

ÇOKLU DİSİPLİNLERDEN AKADEMİK İNCELEMELER: İLERİ KİMYA, FİZİK VE MÜHENDİSLİK PERSPEKTİFLERİ

EDİTÖR

Prof. Dr. Elif ORHAN



İKSAD
Publishing House

ÇOKLU DİSİPLİNLERDEN AKADEMİK İNCELEMELER: İLERİ KİMYA, FİZİK VE MÜHENDİSLİK PERSPEKTİFLERİ

EDİTÖR

Prof. Dr. Elif ORHAN

YAZARLAR

Prof. Dr. Bahaddin SİNSOYSAL

Prof. Dr. Elif ORHAN

Prof. Dr. Mahir RASULOV

Prof. Dr. Uğur BÜYÜK

Doç. Dr. İsmail TOPCU

Dr. Öğr. Üyesi Melek FİDAN

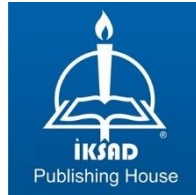
Dr. Öğr. Üyesi Tuğba AYCAN

Öğr. Gör. Dr. Ethem İlhan ŞAHİN

Dr. Sevda ENGİN

Öğr. Gör. Filiz ÖZTÜRK

Nergiz ÇAĞLAR



Copyright © 2023 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced,
distributed or transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or
mechanical methods, without the prior written permission of the publisher,
except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other
noncommercial uses permitted by copyright law. Institution of Economic
Development and Social
Researches Publications®
(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)
TURKEY TR: +90 342 606 06 75
USA: +1 631 685 0 853
E mail: iksadyayinevi@gmail.com
www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.
Iksad Publications – 2023©

ISBN: 978-625-367-164-8
Cover Design: İbrahim KAYA
March / 2023
Ankara / Turkey
Size = 16x24 cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ

Prof. Dr. Elif ORHAN1

BÖLÜM 1

DIETİLENTRİAMİN LİGANDLARI İLE ZN(II)-SÜLFAMETOKSAZOL KOMPLEKSİNİN SPEKTROSKOPİK, YAPISAL KARAKTERİZASYONU, MANYETİK ve ANTİMİKROBİYAL ÇALIŞMALARI

Öğr. Gör. Filiz ÖZTÜRK

Dr. Öğr. Üyesi Tuğba AYCAN

Dr. Öğr. Üyesi Melek FİDAN

Nergiz ÇAĞLAR3

BÖLÜM 2

KONTROLLÜ KATILAŞTIRILAN Al-Cu-Fe ALAŞIMLARINDA Fe İLAVESİNİN VE SOĞUMA HIZININ ROLÜ

Dr. Sevda ENGİN

Prof. Dr. Uğur BÜYÜK27

BÖLÜM 3

FİZİK PRENSİPLERİ IŞIĞINDA SES VE İŞİTME

Prof. Dr. Elif ORHAN45

BÖLÜM 4

İKİ FAZLI SIVILARIN TABAKALI ORTAMDA AKIŞ PROBLEMİNİN ENTROPİ ÇÖZÜMÜ

Prof. Dr. Bahaddin SİNSOYSAL

Prof. Dr. Mahir RASULOV

Öğr. Gör. Dr. Ethem İlhan ŞAHİN107

BÖLÜM 5

TİTANYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERE TAKVİYE EDİLEN HEGZAGONAL BOR NİTRÜRÜN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Doç. Dr. İsmail TOPCU

Öğr. Gör. Dr. Ethem İlhan ŞAHİN.....121

ÖN SÖZ

Saygıdeğer okuyucular,

Çoklu disiplinlerden altı farklı akademik konuyu ele alan bu kitap, yazarlarınca titiz çalışmalar sonrasında gerçekleştirilen akademik inceleme, tespit ve değerlendirmeleri, siz okuyucu ve araştırmacıların istifadesine sunmaktadır.

İlk bölüm “Dietilentriamin Ligandları ile Zn(II)-Sülfametoksazol Kompleksinin Spektroskopik, Yapısal Karakterizasyonu, Manyetik ve Antimikrobiyal Çalışmaları” başlığını taşımaktadır. Bu bölümde, dietilentriamin ligandları ile sentezlenen Zn(II)-sülfametoksazol kompleksinin spektroskopik ve yapısal özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, manyetik özellikleri ve antimikrobiyal etkisi araştırılmıştır.

İkinci bölüm “Kontrollü Katılaştırılan Al-Cu-Fe Alaşımlarında Fe İlavesinin ve Soğuma Hızının Rolü” olarak belirlenmiştir. Bu bölümde, alüminyum-bakır-demir alaşımlarında demir ilavesinin ve soğuma hızının mekanik özelliklere etkisi incelenmiş olup, Fe miktarındaki ve soğuma hızındaki artışının mikrosertlik ve maksimum çekme-dayanım değeri ile ilişkisi ortaya konmuştur.

Üçüncü bölüm, “Fizik Prensipleri Işığında Ses ve İşitme” başlığını taşımaktadır. Bu bölümde, temel fizik bilimi yaklaşımları esas alınarak, ses ve özellikleri, ses üstü olaylar ve işitme konuları ele alınmış, işitme ve duymanın sesin fiziksel nicelikleriyle ilişkisi açıklanmıştır.

Dördüncü bölüm ise “İki Fazlı Sıvıların Tabakalı Ortamda Akış Probleminin Entropi Çözümü” başlıklıdır. Bu bölümde, iki farklı fazdaki sıvıların tabakalı ortamda akış probleminin entropi çözümü üzerinde durulmuştur. İki fazlı sıvıların tabakalı ortamda birlikte hareketini ifade edebilen nonlinear kısmi türevli diferansiyel denklemler sistemi bazı fiziksel varsayımlar çerçevesinde incelenmiştir.

Son bölümde ise “Titanium Matrisli Kompozitlere Takviye Edilen Hegzagonal Bor Nitrürün Mekanik Özelliklere Etkisi” araştırılarak deneysel sonuçlara yer verilmiştir. Kompozit malzemeye takviyelerin nasıl etkiler oluşturduğu belirlenmiştir.

Bu kitap, çoklu disiplinlerden farklı konulardaki çalışmalarını bir araya getirerek okuyuculara geniş bir bakış açısı sunmayı hedeflemektedir. Umuyoruz ki bu kitap, okuyucular için ilham verici olacak ve yeni çalışmalara ışık tutacaktır.

Keyifli okumalar dileriz.

Prof. Dr. Elif ORHAN

BÖLÜM 1

DIETİLENTRIAMİN LİGANDLARI İLE ZN(II)-SÜLFAMETOKSAZOL KOMPLEKSİNİN SPEKTROSKOPİK, YAPISAL KARAKTERİZASYONU, MANYETİK ve ANTİMİKROBİYAL ÇALIŞMALARI

Öğr. Gör. Filiz ÖZTÜRK¹

Dr. Öğr. Üyesi Tuğba AYCAN²

Dr. Öğr. Üyesi Melek FİDAN³

Nergiz ÇAĞLAR⁴

¹ Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi,, Samsun, Türkiye; filiz.ozturk@omu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-0493-0446

²Fizik Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Sinop Üniversitesi, Sinop, Türkiye; taycan@sinop.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-5313-7807

³ Atatürk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, Erzurum, Türkiye; mbahadır@atauni.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-8138-1743

⁴ Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye; nergizakademik@gmail.com.tr, ORCID ID :0000-0002-6326-2783

GİRİŞ

Sülfanilamidin türevleri olan sülfonamidler, insanlarda bakteriyel enfeksiyonların tedavisinde yaygın olarak kullanılan ilk etkili kemoterapötik ajanlardır. P-aminobenzoik asit (PABA) sülfamidler üzerinde antagonist etki yaparak, folik asidi doğrudan sentezleyen mikroorganizmalara sülfamid verilmesi şartıyla kompetitif inhibisyon sonucu folik asit sentezine neden olur ve böylece mikroorganizmanın büyümesini engeller. Bu molekül gruplarının ciddi bakteriyel enfeksiyonları tedavi etme potansiyeline sahip özel bir grup olduğu bilinmektedir (Bhattacharjee, 2016; Kremer et al., 2006; Wolff, 1996). Son zamanlardaki enfeksiyonların sıklık ve tiplerinin artması ve immün yetmezliklerin (HIV enfeksiyonu, antitümör tedaviler ve organ nakli gibi) artması nedeniyle daha etkin ve güvenli antimikrobiyal aktiviteye sahip kimyasal bileşiklerin araştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır (David, Thomas, & Lemke, 1995; Kremer et al., 2006; Reynolds, 1982; Supuran, Scozzafava, & Conway, 2004).

Proteusmirabilis, Escherichiacoli gibi çeşitli mikroorganizmalar nocardiosis, şankroidler ve akut idrar yolu enfeksiyonlarına neden olabilir. Bu enfeksiyonların tedavisinde sülfonamid türevi olan sülfamiazol ilaçları tercih edilmektedir. Bu hastalıkların yanı sıra menenjit, otit, ishal, toksoplazmoz ve kronik idrar yolu enfeksiyonlarının tedavisinde farklı ilaçlarla kombinasyon halinde kullanılabilirler (Gennaro, 2003; Sweetman, 2007). Antibakteriyel aktiviteye ek olarak, sülfonamidler anti-fungal, anti-viral, antitümör, anti-karbonik anhidraz, antitiroid, diüretik, hipoglisemik veya proteazinhibe edici aktivite için kullanılmıştır (Bellu et al., 2005; Chohan, Mahmood-ul-Hassan, Khan, & Supuran, 2005; Huang, Lin, & Huang, 2001). Sülfonamidler, farklı konumlarda çeşitli verici atomlara (iki çift bağlı oksijen, bir nitrojen ve merkezi kükürt atomu) sahiptir.

Sülfonamidlerden biri olan sülfametoksazol, üriner sistem enfeksiyonlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle sülfametoksazol (smxH), idrar yolu enfeksiyonları, bronşit ve insan prostatiti gibi bakteriyel enfeksiyonların tedavisinde antibiyotik olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, hem gram-negatif

hem de gram-pozitif *Staphylococcus aureus* ve *Escherichia coli*'ye karşı etkilidir (Ong, Sievers, & Leslie, 2010). Hayvancılık ve su ürünleri endüstrisinde bakteriyel enfeksiyonları tedavi etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Bogialli, Curini, Di Corcia, Nazzari, & Samperi, 2003; Lai et al., 2011; Li, Zhang, Wu, Xiong, & Zhang, 2005; Msagati & Nindi, 2004; Takasuka & Nakai, 2001). Sülfametoksazol kompleksleri [Co (II), Cd (II), Ni (II), Cu (II), Zn (II), Au (III)] farklı biyolojik etkileri nedeniyle (anti kanser, antibakteriyel, antifungal) çalışmaları literatürde oldukça yaygındır (Al-Khodir, 2015; Bouchoucha, Terbouche, Zaouani, Derridj, & Djebbar, 2013; Kesimli & Topaçlı, 2001; Tracey & Crans, 1998).

Sülfametoksazol, asit-baz reaksiyonunda sadece bir hidrojen iyonu içeren monobazik bir ligandır. Bu monobazikligandlar, koordinasyon bileşiklerinin oluşumuna neden olur. Sülfonamid türevleri, nitrojen ve sülfonil oksijenden veya izoksazolil halka nitrojeninden metale çift dişli olarak bağlanır.

Bu çalışmada, $[Zn(dien)_2].2(stz).2H_2O$ (Smtx=sülfametoksazol, dien= dietilentriamin) kompleksi sentezlendi. Yapısal özellikleri, X-ışını kırınım tekniği (XRD) ve element analizi ile karakterize edildi. Spektroskopik özellikleri FT-IR, EPR ve termal analiz ile araştırıldı. Kompleks, ortorombik uzay grubu $Pn2_1a'$ 'da kristallendi. Zn(II) iyonu, iki dietilentriamin ligandının altı nitrojen atomu aracılığıyla hafifçe bozulmuş oktahedral koordinasyon geometrisine sahiptir. Monomer, koordine olmayan $[Zn(dien)_2]^{2+}$ kationu ve iki sülfametoksazol iyonu arasında bağlanır. Supramoleküler yapı, birimleri birbirine bağlayan hidrojen bağları tarafından oluşturulmuştur. Kompleksin *B. subtilis*, *S. aureus*, *P. aeruginosa*, *E. coli*, *K. pneumoniae* ve *C. albicans*'a karşı biyolojik çalışması, MIC değerleri ile çok güçlü antibakteriyel aktivite göstermiştir.

1. MATERYAL VE METOT

1.1. Kompleksin Hazırlanması

ZnCl₂·6H₂O, daha önceden rapor edilen bir prosedüre göre sentezlendi (Öztürk, Aycan, & Çon, 2020). Yaklaşık dört hafta sonra beyaz tek kristaller elde edildi. X-ışını kırınım çalışmaları için uygun boyutlu tek kristaller seçildi. Anal. hesap. C₂₈H₄₈N₁₂O₈S₂Zn için: C, %41.57; H, %5.97; N, %20.77; K, %7.92. Bulunan: C, %40.84; H, %6.31; N, %20.51; K, %7.79.

Kristaller MeOH (%100) (25 ml) içinde çözüldükten sonra üzerine %1 CuSO₄ geçiş metali ilave edildi. Son çözelti yavaş yavaş buharlaşmaya bırakıldı. İki haftanın sonunda EPR çalışması için toz kristaller toplandı.

1.2. Genel Metotlar

Ticari olarak satın alınan tüm reaksiyonlar, daha fazla saflaştırılmadan kullanıldı. Element analizi (C, H, N, S) için ODTÜ merkez laboratuvarında bulunan LECO, CHNS-932 element analiz cihazı kullanılmıştır.

KBr pelet tekniğinde alınan ana ligand ve Zn(II) kompleksinin FT-IR spektrumları, bir Bruker TENSOR-27 spektrometresi ile elde edildi. Oda sıcaklığında ve 77⁰K'de kaydedilen EPR spektrumları, bir Varian E-104 X-band EPR spektrometresinde elde edildi ve mikrodalga gücü, manyetik alan ve modülasyon frekansı sırasıyla 10mW, 1.00 G ve 100 kHz olarak ayarlandı. 10° aralıklarla kaydedilen açısal değişimler, kristalin x, y ve z karşılıklı dik üç eksenli boyunca döndürülmesiyle elde edilmiştir.

25-1000°C sıcaklık aralığında, 10 K dk⁻¹ ısıtma hızında ve nitrojen atmosferinde platin krezeller kullanılarak TGA eğrilerini elde etmek için Amasya üniversitesi MAULAB'da yüksek sinterlenmiş α-Al₂O₃ referanslı ve DTG duyarlılığı 0.05 mg s⁻¹ olan HITACHI-SII 7300 termal analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

1.3. X-ışını Kristalografisi

Kompleksin XRD ölçümü, bir Stoe IPDS difraktometresinde (MoK α radyasyonu, $\lambda=0.71073$ Å) 293 K'de kaydedilmiştir. Veri azaltma: Stoe X-RED (Stoe, 2002), Hücre arıtımı: Stoe X-AREA (Stoe, 2002), Veri toplama: Stoe X-AREA (Stoe, 2002). Yapı, SIR-2004 yazılımı kullanılarak doğrudan yöntemlerle çözüldü (Burla et al., 2005). Tek kristal yapı, SHELXL-2018/3 kullanılarak arıtıldı. (Sheldrick, 2018). Kompleksin şekilleri ORTEP-2014 (Farrugia, 2012), WINGX-2014 (Farrugia, 2012) ve MERCURY (Macrae et al., 2006) programları kullanılarak çizilmiştir. Diğer tüm H atomları geometrik olarak konumlandırıldı ve bağlı atomlarınınin U_{iso} 1.2 katı olan sürüş modeli ile arıtıldı. Kristal verilerinin, veri toplamanın ve yapı iyileştirme parametrelerinin ayrıntıları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: [Zn(dien) $_2$].2(smtx).2H $_2$ O'nun kristal verileri, veri toplama ve yapı iyileştirme parametreleri

| Formül | C $_{28}$ H $_{48}$ N $_{12}$ O $_8$ S $_2$ Zn |
|--|--|
| CCDC | 1987858 |
| Moleküler ağırlık | 810.27 |
| Sıcaklık(K) | 293 |
| Radyasyon, λ (MoK $_{\alpha}$) | 0.71073 |
| Kristal sistem | Ortorombik |
| Uzay grubu | Pn 2_1 a |
| Birim hücre boyutları a , b , c (Å) | 16.6221 (8), 26.4006 (11), 8.6368 (3) |
| α , β , γ (°) | 90, 90, 90 |
| Hacim (Å 3) | 3790.1 (3) |
| Z | 4 |
| Hesaplanan yoğunluk (Mg.m $^{-3}$) | 1.420 |
| μ (mm $^{-1}$) | 0.82 |
| $F(000)$ | 1704 |
| Kristal boyutu (mm) | 0.650× 0.433× 0.220 |
| θ aralığı (°) | 1.5–26.8° |
| İndeks aralığı | -20 ≤ h ≤ 18 -29 ≤ k ≤ 33 -10 ≤ l ≤ 10 |
| Ölçülen yansımalar | 16834 |
| Bağımsız yansımalar | 7499 |
| Gözlenen yansımalar [$I \geq 2\sigma(I)$] | 4022 |
| Absorpsiyon düzeltmesi | İntegrasyon |
| Atırma metodu | F 2 tam matris en küçük kareler |
| Veri/kısıtlamalar/parametreler | 7499/17/468 |
| Goof S | 0.82 |

| | |
|---|--------------------------------|
| Son R indisi [$I \geq 2\sigma(I)$] | $R_1 = 0.041$; $wR_2 = 0.101$ |
| R indisi (tüm veri) | 0.050 |
| $\Delta\rho_{maks}$; $\Delta\rho_{min}$ ($e\text{\AA}^{-3}$) | 0.42; -0.32 |

1.4. Antimikrobiyal Duyarlılık Testleri

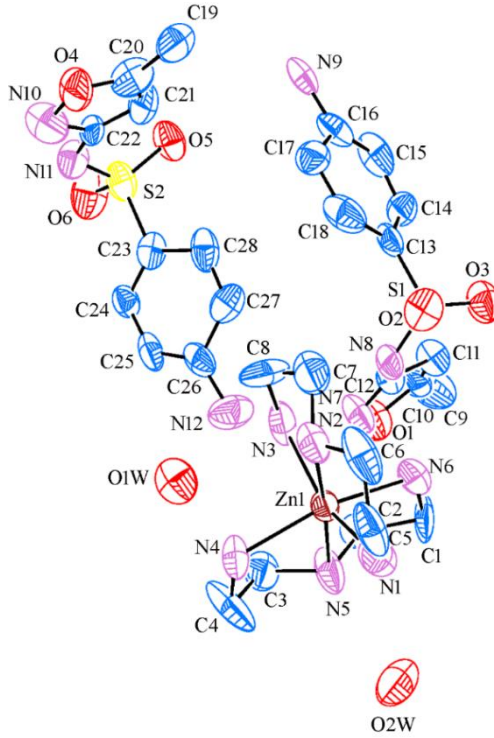
Kompleksin antimikrobiyal aktivitesini belirlemek için mikrodilüsyon yöntemi kullanılmıştır (Eloff, 1998). Antimikrobiyal aktiviteler iki Gram pozitif bakteriye (*Bacillus subtilis* ve *Staphylococcus aureus*), üç Gram negatif bakteriye (*Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*) ve bir mayaya (*Candida albicans*) karşı test edilmiştir. Kısaca mikroorganizmalar gece boyunca Luria Agar plakalarında büyütüldü. Koloniler daha sonra steril salin solüsyonunda (%0.9 NaCl) süspanse edildi. Mikroorganizmaların konsantrasyonları 1×10^8 cfu/ml'ye ayarlandı. Mikroorganizmalar, 5×10^5 cfu/ml'lik bir nihai konsantrasyon elde etmek için Mueller-Hinton sıvı besiyerinde ayrıca seyreltildi. Bu ortamdan 100 ul (yaklaşık 5×10^4 cfu/ml) 96 gözlü mikropolanın (Sarstedt AG&Co, Almanya) her bir gözüne ilave edildi. 5 mg/ml ila 12.5 mg/ml kompleks konsantrasyonları (Metanol(%50)/Asetonitril(%50) içinde) aralığındaki stok çözeltiler hazırlandı ve bu stok çözeltilerin 10 ul'si ayrı oyuklara ilave edildi. Mikropolakadaki kültürler 37°C 'de 24 saat (*C. albicans* için 48 saat) inkübe edildi. Her kuyucuğun OD_{600} değerleri, MultiskanGO mikropolaka okuyucu (Thermo Scientific) kullanılarak belirlendi. Her deney üç kopya halinde test edilir. MİK değeri, gözle görülür bir mikrobiyal büyümenin olmadığı ilk kuyunun bileşik konsantrasyonu olarak bulundu.

2. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

2.1. Kristal Yapının Tanımı

Dietilentriamin ligandlarını içeren çinko-sülfametoksazol kompleksi, $a=16.6221$ (8), $b=26.4006$ (11), $c=8.6368$ (3) ve $Z=4$ (Tablo 1) ile ortorombik boşluk grubu $Pn2_1a$ 'da kristalleşir. Başlık kompleksinin asimetrik biriminde çinko geçiş metaline bağlı iki dietilentriamin (dien) ligandı, iki sülfametoksazol (smtx) anyonu ve iki kafes su molekülü bulunur (Şekil 1). Zn(II), iki dietilentriamin

ligandının altı nitrojen atomu aracılığıyla bozulmuş bir oktahedral koordinasyon geometrisine sahiptir. Her iki dietilentriamin ligandının metal ile olan mesafesi daha uzun Zn-N_{primer} iken, daha kısa olan Zn-N_{sekonder}dir. Bu mesafeler (Zn-N), bazı küçük sapmalar olmasına rağmen, literatüre ve teorik hesaplamayla uyumludur (Butcher, Muratore, & Purdy, 2006). Literatür ile X-ışını kırınımına ilişkin bağ uzunlukları, bağ açıları ve burulma açıları Tablo 2'de verilmiştir. Kompleksteki smtx'in N9-C12 ve N11-C22 bağ uzunlukları sırasıyla 1.446 (16) Å ve 1.281 (17) Å olarak bulunmuştur. Serbest smtx anyonunun uzunlukları (1.3882 Å) (Das et al., 2015) ile karşılaştırıldığında, N9-C12 bağı uzamış ve N11-C22 bağı kısalmıştır. Bağın uzamasının veya kısalmasının nedeni; nitrojenin deproton olmaları ve hidrojen bağı yapmasıdır.



Şekil 1: [Zn(dien)₂].2(smtx).2H₂O molekül yapısının ORTEP görünümü (Hidrojen bağı olmayan hidrojen atomları netlik için çıkarılmıştır).

Tablo 2: Kompleksin seçilen bağ uzunlukları, bağ açıları ve burulma açılarının DFT ile karşılaştırılması

| Bağ uzunlukları (Å) | | XRD | | (Butcher et al., 2006) | |
|------------------------|---------|------------|-----------|------------------------|------------|
| N1–Zn1 | | 2.242(11) | | 2.2448(12) | |
| N2–Zn1 | | 2.147(5) | | 2.1332(12) | |
| N3–Zn1 | | 2.228(12) | | 2.2356(12) | |
| N4–Zn1 | | 2.192(4) | | 2.1943(12) | |
| N5–Zn1 | | 2.127(4) | | 2.1566(12) | |
| N6–Zn1 | | 2.224(4) | | 2.2462(12) | |
| N1–C5 | N6–C1 | 1.367(17) | 1.477(7) | 1.477(2) | 1.478(2) |
| C5–C6 | C1–C2 | 1.470(2) | 1.590(12) | - | - |
| C6–N2 | C2–N5 | 1.393(18) | 1.565(13) | 1.4663(19) | 1.4673(18) |
| N2–C7 | N5–C3 | 1.538(17) | 1.582(13) | 1.4749(18) | 1.4694(18) |
| C7–C8 | C3–C4 | 1.480(2) | 1.654(15) | - | - |
| C8–N3 | C4–N4 | 1.580(2) | 1.453(7) | 1.4766(18) | 1.4749(18) |
| S1–O2 | S2–O6 | 1.426(10) | 1.515(11) | - | - |
| S1–O3 | S2–O5 | 1.393(10) | 1.473(9) | - | - |
| N9–C12 | N11–C22 | 1.446(16) | 1.281(17) | - | - |
| N9–S1 | N11–S2 | 1.588(11) | 1.550(12) | - | - |
| Bağ açıları (°) | | | | | |
| N5–Zn1–N2 | | 174.93(16) | | 170.36(5) | |
| N5–Zn1–N4 | | 79.11(15) | | 78.15(4) | |
| N5–Zn1–N6 | | 80.23(16) | | 81.02(5) | |
| N5–Zn1–N3 | | 97.5(6) | | 96.37(5) | |
| N5–Zn1–N1 | | 105.8(6) | | 105.30(5) | |
| N4–Zn1–N6 | | 159.32(17) | | 156.61(5) | |
| N4–Zn1–N3 | | 93.9(5) | | 103.67(5) | |
| N4–Zn1–N1 | | 97.1(5) | | 86.72(4) | |
| N3–Zn1–N1 | | 155.7(3) | | 157.55(5) | |
| N2–Zn1–N1 | | 74.5(6) | | 80.30(5) | |
| N2–Zn1–N3 | | 82.9(6) | | 79.09(4) | |
| N2–Zn1–N6 | | 104.84(17) | | 107.23(5) | |
| N2–Zn1–N4 | | 95.82(16) | | 94.56(4) | |
| N3–Zn1–N6 | | 87.7(5) | | 89.05(4) | |
| N1–Zn1–N6 | | 89.5(6) | | 88.62(4) | |
| N9–S1–C13 | | 106.9(7) | | - | |
| N11–S2–C23 | | 110.7(7) | | - | |
| C12–N9–S1 | | 123.7(8) | | - | |
| C22–N11–S2 | | 114.9(9) | | - | |

| Torsiyon açıları (°) | | |
|----------------------|----------|---|
| C22-N11-S2-C23 | 90.9(12) | - |
| C24-C23-S2-N11 | 84.7(12) | - |
| C12-N9-S1-C13 | 77.9(12) | - |
| C18-C13-S1-N9 | 87.8(13) | - |

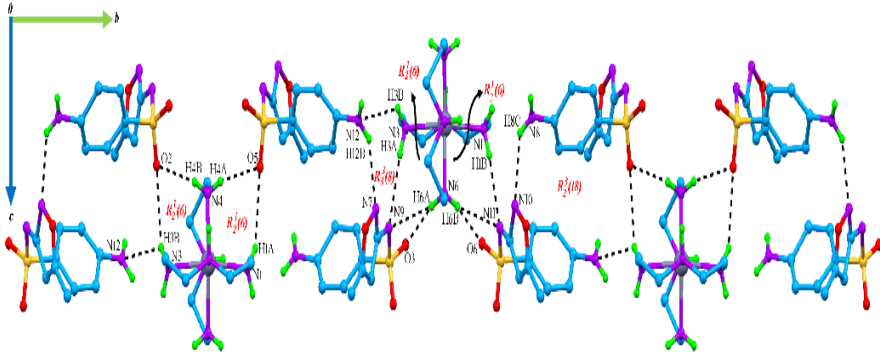
Molekül, tipik H-bağı (N—H \cdots O, N—H \cdots N, O—H \cdots O ve C—H \cdots O) aracılığıyla bağlanır. Koordinasyonsuz [Zn(dien)₂]²⁺ katyon ve iki sülfametoksazol ligandı arasında molekül içi beş tane (N12—H12B \cdots N3, N12—H12B \cdots N7, N3—H3A \cdots N9, N3—H3B \cdots N12 ve N6—H6A \cdots N9) ve sekiz tane moleküller arası hidrojen bağı vardır (N3—H3B \cdots O2ⁱ, N4—H4A \cdots O5ⁱⁱ, N4—H4B \cdots O2ⁱ, N6—H6B \cdots N11ⁱⁱⁱ, N6—H6B \cdots O6ⁱⁱⁱ, N1—H1A \cdots O5ⁱⁱ, N1—H1B \cdots N11ⁱⁱⁱ ve N8—H8C \cdots N10^{iv}) (Tablo 3). Bu hidrojen bağları R₂¹(6), R₃³(8) ve R₂³(18) sintonları oluşturularak, *b*-yönlerinde 1D zincir oluşturulur (Şekil 2). 1D zincirler aynı H-bağları ile bağlanır. [010] yönünde 1-boyutlu polimerik zincirler ortaya çıkar ve (011) düzleminde 2-boyutlu polimerik levhalar oluşur (Şekil 3). 2B katmanlar, C—H \cdots O hidrojen bağları ile bağlanır ve üç boyutlu bir supramoleküler yapı oluşturur.

Table 3: Zn(II) kompleksinin hidrojen bağı geometrisi

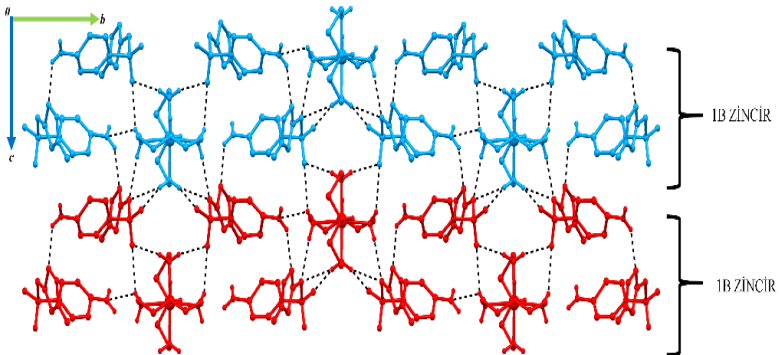
| D-H \cdots A | D-H | H \cdots A | D \cdots A | D-H \cdots A |
|------------------------------------|------|--------------|--------------|----------------|
| N2—H2 \cdots O1W | 0.98 | 2.11 | 3.089 (6) | 174 |
| N12—H12B \cdots N3 | 0.86 | 2.67 | 3.286 (17) | 130 |
| N12—H12B \cdots N7 | 0.86 | 2.46 | 3.028 (16) | 125 |
| N3—H3A \cdots N9 | 0.89 | 2.42 | 3.305 (14) | 173 |
| N3—H3B \cdots N12 | 0.89 | 2.68 | 3.286 (17) | 127 |
| N5—H5 \cdots O3W | 0.98 | 1.84 | 2.798 (17) | 166 |
| N6—H6A \cdots N9 | 0.89 | 2.49 | 3.280 (2) | 148 |
| N3—H3B \cdots O2 ⁱ | 0.89 | 2.63 | 3.250 (15) | 128 |
| N4—H4A \cdots O5 ⁱⁱ | 0.89 | 2.29 | 3.144 (18) | 160 |
| N4—H4B \cdots O2 ⁱ | 0.89 | 2.22 | 3.072 (18) | 161 |
| N6—H6B \cdots N11 ⁱⁱⁱ | 0.89 | 2.46 | 3.260 (2) | 150 |
| N6—H6B \cdots O6 ⁱⁱⁱ | 0.89 | 2.61 | 3.434 (18) | 154 |
| N1—H1A \cdots O5 ⁱⁱ | 0.89 | 2.57 | 3.224 (15) | 132 |
| N1—H1B \cdots N11 ⁱⁱⁱ | 0.89 | 2.42 | 3.309 (16) | 174 |
| N8—H8C \cdots N10 ^{iv} | 0.86 | 2.49 | 3.021 (14) | 121 |

| | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|------------|---------|
| O1W—H1WB···O6 ⁱⁱ | 0.93 (3) | 2.03 (4) | 2.905 (18) | 157 (7) |
| O1W—H1WA···O3 ⁱ | 0.94 (5) | 2.06 (6) | 2.892 (16) | 147 (7) |
| C6—H6D···O6 ⁱⁱⁱ | 0.97 | 2.63 | 3.50 (2) | 150 |
| C8—H8B···O2 ⁱ | 0.97 | 2.62 | 3.315 (19) | 129 |
| C3—H3C···O1W ^v | 0.97 | 2.53 | 3.355 (11) | 144 |
| C3—H3D···N3 | 0.97 | 2.67 | 3.315 (16) | 124 |
| C5—H5B···O5 ⁱⁱ | 0.97 | 2.61 | 3.333 (17) | 131 |
| C2—H2A···N3 | 0.97 | 2.68 | 3.300 (15) | 122 |
| C2—H2A···N7 | 0.97 | 2.56 | 3.282 (15) | 131 |
| C7—H7B···O3 | 0.97 | 2.54 | 3.453 (16) | 157 |

Simetri Kodu: (i) $x,y,z-1$; (ii) $-x+1/2,y+1/2,z-1/2$; (iii) $-x+1/2,y+1/2,z+1/2$; (iv) $x,y,z+1$; (v) $x-1/2,y,-z-1/2$.

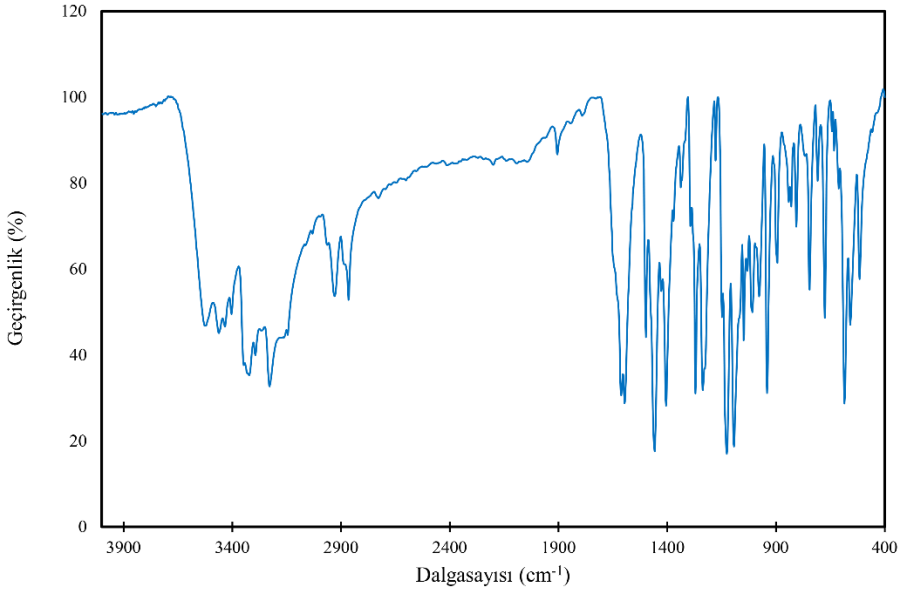


Şekil 2: [010] yönünde $[Zn(dien)_2]^{2+}$ kationu ve iki sülfametoksazol ligandı arasındaki H-bağlarının oluşturduğu 1-boyutlu zincir.



Şekil 3: (011) düzleminde 1-boyutlu zincirler arasında oluşan aynı H-bağları ile bağlanan 2-boyutlu polimerik levhalar.

2.2 FT-IR SPEKTROSKOPİSİ



Şekil 4: Kompleksin deneysel IR spektrumu (mavi çizgi).

3600 ile 3400 cm^{-1} arasındaki soğurma bantları, su ve kristal su moleküllerinin titreşimlerinin karakteristiğidir (Öztürk, Aycan, & Özdemir, 2019). Kompleks için bu değer 3527 cm^{-1} 'de gözlenmiştir. Kompleksin IR spektrumunun yüksek enerji bölgesindeki amino grubunun $\nu_{\text{as}}(\text{NH}_2)$ ve $\nu_{\text{s}}(\text{NH}_2)$ bantları 3463, 3434 ve 3347 cm^{-1} 'de gözlendi (Şekil 4). Koordine olmayan smtx ligandına kıyasla daha yüksek frekanslara (3442 ve 3342 cm^{-1}) kaydığı görülmektedir. Kompleks oluşumundaki amino gruplarının nitrojen atomları ile hidrojen bağı etkileşimlerinden kaynaklanır. Serbest smtx ligandının sülfonamido grubunun (N-H) imido ve amido formlarının titreşim pikleri 3254 ve 3242 cm^{-1} 'de gözlendi. Serbest smtx ligandının 3245 cm^{-1} civarında gözlenen tepe noktası, sülfonamido grubunun NH titreşimine aittir. Bu, kompleksin IR spektrumunda gözlenmeyen bu piklerin kompleks oluşumunda $-\text{SO}_2\text{NH}-$ segmentinin deprotonasyonunu doğrular ve bu, X-ışını analiz sonuçlarıyla tutarlıdır (Hossain, Amoroso, Banu, & Malik, 2007). Serbest *dien* ligandının

NH₂ grubunun asimetric ve simetric modları 3302, 3265, 3238 ve 3185 cm⁻¹ titreşim bantlarında görölmektedir. Bu gruba ait kompleksin titreşimli bantları (3323, 3294 ve 3268 cm⁻¹) serbest hallerine göre daha yüksek frekanslarda görölmektedir. Kompleks oluşumunda NH₂'nin smtx anyonları ile hidrojen bağı etkileşiminden kaynaklanır (Curtis & Powell, 1968).

İzoksazol halkasının C=N bağıının titreşim tepe noktası da 1499 cm⁻¹'de gözlendi. 1504 cm⁻¹'de serbest halde gözlenen bu değerin düşük frekansa kaydığı gözlendi. Ayrıca serbest forma göre C=N bağı uzunluğunun arttığı ve C-N bağıının kısaldığı gözlendi. Bunun, metale koordineli *dien* ligandının nitrojen atomu ile sülfonamid kısmının protonu giderilmiş NH grubunun hidrojen bağı etkileşimlerinden kaynaklandığı düşünölmektedir (Chamundeeswari, Samuel, & Sundaraganesan, 2014). Komplekste, izoksazol halkasının C=C gerilmesi 1596 cm⁻¹ gözlenmiştir. Serbest forma göre düşük bir frekansa kaydığı gözlemlendi.

-SO₂ grubunun serbest smtx'teki asimetric ve simetric gerilme titreşimleri 1326 cm⁻¹ ve 1127 cm⁻¹'de gözlendi. Komplekste -SO₂ grubunun simetric ve asimetric gerilme titreşimleri 1317 cm⁻¹ ve 1326 cm⁻¹'de gözlenmiştir. Ölçekli teorik hesaplamalar sonucunda 1325 cm⁻¹ ve 1125 cm⁻¹'de SO₂ gerilme modları elde edilmiştir. Tüm bu sonuçların literatürle uyumlu olduğu görölmüştür (Pindiga, Zulqiflu, Adamu, & Usman Hamidu; Souza, 2013). IR spektrumunda 456 cm⁻¹'de gözlenen yeni bant, M-N titreşiminden kaynaklanmaktadır (Silverstein, Webster, & Kiemle, 2005).

2.3 EPR Spektroskopisi

Bakır (II) katkılı [Zn(*dien*)₂].2(smtx).2H₂O tek kristal için, karşılıklı üç eksen 10° aralıklarla açısai değişimi için EPR spektrumları alındı. Cu²⁺ iyonunun EPR spektrumu, bakırın elektron spinini S=1/2 ile nükleer spin I=3/2'nin etkileşiminden kaynaklanarak dört yarıma oluşur. Manyetik alanın a*b düzleminde elde edilen spektrum Şekil 5' te görölmektedir. Şekil 6a ve 6b ise sırasıyla oda sıcaklığında ve 77 K'da kaydedilen toz spektrumlarını göstermektedir. Bununla birlikte,

aşırı ince yapı nedeniyle yarıлма parametreleri çok küçük olduğundan, diğer eksenlerde yarıлма gözlenmemiştir. Bu durum tek kristal spektrum analizine olanak vermedi. Tek kristalden elde edilen spektrumlar, bu eksenlerde Şekil 6a'da verilen toz spektrumu ile benzerdir.

Toz spektrumundan $g_{xx} = 2.196$, $g_{yy} = 2.137$, $g_{zz} = 2.334$ ve $A_{xx} = 25$ G, $A_{yy} = 15$ G, $A_{zz} = 163.33$ G have hesaplandı. Elde edilen değerlerden $g_{xx} \neq g_{yy} \neq g_{zz}$ and $A_{xx} \neq A_{yy} \neq A_{zz}$ olarak hesaplandı. Bu değerler Cu^{2+} iyonunun yerel simetrisinin bozulmuş rombik simetriye sahip olduğunu göstermektedir. Buna göre, spektrum rombik simetrisinin spin-Hamiltoniyeni aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mathcal{H} = \beta_e (g_{xx} B_x S_x + g_{yy} B_y S_y + g_{zz} B_z S_z) + A_{xx} S_x I_x + A_{yy} S_y I_y + A_{zz} S_z I_z$$

Oktahedral kristal alandan tetragonala bozulmuş kompleksin, Cu^{2+} iyonunun taban durumu, oktahedral çevrenin z eksenini boyunca uzaması veya sıkıştırılmasına bağlı olarak tetragonal bozulduğunda $|3z^2 - r^2\rangle$ ya da $|x^2 - y^2\rangle$ durumlarına ayrılır (Rao & Narayana, 1981). Taban durum bu iki durumun karışımından oluşur. Bu nedenle Cu^{2+} iyonunun taban durum dalga fonksiyonu şu şekilde yazılabilir:

$$\psi = \alpha' [\alpha |x^2 - y^2\rangle + \beta |z^2\rangle]$$

burada α' , Cu^{2+} iyonunun d orbitalinde eşleşmemiş elektronun bulma olasılığı olan kovalentlik parametresidir. α ve β , $|3z^2 - r^2\rangle$ and $|x^2 - y^2\rangle$ orbitallerinin $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ normalleştirme koşulunu sağlayan katsayılarıdır. Verilen dalga fonksiyonu için, Cu^{2+} iyonunun g değerlerine birinci dereceden katkıları:

$$g_{xx} = g_e + 2\alpha'^2 \frac{\lambda(\alpha + \sqrt{3}\beta)^2}{\Delta_{yz}} \quad g_{yy} = g_e + 2\alpha'^2 \frac{\lambda(\alpha - \sqrt{3}\beta)^2}{\Delta_{xz}}$$

$$g_{zz} = g_e + 8\alpha'^2 \frac{\alpha^2 \lambda}{\Delta_{xy}}$$

Δ_{xy} , Δ_{xz} ve Δ_{yz} sırasıyla $|xy\rangle$, $|xz\rangle$ ve $|yz\rangle$ durumlarının taban duruma göre enerji dağılımıdır; serbest elektron g değeri $g_e = 2.0023$; λ (-828 cm^{-1}), Cu^{2+} iyonunun spin-yörünge eşleşme sabitidir. Bu denklemler α'^2 , α ve β parametrelerini elde etmek için aşağıdaki hiperfine değerlerinden de yararlanılmalıdır:

$$A_{xx} = P \left[-K + \frac{2\alpha'[(\alpha^2 + \beta^2) - 2\sqrt{3}\alpha\beta]}{7} (g_{xx} - g_e) - \frac{1}{14} \left(\frac{3\alpha + \sqrt{3}\beta}{\alpha - \sqrt{3}\beta} \right) (g_{yy} - g_e) + \frac{\sqrt{3}\beta}{14\alpha} (g_{zz} - g_e) \right]$$

$$A_{yy} = P \left[-K + \frac{2\alpha'[(\alpha^2 + \beta^2) + 2\sqrt{3}\alpha\beta]}{7} (g_{yy} - g_e) - \frac{1}{14} \left(\frac{3\alpha - \sqrt{3}\beta}{\alpha + \sqrt{3}\beta} \right) (g_{xx} - g_e) - \frac{\sqrt{3}\beta}{14\alpha} (g_{zz} - g_e) \right]$$

$$A_{zz} = P \left[-K + \frac{4\alpha'(\alpha^2 + \beta^2)}{7} (g_{zz} - g_e) - \frac{1}{14} \left(\frac{3\alpha - \sqrt{3}\beta}{\alpha + \sqrt{3}\beta} \right) (g_{xx} - g_e) + \frac{1}{14} \left(\frac{3\alpha - \sqrt{3}\beta}{\alpha + \sqrt{3}\beta} \right) (g_{yy} - g_e) \right]$$

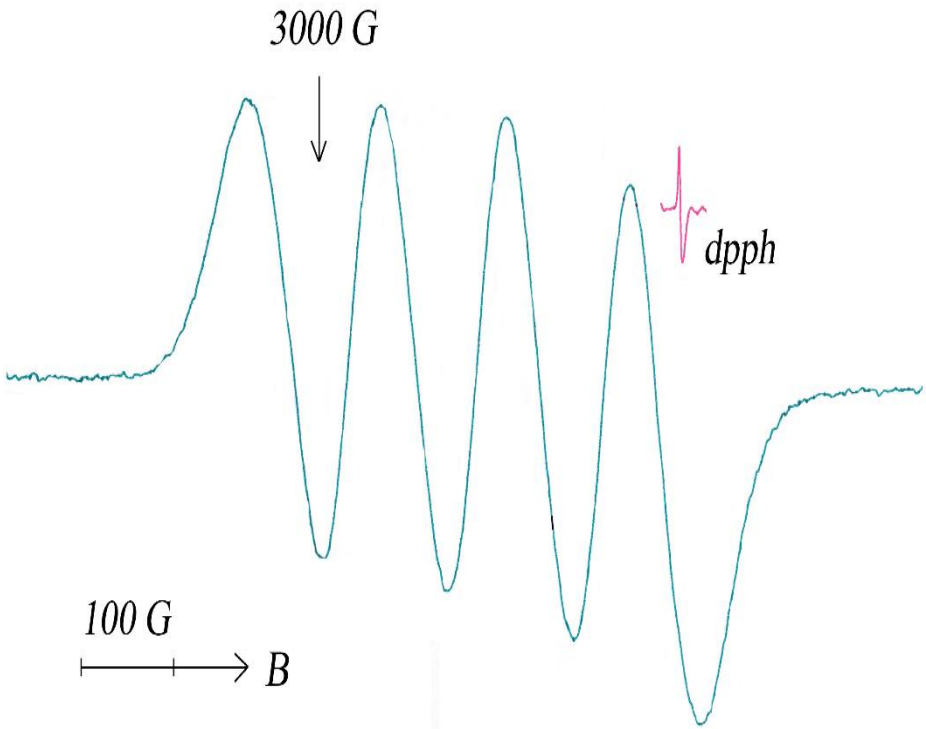
K spin polarizasyonu ve $P = \alpha'P_0$ metal iyonu için dipolar etkileşim parametresi, P_0 serbest iyon değerleridir, $^{63}\text{Cu}^{2+}$ isotopu için $416 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$. Toz spektrumunun hesaplanan parametreleri Tablo 4'te verilmiştir. Taban durum dalga fonksiyonu deneysel değerler kullanılarak elde edilir.

$$\psi = \sqrt{0.835}[0.998|x^2 - y^2\rangle + 0.058|z^2\rangle]$$

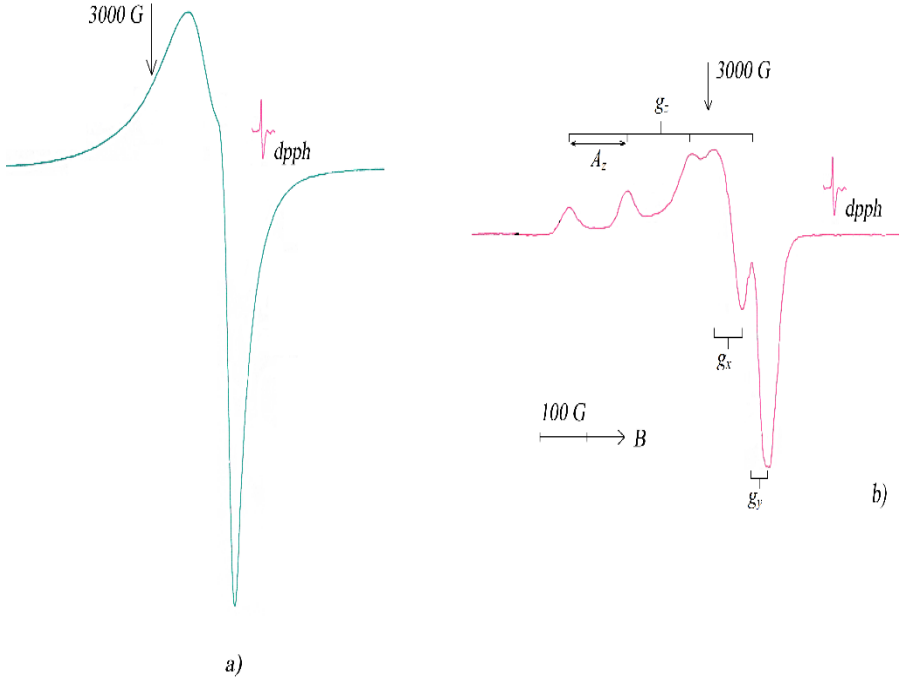
Kovalentlik parametresi α'^2 yaklaşık olarak 0,835 değerine elde edildi. Bu da eşleşmemiş elektronun zamanının %83,5'ini Cu^{2+} iyonunun d orbitallerinde, geri kalan sürenin ise ligand orbitallerinde geçirdiği söylenir.

Tablo 4: $[\text{Zn}(\text{dien})_2] \cdot 2(\text{smtx}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ için EPR ve moleküler orbital parametreleri

| g_{xx} | g_{yy} | g_{zz} | A_{xx} | A_{yy} | A_{zz} | α'^2 | α^2 | β^2 | K |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|------------|-----------|-------|
| 2.196 | 2.137 | 2.334 | 25 G | 15 G | 163.3 G | 0.835 | 0.996 | 0.0034 | 0.506 |



Şekil 5: Manyetik alan için Cu^{2+} iyon katkılı $[\text{Zn}(\text{dien})_2] \cdot 2(\text{smtx}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ tek kristalinin EPR spektrumu a*b düzleminde.



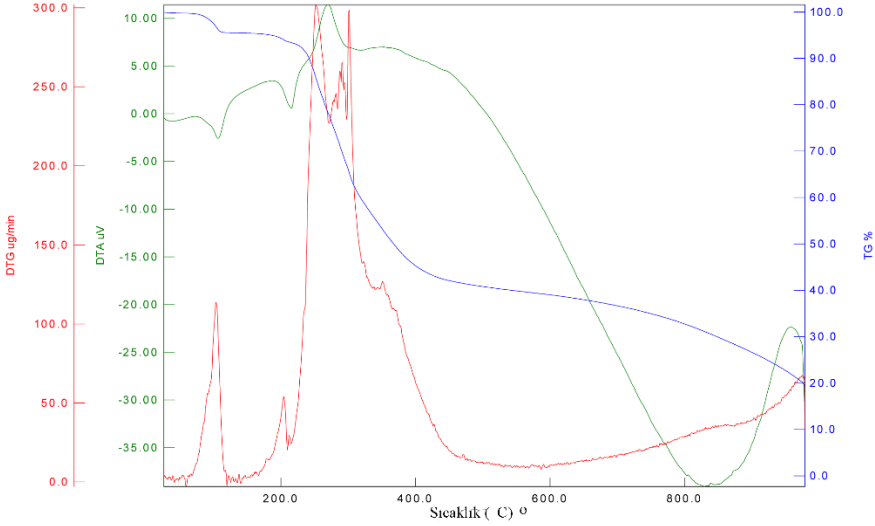
Şekil 6: Toz spektrumu a) oda sıcaklığında b) 77K'da DMF çözeltisinde.

2.4. Termogravimetrik Analiz

Zn(II) kompleksinin TGA eğrileri Şekil 7'de verilmiştir. İlk aşamada koordine olmayan iki su molekülü 25-154 °C sıcaklık aralığında bozunmuştur.

İkinci adımda 154-504 °C sıcaklık aralığında iki smtx molekülünün ayrışması (hesaplanan: %62.12; den.: %61.90) gerçekleşmiştir. Son aşamada kütle kaybı deneysel olarak %13.50 ve hesaplamalı olarak %12.70 bulunmuştur.

Bu kayıp, dien ligandına karşılık gelir. Son tortu, Zn(dien) olarak kalmıştır (deney: %20.00; hesaplanan: %20.75).



Şekil 7: Kompleksin termal analiz eğrileri (TG: mavi, DTG: kırmızı, DTA: yeşil).

2.5 Minimum İnhibisyon Konsantrasyonları (MIC)

Tablo 5. MIC ($\mu\text{g/ml}$) konsantrasyonu olarak belirlenen kompleksin antimikrobiyal aktivitesi

| Mikro- organizmalar | <i>B.</i> <i>subtilis</i> | <i>E.</i> <i>coli</i> | <i>K.</i> <i>pneumoniae</i> | <i>P.</i> <i>aeruginosa</i> | <i>S.</i> <i>aureus</i> | <i>C.</i> <i>albicans</i> |
|------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Kompleks | 300 | 200 | 200 | 200 | 200 | 300 |
| Sulfametaksazol | >500 | 300 | 300 | >500 | 500 | 300 |

Günümüzde antibiyotiklerin yanlış ya da fazla kullanımı dirençli mikroorganizmaların ortaya çıkmasına neden olmuş. Bu nedenle yeni antimikrobiyallerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Sülfametoksazolün trimetoprim ile kombinasyonu, bronşit, prostatit, Pneumocystis jirovecii ve idrar yolu enfeksiyonları için en sık reçete edilen antibiyotiklerden biridir (Osovole, Wakil, & Alao, 2015). Sülfametoksazol, bakterilerin metabolik süreci için gerekli olan tetrahidrofolik asidin biyosentezinde p-aminobenzoik asit (PABA) ile etkileşerek bakteriyel büyümeyi inhibe eder (Yasmin, Al-Maqtari, & Al-Qadasi, 2017). Bu çalışmada, sülfametoksazolden sentezlenen kompleksin antimikrobiyal aktivitesi incelenmiştir. İn vitro tarama sonuçlarımız, yeni sentezlenen kompleksin *S. aureus* (200 $\mu\text{g/ml}$), *K.*

pneumoniae (200 µg/ml), E. coli (200 µg/ml), B. subtilis (300 µg/ml)'ye karşı antibakteriyel aktivite sergilediğini gösterdi. µg/ml), P. aeruginosa (200 µg/ml) (Tablo 5). Ayrıca kompleks Candida albicans'a (300 ug/ml) karşı antifungal aktivite de göstermiştir.

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada tek kristal XRD ile $[Zn(dien)_2].2(smtx).2H_2O$ kompleksi sentezlenmiş ve yapısı aydınlatılmıştır. Kristal yapı, ortorombik uzay grubu $Pn2_1a$ 'da kristalleştirildi.

Başlık kompleksinin asimetrik biriminde çinko geçiş metaline bağlı iki dietilentriamin (dien) ligandı, iki sülfametoksazol (smtx) ligandı ve iki kafes su molekülü bulunur.

Zn(II)-smtx kompleksi öncelikle IR, EPR spektroskopisi ve termal analiz ile incelenmiştir.

Kompleksin antimikrobiyal özelliklere sahip olup olmadığını görmek için antimikrobiyal analiz yapıldı ve ardından XRD ile yapı aydınlatıldı. Bakır katkılı $[Zn(dien)_2].2(smtx).2H_2O$ kompleksi, oda sıcaklığında ve sıvı nitrojen sıcaklığında (77 K) EPR spektroskopisi ile incelenmiştir.

EPR sonucuna göre elde edilen g değerleri yerel simetrisinin eşkenar dörtgen olduğunu göstermektedir. Bakır(II) katkılı kompleksin bozuk bir oktahedral geometriye sahip olduğu gösterilmiştir. Kompleksin mikro dilüsyon kullanılarak P. aeruginosa, E. coli, C. albicans, S. aureus, B. subtilis ve A. flavus'a karşı antimikrobiyal aktivite çalışmaları incelenmiştir.

Sentezlenen bileşiğin antimikrobiyal aktivite çalışması, mikro dilüsyon kullanılarak S. aureus, B. subtilis, K. pneumoniae, E. coli, B. subtilis ve P. aeruginosa'ya karşı antibakteriyel aktivite göstermiştir.

Kompleksin Candida albicans'a karşı önemli bir antifungal aktiviteye sahip olduğu belirlendi.

KAYNAKÇA

- Al-Khodir, F. A. (2015). Ca (II), Zn (II) and Au (III) sulfamethoxazole sulfa-drug complexes: Synthesis, spectroscopic and anticancer evaluation studies. *Oriental journal of chemistry*, 31(3), 1277-1285.
- Bellu, S., Hure, E., Trapé, M., Trossero, C., Molina, G., Drogo, C., . . . Zacchino, S. (2005). Synthesis, structure and antifungal properties of Co (II)–sulfathiazolate complexes. *Polyhedron*, 24(4), 501-509.
- Bhattacharjee, M. K. (2016). Antimetabolites: antibiotics that inhibit nucleotide synthesis. In *Chemistry of Antibiotics and Related Drugs* (pp. 95-108): Springer.
- Bogialli, S., Curini, R., Di Corcia, A., Nazzari, M., & Samperi, R. (2003). A liquid chromatography– mass spectrometry assay for analyzing sulfonamide antibacterials in cattle and fish muscle tissues. *Analytical Chemistry*, 75(8), 1798-1804.
- Bouchoucha, A., Terbouche, A., Zaouani, M., Derridj, F., & Djebbar, S. (2013). Iron and nickel complexes with heterocyclic ligands: Stability, synthesis, spectral characterization, antimicrobial activity, acute and subacute toxicity. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 27(3), 191-202.
- Burla, M., Caliandro, R., Camalli, M., Carrozzini, B., Cascarano, G., De Caro, L., . . . Spagna, R. (2005). SIR2004, A program for automatic solution and refinement of crystal structures. *J. Appl. Crystallogr*, 38, 381.
- Butcher, R. J., Muratore, N., & Purdy, A. P. (2006). mer-Bis(diethylenetriamine)zinc(II) dichloride. *Acta Crystallographica Section E*, 62(7), m1562-m1564. doi:doi:10.1107/S1600536806019581
- Chamundeeswari, S. V., Samuel, E. J. J., & Sundaraganesan, N. (2014). Molecular structure, vibrational spectra, NMR and UV spectral analysis of sulfamethoxazole. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 118, 1-10.
- Chohan, Z. H., Mahmood-ul-Hassan, Khan, K. M., & Supuran, C. T. (2005). In-vitro antibacterial, antifungal and cytotoxic

- properties of sulfonamide—derived Schiff's bases and their metal complexes. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 20(2), 183-188.
- Curtis, N., & Powell, H. (1968). Some complexes of diethylenetriamine with nickel (II), copper (II), and zinc (II). *Journal of the Chemical Society A: Inorganic, Physical, Theoretical*, 3069-3073.
- Das, D., Sahu, N., Roy, S., Dutta, P., Mondal, S., Torres, E. L., & Sinha, C. (2015). The crystal structure of sulfamethoxazole, interaction with DNA, DFT calculation, and molecular docking studies. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 137, 560-568.
- David, A., Thomas, L., & Lemke, F. s. (1995). Principles of Medicinal Chemistry. In: Lippincott Williams and Wilkins Publication.
- Eloff, J. N. (1998). A sensitive and quick microplate method to determine the minimal inhibitory concentration of plant extracts for bacteria. *Planta medica*, 64(08), 711-713.
- Farrugia, L. J. (2012). WinGX and ORTEP for Windows: an update. *Journal of Applied Crystallography*, 45(4), 849-854.
- Gennaro, A. R. (2003). *Remington farmacia*: Ed. Médica Panamericana.
- Hossain, G. G., Amoroso, A., Banu, A., & Malik, K. (2007). Syntheses and characterisation of mercury complexes of sulfadiazine, sulfamerazine and sulfamethazine. *Polyhedron*, 26(5), 967-974.
- Huang, Z., Lin, Z., & Huang, J. (2001). A novel kind of antitumour drugs using sulfonamide as parent compound. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 36(11-12), 863-872.
- Kesimli, B., & Topaçli, A. (2001). Infrared studies on Co and Cd complexes of sulfamethoxazole. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 57(5), 1031-1036.
- Kremer, E., Fachin, G., Estévez, E., Alborés, P., Baran, E., Ellena, J., & Torre, M. (2006). Copper complexes with heterocyclic sulfonamides: Synthesis, spectroscopic characterization, microbiological and SOD-like activities: Crystal structure of

[Cu (sulfisoxazole) 2 (H₂O) 4]· 2H₂O. *Journal of inorganic biochemistry*, 100(7), 1167-1175.

- Lai, K., Zhai, F., Zhang, Y., Wang, X., Rasco, B. A., & Huang, Y. (2011). Application of surface enhanced Raman spectroscopy for analyses of restricted sulfa drugs. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 5(3-4), 91-96.
- Li, N., Zhang, Y.-H., Wu, Y.-N., Xiong, X.-L., & Zhang, Y.-H. (2005). Inclusion complex of trimethoprim with β -cyclodextrin. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, 39(3-4), 824-829.
- Macrae, C. F., Edgington, P. R., McCabe, P., Pidcock, E., Shields, G. P., Taylor, R., . . . Streek, J. V. D. (2006). Mercury: visualization and analysis of crystal structures. *Journal of Applied Crystallography*, 39(3), 453-457.
- Msagati, T. A., & Nindi, M. M. (2004). Multiresidue determination of sulfonamides in a variety of biological matrices by supported liquid membrane with high pressure liquid chromatography-electrospray mass spectrometry detection. *Talanta*, 64(1), 87-100.
- Ong, W., Sievers, A., & Leslie, D. E. (2010). Mycobacterium tuberculosis and sulfamethoxazole susceptibility. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 54(6), 2748-2749.
- Osowole, A. A., Wakil, S. M., & Alao, O. K. (2015). Synthesis, characterization and antimicrobial activity of some mixed Trimethoprim-Sulfamethoxazole metal drug complexes. *World Applied Sciences Journal*, 33(2), 336-342.
- Öztürk, F., Aycan, T., & Çon, A. H. (2020). Spectroscopic, structural characterization and magnetic studies of Cu(II)-sulfathiazole complex with 1,10-Phenanthroline and N-(2-hydroxyethyl)-Ethylenediamine ligands. *Journal of Molecular Structure*, 1202, 127220. doi:<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127220>
- Öztürk, F., Aycan, T., & Özdemir, N. (2019). Cu (II)-sulfamethazine complex with N-(2-hydroxyethyl)-ethylenediamine: synthesis, spectroscopic, structural characterization and antimicrobial activity. *Journal of Coordination Chemistry*, 72(19-21), 3359-3370.

- Pindiga, N. Y., Zulqiflu, A., Adamu, U. A., & Usman Hamidu, Y. M. Synthesis, Characterization and Studies Antibacterial Activity of Iron and Zinc Metal Complexes derived from Sulfamethoxazole.
- Rao, T. B., & Narayana, M. (1981). A QUANTITATIVE ESTIMATION OF THE ADMIXTURE IN THE GROUND-STATE WAVEFUNCTION OF CU-2+ IN LOW-SYMMETRY CRYSTAL FIELDS. *PHYSICA STATUS SOLIDI B-BASIC RESEARCH*, 106(2), 601-606.
- Reynolds, J. E. (1982). *Martindale: the extra pharmacopoeia*: London, UK; The Pharmaceutical Press.
- Sheldrick, G. (2018). SHELXS version-2018/3 and SHELXL version-2018/3: programs for crystal structure solution and refinement. *University of Gottingen, Germany*.
- Silverstein, R. M., Webster, F. X., & Kiemle, D. (2005). *Spectrometric Identification of Organic Compounds, 7th Edition*: Wiley.
- Souza, P. C. d. (2013). Atividade anti-Mycobacterium tuberculosis intra e extra celular e citotoxicidade dos complexos de coordenação de metais.
- Stoe, C. (2002). X-Area (Version 1.18) and X-RED (Version 1.04). *Stoe & Cie, Darmstadt, Germany*.
- Supuran, C. T., Scozzafava, A., & Conway, J. (2004). *Carbonic anhydrase: its inhibitors and activators* (Vol. 1): CRC press.
- Sweetman, S. C. (2007). *Martindale: guía completa de consulta farmacoterapéutica: endocrinología*: Pharma.
- Takasuka, M., & Nakai, H. (2001). IR and Raman spectral and X-ray structural studies of polymorphic forms of sulfamethoxazole. *Vibrational Spectroscopy*, 25(2), 197-204.
- Tracey, A. S., & Crans, D. C. (1998). *Vanadium compounds: chemistry, biochemistry, and therapeutic applications*: ACS Publications.
- Wolff, M. E. (1996). Burger's medicinal chemistry and drug discovery. *American Journal of Therapeutics*, 3(8), 608.
- Yasmin, M., Al-Maqtari, M. A., & Al-Qadasi, M. K. (2017). Ligational and spectroscopic on some sulfamethoxazole metal complexes

as antimicrobial agents. *Eur. J. pharmaceutical Med. Res.*, 4(7), 95-105.

BÖLÜM 2

KONTROLLÜ KATILAŞTIRILAN Al-Cu-Fe ALAŞIMLARINDA Fe İLAVESİNİN VE SOĞUMA HIZININ ROLÜ

Dr. Sevda ENGİN¹

Prof. Dr. Uğur BÜYÜK²

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Konya, Türkiye
ORCID: ID/0000-0001-8746-8770. sengin@ktun.edu.tr, 0507 3828827

² Erciyes Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Kayseri, Türkiye
ORCID: ID/0000-0002-6830-8349. buyuk@erciyes.edu.tr , 0555 4465405

1. GİRİŞ

Alüminyum yeryüzünde bulunan en yaygın element olup üretimi demirden sonra ikinci sırada yer almaktadır [1-2]. Saf haldeki alüminyumun endüstride kullanımı için gereken mekanik özelliklere sahip olmaması nedeniyle başta Si olmak üzere farklı elementlerle (Cu, Mg, Zn, Ti, B, Sr, Mn, Fe) alaşım oluşturulmaktadır. Böylece alaşımlama elementleriyle birlikte kullanımı alüminyumun ürün yelpazesini genişletmiş ve üretim kapasitesini artırarak son 50 yıldır demir-çelikten sonra endüstriyel alanlarda en çok kullanılan metal olmuştur [3]. Özellikle yüksek mukavemet gerektiren havacılık ve savunma sektöründe Al-Cu alaşımları kullanımı oldukça yaygındır. Bununla birlikte alüminyum ile kararlı yapıda, fakat alaşım içinde kırılğan yapıya sahip intermetalikler oluşturan Fe elementi mekanik özelliklere katkı sağlarken alaşımın sünekliğini azaltıp korozyon dayanımını düşürmektedir [3].

Alaşımın mekanik özelliklerini iyileştirmek için alaşımlama, ısıtıl işlem ve tane inceltme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden tane inceltme, Bridgman tipi fırın vasıtasıyla kontrollü katılaştırma tekniği ile yaygın kullanılan bir süreçtir. Kontrollü katılaştırma süresinde alaşımın bileşimi (C_0), soğuma hızı (büyütme veya katılaştırma hızı (V)) ve sıcaklık gradyentinin (G) birbirinden bağımsız olarak değişimlerinin kontrol edilebildiği bir tekniktir [4-24].

Bu çalışmada, Al-%26.5Cu-%1Fe ve Al-%26.5Cu-%1.5Fe (ağ.) alaşımları için beş farklı soğuma hızlarında (8.25, 16.60, 41.65, 90.05, 164.80 $\mu\text{m/s}$) ve sabit sıcaklık gradyentinde ($G=8.5$ K/mm) kontrollü katılaştırma deneyleri yapılması amaçlanmıştır. Böylece Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe alaşımları için Fe ilavesinin ve soğuma hızlarının, numunelerin maksimum çekme-dayanım (σ_{uts}) ve mikrosertlik (HV) değerlerine etkisi belirlenecektir. Soğutma hızı, maksimum çekme-dayanım ve mikrosertlik değerleri arasındaki ilişkiler hem Hall-Petch tipi bağıntılarla hem de lineer regresyon analizi ile ortaya çıkarılması planlanmıştır.

2. DENEYSEL SÜREÇ

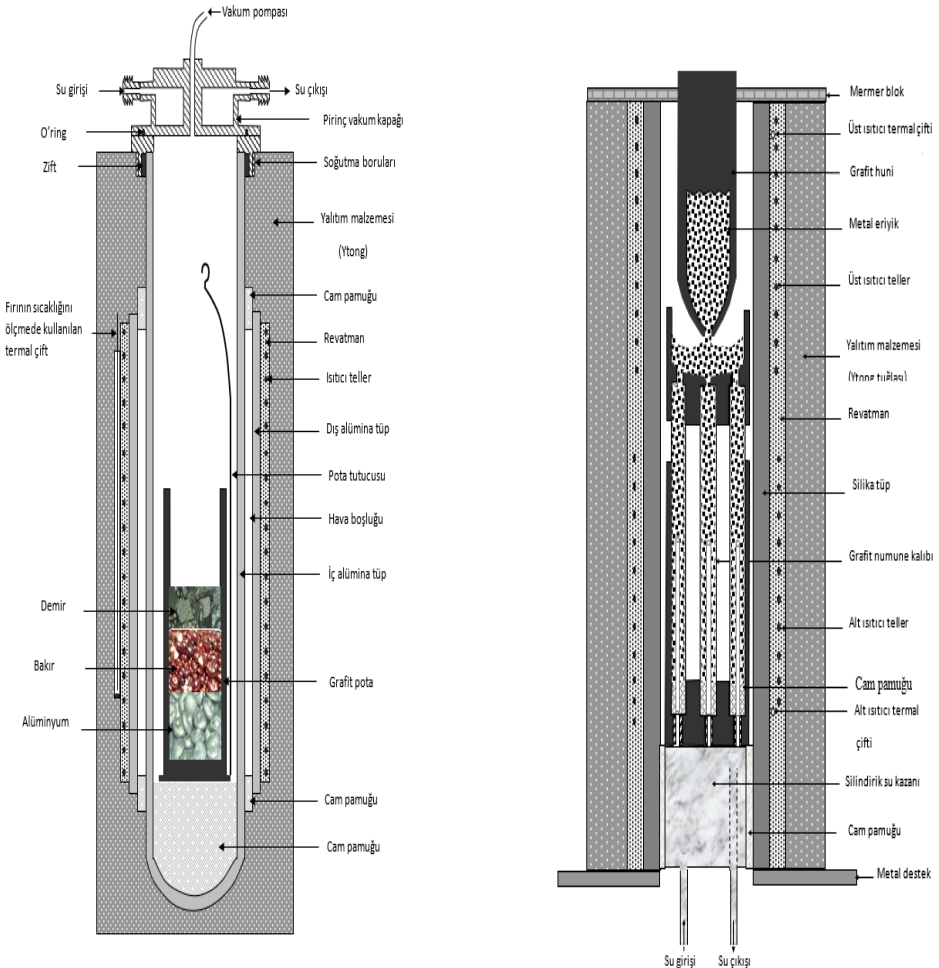
2.1. Alaşım Hazırlama, Doğrusal Katılaştırma ve Metalografik İşlemler

Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe alaşımlarını oluşturabilmek için elementlerin kütlece miktarları hesaplanmıştır. %99.99 saflıktaki alüminyum, bakır ve %99.97 saflıktaki demir elementlerinin hesaplanan kütle miktarları hassas terazi ile tartılmıştır. Saf haldeki miktarları belirlenen elementlerin oksitlenmeden homojen alaşım oluşturabilmesi için Şekil 1a'da verilen vakumlu eritme fırını kullanılmıştır. Vakumlu eritme fırını içinde alaşımı oluşturmak için yüksek sıcaklıklara dayanabilen ve metallerle tepkime göstermeyen grafit pota tercih edilmiştir. Alaşımın erime sıcaklığının yaklaşık 50-100 °C üzerinde ayarlanan vakumlu eritme fırını içerisindeki grafit potaya erime sıcaklığı en düşük element ilk sırada olacak şekilde sırayla ilave edilerek saf metaller eritilmiş ve belirli zaman aralıklarında eriyik haldeki elementler karıştırılarak homojen alaşım oluşturulmuştur.

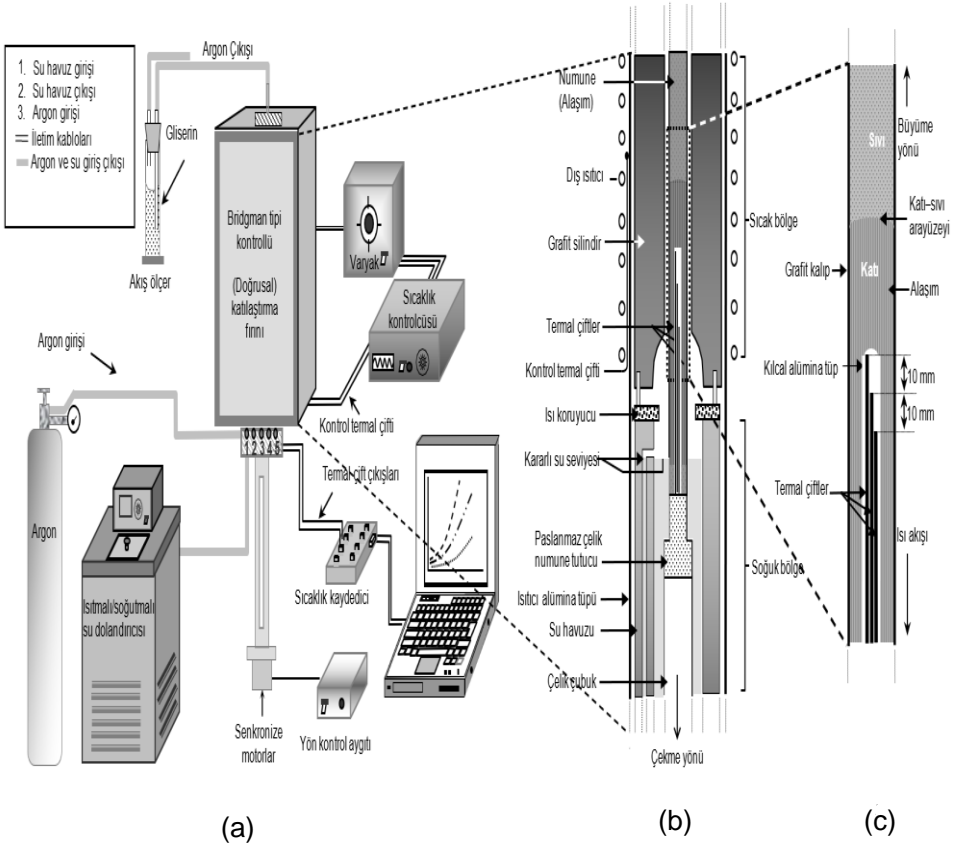
Şematik gösterimi Şekil 1b'de verilen döküm fırını içindeki grafitten yapılmış 6.35 mm dış çapa ve 4 mm iç çapa sahip 200 mm uzunluğunda 15 adet silindir şeklindeki numune kalıpları homojen alaşımın oluşturulmasıyla eş zamanlı olarak alaşımın erime sıcaklığının yaklaşık 50-100°C üzerinde ısıtılmıştır. Her bir alaşım için numune kalıplarından 7 tanesinin içine sıcaklık gradyentini ve soğuma hızını ölçmek için tek ucu kapalı alümina tüpler yerleştirilmiştir. Her bir bileşen için ayrı ayrı homojen olarak hazırlanan alaşım, döküm fırını vasıtasıyla içinde hava boşluğu kalmayacak şekilde numune kalıpları içerisine tamamen doldurulmuştur.

Şematik gösterimi Şekil 2'de verilen ridgman tipi fırın içine yerleştirilmiş alaşım ile doldurulmuş numune kalıplarının her biri beş farklı soğuma hızlarında ($V=8.25-164.80 \mu\text{m/s}$) ve sabit sıcaklık gradyentinde ($G=8.5 \text{ K/mm}$) tek yönlü kontrollü katılaştırılmıştır. Kontrollü katılaştırma esnasında numune üzerinde sabit sıcaklık gradyentini sağlayabilmek için yaklaşık 2 saat Bridgman tipi fırın

içinde numune denge halinde bekletilmiştir. Numune üzerindeki sıcaklık gradyentini ve soğuma hızını ölçmek için Bridgman tipi fırın içine yerleştirilirken numune içindeki alümina tüpe 10 mm aralıklarla K-tipi 0.25 mm çaplı üç termal çift yerleştirilmiştir (Şekil 2c). Yeterli süre denge halinde bekletilen numune senkronize motorlar vasıtasıyla farklı soğuma hızlarında kontrollü katılaştırmayı gerçekleştirmek üzere Şekil 2b’de tanımlanan sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru çekilmiştir. Şekil 2b’de tanımlanan soğuk bölgeyi oluşturmak için sıcaklığı 5°C ’de sabit tutulmuş sirkülator kullanılmıştır.



Şekil 1. (a) Vakumlu eritme fırınının şematik gösterimi, (b) döküm fırınının şematik gösterimi.



Şekil 2. (a) Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırınının şematik gösterimi, (b) fırının iç yapısı, sıcak ve soğuk bölgeleri, (c) numune kalıbı.

Bridgman tipi fırın vasıtasıyla yaklaşık 100-120 mm kontrollü katılaşması sağlanan her bir numune ani soğutma (quench) işlemi için çok hızlı bir şekilde senkronize motordan bağımsız olarak sıcak bölgeden soğuk bölgeye çekilmiştir. Böylece kontrollü katılaştırma deneyleri yapılan her bir numune üzerindeki grafit kalıp dikkatli bir şekilde çıkarılarak numuneler metalografik işlemlere hazır hale getirilmiştir.

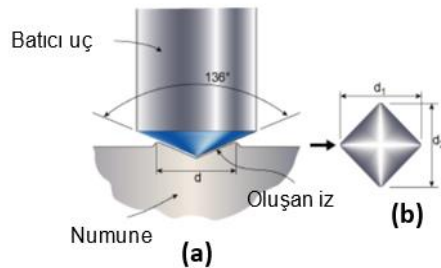
2.2. Katılaştırma Parametrelerinin Ölçümü

Şekil 2c’de tanımlandığı gibi Bridgman tipi fırında numune içindeki K–tipi 0.25 mm çapındaki üç termal çiftten alınan verilerle numunelerin soğuma hızı ve sıcaklık gradyenti belirlenmiştir. Soğuma hızı ($V=\Delta X/\Delta t$) ve sıvı fazın sıcaklık gradyenti ($G=\Delta T/\Delta X$) ΔX , ΔT ve Δt değerlerinin belirlenmesiyle her bir numune için hesaplanmıştır. ΔX , ΔT ve Δt değerleri sırasıyla termal çiftler arası mesafe, termal çiftlerin ölçtüğü sıcaklık ve katı–sıvı arayüzeyinin iki termal çift aralığını tamamlama süresi olarak tanımlanmıştır.

2.3. Mikrosertlik ve Maksimum Çekme–Dayanım Değerinin Ölçülmesi

Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe alaşımlarının kontrollü katılaştırılması ve metalografi işlemlerini tamandıktan sonra 10 s süreyle 500 g’lık yükün numune üzerine uygulanmasıyla meydana gelen 40–60 μm ’lik şematik gösterimi Şekil 3’te verilen iz yardımıyla her bir numunenin mikrosertlik değeri ölçülmüştür. Ölçüm güvenilirliğini sağlamak için bu işlem 10 defa tekrarlanarak ortalama sonuç dikkate alınmıştır.

Ayrıca beş farklı soğuma hızında kontrollü katılaştırılan Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe bileşenlerde 50 mm uzunluğunda ve 4 mm çapında hazırlanan numuneler için maksimum çekme–dayanım değerleri 10^{-3} s gerilim uygulanarak belirlenmiştir.



Şekil 3. (a) Vickers sertlik ölçüm cihazı şematik gösterimi (b) Vickers sertlik ölçüm cihazının numune üzerinde oluşturduğu iz.

3. SONUÇ VE TARTIŞMA

3.1. Fe Katkısının ve Soğuma Hızının Mikrosertlik ve Çekme-Dayanıma Etkisi

Soğuma hızı ve mikrosertlik arasındaki ilişki lineer regresyon analiziyle aşağıdaki şekilde belirtilmektedir:

$$HV = k_1 V^{n_1}$$

Burada k_1 denklemin sabiti olup n_1 ise soğuma hızının üstel değeri olarak tanımlanmıştır.

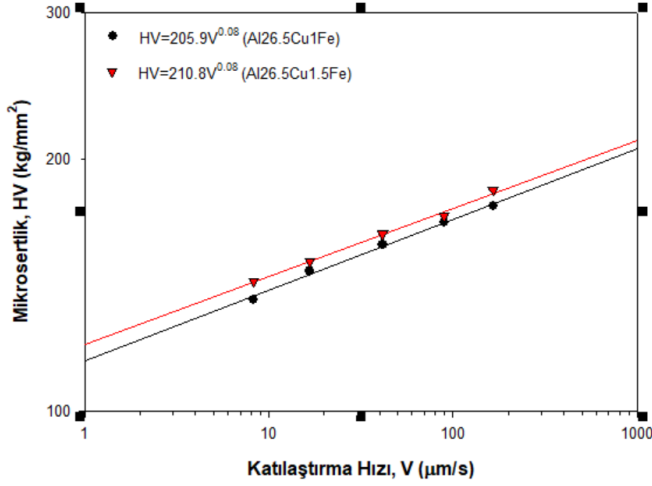
Şekil 4'te Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe bileşenleri için soğuma hızına bağlı olarak mikrosertlik değerinin logaritmik değişim grafiği ve lineer regresyon bağıntısı verilmiştir.

Tablo 1'de benzer şartlar altında kontrollü katılaştırılmış alüminyum esaslı farklı alaşımların mikrosertlik değerlerinin soğuma hızına bağlı lineer regresyon analizleri verilmiştir.

Tablo 1'de verilen lineer regresyon bağıntılarının soğuma hızına bağlı üstel değerleri 0.03 ile 0.10 aralığında değişmekte olup bu çalışma kapsamında Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe bileşenleri için elde edilen 0.08 değerleri ile uyum içerisindedir.

Hem alaşım içerisindeki Fe miktarının artmasıyla hem de soğuma hızının artmasıyla mikrosertlik değerinin arttığı Şekil 4'te verilen grafikten anlaşılmaktadır.

Soğuma hızı yaklaşık 20 kat artırılmasına rağmen mikrosertlik değerleri her iki bileşen için yaklaşık 1.3 kat artmıştır.



Şekil 4. Kontrollü katılaştırılmış Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe alaşım sistemleri için mikrosertlik değerlerinin soğuma hızı ile logaritmik değişim grafiği ve lineer regresyon bağıntısı.

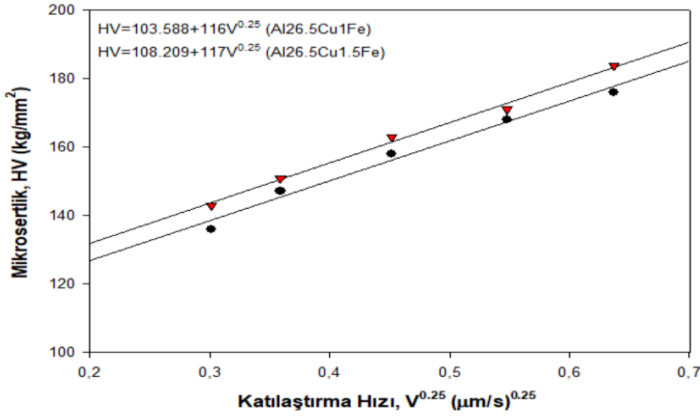
Alaşımın soğuma hızı ve mikrosertlik arasındaki ilişki Hall-Petch tipi bağıntı ile aşağıdaki şekilde belirtilmektedir:

$$HV = HV_0 + k_2 V^{0.25}$$

Burada HV_0 ve k_2 her bir malzeme için ayrı ayrı belirlenmesi gereken birer denklem sabiti olup HV_0 erime sıcaklığında dengede bulunan katı ve sıvı fazın başlangıç mikrosertlik değerini tanımlamaktadır. Şekil 5'te Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe bileşenleri için soğuma hızına bağlı olarak mikrosertlik değişimi ve Hall-Petch tipi bağıntısı verilmiştir.

Hall-Petch eşitliğine göre alaşımın soğuma hızını artırmak tane boyu küçültmekte bu ise mikrosertlik değerini artırmaktadır. Deneysel sonuçlardan elde edilen bilgilere göre başlangıç mikrosertlik değerleri Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe alaşım sistemleri için sırasıyla 103.588 ve 108.209 kg/mm^2 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler arasındaki küçük farklılık doğrudan Fe katkısının mikrosertlik değerine etkisi olarak yorumlanabilir. Fe elementinin ayrıca alaşım içerisinde

çözünmeyip intermetalik mikroyapı oluşturmasının da mikrosertlik değerinin artmasına sebep olabileceği düşünülmektedir. Bakır ve demir elementinin alüminyum içerisindeki çözünürlüğü sırasıyla 548 °C’de % 5.65 ve 655 °C’de % 0.03 [25] olarak verilmiştir. Bu nedenle Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe alaşım sistemlerinde alüminyum ve bakır tarafından oluşan genel mikroyapıdaki tane büyüklüklerinin demir içeren intermetalik faz nedeniyle çok genişleyememesi de mikrosertlik değerini görece artırmış olabilir.



Şekil 5. Kontrollü katılaştırılmış Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe alaşım sistemleri için soğuma hızına bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin değişimi ve Hall-Petch tipi bağıntısı.

Tablo 1. Alüminyum esaslı kontrollü katılaştırılmış alaşımların maksimum çekme dayanım ve mikrosertlik değerleri için Hall-Petch tipi bağıntıları ve lineer regresyon analizleri.

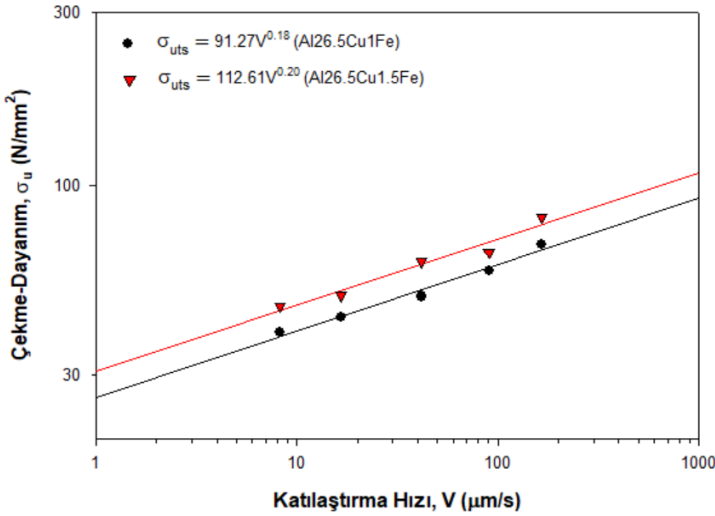
| Alaşım (%ağ.) | Soğuma Hızı (mm/s) | Sıcaklık Gradye nti (K/mm) | Mikrosertlik (Kg/mm ²) | Maksimum Çekme-Dayanım (N/mm ²) | Kaynak |
|-----------------|--------------------|----------------------------|--|--|--------------|
| Al-32.5Cu-1.5Fe | 8.25-164.80 | 8.50 | $HV = 205.9V^{0.08}$ $HV = 103.588 + 116V^{0.25}$ | $\sigma_{uts} = 91.27V^{0.18}$ $\sigma_{uts} = 36.55 + 257V^{0.25}$ | [Bu çalışma] |

| | | | | | |
|--------------------|--------------|------|---|--|--------------|
| Al-32.5Cu-1.5Fe | 8.25-164.80 | 8.50 | $HV = 210.8V^{0.08}$ $HV = 108.209 + 117V^{0.25}$ | $\sigma_{uts} = 112.61V^{0.20}$ $\sigma_{uts} = 14.67 + 100.56V^{0.25}$ | [Bu çalışma] |
| Al-32.5Cu-0.5Fe | 8.25-164.80 | 8.50 | $HV = 225.40V^{0.09}$ $HV = 111.11 + 130.97V^{0.25}$ | $\sigma_{uts} = 102.61V^{0.11}$ $\sigma_{uts} = 39.10 + 70.71V^{0.25}$ | [15] |
| Al-6.5Ni-1.5Fe | 8.25-164.80 | 4.48 | $HV = 42.54V^{0.07}$ $HV = 39.92 + 31.72V^{0.25}$ | $\sigma_{uts} = 105.15V^{0.07}$ $\sigma_{uts} = 74.47 + 230.57V^{0.25}$ | [21] |
| Al-15.91Cu-32.12Ag | 1.83-498.25 | 8.79 | $HV = 181.97V^{0.10}$ $HV = 151.69 + 236.64V^{0.25}$ | | [13] |
| Al-30Cu-6Mg | 9.43-173.3 | 8.55 | $HV = 308.3V^{0.03}$ | $\sigma_{uts} = 408.6V^{0.14}$ | [20] |
| Al-33Cu | 8.25-164.80 | 8.50 | $HV = 121.74V^{0.08}$ $HV = 109.99 + 119.07V^{0.25}$ | $\sigma_{uts} = 36.36V^{0.10}$ $\sigma_{uts} = 31.51 + 44.99V^{0.25}$ | [12] |
| Al-32.5Cu-0.6Mn | 8.4-166.2 | 8.1 | $HV = 153.2V^{0.035}$ $HV = 149.9 + 53.48V^{0.25}$ | | [19] |
| Al-23.9Cu-1.2Co | 8.3-166 | 5.66 | $HV = 184.07V^{0.05}$ | $\sigma_{uts} = 6.75V^{0.22}$ | [22] |
| Al-33Cu-0.1Ti | 8.58-2038.65 | 6.45 | $HV = 149.15V^{0.05}$ $HV = 154.2 + 54.24V^{0.25}$ | $\sigma_{uts} = 131.52V^{0.08}$ | [23] |
| Al-32.5Cu-1Ni | 9.25-2056.68 | 4.93 | $HV = 115.08V^{0.08}$ $HV = 103.3 + 106.1V^{0.25}$ | $\sigma_{uts} = 146.55V^{0.09}$ $\sigma_{uts} = 125.70 + 174.4V^{0.25}$ | [24] |

Soğuma hızı ve maksimum çekme-dayanım değeri arasındaki ilişki lineer regresyon analiziyle aşağıdaki şekilde belirtilmektedir:

$$\sigma_{uts} = k_3 V^{n_2}$$

Burada k_3 denklem sabiti olup n_2 ise soğuma hızının üstel değeri olarak tanımlanmıştır. Şekil 6'da Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe bileşenleri için soğuma hızına bağlı olarak maksimum çekme-dayanım değerinin logaritmik değişim grafiği ve lineer regresyon bağıntısı verilmiştir.



Şekil 6. Kontrollü katılaştırılmış Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe alaşım sistemleri için maksimum çekme-dayanım değerlerinin soğurma hızı ile logaritmik değişim grafiği ve lineer regresyon bağılantısı.

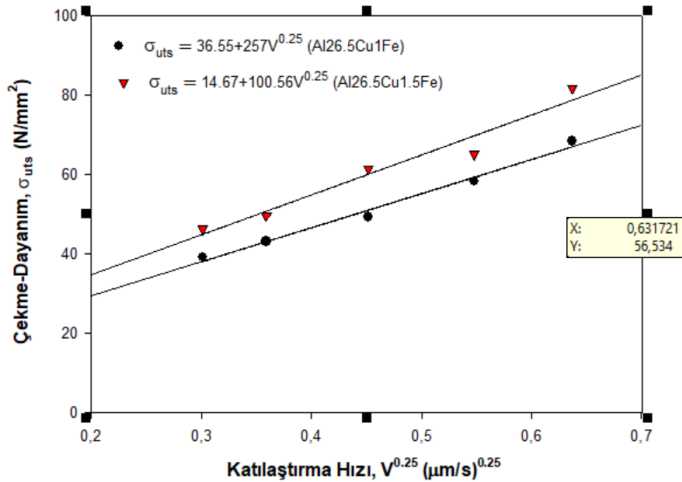
Tablo 1'de benzer şartlar altında kontrollü katılaştırılmış alüminyum esaslı farklı alaşımların maksimum çekme-dayanım değerlerinin soğuma hızına bağlı lineer regresyon analizleri verilmiştir. Tablo 1'de verilen lineer regresyon analizi sonuçlarının üstel değerleri 0.07 ile 0.22 aralığında değişmekte olup bu çalışma kapsamında Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe bileşenleri için sırasıyla elde edilen 0.18 ve 0.20 değerleri ile uyum içerisinde. Hem alaşım içerisindeki

Fe miktarının artmasıyla hem de soğuma hızının artmasıyla maksimum çekme-dayanım değerinin arttığı Şekil 6'da verilen grafikten anlaşılmaktadır. Soğuma hızı yaklaşık 20 kat artırılmasına rağmen maksimum çekme-dayanım değerleri her iki bileşen için yaklaşık 1.7 kat artmıştır.

Alaşımın soğuma hızı ve maksimum çekme-dayanım arasındaki ilişki Hall-Petch tipi bağıntı ile aşağıdaki şekilde belirtilmektedir:

$$\sigma_{uts} = \sigma_{uts_0} + k_4 V^{0.25}$$

Burada σ_{uts_0} ve k_4 her bir malzeme için ayrı ayrı belirlenmesi gereken birer denklem sabiti olup σ_{uts_0} erime sıcaklığında dengede bulunan katı ve sıvı fazın başlangıç maksimum çekme-dayanım değerini tanımlamaktadır. Şekil 7'de Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe bileşenleri için soğuma hızına bağlı olarak maksimum çekme-dayanım değerinin değişimi ve Hall-Petch tipi bağıntısı verilmiştir.



Şekil 7. Kontrollü katılaştırılmış Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe alaşım sistemleri için maksimum çekme-dayanım değerlerinin soğuma hızı ile değişimi ve Hall-Petch tipi bağıntısı.

Hall-Petch tipi eşitliğine göre Tablo 1’de verilen maksimum çekme-dayanım sonuçları değerlendirildiğinde Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe bileşenleri için elde edilen σ_{uts_0} değerlerinin oldukça küçük olduğu grlmektedir.

Bunun en önemli nedenlerinden biri bu çalışmada ötektik altı bileşimler incelenirken Tablo 1’de verilen sonuçların ötektik bileşimlere ait olmasıdır.

Ayrıca Fe elementinin alaşım içerisinde kırılğan yapıya sahip intermetalik oluşturması da Al-26.5Cu-1Fe ve Al-26.5Cu-1.5Fe sünekliğinin azalmasına neden olmuştur [3, 15].

Tablo 1’den de görüldüğü gibi Al-Cu esaslı alaşıma katkılanan her bir element hem mikrosertlik değerleri için hem de maksimum çekme-dayanım değerleri için farklı sonuçlar ortaya çıkarmıştır.

Yapılan deneyler ve elde edilen sonuçlar dikkate alındığında soğuma hızı ile maksimum çekme-dayanım ve mikrosertlik değerleri arasında lineer bir ilişki olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca alaşım içine katkılanan Fe miktarındaki artışında mikrosertlik ve maksimum çekme-dayanım değerini arttırdığı ortaya çıkarılmıştır.

Bu sonuçlar ise alaşım içinde oluşan mikroyapının soğuma hızının artmasına bağlı olarak incelmesine ve Al-Cu esaslı mikroyapısının Fe içeren intermetalik bileşik tarafından engellenmesinden kaynaklanmıştır.

KAYNAKLAR

- Andersen, S. J., Marioara, C. D., Friis, J., Wenner, S., & Holmestad, R. (2018). Precipitates in aluminium alloys. *Advances in Physics: X*, 3(1), 1479984.
- J. Emsley, *The Elements*, 2nd, Clarendon Press, Oxford, 1991.
- Yağcı, T., Cöcen, Ü., Culha, O., & Korkmaz, A. (2021). Alüminyum Döküm Alaşımlarına Dair Son Yıllardaki Akademik Ve Endüstriyel Gelişmelere Genel Bakış Ve Değerlendirme. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 1191–1210.
- Jones, H. R. A. (2005). Some effects of solidification kinetics on microstructure formation in aluminium-base alloys. *Materials Science and Engineering A*, 413–414, 165–173.
- Çadırlı, E. (2013). Effect of solidification parameters on mechanical properties of directionally solidified Al-Rich Al-Cu alloys. *Metals and Materials International*, 19(3), 411–422.
- Liu, G., Li, X., Zhang, Y., Chen, R., Wang, L., Guo, J., Fu, H., Wang, Z., & Wang, G. (2014). Effect of growth rate and diameter on microstructure and hardness of directionally solidified Ti–46Al–8Nb alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24; 4044–4052.
- Min, Z., Shen, J., Wang, L., & Liu, L. (2011). Effect of traveling magnetic field on dendrite growth of Pb-Sn alloy during directional solidification. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 9; 1976–1980.
- Qu, M., Liu, L., Cui, Y., & Liu, F. (2015). Interfacial morphology evolution in directionally solidified Al-1.5%Cu alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(2), 405–411.
- Miller, J., & Pollock, T. (2014). Stability of dendrite growth during directional solidification in the presence of a non-axial thermal field. *Acta Materialia*, 78, 23–36.
- Li, X., Ren, Z., & Fautrelle, Y. (2006). Effect of a high axial magnetic field on the microstructure in a directionally solidified Al–Al₂Cu eutectic alloy. *Acta Materialia*, 54(20), 5349–5360.

- Walker, H., Liu, S., Lee, J. H., & Trivedi, R. (2007). Eutectic Growth in Three Dimensions. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 38(7), 1417–1425.
- Engin, S., & Büyük, U. (2018). Kontrollü Doğrusal Katılaştırılan Al-Cu Alaşımının Mikroyapısı, Mekanik ve Elektriksel Özelliklerinin Katılaştırma Hızına Bağlı Değişimi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(2): 209–221.
- Böyük, U., Maraşlı, N., Kaya, H., Çadırılı, E., & Keşlioğlu, K. (2009). Directional solidification of Al–Cu–Ag alloy. *Applied Physics A*, 95(3), 923–932.
- Berkdemir, A., & Gündüz, M. (2009). Effect of growth rate and Mg content on dendrite tip characteristics of Al–Cu–Mg ternary alloys. *Applied Physics A*, 96(4), 873–886.
- Engin, S. (2020). Microstructure and mechanical properties of AlCuFe eutectic alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30(12), 3183–3194.
- Liu, D., Zhang, H., Li, Y., Chen, X., & Liu, Y. (2017). Effects of composition and growth rate on the microstructure transformation of β -rods/lamellae/ α -rods in directionally solidified Mg-Li alloy. *Materials & Design*, 119, 199–207.
- Jia'an, W., Jiahe, W., & Zhongxiao, S. (2017). Microstructures and Microsegregation of Directionally Solidified Mg-1.5Gd Magnesium Alloy with Different Growth Rates. *Rare Metal Materials and Engineering*, 46(1), 12–16.
- Li, K., Xiong, F., Chen, G., Ali, W., Lu, X., & Li, C. (2018). Directional solidification of Ti-46Al-8Nb alloy in BaZrO₃ coated Al₂O₃ composite mould. *Intermetallics*, 102, 106–113.
- Kaygısız, Y. (2018). Microstructure characterization and hardness of Al-Cu-Mn eutectic alloy. *China Foundry*, 15(5), 390–396.
- Kaygısız, Y., & Maraşlı, N. (2017). Microstructural, mechanical, and electrical characterization of directionally solidified Al–Cu–Mg eutectic alloy. *Physics of Metals and Metallography*, 118(4), 389–398.
- Engin, S., Büyük, U., & Maraşlı, N. (2016). The effects of microstructure and growth rate on microhardness, tensile

- strength, and electrical resistivity for directionally solidified Al–Ni–Fe alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 660, 23–31.
- Çadırılı, E., Yılmaz, Z., Şahin, M., & Kaya, H. (2015). Investigation of the Some Physical Properties of the Directionally Solidified Al–Cu–Co Ternary Eutectic Alloy. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 68(5), 817–827.
- Ümit Bayram, & Necmettin Maraşlı. (2020). Effects of Growth Rate on Eutectic Spacing, Microhardness, and Ultimate Tensile Strength in the Al–Cu–Ti Eutectic Alloy. *Physics of Metals and Metallography*, 121(4), 382–390.
- Bayram, M., & Maraşlı, N. (2018). Influence of Growth Rate on Eutectic Spacing, Microhardness, and Ultimate Tensile Strength in the Directionally Solidified Al–Cu–Ni Eutectic Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 49(6), 3293–3305.
- Mondolfo, L. F. *Metallography of Aluminum Alloys* John Wiley & Sons, Inc. New York 1943, 18, 77.

BÖLÜM 3

FİZİK PRENSİPLERİ IŞIĞINDA SES VE İŞİTME

Prof. Dr. Elif ORHAN¹

¹ Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Ankara, Türkiye.
eliforhan@gazi.edu.tr, ORC – ID : 0000-0002-3949-6141

GİRİŞ

“Fizik Prensipleri Işığında Ses ve İşitme” başlıklı derleme çalışmamızda², temel fizik bilimi yaklaşımları esas alınarak, ses ve özellikleri, ses üstü olaylar ve işitme alt başlıklarında, sesin tanımı, sesle ilgili temel fiziksel veriler, sesin sürati, frekans ve dalga boyu, sesin şiddet ve düzeyi, doppler etkisi yanı sıra ultrases ve ultrases görüntüleme, bazı ultrases uygulamaları konularına yer verilmiş, işitme mekanizması ele alınmış, işitme ve duymanın sesin fiziksel nicelikleriyle ilişkisi açıklanmaya çalışılmıştır.



Şekil 1: Bu ağaç bir süre önce devrildi. Devrildiği sırada, havadaki atomları titreştirdi. Etrafta biri onu duysa da duymasa da fizikçiler bu olaya ses derler. (<https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/introduction-18/>).

İssiz bir ormanda bir ağaç devrilirse ve onu duyacak kimse yoksa yine de devrilen bu ağaç ses çıkarır mı? Bu eski felsefî sorunun felsefî cevabı, sesi nasıl tanımladığınıza bağlıdır. Eğer ses sadece etrafta onu algılayacak biri varken varsa, o zaman “ıssız ormanda ses yoktur” diyebiliriz.

² Yazar tarafından burada FİZİK PRENSİPLERİ IŞIĞINDA SES VE İŞİTME başlığında müstakil bir kitap bölümü olarak ele alınan “ses ve işitme” konusu, üniversite öğrencilerine yardımcı olmak amacıyla, örnekler, kavramsal tanımlar, değerlendirme soruları ve problemler ile zenginleştirilmesi suretiyle, kaynak ders notu mahiyetinde öğrencilerle paylaşılması planlanmaktadır.

Sesi hep işittiğimiz bir şey olarak düşünürüz. Ancak “saf fizik” terimleriyle ses, bir ortamda, insan kulağının algılayabildiği frekans aralığında ilerleyen bir dizi titreşimlerden oluşan periyodik bir dalgadır. Titreşimlerin ortamdan geçiş şekli bir ses dalgası biçimindedir. Ses dalgası, su veya havadaki bir bozulmanın neden olduğu ve bir dalgalanma etkisi ile ileriye taşınan bir basınç dalgasıdır. Böyle bir dalga, ses dediğimiz fiziksel olguya karşılık gelmektedir. Ses dalgası, mekanik bir dalga olarak karakterize edilir. Mekanik dalgalar, enerjilerini bir yerden başka bir yere taşımak için bir ortama ihtiyaç duyarlar ve parçacık etkileşimine dayandığından, uzayın parçacıklardan yoksun bölgelerinden geçemezler. Ses, birçok ortam türünden geçebilir, örnek: gazlar, sıvılar ve katılar. Ayrıca, ses bir enerji şeklidir. Üretilir, iş yapabilir, zaman ve mesafe içinde dağılır ve muazzam miktarda enerji taşıyabilir. Sistemde onu devam ettirecek enerji olduğu sürece ses devam edecektir; o zaman “etrafta kimse duymasa bile ormanda ses vardır” diyebiliriz.

Görme görünür ışığın algılanması olduğu gibi, işitme de sesin algılanmasıdır. Hem fiziksel olgusu hem de algısı ilginçtir ve bu bölümde bu konu ele alınacaktır. Hem sesi hem de işitmeyi inceleyeceğiz; onlar birbiri ile ilişkilidirler ancak, aynı şey değildirler. İşitme en önemli duyularımızdan biri olduğu için, sesin fiziksel özelliklerinin algılarımıza nasıl karşılık geldiğini görmek ilginç olacaktır. Ancak sesin işitmenin ötesinde önemli uygulamaları da vardır. Örneğin ultrases duyulmaz ancak, tıbbi görüntüler oluşturmak için kullanıldığı gibi tedavi için de kullanılmaktadır.

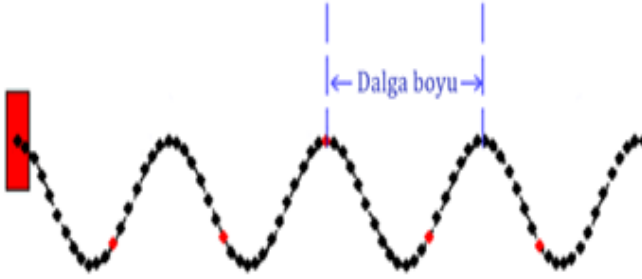
1. SES VE ÖZELLİKLERİ

1.1. Ses Nedir?

Ses katı, sıvı ve gaz ortamlarda kulağın algılayabileceği basınç değişiklikleridir ve atom veya moleküllerin mekanik titreşimi sonucu meydana gelmektedir. Bu basınç değişiklikleri veya titreşim hareketleri bir dalga, hatta birçok durumda “periyodik bir dalga” şeklinde yayılır.

Birçok insan ses dalgalarının, hatalı bir şekilde, Şekil 2’deki gibi olduğunu düşünür. Kabaca, yılanın hareketine benzeyen böyle bir

dalgaya, enine dalga denir. Bir başka deyişle enine dalga, salınımları dalganın ilerleme yönüne dik olan bir dalgadır. Ama ses dalgaları böyle değildirler.



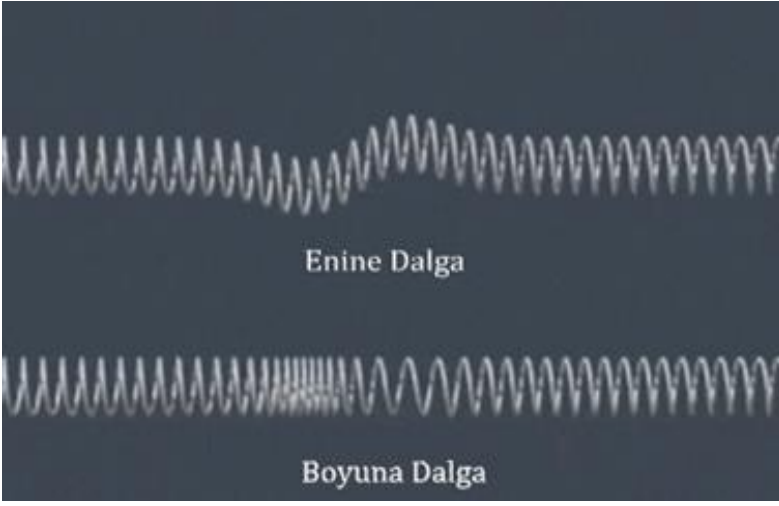
Şekil 2: Dalga modeli.

Ortamın titreşiminin dalganın ilerlediği yöne paralel olduğu ve ortamın yer değiştirmesinin dalga yayılımı ile aynı (veya zıt) yönde olduğu dalgalara boyuna dalga denir.

Bu dalgalar bir solucan gibi, ortamı sıkıştırarak ve gevşeterek hareket eder.

Mekanik boyuna dalgalar, bir ortamda seyahat ederken sıkıştırma ve seyrekleşme ürettikleri için sıkıştırma veya sıkıştırma dalgaları ve basınçta artış ve azalma ürettikleri için basınç dalgaları olarak da adlandırılır.

Ses de boyuna bir dalgadır. Şekil 3'te görüldüğü gibi stres yayı her iki dalgayı da üretebilmektedir.



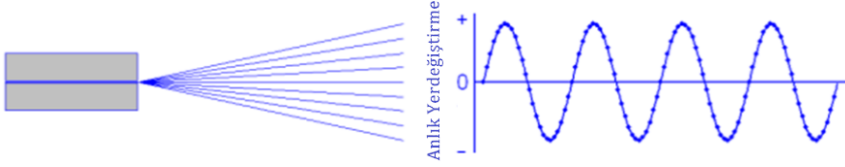
Şekil 3: Stres yayı: Enine ve boyuna dalgalar.



Şekil 4: Bu cam kadeh, cam kadehin rezonans frekansıyla aynı frekansta olan yüksek şiddetli bir ses dalgası tarafından parçalanmıştır. Ses gözle görülmezken, sesin etkileri varlığını kanıtlamaktadır (<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/17-1-sound-waves>).

Titreşim, bir akort çatalından, bir gitar telinden, bir org borusundaki hava sütunundan, bir trampetin başlığından (veya kenarından), radyatörden kaçan buhardan, bir klarnet kamışından, bir hoparlörün diyaframından gelebilir; ses dinleyicinin duyabileceği bir frekans aralığında titreşen hemen hemen her şeydir (insanlar için saniyede yaklaşık 20 ila 20 000 Hertz). Ses gözle görülmezken, sesin etkileri varlığını kanıtlamaktadır (Şekil 4). Bir ses dalgasının üretilmesi için gerekli koşullardan biri titreşim bozulumu, diğeri ise (en bilineni “hava” olan) elastik bir ortamdır. Titreşen nesnelerin özelliklerini tanımlayarak başlayacağız ve ardından hava gibi elastik bir ortamda titreşim hareketi meydana geldiğinde ne olduğunu göreceğiz.

İşte, Şekil 5’te gösterildiği gibi, basit bir titreşen nesneyi inceleyerek başlayabiliriz. Bu cisim alttan (veya üstten) vurularak titreştirecek olursak, çubuğun iç direnci titreşimin kesilmesine neden olana kadar çubuk yukarı ve aşağı salınım yapacaktır. Şekil 5’in sağındaki grafik, çubuğun yukarı ve aşağı hareketinin görsel bir temsilidir. Bu grafiğin nasıl oluşturulduğunu anlamak için, çubuğun yukarı ve aşağı titreşimi sırasında bir dizi anlık görüntüsünü almak için bir flaş ışığı kullandığımızı hayal ediniz. Her anlık görüntü için, çubuğun anlık yer değiştirmesini ölçüyoruz. Bu, çubuğun anlık görüntüsünün alındığı saniyedeki konumu ile çubuğun hareketsiz durumdaki konumu arasındaki farktır. Çubuğun hareketsiz konumu, keyfi olarak sıfır yer değiştirme olarak kabul edilirse; pozitif sayılar, hareketsiz konumun üzerindeki yer değiştirmeler için, negatif sayılar, hareketsiz konumun altındaki yer değiştirmeler için kullanılabilir. Böylece, çubuğa vurulurken alınan ilk anlık görüntü, sıfır anlık yer değiştirmesini gösterecektir; bir sonraki anlık görüntü küçük bir pozitif yer değiştirmeyi gösterecek, bir sonraki resim biraz daha büyük bir pozitif yer değiştirmeyi gösterecek ve bu böyle devam edecektir. Bu yer değiştirmeler zamana karşı çizilirse şeklin sağ tarafındaki desen elde edilir. Bu tür basit bir titreşim sistemi tarafından üretilen titreşimli hareket tipine basit harmonik hareket veya düzgün dairesel hareket denir ve grafikte çizilen modele sinüs dalgası veya sinüzoid dalga denir.



Şekil 5: Bir çubuğun bir tarafı sabitlenip alttan (veya üstten) vurularak titreşim yapması sağlanır. Çubuğun aşağı-yukarı titreşimi sırasında bir dizi anlık görüntüsünü almak için bir flaş ışığının kullanıldığını hayal ediniz.

Artık sinüzoidal bir titreşim için geçerli olan bazı temel terminolojiyi tanımlayabilecek durumdayız:

Dalga: Parçacık ve kütle taşınımı olmaksızın enerji ve momentum aktarım hareketine denir.

Periyodik: Şekil 5'teki titreşim modeli ve grafikte gösterilen dalga biçiminde olduğu gibi, basitçe zaman içinde kendini tekrar eden bir deseni ifade eder.

Periyot (T): Bir tam titreşim için gereken süredir. Örneğin, 1 saniyede 20 devir tamamlanırsa, periyot saniyenin $\frac{1}{20}$ 'si (s) veya 0,05 s'dir. Konuşma uygulamaları için, periyot için en yaygın kullanılan ölçü birimi milisaniyedir ($1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$ 'dir.).

Dalga Boyu (λ): Bir dalga örüntüsünün tekrarlanan birimleri (art arda gelen aynı fazlı iki noktası) arasındaki mesafeyi belirtir. Dalganın, bir periyotluk zamanda aldığı yol olup, birimi metredir. Ardışık iki tepe noktası ya da ardışık iki çukur noktası arası uzaklık olarak ölçülebilir.

Frekans (f): 1 saniyedeki devir sayısı olarak tanımlanır. Frekansın birimi Hertz (Hz) 'dir ve bu, daha eski ve basit bir terim olan “saniye başına devir” (veya devir/saniye) ile tamamen eş değerdedir.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Burada f , Hz biriminde frekans, T saniye biriminde periyottur. Örnek olarak $T = 0.05\text{s}$ 'lik periyot için frekans:

$$f = \frac{1}{0,05 \text{ s}} = 20 \text{ Hz}' \text{ dir.}$$

Frekansın saniyedeki devir sayısı veya Hz olarak çıkması için periyodun saniye cinsinden gösterilmesi gerektiğini unutmamak önemlidir. Eğer periyot milisaniye cinsinden gösterilirse, ki bu genellikle böyledir, ondalık noktayı üç basamak sola kaydırarak periyodun önce milisaniyeden saniyeye dönüştürülmesi gerekir. Örneğin, 10 ms'lik bir periyot için frekans:

$$f = \frac{1}{10 \text{ ms}} = \frac{1}{0,01 \text{ s}} = 100 \text{ Hz}' \text{ dir.}$$

$T = 100 \mu\text{s}$ için ise;

$$f = \frac{1}{100 \text{ ms}} = \frac{1}{0,00001 \text{ s}} = 10000 \text{ Hz}' \text{ dir.}$$

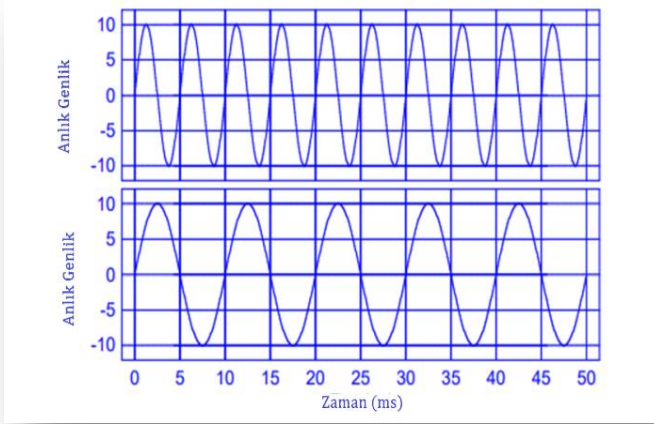
Frekans biliniyorsa periyot hesaplanabilir. Periyot ve frekans ters orantılı olduğundan,

$$T = \frac{1}{f} \quad (2)$$

yazılabilir. Buna göre, 200 Hz 'lik bir frekans için periyot,

$$T = \frac{1}{200 \text{ Hz}} = 0,005 = 5 \text{ ms 'dir.}$$

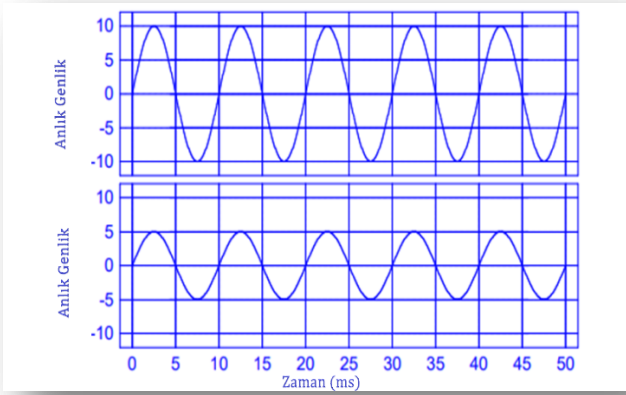
Bu tür basit titreşim sistemleri, birbirinden sadece üç çeşit farklılık gösterebilir: frekans, genlik ve faz. Şekil 6, frekans bakımından farklılık gösteren sinyal örneklerini göstermektedir. Genlik terimi, kuvvet ve basınç gibi şimdiye kadar tartışılan diğer terimlerden biraz farklıdır. Kuvvet ve basınç gibi terimler, kütle, zaman ve mesafe gibi temel niceliklerin çeşitli kombinasyonları olarak çok özel tanımlara sahiptir. Genlik ise bu bölümde "ne kadar" anlamına gelen genel bir terim olarak kullanılacaktır. Ne kadar ne? Genlik terimi, yer değiştirmenin büyüklüğünü, bir hava basıncı bozukluğunun büyüklüğünü, bir kuvvetin büyüklüğünü, gücün büyüklüğünü vb. belirtmek için kullanılabilir.



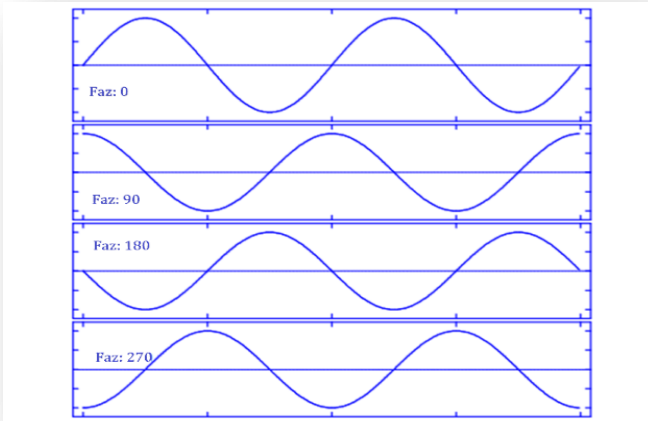
Şekil 6: Frekansları farklı olan iki titreşim modeli. Üstteki şeklin frekansı alttaki şekilden daha büyüktür.

Genlik terimi, yer değiştirme desenin büyüklüğü ile ilgilidir. Şekil 7, genlik bakımından farklılık gösteren iki dalga biçimini göstermektedir. Genlik kavramı, şekilde gösterilen iki dalga formunun önerdiği kadar basit olsa da genliği ölçmek görüldüğü kadar basit değildir. Bunun nedeni, dalga formunun anlık genliğinin sürekli

değişmesidir. Genliği ölçmenin birçok yolu vardır, ancak en yüksek (tepe) noktası ve en düşük (çukur) noktası arasındaki mesafenin yarısı olarak tanımlamak, amaçlarımıza yeterince hizmet edecektir. Tepeden çukura genlik, basitçe, sinyaldeki maksimum pozitif ve maksimum negatif tepe noktaları arasındaki genlik farkıdır. Örneğin, Şekil 7’de, üst şeklin tepeden çukura genliği 20 cm, alt şeklin genliği ise 10 cm’dir.



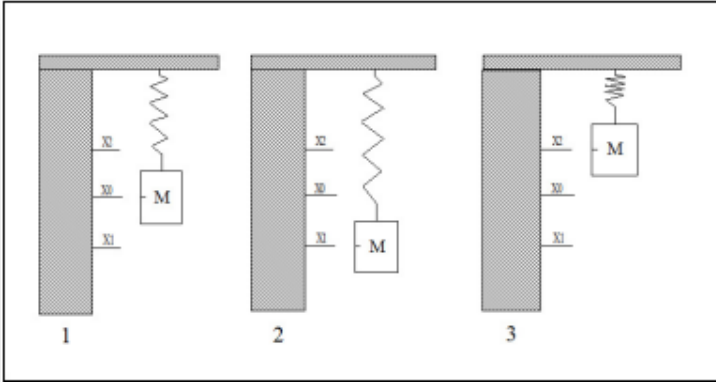
Şekil 7: Genlik bakımından farklılık gösteren iki titreşim biçimi. Üstteki şekildeki genlik, alttaki şekildeki genlikten daha büyüktür.



Şekil 8: Faz bakımından farklılık gösteren dört titreşim biçimi.

Şekil 8, frekans ve genlik bakımından aynı olan, ancak faz bakımından birbirinden farklı olan birkaç sinyali göstermektedir.

İki sinüs dalgasının genlik tepe noktaları aynı zamanda aynı yerde ise bu iki dalga aynı fazdadır. Diğer bir deyişle, bu iki dalga arasında faz farkı ya da faz kayması yoktur. İki sinüs dalgasının genlik tepe noktaları aynı zaman içinde farklı yerlerde ise bu iki dalganın arasında faz kayması vardır. İki sinüs dalgası arasında 90° faz farkı olduğunda birinci sinüs dalgasının tepe noktası sıfır noktasındayken (0° veya 180°), ikinci sinüs dalgasının tepe noktası artı veya eksi 'tepe' noktası olarak ileride veya geri olabilir (90° veya 270°). Şekil 9 doğal titreşim frekansı iki parametre tarafından kontrol edilen bir yay ve kütle sistemini göstermektedir. Bu parametrelerden (1) yayın sertliği (yay ne kadar sert olursa, frekansı o kadar büyük olur) ve (2) yayda asılı duran malzemenin kütlesidir (kütle ne kadar büyükse, doğal frekansı o kadar küçük olur).



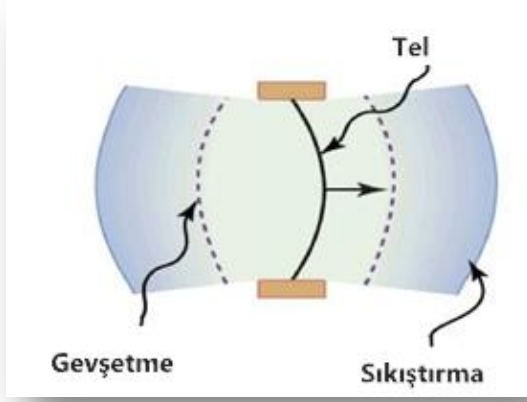
Şekil 9: Bir yay ve kütle sistemi.

Şekil 10'da gösterildiği gibi, bir dalganın ilerleme yönü (yayıma doğrultusu) ile titreşim yönü birbirine dik ise bu tür dalgaya enine dalga denir. Bir dalganın ilerleme yönü ile titreşim yönü birbirine paralel ise bu tür dalgaya boyuna dalga denir. (Şekil 11). Ortamdaki parçacıkların davranışlarından dolayı ses enine dalga olarak

düşünülmez. Havadaki ve çoğu akışkandaki ses dalgaları boyunadır, çünkü sıvıların neredeyse hiç kesme kuvveti yoktur. Katılarda, ses dalgaları hem enine hem de boyuna olabilir.



Titreşen bir tel, Şekil 12’de gösterildiği gibi bir ses dalgası üretir. Tel ileri geri salınırken, enerjiyi çoğunlukla türbülansın (hava akışının düzensizleşmesinin) yarattığı termal enerji olarak havaya aktarır. Fakat telin enerjisinin küçük bir kısmı çevredeki havayı sıkıştırmaya ve genişletmeye harcanır, bu da biraz daha yüksek ve daha düşük yerel basınçlar yaratır. Bu yüksek basınç bölgeleri ve düşük basınç bölgeleri tel ile aynı frekansa sahip boyuna basınç dalgaları olarak hareket eder (bu durum bir düzensizleşmedir). Bu basınç dalgalanması, bir ses dalgasıdır.



Şekil 12: Sağa doğru hareket eden titreşen bir tel, önündeki havayı sıkıştırır ve arkasındaki havayı gevşetir (<https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/17-1-sound/>).

1.2. Sesin Sürati, Frekansı ve Dalga Boyu

Ses, tüm dalgalar gibi belirli bir ortamda belirli bir hızla hareket eder ve frekans ve dalga boyu gibi fiziksel niceliklere sahiptir. Şekil 13'te görüldüğü gibi, bir havai fişek gösterisini izlerken ses hızının doğrudan kanıtını gözlemleyebilirsiniz. Bir patlamanın parlaması, ses duyulmadan çok önce görülür; bu, hem sesin sınırlı bir hızla hareket ettiğini hem de ışıktan çok daha yavaş ilerlediğini gösterir.



Şekil 13: Bir havai fişek patladığında, ses enerjisinden önce ışık enerjisi algılanır. Yani ses, ışıktan daha yavaş yayılır (<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/17-1-sound-waves>).

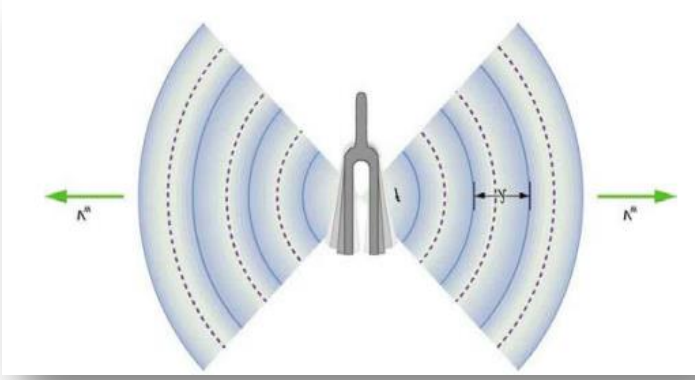
Ayrıca bir sesin frekansını doğrudan hissedebilirsiniz. Frekans algısına perde denir. Sesin dalga boyu doğrudan algılanmaz, ancak müzik aletlerinin boyutları onların perdeleriyle ilişkilidir. Küçük piccolo gibi enstrümanlar tipik olarak yüksek perdeli sesler çıkarırken, tuba gibi büyük enstrümanlar tipik olarak düşük perdeli sesler çıkarır. Yüksek perde, küçük dalga boyu anlamına gelir ve bir müzik aletinin boyutu, ürettiği sesin dalga boyu ile doğrudan ilişkilidir. Bu, küçük bir enstrümanın kısa dalga boyulu sesler oluşturduğuna işaret eder.

Sesin sürati, frekansı ve dalga boyu arasındaki ilişki, tüm dalgalarda aynıdır:

$$v_w = f \lambda \quad (3)$$

Burada v_w sesin sürati, f frekansı ve λ dalga boyudur. Bir sesin dalga boyu, bir dalga örüntüsünün tekrarlanan birimleri arasındaki mesafedir. Frekans, kaynağın frekansı ile aynıdır ve birim zamanda bir noktadan geçen dalgaların sayısıdır.

Şekil 14, f frekansı ile titreşen bir diyapazonu (titreştirildiğinde ana seslerden birini veren, U harfi biçiminde, saplı küçük metal araç) göstermektedir.



Şekil 14: Bir ses dalgası f frekansında titreşen bir kaynaktan yayılır, v_w hızı ile ilerler ve λ dalga boyuna sahiptir (<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/17-2-speed-of-sound>).

Ses mekanik bir dalga olup, ses dalgalarının hızı sesin iletiildiği ortam ile ilişkilidir. Konuşma dilinde ses hızı, ses dalgalarının havadaki hızını ifade eder. Bununla birlikte, sesin hızı yayıldığı ortamdaki ortama değişir: tipik olarak ses, gazlarda en yavaş, sıvılarda daha hızlı ve katılarda en hızlı yayılır. Örneğin, ses havada 343 m/s hızla hareket ederken, suda 1.481 m/s (neredeyse 4.3 kat daha hızlı) ve demirde 5.120 m/s neredeyse 15 kat daha hızlı) hızla hareket eder. Elmas gibi son derece sert bir malzemede ses saniyede 12000 metre (havadaki hızının yaklaşık 35 katı) hızla yayılır. Bu hız sesin normal koşullar altında gidebileceği en büyük hızdır.

Ayrıca bulunduğu ortamın sıcaklık, nem ve yoğunluğuna bağlı olarak ses hızında değişiklikler gözlemlenmektedir. Maddenin farklı hâlleri (fazları) için ses hızının ifadesi değişim göstermektedir. Bir ortamdaki sesin hızı, ortamın sertliği (veya gazlarda sıkıştırılabilirliği) ve yoğunluğunun bir kombinasyonu ile belirlenir. Ortam ne kadar sert (veya daha az sıkıştırılabilir) olursa, sesin hızı o kadar büyük olur. Bu gözlem, basit bir harmonik hareketin frekansının, salınan nesnenin sertliği ile doğru orantılı olduğu gerçeğine benzer.

Aynı cins ortamda, ortamın yoğunluğu arttıkça, sesin hızı azalır. Bu gözlem, basit bir harmonik hareketin frekansının salınan cismin kütlesiyle ters orantılı olduğu gerçeğine benzer.

Hava sıkıştırılabilir olduğundan sesin havadaki hızı nispeten daha küçüktür.

Sıvılar ve katılar nispeten sert (rijid) olduklarından ve sıkıştırılmaları çok zor olduğundan, bu tür ortamlarda sesin hızı genellikle gazlardakinden daha büyüktür.

Katı içinde ses hızı;

$$v_w = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (4)$$

ifadesi ile verilir. Burada Y Young modülü, ρ ise yoğunluktur.

Akışkan içindeki sesin sürati;

$$v_w = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (5)$$

ifadesi ile verilir. Burada B Hacim modülü, ise yoğunluktur.

Gaz içindeki sesin sürati ise;

$$v_w = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (6)$$

ifadesi ile verilir. Burada γ gazın özgül ısılarının oranıdır. M , molar kütle; T sıcaklık ve R evrensel gaz sabitidir.

Tablo 1, ses hızının farklı ortamlarda büyük ölçüde değiştiğini açıkça göstermektedir.

Tablo1: Çeşitli ortamlarda sesin süratı.

| Ortam | v_w (m/s) |
|--------------------------|----------------|
| Gazlar (0 °C) | |
| Hava | 331 |
| Karbondioksit | 259 |
| Oksijen | 316 |
| Helyum | 965 |
| Hidrojen | 1290 |
| Sıvılar (20 °C) | |
| Etanol | 1160 |
| Cıva | 1450 |
| Temiz su | 1480 |
| Deniz suyu | 1540 |
| İnsan dokusu | 1540 |
| Katılar (Hacimli) | |
| Vulkanize kauçuk | 54 |
| Polietilen | 920 |
| Kurşun | 1960 |
| Mermer | 3810 |
| Alüminyum | 5120 |
| Borcam | 5640 |
| Çelik | 5960 |

Ses dalgaları havadan geçebilir, normalde bunu deneyimliyoruz. Ancak aynı zamanda sıvı veya katı maddeden de geçebilir deprem sırasında meydana gelen sarsıntıların çoğu, devasa bir ses dalgasının sonucudur. Peki ya ses hızı? Basınç dalgasının belirli bir ortamda ne kadar hızlı hareket edebileceğine bağlıdır. Hava gibi daha akışkan bir ortam yüksek oranda sıkıştırılabilir, bu nedenle dalga havada sudakinden daha yavaş hareket eder; çünkü su çok daha az sıkıştırılabilir. Sıkıştırılabilirlik ile ilgili bu durumu iki benzetmeyle açıklamak mümkündür: Bir stres yayının uçlarını tutan iki insandan biri tuttuğu ucu diğerine doğru iterse, dalganın diğer kişiye ulaşması biraz zaman alacaktır. Ama iki kişi bir süpürge sapını tutuyorsa, biri ittiğinde diğeri bu itmeyi hemen hisseder, çünkü süpürge sapı çok daha az sıkıştırılabilir. Bu nedenle, sesin havadaki hızının (normal koşullar

altında 768 mil/saat= 331 m/s), sudaki ses hızından (1.480 m/s) yaklaşık dört kat daha yavaş olması mantıklıdır; bu, sesin demir gibi katı bir ortamdaki hızından (5.951 m/s) yaklaşık dört kat daha yavaştır.

Deprem dalgalarının -yerkabuğundaki ses dalgalarının- hızı, ses hızının ortamın sertliğine nasıl bağlı olduğuna dair ilginç bir örnektir. Deprem dalgaları hem boyuna hem de enine dalgalardır ve bunlar farklı hızlarda hareket ederler. Granitin (volkanik taşın) hacim modülü, kesme modülünden daha büyüktür. Bu nedenle, granitteki depremlerde boyuna veya basınç dalgalarının (P-dalgaları) hızı, enine veya kesme dalgalarının (S-dalgaları) hızından önemli ölçüde yüksektir. Depremlerin her iki bileşeni de tortul tabakalar gibi daha az sert malzemede daha yavaş hareket eder. P dalgaları 4 ile 7 km/s hıza sahiptir. S dalgalarının hızı ise 2 ile 5 km/s hız aralığındadır, her ikisi de daha sert malzemede daha hızlıdır. P dalgası, Dünya'nın kabuğundan geçerken S dalgasının giderek daha da önüne geçer. P ve S dalgaları arasındaki süre, depremin merkez üssüne olan mesafeyi belirlemek için rutin olarak kullanılmaktadır.

Sesin sürati, belirli bir ortamdaki sıcaklıktan etkilenir. Deniz seviyesindeki hava için sesin sürati şu şekilde verilir:

$$v_w = (331 \text{ m/s}) \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}} \quad (7)$$

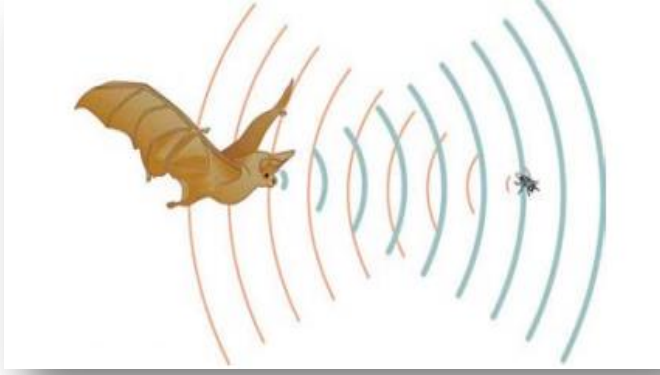
burada T sıcaklık olup, Kelvin birimindedir.

0°C'de sesin sürati 331 m/s iken, 20°C'de 343 m/s'dir. Sıcaklıktaki her 1°C 'lik artış için hız yaklaşık 0.60 m/s artar. Yani bu, % 4 'ten daha az bir artış anlamına gelir. Ses, sıcak havalarda, soğuk havalarda olduğundan daha hızlı yayılır. Daha yüksek sıcaklıklarda dalga boyu, donma sıcaklıklarında olduğundan biraz daha uzundur. Ses, atmosferin üst katmanlarında okyanus ve kara yüzeyinin hemen üzerinde olduğundan daha yavaş yayılır.

Gazlardaki sesin sürati, gazdaki parçacıkların ortalama hızı, v_{rms} ile ilgilidir ve bu

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (8)$$

Burada k , Boltzmann sabitidir (1.38×10^{-23} J/K) ve m gazdaki her özdeş parçacığın kütlesidir. Bu nedenle, sesin havadaki ve diğer gazlardaki hızının sıcaklığın kareköküne bağlı olması mantıklıdır. İhmal edilebilir olmasa da bu, güçlü bir bağımlılık değildir.

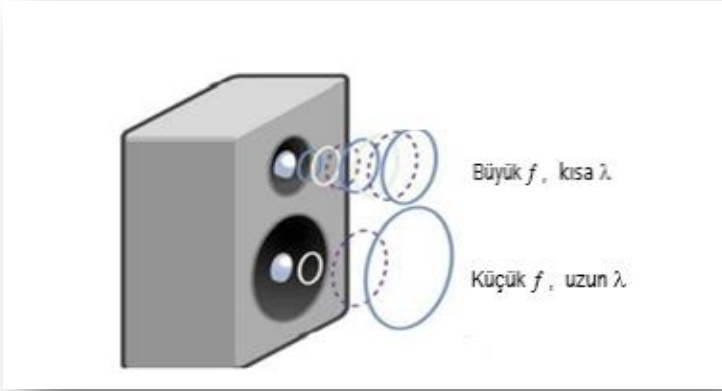


Şekil 15: Bir yarasa, yolunu bulmak ve avını yakalamak için ses yankılarını kullanır. Yankının geri dönme süresi, mesafe ile doğru orantılıdır (<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/17-2-speed-of-sound>).

Şekil 15, mesafeleri algılamak için bir yarasa tarafından ses hızının kullanımını göstermektedir. Yankılar, tıbbi görüntülemelerde de kullanılmaktadır.

Sesin en önemli özelliklerinden biri, hızının neredeyse frekanstan bağımsız olmasıdır. Bu bağımsızlık, 20 ile 20000 Hz'lik işitilebilir aralıktaki sesler için kesinlikle açık havada doğrudur. Bu bağımsızlık doğru olmasaydı, örneğin bir futbol stadyumunda bir bando tarafından çalınan müzik için bunu kesinlikle fark ederdimiz. Yüksek frekanslı seslerin daha hızlı yayıldığını varsayalım o zaman gruptan ne kadar uzaklaşırsanız, sesin frekansı o kadar fazla olur. Düşük perdeli

enstrümanlar, yüksek perdeli enstrümanlardan daha geride kalacaktır. Ancak tüm enstrümanlardan gelen müzik, mesafeden bağımsız olarak bir ritimde gelir ve bu nedenle tüm frekanslar hemen hemen aynı hızda hareket etmelidir.



Şekil 16: Belirli bir ortamda aynı hızda hareket ettikleri için, düşük frekanslı sesler, yüksek frekanslı seslerden daha büyük bir dalga boyuna sahip olmalıdır. Bu sebepten dolayı, düşük frekanslı sesler “woofer” adı verilen büyük hoparlör tarafından, yüksek frekanslı sesler ise “tweeter” adı verilen küçük hoparlör tarafından yayılır (<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/17-2-speed-of-sound>).

Belirli bir ortamda, sabit koşullar altında v_w sabittir, dolayısıyla f ve λ arasında bir ilişki vardır ($v_w = f \lambda$); Şekil 16’da görüldüğü gibi frekans ne kadar yüksek olursa, dalga boyu o kadar küçük olur.

1.3. Ses Şiddeti ve Düzeyi

Sessiz bir ormanda bazen tek bir yaprağın yere düştüğünü duyabilirsiniz. Yatağa yerleştikten sonra nabzınızı kulaklarınızdan duyabilirsiniz. Ancak yoldan geçen bir sürücü radyoyu açtığında, arabanızda yanınızdaki kişinin ne dediğini bile duyamazsınız. Hepimiz seslerin yüksekliğine çok aşınayız ve bunların kaynağının, enerjisel olarak ne kadar titreştiğiyle ilgili olduğunun farkındayız.



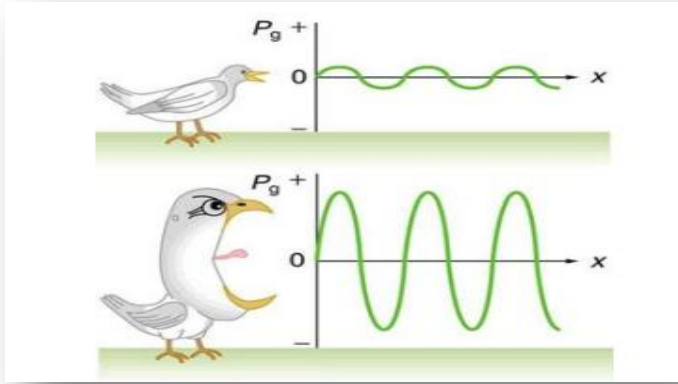
Şekil 17: Delhi'deki gibi kalabalık bir yoldaki gürültü, bağırmadıkları sürece insanların birbirlerini duymalarını zorlaştırıyor (<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/17-3-sound-intensity>).

Şekil 17, Delhi'deki gibi kalabalık bir yoldaki gürültü³, temsil için gösterilmiştir. Çılgık atan bir insanı (veya yüksek ses çıkaran bir hayvanı) betimleyen karikatürlerde, karikatürist genellikle titreyen bir küçük dil ile açık bir ağız gösterir; ağız, boğazdan yüksek bir ses geldiğini düşündürür.

Yüksek gürültüye maruz kalma, işitme için tehlikelidir ve müzisyenlerin, performans gösterme yeteneklerini engelleyebilecek kadar şiddetli işitme kayıplarına sahip olmaları yaygındır. İlgili fiziksel nicelik, işitilebilir aralıkta olsun ya da olmasın tüm sesler için geçerli bir kavram olan ses şiddetidir.

Şekil 18, farklı şiddetteki iki ses dalgasına ait basınç-ölçer grafiklerini göstermektedir.

³ Uyumsuz ve düzensiz bir biçimde çıkan, istenmeyen, rahatsız edici her türlü ses kirliliğine gürültü denilebilir.



Şekil 18: Farklı şiddetteki iki ses dalgası için basınç-ölçer grafikleri. Daha şiddetli ses, daha büyük genlikli salınımlara ve daha büyük maksimum ve minimum basınca sahip bir kaynak tarafından üretilir. Daha şiddetli seste basınçlar daha yüksek olduğundan, karşılaştığı nesnelere daha büyük kuvvetler uygulayabilir (<https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/17-3-sound-intensity-and-sound-level/>).

Ses şiddeti, bir dalga tarafından taşınan birim alan başına düşen güç olarak tanımlanır. Burada güç, enerjinin dalga tarafından aktarılma hızıdır. Denklem formunda, şiddet,

$$I = \frac{P}{A} \quad (9)$$

şeklinde yazılabilir. Burada P, A alanından geçen güçtür. I için SI birimi W/m^2 'dir. Bir ses dalgasının şiddeti basınç genliğinin karesi ile, aşağıdaki şekildeki gibi, ilişkilidir.

$$I = \frac{(\Delta p)^2}{2\rho v_w} \quad (10)$$

Burada Δp , Pascal (pa) veya N/m^2 cinsinden basınç değişimi veya basınç genliğidir (ses dalgasındaki maksimum ve minimum basınç arasındaki farkın yarısı). (Basıncı güçten ayırt etmek için, burada küçük p harfini kullanıyoruz). Bu denklemde, ρ ses dalgasının içinde hareket ettiği malzemenin kg/m^3 biriminde yoğunluğu, v_w ise m/s biriminde

sesin ortamdaki hızıdır. Basınç değişimi, salınımın genliği ile orantılıdır. Dolayısıyla I , $(\Delta p)^2$ ile değişir. Bu ilişki, ses dalgasının bir miktar titreşim tarafından üretildiği gerçeğiyle tutarlıdır; basınç genliği ne kadar büyük olursa, oluşturduğu sesle hava o kadar fazla sıkıştırılır.

Herhangi küçük bir hacim elemanının x deki denge konumuna göre yerdeğiştirmesini s ile göstereyim. Sağa doğru ilerleyen boyuna dalga için s yerdeğiştirmesi,

$$s = f(x - vt) \quad (11)$$

ifadesi ile verilir. Buradaki f fonksiyonu temsil ediyor, frekansla karıştırılmamalıdır. Basit harmonik dalganın özel durumu için,

$$s = s_m \cos \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \quad (12)$$

dir. Burada v boyuna dalganın hızını, s_m yerdeğiştirme (öteleme) genliğini ve λ dalga boyunu göstermektedir. Bu eşitlik daha kapalı bir şekilde yazılırsa, yani

$$s = s_m \cos(kx - \omega t) \quad (13)$$

dir. Burada k dalga sayısı ($2\pi / \lambda$) ve ω açısal frekanstır. Genellikle bir ses dalgasında basınç değişimleri ile ilgilenmek, dalgayı taşıyan parçacıkların yerdeğiştirmeleri ile ilgilenmekten daha uygundur. Basınçtaki değişim de harmoniktir ve

$$\Delta p = \Delta p_m \sin(kx - \omega t) \quad (14)$$

bağıntısı ile verilir. Δp_m ölçülen basınç değerindeki maksimum değişimdir. Ayrıca basınç genliği öteleme genliği olan s_m ile de orantılıdır.

$$\Delta p_m = \rho v \omega s_m \quad (15)$$

$\omega = kv$ yazılırsa, basınç değişim genliği ile yerdeğiştirme genliği arasındaki ilişki

$$\Delta p_m = k\rho v^2 s_m \quad (16)$$

ifadesi ile verilir. Sonuç olarak bir ses dalgası, bir basınç dalgası veya bir yerdeğiştirme dalgası olarak düşünülebilir. (13) ve (14) eşitlikleri, basınç dalgasının öteleme dalgası ile arasında 90° faz farkı olduğunu gösterir: Yani bir noktadaki denge konumuna göre yerdeğiştirme maksimum veya minimum ise o noktadaki basınç değişimi sıfırdır; eğer bir noktadaki denge konumuna göre yerdeğiştirme sıfır ise o noktadaki basınç değişimi maksimumdur.

Ses şiddet düzeyi (ses düzeyi), metre kare başına Watt (W) cinsinden ses şiddeti birimi yerine daha çok desibel (dB) cinsinden belirtilir. Desibel, bilimsel literatürde ve popüler medyada tercih edilen birimdir. Bu birim seçiminin nedenleri, sesleri nasıl algıladığımızla ilgilidir. Kulaklarımızın sesi nasıl algıladığı, doğrudan şiddetten ziyade şiddetin logaritması ile daha doğru bir şekilde tanımlanabilir. Metre kare başına Watt cinsinden I şiddetine sahip bir sesin desibel cinsinden ses şiddeti düzeyi,

$$\beta(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (17)$$

ifadesiyle tanımlanır. Burada $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ olan bir referans şiddettir. Özellikle, I_0 , 1000 Hz frekansta normal işiten bir kişinin algılayabileceği en düşük veya eşik ses şiddetidir. Ses düzeyi, sesin şiddet ile aynı değildir. β , bir oran olarak tanımlandığından, sabit bir değere (bu durumda 10^{-12} W/m^2) göre sesin şiddetinin düzeyini söyleyen birimsiz bir niceliktir. Tanımında bu oranın 10 ile çarpıldığını belirtmek için desibel (dB) birimi kullanılır. Desibelin dayandığı “Bell”, adını telefonun mucidi Alexander Graham Bell'den almıştır.

10^{-12} W/m^2 eşik şiddetine sahip bir sesin desibel seviyesi $\beta = 0$ dB'dir, çünkü $\log_{10} 1 = 0$. Yani işitme eşiği 0 desibeldir. Tablo 2, bazı sesler için desibel cinsinden ses düzeylerini ve metre kare başına Watt

cinsinden şiddetleri verir. Çizelge 2'deki şiddetlerle ilgili daha çarpıcı olan şeylerden biri, metre kare başına Watt cinsinden şiddetin, çoğu ses için oldukça küçük olmasıdır. Kulak, metre kare başına Watt'ın trilyonda birine kadar duyarlıdır - kulak zarının alanının sadece 1 cm² olduğunu fark ettiğinizde daha da etkileyicidir, böylece işitme eşiğinde kulaktaki şiddet 10⁻⁶ W'a düşer! Bu şiddetteki bir ses dalgasındaki hava molekülleri, bir moleküler çaptan daha küçük bir mesafede titreşir. Çizelge 2'deki seslerin bir başka etkileyici özelliği de sayısal aralıklarıdır. Ses şiddeti, eşik seviyesinden saniyeler içinde hasara neden olan bir sese (10¹² kata) kadar değişir. Ses şiddetindeki bu muazzam aralığın farkında değiliz çünkü kulaklarımızın nasıl tepki verdiği yaklaşık olarak şiddetin logaritması olarak tanımlanabilir. Bu nedenle, ses düzeylerini desibel cinsinden ifade etmek, metre kare başına Watt biriminde ifade etmekten daha uygundur. Desibel ölçeğini ilişkilendirmek de daha kolaydır; çünkü çoğu insan 0.53 veya 120 gibi sayılarla uğraşmaya, 1.001x10⁻¹¹ gibi sayılarla uğraşmaktan daha alışkındır.

Tablo 2: Bazı sesler için ses düzeyleri ve şiddetleri.

| Ses düzeyi β (dB) | Şiddet I (W/m ²) | Örnek/Etki |
|----------------------------|-----------------------------------|---|
| 0 | 1x10 ⁻¹² | 2 Hz' de işitme eşiği |
| 10 | 1x10 ⁻¹¹ | Yaprakların hışırtısı |
| 20 | 1x10 ⁻¹⁰ | 1m mesafeden fısıltı |
| 30 | 1x10 ⁻⁹ | Sessiz ev |
| 40 | 1x10 ⁻⁸ | Orta seviyedeki sese sahip ev |
| 50 | 1x10 ⁻⁷ | Orta seviyedeki sese sahip işyeri, hafif müzik |
| 60 | 1x10 ⁻⁶ | Normal konuşma |
| 70 | 1x10 ⁻⁵ | Gürültülü ofis, yoğun trafik |
| 80 | 1x10 ⁻⁴ | Yüksek sesli radyo, dersteki bir sınıf |
| 90 | 1x10 ⁻³ | Ağır bir kamyonun içinde; uzun süreli maruz kalmadan kaynaklanan hasar * |
| 100 | 1x10 ⁻² | Gürültülü fabrika, siren 30 m'de; günde 8 saat maruz kalmadan kaynaklanan hasar |
| 110 | 1x10 ⁻¹ | Günde 30 dakika maruz kalmadan |

| | | |
|-----|-----------------|---|
| | | kaynaklanan hasar |
| 120 | 1 | Yüksek sesli rock konseri, 2 m'de pnömatik parçalayıcı; acı eşiği |
| 140 | 1×10^2 | 30 m'de jet uçağı; şiddetli ağrı, saniyeler içinde hasar |
| 160 | 1×10^4 | Kulak zarının patlaması |

1.4. Sesin Rezonansı

Ses kaynağının oluşturduğu dalgalar hareket yolu üzerindeki maddeler ile etkileşerek maddeyi titreştirebilirler. Gelen ses dalgasının frekansı, maddenin doğal titreşim frekansı ile aynı ise madde titreşimindeki genlik maksimum olur. Bu olaya rezonans denir. Örneğin; birbiri ile aynı özellikte olan iki diyapazondan (ses çatalı) birine vurulduğunda diğer diyapazonun da titreştiğini ve ses çıkardığını, jet uçakları geçerken camların titreştiğini gözlemleyebiliriz. Her cismin, elastikiyetine ve kütlesine bağlı olarak özel bir frekansı vardır ve bu frekans doğal frekans olarak adlandırılır. Cisimler doğal frekansı ile aynı frekansta bir ses kaynağı tarafından uyarıldığında maksimum genliğe ulaşır ve şayet sistemi uyarmaktan vazgeçilirse sürtünme(ler)den kaynaklı olarak zaman içerisinde genlik azalır. Dışarıdan bir frekans ile uyarılması durumundaki titreşime zoraki titreşim denir. 1940 yılında Tacoma köprüsü (Washington, Amerika Birleşik Devletleri) (Şekil 19), kesintili rüzgâr etkisinin neden olduğu periyodik titreşimler ile köprünün doğal frekansının eşitlenmesi sonucunda rezonansa uğramış ve salınım genliğinin artması sonucunda yıkılmıştır. Zorlamalı titreşimlerle herhangi bir yapıyı rezonansa ulaştırarak yıkma veya kırma düşüncesi üzerinde halen stratejik çalışmalar sürdürülmektedir.



Şekil 19: Tacoma köprüsü, köprü ayaklarındaki açıklıklardan geçen rüzgarın köprü'nün doğal frekansında esmeye devam etmesi sonucunda meydana gelen rezonans etkisiyle yıkılmıştır.

1.4.1. Boruların Akustiği

İki ucu sabitleştirilmiş bir sicim, enine çekilip bırakılırsa sicim boyunca ilerleyen enine titreşimler oluşur. Bu etkiler sabit uçlardan yansıyarak geri döner ve bir durağan dalga sistemi meydana gelir. Bu dalga sistemi, sicimin titreşiminin doğal yapısını uyarır ve titreşimlerin çevredeki hava içinde boyuna dalgalar üretmesine neden olur. İki ucu sabit L uzunluğunda bir sicimin üzerinde oluşan dalga hareketinin frekansı,

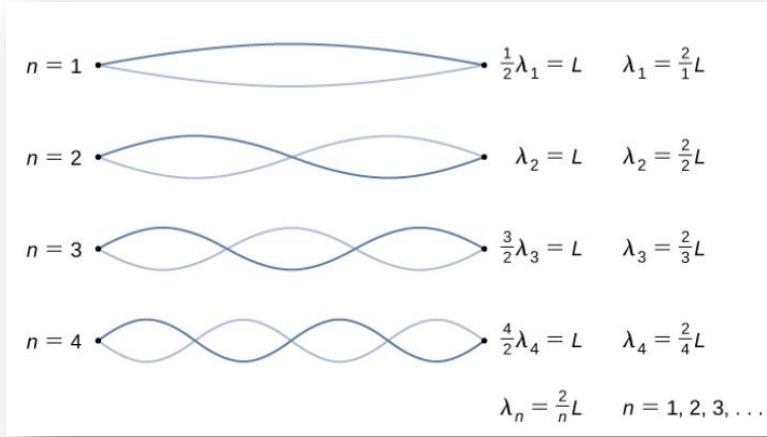
$$f_n = \frac{n}{2L} v = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F_T}{\mu}}, n=1,2,3... \quad (18)$$

ile verilir. Burada v enine dalgaların hızını ve F_T gerilme kuvvetini göstermektedir. Hız $v \left(= \sqrt{\frac{F_T}{\mu}} \right)$ tüm frekanslar için aynıdır. Bu frekansların herhangi birinde titreşen telin iki ucu arasında n tane düğüm vardır. Tel uçlarının bir düğüm olabilme şartı Şekil 20'de

gösterilmiştir. En küçük $\sqrt{\frac{F_T}{\mu}}$ değerine temel frekans, diğerlerine de üst frekanslar denir. Tam katları olanlara da harmonikler denir. Şayet telin şekli, herhangi bir harmoniğin şekli ile özdeş olana kadar değiştirilirse, tel serbest bırakıldığında aynı harmonik frekansta titreşir. Tele uygulanan başlangıç şartlarından kaynaklanan titreşim, temel frekansta olduğu gibi diğer harmoniklerde de olur. Bu durumda tel üzerinde değişik yapılardaki titreşimlerin üst üste binmesi gözlemlenir. Yer değiştirme değişik yapıdaki titreşim genliklerinin toplamıdır.

Bir tüp boyunca ilerleyen dalgalar tüpün uç noktalarından yansiyarak geri dönerler. Ters yönde ilerleyen dalgaların girişimi sonucu boyuna duran dalgalar meydana gelir. Gelen dalga ile yansıyan dalga arasındaki ilişki, tüpün yansıyan ucunun açık veya kapalı olmasına bağlıdır. Ses dalgasının bir kısmı açık uçta bile tüpe geri yansır. Bir uç kapalıysa, hava hareketi kısıtlandığından, o uçta bir düğüm bulunmalıdır. Uç açıksa, hava elementleri tam hareket serbestliğine sahiptir ve bir karın (antinot veya ayrık) vardır. Eğer tüpün uç noktaları kapalı ise gelen dalga ile yansıyan dalga arasındaki faz farkı 180° olur. Bu olay kapalı uçtaki küçük hacim elemanlarının yer değişiminin daima sıfır olmasının bir sonucudur. Böylece bir kapalı uç bir yer değişim düğümüdür. Eğer tüpün ucu açıksa, oradaki akışkan elemanları hareket etmekte serbesttir. Buna rağmen o noktadaki yansıma tüpün dalga boyu ile karşılaştırıldığında, geniş veya dar olmasına bağlıdır. Eğer tüp dar ise, yansıyan dalga ile gelen dalga aynı fazdadır. Bu durumda açık uç daima bir yer değişim ayrığıdır. Eğer borunun iki ucu açık ise ve hava akımı bir uca yönelmiş ise tüp içinde duran boyuna dalgalar oluşabilir ve bu durumda yukarıda verilen (18)

denkleminde göre hava tabakası $f_n = \frac{n}{2L}v$ ($n=1,2,3\dots$) ile verilen doğal frekansta titreşir. Burada v , havadaki sesin hızı, n yarım dalga boylarının sayısı ve L borunun uzunluğudur. Borunun bir ucu açık ve diğeri kapalıysa, açık uç bir antinottur ve kapalı uç bir düğümdür.



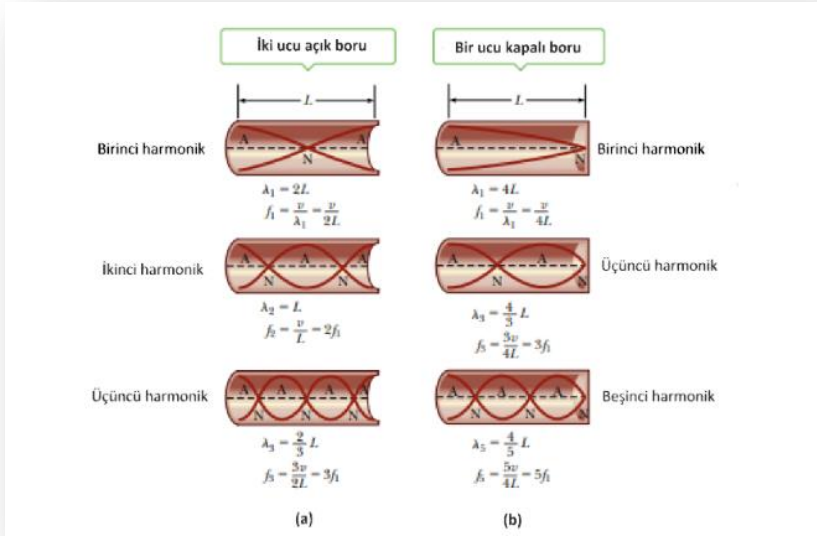
Şekil 20: İki ucundan sabitleştirilmiş, L uzunluğunda bir sicim üzerinde oluşturulan duran dalgalar. Sicimin her iki ucunda birer düğüm oluşur. Düğümler, duran dalgaları harekete geçiren olası frekansları sınırlayan sınır koşullarıdır. (Salımların genliklerinin görselleştirme için sabit tutulduğuna dikkat ediniz. İp üzerinde mümkün olan duran dalga desenleri normal modlar olarak bilinir. Frekans arttıkça genlikte bir azalmaya neden olur).

Şekil 21 (a) da gösterildiği gibi iki ucu açık boruda temel frekans, iki uçta bir karın noktası ortada ise bir düğüm noktası oluşturur. Şekil 21 (a) da daha üst mertebeden, ikinci ve üçüncü titreşim yapıları da gösterilmiştir. Dolayısıyla iki ucu açık boruda temel

frekans $\frac{v}{2L}$ olup, diğer harmonikler mevcuttur.

Kapalı boruda ise kapalı uç bir düğüm noktasıdır. Şekil 21 (b)'de bir ucu kapalı borudaki titreşimler gösterilmiştir. Temel frekans, aynı uzunluktaki açık boru frekansının yarısına eşittir. Şekil 21 (b)'den de görüldüğü gibi ikinci ve dördüncü harmonikler mevcut değildir.

Kapalı boruda temel frekans $\frac{v}{4L}$ olup bu frekansın yalnız tek katları bulunur. Bu nedenle kapalı ve açık borulardan elde edilen sesler birbirinden farklıdır. Flüt, trompet gibi pek çok nefesli saz, açık borulardan elde edilir. Orgda her bir borudan tek ses çıkar. Fakat borunun boyu uzatılıp kısaltılarak sesi değiştirilebilir.



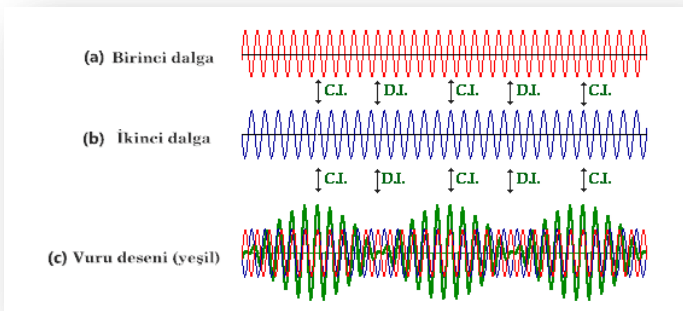
Şekil 21: (a) Her iki ucu açık olan bir org borusunun ilk üç titreşim modunu göstermektedir. Doğal frekans f_1 , $2f_1$, $3f_1$ 'dir. (b) Bir ucu kapalı olan bir org borusu, sadece tek harmonikler mevcuttur ve doğal frekanslar f_1 , $3f_1$, $5f_1$ ve benzerleridir. N ve A yerdeğişim düğümü ve karınlarını göstermektedir.

1.4.2. Girişim

Aynı frekansta ve bir çizgi üzerinde zıt yönde hareket eden dalga katarı, üst üste binme ilkesine göre duran dalgalar meydana getirir. Bu dalgaları nitelendirmek için, Şekil 20'de olduğu gibi genliğin grafiğini uzaklığın fonksiyonu olarak çizebiliriz. Bu bize uzaysal girişimi gösterir. Üst üste binme ilkesi kullanılarak, zaman içinde girişim elde edilebilir. Frekansları biraz farklı iki dalga katarı aynı ortam içinde yayılıyorsa zaman içinde girişim meydana gelebilir. Ses için böyle bir durum bir piyanonun birbirine yakın iki tuşuna aynı anda vurulduğunda elde edilebilir. Böyle iki dalganın yayıldığı ortamın herhangi bir noktasını göz önüne alırsak, bu noktada her iki dalgaya ait yer değiştirmeler zamanın fonksiyonu olarak Şekil 22 a ve b'de gösterilmiştir. Basitlik sağlamak amacıyla iki dalganın genliklerinin eşit olduğu kabul edilirse, titreşimlerin toplanması ile elde edilen

bileşke titreşim zamanın fonksiyonu olarak Şekil 22’c de gösterilmiştir. Bu şekilden, verilen noktadaki genliğin sabit olmadığı ve zamanla değiştiği görülmektedir. Ses dalgaları için genliğin bu şekilde değişmesi, ses yüksekliğinde değişmelere sebep olur. Bu dalgalara vuru denir. Titreşen iki sicim veya tel birbirinin genliğini vurular kayboluncaya kadar değiştirmek suretiyle aynı frekansa getirebilir.

Vurular, birbirine çok benzer frekanslarda iki ses dalgası girişim yaptığında, bir sesin şiddetinde duyulan periyodik ve tekrarlayan dalgalanmalardır. Aşağıdaki şema, çok benzer frekanslara sahip iki dalgadan (kırmızı ve mavi çizilmiş) kaynaklanan dalga girişim modelini göstermektedir. Bir vuru deseni, genliği düzenli bir oranda değişen bir dalga ile karakterize edilir. Vuru modelinin (yeşille çizilmiş) desen boyunca tekrar tekrar sıfır genlikten büyük bir genliğe, tekrar sıfır genliğe salındığı gözlemlenebilir. Yapıcı girişim (C.I.) ve yıkıcı girişim (D.I.) noktaları Şekil 22’de belirtilmiştir. İki tepe veya iki çukur arasında yapıcı girişim meydana geldiğinde, yüksek bir ses duyulur. Bu, vuru desenindeki (yeşille çizilmiş) bir tepe noktasına (yapıcı girişime) karşılık gelir. Bir tepe ve bir çukur arasında yıkıcı girişim meydana geldiğinde, hiçbir ses duyulmaz; bu, vuru deseninde yer değiştirme olmayan bir noktaya (yıkıcı girişime) karşılık gelir.



Şekil 22: (a) ve (b) Frekansları birbirinden çok az farklı iki dalga, (c) bu iki dalganın birleşimi ve zamanla değişim gösteren dalga zarfı-vuru deseni (yeşil renk).

Aynı ortamda yayılan iki dalganın ortamın herhangi bir noktasındaki yer değişimleri,

$$y_1 = y_m \cos 2\pi f_1 t \quad (19)$$

ve

$$y_2 = y_m \cos 2\pi f_2 t \quad (20)$$

şeklinde yazılabilir. Üst üste binme ilkesine göre bileşke yer değiştirmesi,

$$y = y_1 + y_2 = y_m (\cos 2\pi f_1 t + \cos 2\pi f_2 t) \quad (21)$$

dir. Diğer taraftan,

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha - \beta}{2} \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \quad (22)$$

olduğu için, bileşke yer değişim,

$$y = \left[2y_m \cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right) t \right] \cos 2\pi \left(\frac{f_1 + f_2}{2} \right) t \quad (23)$$

şeklinde yazılabilir. Bu durumda bileşke titreşim frekansı,

$$f = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (24)$$

olur. Bu sonuç iki dalganın ortalama frekansıdır ve köşeli parantez içindeki ifade genliği verir. Genlik zamana göre

$$f = \frac{f_1 - f_2}{2} \quad (25)$$

frekansı ile değişir. Eğer f_1 ve f_2 frekansları yaklaşık olarak eşit ise bu terim küçük olacağı için genlik çok yavaş değişecektir. Bu olaya genlik modülasyonu denir.

Eğer,

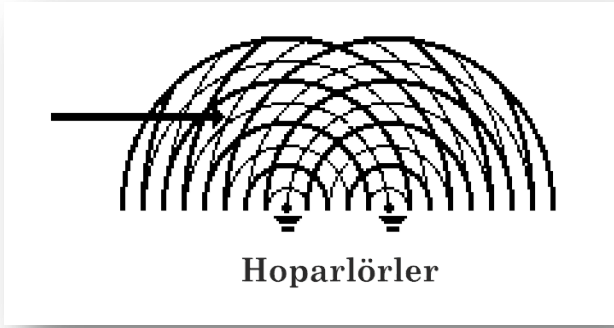
$$\cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right) t \quad (26)$$

ifadesi +1 veya -1'e eşit olursa bir tam vuru veya maksimum genlik meydana gelmiş olur. Her devirde bir defa böyle bir durum oluşacağı için saniyedeki vuruların sayısı frekansın iki katına eşit olur. Yani,

$$f_{\text{vuru}} = f_1 - f_2 \quad (27)$$

dir. Sonuç olarak bir saniyedeki vuruların sayısı (veya vuru frekansı) frekanslar arasındaki farka eşittir.

Şimdi, iki hoparlörden gelen iki ses dalgasının girişimini inceleyelim. Hoparlörlerin yaklaşık 1 metre arayla yerleştirilmiş olduklarını ve aynı frekanslarda ses dalgaları ürettiklerini düşünelim. İki ses dalgası, hoparlörlerin önünde havada dolaşarak, odanın içinde küresel bir biçimde yayılırlar. Bu dalgaların bir anlık görünümü Şekil 23'de verilmiştir. Diyagramda, bir dalga cephesinin sıkıştırmaları kalın bir çizgi ile temsil edilmiş ve gevşetmeleri ince çizgilerle temsil edilmiştir. Elbette yüksek sesler, sıkıştırmaların sıkıştırmalarla bulunduğu veya gevşetmelerin gevşetmelerle bulunduğu yerlerde duyulur. “Sessiz” konumlar, dalgalardan birinin sıkıştırtmasının (kompresyonunun) diğer dalganın gevşetmesiyle (seyrekliğiyle) bulunduğu her yerde görünür. Bir kulağınızı tıkayıp diğer kulağınızı hoparlörlerin bulunduğu yere çevirseniz ve oda boyunca hoparlörlerin düzlemine paralel olarak ok yönünde (Şekil 23) yavaş yavaş yürüseniz, inanılmaz bir olayla karşılaşacaksınız. Alternatif olarak, düğüm noktaları olmayan konumlara yaklaşırken yüksek sesler duyarsınız ve düğüm konumlarına yaklaşırken neredeyse hiç ses duymazsınız. (Genellikle gözlemleneceği gibi, ses dalgalarının duvarlardan yansımaları nedeniyle düğüm konumları gerçek düğüm konumları değildir. Bu yansımalar tüm odayı yansıyan sesle doldurma eğilimindedir).



Şekil 23: Aynı frekansta ses dalgası üreten iki hoparlör.

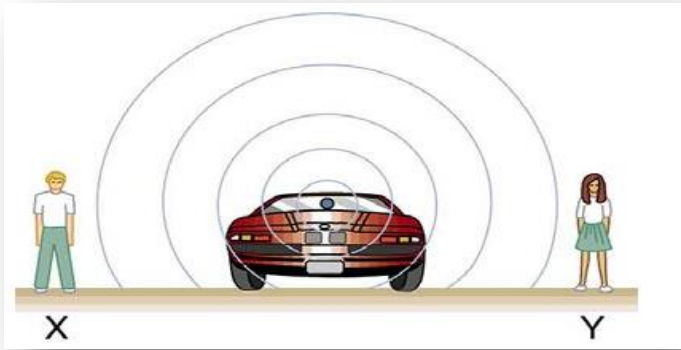
Vuru frekansı her zaman vuruları üretmeye müdahale eden iki notanın frekans farkına eşittir. Dolayısıyla, 254 Hz ve 256 Hz frekanslı iki ses dalgası aynı anda çalınırsa, 2 Hz'lik bir vuru frekansı algılanacaktır. Çok benzer frekanslara sahip iki diyapazon kullanarak vuru üretilebilir. Şöyle ki, iki özdeş diyapazondan birinin çatalı bir lastik bantla sarılırsa bu diyapazonun frekansı düşecektir. Her iki diyapazon birlikte titreşirse, biraz farklı frekanslarda sesler üretecekleridir. Bu sesler algılanabilir vurular üretmeye engel olacaktır. İnsan kulağı 7 Hz ve altındaki frekanslardaki pulsları algılayabilmektedir.

1.5. Doppler Etkisi

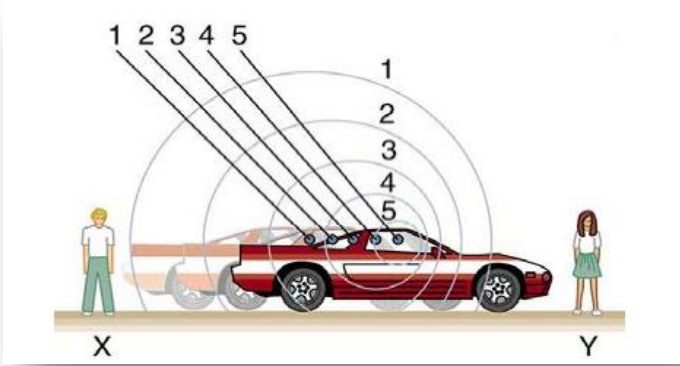
Kaynağın veya gözlemcinin bağıl hareketinden dolayı bir sesin gözlemlenen frekansındaki değişiklik, Doppler etkisi olarak tanımlanır. Örneğin, sabit bir uyarı zilin yanından bir trene binerseniz, yanından geçerken zilin frekansının yüksekte alçağa geçişini duyacaksınız. Kaynak ve gözlemcinin bağıl hareketinden dolayı frekanstaki gerçek değişime Doppler kayması denir. Doppler etkisi ve Doppler kayması adını, hem hareketli kaynaklar hem de hareketli gözlemciler ile deneyler yapan Avusturyalı fizikçi ve matematikçi Christian Johann Doppler (1803-1853)'den almıştır. Christian Johann Doppler, hareket eden bir açık tren vagonunda ve ayrıca bir tren geçerken tren raylarının

yanında müzisyenlerin ayakta çalmalarını sağladı. Müzikleri hem trende hem de tren dışında gözlemlendi ve frekans değişimlerini ölçtü.

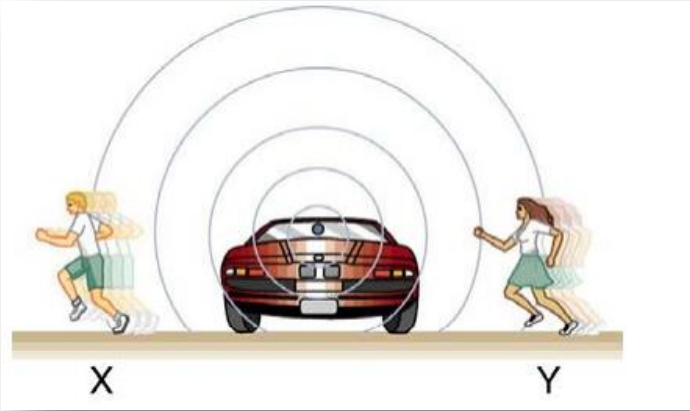
Doppler kaymasına ne sebep olur? Şekil 24-26'da, kararlı bir hava kütesinde, sabit ve hareketli kaynaklardan yayılan ses dalgaları karşılaştırılmaktadır. Havadaki her bozulma, sesin yayıldığı noktadan küresel olarak yayılır. Kaynak durağan ise, ses dalgasındaki hava sıkışmalarını temsil eden tüm küreler aynı noktada merkezlenir ve her iki taraftaki durağan gözlemciler, 24'de olduğu gibi kaynağın yaydığı aynı dalga boyunu ve frekansı görür. Kaynak hareket ediyorsa, Şekil 25'deki gibi durum farklıdır. Havanın her sıkışması, yayıldığı noktadan bir küre içinde hareket eder, ancak emisyon noktasının hareketli olması hava sıkışmalarının bir tarafta birbirine daha yakın, ters tarafta ise daha uzak olmasına neden olur. Böylece dalga boyu kaynağın hareket ettiği yönde daha kısadır (25'de sağda) ve ters yönde daha uzundur (25'de solda). Son olarak, eğer gözlemciler Şekil 26'daki gibi hareket ederse, kaynağa doğru hareket eden gözlemci onları daha yüksek bir frekansta duyar ve kaynaktan uzaklaşan kişi onları daha düşük bir frekansta duyar.



Şekil 24: Bir kaynaktan küresel dalgalar hâlinde yayılan sesler. Kaynak, gözlemciler ve hava sabit olduğundan, tüm gözlemciler için ve tüm yönlerde dalga boyu ve frekans aynıdır (<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/17-7-the-doppler-effect>).



Şekil 25: Sağa doğru hareket eden bir kaynağın yaydığı sesler, yayımlandıkları noktalardan dışarıya doğru yayılır. Dalga boyu azalır ve sonuç olarak frekans hareket yönünde artar, böylece sağdaki gözlemci daha yüksek perdeli bir ses duyar. Soldaki gözlemci için bunun tersi geçerlidir, burada dalga boyu artar ve frekans azalır (<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/17-7-the-doppler-effect>).



Şekil 26: Şekil 25'de verilen etkinin aynısı, gözlemciler kaynağa göre hareket ettiğinde de üretilir. Kaynağa doğru hareket eden sağdaki gözlemci, sabitken yapacağından daha fazla dalga tepesinden geçtiği için, sesin frekansı artar. Kaynaktan uzaklaşan soldaki gözlemci, sabitken olduğundan daha az dalga tepesinden geçtiği

için sesin frekansı azalır (<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/17-7-the-doppler-effect>).

Hareketli bir kaynak ve sabit bir gözlemci için, gözlemci tarafından gözlemlenen frekans $f_{gözlemci}$ aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$f_{gözlemci} = f_{kaynak} \left(\frac{v_w}{v_w \mp v_{kaynak}} \right) \quad (28)$$

f_{kaynak} kaynağın frekansı, v_{kaynak} kaynağın kaynak ile gözlemciyi birleştiren bir hat boyunca sürati ve v_w sesin süratidir. Kaynağın sürati ne kadar yüksek olursa, etkinin de o kadar büyük olduğuna dikkat ediniz. Benzer şekilde, durgun bir kaynak ve hareketli bir gözlemci için, gözlemci tarafından algılanan frekansa ilişkin $f_{gözlemci}$ formülü şu şekilde verilir:

$$f_{gözlemci} = f_{kaynak} \left(\frac{v_w \mp v_{gözlemci}}{v_w} \right) \quad (29)$$

burada $v_{gözlemci}$ kaynak ile gözlemciyi birleştiren bir çizgi boyunca gözlemcinin süratidir. Kaynağa doğru hareket için artı işareti, kaynaktan uzaklaşan hareket için eksi işareti kullanılır. Eğer ortam içinde hem gözlemci hem de kaynak hareket ediyorsa, gözlemcinin işittiği sesin frekansı

$$f_{gözlemci} = f_{kaynak} \left(\frac{v_w \mp v_{gözlemci}}{v_w} \right) \left(\frac{v_w}{v_w \mp v_{kaynak}} \right) \quad (30)$$

bağıntısı ile verilir. Soldaki parantez içindeki değer, hareketli bir gözlemci nedeniyle oluşan Doppler kayması sebebi ile ölçülen frekanstır. Sağdaki parantezli çarpan, hareketli kaynağın etkisidir.

Doppler etkisi sadece ses için değil, gözlemci ile kaynak arasında göreceli hareket olduğunda herhangi bir dalga için de ortaya çıkar. Örneğin ses, ışık ve su dalgalarının frekansında, Doppler kaymaları vardır.

Doppler kaymaları, tıbbi bir teşhiste ultrasesin kan damarları içerisinde bulunan kan hücrelerine çarparak geri yansıtılmasında olduğu gibi, hızı belirlemek için kullanılabilir. Trafikte pratik hız kontrollerinde de Doppler olayı kullanılmaktadır. Doppler olayından sadece insanlar değil yarasalar ve balinalar da yararlanmaktadır. Galaksilerin hareket durumları, onlardan alınan ışığın frekanslarındaki değişim sayesinde belirlenmekte ve evrenin kökenleri hakkında çok şey öğrenilmektedir.

2. SES ÜSTÜ OLAYLAR

2.1. Süpersonik ve Sonik Patlamalar

Daha önce de belirttiğimiz gibi, havada sesin sürati, deniz seviyesinde saatte yaklaşık 1236 km'dir. Bu sürat, bir yarış arabasınınkinden yaklaşık dört kat daha büyüktür. Bir silahtan ateşlenen mermi süpersonik süratlerde uçar. Bu süratler Mach sayılarıyla ifade edilir. Mach sayısı, uçağın süratının ses süratine oranıdır. Mach 1'den daha süratli olan uçuş, süpersoniktir. Sesin süratının beş katına ulaşan sürat, Mach 5 ile gösterilir.

Uçaklar ses bariyerini aştığında (sesten daha süratli hareket ettiğinde), bir ses patlaması meydana gelir. Günümüzde savaş uçaklarının -F 16 bunlara örnektir- büyük bir kısmı süpersonik uçaklardır. Bu sürat sınırının aşılması sonucunda oluşan ses patlamasına sonik patlamalar denilmektedir. Sonik patlama bir koni şeklinde yayılır (buna "Mach konisi" de denir). Yerdeki bir kişi, bir uçak süpersonik hızlarda tepeden uçtuğunda bir ses patlaması duyar. Gürültü, hava basıncının hızlı bir şekilde serbest bırakılmasından

kaynaklanır. Basınç bırakıldığında, yüksek bir ses çıkarır. Bu, bir balonun patlamasına benzer. Balonu patlatan bir iğne, balonun içindeki hava basıncını serbest bırakır ve yüksek bir "patlamaya" neden olur.

Bir uçağın ses hızından daha hızlı uçuşu ilk olarak 1947'de⁴ gerçekleşti. Bu hızlarda bir uçuş, İstanbul-New York gibi transatlantik rotalarda yolculuk sürelerini yarıya indirilebilir. Süpersonik, ses süratinden beş kata kadar daha yüksek olan süratleri kapsamaktadır. Bunlara uçuş rejimleri denir. Uçuş rejimleri ses altı, transonik, süpersonik ve hipersonik tir. Ses altı uçuş: Mach 1'den azdır: Bu, insan ve kargo taşıyan ticari uçakların çoğunun sahip olduğu hızdır. Transonik uçuş: Mach 1 veya civarındadır. Hipersonik uçuş ise Mach 5'ten büyük hızları içerir. Bu, ses hızının beş katından fazladır. Roketlerin ve uzay mekiğinin yörüngeye girerken sahip oldukları hızlardır.

Uzay mekiği, görevinin bir bölümünde süpersonik hızlarda uçar. Yolcuları süpersonik hızlarda uçuran en ünlü uçağa Concorde adı verilmişti. 1976'da hizmete giren, 2003 yılında uçmayı bırakan Concorde'un en yüksek hızı, ses hızının iki katından fazlaydı (maksimum Mach 2.04). Süpersonik yolcu seyahatiyle ilgili iki büyük endişe vardır: gürültü ve kirlilik. Ses hızından daha hızlı seyahat etmek, yerde yüksek bir gök gürültüsü veya patlama olarak duyulabilen bir sonik patlamaya neden olur. Yakıt tüketimi ve karbon emisyonu da şimdilik endişe verici boyutlarda gerçekleşmektedir.

Havacılık, uçuş bilimini elzem kılmaktadır. Süpersonik uçuş hakkında daha fazla bilgi edinmek, uçakların süpersonik hızlarda daha iyi performans gösterecek şekilde tasarlamasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca uzayı keşfetmek için kullanılan yeni araçların tasarımına da yardımcı olabilir. Uzay araçları da süpersonik hızlarda uçar. Uzay mekiği gibi roketler, kalkıştan sonra süpersonik hızlarda uçarlar. Kalkıştan yaklaşık 45 saniye sonra, yaklaşık iki dakika sonrasına kadar, mekik Mach 1'den Mach 5'e hızlanır. Fırlatma araçları, Dünya'nın üst atmosferindeyken hipersonik hızlarda -Mach 5'ten daha büyük hızlarda-

⁴ Dokuz yıl sonra, 1956'da X-2, Mach 3'e veya ses hızının üç katına ulaşan ilk uçak oldu.

uçarlar. Atmosfere yeniden giriş sırasında, uzay aracı yavaşlar. İniş için Dünya atmosferinin alt kısmına ulaştığında süpersonik hızlara ulaşır.

Araştırmacılar, rüzgâr tüneli deneylerinde küçük uçak modellerini kullanarak süpersonik uçuşu simüle edebilmektedirler. Rüzgâr tünelleri, havayı bir araç üzerinde uçuyormuş gibi hareket ettiren tüp şeklindeki yapılardır. Bu yapılar, araştırmacıların bir uçağın nasıl uçacağı hakkında daha fazla bilgi edinmelerine ve yeni tasarımları test etmelerine yardımcı olmaktadır.

Yukarıda bahsettiğimiz sonik patlamalar ve daha önce tanımladığımız Doppler kayması, her tür dalgada meydana gelen ilginç ses olaylarıdır. Birçok yerde kullanılabilirler. Örneğin, ultrasesdeki Doppler kayması kan hızını ölçmek için kullanılabilirken, araba hızlarını ölçmek için radardaki (bir mikrodalga) Doppler kayması kullanılmaktadır. Meteorolojide, fırtına bulutlarının hareketini izlemek için Doppler kayması kullanılmaktadır. Astronomide, uzak galaksilerden yayılan ışığı inceleyebilir ve bizimkine göre hızlarını belirleyebiliriz. Galaksiler bizden uzaklaştıkça, ışıkları daha düşük bir frekansa ve dolayısıyla daha uzun bir dalga boyuna kayar -bu kırmızıya kayma olarak bilinir-. İnsan gözü tarafından algılanan renklerin en düşük frekanslı olanı kırmızı ışık, en yüksek frekanslı olanı ise mavimor ışıktır. Örneğin Dünya'ya yaklaşan gök adalardan gelen ışığın frekansı artarken Dünya'dan uzaklaşan gök adalardan gelen ışığın frekansı azalır.

Çok çok uzaklardaki galaksilerden gelen bu tür bilgiler, evrenin yaşını (Büyük Patlamadan- Big Bang'den) yaklaşık 14 milyar yıl olarak tahmin etmemize imkân vermiştir.

2.2. İşte Bazı Bilinen 194 dB⁺ Olaylar

Satürn V uydusunu fırlatma: Satürn V'nin fırlatılmasından çıkan ses dalgaları o kadar şiddetliydi ki 1.6 km ötede çimenleri ateşe verebilirdi. 4.8 km uzaktaki bir gözlemci, kulakları sağır eden 135 dB'lik bir ses duyabilirdi. Roketin fırlatılması o kadar güçlü bir ses çıkarır ki, roket fırlatıldığında fırlatma rampası su ile doldurur ve roket

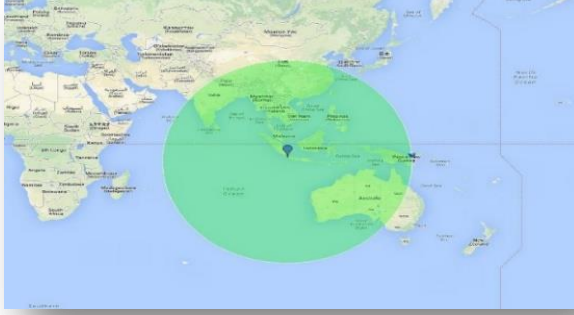
sesini absorbe eder, böylece basınç dalgasının kuvveti rokete zarar vermez.

Hiroşima ve Nagazaki'ye atılan bombalar: Okuduğumuz kaynaklara göre, patlama 200 dB'nin üzerinde bir ses düzeyine sahipti. Şok dalgası o kadar güçlüydü ki, 30 saniyede 11 km yol kat etti.

1883 Krakatoa yanardağının patlaması: Krakatoa, Endonezya'da bir adadır ve 27 Ağustos 1883'te meydana gelen yanardağ patlaması bu adayı tamamen yok etmiştir. Patlama tarihteki en ölümcül ve geniş kapsamlı tsunamilerden birine de neden olmuştur. Patlamada 36000 kişi ölmüştür. Ancak patlamayla ilgili en şaşırtıcı olan patlamanın sesi idi. Modern tarihin tartışmasız en yüksek sesinin bu patlama ile ortaya çıktığı ileri sürülmektedir. Patlamanın sesi o kadar yüksekti ki, şok dalgası 64 km uzaktaki denizcilerin kulak zarlarını patlatacak düzeydeydi. 161 km ötede, ses 172 dB idi, bir insanın kulaklarını kalıcı olarak yok etmeye ve hatta onları öldürmeye yetiyordu. Sesin şiddetini kavrayabilmek açısından, bu patlama ile Satürn V uydusunun fırlatma sesinin karşılaştırılmasında fayda vardır. Şöyle ki; söz konusu patlamada kaynağından 161 km uzaklıkta bile sesin şiddeti 172 dB iken, yine şiddetli bir ses oluşturan Satürn V'nin fırlatma sesi ancak 100 metre uzaklıkta 170 dB idi.

Bu patlama sırasında oluşan ses, 483 km uzakta, yarım metre kalınlığındaki bir beton duvarı çatlattı. Ses Avustralya'da uzaktaki bir kanon topunun ateşlenmesi gibi geliyordu ve hatta 4828 km uzaklıktaki Rodrigues Adası kadar uzaktaki bir yerden duyulabildi.

Şekil 27, Krakatoa Yanardağı Patlamasının etki alanını göstermektedir. Ressam Evard Munch'in çığlık tablosu Şekil 28'de gösterilmiştir.



Şekil 27: Krakatoa Yanardağı Patlaması etki alanı. (<https://i.imgur.com/K9VDEJz.jpg>).



Şekil 28: Ressam Edvard Munch'in “Çığlık” tablosu: Ressam herkesçe bilinen bu eserini, Krakatoa yanardağı patlaması sonrasında Batı Yarımküre'nin her yerinde oluşan kırmızı gökyüzünden ilham alarak hazırlamıştır (<https://www.edvardmunch.org/the-scream.jsp>).

2.3. Diğer Ortamlar

194 dB'den daha yüksek sesler de vardır. Okyanusta, karada ve hatta diğer gezegenlerde daha yüksek sesler olabilir. Örneğin, Güneş Sistemimizdeki gaz devleri, Dünya'ninkinden daha yoğun atmosferlere sahiptir, bu da daha yüksek basınç dalgası genliklerine izin verir ve inanılmaz derecede hızlı rüzgârlar ve güçlü fırtınalar vardır.

Ses, maddenin içinden geçen basınç dalgasıdır. Madde yoksa ses de yoktur. Muazzam bir ısı, radyasyon ve güç olabilir. Varsayımsal olarak, evreni dolduran hava olsaydı, o zaman her yer çok sesli olurdu. Bir süpernova sesinin ürkütücü konseptini unutun; sadece oradaki güneş, 290 dB'lik şaşırtıcı bir ses oluşturacaktı. Astronomi alanında çalışan bir fizikçiye göre, bunu dünya yüzeyinde her zaman, her gün, her yerde 100 dB'lik bir ses olarak duyacaktık. Bu nedenle sesin boşlukta yayılmadığına sevinmeliyiz.

2.4. Ultrases ve Ultrases Görüntüleme

Daha önce de belirtildiği üzere, frekansı 2000 Hz'in (veya 20 kHz) üzerinde, yani duyulabilir en yüksek frekansın üzerinde olan herhangi bir ses ultrases olarak tanımlanır. Pratikte, bir gigahertz'den daha fazla ultrases frekansları oluşturmak mümkün olabilir. (Daha yüksek frekansları oluşturmak zordur; ayrıca, çok güçlü bir şekilde emildikleri için zayıf yayılırlar). Ultrasesin, hırsız alarmlarından temizlikte kullanıma, yaralarının yönlendirme sistemlerine kadar uzanan çok sayıda uygulaması vardır. Ultrasesin hem teşhis hem de tedavi için yaygın olarak kullanıldığı tıptaki bazı uygulamaları ile tartışmamıza başlıyoruz.

Ultrases, herhangi bir dalga gibi, kendisini taşıyan ortam tarafından absorbe edilebilecek enerji taşır ve yoğunluğa göre değişen etkileşimler yaşar. 10^3 ila 10^5 W/m² şiddetlere odaklandığında ultrases cerrahi prosedürlerde safra taşlarını parçalamak veya kanserli dokuyu toz haline getirmek için kullanılabilir. Bu büyüklükteki şiddetler tek tek hücrelere zarar verebilir, çeşitli şekillerde protoplazmalarının içlerine akmasına, geçirgenliklerinin değişmesine veya kavitasyon yoluyla duvarlarının yırtılmasına neden olabilir. Kavitasyon, bir sıvıda buhar boşluklarının yaratılmasıdır (ultrasesdeki boyuna titreşimler alternatif olarak ortamı sıkıştırır ve gevşetir). Çoğu kavitasyon hasarı, boşluklar çöktüğünde meydana gelir ve daha da büyük şok basınçları üretir. Yüksek şiddetli ultrases tarafından dokuda taşınan enerjinin çoğu termal enerjiye dönüştürülür. Aslında, 10^3 'ten 10^4 W/m²'ye kadar olan şiddetler, ultrases diatermi adı verilen derin ısı işlemler için yaygın olarak kullanılmaktadır. Frekansları tipik olarak

0.8 ila 1 MHz arasındadır. Hem atletizmde hem de fizik tedavide, ultrases diatermi çoğunlukla ağrıyı gidermek ve esnekliği artırmak için yaralı veya aşırı çalışan kaslara uygulanmaktadır.

Görüntüleme için kullanıldığında, ultrasonik dalgalar bir dönüştürücüden, piezoelektrik etki (elektriksel etkiyi mekaniksel tepkiye dönüştüren bir maddenin üzerine voltaj uygulandığında kristalin titreşimine neden olan genleşme ve büzülme) sergileyen bir kristalden yayılır. Bu yüksek frekanslı titreşimler, dönüştürücü ile temas hâlinde olan herhangi bir dokuya iletilir. Benzer şekilde, kristale bir basınç uygulanırsa (doku katmanlarından yansıyan bir dalga şeklinde), bir voltaj üretilir. Bu nedenle kristal, hem ses vericisi hem de alıcısı olarak işlev görür. Ultrases ayrıca, hem dönüştürücüden uzaklaşırken hem de dönüş yolculuğunda, yolu üzerindeki doku tarafından kısmen emilir. Orijinal sinyalin gönderildiği ve ortamlar arasındaki çeşitli sınırlardan yansımaların alındığı (aynı zamanda sinyalin şiddet kaybının bir ölçüsü) zaman farkından, dokular ve organlar arasındaki her sınırın doğası ve konumu çıkarılabilir.

2.5. Bazı Ultrases Uygulamaları

Ultrasesin endüstriyel ve diğer araştırma uygulamaları yaygındır. Burada birkaç tanesini tartışacağız. Ultrasonik temizleyicilerin birçok kullanım alanı vardır. Mücevherat, işlenmiş parçalar ve garip şekillere ve yarıklara sahip diğer nesnelere, tipik olarak yaklaşık 40 kHz frekansta ultrasesle çalkalanan bir temizleme sıvısına daldırılır. Şiddet, temizleme eyleminin çoğundan sorumlu olan kavitasyona neden olacak kadar büyüktür. Kavitasyon kaynaklı şok basınçları büyük olduğundan ve bir sıvı içinde iyi bir şekilde iletildiğinden, düşük yüzey gerilimli temizleme sıvısının bile giremeyeceği küçük yarıklara ulaşırlar.

Sonar, ultrasesin tanıdık bir uygulamasıdır. Sonar tipik olarak 30.0 ila 100 kHz aralığında ultrasonik frekanslar kullanır. Yarasalar, yunuslar, denizaltılar ve hatta bazı kuşlar ultrasonik sonar kullanır. Yarasalar da etraflarındaki engelleri ses dalgaları ile fark ederler. Gemicilikte deniz derinlikleri bu yolla ölçülmektedir. Çoğu sonar

uygulamasında ses oldukça iyi yansıtılır; çünkü ilgilenilen nesnelere şiddeti, içinde seyahat ettikleri ortamdan önemli ölçüde farklıdır. Doppler kayması gözlemlendiğinde hız bilgisi de elde edilebilir. Bu tür bilgileri elde etmek için denizaltı sonarı kullanılabilir. Daha önce de bahsettiğimiz üzere, bazı yaraların da yankılardan hız algıladıklarına dair kanıtlar da vardır.

Benzer şekilde, ultrasonik yankıları zamanlayarak mesafeyi ölçen nispeten ucuz bir dizi cihaz vardır. Örneğin birçok kamera, otomatik olarak odaklanmak için bu tür bilgileri kullanır. Bazı kapılar, ultrasonik mesafe belirleme cihazları yakındaki bir nesneyi algıladığında açılır. Oda boyutları gibi şeyleri ölçmek için ultrasonik “ölçüm bantları” da mevcuttur. Umumi tuvaletlerdeki lavabolar insanlar ellerini yıkarken muslukları açıp kapatmak için ultrases cihazlarıyla otomatikleştirilir. Bu cihazlar mikropların yayılmasını azaltır ve su tasarrufu sağlayabilir.

Ultrases, endüstride ve orduda tahribatsız muayene için de kullanılır. Ultrases, şiddetteki herhangi büyük bir değişikliği iyi yansıttığından, uçak kanatları gibi katı cisimlerde x-ışınları ile görülemeyecek kadar küçük çatlakları ve boşlukları ortaya çıkarabilir. Benzer nedenlerle ultrases, özellikle birkaç tabakalı kaplamalı yapılar söz konusu olduğu durumlarda, kaplamaların kalınlığını ölçmek için de kullanılmaktadır.

Ultrases kullanımına ilişkin bu örnekler, meraklıların iştahını açmanın yanı sıra ultrasonun altında yatan fiziğini göstermeyi amaçlamıştır. Kolayca keşfedebileceğiniz daha pek çok uygulama sizlerin keşiflerini beklemektedir.

3. İŞİTME

3.1. İşitme Nedir?

İşitme⁵; kimyasal etkileşimlere dayanan koku veya tat duyularının aksine, kulağın, kulağa giren ses dalgalarını beynin anlayabileceği elektriksel sinyallere dönüştürdüğü mekanik bir süreç olarak tanımlanmaktadır. İşitme süreci sesle başlar (Şekil 29). Bir nesne, madde içinde titreştiğinde ses üretir. Bu, katı, sıvı veya gaz halindeki bir ortam aracılığıyla olabilir. İnsanlar çoğunlukla havada dolaşan sesleri duyarlar. Örneğin, bir zil çaldığında titrer. Bu titreşim aslında metalin içeri ve dışarı esnemesidir. Bu da, metalin yanındaki hava parçacıklarını fiziksel olarak hareket ettirir. Bu parçacıklar, sırayla, yanlarındaki parçacıkları hareket ettirir vb. Bu şekilde, titreşim (veya bozulma) havada hareket eder.



Şekil 29: İşitme, vokalistin, grubunun ve hayranlarının müziğin keyfini çıkarmasını sağlar.

Normal insanın işitmesi, etkileyici bir aralık olan 20 ile 2000 Hz (20 kHz) arasındaki frekansları kapsar. Bu frekans aralığındaki seslere işitilebilir ses denir. Her ne kadar 20000 Hz desek te, 13000 Hz ortalama üst sınırdır. Yani bir insanın 20000 Hz ve yakınlarındaki

⁵ Sesin varlığını algılamaya duyma; sesin taşıdığı anlamı çözmeye ise işitme diyebiliriz.

sesleri algılaması çok zordur. İnsanların iletişim kurarken ortalama olarak çıkardığı frekans 250 Hz ve 3000 Hz arasındaki konuşma frekansıdır. 20 Hz'in altındaki (çok düşük frekanslı) seslere infrases, 20 kHz 'nin üzerindeki (yüksek frekanslı) seslere ise ultrases denir. Her ne kadar infrases bazen titreşim olarak hissedilebilse de hiçbirini kulak tarafından algılanamaz. Hayvanlar, insanlardan farklı işitme aralıklarına sahiptir. Köpekler 30000 Hz'e kadar olan sesleri duyabilirken, yarasalar ve yunuslar 10000 Hz'e kadar olan sesleri duyabilir. Fillerin 20 Hz 'nin altındaki frekanslara tepki verdiği bilinmektedir.

Tablo 3: Algı ve fiziksel nicelikler.

| Algı | Fiziksel Nicelik |
|----------------|---|
| Perde | Frekans |
| Ses Yüksekliği | Şiddet ve frekans |
| Tını | Çoklu frekansların sayısı ve göreceli şiddeti |
| Nota | Belirli adlara sahip temel müzik birimi, melodiler oluşturmak için birleştirilmiştir. |
| Ton | Çoklu frekansların sayısı ve göreceli şiddeti |

Kulak, düşük şiddetli seslere karşı oldukça hassastır. En düşük duyulabilir şiddet veya eşik yaklaşık 10^{-12} W/m²'dir veya 0 dB'dir. Şiddet algısına ses yüksekliği (ses gürlüğü) denir. Belirli bir frekansta, yaklaşık 1 dB 'lik farkları ayırt etmek mümkündür ve 3 dB' lik bir değişiklik kolayca fark edilebilir. Ancak ses yüksekliği yalnızca şiddetle ilgili değildir. Frekans, bir sesin ne kadar yüksek görüldüğü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kulak, 2000 ile 5000 Hz aralığındaki frekanslara karşı maksimum hassasiyete sahiptir, böylece bu aralıktaki sesler, hepsi aynı şiddete sahip olsalar bile, örneğin 500 veya 10000 Hz'deki seslerden daha yüksek olarak algılanır. İşitme aralığının yüksek ve düşük frekans uç noktalarına yakın sesler daha da az gürültülü görünür. Çünkü kulak bu frekanslarda daha az hassastır. Çizelge 3, insan işitme algılarının belirli fiziksel niceliklere bağımlılığını vermektedir.

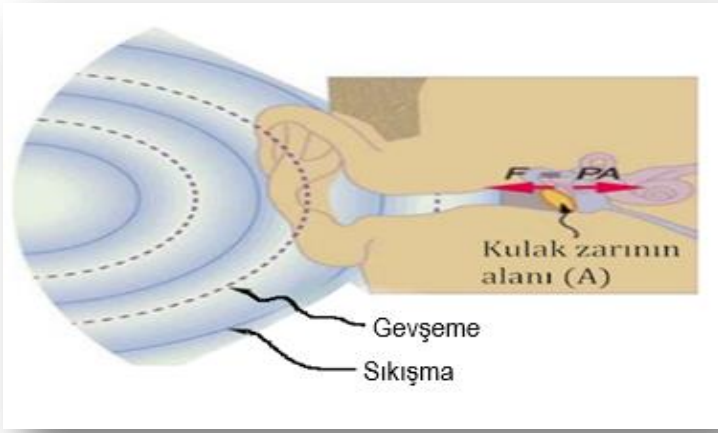
Bir keman orta C'yi (Do'yu) çaldığında, onu aynı notayı çalan bir piyano ile karıştırmak mümkün değildir. Bunun nedeni, her enstrümanın kendine özgü bir frekans ve şiddet üretmesidir. Bu frekans ve şiddet kombinasyonlarına ilişkin algımıza ton kalitesi veya daha yaygın olarak sesin tınısı diyoruz. Tını algısını fiziksel niceliklerle ilişkilendirmek, ses yüksekliği veya perde algısından daha zordur.

Tını daha öznedir. Bir sesin tınısını tanımlamak için donuk, parlak, sıcak, soğuk, saf ve zengin gibi terimler kullanılır. Bu nedenle, tınının dikkate alınması bizi, beyindeki daha yüksek seviyeli süreçlerin baskın olduğu algısal psikoloji alanına götürür. Bu, müzik ve gürültü gibi diğer ses algıları için de geçerlidir.

3.2. Nasıl İşitirsiniz? İşitme Mekanizması Nasıl Çalışır?

Kulaklar, çevremizdeki havadaki ses dalgalarını kaydetmemize ve bilgi olarak işlememize izin veren evrimsel bir varlıktır. Kulaklar olmadan, çoğu ses dalgası bir insan tarafından algılanamaz, yalnızca en yüksek sesler cildimizde hissedilen bir titreşim olarak kaydedilir. Kulaklar bize küçük ses dalgalarını bile çok incelikli bir şekilde algılamamızı sağlar. Öyle ki bu sayede beynimiz genellikle sesin tam olarak nereden geldiğini ve ne anlama geldiğini bize söyleyebilir ve konuşmamızı sağlar. Hiç durup bunun ne kadar önemli olduğunu düşündünüz mü? Bir dahaki sefere biriyle konuşurken, durup neler olduğunu düşünelim. Beynimizin bir düşüncesi var. Bu düşüncüyü bir basınç dalgaları modeline çevirir. Sonra ciğerlerimiz vücudumuzdan hava gönderir, ama bunu yaparken ses tellerinizi doğru şekilde titretiriz ve ağzımızı ve dilimizi doğru şekillere sokarız. Bu havadaki kod daha sonra çevredeki tüm havaya yayılır, bunun bir kısmı arkadaşımızın kulağına gider ve kulak zarından geçer. Bunu yaptığında, yalnızca kodu değil, aynı zamanda tam olarak odanın neresinden geldiğini ve birlikte gelen ses tonunu da iletcek şekilde kulak zarını titretir. Kulak zarının titreşimleri üç küçük kemikten geçirir ve küçük bir sıvı kesesine iletilir, bu da daha sonra bilgiyi elektriksel uyarılara iletir ve bunları işitme sinirine ve bilginin çözüldüğü beyne gönderir. Ve tüm bunlar, iki kişinin de herhangi bir çabası olmadan saniyenin sekizde biri içinde gerçekleşir. Konuşmak bir mucizedir!

İşitme mekanizması bazı ilginç fiziksel olaylar içerir: Kulağımıza çarpan ses dalgası bir basınç dalgasıdır. Kulak, ses dalgalarını bir mikrofondan çok daha karmaşık, ancak ona benzer bir şekilde elektriksel sinir uyarılarına dönüştüren bir dönüştürücüdür. Havada dolaşan sesi duymak için üç şeyin olması gerekir. Birincisi, ses kulağın işiten kısmına yönlendirilmelidir. İkincisi, kulak hava basıncındaki dalgalanmaları algılamalıdır. Üç, dalgalanmalar beynin anlayabileceği elektrik sinyallerine dönüştürülmelidir.

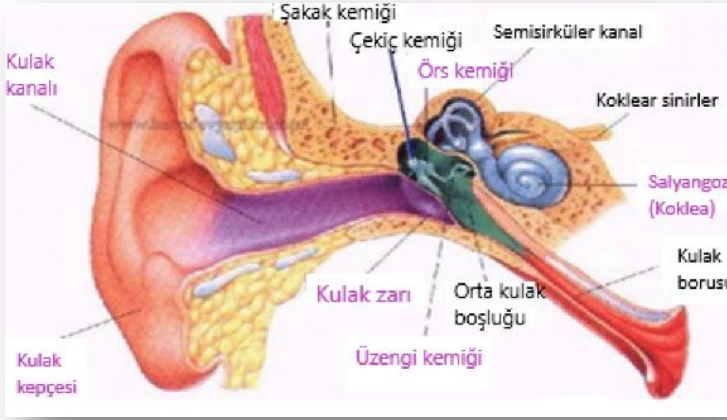


Şekil 30: Ses dalgasının sıkışması ve genişlemesi kulak kanalında yukarı doğru ilerler ve kulak zarını titreşime zorlar. Ses dalgası basınçları, kulak zarının arkasında bulunan atmosferik basınçtan farklı olduğu için kulak zarı üzerinde net bir kuvvet vardır. Karmaşık bir mekanizma, titreşimleri kişi tarafından algılanan sinir uyarılarına dönüştürür (<https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/17-1-sound/>).

Bir ses dalgasının genliği, daha öncede bahsettiğimiz gibi kaynağından uzaklaştıkça azalır, çünkü dalganın enerjisi giderek daha geniş bir alana yayılır. Ancak aynı zamanda Şekil 30'daki kulak zarı gibi nesnelere tarafından da emilir ve havanın viskozitesi ile termal enerjiye dönüştürülür. Ek olarak, her sıkıştırma sırasında havaya biraz ısı transferi olur ve her genişleme sırasında havadan ısı transferi olur, böylece ısı transferi organize bozulmayı rastgele termal hareketlere dönüştürür. (Bu süreçler termodinamiğin ikinci yasasının bir tezahürü

olarak görülebilir). Dalga boyu, frekans, genlik ve yayılma hızı, tüm dalgalar için olduğu gibi ses için de önemlidir.

Şekil 31, kulağın anatomisini kabaca göstermektedir: dış kulak veya kulak kanalı; orta kulak; ve kokleanın kendisi olan iç kulak. Normalde kulak olarak adlandırılan vücut kısmına teknik olarak kulak kepçesi denir.



Şekil 31: İnsan kulağının kabaca anatomisi.

Kulak kepçesi veya kulağın dış/görünür kısmı ses dalgalarını yakalar. İnsanlarda kulak kepçesi ileriye dönüktür. Sesin nereden geldiğini belirlemeye yardımcı olur. Sesin yönü, ses dalgasının kulak kepçesinden yansıması ile belirlenir. Beyin, ses yansımasındaki incelikleri ayırt edebilir ve sesin nereden geldiğini söyleyebilir. Sağdan bir ses geliyorsa, sağ kulağınıza solunuzdan biraz daha erken girecek ve biraz daha yüksek olacaktır. Kulak kepçesi hareket etmediği için insan bir sese gerçekten odaklanamaz. Köpekler gibi bazı memelilerin büyük hareketli kulak kepçeleri vardır ve bu nedenle bir sese odaklanabilirler. Bir ses dalgası kulağa girdikten sonra kulak kanalı boyunca ilerler. Kulak kanalının sonunda kulak zarı bulunur. Kulak zarı, kulak kanalı ile orta kulak arasında yer alan ince, koni şeklinde bir deri parçasıdır. Orta kulak üstteki borusu ile boğaza bağlanır ve kulak zarının her iki tarafında eşit basınç bizi dengede tutar. Hava basıncındaki değişiklik

kulak zarını hareket ettirir. Bir ses dalgası kulak kanalından geçtiğinde kulak zarını ileri geri iter. Kulak zarının hareketleri çok küçüktür ve iç kulak sesi gaz değil sıvı yoluyla ilettiği için sesin toplam basıncının artırılması gerekir. Bu, orta kulaktaki bir grup kemik olan kemikçiklerde gerçekleşir. Kemikçik kemikleri çekiç, örs ve üzengidir. Kulak zarı, oval pencerede kokleaya (salyangoz) bağlı olan kemikleri hareket ettirir. Koklea sıvı ile doldurulur. Kulak zarı ses dalgaları tarafından itildiğinde, kemikçikler hareket eder ve stapes yüz plakası koklea içindeki sıvıyı iter. Stapes temelde bir piston gibi çalışır ve koklea sıvısı içinde dalgalar oluşturur. Koklea sıvısına uygulanan stapes basıncı, ses dalgasının kulak zarındaki basıncının yaklaşık 22 katıdır. Bu, ses bilgisini iç kulağa iletmek için yeterlidir. Ses dalgalarının sinir uyarılarına çevrildiği yer iç kulaktadır ve beyin daha sonra bizim ses olarak anladığımız şeyi yorumlar.

Dış kulak veya kulak kanalı, sesi girintili korumalı kulak zarına taşır. Kulak kanalındaki hava sütunu rezonansa girer ve kulağın 2000 ile 5000 Hz aralığındaki seslere duyarlılığından kısmen sorumludur. Orta kulak sesi mekanik titreşimlere dönüştürür ve bu titreşimleri kokleaya iletir. Orta kulağın kaldırma sistemi, ses basınç değişimleri ile kulak zarına uygulanan kuvveti alır, yükseltir ve oval pencere yoluyla iç kulağa iletir ve kokleada kulak zarına çarpanlardan yaklaşık 22 kat daha fazla basınç dalgaları oluşturur. Orta kulaktaki (gösterilmemiştir) iki kas, iç kulağı çok yoğun seslerden korur. Yoğun sese birkaç milisaniye içinde tepki verirler ve kokleaya iletilen kuvveti azaltırlar. Bu koruyucu tepki kendi sesiniz tarafından da tetiklenebilir, böylece örneğin bir silahla ateş ederken vızıldamak gürültü hasarını azaltabilir. Koklea boyunca hareket eden basınç dalgaları, tektoryal membranın titreşmesine neden olarak, beyne elektrik sinyalleri gönderen sinirleri uyaran tüyleri (tüy hücreleri olarak adlandırılır) ovuşturur. Zar, yakın uçta sinirleri uyaran yüksek frekanslar ve düşük frekans ile farklı frekanslar için farklı pozisyonlarda rezonansa girer. Kokleanın tam işleyişi henüz tam olarak anlaşılamamıştır, ancak beyne bilgi göndermek için çeşitli mekanizmaların dâhil olduğu bilinmektedir. Yaklaşık 1000 Hz'in altındaki sesler için sinirler ses ile aynı frekansta

sinyaller gönderir. Yaklaşık 1000 Hz'den büyük frekanslar için, sinirler frekansa konuma göre sinyal verir. Tüylerin bir yapısı vardır ve beyne bilgi gönderilmeden önce sinyal işlemeyi yapan sinir hücreleri arasında bağlantılar vardır. Şiddet bilgisi kısmen sinir sinyallerinin sayısı ve sinyal dalgaları ile gösterilir. Beyin, kaynak yönü (her iki kulaktan gelen seslerin zaman ve şiddet karşılaştırmalarına dayalı olarak) gibi ek bilgiler sağlamak için koklea sinir sinyallerini işler. Daha yüksek düzeyde işleme, müzik beğenisi gibi birçok nüans üretir.

Koklea (salyangoz)

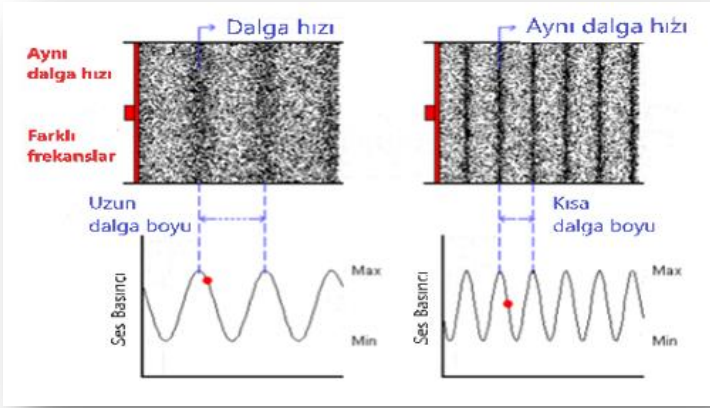
Kulağın en karmaşık kısmı kokleadır. Fiziksel ses titreşimlerinin elektriksel sinyallere dönüştürüldüğü yer burasıdır. Koklea, ince, hassas zarlarla ayrılmış üç bitişik tüpten oluşur. Bu tüpler salyangoz kabuğu şeklinde sarılır. Stapes oval pencereye baskı yaptığında kokleadan dışarı doğru basınç oluşturur. Yuvarlak pencere, kokleayı orta kulaktan ayıran bir zardır ve bu zar içeri ve dışarı hareket ederek sıvının gideceği bir yer sağlar. Orta zar veya baziler zar serttir ve kokleanın uzunluğunu genişletir. Stapeslerden gelen titreşimler baziler membran boyunca hareket eder. Bu zar, koklea genişliği boyunca uzanan 20000 ila 30000 kamış-benzeri yapıdan oluşur. Oval pencerenin sonundaki lifler kısa ve serttir. Oval pencereden uzaklaştıkça lifler daha uzun ve daha esnek hâle gelirler. Lifler farklı rezonans frekanslarına sahiptir. Her frekans belirli bir ses dalgası uzunluğuna karşılık gelir. Titreşim, zar boyunca aynı rezonans frekansına sahip liflere ulaşıncaya kadar hareket eder. Bu noktada dalga enerjisi açığa çıkar. Enerji, corti organının tüy hücrelerini hareket ettirecek kadar güçlüdür. Corti organı, baziler membranın yüzeyinde yer alır ve koklea boyunca uzanır. Kıl hücreleri hareket ettirildiğinde, sinyalleri serebral kortekse gönderen koklear sinir yoluyla elektriksel bir dürtü gönderirler. Beyin daha sonra dürtüleri tanınabilir seslere dönüştürür. İşitme duyusu karmaşık bir yapı olduğu için bunun üzerine hala çok araştırma yapılmaktadır.

3.3. İşitmenin ve Duymanın Sesin Fiziksel Nicelikleriyle İlişkisi

İşitme sesin algılanmasıdır. (Algı, duyular yoluyla farkındalık olarak tanımlanabilir). İnsan kulağının muazzam bir menzili ve hassasiyeti vardır. Bize perde, ses yüksekliği ve yön gibi çok sayıda basit bilgi verebilir. Kulak, duyduğu bir sesin birçok özelliğini ayırt edebilir, ancak en temel iki tanesi perde ve ses yüksekliğidir.

Frekans algısına perde denir. Çoğumuz mükemmel göreceli perdeye sahibiz, yani bir sesin diğerinden farklı bir frekansı olup olmadığını anlayabiliriz. Tipik olarak, frekansları % 0.3 veya daha fazla farklılık gösteriyorsa, iki ses arasında ayırım yapabiliriz. Örneğin, 500.0 ve 501.5 Hz belirgin şekilde farklıdır. Perde algısı doğrudan frekansla ilgilidir ve şiddet gibi diğer fiziksel niceliklerden büyük ölçüde etkilenmez. Müzik notaları, çoğu enstrüman tarafından üretilen belirli seslerdir ve batı müziğinde belirli adları vardır. Notaların kombinasyonları müziği oluşturur. Bazı insanlar A-sharp, C veya E-flat gibi müzik notalarını yalnızca dinleyerek tanımlayabilir. Bu nadir yeteneğe mükemmel kulak denir.

Dalga boyu ne kadar kısa olursa, perde o kadar yüksek olur. İnsanlar, 20 Hz'e kadar düşük ve 20000 Hz'e kadar yüksek frekansları duyabilir. Yaşlandıkça, en yüksek perdeleri duyma yeteneğimizi kaybederiz, bu nedenle 20000 Hz'e yaklaşan frekansları dinlediğinizde çoğumuz muhtemelen hiçbir şey duymayız (köpeğiniz aynı fikirde olmayacaktır). Ancak aralığın en alt kısmını daha kolay duyabileceğiz. Müzikteki düşük bas notaları gibi düşük sesleri hissetmenizin nedeni, dalga boyunun o kadar uzun olmasıdır ki, aslında saniyenin 1/20' sini alır.



Şekil 32: Yüksek ve düşük perdeli sesler.

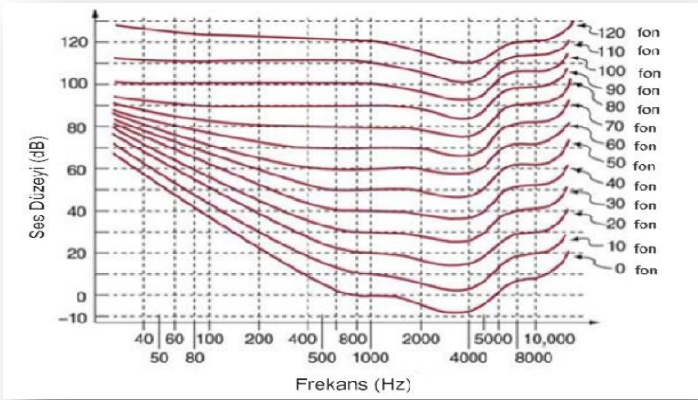
Duyduğumuz bir sesin yüksekliği, basınç dalgalarının genliği ile belirlenir. Şekil 32’de gösterilen yüksek ve düşük perdeli sesler aynı yüksekliğe sahiptir, çünkü şeklin altındaki basınç eğrileri dikey olarak aynı boyuttadır. Daha yüksek seslerin, dalganın alçak ve yüksek basınç bölgeleri arasında daha büyük bir salınımı vardır yani: yüksek seslerin, sessiz seslerden daha yüksek yüksek basınçlı ve daha düşük düşük basınçlı kısımları vardır.

Ses yüksekliği genellikle desibel birimi kullanılarak ölçülür. Nerede olduğunuza bağlı olarak, sesin bir maksimumu vardır. Bunun nedeni, sesin kendi başına bir şey olmaması, bir ortamda hareket eden bir basınç dalgası olmasıdır. Ve konuştuğumuz gibi, bir ses dalgasının yüksek ve alçak basınç noktalarının ortalaması, ortamın normal basıncı olmak zorunda olduğundan, ses yüksekliği, sonunda alçak basınç noktasının yaklaşık sıfır basınca ulaşması gerçeğiyle sınırlıdır. Alçak basınç daha fazla düşemeyeceğinden, bu nokta bir ses dalgasının maksimum genliğini ve herhangi bir yerde bir sesin olabileceği en yüksek şiddeti belirler.

Dünya yüzeyinde havadan gelen sesler için, dalganın yüksek basınçlı ve düşük basınçlı kısımlarının ortalaması, bizim normal

atmosferik basıncımızdır, buna ‘1 atmosfer’ basıncı diyoruz. Bu nedenle, bir ses dalgasının yüksek basınç bileşeni 1.0001 atmosfer ve düşük basınç bileşeni 0.9999 atmosfer olabilir ve daha yüksek bir ses için basınç 1.01/0.99 atmosfer olabilir. Ancak her iki durumda da ikisinin ortalaması 1 atmosferdir.

Ses şiddetini sayısal olarak ifade etmek için fon adı verilen bir birim kullanılır. Fonlar desibellerden farklıdır, çünkü fon bir ses yüksekliği algılama birimidir, oysa desibel bir fiziksel şiddet birimidir. Şekil 33, normal işiten kişiler için ses yüksekliğinin şiddet (veya şiddet seviyesi) ve frekans ile ilişkisini gösterir.

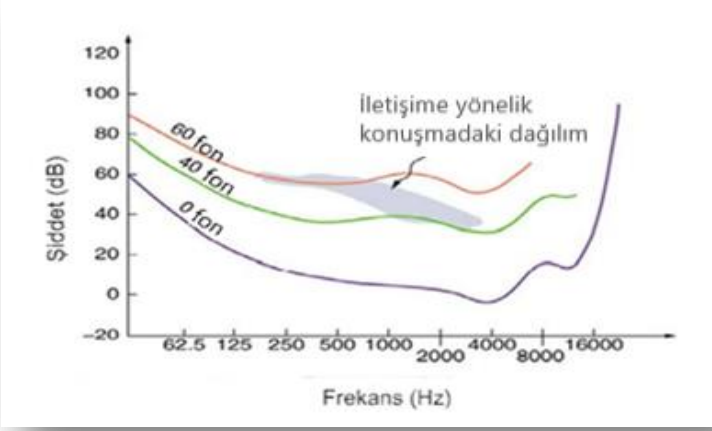


Şekil 33: Normal işiten kişiler için farklı fonlardaki ses yüksekliğinin ses şiddet düzeyi (desibel cinsinden) ve şiddet (metrekare başına Watt cinsinden) ile ilişkisi. Eğri çizgiler eşit sesli eğrilerdir - belirli bir eğri üzerindeki tüm sesler eşit derecede yüksek olarak algılanır. Fonlar ve desibeller 1000 Hz'de aynı olacak şekilde tanımlanır (<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/17-3-sound-intensity>).

Şekil 33'deki grafiğin daha fazla incelenmesi, insan işitmesiyle ilgili bazı ilginç gerçekleri ortaya koymaktadır. İlk olarak, 0 fon eğrisinin altındaki sesler çoğu insan tarafından algılanmaz. Örneğin, 40 dB'de 60 Hz'lik bir ses duyulmaz. 0-fon eğrisi, normal işitme eşliğini temsil eder. 0 dB'nin altındaki şiddet seviyelerinde bazı sesleri duyabiliriz. Örneğin, 3-dB, 5000 Hz'lik bir ses, 0-fon eğrisinin üzerinde yer aldığından duyulabilir. Ses yüksekliği eğrilerinin hepsinde

yaklaşık 2000 ile 5000 Hz arasında eğimler vardır. Bu düşüşler, kulağın o aralıktaki frekanslara en duyarlı olduğu anlamına gelir. Örneğin, 4000 Hz'de 15 dB'lik bir ses, 1000 Hz'deki 20 dB'lik bir sesle aynı, 20 fonluk bir yüksekliğe sahiptir. Eğriler, her iki uçta da yükselir. 10000 Hz'deki bir sesin 1000 Hz'deki 20 dB'lik bir ses kadar yüksek görünmesi için 30 dB'lik bir şiddet seviyesine sahip olması gerekir. 120 fonun üzerindeki sesler hem acı verici hem de zararlıdır.

Çoğu zaman tüm işitme alanımızı kullanmıyoruz. Bu özellikle, çevrede nadir bulunan ve konuşmayı anlamak veya müziği beğenmek için gereksiz olan 8000 Hz'in üzerindeki frekanslar için geçerlidir. Aslında, bu kadar yüksek frekansları duyma yeteneğini kaybetmiş kişiler, test edilene kadar genellikle kayıplarının farkında olmazlar. Şekil 34'deki gölgeli bölge, konuşma seslerinin çoğunun düştüğü frekans ve şiddet bölgesidir. Eğri çizgiler, 40 ve 60 fonun işitme kayıplarının ne gibi etkileri olacağını gösterir. Tüm frekanslarda 40 fon'luk bir işitme kaybı, çok sessiz görünse de, bir kişinin konuşmayı anlamasını sağlar. Tüm frekanslarda 60 fon kaybı olan bir kişi, yalnızca en düşük frekansları duyacak ve normalden çok daha yüksek olmadığı sürece konuşmayı anlayamayacaktır. Öyle olsa bile, konuşma belirsiz görünebilir, çünkü daha yüksek frekanslar iyi algılanmaz. Konuşma bölgesi ayrıca bir cinsiyet bileşenine de sahiptir, çünkü kadın sesleri genellikle daha yüksek frekanslarla karakterize edilir. Yani 60 fon işitme engelli kişi, bir kadının normal konuşmasını anlamakta zorluk çekebilir.



Şekil 34: Gölge bölge, normal iletişime yönelik konuşmada bulunan frekansları ve şiddet seviyelerini temsil eder. 0-fon hattı normal işitme eşiğini temsil ederken, 40 ve 60'likler sırasıyla 40- ve 60-fon işitme kaybı olan kişiler için eşikleri temsil eder (<https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/17-6-hearing/>).

İşitme testleri, genellikle 250 ila 8000 Hz arasında değişen bir frekans aralığında gerçekleştirilir. İşitme eşiği, normal eşiğe göre Db cinsinden ölçülür, böylece normal işitme tüm frekanslarda 0 dB olarak kaydedilir. Gürültünün neden olduğu işitme kaybı, kayba neden olan ve genellikle her iki kulağı da etkileyen frekanstan bağımsız olarak, 4000 Hz frekansına yakında bir düşüş gösterir. İşitme kaybının en yaygın biçimi yaşla birlikte ortaya çıkar ve presbiakuzi, yani kelimenin tam anlamıyla yaşlı kulak olarak adlandırılır. Bu kayıp, yüksek frekanslarda giderek daha şiddetli hâle gelir ve müziği anlamayı ve konuşmayı fark etmeyi engeller.

Desibel (dB) ile ilgili kullanışlı olan şey, insan kulağının algılayabildiği en zayıf sesin tanımı gereği 0 dB olmasıdır ki biz buna "işitme eşiği" diyoruz. Bilim adamları sesleri negatif desibel ölçeğine kadar incelemek için ellerinden gelenin en iyisini yapıyorlar ve Dünya'da -9.4 dB'ye kadar düşük kayıt yapan insan yapımı odalar vardır- burası o kadar sessiz ki, kanın kendi beyninizde pompalandığını

duyabilirsiniz! Dünya yüzeyinde olabilecek en yüksek ses 194 dB'dir. Ancak 195 dB'ye ulaştığımızda, enerji havada hareket etmeyi durdurur ve havayı genişleyen bir vakumla dışarı doğru itmeye başlar. 194'ün üzerindeki dB'ler ne kadar fazlaysa, vakum baloncuğu o kadar uzağa ulaşacak ve daha yüksek etki olacaktır. Vakum baloncuğu hızla büyüyen bir yarım küre olarak dışı doğru genişleyecektir.

3.4. İşitme Kaybı

Orta veya iç kulaktaki problemlerden dolayı işitme kayıpları meydana gelebilir. Orta kulaktaki iletim kayıpları, kafatasından kokleaya ses titreşimleri gönderilerek kısmen telafi edilebilir. Bu amaca yönelik işitme cihazları, çoğu işitme cihazının yaptığı gibi kulak kanalına gönderilen sesi yükseltmek yerine genellikle kulağın arkasındaki kemiğe bastırır. Kokleadaki sinirlerdeki hasar onarılamaz, ancak amplifikasyon (yükseltme) kısmen telafi edebilir. Amplifikasyonun daha fazla hasar üretme riski vardır. Kokleadaki diğer bir yaygın başarısızlık, tüylerin hasar görmesi veya kaybıdır, ancak sinirler işlevsel kalır. Sinirleri doğrudan uyaran koklear implantlar artık mevcuttur ve yaygın olarak kabul görmektedir. Yaklaşık eşit sayıda yetişkin ve çocukta 100000'den fazla implant kullanılmaktadır.

Koklear implant, 1970'lerde sağır babası için Avustralya'nın Melbourne kentinde Graeme Clark tarafından öncülük edilerek geliştirilmiştir. İmplant, üç harici bileşenden ve iki dâhili bileşenden oluşur. Harici bileşenler, sesi alıp elektrik sinyaline dönüştürmek için bir mikrofon, belirli frekansları seçmek için bir konuşma işlemcisi ve sinyali elektromanyetik indüksiyon yoluyla dâhili bileşenlere aktarmak için bir vericidir. Dâhili bileşenler, derinin altındaki kemiğe sabitlenmiş ve sinyalleri elektriğe dönüştüren bir alıcı/vericiden oluşur. Dürtüler ve bunları dâhili bir kablo aracılığıyla kokleaya ve kokleaya sarılmış yaklaşık 24 elektrottan oluşan bir diziye gönderir. Bu elektrotlar da impulsları doğrudan beyne gönderir. Elektrotlar temel olarak tüyleri taklit ederler.

KAYNAKÇA

- Cleveland Clinic. *Hearing*.
<https://my.clevelandclinic.org/health/articles/17054-hearing>
- Edvard Munch Paintings, Biography, and Quotes. *The Scream, 1893 by Edvard Munch*.
<https://www.edvardmunch.org/the-scream.jsp>
- Halliday, David, Resnick, Robert. Halliday, David, Resnick, Robert. (1991). *Fiziğin Temelleri*. Çeviri: Prof. Dr. Cengiz Yalçın, Arkadaş Yayınları. Encyclopædia Britannica. Sound.
<https://www.britannica.com/science/sound-physics>.
<https://i.imgur.com/K9VDEJz.jpg>
- Lumen Learning. *Sound*.
<https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/17-1-sound/>
- Lumen Learning. *Sound Intensity and Sound*.
<https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/17-3-sound-intensity-and-sound-level/>
- Lumen Learning. *Hearing*.
<https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/17-6-hearing/>
- Lumen Learning. *Introduction to the Physics of Hearing*.
<https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/introduction-18/>
- National Aeronautics and Space Administration. *Mach and Speed of Sound*.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/mach.html>
- National Center for Biotechnology Information. *Basics of Sound, the Ear, and Hearing*.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK207834/>
- OpenStax University. *Sound Waves*. University Physics Volume 1.
<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/17-1-sound-waves>
- OpenStax University. *Speed of Sound*. University Physics Volume 1.
<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/17-2-speed-of-sound>
- OpenStax University. *Sound Intensity*. University Physics Volume 1.

<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/17-3-sound-intensity>

OpenStax University. *The Doppler Effect*. University Physics Volume 1. <https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/17-7-the-doppler-effect>

Physics LibreTexts University. *Speed of Sound*. University Physics Volume 1. [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_\(OpenStax\)/Book%3A_University_Physics_I_-_Mechanics_Sound_Oscillations_and_Waves_\(OpenStax\)/17%3A_Sound/17.03%3A_Speed_of_Sound](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/Book%3A_University_Physics_I_-_Mechanics_Sound_Oscillations_and_Waves_(OpenStax)/17%3A_Sound/17.03%3A_Speed_of_Sound)

Sciencing. *Sound: Definition, Types, Characteristics & Frequencies*. <https://sciencing.com/sound-definition-types-characteristics-frequencies-13721568.html>

Synaptic sound. Science & Technology. *Physics of Sound*. <https://www.synapticsound.com/physics-of-sound/>

Serway, Raymond, A. (2007). *Fen ve Mühendislik için Fizik*. Çeviri Editörü Kemal Çolakoğlu, Palme Yayıncılık, 2000.

WikiLectures. *SOUND AND HEARING*. https://www.wikilectures.eu/w/SOUND_AND_HEARING

Wikipedia. *Sound*.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Sound>

BÖLÜM 4

İKİ FAZLI SIVILARIN TABAKALI ORTAMDA AKIŞ PROBLEMİNİN ENTROPİ ÇÖZÜMÜ

Prof. Dr. Bahaddin SİNSOYSAL¹

Prof. Dr. Mahir RASULOV²

Öğr. Gör. Dr. Ethem İlhan ŞAHİN³

¹Prof.Dr., İstanbul Gedik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Böl., Kartal, İstanbul, Türkiye, bahaddin.sinsoysal@gedik.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-2926-2744

²Prof.Dr., Azerbaycan Milli İlimler Akademisi, Petrol ve Gaz Enstitüsü, Baku, Azerbaycan, mresulov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8393-2019

³Dr., Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İleri Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi, Adana, Türkiye. shnethem@gmail.com, ORCID ID :0000-0001-7859-9066

1. GİRİŞ

İki fazlı sıvıların tabakalı ortamda birlikte hareketini ifade edebilen nonlinear kısmi türevli diferansiyel denklemler sistemi bazı fiziksel varsayımlar çerçevesinde göz önüne alınacaktır. Söz konusu sistemdeki denklemlerden biri basınç fonksiyonuna göre eliptik, diğeri ise su ile doyma fonksiyonuna göre hiperboliktir. Ayrıca, denklemler sistemine dahil olan tabakalı ortamı ve sıvıları ifade eden parametrelerin bazıları da deneysel yollarla elde edildiğinden incelemek istediğimiz denklemler sisteminin gerçek çözümünün bulunması genelde imkansızdır. Özel çözümler ise yalnız çok özel durumlarda mevcut olabilir. Bu nedenle söz konusu denklemler sisteminin çözümünü yalnız nümerik yöntemler aracılığıyla elde etmek mümkündür. Bilindiği üzere nümerik yöntemlerden en çok kullanılanı sonlu farklar metodudur. Fakat, bu metot kullanılırken diferansiyel problemin çözümünden veya çözümlerinden yüksek mertebeden diferansiyellenebilme özelliği talep edilir. Bunun yanı sıra, yine literatürden bilindiği üzere hiperbolik tür denklemlerin ve korunum kurallarını ifade eden türden denklemlerin çözümü, başlangıç fonksiyonun yeteri kadar pürüzsüz olması durumunda bile, çözümde yeri önceden bilinmeyen sıçrayış noktaları barındırır.

Söz konusu iki fazlı sıvıların düzlemsel bölgedeki hareketi incelenirken elde edilen denklemler, yer değişkenine göre iki boyutlu olurlar. İki boyutlu durumlarda ise sıçrayış noktalarının sayısı sonsuz olabilir. Bu sıçrayışlardan hangisinin su-petrol arakesiti olduğunu bilmek çok önem taşımaktadır ve çözümü elde etmek için kullanılan yöntemlerden yüksek çözünürlük talep edilmektedir. Süreksiz fonksiyonlarla çalışma zorunluluğu sebebiyle ve olayın fiziksel özelliklerini düzgün ifade edebilmek için süreksiz fonksiyonlar sınıfında bir sonlu farklar yöntemine ihtiyaç duyulur.

1.1 Sıkışabilir Sıvıların Esnek-Elastik Tabakalı Ortamdaki Hareket Denklemi

Şimdi, sıkışabilir sıvıların (örneğin petrolün) ve iki fazlı sıvıların esnek-elastik tabakalı ortamda hareket denklemlerini

çıkarcacağız. Yeraltı hidrodinamik teorisinden bilindiği üzere süreklilik denklemi

$$\frac{\partial}{\partial t}(m\rho) + \text{div}(\rho v) = 0 \quad (4.1)$$

olmaktadır (Buckley ve Leverett, 1942; Collins, 1961; Goritskii, Krujkov ve Chechkin, 1997). Burada m -tabakalı ortamın gözenekliliğini, ρ -sıvının yoğunluğunu, v - akışkanın tabakalı ortamdaki akış (süzülme) hızını göstermektedir. (Muskat, 1946)' da olduğu gibi Darcy kuralı

$$v = -\frac{\kappa}{\mu} \text{grad}p \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada κ - geçirgenlik katsayısı, μ - petrolün viskozitesi, p - basınç dır. Sıvının zayıf sıkışabilir olduğunu varsayarsak, durum denklemi

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1 + \beta_f(p - p_0)$$

şeklinde olur. Burada, β_f -sıkışabilme katsayısı, ρ_0 , p_0 ise sırasıyla basınç ve sıvının başlangıç yoğunluğunu ifade eder.

Tabakalı ortamın da zayıf sıkışabilir olduğunu kabul edersek, gözeneklilik katsayısı, deneylerin sonucuna dayanarak birinci yaklaşımda σ ya (gerginlik tensörüne) bağlıdır, yani tabakalı ortamı etkileyen $m = m(\sigma)$ olduğu kabul edilmektedir. Tabakalı ortam esnek ise

$$\frac{m}{m_0} = 1 - \beta_r(\sigma - \sigma_0) \quad (4.3)$$

dır. Burada β_r -tabakalı ortamın sıkışabilme katsayısı, σ_0 ve m_0 yine de başlangıçtaki gerginlik tensörünün ve gözenekliliğin başlangıç değeri olmaktadır.

Derin katlardaki tabakalı ortamlarda toplam gerginlik “sıvı-tabakalı ortam” sisteminde sabit kaldığından,

$$\sigma + p = \sigma_0 + p_0$$

eşitliği korunur. Buradan

$$\sigma - \sigma_0 = -(p - p_0)$$

olur. Bu ifadeler ve (4.2) ifadesi (4.1) denkleminde yerine konulduğunda ve $\beta(p - \rho_0)$ büyüklüğünün etkisinin az olması koşulunu da dikkate alarak, sıvıların derin tabakalı ortamlardaki hareketini incelemek için $p(r, t)$ basınç fonksiyonu için

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \kappa \Delta p \quad (4.4)$$

elde ederiz. Burada, κ klasik ısı denkleminde olan ısı geçirme katsayısına benzer olarak pseudo geçirgenlik olmaktadır ve

$$\kappa = \frac{k}{\mu} (m_0 \beta_f + \beta_r)$$

dir. Diğer taraftan, tabakalı ortamın plastik olması nedeniyle deformasyon sonucu önceki şekli olamaz. Bu durumda

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -m_0 \beta_r \frac{\partial \sigma}{\partial t} = m_0 \beta_r \frac{\partial p}{\partial t}$$

ifadesi σ nın artması ile (basıncın azalması) sistemin toplam gerginlik durumu değişmemektedir ve

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -m_0 \beta_{r_1} \frac{\partial \sigma}{\partial t} = m_0 \beta_{r_1} \frac{\partial p}{\partial t}$$

burada $\beta_{r_1} \neq \beta_r$ dir.

1.2 İki Fazlı Sıvıların Tabakalı Ortamda Birlikte Hareket Denklemi

Petrol ve suyun gözenekli ortamdaki eşzamanlı hareketinin matematiksel modelinin, iki temel fizik kanununa dayandığı bilinir, bunlardan biri petrol ve su kütlelerinin korunumu kanunu, diğeri ise Darcy kanunudur (Muskat, 1946). Bazı fiziksel varsayımlar dahilinde, iki fazlı sıvının gözenekli ortamdaki hareketi aşağıdaki denklemler sistemi ile tanımlanır

$$m \frac{\partial \sigma_\ell}{\partial t} + \text{div}(u_\ell) = 0, \quad (4.5)$$

$$u_\ell = - \frac{k k_\ell(\sigma)}{\mu_\ell} \text{grad} P_\ell, \quad (4.6)$$

$$P_p - P_w = \wp_k(\sigma_w), \quad (4.7)$$

$$\sigma_p + \sigma_w = 1, \quad (\ell = w, p). \quad (4.8)$$

Burada σ_ℓ , ve P_ℓ , ($\ell = w, p$) sırasıyla su ve petrol ile doyma fonksiyonları ile su ve petrol fazlarının basınçlarının bilinmeyen fonksiyonlarıdır. u_ℓ , su ve petrolün hareket hızı, k_ℓ , ($\ell = w, p$) ise petrol ve suyun oransal geçirgenliğidir, \wp_k su ve petrol arasındaki kapiler basınç, m ve k ise sırasıyla gözeneklilik ve geçirgenliktir. Basitlik için $\sigma_w \equiv \sigma$ olsun. İstismarın doğasına uygun olarak (4.5)-(4.8) denklemler sistemine başlangıç ve sınır koşulları eklenir.

(4.6) da (4.7) yi göz önüne alarak,

$$k \left(\frac{k_w(\sigma)}{\mu_w} + \frac{k_p(\sigma)}{\mu_p} \right) grad P_w + \frac{k_p(\sigma)}{\mu_p} grad \wp_k(\sigma) = -u$$

elde ederiz. Burada $u = u_w + u_p$ dır. Buradan

$$grad P_w = \frac{-u}{k \left(\frac{k_w(\sigma)}{\mu_w} + \frac{k_p(\sigma)}{\mu_p} \right)} - \frac{\frac{k_p(\sigma)}{\mu_p} grad \wp_k(\sigma)}{k \left(\frac{k_w(\sigma)}{\mu_w} + \frac{k_p(\sigma)}{\mu_p} \right)} \quad (4.9)$$

olur. Son ifadeyi suyun korunumu kanununun denkleminde yerine koyarak

$$m \frac{\partial \sigma}{\partial t} + div \left\{ -\frac{k k_w(\sigma)}{\mu_w} \left[\frac{-u}{k \left(\frac{k_w(\sigma)}{\mu_w} + \frac{k_p(\sigma)}{\mu_p} \right)} - \frac{\frac{k_p(\sigma)}{\mu_p} grad \wp_k(\sigma)}{k \left(\frac{k_w(\sigma)}{\mu_w} + \frac{k_p(\sigma)}{\mu_p} \right)} \right] \right\} = 0$$

elde ederiz. Aşağıdaki biçimde tanımlanan Buckley-Leverett (4.10) fonksiyonlarını kullanarak

$$F_w(\sigma) = \frac{\frac{k_w(\sigma)}{\mu_w}}{\frac{k_w(\sigma)}{\mu_w} + \frac{k_p(\sigma)}{\mu_p}}, \quad F_p(\sigma) = \frac{\frac{k_p(\sigma)}{\mu_p}}{\frac{k_w(\sigma)}{\mu_w} + \frac{k_p(\sigma)}{\mu_p}},$$

$$F_w(\sigma) + F_p(\sigma) = 1$$

(4.10) denklemi

$$m \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \text{div}(u F_w(\sigma)) + \text{div} \left(\frac{k_p(\sigma)}{\mu_p} F_w(\sigma) \text{grad} \wp_k(\sigma) \right) = 0 \quad (4.11)$$

şeklinde yazılabilir (Buckey ve Leverett, 1942). (4.3)-(4.8) problemi uygun başlangıç ve sınır koşulları ile kapiler basıncın göz önüne alındığı durumda (Collins, 1961) ve (Muskat, 1946) de detaylı çalışılmıştır.

Bir boyutlu durumda kapiler basınç $\wp_k(\sigma) = 0$ ise, (4.11) denklemi birinci mertebeden nonlinear bir denkleme dönüşür, (Collins, 1961)

$$m \frac{\partial \sigma}{\partial t} + u(t) \frac{\partial F_w(\sigma)}{\partial x} = 0. \quad (4.12)$$

Karakteristikler yöntemi ile elde edilen (4.12) denkleminin çözümü aşağıdaki gibi kapalı bir forma sahip olur

$$\sigma(x, t) = f \left(x - \frac{F'_w(\sigma)}{m} \int_0^t u(\eta) d\eta \right). \quad (4.13)$$

Burada f türevlenebilir herhangi bir fonksiyondur. Ancak (4.13) den bilinmeyen fonksiyona ilişkin açık bir formül elde etmek genellikle mümkün değildir. Elde edilen (4.13) fonksiyonel bağıntısını (4.12) denkleminin alternatif biçimi olarak adlandıracağız. $\tau = \frac{1}{m} \int_0^t u(\eta) d\eta$ dönüşümü yardımıyla, denklemin daha basit olarak

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial F_w(\sigma)}{\partial x} = 0 \quad (4.14)$$

şeklinde yazılabileceği kolaylıkla gösterilebilir. (4.14) denklemi birinci mertebeden kısmi türevli diferansiyel denklem olmaktadır. Burada $F_w(\sigma)$ fonksiyonu aşağıdaki koşulları sağlamaktadır:

1. $\sigma \geq 0$ için, $F_w(\sigma) \geq 0$ dır,
2. $\sigma \geq 0$ için $F'_w(\sigma) \geq 0$ dır,

3. $F_w''(\sigma)$ işaret değiştiren fonksiyondur, yani $F_w(\sigma)$ fonksiyonu hem konveks hem de konkav kısımlara sahiptir.

2. TABAKALI ORTAMDA PETROLÜN SU İLE ÇIKARILMASI PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ

Bu bölümde iki fazlı sıvıların tabakalı ortamda birlikte akış probleminin dinamiğini teorik yönden inceleyeceğiz. Bu amaçla (4.14) denkleminin çözümünü aşağıda verilen

$$\sigma(x, 0) = \sigma_0(x) \quad (4.15)$$

koşulu çerçevesinde araştıracağız. Burada $\sigma_0(x)$ petrolün tabakalı ortamda $t = 0$ anındaki su ile doyma oranını göstermektedir.

Başlangıç fonksiyonu hem pozitif hem de negatif eğimlere sahip ya da parçalı sabit olduğunda, genel olarak, $\sigma(x, 0) \in L_\infty(\mathbb{R}^2)$ ve $F_w''(\sigma) > 0$ (ya da $F_w''(\sigma) < 0$) ise, bu taktirde Cauchy probleminin çok değerli çözümlerinin olduğu bilinmektedir. Çok değerli çözümlerden entropi denilen koşul uygulanarak fiziksel olarak yararlı bir çözüm elde edilebileceği de belirtilmektedir (Goritskii ve diğerleri, 1997), (Rasulov, 1991), (Toro, 1999). Oleinik, $F_w''(\sigma)$ nün işaret değiştirmedeği varsayımı altında, entropi koşulunu karşılayan zayıf çözümleri elde etmek için bir yöntem önermiştir (Tikhonov ve Samarskii, 1977).

Zayıf çözüm kavramını dahil ettiğimizde, süreksizlik noktalarının yeri ve zamanı gibi ek problemler ortaya çıkmaktadır. Nonlineer diferansiyel denklemler için tanımlanan bir zayıf çözümün, sıçrayış koşulunu otomatik koruduğu açıktır. Ancak bu ifade soft çözüm için geçerli değerdir..

2.1 Cauchy Problemi

$R^2(x, t)$ ile (x, t) noktalarının Euclid uzayını gösterelim ve $Q_T = \{x \in (-\infty, \infty), 0 \leq t \leq T\} \subseteq R^2(x, t)$ olsun.

$\sigma_0(x)$ fonksiyonunun hem pozitif hem de negatif eğime sahip, kompakt destekli bilinen sürekli türevlenebilir bir fonksiyon olduğunu farz edelim. Ayrıca, $F_w(\sigma)$ nin bilinen bir fonksiyon olduğunu ve aşağıdaki koşulları gerçeklediğini varsayalım.

(i) sınırlı σ için, $F_w(\sigma)$ iki kez sürekli diferansiyellenebilir ve sınırlı bir fonksiyondur.

(ii) $\sigma \geq 0$ için $F_w'(\sigma) \geq 0$ dir.

(iii) $F_w''(\sigma)$ alternatif işaretleri olan bir fonksiyondur, yani F_w konveks ve konkav kısımlara sahiptir.

(4.14), (4.15) problemi için bir çözüm karakteristikler yöntemi ile kolaylıkla oluşturulabilir ve

$$\sigma(x, t) = \sigma_0(\xi) \quad (4.16)$$

biçiminde olur. Burada

$$\xi = x - F_w'(\sigma)t, \quad (4.17)$$

$F_w'(\sigma)$ hızıyla hareket eden uzaysal koordinattır.

(4.16) ve (4.17) den

$$\frac{\partial \sigma(x, t)}{\partial x} = \frac{\sigma'_0(\xi)}{(1 + \sigma'_0(\xi)F_w''(\sigma)t)}, \quad \frac{\partial \sigma(x, t)}{\partial t} = -\frac{\sigma'_0(\xi)F_w'(\sigma)}{(1 + \sigma'_0(\xi)F_w''(\sigma)t)}$$

elde ederiz. Birinci bağıntı, başlangıç profilinin ($x = \xi, t = 0$) daki eğim açısına göre, (x, t) noktasında $\sigma(x, t)$ profilinin eğimini ifade eder. $\sigma'_0 < 0$ ve $F_w''(\sigma) > 0$, (ya da $\sigma'_0 > 0$ ve $F_w''(\sigma) < 0$) ise, bu takdirde $t = \frac{-1}{\sigma'_0(\xi)F_w''(\sigma)}$ için $\sigma_x(x, t) = \infty$ elde ederiz. Bu noktalarda $\sigma_t(x, t)$ de sonsuz olur. Bu nedenle (4.14), (4.15) probleminin klasik bir çözümü yoktur.

Tanım 2.1 (4.15) başlangıç koşulunu sağlayan, yeterince büyük $t + |x|$ ler için sıfır olan ve üst yarı düzlemde tanımlı ve iki kez diferansiyellenebilir her bir $\phi(x, t)$ fonksiyonu için

$$\iint_{Q_T} \{\varphi_t(x, t)\sigma(x, t) + \varphi_x(x, t)F_w(\sigma(x, t))\} dx dt + \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(x, 0)\varphi(x, 0) dx = 0 \quad (4.18)$$

integral bağıntısını koruyan $\sigma(x, t)$ fonksiyonuna (4.14), (4.15) probleminin zayıf çözümü denir.

2.2 Yardımcı Problem

(4.14), (4.15) probleminin zayıf çözümünü tespit etmek amacıyla Rasulov'un (1991; 2011) ve ayrıca Sinsoysal ve Rasulov'un (2009) dikkate alarak

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial t} + F_w\left(\frac{\partial v(x, t)}{\partial x}\right) = 0, \quad (4.19)$$

$$v(x, 0) = v_0(x) \quad (4.20)$$

yardımcı problemini önerelim. Burada, $v_0(x)$,

$$\frac{dv_0(x)}{dx} = \sigma_0(x) \quad (4.21)$$

denklemini sağlayan mutlak sürekli herhangi bir fonksiyondur.

(4.19), (4.20) probleminin çözümü

$$v(x, t) = [\sigma F'_w(\sigma) - F_w(\sigma)]t + v_0(\xi), \quad \xi = x - F'_w(\sigma)t \quad (4.22)$$

biçiminde kolayca elde edilir. Hesaplama yoluyla,

$$\sigma(x, t) = \frac{\partial v(x, t)}{\partial x}$$

olduğu kolaylıkla gösterilebilir. İntegrallenebilen bir soft çözümün (4.14) ün zayıf bir çözümü olduğu, yani aşağıdaki teoremin geçerli olduğu da kolaylıkla görülebilir.

Teorem 2.1 (4.19), (4.20) yardımcı probleminin çözümü $v(x, t)$ ise, bu taktirde aşağıdaki şekilde tanımlanan

$$\sigma(x, t) = \frac{\partial v(x, t)}{\partial x} \quad (4.23)$$

fonksiyonu esas problemin zayıf çözümüdür ve ayrıca $v(x, t)$ mutlak sürekli bir fonksiyondur.

Yardımcı problemin avantajları şunlardır:

(i) $v(x, t)$ fonksiyonu, $u(x, t)$ den aha düzgündür;

(ii) süreksizlik noktalarının civarında tanımlı olmayan $\frac{\partial \sigma}{\partial x}$ ve $\frac{\partial \sigma}{\partial t}$ türevlerini kullanmaksızın $\sigma(x, t)$ belirlenebilir.

2.3 Ön Cephenin Bulunması

Esas problemin çözümünde ortaya çıkan süreksizlik noktalarının konumunu elde etmek için $\int_{-\infty}^{\infty} \sigma(x, t) dx = \text{sabit}$ olması gerçeğinden ve bu integralin yalnız çok değerli ve sürekli fonksiyonlar için değil, aynı zamanda da tek değerli parçalı sürekli fonksiyonlar için de var olduğu gerçeğinden faydalanacağız. Bu gerçeklik, kütle korunum kanununu ifade eden (4.14) denkleminin bir sonucudur. $E_1(t)$ ile $E_1(t) = \int_R \sigma(x, t) dx$ integralini gösterelim.

Tanım 2.2 $E_1(0) = \int_R \sigma(x, 0) dx$ ile tanımlanan $E_1(0)$ sayısına $v(x, t)$ fonksiyonunun kritik değeri denir.

Şimdi, $\sigma(x, t)$ fonksiyonunun süreksizlik noktalarının yerini ve bu noktaların zamana göre evrimini araştıracağız. Daha önce belirtildiği gibi, yardımcı problemin çözümü tek değerlidir. Tek ve fiziksel olarak anlamlı bir çözüm bulabilmek için bazı ilave koşullar gereklidir.

Tanım 2.3 Her t için, $v(x, t)$ nin kritik bir değer aldığı noktaların geometrik konumuna ön eğri denir.

$x_f = x_f(t)$, $v(x, t)$ nin süreksizlik eğrisinin denklemini olmak üzere

$$v(x_f(t), t) = \int_{-\infty}^{x_f} \sigma(x, t) dx = E_1(0)$$

olur. Son bağıntıdan

$$\frac{dx_f(t)}{dt} = \frac{[F_w(\sigma)]}{[\sigma]} \Big|_{x=x_f(t)} \quad (4.24)$$

elde ederiz. Burada $[f]$, bir $x = x_0$, noktasında f fonksiyonunun şokunu gösterir, yani $[f] = f(x_0 + 0) - f(x_0 - 0)$ dır.

Tanım 2.4

$$v_{gen}(x, t) = \begin{cases} v(x, t), & v < E_1(0), \\ E_1(0), & v \geq E_1(0) \end{cases}$$

ile tanımlanan fonksiyona (4.19), (4.20) probleminin genişletilmiş çözümü denir.

Teorem 2.1 den, (4.14), (4.15) esas probleminin zayıf çözümü için

$$\sigma_{gen}(x, t) = \frac{\partial v_{gen}(x, t)}{\partial x}$$

elde ederiz. Bu, $\sigma(x, t)$ ye ilişkin bir süreksizlik noktasının, (4.14), (4.15) probleminin çözümünün sıfıra eşit olduğu sağdaki nokta olduğu anlamına gelir.

(4.24) den kolaylıkla

$$t = \int_0^{x_f(t)} \frac{dx}{F_w'(\sigma)}$$

elde edebiliriz. Dolayısıyla, $\sigma(x, t)$ için bir sıçrayışın varlığına ilişkin gerekli ve yeterli koşul integralin $\int_0^{x_f(t)} \frac{dx}{F_w(\sigma)} < \infty$ olmasıdır.

Şimdi herhangi bir $a > 0$ için $\frac{v(x,t)-v(x-a,t)}{a}$ bağıntısını değerlendirelim:

$$\begin{aligned} \frac{v(x, t) - v(x - a, t)}{a} &= \frac{1}{a} \int_0^t [F(u(x, \tau)) - F(u(x - a, \tau))] d\tau \\ &\leq \frac{1}{a} \int_0^T [F(u(x, \tau)) - F(u(x - a, \tau))] d\tau \leq \frac{E_2}{t}. \end{aligned}$$

Burada $E_2 = \frac{2}{a} \sup_u F(u)$ dur. Bu, karakteristiklerin dağılım oranını gösteren entropi koşuludur. Dolayısıyla $v(x, t)$ fonksiyonu (4.19), (4.20) probleminin entropi çözümüdür.

KAYNAKÇA

- Buckley, S. E, Leverett, M. C. (1942). Mechanism of fluid displacement in sands. *Transactions of the AIME*, 146(01), 107-116.
- Collins, R. E. (1961). *Flow of fluids through porous materials*. New York: Reinhold Publishing.
- Goritskii, A. Y., Krujkov, S. N., & Chechkin, G. A. (1997). *First order quazi linear equations with partial derivatives*, Moscow: Pub. of Moscow University.
- Muskat, M. (1946). *The flow of homogeneous fluids through porous media*, New York: J. W. Edwards.
- Rasulov, M. A. (1991). On a method of solving the cauchy problem for a first order nonlinear equation of hyperbolic type with a smooth initial condition. *Soviet Math. Dok.*, 43(1), 150-153.
- Rasulov, M. A. (2011). *Süreksiz fonksiyonlar sınıfında korunum kanunları*. Ankara: Seçkin Yayınevi.
- Sinsoysal, B., Rasulov, M. (2009). *Efficient numerical method of the 1D motion of the two-phase fluid through porous medium in a class of discontinuous functions*, In: Margenov S., Vulkov L.G., Wasniewski J., (eds) Numerical Analysis and Its Applications. Lecture Notes in Computer Science, Vol 5434, 532-539, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Tikhonov, A. N., Samarskii, A. A. (1977). *Equations of mathematical physics*. Moscow: Nauka.
- Toro, E. F. (1999). *Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics*. Berlin: Springer-Verlag.

BÖLÜM 5

TİTANYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERE TAKVİYE EDİLEN HEGZAGONAL BOR NİTRÜRÜN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Doç.Dr. İsmail TOPCU¹

Öğr. Gör. Dr. Ethem İlhan ŞAHİN²

¹ Alanya Alaaddin Keykubat,Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme mühendisliği Bölümü. Alanya,Antalya, Türkiye. İsmail.topcu@alanya.edu.tr, ORCID ID : 0000-0002-2998-6569

² Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Advanced Technology Research and Application Center, Adana, 01250, Türkiye. shnethem@gmail.com, ORCID ID :0000-0001-7859-9066

1. GİRİŞ

Toz Metalurjisi, elementel veya ön alaşımli tozları bir arada harmanlayarak, bu karışımı bir kalıpta sıkıştırarak ve preslenmiş parçayı kontrollü bir atmosfer fırınında sinterleyerek veya ısıtarak metalürjik parçacıkları birbirine bağlayarak, güvenilir ağ şekilli bileşenler üretmenin oldukça gelişmiş bir yöntemidir. P/M süreci, nihai boyutlarda basit veya karmaşık parçalar üretmede oldukça uygun maliyetli olan avantajlı bir imalat yöntemidir. (Koczak ve Premkumar, 1989).

Geleneksel metalik malzemeler bu tür gereksinimleri nadiren karşılar. Bununla birlikte, metal matrisli kompozitler alanındaki son gelişmeler bu zorluğun üstesinden gelmiştir. Son yıllarda geliştirilen birçok metal matrisli kompozit, çeşitli gereksinimleri kombinasyonlarını karşılayacak özelliklere sahiptir. Titanyum bazlı kompozitler, bu tür metal matrisli kompozitlerin önemli bir grubunu oluşturur (Chandrasekar vd 2007, Alman vd 1999).

Seramik parçacıklarla güçlendirilmiş titanyum metal matrisli kompozitler (TMMC'ler), öncelikle yüksek özgül modülleri, toklukları, yüksek sıcaklıkları, yüksek özgül dayanımları, iyi korozyon dirençleri ve iyi aşınma dirençleri nedeniyle havacılık, ulaşım ve endüstriyel sektörlerdeki yapısal uygulamalar için önemli bir potansiyele sahiptir (Mosleh vd 2009).

Hekzagonal bor nitrür (h-BN), iyi fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı günümüzde birçok uygulamada kullanılan sentetik bir refrakter malzemedir (Lian vd 2011, Topcu vd. 2019, Topcu vd 2020). BN, altıgen BN (hBN), kübik BN (cBN), turbostratik BN (tBN), vurtzitik BN (wBN), eşkenar dörtgen BN (rBN) ve patlayıcı BN (eBN) gibi çeşitli kristal yapılarla başarıyla sentezlenip elde edilmiştir. Bor nitrür (BN), son derece yüksek erime sıcaklığı, termal şok direnci, kimyasal inert ligi, toksik olmaması ve çevre güvenliği nedeniyle yapısal uygulamalar için umut verici bir malzeme olarak kabul edilmiştir (German, 2005, Topcu vd. 2021). Özellikle BN'nin erimiş metal tarafından zayıf ıslana bilirligi çok iyi bir özelliğidir. Bu nedenle BN bazlı kompozitler, çelik ve demir dışı metallerin üretim endüstrisinde kullanılabilir (Lavemia vd 1991). Hem bir refrakter hem de bir yağlayıcıdır (Huda vd 1995, Topcu vd 2018). h-BN, mükemmel yağlama özellikleri sağlayan grafit benzer bir kristal yapıya sahiptir (Lian vd 2010).

Toz metalürjisi (P/M) teknolojisi, işlemenin en aza indirilmesini ve böylece maliyetlerin düşürülmesini sağlayan net şekilli bileşenlerin üretilmesi için kullanışlı yöntemdir (Wang vd 2012). Toz teknolojileri, yalnızca taklit

edileme yetenekleri nedeniyle değil, aynı zamanda tasarım özellikleri nedeniyle de mühendisler için önemlidir (German, 2005).

Kompozitler yeni malzemenin istenilen eksikliklerini giderebilir, kompozit numune üretiminde dört temel parametre söz konusudur. Öğütme, karıştırma, sıkıştırma ve sinterleme (Wang vd 2012; Şahin, Emek ve İbrahim, 2023; Şahin vd 2020). Yaygın olarak Al, Ti, Mg, Ni, Cu, Pb, Fe, Ag, Zn, Sn ve süper alaşımları kullanılmaktadır.

Al, Ti ve Mg alaşımları diğerlerine göre geniş uygulama alanlarına sahiptir (Topcu, 2020). Tablo 1’de bazı metallerin bazı tipik özellikleri yer almaktadır.

Tablo 1: Bazı Metallerin ve Alaşımlarının Bazı Tipik Özellikleri

| Metaller | Yoğunluk (gr/cm ³) | Young Modülü (GPa) | Akma Dayanımı (MPa) | Çekme Dayanımı (MPa) |
|-----------------|--------------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| Alüminyum | 2.7 | 70 | 40 | 200 |
| Bakır | 8.9 | 120 | 60 | 400 |
| Nikel | 8.9 | 210 | 70 | 400 |
| Ti-6Al-4V | 4.33 | 110 | 900 | 1000 |
| Paslanmaz Çelik | 7.69 | 195 | 240 | 365 |
| Karbon Çeliği | 7.9 | 210 | 250 | 420 |

Kompozit malzeme yapısal uygulamalarda kullanılacaksa, takviye malzemesinin yüksek mukavemete, elastik modüle ve düşük yoğunluğa sahip olması gerekir. Köşeli parçacıklar stres konsantrasyonuna neden olduğundan ve sünekliği azalttığından, parçacığın parçacık şekli mekanik özellikler üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir (Lian vd 2010).

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen kompozitler farklı takviye ve üretim yöntemler ile iyileştirilen özelliklerinden dolayı genel kompozitlerden ayrılmaktadır. Toz metalurjisinde ana matris ve takviye malzeme olarak metal tozları kullanılarak üstün özellikte kompozitlerin üretilmesini ifade eder. Toz metalurjisi endüstriyel talepleri karşılayabildiğinden ve üretimde yüksek kolaylık sağladığından uygun bir üretim tekniğidir (Şahin, 2022). Toz metalurjisi, sıkıştırılabilir metal tozlarını güçlü ve yüksek performanslı parçalara dönüştürmek için kullanılan süreçlerin bir sonucudur. Bu

yöntem, süreksiz toz parçacıkları ile takviye edilmiş kompozitlerin hazırlanmasında yaygın olarak kullanılırken sinterleme prosesinde kullanılan yöntem sıvı sinterleme tekniği alaşımların ıslana bilirliliğinin düşük olması nedeniyle benimsenen ileri bir tekniktir, diğer tekniklerle karşılaştırıldığında, nispeten düşük enerji tüketimi ve düşük maliyet, ile bu yöntemin yaygınlaşmasını sağlayan bir avantajdır. Toz metalurjisi, yüksek erime noktasına sahip metallerin ve kompozitlerin üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntemde yoğunluk farklılıklarından kaynaklanan oksidasyon, ayrışma, gaz absorpsiyonu ve alaşımlama gibi problemler ortadan kaldırılabilmektedir (Topcu, 2020).

Mekanik alaşımlama (MA), elementel tozlardan başlayarak ticari olarak yararlı malzemelerin hem denge hem de denge dışı fazlarını sentezlemek için basit ve kullanışlı bir tekniktir. Aynı zamanda önemli teknik avantajları olan ekonomik bir süreçtir. Mekanik alaşımlamanın en büyük avantajlarından biri, normalde karışmayan elementlerin alaşımlaması gibi başka hiçbir teknikle mümkün olmayan yeni alaşımların sentezidir. Bunun nedeni, mekanik alaşımlamanın tamamen katı hal işleme tekniği olması ve bu nedenle faz diyagramlarının getirdiği sınırlamaların burada geçerli olmamasıdır. Mekanik alaşımlama (MA) normalde kuru, yüksek enerjili bir bilyeli öğütme tekniğidir ve ticari olarak faydalı ve bilimsel olarak ilginç çeşitli materyaller üretmek için kullanılmıştır.

Şekil.1 MA sürecini kullanan bir üretim proses şemasıdır. Hammaddeler, kullanılan değirmen tipi, karıştırma işlemi ve ısı işleminin detayları istenen ürün tipine göre değişir, ancak işleme prosesi genelde benzerdir. Bazı küçük adımların eklenmesi veya bazılarında değiştirilmesi mümkündür. MA'nın asıl süreci, tozların doğru oranda karıştırılması ve tozun öğütme atmosferi (genellikle çelik bilyeler) ile değirmene yüklenmesi ile başlar (Suryanarayana, 2004).

Öğütme/Karıştırma teknikleri elde edilmesi gereken özelliklere sahip kompozitleri oluşturmak için gelişmiştir. Başarılı bir teknik, alaşımlı bir bileşik parçacık oluşturmak için karıştırılan bilyeler arasındaki aşınma hareketini kullanan mekanik alaşımlamadır (Lavemia ve Srivatsan, 1991). Öğütme, sert bilyeler, çubuklar veya çekiçler kullanılarak yapılan mekanik darbeyi ifade eder ve kırılan

malzemelerden toz üretmeye yönelik klasik bir yaklaşımdır. En basit cihaz, Şekil.1'de gösterildiği gibi, bilyeler ve öğütülecek malzeme ile dolu silindirik bir kavanozdan oluşan bir kavanoz değirmendir. Kavanoz döndükçe, toplar sürekli olarak toz halindeki malzeme ile çarpışır ve onu daha da küçük parçacıklara ayırır. Kırılgan bir malzemeyi öğütme yoluyla kırmak için gereken darbe gerilimi, malzemenin kusurlu yapısı ve çatlak ilerlemesine karşı hassasiyet ile ilgilidir. Daha büyük, kırılma için daha az darbe gerilimi gerektirir. Öğütme sırasında parçacık boyutu küçüldükçe gerekli stres arttı (Dorr, 1986).

2. METOT VE MALZEME

2.1 Malzemeler ve Uygulanan İşlemler

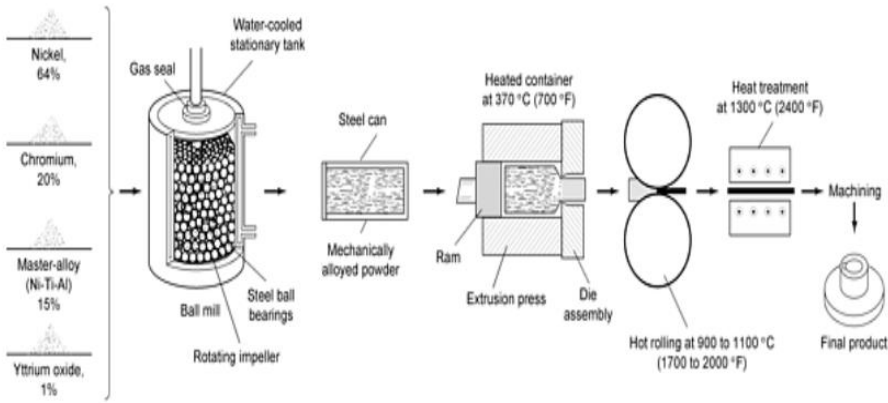
Bu çalışmada, ana matris olarak Ti6Al4V tozu (Coldstream SA, Ath, Belçika) kullanılmıştır. Ti6Al4V tozunun parçacık boyutları 40–145 µm aralığındaydı. H.C. tarafından sağlanan h-BN katı yağlayıcı tozlar. 6–10 µm aralığında parçacık boyutlarına sahip Starck Inc. (Almanya), Takviye malzemesi ana matrise hacimce %7.5-%17.5 arasında değişen oranlarda ilave edildi. Toz bileşenler beş saat ve 350 rpm devirde helezonik cihazda karıştırıldı. Karışık tozlar daha sonra 10 mm çapında silindirik numuneler elde etmek için preslendi. Numunelerin ham yoğunluğu, teorik yoğunluğun yaklaşık %83.3'ü kadardı.

Yaş numuneler, 700°C sıcaklıkta argon atmosferi altında bağlayıcıdan arındırıldı ve 1250°C'de argon atmosferi altında sinterlendi. Numuneler son olarak sinterleme fırınında soğutulmuştur. Ham ve sinterlenmiş yoğunluklar, Metal Tozu Endüstrileri Federasyonu (MPIF) Standardı 42'ye (2002) göre deneysel olarak belirlendi.

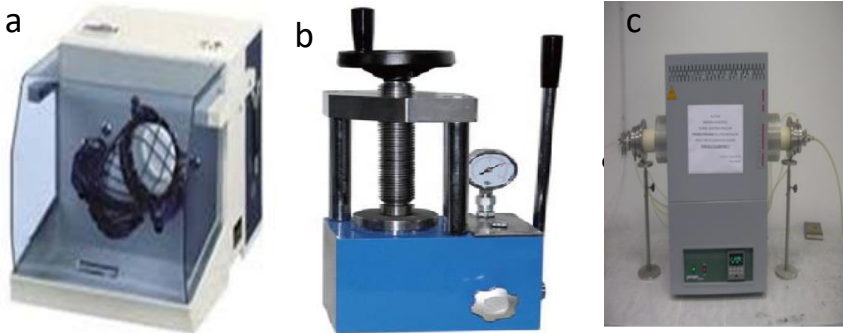
2.2. h-BN Takviyeli Titanyum Matrisli Numune Üretimi

Kompozitlerin üretimi sırasında %7.5, %12.5 ve %17.5 hacimce h-BN ve %1 oranında Acrowax bağlayıcı ile trubula aşındırma helezonik karıştırma cihazında Ti6Al4V tozuna takviye edilerek çalışmalar başlamıştır.

Karıştırma prosesinde bilyenin toza ağırlık oranı 3:1, öğütme hızı 350 Rpm, bilye çapı: 10 mm alümina bilye. Toz malzemeler tek eksenli pres ile 25 MPa 'da kolayca preslenmiştir. Preslenen numuneler farklı zaman aralıklarında (75 dk., 135 dk.ve 195 dk.) ve 1250 °C de yüksek saflıkta argon atmosferinde sinterlendi. Çünkü diğer sinterleme atmosferlerinde numunelerin oksitlenmesi söz konusu olabilir. Üretim akış şeması şekil 2 de gösterilmiştir.



Şekil 1: Toz metalürjisi ile Mekanik Alaşımlama akış prosesi (German, 2005).

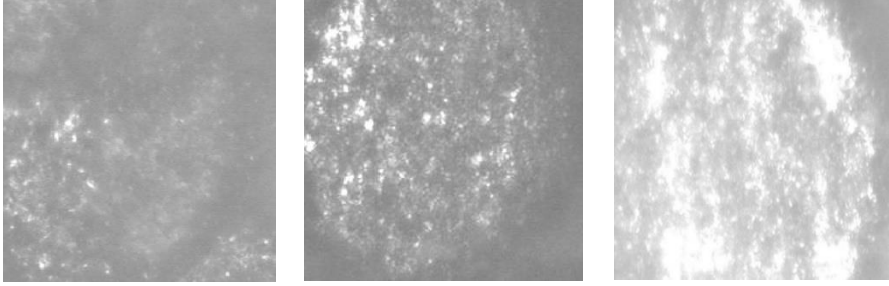


Şekil 2: Çalışmada kullanılan cihazlar.

2.3. Mikroskopik İnceleme

İncelenen kompozitlerin boyuna kesitlerinden elde edilen metalografik numuneler incelenmek üzere hazırlandı. Tüm numuneler 300, 600, 800 ve 1000 mesh SiC zımpara kağıtları ile özenli bir şekilde

zımparalandı. Daha sonra numuneler Al_2O_3 pastası çuhada parlatıldı. Kompozitlerin mikro yapıları LEICA optik mikroskobu ile incelendi (Şekil 3 ve Şekil 4).

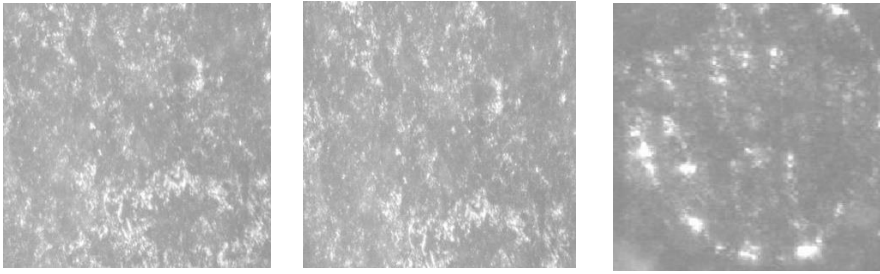


a) h-BN %7.5

b) h-BN %12.5

c) h-BN %17.5

Şekil 3: Farklı oranlarda h-BN ile takviye edilen Ti6Al4V kompozit numunelerinin 75 dk. sinterlemesi ile elde edilen mikroyapı görüntüleri.



a) h-BN %7.5

b) h-BN %12.5

c) h-BN %17.5

Şekil 4: Farklı oranlarda h-BN ile takviye edilen Ti6Al4V kompozit numunelerinin 195 dakikada sinterlemesi ile elde edilen mikroyapı görüntüleri.

2.4. Sertlik Testleri

Numunelerin mekanik özellikleri sertlik ölçümleri ile belirlendi. Instron universal sertlik test cihazı kullanılarak metalografik olarak hazırlanmış numunelere sertlik testleri yapılmıştır. Kompozitlerin sertliğini bulmak için Vickers 136° elmas uç ve 500 gr test yükü uygulanarak ölçümler yapıldı. Üretilmiş numune kompozit malzeme olduğu için sertlik izinin homojen olarak alınması için hem matrisi hem de takviye malzemesinin ölçülmesi gerekmektedir.

Sertlik değeri kompozitin kütle sertliğini temsil etmesi için sertlik ölçümleri birbirini izleyen 10 ölçümün ile yapılmıştır. Elde edilen sertlik ölçümü sonuçları 10 değerın ortalamasıdır.

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Elde edilen numuneler, toz metalürjisi ile üretilmiş, h-BN ile güçlendirilmiş Ti6Al4V tozudur. Tozların özellikleri bir önceki bölümde verilmiş ve farklı miktarlarda h-BN içeren kompozitlerin 1250 C de sinterlenmiş ve ortalama yoğunluk değerleri Tablo.2'de listelenmiştir. Malzemelerin teorik yoğunluğu: Ti6Al4V alaşımı 4.43 gr/cm³, h-BN 2.28 gr/cm³.

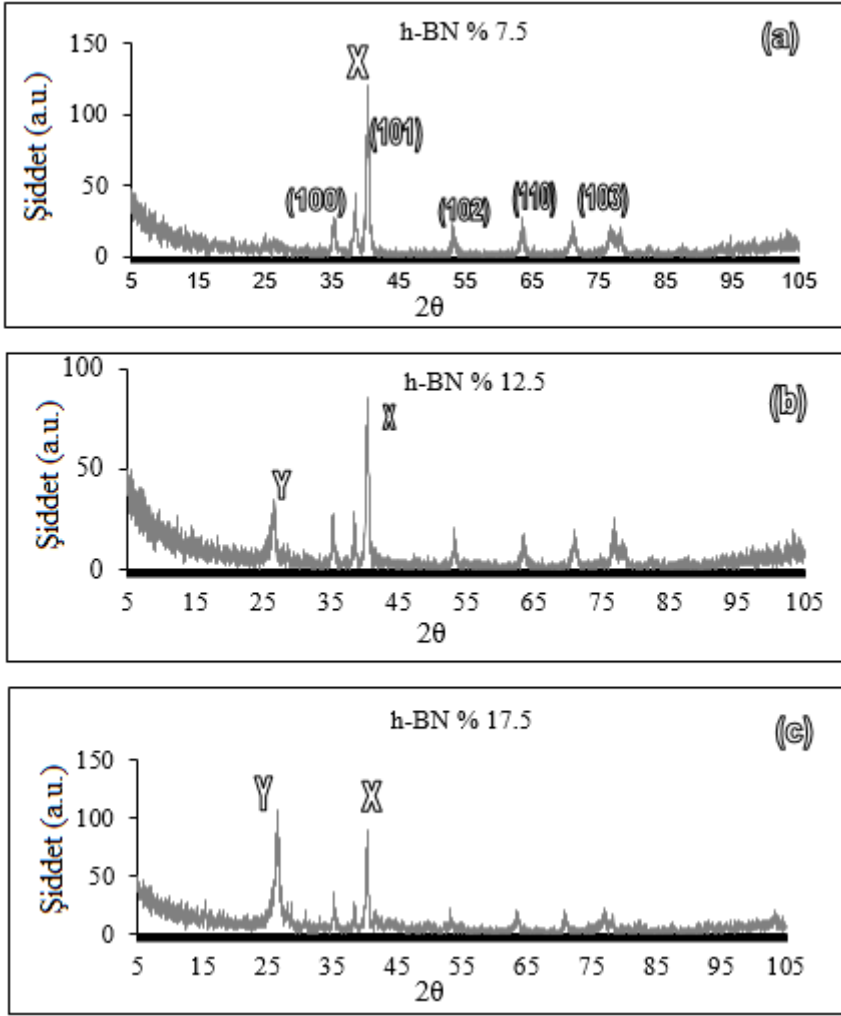
Tablo 2. Kompozit numunelerin saatin fonksiyonu olarak yoğunlukları

| Malzeme | Yoğunluk (gr/cm ³) | | |
|---------------------|--------------------------------|---------|---------|
| | 75 dk. | 135 dk. | 195 dk. |
| Takviye h-BN % 7.5 | 4.39 | 4.32 | 4.29 |
| Takviye h-BN % 12.5 | 4.26 | 4.25 | 4.21 |
| Takviye h-BN % 17.5 | 4.21 | 4.16 | 4.12 |

Yoğunluk testleri üç farklı sinterleme sıcaklığı ve üç farklı takviye oranı ile elde edilmiş olan kompozit numunelerin 500 gr ağırlık ölçümü ile bütün numune yüzeyi taranarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ortalama sertlik değerleri Tablo 2'de listelenmiştir ve h-BN'nin hacimce yüzdesi ve sinterleme zamanı kompozitlerin yoğunluk değerinde azalma olduğu görülmüştür.

Bu durum üretilen numunenin zamana göre içyapıdaki poroziteyi elemine etmiş ancak düşük yoğunluğa sahip artan takviye h-BN oranı ile de yoğunluğunun azaldığı Tablo 2'de görülmektedir.

BN ve Ti alaşımından elde edilen XRD desenleri şekil.5'te verilmiştir.



Şekil 5: Farklı hacimde; a) %7.5 h-BN, b) % 12.5 h-BN, c) % 17.5 h-BN içeren Ti6Al4V alaşım tozunun XRD modelleri.

Karakterizasyon testleri üç farklı sürede, üç farklı takviye oranında ve 1350°C’de üretilen kompozit numunelerin 5 °C’den 105 °C’ye kadar hassasiyetle taranması ile edilmiştir. Burada ana pik (101) ile verilen 39.45 °C’de (X) görülmüştür. Artan h-Bn oranı ile pik şiddetlerinde değişiklikler görülmüş, özellikle %7.5 takviyeli numunelerde sırası ile 26.34 °C’de 18.5 (Y), 39,6 (Y), 116 (Y) şiddetine sahip pikler belirlenmiştir.

Tablo 3. Farklı sinterleme saatlerine sahip BN'nin sertlik değeri

| Malzeme | Sertlik Değeri (HV 500 gr) | | |
|---------------------|----------------------------|--------|--------|
| | 75 dk | 135 dk | 195 dk |
| Takviye h-BN % 7.5 | 44.5 | 50.1 | 63.8 |
| Takviye h-BN % 12.5 | 50.6 | 55.4 | 70.2 |
| Takviye h-BN % 17.5 | 64.3 | 60.1 | 82.3 |

Yukarıda yapılan değerlendirme sonucunda elde etmek istediğimiz metal matrisli kompozit üretiminden başarılı sonuçlar alındığı şekil 5’de görülmektedir.

Vickers sertlik testleri, üç farklı sinterleme sıcaklığı ve üç farklı takviye oranı ile elde edilmiş olan kompozit numunelerin 500 gr ağırlık ölçümü ile bütün numune yüzeyi taranarak gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin ortalama sertlik değerleri tablo 3’de listelenmiştir ve h-BN'nin hacim yüzdesi arttıkça ve farklı saatlerde kompozitin sertliğinin arttığı Tablo 3’te görülmektedir (Topcu vd 2019).

4. SONUÇ

- ✓ Bu çalışmada, farklı takviye (h-BN) oranları ile güçlendirilmiş Ti6Al4V numunelerinin yoğunluk ve sertlik özellikleri, sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak incelenmiştir.
- ✓ Çalışmanın sonuçları şu şekilde ifade edilebilir;
- ✓ Elde edilmiş olan numunelerin yoğunlukları teorik yoğunluğa azalarak yaklaşmaktadır.
- ✓ Mikroskobik resimler, h-BN parçacıklarının özellikle matris içinde homojen bir şekilde dağıldığını ve ayrışma

olmadığını göstermiştir. Fakat h-BN partiküllerinin uç kısımlarında porozite varlığının olduğu görülmüştür. Söz konusu porozitelerin mekanik alaşımlama işlemlerinden dolayı meydana geldiği gözlemlenmiştir.

- ✓ XRD, artan h-BN içeriğinin, h-BN'nin ana pikinin alanında bir artışa neden olduğunu göstermektedir.
- ✓ Numune üretim tekniği olarak HIP veya CIP kullanan literatürleri araştırıldı. Ayrıca h-BN yüzey gerilmelerinin yüksek olmamasında dolayı ıslatamama söz konusudur. Islatmayan araçlar MA tekniği ile kolayca birleşmiyor ve bağlayıcı kullanılmalıdır. Bu bağlayıcı, sinterleme işleminden önce çıkarılır. Bağlayıcı uzaklaştırıldığında numune içerisinde porozite oluşabileceği için bağlayıcı giderme prosesinde parametreler dikkatli seçilmelidir. Söz konusu prostesten sertlik ve yoğunluk değerleri etkilenir.
- ✓ Artan h-BN hacim yüzdesi ve sinterleme süresi arttıkça kompozitin sertliği de artmaktadır. BN ilavesiyle sertliğin artması, dispersiyon güçlendirme etkisine bağlanabilir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmada 2016 yılındaki destekleri için, Marmara Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden Prof. Dr. Arif Nihat Güllüoğlu'na teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- Alman, D. E., Hawk, J. A. (1999). The abrasive wear of sintered titanium matrix ceramic particle reinforced composites. *Wear*, 225–229, 629-639.
- Chandrasekar, P., Balusamy, V., Ravi Chandran K. S., Kumar, H. (2007). Laser surface hardening of titanium–titanium boride (Ti–TiB) metal matrix composites. *Scripta Materialia*, 56(7), 641-644.
- German, R. M. (2005). Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing”Princeton USA, Huda, M.D. and Hashmi, M.S. (1995). Materials, Manufacturing and Mechanical Properties. 104- 107, 37-64.
- Koczak, M. J. ; Premkumar, M. K. High Performance Powder Metallurgy Aluminum Alloys an Overview. Philadelphia, USA.1989.
- Srivatsan, T. S., Ibrahim, I. A., Mohammed, F. A. & Lavernia, E. J. (1991). Processing techniques for particulate reinforced metal aluminium matrix composites. *Journal of Materials Science*, 26, 5965-5978.
- Lian,,G., Zhang, X., Zhu, L., Tan, M., Cui, D., Wang, Q. (2010). A facile solid state reaction route towards nearly monodisperse hexagonal boron nitride nanoparticles. *J. Mater. Chem.*, 20, 3736–3742.
- Michael, A., Jones, F., and David, R. H. Engineering Materials 2 (with corrections ed.), Oxford: Pergamon Press. ISBN 0-08-032532-7.564.1992.
- Mosleh, M., Atnafu, N. D., Belk, J. H., Nobles, O. M. (2009). Modification of sheet metal forming fluids with dispersed nanoparticles for improved lubrication, *Wear*, 267, 1220–1225.
- Murad, M. S., Usta, A., Asmatulu, R. & Ceylan, M. (2022). Studying the electrochemical behaviors of anodized metallic implants for improved corrosion resistance, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 21(41), 117-135.
- O’Connell, T.E. (1973). Production of Titanium Aluminide Products. Report AFWAL-TR-83- 4050, Wright-Patterson AFB OH.

- Anderson, R. et al, (1996). Titanium Matrix Composite Turbine Engine Component Consortium, Quarterly Status Reports for Contract F336 15-94- 2-4439, WL/MTPM, Wright-Patterson AFB OH, November 1994 through April.
- Grant, W. J. and Lewis, R., (1993). Continuous Powder/Fiber Tape Optimization Plan and Rationale for Powder/Fiber Tape Selection. Report for Contract F33615-91-C-5728, Titanium Matrix Composite (TMC) Engine Components, Wright-Patterson AFB OH.
- Şahin E. İ. (2022). Microwave electromagnetic shielding effectiveness of ZnNb₂O₆-chopped strands composites for radar and wideband (6.5-18 GHz) applications. *Lithuanian Journal of Physics*, 62(3), 161-170.
- Şahin, E. İ, Emek, M., Ertug, B. & Kartal, M. (2020). Electromagnetic shielding effectiveness of Colemanite/PANI/SiO₂ composites radar and wider frequency ranges. *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 34-42.
- Şahin, E. İ., Emek, M., Ibrahim, J. E. F. M. (2023). *Instrumental measurements laboratory* (1st ed.). Iksad Publishing House.
- Topcu, İ. & Karaman, E. (2019). Çok duvarlı karbon nanotüp takviyeli düzenli/ düzensiz ekilli Ti-6Al-4V kompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(3), 1249-1260.
- Topcu, İ. Ceylan, M. (2020). Wear behavior of irregular shape Ti6Al4V powder reinforced with carbon nanotubes. *Journal of Ceramic Processing Research*, 21(5), 539-546.
- Topcu, İ. (2020). Determination of the mechanical properties of Al/MWCNT composites obtained with the reinforcement of cu-coated multiwall carbon nanotubes (MWCNTs). *Materiali in Tehnologije*, 54(5), 689-695.
- Topcu, İ. Çetiner, B. C., Güllüoğlu, A. N. andÖzkan, G. (2018). Investigation of creep behavior of CNT reinforced Ti6Al4V under dynamic loads. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 42(1), 70-80.

- Topcu, İ., Ceylan, M., Yılmaz, E. B. (2020). Experimental investigation on mechanical properties of multi wall carbon nanotubes (MWCNT) reinforced aluminium metal matrix composites. *Journal of Ceramic Processing Research*, 21(5), 596-601.
- Topcu, İ. Güllüoğlu, A. N., Gulsoy, Ö., Bilici, M. K. (2019). Karbon nanotüp takviyeli Ti-6Al-4V/KNT kompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(3), 1441-1449.
- Topcu, İ. (2020). Investigation of wear behavior of particle reinforced AL/B4C composites under different sintering conditions. *Journal of Technical Glasnic*, 14(1), 7-14.



ISBN: 978-625-367-164-8