edilen tüm sonuçlar, daha önce doğruluğu denetlenmiş ve teyit edilmiş Serbest Alanda Sesin Yayılması Denklemiyle (Klasik Logaritmik Yaklaşım) karşılaştırılmıştır.

Bu denklemden sağlıklı “gerçek” değerlerin elde edebilmesi için Kritik Mesafe Eşiği,

$$r_{kri} = \sqrt{\frac{Q}{4\pi}} \quad (3.1)$$

Denklemel tanımlaması yapılmıştır. Bu eşitlik, Galerkin Ağırlıklı Artıklar Metodunda Küresel Harmonik Fonksiyonlara bağlı olarak,

$$r_{kri} = \sqrt{Q} \times Y_l^m \quad (3.2)$$

değerlendirilecek ve desibel hesaplarındaki önemi vurgulanacaktır.  $r_{kri}$  değerinin yakın alan ses ölçümlerinde oldukça büyük bir önem arz ettiği ve alınan mesafe değerinin bu kritik eşik değerinin altında veya eşit alındığında hem Klasik Logaritmik Yaklaşımına göre hem de Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemine göre fiziki olarak gerçekleşmesi mümkün olmayan değerlerin çıkacağı yakın alan analiz tablolarında gösterilecektir. Bu sebeple hem fiziki hem de matematiksel tutarlılık için  $\left(\frac{r_{kri}}{r} < 1\right)$  oranının gösterildiği biçimde bütün çalışma, sayısal olarak 1’den küçük değerler dikkate alınarak yapılmıştır.

Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yönteminde elde edilen basınç değerleri  $P_r$ , küresel harmonik fonksiyonlara bağlantılı olarak elde edilmiş bu  $r_{kri}$  değeri ile çarpılarak desibel hesaplama formülünden ses düzeyleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Küresel harmonik fonksiyonların enlem ve boylam katsayıları ses yayılımının

küresel bir biçimde yayıldığı düşünülmesi için bu çalışmada  $m = 0$ ,  $l = 0$  olarak alınmıştır. Karşılaştırmalar için kurgulanan farklı yönlendirmeli ses yayılım “durum”ları oluşturulmuştur. Analiz sonuçları, desibel ve hata yüzdeleri tabloları ile net olarak gözlemlenmiştir.

Atmosferik Sönümlenme ile Ses Basıncının Düşmesi (Yutulama) veya birçok kaynaktan belirtildiği gibi Havanın Yutma (Sönüm) Etkisi ile Ses Basıncındaki Azalma parametresi kısa mesafeli ölçümler için çoğu desibel hesabı modellemesinde ihmal edilse de kimi zaman atmosferik koşullar ihmal edilemez durumlar meydana getireceği için hesaba katılmak zorundadır.

(1.9) Denkleminde de görüleceği gibi yüksek frekanslarda havanın sesi sönümlenme etkisi, daha da fazla olmaktadır. Bu nedenle düşük frekanslı sesler, uzak mesafelere ( $r \gg r_{kri}$ ) kadar ulaştığında belirli bir eşik değerden sonra duyulmaları söz konusu değildir. Bu eşik değeri, matematiksel denklemlerle çok kolay tespit edilebilmektedir. Fakat analiz örneklerinde de görüleceği gibi yüksek mesafelere çıkılınca Galerkin Ağırlıklı Artıklar Metodu sağlıklı sonuçlar vermediği için bu eşik değeri hesaplamasına bu çalışmada girilmemiştir.

Sayısal çözümlerin tespitlerinde yapılacak analizler için çeşitli kısıt faktörlerinin önemi, fiziksel durum ve yaklaşımlara farklı bakış açılarının getirilmesinde büyük önem getirmektedir. Önerilen “Durumlarda” bunları açık bir şekilde göstermektedir.

### **Durum 1:**

Hareketli olmayan, hava sönümlenme (yutulama) etkisi ihmal edilmiş ( $A_{atm} \cong 0$ ), boşlukta herhangi bir engelle karşılaşmayan ( $Q=1$ ) rastgele bir noktasal kaynaktan 90 dBlik bir ses şiddetinin düzgün periyodik yayılımı (gürültü olmayan) için yapılan Klasik Logaritmik Yaklaşım (*KLY*) ve  $N = 3, 4, 5, 7$  ve 10 adet ağırlık fonksiyonu için Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi (GAAY) yardımıyla çözümlenen küresel koordinatlara dayalı analizlerden elde edilen sonuçların karşılaştırılması Çizelge 3.1’de incelenmiştir.

**Çizelge 3.1:** 90 dB Bir Ses Kaynağının 5 m Boyunca Ses Yayılım Değerleri. ( $Q = 1$ )

Mesafe (m)	Klasik Logaritmik Yaklaşım (dB)	Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi (dB)				
		N=3	N=4	N=5	N=7	N=10
0	90	90	90	90	90	90
0,5	85,029	84,752	84,958	85,015	85,028	85,029
1	79,008	79,008	79,008	79,008	79,008	79,008
1,5	75,486	75,425	75,480	75,486	75,486	75,486
2	72,987	72,840	72,974	72,986	72,987	72,987
2,5	71,049	70,826	71,029	71,048	71,049	71,049
3	69,465	69,160	69,438	69,464	69,465	69,466
3,5	68,127	67,710	68,097	68,124	68,127	68,127
4	66,967	66,384	66,945	66,961	66,967	66,968
4,5	65,944	65,117	65,948	65,931	65,943	65,945
5	65,029	63,855	65,085	65,004	65,028	65,030

Hassasiyetlerin tespit edilebilmesi açısından virgülden sonra 3 ondalık değer alınarak sapma oranları daha detaylı olarak gözlemlenme olanağı sağlanmıştır. Buna ek olarak Klasik Logaritmik Yaklaşım referans alınarak yapılan hata payı analizi yüzde cinsinden hesaplanmıştır. Bu yüzde değerleri elde edilirken her  $N$  değeri için mesafeye bağlı bulunan desibel değerleri ile Klasik Logaritmik Yaklaşım değerleri çıkartılıp o mesafedeki Klasik Logaritmik Yaklaşım değerleriyle oranlanarak yüzde değerleri tespit edilmiştir.

$$\text{Hata Payı \%} = \frac{KLY - GAAY}{KLY} \% \quad (3.3)$$

**Çizelge 3.2:** 5 m Boyunca Ses Yayılım Değerlerinin Hata Payı Yüzdeleri

Mesafe (m)	Hata Payı (%)				
	N=3	N=4	N=5	N=7	N=10
0,5	0,33%	0,08%	0,02%	0,00%	0,00%
1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,5	0,08%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
2	0,20%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%
2,5	0,31%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%
3	0,44%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%
3,5	0,61%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%
4	0,87%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
4,5	1,25%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%
5	1,81%	0,09%	0,04%	0,00%	0,00%

Çizelgelerden de görülebileceği gibi özellikle düşük ağırlık fonksiyonlu  $N = 3$  yaklaşımındaki hata payı yüzdesinde “gerçek” değerlerden sapma oldukça yüksek oranda söz konusudur.  $N = 4$  den sonra özellikle de  $N = 5$  Ağırlık fonksiyonu adedinden sonra hata paylarında dramatik bir azalma ve “gerçek” matematiksel değere yüksek oranda yakınsama görülmektedir. Ağırlık fonksiyonu artırıldığında özellikle de  $N \geq 7$  alınarak yapılan analizlerde artık “gerçek” değerlerin bulunduğu kaçınılmaz bir hal almaktadır. Bunlara ek olarak, mesafe artıka düşük ağırlık fonksiyonlu analizlerde ( $N \leq 5$ ) hata payı değerlerinde gözlemlenebilir bir artış söz konusu olmaktadır. Bu sebeple sağlıklı sonuçların alınabilmesi için  $N \geq 5$  durumunda Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yönteminde yapılacak analizler daha önem kazanmaktadır.

Aynı çalışmanın uzak ve yakın alan analizleriyle ilgili tablolar incelendiğinde bazı dikkate değer sonuçların gözlemlenmesi kaçınılmaz olmaktadır. Çok yakın alan ( $r < 1$ ) desibel değerleri ve hata payı çizelgeleri incelendiğinde özellikle noktasal kaynağa çok yaklaşma söz konusu oldukça ( $r \leq r_{kri}$ ) desibel değerleri Hem Klasik Logaritmik Yaklaşımında hem de Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yönteminde analiz edildiğinde fiziksel olarak gerçekleşmesi mümkün olamayacak kadar büyümektedir. Burada  $r_{kri}$ , Kritik Mesafe Eşiğinin değerimizin önemi bir kere daha ortaya

çıkılmaktadır.  $r_{kri}$  değerinin altında tutarsız sonuçların çıkma sebebinin küresel ses dalgalarında ses basıncının uzaklıkla ters orantılı olarak azalımı ilkesinden  $\left(\frac{1}{r}\right)$  kaynaklandığı fiziksel ve matematiksel bir gerçekliktir. Çünkü matematiksel olarak,

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{P}{r} = \infty \quad (3.4)$$

limiti gibi düşündüğümüzde kaynağa yaklaşıldıkça basınç değeri sonsuza yaklaşacaktır. Bu sebeple mantıklı ve tutarlı sonuçlar elde etmek için, Atmosferik Ses Yutumu veya ortamda bulunan yüzeylerin ses yutumu dikkate alınmadan Klasik Logaritmik Yaklaşım ve Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemine göre analiz yapılacaksa mesafe değerleri öncelikli olarak belirtildiği gibi Kritik Mesafe Eşiği,  $r_{kri}$  değerinden büyük alınmak zorundadır.

$$r > r_{kri} = \sqrt{\frac{Q}{4\pi}} \quad (3.5)$$

**Çizelge 3.3:** 0 ve 1 m Arasındaki Yakın Alan Ses Yayılım Değerleri

Mesafe (m)	Klasik Logaritmik Yaklaşım (dB)	Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi (dB)				
		N=3	N=4	N=5	N=7	N=10
0	90	90	90	90	90	90
0,1	99,008	95,606	97,445	98,370	98,931	99,007
0,2	92,987	91,344	92,361	92,784	92,973	92,987
0,3	89,465	88,570	89,172	89,386	89,462	89,466
0,4	86,967	86,465	86,823	86,934	86,966	86,967
0,5	85,029	84,752	84,958	85,015	85,028	85,029
0,6	83,445	83,301	83,412	83,439	83,445	83,445
0,7	82,106	82,038	82,092	82,104	82,106	82,106
0,8	80,946	80,921	80,941	80,946	80,946	80,946
0,9	79,923	79,918	79,922	79,923	79,923	79,923
1	79,008	79,008	79,008	79,008	79,008	79,008

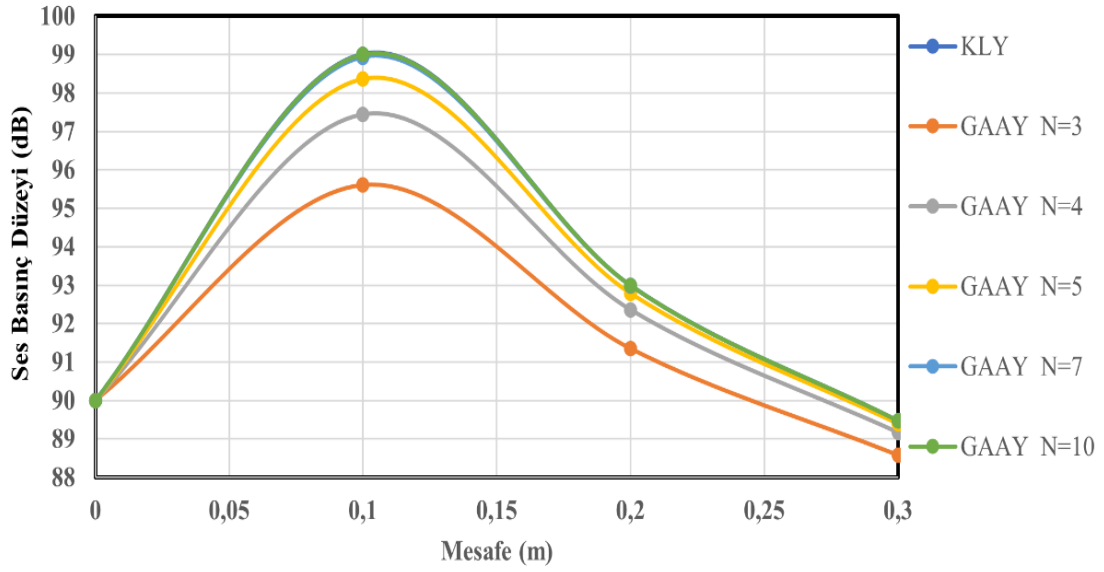
Yakın alanda ses yayılması ile ilgili yapılan hesaplamalardan da net olarak görülebileceği gibi ağırlık fonksiyonu sayısı  $N \geq 5$  gibi yüksek adetlere çıktıkça,

Klasik Logaritmik Yaklaşım ve Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi,  $r_{kri} \leq \sqrt{\frac{Q}{4\pi}}$  kritik mesafe eşliğinin altındaki değerlerde bile oldukça uyumlu sonuçları göstermektedir. Özellikle bu “durum” bağlamında bu eşik değer için  $r_{kri} = \sqrt{\frac{1}{4\pi}} \cong 0,28 m$  olarak hesaplandığında fiziki olarak tutarsız sonuçlar meydana getirmesi kaçınılmaz olan  $r = 0,1$  ve  $0,2 m$  değerlerinde bile Klasik Logaritmik Yaklaşım ve Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yönteminden elde edilen sonuçların birbirleriyle ne kadar yakın değerlere ulaştığı analiz sonuçlarından net olarak görülmektedir.

**Çizelge 3.4:** Yakın Alan Hata Payı Yüzdeleri

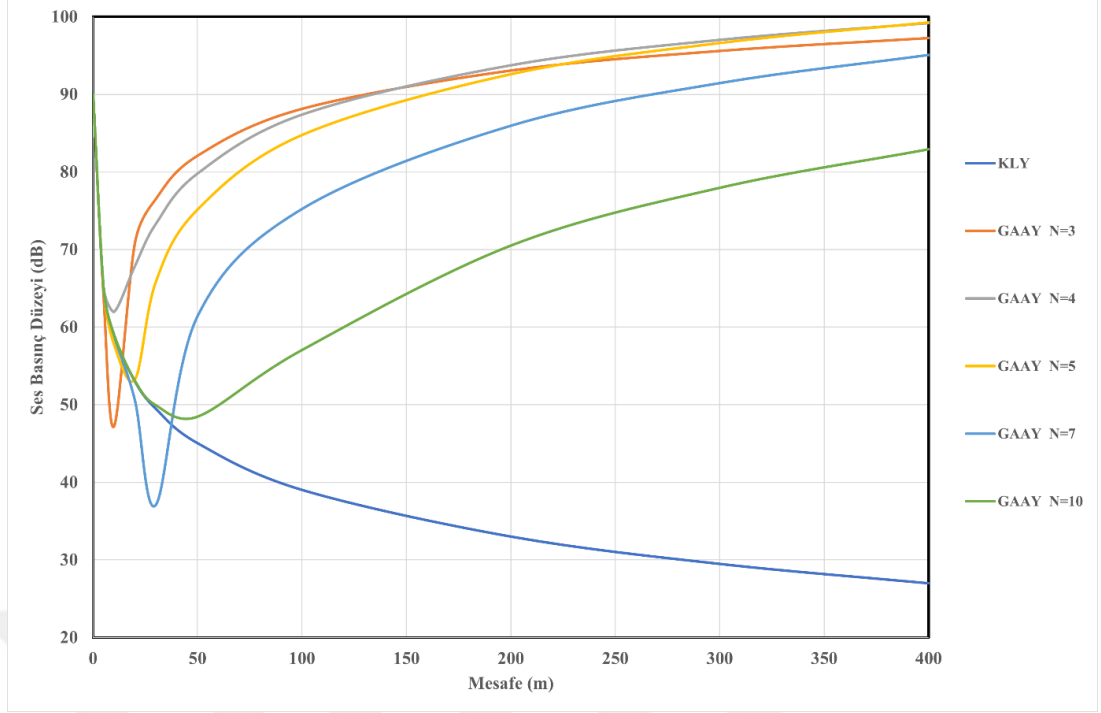
Mesafe (m)	Hata Payı (%)				
	N=3	N=4	N=5	N=7	N=10
0,1	3,44%	1,58%	0,64%	0,08%	0,00%
0,2	1,77%	0,67%	0,22%	0,02%	0,00%
0,3	1,00%	0,33%	0,09%	0,00%	0,00%
0,4	0,58%	0,17%	0,04%	0,00%	0,00%
0,5	0,33%	0,08%	0,02%	0,00%	0,00%
0,6	0,17%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%
0,7	0,08%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%
0,8	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
0,9	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Kritik mesafe eşliğinin ses yayılımındaki tutarlılık etkisi, Şekil 3.1’den de kapsamlı olarak gözlemlenebileceği gibi  $(0 - r_{kri})$  aralığında fiziksel olarak gerçekleşmesi mümkün olmayacak kadar desibel maksimizasyonu sonuçları doğurmaktadır. Bu etki, yapılan tüm analizler çerçevesinde  $r_{kri}$  değerinden önce yapılan bütün desibel hesaplamalarının sağlıklı sonuçlar veremeyeceğini görülebilir kılmaktadır. Bu bağlamda en dikkate değer nokta, düşük ağırlık fonksiyonlu, özellikle  $N = 3$  yaklaşımındaki gibi, her ne kadar “gerçek” değerlerden sayısal olarak kayda değer sapmalar meydana getirse de  $0 - r_{kri}$  aralığında fiziki gerçekliğe en yakın minimizasyon ve yayılım analizleri daha gerçekçi bir ölçüm yaklaşımını tanımlayacaktır.



**Şekil 3.1:** Yakın Alan Ses Yayılımında Kritik Mesafe Eşiği Etkisi

Uzak Alan ( $r \gg 5$ ) desibel değerleri analiz edildiğinde Şekil 3.1'den ve çizelgelerden de görülebileceği gibi dikkate değer farklılıkta sayısal veriler göze çarpmaktadır. Özellikle 10 m mesafe için ağırlık fonksiyonu sayısı  $N < 5$  olan desibel analizlerinde değerlerin ciddi anlamda salınım yaparak “gerçek” değerlerden uzaklaştığı özellikle de  $r > 20$  m mesafeler için değerlerin salınım genliklerinin oldukça yüksek olduğu buna bağlı olarak hata payı yüzdelerinin de oldukça yüksek olduğu net olarak görülmektedir. Bu durum Uzak Alan ses yayılımlarında Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yönteminin özellikle  $N \leq 10$  ağırlık fonksiyonu adetli analizler için iyi bir yöntem olmadığını, Sadece  $N \gg 10$  değerleri alındığında etkili olabileceğini fakat ağırlık fonksiyonu sayısının ne oranda artırılırsa etkili olmasının tam öngörülemediğini, çok fazla ağırlık fonksiyonu kullanılırsa hesap ekonomisi açısından kullandığımız bilgisayar programında iterasyon sayısı artacağı için zamandan tasarruf etmemizin zor olacağını net olarak göstermektedir.



Şekil 3.2: Uzak Alan Ses Yayılımında Ağırlık Fonksiyonlarının Etkisi

Çizelge 3.5: 5 ve 400 m arasındaki Uzak Alan Ses Yayılım Değerleri

Mesafe (m)	Klasik Logaritmik Yaklaşım (dB)	Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi (dB)				
		N=3	N=4	N=5	N=7	N=10
5	65,029	63,855	65,085	65,004	65,028	65,030
10	59,008	47,197	61,976	57,761	58,938	59,015
20	52,987	70,823	67,872	53,242	50,567	53,060
30	49,465	76,507	73,294	65,810	37,089	49,912
50	45,029	82,087	79,791	75,148	61,414	48,436
100	39,008	88,128	87,376	84,759	75,233	57,029
200	32,987	93,067	93,732	92,596	85,964	70,499
300	29,465	95,592	97,005	96,618	91,457	77,946
400	26,967	97,252	99,163	99,269	95,082	82,915

**Çizelge 3.6:** Uzak Alan Hata Payı Yüzdeleri

Mesafe (m)	Hata Payı (%)				
	N=3	N=4	N=5	N=7	N=10
5	1,81%	-0,09%	0,04%	0,00%	0,00%
10	20,02%	-5,03%	2,11%	0,12%	-0,01%
20	-33,66%	-28,09%	-0,48%	4,57%	-0,14%
30	-54,67%	-48,17%	-33,04%	25,02%	-0,90%
50	-82,30%	-77,20%	-66,89%	-36,39%	-7,57%
100	-125,92%	-124,00%	-117,29%	-92,87%	-46,20%
200	-182,13%	-184,15%	-180,70%	-160,60%	-113,72%
300	-224,42%	-229,22%	-227,90%	-210,39%	-164,53%
400	-260,64%	-267,72%	-268,12%	-252,59%	-207,47%

Birçok ses kaynağının birlikte çalışarak, belirli düzlemsel ses yönlendirmelerinde ( $Q>1$ ) ve Atmosferik koşullar dikkate alındığında ( $A_{atm}>0$ ) ses yayılmasının meydana getireceği farklı durumlar için ses yayılma analizi değerlendirildiğinde farklı sayısal sonuçların çıkması kaçınılmaz olmaktadır. Bu bağlamda geliştirilmiş “Durum 2” incelenmiştir.

### **Durum 2:**

Açık bir havada düzgün bir zemin üzerinde çalışan birbirleriyle yakın ve herhangi bir düzlemsel ses yutumu olmayan dört adet makine, atmosferik koşullar dikkate alındığında  $t=20$  °C ortam sıcaklığı ve bağıl nem oranı %60 olarak ölçümlenmiştir. Bu makineler sırasıyla,  $f_1 = 500$  Hz,  $f_2 = 750$  Hz,  $f_3 = 1000$  Hz ve  $f_4 = 2000$  Hz frekanslarla düzgün ses dalgaları üretmekte ve  $L_{w1} = 74$  dB,  $L_{w2} = 86$  dB,  $L_{w3} = 82$  dB,  $L_{w4} = 76$  dB ses şiddeti düzeyleri meydana getirmektedir. Bu makinelerin oluşturmuş olduğu ses alanının 5 m uzaklığındaki ses basıncı düzeyinin Atmosferik Yutum ihmal edilmiş (Çizelge 3.7) ve edilmemiş Klasik Logaritmik Yaklaşım ve Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemleri analizleri tablolarda görüldüğü gibi olacaktır.

**Çizelge 3.7:** 4 Adet Makinenin Birlikte Çalışarak Ürettiği 5 m Mesafedeki Ses Değerleri ( $A_{atm} = 0, Q = 2$ )

Makineler, Frekans, Ses Düzeyi	Klasik Logaritmik Yaklaşım (dB)	Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi (dB)				
		N=3	N=4	N=5	N=7	N=10
Makine 1, 500 Hz, 74 dB	52,039	50,865	52,096	52,014	52,038	52,040
Makine 2, 750 Hz, 86 dB	64,039	62,865	64,096	64,014	64,038	64,040
Makine 3, 1000 Hz, 82 dB	60,039	58,865	60,096	60,014	60,038	60,040
Makine 4, 2000 Hz, 76 dB	54,039	52,865	54,096	54,014	54,038	54,040
Toplam Ses Düzeyi, $L_{pt}$	65,973	64,800	66,030	65,948	65,973	65,975

4 adet makinenin birlikte çalışarak üretmiş olduğu Toplam Ses Düzeyi Denklemi (3.5) ile tespit edilmiştir.

$$L_{pt} = 10 \log \left( \sum_{i=1}^4 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \right) \quad (3.5)$$

**Çizelge 3.8:** 4 Adet Makinenin Birlikte Çalışarak Ürettiği 5 m Mesafedeki Ses Değerleri ( $A_{atm} \neq 0, Q = 2$ )

Makineler, Frekans, Ses Düzeyi	Klasik Logaritmik Yaklaşım (dB)	Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi (dB)				
		N=3	N=4	N=5	N=7	N=10
Makine 1, 500 Hz, 74 dB	52,037	50,863	52,094	52,012	52,037	52,039
Makine 2, 750 Hz, 86 dB	64,035	62,861	64,092	64,010	64,034	64,037
Makine 3, 1000 Hz, 82 dB	60,033	58,858	60,089	60,007	60,031	60,034
Makine 4, 2000 Hz, 76 dB	54,014	52,837	54,067	53,986	54,010	54,016
Toplam Ses Düzeyi, $L_{pt}$	65,968	64,793	66,024	65,942	65,967	65,969

Bu “durumda” net olarak da gözlemlenebileceği gibi ses kaynakları, boşlukta ses üreten kaynak bileşenleri gibi değil, düz bir zeminde yani bir ses yönelmenin etkili olacağı şekilde düşünülmüştür. Düz zemin düşünüldüğü için  $Q = 2$  alınması kaçınılmaz olmaktadır. Çizelgelerden de net olarak görülebileceği gibi atmosferik yutum, özellikle kısa mesafelerde çoklu makine çalışmasında kayda değer bir ses şiddeti etkisi yaratmamaktadır. Mesafe değerleri yüksek alındığında atmosferik yutum değerleri dikkate değer bir hal alacaktır. Fakat diğer “durumda” belirtildiği

gibi mesafe artışı Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yönteminde ciddi bir stabilizasyon problemine yol açıp bulunan değerlerde salınım etkisi meydana getireceği için Klasik Logaritmik Yaklaşım ile arasında ciddi Hata Payı Yüzdesi artışlarına sebebiyet verecektir. Atmosferik yutunun ihmal edildiği Çizelge 3.7 ve ihmal edilmediği Çizelge 3.8 değerlerindeki fark oranı yüzdeleri Çizelge 3.9 da değerlendirilmiştir. Burada ilk göze çarpan etmen, özellikle frekans değeri yüksek ve ses düzeyi düşük kaynaklarda atmosferik yutum değerini ihmal ettiğimizde sapmanın çok yüksek oluşudur. Özellikle Makine 4, frekans yüksekliği ve ses şiddeti düşüklüğü sebebiyle en yüksek atmosferik yutumu içerdiği net bir gerçekliktir.

**Çizelge 3.9:** 4 Adet Makinenin Birlikte Çalışarak Ürettiği 5 m Mesafedeki Fark Oranları

Makineler, Frekans, Ses Düzeyi	Fark Oranları (%)					
	Klasik Logaritmik Yaklaşım (dB)	Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi (dB)				
		N=3	N=4	N=5	N=7	N=10
Makine 1, 500 Hz, 74 dB	0,15%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,15%
Makine 2, 750 Hz, 86 dB	0,35%	0,40%	0,40%	0,40%	0,40%	0,35%
Makine 3, 1000 Hz, 82 dB	0,62%	0,71%	0,71%	0,71%	0,71%	0,62%
Makine 4, 2000 Hz, 76 dB	2,47%	2,82%	2,82%	2,82%	2,82%	2,47%
Toplam Ses Düzeyi $L_{pt}$	0,54%	0,62%	0,62%	0,62%	0,62%	0,54%

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada küresel koordinatlara dayalı ses denklemlerinden türetilen ses şiddeti düzeylerinin hesaplanmasında literatürde çok nadir olarak ele alınan fakat birçok kısmi türevli diferansiyel denklemlere dayalı fiziksel problemlerin çözümünde etkili bir şekilde kullanılan Semi-Analitik bir matematiksel çözüm yöntemi olan Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi kaynaklı çözümler tespit edilmiş ve literatürde yaygın olarak kabul gören, ses yayılımının hem matematiksel hem de fiziksel analizinde önemli bir yer edindiği için yaygın olarak kabul görerek kullanılan Klasik Logaritmik Yaklaşım çözümlerinden elde edilen referans değerler ile sayısal karşılaştırmalar yapılmıştır.

Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yönteminin önemi farklı fiziksel “durum” yaklaşımlarında vurgulanmış, ayrıca yapılan karşılaştırmalar baştan da belirtildiği gibi ses yayılımının hem matematiksel hem de fiziksel analizlerinde önemli bir yer aldığı için Klasik Logaritmik Yaklaşım çözümlerinden elde edilen referans değerlerin ses kaynaklarının yayılım analizlerinde gerçekçi sonuçlara daha yakın çıkmakta ve etkili olabilecek bir çözüm yöntemi olduğu net olarak gösterilebilmiştir.

Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemine göre ses şiddeti düzeyinin (dB) elde edilmesinde çok önemli bir parametre olan  $P_\tau$  değerinin bulunmasını sağlayan kısaca ses basıncı değerinin temelini oluşturan  $P(\tau)$  fonksiyonunun ağırlık fonksiyonlarına dayalı polinomik dizaynında, başka bir biçimde ifade edilirse yaklaşık olarak sayısal ve fonksiyonel olarak belirlenmesinde yani  $N$  ağırlık fonksiyonu adedinin mesafenin logaritmik bölge parametresi olan  $\tau$  değerine bağlı olarak  $\tau^N$  ağırlık fonksiyonlarına bağlı olarak belirlemesi için ve bunlara bağlı Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemini artık ve ağırlık fonksiyonu integral denklemlerinin oluşma sayısında ve çözümlenme sonucu elde edilen  $c$  katsayı değerlerinin sayısal etkisi net olarak gözlemlenebilmiştir.

Hata Yüzdelerinin, özellikle  $N \geq 5$  yani uzak değerler alınmadığında  $N = 10$  ağırlık fonksiyonu adetlerinin söz konusu olduğunda daha küçük çıkmakta ve daha güvenilir sayısal veriler elde edilebilmekte olduğu net olarak görülebilmektedir.

Kritik Mesafe Eşiği ( $r_{kri}$ ), değerinin yakın mesafelerde fiziksel olarak daha gerçekçi sayısal değerler ortaya çıkmasına yardımcı olduğu gösterilmiş, ayrıca küresel harmonik fonksiyonların önemi anlaşıldıktan sonra onlara bağlı olarak tanımlanmış bu değerlerin hem uzak hem de yakın değerler için Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yönteminden üretilmiş değerler ile çarpımının ses basınç düzeylerinde oldukça önemli olması gereken bir sayısal parametre olduğu vurgulanmıştır.

Uzak mesafelerde Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yönteminin yüksek miktarda sağlıklı sonuçlar verebilmesi için çok miktarda  $N$  ağırlık fonksiyon adetlerinin alınması gerektiği, ayrıca düşük sayıda değerlerin Klasik Logaritmik Yaklaşım bağlamında uyumlu sonuçlar veremediği net olarak gösterilmiştir.

Çoklu makine çalışmasında yönelme katsayısı  $Q$  değerinden bağımsız olarak kısa mesafeli analizlerin etkili olabilmesi için makinelerin ses frekans miktarlarında yüksek değerlerin tercih edilmemesi bu bağlamda atmosferik yutuma bağlı olan değerlerin elde edildikten sonra tutarlı sonuçlar elde edilmesinde problem yaratabilecek ölçekte olduğu analiz edilmiştir.

Bu çalışmada analiz yöntemi olarak kullanılmış olan Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemine göre Semi-analitik tipteki çözümler bağlamında elde edilen sonuçların önemi vurgulanmış ve birçok fiziksel problemlerden elde edilmiş kısmi türevli diferansiyel denklemler için iyi ve en önemli sayısal çözüm metodunda olan bu matematiksel yönteminin sese dayalı fiziki matematiksel problemlerin çözümlerinde yaşanacak sorunların ortaya çıkması net olarak gösterilmiştir. Yakın mesafe çalışmalarında yüksek miktarda ağırlık fonksiyonu kullanılarak çok miktarda sağlıklı sonuçlar elde edilebildiği fakat ağırlık fonksiyonu sayısı düşük alındığında sağlıklı sonuçlar almanın zor elde edilebildiği gösterilmiştir. İlerde birçok araştırmacının bu tip konulara odaklanması kaçınılmaz olarak öngörülebilir kılınmaktadır. Bu sebeple mevcut bağlamda klasik olarak kullanılan logaritmik denklem (Klasik Logaritmik Yaklaşım) ve yeni olarak geliştirilebilecek matematiksel ve fiziksel yöntemlerin fiziki anlamda gerçek ses basınç düzeylerinin ölçülmesine belki de yeni

katkıların eklenmesi kaçınılmaz olabilecek ve Akustik bilimine yeni katkıların ortaya çıkmasına destek olması kaçınılmaz olacaktır.



## KAYNAKLAR

- Ahmed, SF; Azim, CF & Memon, AR** 2011, “Minimization of The Excessive Noise for Broad-Band Active Noise Feed-Forward Control System”, *International Journal of Academic Research*.
- Akhtar, MT; Abe, M & Kawamata, M** 2007, “Noise Power Scheduling in Active Noise Control Systems with Online Secondary Path Modeling”, *IEICE Electronics Express*, vol. 4, no. 2, pp. 66–71.
- Alexopoulos, EC** 2010, “Introduction to Multivariate Regression Analysis”, *Hippokratia* vol. 14, no. Suppl 1, pp. 23–28.
- Araújo, AJ; Neto, PF, Torres, SL & Remoaldo, P** 2020, “Low- Frequency Noise and Its Main Effects on Human Health - A Review of the Literature between 2016 and 2019”, *Applied Sciences*, vol. 10, no. 15,p.5205.
- Ataş, A; Şahin, E; Belgin, E & Aktürk, N** 1995, “Effects of Industrial Noise on Hearing Thresholds”, *5th. Ergonomics Congress*, İstanbul.
- Bai, MR; Chen, H; Yang, L & Huang, S** 2019, “Active Control Of Noise In A Duct Using The Sparsely Coded Time-Domain Underdetermined Multichannel Inverse Filter”, Department of Power Mechanical Engineering, National Tsing Hua University, 101, Section 2, Kuang-Fu Road, Hsinchu 30013.
- Bayrak, H & Akgül, F** 2013, “Effect of Coefficients of Regression Model on Performance Prediction Curves”. *International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS)* vol. 5, no. 1, pp. 32-39.
- Barron, RF** 2003, “Industrial Noise Control and Acoustic”, Marcel Dekker Inc. NY.
- Battista, G; Chiariotti, P & Castellini, P** 2018, “Spherical Harmonics Decomposition in Inverse Acoustic Methods Involving Spherical Arrays.”, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 433, 2018, Pages 425-460.
- Bilir, N** 2003, “İş Sağlığı ve Güvenliği Temel Bilgiler”, Ankara: Hacettepe Üniversitesi Basım Evi.
- Brüel & Kjaer** 1998, “*Basic Frequency Analysis of Sound*”, BA 7660-06. Denmark: Brüel & Kjaer Sound & Vibration Measurement A/S.
- Bugliarello, G; Alexandre, A; Barnes, J & Wakstein, C** 1976, “*The Impact of Noise Pollution*”, New York: Pergamon Press.
- Büker, N** “Gürültünün İnsan Psikolojisi Üzerindeki Etkileri”, Alındığı tarih: 18.05.2023.
- Cha, S-G; Troshin, AG & Kim D-H** 2011, “Active Noise Control Barrier for Acoustic Hardware System Design”, *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 60 no. 12, pp. 2368-2373.

- Chen, K-C; Chang, C-Y & Kuo, SM** 2017, "Active Noise Control in A Duct to Cancel Broadband Noise", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 237, 012015.
- Çınar, İ** 2005, "Madencilikte Gürültü Analizi, Modellenmesi ve Haritalanması", Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Çırpan, M** 2016, "Risk Değerlendirmesi; Bir Üniversite Uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye.
- ÇYGM**, "Gürültü Yönergesi", Alındığı tarih: 13.05.2023.
- Dawson, GF** 2018, "The Probability Connection", In *Easy Interpretation of Biostatistics*, pp. 97-106.
- Dineen, SH; Gelin, LJ & Wise, S** 1996, "Noise Control in Buildings Without Exposed Fiberglass", *Canadian Acoustics*, vol. 24, no. 3, p. 8.
- Elbistanhoğlu, B** 1988, "Gürültü Etkileri ve Alınması Gereken Önlemler", *Mühendis ve Makine Dergisi*, cilt 29, sayı 346, ss. 33-36.
- Eversman, W & Vo, PT** 1978, "A Method Of Weighted Residuals With Trigonometric Basis Functions For Sound Transmission in Circular Ducts", *Journal of Sound and Vibration* 56(2), 243-250.
- Eversman, W; Cook, EL, & Beckemeyer, RJ** 1974, "A Method of Weighted Residuals for the Investigation of Sound Transmission in Non-Uniform Ducts Without Flow", *Journal of Sound and Vibration* 38, 105-123.
- Eversman, W** 1976, "A multimodal solution for the transmission of sound in non-uniform ducts", *American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper* 76-497.
- Eversman, W** 1975, "Computation of axial and transverse wave numbers for uniform two-dimensional ducts with flow using a numerical integration scheme", *Journal of Sound and Vibration* 41, 252-255.
- Eversman, W** 1977, "Initial Values for The Integration Scheme to Compute The Eigenvalues for Propagation in Ducts", *Journal of Sound and Vibration* 50, 159-162.
- Eversman, W** 1970, "The Effect of Mach Number on The Tuning of An Acoustic Lining in A Flow Duct", *Journal of the Acoustical Society of America* 48, 425-428.
- Feynman, R** 1969, "Lectures in Physics", Addison Publishing Company, Addison, Volume 1.
- Fişne, A** 2008, "Türkiye Taşkömürü Kurumu Ocaklarında Gürültü Koşullarının İncelenmesi, Etkilenme Düzeylerinin İstatistiksel Analizi ve Risk Değerlendirmesi", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Güler, Ç & Çobanoğlu, Z** 1994, "Gürültü", *Çevre Sağlığı Temel Dizisi*, Ankara, 19, s. 25.

- Hansen, CH** 2001, "Fundamentals of Acoustics, in Occupational Exposure to Noise: Evaluation, Prevention and Control" (Goelzer, B., Hansen, C.H., Sehrndt, G.A., Eds.) *Publication Series from the Federal Institute for Occupational Safety and Health*, Document published on behalf of the World Health Organization-Dortmund, Berlin. pp. 23-52.
- HİSAM**, "Hacettepe Ün. İş Sağ. ve Güv. Ar. Merkezi İnternet Sayfası", Alındığı tarih: 18.05.2023.
- Jacobsen, F; Moreno-Pescador, G; Fernandez-Grande, E & Hald, J** 2011, "Near Field Acoustic Holography with Microphones on A Rigid Sphere." *J. Acoust. Soc. Am.*, 129, pp. 3461-3464.
- Kavraz, M** 2006, "Mekanlarda Gürültü Kaynağı ile Alıcı Arasına Yerleştirilen Engellerle Gürültü Kontrolü Üzerine Bir Çalışma", Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Koutny, A; Jiricek, O & Thomas J** 2017, "Source Distance Determination Based on The Spherical Harmonics". *Mechanical Systems and Signal Processing* Volume 85, Pages 993-1004.
- Köstekçi, F & Taşgetiren, S** 1995, "Gürültü Kirliliğinin Önlenmesi Açısından Aktif Kontrol", *Ekoloji Çevre Dergisi*, ss. 16-17.
- Lin, JH; Tang, ST; Han, WR; Chuang, CY; Liu, PT & Young, ST** 2006, "Evaluation of Speech Intelligibility for Feedback Adaptive Active Noise Cancellation Headset", *Intl. Conf. on Biomedical and Pharmaceutical Engineering*.
- Liu, C-S; Young, L-H; Yu, T-Y; Bao, B-Y & Chang, T-Y** 2016, "Occupational Noise Frequencies and the Incidence of Hypertension in a Retrospective Cohort Study", *American Journal of Epidemiology*, vol. 184, no. 2, pp. 120-128.
- Madhu** 2020, "Statistical Methods", In MLIS semester II, paper – 201, Research Methodology Topic, Guest Faculty, Dept. of library & Information Science, Patna University.
- Møller, H & Waye, KP** 2008, "A Detailed Study of Low-Frequency Noise Complaints", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 27, no. 1, pp. 1-33.
- Muller, G & Moser, M** 2013, "Handbook of Engineering Acoustics", München & Berlin: Springer Press. ISBN: 978-3-540-69460-1(Translation of the German Standard Book),
- Narang, N; Sharma, NK & Vig, R** 2013, "Active Noise Control Using Intrinsic Mode Function Technique", *5th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*.
- Okco, F** 2012, "Gürültü Ölçümü", İnternet Kaynağından Alıntı: 20.05.2023.
- Öktem, R** 2017, "İş Sağlığı ve Güvenliği Ders Notları", Alındığı tarih: 20.05.2023.
- Pedersen, CS; Park M & Rafaely B** 2005, "Sound-Field Analysis by Plane-Wave Decomposition Using Spherical Microphone Array.", *J. Acoust. Soc. Am.*, 118, pp. 3094-3103.

- Rafaely B** 2004, "Plane-Wave Decomposition of The Sound Field on A Sphere by Spherical Decomposition." J. Acoust. Soc. Am., 116, pp. 2149-2157.
- Rafaely B** 2005, "Analysis and Design of Spherical Microphone Array.", IEEE Trans. Speech Audio Process., 13, pp. 135-143.
- Sabuncu, H** 1998, "Fiziksel Etkilere Bağlı Meslek Hastalıkları", İşyeri Hekimliği Ders Notları, Ankara: Türk Tabipler Birliği Yayını, ss. 207-226.
- Schust, M** 2004, "Effects of Low Frequency Noise up to 100 Hz", *Noise Health*, vol. 6, no. 23, pp. 73-85.
- Schwarzbach, YK** 2006, "Groupes Et Symétries : Groupes Finis, Groupes Et Algèbres De Lie, Représentations" , Éditions de l'École Polytechnique, Chapter 7, " Harmoniques Sphériques ", ISBN: 978-2-7302-1257-1.
- Skudrzyk, E** 1971, "The Foundations of Acoustics", New York: Springer Press. ISBN: 978-3-7091-8255-0.
- Stephen AS & Mark PM** 2003, "Noise Pollution: Non-Auditory Effects on Health", *British Medical Bulletin*, 68.
- Şahin, E** 2003, "Noise Control Techniques - A Case Study", *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*
- Vatansever, Ç** 2014, "Risk Değerlendirmede Yeni Bir Boyut, Psikososyal Tehlike Riskler", *Çalışma ve Toplum Dergisi*, ss. 117-138.
- Walker, ED; Brammer, A; Cherniack, MG; Laden, F & Cavallari, JM** 2016, "Cardiovascular and Stress Responses to Short-Term Noise Exposures - A Panel Study in Healthy Males", *Environmental Research*, vol. 150, pp. 391-397.
- Williams, EG; Valdivia, N & Herdic PC** 2006, "Volumetric Acoustic Vector Intensity Imager.", J. Acoust. Soc. Am., 120, pp. 1887-1897.
- Williams, EG & Takashima K** 2010, "Vector Intensity Reconstructions in A Volume Surrounding A Rigid Spherical Microphone Array." J. Acoust. Soc. Am., 127, pp. 773-783.
- Williams, EG** 2000, "Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography". London: Academic Press , The Journal of the Acoustical Society of America, Published Online.
- Yapar, ÖU** 2020, "Temel Akustik Terimleri", İnternet Kaynağından Alıntı: 20.05.2023.
- Zeng, J & Callafon, RD** 2003, "Feedforward noise cancellation in an airduct using generalized FIR filter estimation", *42nd IEEE International Conference on Decision and Control (IEEE Cat. No.03CH37475)*, pp. 6392-6397.
- Zill, DG** 2012, "A First Course in Differential Equations with Modeling Applications", Cengage Learning. ISBN 1-285-40110-7.

## ÖZGEÇMİŞ

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2000, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans:** 2009, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü.

### AKADEMİK VE İDARİ GÖREVLER:

- T.C. İstanbul Okan Üniversitesi MYO Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü Başkanı 2013 – Halen
- T.C. İstanbul Okan Üniversitesi MYO Elektronik ve Otomasyon Bölümü Başkanı 2018 – Halen
- T.C. İstanbul Okan Üniversitesi MYO Mobil Teknolojiler Programı Başkanı 2020 – 2022
- T.C. İstanbul Okan Üniversitesi MYO Bilgisayar Programcılığı Programı Başkanı 2021 – 2022

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

- Karasoy T., Yağımlı M., 2024. “Küresel Koordinatlarda Ses Dalga Denklemlerinin Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi ve Küresel Harmonik Fonksiyonlar Yardımıyla Analizi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Kabul Tarihi: 15 Mayıs 2023, Ankara, Turkey.
- Karasoy T., Yağımlı M., “Ses Desibeli (dB) Hesaplanmasında Küresel Ses Dalga Denklemlerinin Galerkin Ağırlıklı Artıklar Yöntemi Yardımıyla Analizi” 6th International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2021), Antalya, Turkey (Konferans Bildirisi).