


$$E = mc^2$$

FEN BİLİMLERİ VE MATEMATİK

Alanında Uluslararası
Güncel Yaklaşımlar

Haziran 2026

EDİTÖRLER

PROF. DR. GÜZİDE ŞENEL
PROF. DR. EDİP BAYRAM

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Haziran 2026

ISBN • 978-625-8810-33-2

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruyenyayinevi.com

e-mail: seruyenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

FEN BİLİMLERİ VE MATEMATİK ALANINDA ULUSLARARASI GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

EDİTÖRLER

PROF. DR. GÜZİDE ŞENEL

PROF. DR. EDİP BAYRAM

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

BOR KATKILI BAZI YAPI MALZEMELERİNDE DOĞAL GAMA
RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ 1

Biröl ERTUĞRAL, Hasan BALTAŞ

BÖLÜM 2

ŞANLIURFA'NIN MERKEZ İPEK YOLU BULVARINDA TEMEL
RADYASYON DÜZEYİNİN ÖLÇÜMÜ VE YAŞAM BOYU KANSER
RİSKİNİN HESAPLANMASI 21

Ömer SÖĞÜT

BÖLÜM 3

MAKİNE ÖĞRENMESİ ALGORİTMALARINDA OPTİMİZASYON
PROBLEMLERİ 39

Arzu AKTAŞ

BÖLÜM 4

FARKLI FREKANS VE SES ŞİDDETLERİNİN PİEZOELEKTRİK ENERJİ
ÜRETİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI 55

Burak Gül, Hakan Yılmaz, Nida Çırak

BÖLÜM 5

BAĞIMLILIĞIN MOLEKÜLER VE BİYOKİMYASAL MEKANİZMALARI:
ÖDÜL SİSTEMİ, NÖROADAPTASYON VE NÖROİNFLAMASYON 75

Zuhal Emire

BÖLÜM 6

MONOAMİN OKSİDAZLAR: NÖROBİYOKİMYASAL ROL, OKSİDATİF STRES
VE TERAPÖTİK HEDEFLER ÜZERİNE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR 93

Güven BUDAK, Hülya AKINCIOĞLU

BÖLÜM 7

GÜNEŞİN DERİNLİKLERİNDEN DÜNYAYA: NÖTRİNOLAR VE KUTUP
IŞIKLARI117

Çağın KAMIŞCIOĞLU

BÖLÜM 8

KAHRAMANMARAŞ DULKADİROĞLU İLÇESİNİN TRABZON
CADDESİNDE GÜRÜLTÜ DOZUNUN HESAPLANMASI.....135

Ömer SÖĞÜT, Cemil EFE

BÖLÜM 9

Tİ VE AG ELEMENTLERİ İLE BAZI KOMPLEKSLERİN KB/KA X-IŞINI
ŞİDDET ORANLARININ ÖLÇÜMÜ163

Birol ERTUĞRAL, Ömer SÖĞÜT



BOR KATKILI BAZI YAPI MALZEMELERİNDE DOĞAL GAMA RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ

“ ”

Birol ERTUĞRAL¹

Hasan BALTAŞ²

1 Prof. Dr.; Giresun Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü
birol.ertugral@giresun.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-4376-3476

2 Prof. Dr.; Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü
hasan.baltas@erdogan.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-1939-8253

GİRİŞ

İnşaat sektöründe kullanılan malzemelerin yalnızca mekanik ve fiziksel özellikleri değil, aynı zamanda çevresel ve radyolojik etkileri de gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır. Doğada yaygın olarak bulunan primordial radyoaktif izotoplar, yapı malzemeleri aracılığıyla iç mekân ortamlarına taşınarak insanlarda düşük dozda ancak sürekli bir radyasyon maruziyetine neden olabilmektedir. Özellikle kapalı alanlarda uzun süre geçirilen zaman dikkate alındığında, yapı malzemelerinin toplam radyasyon dozuna katkısı göz ardı edilemeyecek düzeydedir (UNSCEAR, 2000; European Commission, 1999; Turhan, 2008).

Doğal radyoaktivite, yerkabuğunda bulunan uranyum (^{238}U), toryum (^{232}Th) serileri ve potasyum (^{40}K) gibi primordial radionüklidlerin bozunması sonucu ortaya çıkan ve çevrede sürekli olarak varlığını sürdüren bir olgudur (UNSCEAR, 2000; IAEA, 2014). İnsanlar bu doğal radyasyona başlıca kozmik ışınlar, yer kabuğu ve yapı malzemeleri aracılığıyla maruz kalmaktadır. Bu nedenle, yapı malzemelerinde bulunan doğal radyoaktivitenin belirlenmesi, radyasyon güvenliği açısından önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir.

Son yıllarda, yapı malzemelerinin performansını artırmaya yönelik katkı maddelerinin kullanımı önemli ölçüde yaygınlaşmış olup, bu katkılar arasında bor ve bor bileşikleri dikkat çekici bir yer edinmiştir. Bor, periyodik tabloda yarı metal (metalloid) özellik gösteren ve doğada çoğunlukla borat mineralleri halinde bulunan bir elementtir. Düşük yoğunluğu, yüksek erime noktası ve üstün kimyasal kararlılığı sayesinde geniş bir endüstriyel kullanım alanına sahiptir (Helvacı & Alonso, 2000; Eti Maden, 2021). Özellikle ^{10}B izotopunun yüksek nötron soğurma kesitine sahip olması, boru nükleer uygulamalar ve radyasyon zayıflatma teknolojileri açısından önemli kılmaktadır (IAEA, 2014). Bunun yanı sıra bor bileşikleri; yüksek ısı dayanımı, alev geciktiricilik, kimyasal kararlılık ve mekanik dayanım artışı gibi özellikler sağlayarak cam, seramik, metalurji ve yapı sektörlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Garrett, 1998; **Akkurt ve ark., 2008**). Ayrıca borun çevre dostu ve geri dönüştürülebilir özellikleri, sürdürülebilir malzeme geliştirme çalışmalarında da önemli bir rol oynamasına katkı sağlamaktadır (Eti Maden, 2021).

Bor katkılı yapı malzemelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerine yönelik çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen (Beretka ve Mathew, 1985; Garrett, 1998; Helvacı & Alonso, 2000; **Akkurt ve ark., 2008**; **Çalık ve ark., 2009**), bu malzemelerin radyolojik özelliklerini inceleyen araştırmaların sınırlı

olduğu görülmektedir (Baykara ve ark., 2011; Al-Sulaiti ve ark., 2011; Seval, 2024; Kılınçarslan, 2000; Turhan, 2008; Akkurt ve ark., 2012). Oysa bor katkısının yapı malzemelerinin doğal gama radyoaktivite seviyeleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi, hem insan sağlığı hem de yapı güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, bor içeren doğal minerallerden kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ve üleksit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) öne çıkmaktadır. Kolemanit bir kalsiyum borat minerali olup cam, seramik ve deterjan üretiminde yaygın olarak kullanılırken, üleksit lifsi yapısı ve ışık iletme özelliği nedeniyle “TV taşı” olarak da bilinmekte ve benzer şekilde sanayide önemli bir hammadde olarak değerlendirilmektedir. Türkiye, bu mineraller açısından zengin rezervlere sahip olup bor üretiminde dünyada önemli bir konumdadır.

Bu bağlamda, bu çalışmada farklı konsantrasyondaki (%0,05-%5) bor katkılı bazı yapı malzemelerinde ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K doğal gama radyoaktivite seviyeleri, Yüksek Saflıkta Germanyum (HPGe) dedektörü kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, radyolojik tehlike indeksleri (Ra_{eq} , D , YED , *Alfa İndeksi*, *Gama İndeksi*) hesaplanmış; elde edilen bulgular literatürde bildirilen değerlerle karşılaştırılmış ve uluslararası radyasyon güvenliği kriterleri çerçevesinde değerlendirilerek insan sağlığı açısından uygunluğu tartışılmıştır.

MATERYAL VE METOT

Numunelerin Hazırlanması

Ölçümlerde kullanılmak üzere hazırlanan harç numunelerine ait karışım bileşenleri ve bunların miktarları Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Harç numunelerine ait karışım bileşenleri ve miktarları (g)

Numune türleri ve katkı miktarları	Agrega	Su	Çimento	Kolemanit	Üleksit
C0 - Katkısız	1350	225	447,75	-	-
K1 -Kolemanit % 0,5	1350	225	445,5	2,22	-
K2- Kolemanit % 1	1350	225	441,0	4,45	-

K3- Kolemanit % 2	1350	225	436,5	8,91	-
K4- Kolemanit % 3	1350	225	432,0	13,36	-
K5-Kolemanit % 4	1350	225	427,5	17,82	-
K6-Kolemanit % 5	1350	225	427,5	22,28	-
U1-Üleksit % 0,5	1350	225	445,5	-	2,22
U2-Üleksit % 1	1350	225	441,0	-	4,45
U3- Üleksit % 2	1350	225	436,5	-	8,91
U4-Üleksit % 3	1350	225	432,0	-	13,36
U5- Üleksit % 4	1350	225	427,5	-	17,82
U6-Üleksit % 5	1350	225	427,5	-	22,28

Burada, C0 numunesi katkısız standart harç numunesini temsil etmektedir. K1, K2, K3, K4, K5 ve K6 numuneleri kolemanit katkılı, U1, U2, U3, U4, U5 ve U6 numuneleri ise üleksit katkılı harç numuneleridir. Kolemanit ve üleksit katkılı numuneler, standart numunenin çimento kütlesi %0,5, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında azaltılarak, aynı toplam kütleyi koruyacak şekilde katkılardan arındırılmış ve öğütülmüş kolemanit veya üleksit eklenerek hazırlanmıştır.

Bu araştırmada yararlanılan kolemanit ve üleksit türü bor mineralleri, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'ne bağlı olarak faaliyet gösteren Balıkesir Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü aracılığıyla temin edilmiştir.

Harç numuneleri, tane çapı 4 mm'nin altındaki agregası (kum) kullanılarak ve CEM I 42,5 R sınıfı çimento ile üretilmiştir. Numuneler TS EN 196-1 (TSE, 2009) standardına uygun olarak hazırlanmıştır.

Harçlar, nemlendirilmiş karıştırıcı kabına 225 g su konduktan sonra çimento ilave edilip 15 saniye karıştırılmış, ardından standart kum eklenmiş ve iki defa 90 saniye mikserde karıştırılmıştır. Hazırlanan harçlar, sarsma tablasında 4×4×16 cm'lik prizmatik kalıplara yerleştirilmiştir. Numuneler, 24 saat boyunca 20±1 °C ve %90 nem ortamında bekletildikten sonra

kalıplarından çıkarılmış ve 20 ± 2 °C’de kirece doymun suda 28 gün süreyle standart küre tabii tutulmuştur. Belirlenen sürelerin sonunda, standart ve bor katkılı harç numuneleri yaklaşık 1 cm kalınlığında kesilerek doğal gama radyoaktivite ölçümleri için hazır hâle getirilmiştir.

Radyoaktivite ölçümleri

Katkısız ile kolemanit ve üleksit katkılı yapı malzemelerinin doğal gama radyoaktivite seviyeleri, 1332,5 keV’de 1,9 keV enerji çözünürlüğüne ve %55 relatif verime sahip ORTEC GEM55P4–95 model Yüksek Safılıkta Germanyum (HPGe) dedektörü kullanılarak 50.000 saniye süreyle ölçülmüştür.

^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K radyoaktif izotoplarının aktiviteleri, elde edilen gama spektrumların detaylı analizi ve standart hesaplamalar sonucunda belirlenmiştir. ^{232}Th serisinin aktivite konsantrasyonu 911,1 keV (^{228}Ac) ve 583,1 keV (^{208}Tl) enerji çizgileri kullanılarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, ^{226}Ra serisinin aktivite konsantrasyonunun tayininde, radyoaktif denge koşulları altında 351,9 keV (^{214}Pb) ve 609,3 keV (^{214}Bi) enerjilerindeki karakteristik gama geçişlerinden yararlanılmıştır. ^{40}K izotopunun aktivite konsantrasyonu ise 1460,8 keV enerjisindeki karakteristik gama emisyonu yoluyla doğrudan tayin edilmiştir. Bu yaklaşım, uluslararası kabul görmüş yöntemler ve Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA, 1989 ve 2003) ile Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu (ICRP, 2007) tarafından önerilen standartlara dayanmaktadır.

Ölçülen numunelerdeki doğal radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları aşağıdaki 1 no’lu denklem kullanılarak hesaplanmıştır:

$$C = \frac{N}{\varepsilon PMt} (Bq kg^{-1}) \quad (1)$$

Burada N, gama ışınının net sayım oranı; ε , kullanılan dedektörün fotopik verimliliği; P, gama bozunumuna ait mutlak geçiş olasılığını; t, saniye cinsinden sayım süresi ve M, kurutulmuş numunenin kilogram cinsinden kütlesini ifade etmektedir.

Radyum eşdeğer aktivitesi (R_{eq})

Harç numunelerinde Radium-226 (^{226}Ra), Thorium-232 (^{232}Th) ve Potassium-40 (^{40}K) dağılımının homojen olmadığı belirlenmiştir. İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalma açısından farklı radyonüklid içeriklerine sahip malzemelerin karşılaştırılabilirliğini sağlamak amacıyla homojenlik kavramı, radyum eşdeğer aktivitesi (R_{eq}) ile ifade edilmektedir. Bu parametre, söz

konusu radyonüklidlerin özgül aktivitelerinin birleşik etkisini temsil eden ve birimi $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ olan standart bir ölçüt olarak tanımlanmakta olup aşağıdaki 2 no'lu denklem ile hesaplanmıştır (Beretka ve Mathew, 1985):

$$R_{\text{eq}} = C_{\text{Ra}} + 1,43 C_{\text{Th}} + 0,077 C_{\text{K}} \quad (2)$$

Burada C_{Ra} , C_{Th} ve C_{K} ; sırasıyla $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ cinsinden ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'nin aktivite konsantrasyonlarıdır. İnşaat malzemelerindeki R_{eq} 'in maksimum değeri, dış dozun $1,5 \text{ mSv y}^{-1}$ 'in altında kalması için 370 Bq kg^{-1} 'den az olmalıdır (UNSCEAR, 2010). Ayrıca, ^{226}Ra 'nın 370 Bq kg^{-1} , ^{232}Th 'nin 259 Bq kg^{-1} ve ^{40}K 'nin 4810 Bq kg^{-1} değerlerinin aynı gama ışını doz hızını ürettiği varsayılmaktadır (IAEA, 1989).

Gama İndeksi (I_γ)

Gama indeksi, yapı malzemelerinde aşırı gama radyasyonunu sınırlamak için kullanılan bir tarama yöntemidir. Tipik bir yapı malzemesi için gama indeksi aşağıdaki 3 no'lu denklem kullanılarak belirlenmiştir (EC, 1999).

$$I_\gamma = \frac{C_{\text{Ra}}}{300} + \frac{C_{\text{Th}}}{200} + \frac{C_{\text{K}}}{3000} \quad (3)$$

Burada C_{Ra} , C_{Th} ve C_{K} sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'nin Bq kg^{-1} cinsinden aktivite konsantrasyonlarıdır. ^{226}Ra için 300 Bq kg^{-1} , ^{232}Th için 200 Bq kg^{-1} ve ^{40}K için 3000 Bq kg^{-1} aktivite konsantrasyonlarının her birinin aynı gama doz hızını ürettiği varsayılmakta olup, bu yaklaşım farklı radyonüklidlerin gama radyasyonuna katkılarının karşılaştırılabilir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Alfa İndeksi (I_α)

Bu indeks, yapı malzemelerinden kaynaklanan radon maruziyetini değerlendirmek için önerilmiştir. Malzemede bulunan ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu esas alınarak aşağıdaki 4 no'lu denklem yardımıyla hesaplanmıştır.

$$I_\alpha = \frac{C_{\text{Ra}}}{200 \text{ Bq kg}^{-1}} \quad (4)$$

Burada C_{Ra} , alfa yayıcı ^{226}Ra aktivite konsantrasyonudur (Bq kg^{-1}). İnşaat malzemelerinde ^{226}Ra konsantrasyonları için önerilen muafiyet ve önerilen üst seviyeler sırasıyla 100 Bq kg^{-1} ve 200 Bq kg^{-1} 'dir (EC, 1999). ^{226}Ra 'nın önerilen limit konsantrasyonu 200 Bq kg^{-1} olup, bu durumda $I_\alpha = 1$ 'dir. Bir malzemenin konut yapımında güvenli kullanımı için I_α 'nın birden küçük olması gerekir. Ayrıca 300 Bq kg^{-1} güvenli kabul edilen sınır değeridir (EC, 1999).

Soğurulan Doz Hızı (D)

Bazı yapı malzemelerinin, ^{226}Ra ve ^{232}Th bozunma zincirlerine ait ^{214}Pb ve ^{214}Bi bozunma ürünleri tarafından yayılan gama (γ) ışınları ile ^{40}K kaynaklı radyasyon nedeniyle, toplam vücut dozu açısından önemli bir radyasyon riski oluşturabileceği düşünülmektedir. Kullanım süresi dikkate alındığında, iç mekanlardaki gama maruziyetinin dış mekan maruziyetine kıyasla daha yüksek olduğu bilinmektedir.

Kapalı ortamlarda havada soğurulan doz hızı D (nGy saat^{-1}), yapı malzemelerinde bulunan ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklidlerinin yaydığı gama ışınları dikkate alınarak aşağıda verilen 5 no'lu eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (UNSCEAR, 2000; EC, 1999):

$$D = \alpha C_{\text{Ra}} + \beta C_{\text{Th}} + \gamma C_{\text{K}} \quad (5)$$

Burada C_{Ra} , C_{Th} , C_{K} , sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarını (Bqkg^{-1}) ifade etmektedir. α , β ve γ ise her bir radyonüklidin kapalı ortamlardaki gamma radyasyonuna katkısını gösteren doz hızı katsayıları olup, birim aktivite (1 Bqkg^{-1}) başına nGy.saat^{-1} cinsinden ifade edilir. Çalışmada bu katsayılar ^{226}Ra için $\alpha = 0.92$, ^{232}Th için $\beta = 1.1$ ve ^{40}K için $\gamma = 0.08$ olarak alınmıştır (EC, 1999). Aynı zamanda bu formül, farklı radyonüklidlerin gama radyasyonuna olan katkılarını lineer olarak toplamakta ve kapalı ortamlardaki havada soğurulan doz hızını vermektedir. Elde edilen bu değer, yıllık etkin dozun tahmin edilmesinde temel girdi olarak kullanılmaktadır.

Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (YED)

Yıllık etkin doz eşdeğeri (YED), yapı malzemelerinde bulunan radyonüklidlerin aktivite konsantrasyonlarına bağlı olarak bir yetişkinin yıllık maruz kaldığı etkin dozu ifade etmektedir. Yıllık etkin doz hesaplanmasında, havada soğurulan edilen dozun etkin doza dönüştürülmesi ile bireylerin kapalı ortamlarda geçirdiği süre dikkate alınmaktadır. Bu amaçla, soğurulan dozdan etkin doza çevirme katsayısı $0,7 \text{ Sv Gy}^{-1}$ ve Türkiye nüfusu için iç mekân kullanım faktörü yaklaşık %80 olarak alınmaktadır. Buna göre, havadaki soğurulan doz hızı (D , nGy saat^{-1}) kullanılarak yıllık etkin doz (YED, mSv yıl^{-1}) aşağıdaki 6 no'lu formül yardımıyla hesaplanmıştır (Damla ve ark., 2010):

$$\text{YED} (\text{mSv yıl}^{-1}) = D (\text{nGy saat}^{-1}) \times 8760 (\text{saat yıl}^{-1}) \times 0.8 \times 0.7 \times (\text{Sv Gy}^{-1}) \times 10^{-6} \quad (6)$$

Bu formül, kapalı alanlarda maruz kalınan gamma radyasyonunun yıllık etkin dozunu tahmin etmek için standart bir yöntemdir.

BULGULAR VE TARTIŞMALAR

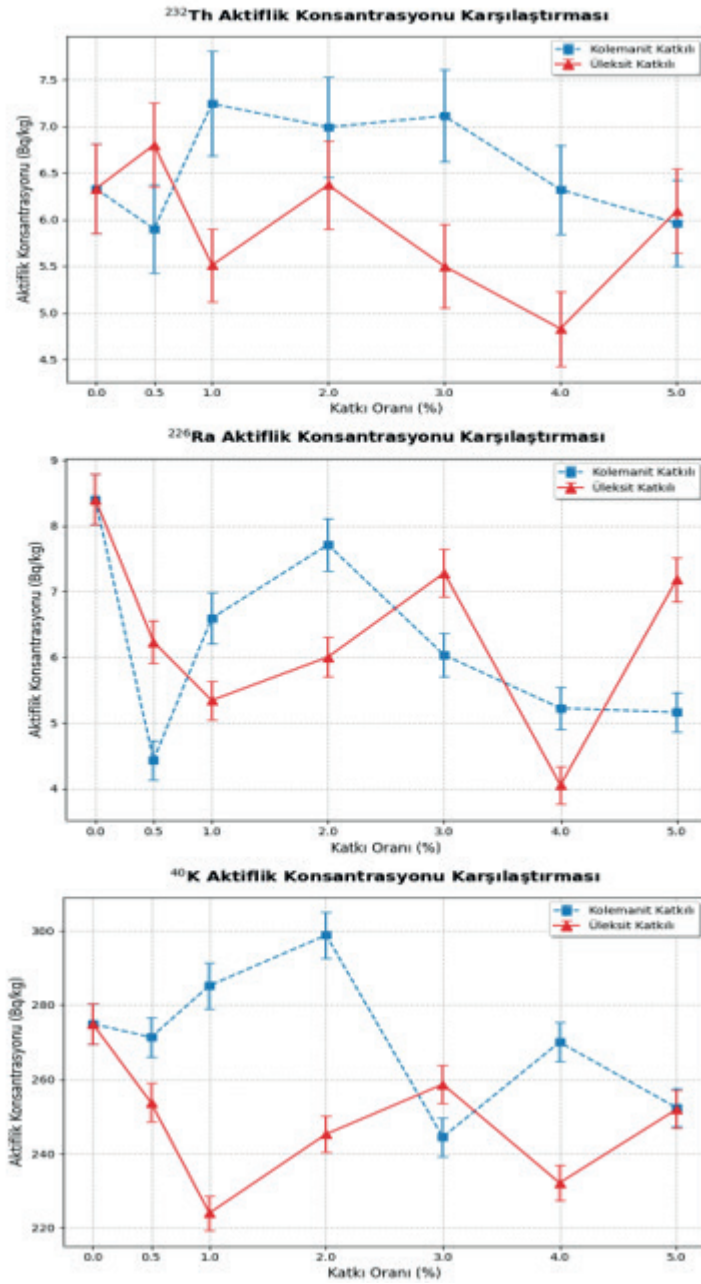
²³²Th, ²²⁶Ra ve ⁴⁰K Aktivlik Konsantrasyonları ve Grafiksel Değerlendirmeler

Bu çalışmada, katkısız ve farklı oranlarda (%0,05, %1, %2, %3, %4 ve %5) bor minerali katkısı içeren kolemanit ve üleksit katkılı yapı malzemelerinde ²³²Th, ²²⁶Ra ve ⁴⁰K doğal gama radyoaktivite seviyeleri, Yüksek Safılıkta Germanyum (HPGe) dedektörü kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları Tablo 1’de sunulmuştur. Ayrıca, ²³²Th, ²²⁶Ra ve ⁴⁰K aktivite konsantrasyonlarının kolemanit ve üleksit katkı oranlarına bağlı değişimleri Şekil 1’de verilmiştir. Şekil 2’de ise ortalama aktivite değişimleri gösterilmiştir. Bununla birlikte her aktivite konsantrasyonu için ısı haritası çıkarılmış olup Şekil 3 te sunulmuştur.

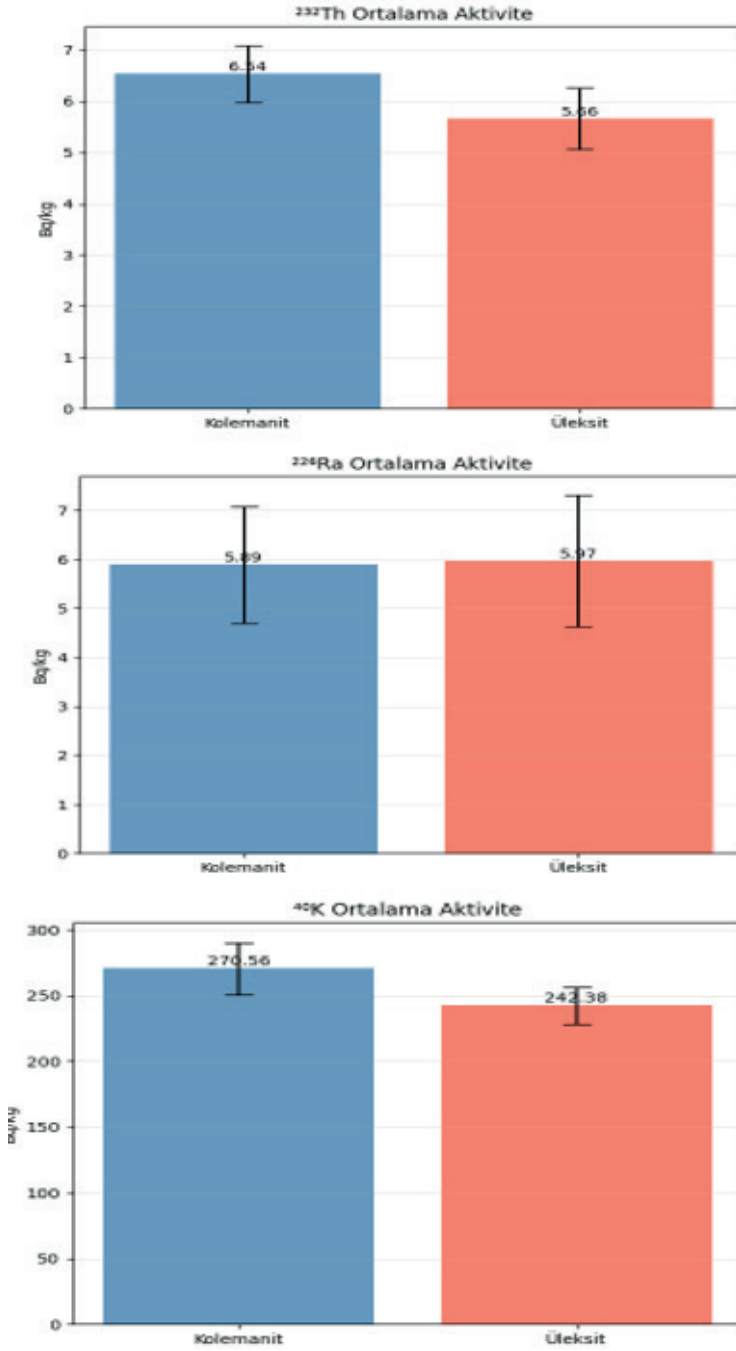
Tablo 1. Bazı Yapı malzemelerindeki ²³²Th, ²²⁶Ra ve ⁴⁰K aktiflik konsantrasyonları

Numune	²³² Th (Bq/Kg)	²²⁶ Ra (Bq/Kg)	⁴⁰ K (Bq/Kg)
C0 - Katkısız	6,33 ± 0,48	8,40 ± 0,38	274,91 ± 5,44
K1 -Kolemanit % 0,5	5,90 ± 0,47	4,43 ± 0,30	271,3 ± 5,38
K2- Kolemanit % 1	7,24 ± 0,56	6,59 ± 0,39	285,19 ± 6,15
K3- Kolemanit % 2	6,99 ± 0,54	7,71 ± 0,40	298,75 ± 6,04
K4- Kolemanit % 3	7,11 ± 0,49	6,03 ± 0,33	244,47 ± 5,19
K5-Kolemanit % 4	6,32 ± 0,48	5,22 ± 0,32	269,98 ± 5,26
K6-Kolemanit % 5	5,96 ± 0,46	5,16 ± 0,30	252,40 ± 5,10

U1-Üleksit % 0,5	$6,80 \pm 0,45$	$6,23 \pm 0,33$	$253,70 \pm 5,14$
U2-Üleksit % 1	$5,51 \pm 0,39$	$5,34 \pm 0,29$	$224,03 \pm 4,58$
U3- Üleksit % 2	$6,37 \pm 0,47$	$6,00 \pm 0,30$	$245,25 \pm 4,89$
U4-Üleksit % 3	$5,50 \pm 0,45$	$7,28 \pm 0,36$	$258,64 \pm 5,18$
U5- Üleksit % 4	$4,83 \pm 0,40$	$4,05 \pm 0,28$	$232,14 \pm 4,75$
U6-Üleksit % 5	$6,09 \pm 0,45$	$7,18 \pm 0,34$	$251,85 \pm 5,06$



Şekil 1 Kolemanit ve Üleksit katkısına bağlı ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K aktivite değişimleri



Şekil 2. K Colemanite ve Üleksit katkısına bağlı ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K ortalama aktiviteleri

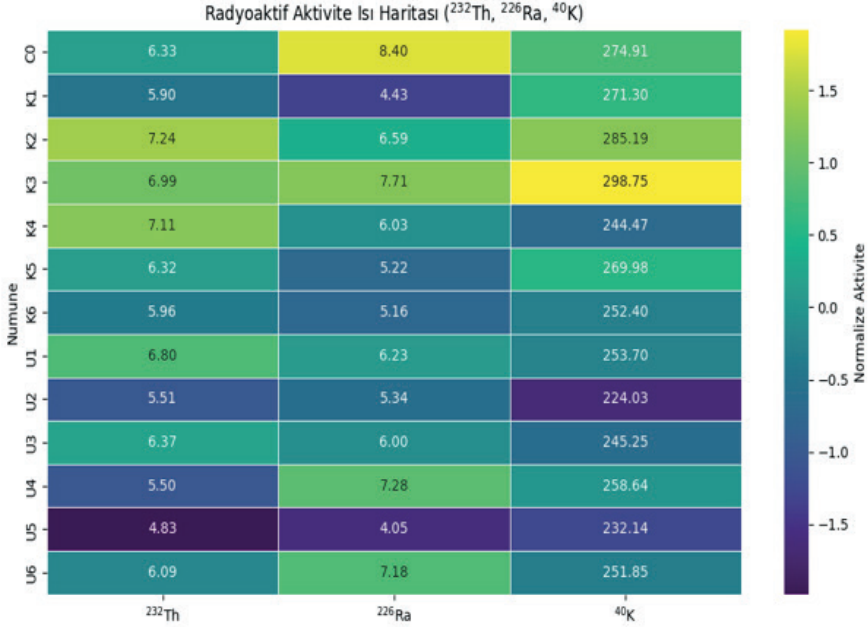
Tablo 1’de sunulan veriler ile Şekil 1 ve 2’deki grafiksel dağılımlar birlikte incelendiğinde; Kolemanit ve üleksit katkılı numunelerin ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K ortalama aktivite konsantrasyonları katkı türü ve oranına bağlı olarak belirgin değişimler gözlenmiştir. Katkısız numuneye (C0) ait değerler sırasıyla 6,33 Bq/kg, 8,40 Bq/kg ve 274,91 Bq/kg olup karşılaştırmalar için referans alınmıştır.

Kolemanit katkılı numunelerde ^{232}Th aktivite konsantrasyonlarının dar bir aralıkta değiştiği (5,90–7,24 Bq/kg) ve genel olarak katkı oranına bağlı belirgin bir artış veya azalış eğilimi göstermediği görülmektedir. Buna karşılık ^{226}Ra değerlerinde katkı ile birlikte belirgin bir düşüş (özellikle %0,5 katkıda 4,43 Bq/kg) gözlenmiş, daha yüksek katkı oranlarında ise dalgalı bir değişim sergilemiştir. ^{40}K aktivite konsantrasyonları ise %2 katkıya kadar artış göstererek maksimum değere (298,75 Bq/kg) ulaşmış, daha yüksek katkı oranlarında ise azalma eğilimine girmiştir. Bu durum, düşük oranlı kolemanit katkısının potasyum içeriğini artırıcı, yüksek oranların ise seyreltici etki oluşturabileceğini düşündürmektedir.

Üleksit katkılı numunelerde ise ^{232}Th aktivite konsantrasyonlarının 4,83–6,80 Bq/kg aralığında değiştiği ve bazı katkı oranlarında (özellikle %4) belirgin azalma gösterdiği dikkat çekmektedir. ^{226}Ra aktivitesi ise kolemanit katkılı numunelere benzer şekilde dalgalı bir dağılım sergilemekle birlikte bazı oranlarda (örneğin %3 ve %5) görece yüksek değerlere ulaşmıştır. ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının ise genel olarak katkısız numuneye kıyasla daha düşük olduğu ve %1 katkıda minimum değere (224,03 Bq/kg) indiği belirlenmiştir.

Genel bir perspektifle bakıldığında, üleksit katkılı numunelerin radyonüklid konsantrasyonlarını düşürme (seyreltme) kapasitesinin kolemanitten daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kolemanit katkısı belirli oranlarda toryum ve potasyum değerlerini stabilize ederken veya hafifçe artırırken; üleksit, numunenin toplam spesifik aktivitesini baskılayan ve çoğunlukla daha düşük aktivite değerleri ile karakterize edilmekte ve daha belirgin dalgalanmalar göstermektedir.

Bu bulgular, düşük arka plan radyasyonu gerektiren yapı malzemesi tasarımlarında üleksitin, kolemanite oranla daha tercih edilebilir bir bor minerali olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3. Katkı oranına bağlı ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K için ısı haritası değişimi

Şekil 3'te, Radyoaktif elementlerin (^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K) örnekler arasındaki dağılımı Z-score normalizasyonu ile karşılaştırmalı olarak ısı haritası şeklinde incelenmiştir. Bu yöntem, farklı birim ve büyüklükteki aktivitelerin aynı ölçek üzerinde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Normalize edilmiş (standartlaştırılmış) Z değerleri ise her bir veri noktası için matematiksel olarak Denklem 7 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (7)$$

Burada; X orijinal veri değerini (örneğin ^{232}Th aktivitesi), μ ilgili sütunun ortalamasını, σ standart sapmasını ifade etmektedir

Genel olarak ^{232}Th ve ^{226}Ra değerleri örnekler arasında daha dar bir dağılım gösterirken, ^{40}K aktivitesinde daha belirgin değişkenlik gözlenmiştir. Özellikle K3 numunesi ^{40}K açısından pozitif yönde yüksek sapma göstererek en yüksek normalize değere sahip örneklerden biri olmuştur. Buna karşılık U2 ve U5 örnekleri hem ^{232}Th hem de ^{226}Ra bakımından düşük normalize edilmiş ısı haritası değerleri göstererek ortalamanın altında kalmıştır. C0 referans numunesi, ^{226}Ra açısından pozitif sapma gösterirken ^{232}Th ve ^{40}K için ortalama

seviyeye yakın bir dağılım sergilemiştir. Bu durum, C0'ın özellikle radyum katkısı açısından diğer örneklerden ayrıştığını göstermektedir.

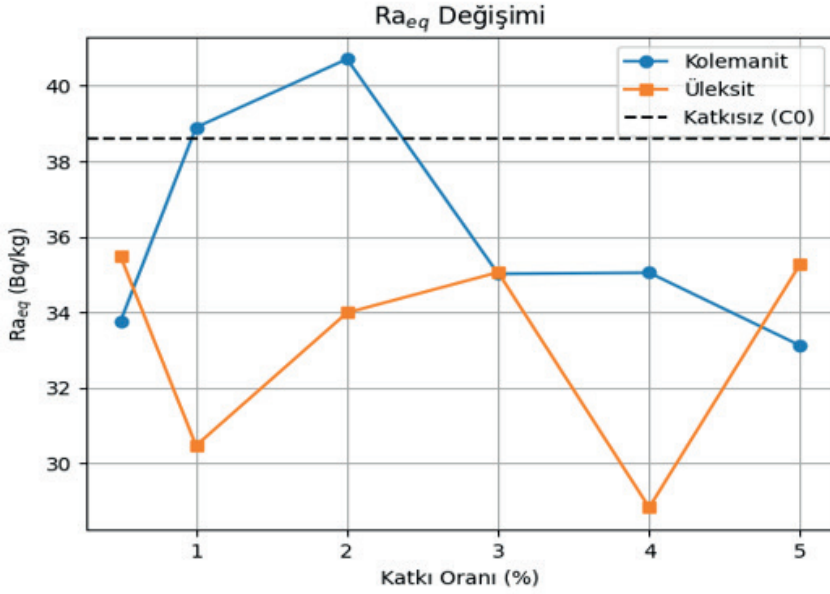
Radyolojik Risk İndeksleri ve Grafikselsel Değerlendirmeler

Çalışmada üretilen Katkısız ve %0–%5 aralığında değişen oranlarda kolemanit ve üleksit katkısı içeren malzemelerin içerdığı doğal radyonüklidler (^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K) dikkate alınarak, insan sağlığı üzerindeki etkilerin değerlendirilmesi amacıyla radyolojik risk indeksleri olan R_{eq} , D , YED , I_γ ve I_α değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 2’de sunulmuştur. Ayrıca bu malzemelere ait radyum eşdeğeri (R_{eq}) aktivite değerlerinin değişimi grafikselsel olarak Şekil 3 te ortaya konulmuştur.

Tablo 2. Bazı Yapı malzemelerindeki R_{eq} , D , YED , I_γ ve I_α index değerleri

Numune	R_{eq} (Bq/kg)	D (nGy/saat)	YED (mSv/yıl)	I_γ	I_α
C0 - Katkısız	$38,62 \pm 1,49$	$36,68 \pm 1,3$	$0,18 \pm 0,01$	$0,15 \pm 0,01$	$0,04 \pm 0,002$
K1 -Kolemanit % 0,5	$33,76 \pm 1,39$	$32,27 \pm 1,2$	$0,16 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,002$
K2- Kolemanit % 1	$38,9 \pm 1,66$	$36,84 \pm 1,5$	$0,18 \pm 0,01$	$0,15 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,002$
K3- Kolemanit % 2	$40,71 \pm 1,64$	$38,68 \pm 1,4$	$0,19 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,01$	$0,04 \pm 0,002$
K4- Kolemanit % 3	$35,02 \pm 1,43$	$32,93 \pm 1,3$	$0,16 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,002$
K5-Kolemanit % 4	$35,05 \pm 1,41$	$33,35 \pm 1,2$	$0,16 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,002$
K6-Kolemanit % 5	$33,12 \pm 1,35$	$31,5 \pm 1,2$	$0,15 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,002$
U1-Üleksit % 0,5	$35,49 \pm 1,37$	$33,51 \pm 1,2$	$0,16 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,002$
U2-Üleksit % 1	$30,47 \pm 1,2$	$28,9 \pm 1,1$	$0,14 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,004$	$0,03 \pm 0,001$
U3- Üleksit % 2	$33,99 \pm 1,35$	$32,15 \pm 1,2$	$0,16 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,005$	$0,03 \pm 0,002$

U4-Üleksit % 3	35,06 ± 1,4	33,44 ± 1,2	0,16 ± 0,01	0,14 ± 0,01	0,04 ± 0,002
U5- Üleksit % 4	28,83 ± 1,22	27,61 ± 1,1	0,14 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,02 ± 0,001
U6-Üleksit % 5	35,28 ± 1,37	33,45 ± 1,2	0,16 ± 0,01	0,14 ± 0,01	0,04 ± 0,002

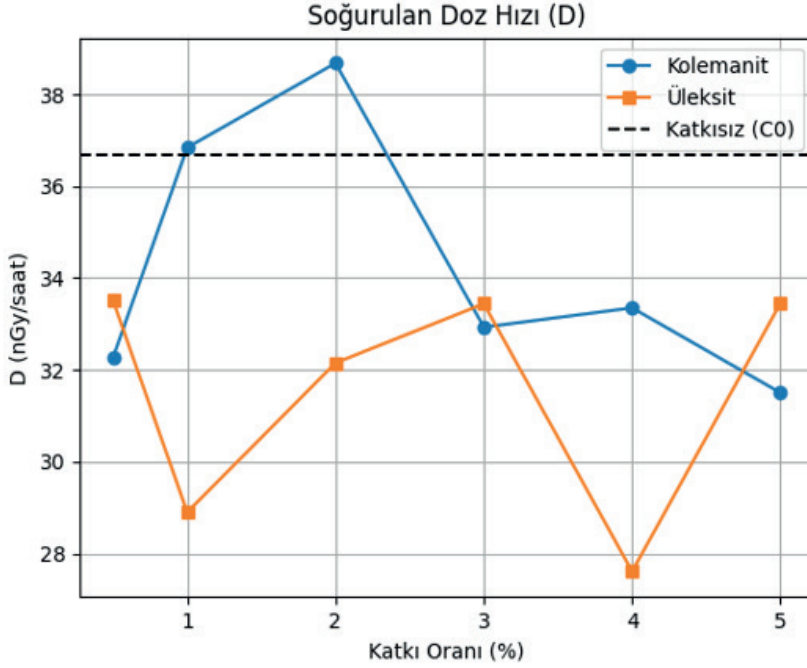


Şekil 4. Ra_{eq} değerlerinin katkı oranına bağlı olarak değişimi

Şekil 4'te verilen Ra_{eq} değerlerinin katkı oranına bağlı değişimi incelendiğinde, kolemanit katkılı numunelerde %0,5 katkı oranında katkısız numuneye göre bir azalma gözlenmiş, %1 ve %2 katkı oranlarında ise artış eğilimi ortaya çıkmış ve en yüksek değer %2 katkı oranında elde edilmiştir. Daha yüksek katkı oranlarında ise Ra_{eq} değerlerinin yeniden azalma eğilimine girdiği belirlenmiştir. Üleksit katkılı numunelerde ise Ra_{eq} değerlerinin daha düzensiz bir değişim sergilediği, bazı oranlarda (özellikle %1 ve %4) belirgin düşüşler meydana geldiği görülmüştür.

Bununla birlikte; ortamda maruz kalınan gama radyasyonunun birim kütle başına enerji soğurma hızını temsil eden doz hızı (D) değerlerinin,

katkısız ve %0–%5 aralığında değişen oranlarda kolemanit ve üleksit katkısı içeren yapı malzemelerindeki değişimi grafiksel olarak incelenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Soğurulan doz hızı (D) değerlerinin katkı oranına bağlı olarak değişimi

Şekil 5'te sunulan Soğurulan doz hızı (D) değerleri incelendiğinde kolemanit katkılı numunelerde %2 katkı oranına kadar artış eğilimi gözlenmiş, bu orandan sonra azalma eğilimi ortaya çıkmıştır. Üleksit katkılı numunelerde ise Soğurulan doz hızı değerlerinin katkı oranına bağlı olarak dalgalı bir davranış sergilediği ve bazı oranlarda katkısız numuneye göre belirgin düşüşler gösterdiği tespit edilmiştir.

SONUÇLAR

Yapı malzemelerinde doğal gama radyoaktivitenin başlıca kaynakları olan ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K radyonüklidleri, çevresel radyasyon seviyelerinin belirlenmesinde temel parametreler olarak kabul edilmektedir. Bu radyonüklidlerin aktivite konsantrasyonları, yapı malzemelerinin insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerinin değerlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu kapsamda, söz konusu radyonüklidlerin toplam radyolojik etkisini ifade etmek amacıyla radium eşdeğeri aktivite (R_{eq}), soğurulan doz hızı (D), yıllık etkin doz (YED) ile gamma ve alfa indeksleri (I_γ ve I_α) yaygın olarak kullanılmaktadır (UNSCEAR, 2000; UNSCEAR, 2008).

Bu çalışmada, katkısız (C0) ve farklı oranlarda (%0–%5) kolemanit ve üleksit katkısı içeren yapı malzemelerinde ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K doğal radyonüklidlerinin oluşturduğu radyolojik etkiler incelenmiştir (Tablo 1). Bu amaçla, numunelere ait R_{eq} , D, YED, I_γ ve I_α değerleri hesaplanmış ve katkı oranına bağlı değişimleri grafiksel olarak değerlendirilmiştir (Tablo 2). Elde edilen sonuçlar, katkı türü ve oranının radyolojik parametreler üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu göstermektedir.

Radium eşdeğeri aktivite (R_{eq}) değerlerinin tüm numunelerde 370 Bq/kg sınır değerinin oldukça altında olduğu belirlenmiştir. Bu sınır değer, yapı malzemelerinin güvenli kullanımına ilişkin temel kriterlerden biri olup (UNSCEAR, 2000) tarafından önerilmektedir. Bu çalışmada elde edilen maksimum R_{eq} değerinin (~40 Bq/kg) söz konusu sınırın oldukça altında kalması, incelenen malzemelerin radyolojik açıdan güvenli olduğunu ortaya koymaktadır.

Soğurulan doz hızı (D) değerleri incelendiğinde, tüm numunelerin yaklaşık 27–39 nGy/saat aralığında olduğu ve bu değerlerin dünya ortalama açık alan doz hızı olan yaklaşık 60 nGy/saat değerinin altında kaldığı görülmektedir (UNSCEAR, 2008). Bu bulgu, yapı malzemelerinin çevresel gama radyasyonuna katkısının sınırlı olduğunu göstermektedir.

Yıllık etkin doz (YED) değerlerinin 0,14–0,19 mSv/yıl aralığında olduğu ve bu değerlerin halk için önerilen 1 mSv/yıl sınırının oldukça altında kaldığı belirlenmiştir. Bu sınır değer ICRP tarafından önerilmekte olup (ICRP, 2007), elde edilen sonuçlar incelenen yapı malzemelerinin uzun süreli kullanımda önemli bir radyolojik risk oluşturmadığını göstermektedir.

Gamma indeksi (I_γ) değerlerinin tüm numunelerde 1'in altında olması, malzemelerin yapı malzemesi olarak kullanım açısından uygun olduğunu

göstermektedir. Bu kriter Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan radyasyon koruma raporlarında belirtilmiştir (European Commission, 1999). Benzer şekilde, alfa indeksi ($I\alpha$) değerlerinin düşük olması, radon kaynaklı içsel maruziyet riskinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır.

Katkı oranına bağlı değişimler incelendiğinde, kolemanit katkılı numunelerde belirli oranlara kadar (özellikle %2) artış eğilimi gözlenmesine rağmen daha yüksek katkı oranlarında azalma eğilimi tespit edilmiştir. Üleksit katkılı numunelerde ise daha düzensiz bir değişim gözlenmiş, ancak bazı katkı oranlarında belirgin düşüşler elde edilmiştir. Bu durum, katkı türü ve oranının radyolojik özellikler üzerinde farklı etkiler oluşturduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen tüm radyolojik parametrelerin uluslararası sınır değerlerin oldukça altında kaldığı ve literatür verileri ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, kolemanit ve üleksit katkılı yapı malzemelerinin radyolojik açıdan güvenli olduğunu ve uygun katkı oranlarında alternatif yapı malzemesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

- Akkurt, I., Adnan, C., Akyıldırım, H., & Mavi, B. (2008). The effect of boronizing on the radiation shielding properties of steel. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 63, 445–447.
- Akkurt, I., Akyıldırım, A., Karıpcin, F., & Mavi, B. (2012). Chemical corrosion on gamma-ray attenuation properties of barite concrete. *Journal of Saudi Chemical Society*, 16, 199–202. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.03.020>
- Al-Sulaiti, H., Alkhomashi, N., Al-Dahan, N., Al-Dosari, M., Bradley, D. A., Bukhari, S., Matthews, M., Regan, P. H., & Santawamaitre, T. (2011). Determination of the natural radioactivity in Qatari building materials using high-resolution gamma-ray spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*.
- Baykara, O., Karatepe, Ş., & Doğru, M. (2011). Assessments of natural radioactivity and radiological hazards in construction materials used in Elazığ, Turkey. *Radiation Measurements*, 46, 153–158.
- Beretka, J., & Mathew, P. J. (1985). Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. *Health Physics*, 48(1), 87–95.
- Çalık, A., Akkurt, İ., & Akyıldırım, H. (2009). Determination using as radiation armor of boron material. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye.
- Damla, N., Cevik, U., Kobya, A. I., Celik, A., Celik, N., & Van Grieken, R. (2010). Determination of natural radioactivity levels of some concretes and mineral admixtures. *Journal of Hazardous Materials*, 176, 644–650. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.081>
- Eti Maden. (2021). Bor sektör raporu. Ankara, Türkiye.
- European Commission. (1999). Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials (Radiation Protection No. 112). Directorate-General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection.
- Garrett, D. E. (1998). *Borates: Handbook of deposits, processing, properties, and use*. Academic Press.
- Helvacı, C., & Alonso, R. N. (2000). Borate deposits of Turkey and Argentina: A summary and geological comparison. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 9, 1–27.

- International Atomic Energy Agency (IAEA). (1989). Measurement of radionuclides in food and the environment (Technical Reports Series No. 295). Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2003). Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2014). Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. Vienna: IAEA.
- International Commission on Radiological Protection (ICRP). (2007). The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP Publication 103). Elsevier.
- Kılınçarslan, Ş., Başyigit, C., & Akkurt, İ. (2007). Investigation of heavyweight concrete with barite aggregates for radiation shielding. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 22(2), 393–399.
- Seval, H., Yağımlı, M., & Tozan, H. (2024). Nötron radyasyondan korunmak için bor katkılı yüzey kaplaması oluşturulması ve karakterizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(4), 2383–2394. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1277335>
- Turhan, Ş. (2008). Assessment of natural radioactivity and radiological hazards in Turkish cement and its raw materials. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99(2), 404–414.
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (2009). TS EN 196-1: Çimento deney metotları – Bölüm 1: Dayanım tayini. Ankara: TSE.
- UNSCEAR. (2000). Sources, effects and risks of ionizing radiation: Report to the General Assembly with Annex B. United Nations.
- UNSCEAR. (2008). Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2008 report. United Nations.
- UNSCEAR. (2010). Sources and effects of ionizing radiation (Vol. I, pp. 3–18). United Nations.



ŞANLIURFA'NIN MERKEZ İPEK
YOLU BULVARINDA TEMEL
RADYASYON DÜZEYİNİN ÖLÇÜMÜ
VE YAŞAM BOYU KANSER
RİSKİNİN HESAPLANMASI

“=====”

Ömer SÖĞÜT¹

¹ Prof. Dr. Ömer SÖĞÜT, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1987-1116>,
omersogut@gmail.com.Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik
Bölümü 46100 Kahramanmaraş-Türkiye.

1. GİRİŞ

Enerjilerine göre iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan olarak ikiye ayrılan radyasyon, enerjinin dalgalar veya parçacıklar halinde uzayda yayılması olarak tanımlanmaktadır. Dünyadaki tüm canlılar doğumundan ölümüne kadar hem karasal hem de Dünya dışı radyasyona maruz kalırlar. Radyasyon Dünya dışı radyasyonu uzaydan gelen kozmik ışınları oluştururken karasal radyasyonu Dünya kabuğunda bulunan doğal radyasyon kaynakları (kabuğunda bulunan ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K gibi radyonüklidler) suni radyasyon kaynaklarından oluşur. Suni radyasyon kaynaklarını röntgen, tomografi, mamografi, radyofarmasötik ilaçlar, nükleer enerji ile atomik ve nükleer araştırmalarda kullanılan radyoaktif kaynaklar oluşturmaktadır (Monica ve ark., 2016; UNSCEAR, 2000; Yılmazkaya ve ark., 2025). Temel doğal radyasyonunun seviyesi, bölgenin jeolojik ve coğrafi özelliklerinin yapısına bağlı olarak da değişmektedir (UNSCEAR, 2017; Daryoush Shahbazi-Gahrouei, 2013; Ahmed ve ark., 2022). Dünya yüzeyindeki yaşamın kaynağının radyasyon olduğu ifade edilebilirken birçok hastalığın dolayısıyla ölümlerin nedeninin de radyasyon olduğu söylenebilir. Ek olarak, canlılar vücut yapılarında doğal olarak bulunan ^{40}K radyoaktif element nedeniyle içsel radyasyona maruz kalırlar. ^{40}K radyoaktif elementi tüketilen gıdalar ve su yoluyla da vücuda alınırlar. Bunların dışında topraktan evlere bina çatlakları ile su tehsisatları aracılığı ile sızan ve iyi havalandırılmayan kapalı alanlarda birikim yapabilen radon gazı Dünya sağlık örgütüne göre sigaradan sonra Dünya genelinde akciğer kanserlerin en büyük nedenlerinden biridir (web 1; WHO, 2009). Dünya Sağlık Örgütü'nün bir parçası olan Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı (IARC) tarafından geliştirilmiş bir proje olan Küresel Kanser Gözlemevi'ne göre, 2020 yılında toplam 19.292.789 yeni kanser vakası tespit edilmiş ve %11,7 ile meme kanseri ve %11,4 akciğer kanserinin geldiği rapor edilmiştir. %14,3 ile akciğer kanserinin ise erkeklerde en sık görülen tümör türü olduğu da rapor edilmiştir. Sigara içmeyenlerde akciğer kanseri, tüm akciğer kanseri vakalarının yaklaşık %15-25'ini oluşturmaktadır ve IARC sigara içmeyenlerde akciğer kanseri sebebi için iç mekan radonu, hava kirliliği, arsenik, krom, asbest, nikel, kadmiyum, berilyum, silika ve dizel gibi çeşitli çevresel kanserojenler olarak listelemiştir (WHO, 2009; Ferlay ve ark., 2019; Riudavets ve ark., 2022). Dünya sağlık örgütüne göre bir insan tarafından doğal radyasyonlardan alınan ortalama yıllık

etkin doz 2,4 mSv'ı aşmamalıdır. Bununla birlikte, bazı ülkelerde 10 mSv'nin üzerine kadar çıkabilmektedir (UNSCEAR, 2000). Ancak, dünyanın

birçok bölgesinde, radyasyon çalışanları için belirlenen 20 mSv/y doz sınırından dahi daha yüksek potansiyel yıllık etkin fraksiyonlanmamış, yani orijinal, doğal veya işlenmemiş formunda (standart halinde) bırakılmış dozlara (HE) sahip yüksek doğal radyasyon (HBNR) alanları bulunmaktadır. Brezilya, Çin, Hindistan ve İran'da HBNR bölgeleri mevcuttur ve son yıllarda bu bölgelerinde yapılan çalışmaların bazıları daha fazla ilgi görmüştür (Sohrabi, 2013). Bu bağlamda, uluslararası konferanslardaki sunumlarda ve diğer ilgili yayınlarda, ayrıca bazı kapsamlı incelemelerde bazı fiziksel ve biyolojik dozimetri ve epidemiyolojik çalışmalar da rapor edilmiştir (Eisenbud ve Gesell, 1997; Sohrabi, 1998; Cardis, 2005; Hendry ve ark., 2009; Sohrabi, 2013; Boice ve ark., 2010). Granit, mermer, fosfat kayaları ve tortullar gibi volkanik kayalarda yüksek radyoaktivite olabileceği gibi rakım ve enlem arttıkça da kozmik radyasyonlardan kaynaklanan radyasyon dozunun da artabileceği ve hata bu temel (background) radyasyonun insan sağlığına muhtemel olumsuz etkilerinin oluşabileceği ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmıştır (Ahmed ve ark., 2022; Ahamad ve ark., 2024; Bayrak ve ark., 2020; Deniz ve ark., 2024; Kobya ve ark., 2015; Sajwan ve ark., 2024; Yılmazkaya ve ark., 2025). Dünya genelinde dış alanda havada soğurulan ortalama gama doz hızı 40 ile 200 nSv/h arasında değişmektedir. Küresel ortalama da yaklaşık 59 nGy/h ya da 60 nSv/h civarındadır (UNSCEAR, 2000). Türkiye genelinde yapılan haritalama çalışmalarında ortalama havada soğurulan gama doz hızı yaklaşık 80 nSv/h ile 100 nSv/h civarında olduğu söylenebilir. Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP), bir insanın doğal temel radyasyon ve tıbbi uygulamalar hariç, yapay kaynaklardan maruz kalabilecek izin verilen yıllık güvenli doz sınırının 1 mSv (1000 μ Sv) olması gerektiğini rapor etmiştir (ICRP, 2007). Türkiye'nin çeşitli illerinde havadaki gama radyasyonunun doz seviyelerini belirlemek için çok sayıda çalışma yapılmıştır (Karataş, 2019; Yılmazkaya ve ark., 2025; Ateş ve ark., 2020; Kam ve Bozkurt, 2007; Karataşlı 2019a ve 2019b; Kayakökü, 2022; Deniz ve Calık, 2024; Kapdan ve ark., 2011; Taskın ve ark., 2009; Kapdan ve ark., 2018; Bal ve Karatepe 2015; Durusoy ve Yıldırım, 2017).

Bu çalışmada Şanlıurfa Merkez İlçelerini birleştiren İpek yolu bulvarında temel radyasyon düzeyinin ölçümü yapıldı ve yaşam boyu kanser riski (YBKR) hesaplanandı. Ölçümler İpek Yolu Bulvarının yaklaşık 2500 metrelik kısmında, 7 gün boyunca, saat 08.00-12.00 arasında 8 ayrı noktada yapıldı. İyonlaştırıcı radyasyon ölçümleri için nükleer radyasyon dedektörü GQ GMC-800 Geiger Sayacı kullanıldı.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Ölçümlerin Yapılması

Güneydoğu Anadolu Bölgesinde bulunan Şanlıurfa ya da eski adıyla Ruha veya eski çağlardaki suyu bol anlamına gelen Edessa adıyla da anılmaktadır. Şanlıurfa halk arasında Urfa şeklinde kısa olarak adlandırılmaktadır. Urfa şehrine Şanlı unvanı 12 Haziran 1984 yılında kabul edilen bir kanunla verilmiştir. Şanlıurfa doğusunda Mardin, batısında Gaziantep, kuzeyinde Adıyaman, kuzeydoğusunda Diyarbakır ve güneyinde Suriye ile çevrilidir. Deniz seviyesinden yüksekliği yani rakımı 477m'dir. 19451km²'lik alanıyla Türkiye'nin yedinci büyük şehri durumundadır. Türkiye İstatistik Kurumunun (TÜİK) Adrese Dayalı Kayıt Sistemi'nin (ADKS) 2023 yılı resmi verilerine göre nüfusu 2213964 kişidir. Şanlıurfa nüfus olarak ise Türkiye'nin sekizinci en kalabalık ili durumunda olup, %18,5'lik genç nüfus oranıyla Türkiye'nin en genç nüfusa sahip illeri arasındadır (web1; web2). Havada gama doz hızı ölçümleri Şanlıurfa'nın iki merkez ilçesi olan Eyyübiye ve Haliliye ilçelerini birleştiren İpek Yolu Bulvarı boyunca önceden tespit edilmiş olan 8 istasyonda, Bulvarı boyunca 300 m aralıklarla ve bir hafta boyunca her gün aynı zaman aralığında (08:00-13:00) yapıldı. Ölçüm yapılan noktalarının uydu haritası Şekil 1'de verildi. Havada gama (γ) doz hızı ölçümleri için Nükleer Radyasyon Dedektörü GQ GMC-800 Geiger Sayacı kullanıldı. Her bir ölçümün süresi 6 dakika olarak ayarlandı ve her ölçüm noktasında ölçümler 3 defa tekrarlandı ve ölçümlerin ortalamaları alındı. Nükleer Radyasyon Dedektörü GQ GMC-800 Geiger Sayacının fotoğrafı Şekil 2'de verildi.



Şekil 1. Şanlıurfa ili İpek Yolu Bulvarı boyunca ölçüm yapılan noktalarının uydu haritası



Şekil 2. Nükleer radyasyon dedektörü GQ GMC-800 Geiger Sayacı

2.2.İyonlaştırıcı Radyasyon Gama Doz Hızı, Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri ve Yaşam Boyu Kanser Riskinin Hesaplanması

İnsanlar çeşitli şekillerde doğumundan ölümüne kadar doğal ve yapay radyasyon kaynaklarına maruz kalırlar. Radyasyon, gama ve X-ışınları gibi yüksek enerjili iyonlaştırıcı ve mikro ve radyo dalgaları gibi düşük enerjili iyonlaştırıcı olmayan ışınlardan oluşur. İnsanların gama (γ) ışını maruziyeti için yıllık etkin doz eşdeğeri (YEDE) hesaplanırken bu ışınlar maruziyet süresi çok önemlidir. Maruz kalınan bu zaman meşguliyet faktörü olarak adlandırılır. Bu faktör insanların bina içinde ve bina dışında geçirdiği zaman olarak iki kısımdan oluşur ve bunların süresinin ayrı ayrı bilinmesi de önemlidir. Bu nedenle YEDE hesaplanırken insanların ortalama yaşam süresinin %80'lik kısmını bina içinde, %20'lik kısmını da açık hava ortamlarında geçirdiği kabul edilir. YEDE aşağıdaki denklemle hesaplanır (ICRP, 1990).

$$\text{YEDE } (\mu\text{Sv/y}) = \text{Ölçülen değer, } D_r (\mu\text{Sv/h}) \times 8760 (\text{saat/yıl}) \times 0.2 \quad (1)$$

burada 0.2 faktör açık alanda maruz kalınan zamanı, 8760 saat/yıl çarpanı da bir yıllık toplam saat değerini göstermektedir. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansının (IAEA) 2003 yılında, 1363 nolu raporunda, bir ortamdaki gama doz eşdeğeri (H) ile havada soğrulan gama doz hızı (D_r) arasında aşağıdaki denklemde verilen ilişki vardır.

$$H = 1.15 \times D_r \quad (2)$$

Yaşam boyu kanser riski (YBKR) değeri denklem 3 ile hesaplanabilir.

$$YBKR = YEDE (\mu Sv/y) \times YS (y) \times R_f (Sv^{-1}) \quad (3)$$

burada yaşam süresi yani YS 70 yıl olarak alındı. R_f Sievert başına ölümcül kanser riski (1/Sv) anlamındadır. ICRP tarafından yayınlanan verilerde R_f değeri 0.05 olarak alınması önerilmiştir (ICRP, 1990).

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

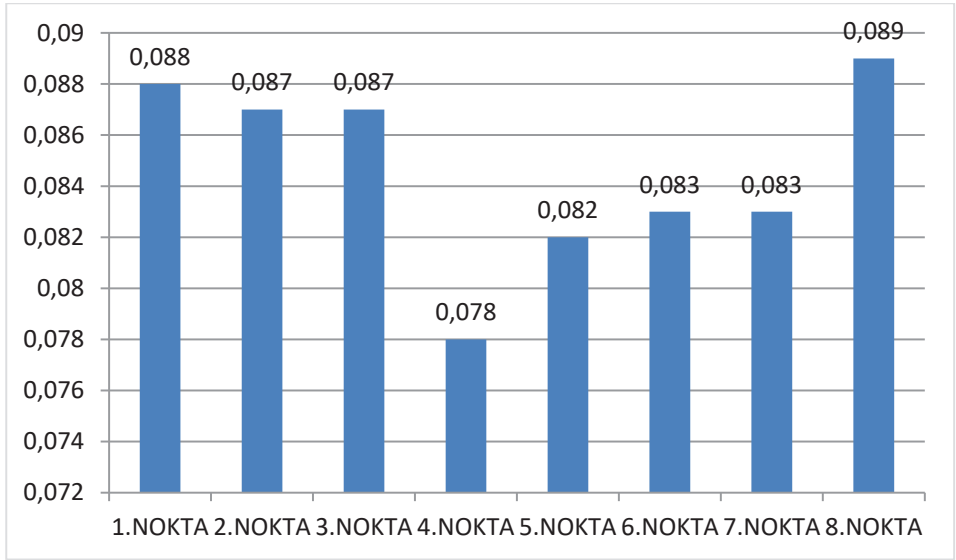
Şanlıurfa'nın Eyyübiye ve Haliliye merkez ilçelerinin sınırları içinde olan İpek Yolu Bulvarının trafik ve insan yoğunluğu açısından en kalabalık alanını oluşturan 2400 metrelik kısmında 300 m aralıklarla 8 noktada bir hafta boyunca her gün aynı zaman aralığında (08:00-13:00) Q GMC-800 Geiger sayacı ile ölçümler yapıldı. GQ GMC-800 Geiger sayacı ile yapılan ölçüm değerleri Tablo 1'de verildi.

Tablo 1. Şanlıurfa'nın merkez ilçelerini birleştiren İpek Yolu Bulvarında 1 hafta boyunca GQ GMC-800 Geige sayacı ile ölçülen gama doz hızı değerleri (D_r)

Ölçü m nokta ları	Konum	Pazar tesi (mSv/h)	Salı (mSv/h)	Çarşı mba (mSv/h)	Perşe mbe (mSv/h)	Cum a (mSv/h)	Cumar tesi (mSv/h)	Paza r (mSv/h)	Ortala ma (mSv/h)
1	Lot:37°9'19° Lon:38°46'37°	0.070 ± 0.014	0.063± 0.009	0.117± 0.005	0.100± 0.014	0.123± 0.012	0.063± 0.009	0.077± 0.005	0.088 ± 0.010
2	Lot:37°9'19° Lon:38°46'37°	0.100 ± 0.016	0.080± 0.008	0.087± 0.009	0.090± 0.014	0.077± 0.009	0.097± 0.017	0.077± 0.005	0.087 ± 0.011
3	Lot:37°9'41° Lon:38°46'53°	0.077 ± 0.005	0.083± 0.005	0.107± 0.019	0.107± 0.026	0.063± 0.005	0.093± 0.009	0.077± 0.005	0.087 ± 0.011

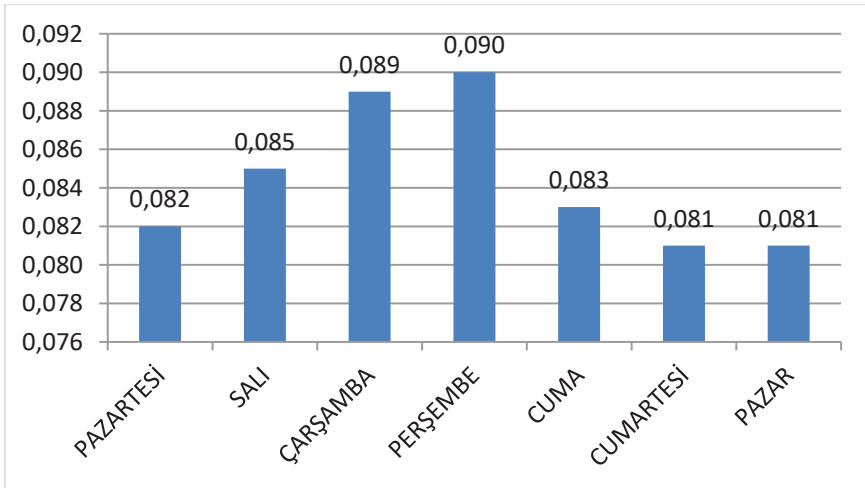
4	Lot:37°9' 51° Lon:38°4 7'5°	0.083 ± 0.005	0.07 7± 0.00 5	0.070 ± 0.014	0.087 ± 0.033	0.09 0± 0.01 4	0.053 ± 0.005	0.08 3 ±0.0 05	0.078 ± 0.012
5	Lot:37°9' 53° Lon:38°4 7'15°	0.083 ± 0.005	0.08 3± 0.01 2	0.080 ± 0.016	0.070 ± 0.014	0.09 3± 0.03 3	0.073 ± 0.005	0.09 0± 0.00 8	0.082 ± 0.013
6	Lot:37°9' 57° Lon:38°4 7'23°	0.087 ± 0.009	0.09 3± 0.00 9	0.080 ± 0.014	0.093 ± 0.019	0.06 0± 0.00 8	0.097 ± 0.005	0.07 0± 0.01 6	0.083 ± 0.011
7	Lot:37°9' 59° Lon:38°4 7'38°	0.073 ± 0.005	0.10 3± 0.02 4	0.070 ± 0.016	0.067 ± 0.017	0.08 0± 0.00 8	0.083 ± 0.005	0.10 3± 0.02 6	0.083 ± 0.014
8	Lot:37°1 0'2° Lon:38°4 7'55°	0.083 ± 0.024	0.09 7± 0.01 2	0.100 ± 0.024	0.107 ± 0.005	0.07 3± 0.00 5	0.087 ± 0.009	0.07 3± 0.01 7	0.089 ± 0.014
Ortalama		0.082 ± 0.002	0.08 5± 0.00 3	0.089 ± 0.001	0.090 ± 0.007	0.08 3± 0.00 4	0.081 ± 0.004	0.08 1± 0.00 3	0.084 ± 0.003

Tablo 1’de görüldüğü gibi pazartesi günü en büyük gama doz hızı değeri 2. noktada 0.100 mSv/h olarak ölçülürken en küçük gama doz hızı 1. noktada 0.070 mSv/h olarak ölçüldü. Salı günü en büyük gama doz hızı değeri 0.103 mSv/h olarak 7. noktada ölçülürken en küçük değer 1. noktada 0.063 mSv/h olarak ölçüldü. Çarşamba günü en küçük gama doz hızı 0.070 mSv/h olarak 7. noktada tespit edilirken en büyük değer 1. noktada 0.117 mSv/h olarak tespit edilmiştir. Perşembe günü en büyük gama doz hızı 0.107 mSv/h olarak 3.ve 8. noktalarda ölçülürken en küçük gama doz hızı 6. noktada 0.067 mSv/h olarak ölçüldü. Cuma günü en büyük gama doz hızı 0.123 mSv/h olarak 1. noktada ölçülürken en küçük değer 6. noktada 0.060 mSv/h olarak ölçülmüştür. Cumartesi günü gama doz hızı en büyük değeri 0.097 mSv/h olarak 2. ve 6. noktalarda tespit edilirken en küçük değeri 4. noktada 0.053 mSv/h olarak tespit edilmiştir. Pazar günü için yapılan ölçümlerde en büyük gama doz hızı 0.103 mSv/h olarak 7. noktada tespit edilirken, en küçük gama doz hızı değeri 0.070 mSv/h olarak 6. noktada ölçüldü. GQ GMC-800 Geiger sayacı ile ölçülen gama doz hızının ortalama değerlerinin ölçüm noktalarına göre değişimi Şekil 3’de verildi.



Şekil 3. Şanlıurfa İpek Yolu Bulvarında ölçülen gama doz hızının ortalama değerlerinin ölçüm noktalarına göre değişimi

Şekil 3’den görüldüğü gibi gama doz hızının ortalamasının en büyük değeri 0.089 ± 0.014 olarak 8. noktada tespit edilirken en küçük değeri de 0.078 ± 0.012 olarak 4. noktada tespit edilmiştir. GQ GMC-800 geiger sayacı ile ölçülen gama doz hızının ortalama değerlerinin günlere göre değişimi Şekil 4’de verildi.



Şekil 4. Şanlıurfa İpek Yolu Bulvarında ölçülen gama doz hızının ortalama değerlerinin günlere göre değişimi

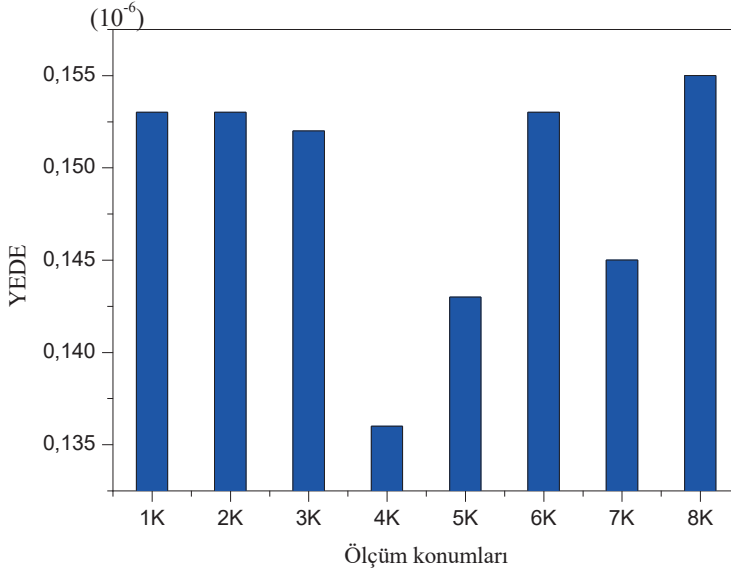
Şekil 4'den görüldüğü gibi gama doz hızının en büyük ortalama değeri perşembe günü 0.090 ± 0.007 olarak hesaplanırken en küçük değerleri de 0.081 ± 0.004 ve 0.081 ± 0.003 olarak sırasıyla Cumartesi ve pazar günleri için hesaplandı. Şanlıurfa'nın Eyyübiye ve Haliliye merkez ilçelerinin sınırları içinde olan İpek Yolu Bulvarında 1 hafta boyunca Geiger cihazı ile ölçülen gama doz hızı değerleri kullanılarak her bir ölçüm noktası için hesaplanan YEDE değerleri Tablo 2'de verildi.

Tablo 2. Şanlıurfa İpek Yolu Bulvarında 1 Hafta boyunca GQ GMC-800 Geiger sayacı yapılan gama doz hızı değerlerinden hesaplanan YEDE $\mu\text{Sv/y}$ değerleri

Lokasyonlar	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma	Cumartesi	Pazar	Ortalama
1. nokta	0.123	0.110	0.205	0.175	0.215	0.110	0.135	0.153
2. nokta	0.175	0.140	0.152	0.158	0.135	0.170	0.135	0.153
3. nokta	0.135	0.145	0.187	0.187	0.110	0.163	0.135	0.152
4. nokta	0.145	0.135	0.123	0.152	0.158	0.093	0.145	0.136
5. nokta	0.145	0.145	0.140	0.123	0.163	0.128	0.158	0.143
6. nokta	0.152	0.163	0.140	0.163	0.105	0.170	0.123	0.153
7. nokta	0.128	0.180	0.123	0.117	0.140	0.145	0.180	0.145
8. nokta	0.145	0.170	0.175	0.187	0.128	0.152	0.128	0.155
Ortalama	0.145	0.170	0.175	0.187	0.128	0.152	0.128	0.155

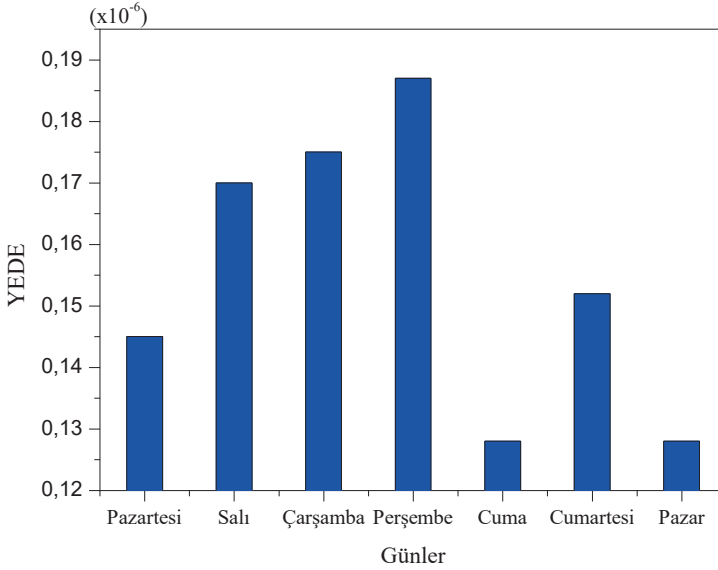
Tablo 2'den görüldüğü gibi, pazartesi günü en büyük YEDE değeri 2. noktada $0.175 \mu\text{Sv/y}$ olarak hesaplanırken en küçük YEDE 1. noktada $0.123 \mu\text{Sv/y}$ olarak hesaplandı. Salı günü ölçülen gama doz hızının en büyük YEDE değeri $0.180 \mu\text{Sv/y}$ olarak 7. noktada ve en küçük YEDE değeri 1. noktada $0.110 \mu\text{Sv/y}$ olarak ölçüldü. Çarşamba günü en küçük gama doz hızı YEDE değeri $0.123 \mu\text{Sv/y}$ olarak 4.ve 7. noktalarda tespit edilirken en büyük değer 1. noktada 0.205 mSv/y olarak tespit edilmiştir. Perşembe günü en büyük gama doz hızı YEDE değeri $0.187 \mu\text{Sv/y}$ olarak 3 ve 8. noktalarda ve en küçük gama doz hızı YEDE değeri 7. noktada $0.117 \mu\text{Sv/y}$ olarak tespit edilmiştir. Cuma günü ölçülen gama doz hızının en büyük YEDE değeri $0.215 \mu\text{Sv/y}$ olarak 1. noktada hesaplanırken en küçük değer 6. noktada $0.105 \mu\text{Sv/y}$ olarak hesaplandı. Cumartesi günü için hesaplanan YEDE'nin en büyük değeri 0.170 mSv/y olarak 2 ve 6. noktalarda tespit edilirken en küçük değeri 1. noktada 0.110 mSv/y olarak tespit edilmiştir. Pazar günü için yapılan gama doz hızı ölçümlerde en büyük YEDE değeri $0.180 \mu\text{Sv/y}$ olarak 7. noktada

hesaplanırken, en küçük gama doz hızı YEDE değeri 0.123 mSv/y olarak 6. noktada hesaplandı. YEDE değerlerinin ölçüm noktalarına göre değişimi Şekil 5’de verildi.



Şekil. 5. Şanlıurfa’nın Eyyübiye ve Haliliye merkez ilçelerinin sınırları içinde olan İpek Yolu Bulvarında GQ GMC-800 Geiger sayacı ile yapılan ölçümlerden hesaplanan gama doz hızının ortalama YEDE değerlerinin ölçüm noktalarına göre değişimi

Tablo 2 ve Şekil ’den görüldüğü gibi YEDE’nin en büyük ortalama değeri 8. noktada 0.155 $\mu\text{Sv/y}$ olarak hesaplandı. YEDE’nin en küçük değeri de 4. noktada 0.136 $\mu\text{Sv/y}$ olarak hesaplandı. YEDE değerlerinin günlere göre değişimi Şekil 6’da verildi.



Şekil 6. Şanlıurfa'nın Eyyübiye ve Haliliye merkez ilçelerinin sınırları içinde olan İpek Yolu Bulvarında GQ GMC-800 Geiger sayacı ile yapılan ölçümlerden hesaplanan gama doz hızının ortalama YEDE değerlerinin günlere göre değişimi

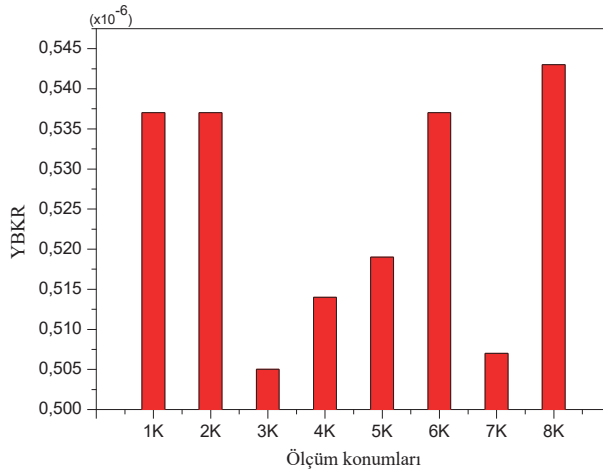
Tablo 2 ve Şekil 6'dan görüldüğü gibi YEDE'nin en büyük ortalama değeri perşembe günü 0.187×10^{-6} olarak tespit edilirken, cuma ve pazar günleri de en küçük YEDE değeri 0.128×10^{-6} olarak tespit edilmiştir. Hesaplanan YBKR değerleri Tablo 3'de verildi.

Tablo 3. Şanlıurfa İpek Yolu Bulvarında 1 hafta boyunca GQ GMC-800 Geiger cihazı ölçülen gama doz hızının hesaplanan YBKR değerleri

Lokasyonlar	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma	Cumartesi	Pazar	Ortalama
1. nokta	0.430	0.385	0.718	0.612	0.753	0.390	0.473	0.537
2. nokta	0.613	0.490	0.532	0.553	0.472	0.560	0.473	0.537
3. nokta	0.473	0.508	0.655	0.655	0.390	0.390	0.473	0.505
4. nokta	0.508	0.473	0,435	0.532	0.553	0.595	0.508	0.514
5. nokta	0.508	0.507	0.490	0.431	0.571	0.571	0.553	0.519
6. nokta	0.532	0.571	0.490	0.571	0.368	0.560	0.431	0.537
7. nokta	0.448	0.630	0.430	0.401	0.490	0.508	0.630	0.507

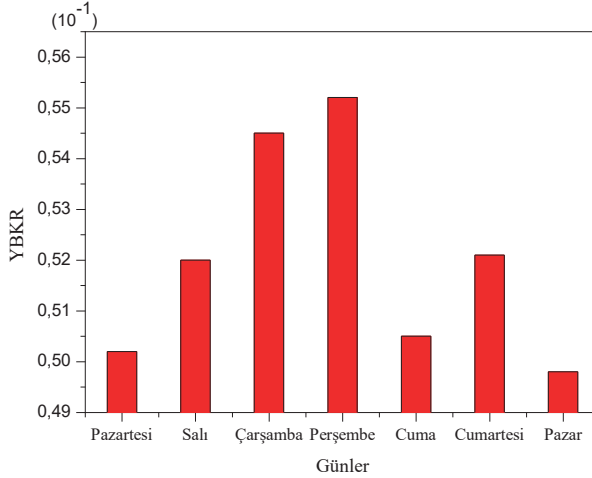
8. nokta	0.508	0.560	0.613	0.655	0.450	0.532	0.448	0.543
Ortalama	0.502	0.520	0.545	0.552	0.505	0.521	0.498	0.540

Tablo 3’den görüldüğü gibi pazartesi günü en büyük gama doz hızı YBKR değeri 2. noktada 0.613×10^{-6} olarak hesaplanırken en küçük gama doz hızı YBKR değeri 1. noktada 0.430×10^{-6} olarak bulundu. Salı günü en büyük gama doz hızı YBKR değeri 630 $\times 10^{-6}$ olarak 7. noktada hesaplanırken en küçük değer 1. noktada 0.385×10^{-6} olarak hesaplandı. Çarşamba günü en küçük gama doz hızı YBKR değeri 0.430×10^{-6} olarak 7. noktalarda tespit edilirken en büyük değer 1. noktada 0.718×10^{-6} olarak tespit edilmiştir. Perşembe günü en büyük gama doz hızı YBKR değeri 0.655×10^{-6} olarak 3. ve 8. noktalarda hesaplanırken en küçük gama doz hızı YBKR değeri 7. noktada 0.401×10^{-6} olarak hesaplandı. Cuma günü en büyük gama doz hızı YBKR değeri 0.753×10^{-6} olarak 1. noktada tespit edilirken en küçük değer 6. noktada 0.368×10^{-6} olarak tespit edildi. Cumartesi günü gama doz hızının YBKR değerinin en büyük değeri 0.595×10^{-6} olarak 4. noktada tespit edilirken en küçük değeri 1. ve 3. noktalarda 0.390×10^{-6} olarak tespit edilmiştir. Pazar günü için yapılan ölçümlerde en büyük gama doz hızı YBKR değeri 0.630×10^{-6} olarak 7. noktada tespit edilirken en küçük gama doz hızı 0.431×10^{-6} olarak 6. noktada hesaplandı. Gama doz hızı ölçümlerinin 8 noktanın ortalama değerlerinin ölçüm noktalarına göre değişimi Şekil 7’de verildi.



Şekil 7. Şanlıurfa İpek Yolunda GQ GMC-800 Geiger geiger cihazı ile yapılan ölçümlerden hesaplanan gama doz hızının hesaplanan YBKR değerleri ölçüm noktalarına göre değişimi

Tablo 3 ve Şekil 7’den görüldüğü gibi bir hafta boyunca her gün farklı noktalar için ölçülen gama doz hızı değerleri kullanılarak hesaplanan YBKR’nin ortalamasının en büyük değeri 8. noktada 0.543×10^{-6} olarak hesaplanırken en küçük değeri 3. noktada 0.505×10^{-6} olarak hesaplandı. YBKR’nin 7 günlük ortalama değerlerinin günlere göre değişimi Şekil 8’de verildi.



Şekil 8. Şanlıurfa İpek Yolu Bulvarında GQ GMC-800 Geiger geiger cihazı ile yapılan ölçümlerden hesaplanan ölçülen gama doz hızının hesaplanan YBKR’nin 7 günlük ortalama değerlerinin günlere göre değişimi

Şekil 8’de görüldüğü gibi bir hafta boyunca her gün farklı noktalar için ölçülen gama doz hızı değerleri kullanılarak hesaplanan YBKR’nin 8. nokta arasında ortalama değerinin en büyüğü perşembe günü tespit edilirken en küçük değeri pazar günü tespit edilmiştir. Tablo 1 ve Şekil 3’den görüldüğü gibi, GQ GMC-800 Geiger sayacı ile ölçülen gama doz hızının (D_r) bir haftalık ortalama değeri 0.084 ± 0.003 mSv/h olarak hesaplandı. Ölçümlerden hesaplanan en büyük ortalama D_r değeri Perşembe günü için tespit edilirken en küçük D_r değeri 0.081 ± 0.004 mSv/h Cumartesi ve Pazar günleri için hesaplandı. GQ GMC-800 Geiger sayacı ile yapılan ölçüm değerleri kullanılarak hesaplanan YEDE’nin bir haftalık ortalama değeri $0.155 \mu\text{Sv/y}$ olarak bulundu. YEDE’nin en büyük ortalama değeri $0.187 \mu\text{Sv/y}$ Perşembe günü için hesaplanırken en küçük YEDE değeri $0.128 \mu\text{Sv/y}$ Cuma ve Pazar günleri için hesaplandı. YBKR’nin bir haftalık ortalama değeri 0.540×10^{-6} olarak hesaplandı. YBKR’nin ortalama olarak hesaplanan en büyük değeri

0.545×10^{-6} olarak Çarşamba günü için bulunurken en küçük YBKR değeri 0.498×10^{-6} olarak Pazar günü için bulunmuştur. YEDE'nin $0.155 \mu\text{Sv/y}$ değeri karasal kaynaklı gama radyasyonu için UNSCEAR tarafından Dünya ortalama değeri olarak tanımlanan $460 \mu\text{Sv/y}$ değerinden küçüktür. 0.540×10^{-6} olarak hesaplanan YBKR değeri UNSCEAR tarafından Dünya ortalama değeri olarak tanımlanan 290×10^{-6} değerinden küçüktür.

SONUÇ

GQ GMC-800 Geiger sayacı ile ölçülen gama doz hızının (Dr) bir haftalık ortalama değeri $0.084 \pm 0.003 \text{ mSv/h}$ olarak hesaplanırken, YEDE ve YBKR'nin bir haftalık ortalama değerleri sırasıyla, $0.155 \mu\text{Sv/y}$ ve 0.540×10^{-6} olarak hesaplandı. YEDE'nin $0.155 \mu\text{Sv/y}$ değeri karasal kaynaklı gama radyasyonu için UNSCEAR tarafından Dünya ortalama değeri olarak tanımlanan $460 \mu\text{Sv/y}$ değerinden küçüktür. 0.540×10^{-6} olarak hesaplanan YBKR değeri de UNSCEAR tarafından Dünya ortalama değeri olarak tanımlanan 290×10^{-6} değerinden küçüktür. Sonuç olarak havada soğrulan gama radyasyonu doz seviyesi açısından ölçüm yapılan alanda yaşayanlar için sağlık riski oluşturmadığı söylenebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma KSÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje No: 2024/4-19 YLS. Bu destekleri nedeniyle yazar, KSÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Ahmed F., Kareem I., Meerkan S., Shlaimoon W., 2022. Risk Assessment of Outdoor Background Gamma Radiation at Duhok City, in Kurdistan Region, Iraq, *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 31(6), 4989-4995.
- Ateş N.Z., Bayrak K., Turgay M.E., Kam E., 2020. Evaluation of excess lifetime cancer risk caused by external exposure due to natural radioactivity in Bolu, Turkey. *Sigma J Eng Nat Sci* 38(2), 945-954.
- Ahamad T., Nautiyal O.P., Joshi M., Singh P., Sajwan R.S., Rana A.S., Bourai A.A., 2024. Measurement of indoor radioactivity and Dose derived from $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ and EECs by using SSNTD based technique. *Radiat Prot Dosimetry* 200(11–12), 1011-1017.
- Bayrak K., Yümün Z.Ü., Çakar M., 2020. Investigation of outdoor gamma dose rates in Yalova, Turkey. *EJOSAT*.
- Boice J. J.D., Hendry J.H., Nakamura N., Niwa O., Nakamura S., Yoshida K., 2010. Low-dose-rate epidemiology of high background radiation areas. *Radiat. Res.* 173 (6), 849-854.
- Cardis E., 2005. Commentary on information that can be drawn from studies of areas with high levels of natural radiation. In: Sugahara, T., Morishima, H., Sasaki, Y., Hayata, I., Sohrabi, M., Akiba, S. (Eds.), *High Levels of Natural Radiation and Radon Areas: Radiation Dose and Health Effects*. Proc. of 6th Intl. Conf. on High Levels of Natural Radiation and Radon Areas, Osaka, Japan, 6-10 September 2004. *Excerpta Medica, Intl. Cong. Series*, vol. 1276. Elsevier Sciences B.V., Amsterdam, pp. 118-123.
- Daryoush Shahbazi-Gahrouei M.G., 2013. A review on natural background radiation. *Advanced Biomedical Research*. 2 (3).
- Deniz K., Calık A.E., 2024. Hazard assessment of outdoor gamma radiation in Tavşanlı, Kutahya region of Türkiye. *Nuclear Technology Radiat Protect* 39(1), 74-80.
- Durusoy A., and Yıldırım M., 2017. Determination of radioactivity concentrations in soil samples and dose assessment for Rize province, Turkey. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences* 10, 348-352.
- Eisenbud M., Gesell T., 1997. *Environmental Radioactivity from Natural, Industrial, and Military Sources*. Academic Press, San Diego, CA. Chapter 6: Natural Radioactivity.
- Ferlay J., Colombet M., Soerjomataram I., Mathers C., Parkin D.M., Piñeros M., Znaor A., Bray F., 2019. Estimating the Global Cancer Incidence and Mortality in 2018, GLOBOCAN Sources and Methods. *Int. J. Cancer* 144, 1941-1953.
- Hendry J.H., Simon S.L., Wojcik A., Sohrabi M., Burkart W., Cardis E., Laurier T.D.M., Hayata I., 2009. Human exposure to high natural background

- radiation: what can it teach us about radiation risks? J. Radiol. Prot. 29,A29-A42.
- International Commission on Radiological Protection, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Annals of the ICRP, 37(2-4), 1-332.
- IARC, 2012. Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Arsenic, Metals, Fibres, and Dusts. IARC Monogr. Eval. Carcinog. Risks Hum. 100, 11-465.
- Kapdan E., Varinlioglu A., Karahan G., 2011. Outdoor Radioactivity and Health Risks in Balıkesir, Northwestern Turkey. Radiat Prot Dosim, 148 (3), 301-309.
- Kapdan E., Nesrin Altinsoy N., Karahan G., Yuksel A., 2018. Outdoor radioactivity and health risk assessment for capital city Ankara, Turkey, Radioanal Nucl Chem 318, 1033-1042.
- Karataşlı M., 2019a. Determination of outdoor absorbed gamma dose rates of Kahramanmaraş Province, Turkey. Cumhuriyet Sci J 40(1), 102-107.
- Karataş M., 2019b. Adana ve Çevresinde Radyoaktivite Seviyesi ve Sağlık Riski, BEÜ Fen Bilimleri Dergisi 8 (3), 772-778.
- Karataşlı M., 2018. Hatay ve Çevresinde Çevresel Gama Radyasyon Ölçümü. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 18(3), 780-785.
- Kayakökü H., 2022. Environmental gamma radiation measurement, dose rate and lifetime cancer risk assessment in Malatya Province and its districts. Black Sea J Sci 12(2), 634-644.
- Kam E., Bozkurt A., 2007. Environmental radioactivity measurements in Kastamonu region of northeastern Turkey. Appl Radiat Isot 65, 440-444.
- Kobyay Y., Taşkın H., Yeşilkanat C.M., Çevik U., 2015. Evaluation of outdoor gamma dose rate and cancer risk in Artvin Province, Turkey. Hum Ecol Risk Assess 21(8), 2077-2085.
- Monica S., Visnu P.A.K., Soniya S.R., Jojo P.J., 2016. Estimation of indoor and outdoor effective doses and lifetime cancer risk from gamma dose rates along the coastal regions of Kollam district, Kerala. Radiat Prot Environ 39, 38-43.
- Riudavets M., de Herreros M.G., Besse B., Mezquita L., 2022. Radon and Lung Cancer: Current Trends and Future Perspectives, Cancers 14, 3142.
- Sajwan R.S., Joshi V., Ahamad T., Kumar N., Parmar P., Jindal M., 2024. Assessment of radon transportation and uranium content in the soil profile of the tectonically active zone. Sci Tot Environ 926, 171823.
- Sohrabi M., 2013. World high background natural radiation areas: Need to protect public from radiation exposure, Radiation Measurements 50, 166-171.
- Sohrabi M., 1998. The state-of-the-art on worldwide studies in some environments with elevated naturally occurring radioactive materials (NORM). Appl. Radiat. Isot. 49, 169e188.
- Bal S.S., and Karatepe Ş., 2015. Determination of environmental gamma radiation in Bitlis. The European Physical Journal Web of Conferences, 100, 04002.

- UNSCEAR, 2017. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources, Effects and Risks of Ionization Radiation, Report to the General Assembly, with Scientific Annexe, 2017.
- UNSCEAR, 2000. Report of the United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation, sources, effects, and risks of ionizing radiation. Report to The General Assembly Wsabnyu, Annexes B. United Nations Sales Publication, New York.
- Yılmazkaya İ., Altınsoy N., Şimşek V., 2025. Radiologic risk assessment of outdoor gamma dose rate in Çorum province, Turkey, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 334, 6633-6639.
- Taskın H., Karavus M., Ay P., Topuzoglu A., Hidiroglu S., Karahan G., 2009. Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Kırklareli, Turkey. J Environ Radioact 100,49-53.
- WHO, 2009. Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. World Health Organization: Geneva, Switzerland. ISBN 978 92 4 154767 3.
- Web 1. <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon#head>



MAKİNE ÖĞRENMESİ ALGORİTMALARINDA OPTİMİZASYON PROBLEMLERİ

“ ”

Arzu AKTAŞ¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi Arzu AKTAŞ
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi
Fen Fakültesi, İstatistik Bölümü
0000-0001-9571-8012

1. Giriş

Makine öğrenmesi, bilgisayar sistemlerinin açık bir şekilde programlanmadan verilerden öğrenebilmesini ve bu öğrenme sürecine dayanarak tahmin veya kararlar üretebilmesini sağlayan bir yapay zeka alt alanıdır (Mitchell, 1997). Makine öğrenmesi algoritmaları, verilerden anlamlı örüntüler öğrenebilmek için matematiksel modeller ve optimizasyon teknikleri üzerine kuruludur. Bu nedenle model eğitimi süreci çoğu zaman bir optimizasyon problemi olarak formüle edilmektedir. Birçok makine öğrenmesi modeli, model parametrelerinin belirli bir amaç veya kayıp fonksiyonunu minimize edecek şekilde öğrenilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu nedenle optimizasyon, makine öğrenmesi algoritmalarının temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016).

Makine öğrenmesinde optimizasyon süreci genellikle yüksek boyutlu parametre uzaylarında gerçekleşmekte ve çoğu zaman doğrusal olmayan ile konveks olmayan kayıp fonksiyonlarını içermektedir. Doğrusal olmayan kayıp fonksiyonları, model parametreleri ile kayıp değeri arasında doğrusal bir ilişkinin bulunmadığı fonksiyonları ifade ederken, konveks olmayan kayıp fonksiyonları, birden fazla yerel minimum ve eyer noktası içerebilen optimizasyon yüzeylerine sahiptir. Bu durum, model parametrelerinin en uygun değerlerinin belirlenmesini zorlaştırarak optimizasyon sürecinde çeşitli hesaplama güçlüklerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Parametre sayısının artmasıyla birlikte arama uzayının genişlemesi, optimizasyon algoritmalarının yakınsama hızını ve çözüm kalitesini doğrudan etkileyen önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle makine öğrenmesi modellerinin etkin bir şekilde eğitilebilmesi için uygun optimizasyon yöntemlerinin tasarımı ve seçimi kritik bir rol oynamaktadır (Bishop, 2006).

Makine öğrenmesi algoritmalarında karşılaşılan temel optimizasyon problemlerinden biri yerel minimum (local minimum) problemidir. Konveks olmayan kayıp fonksiyonlarında optimizasyon algoritmaları, kayıp fonksiyonunun tüm uzayındaki en düşük değeri temsil eden küresel minimum (global minimum) yerine yerel minimum noktalarına yakınsayabilmektedir. Bu durum modelin en iyi çözümü bulamamasına ve dolayısıyla tahmin performansının düşmesine neden olabilmektedir (Boyd & Vandenberghe, 2004). Optimizasyon sürecinde yalnızca yerel minimum problemleri değil, aynı zamanda eyer noktaları (saddle point) gibi farklı kritik noktalar da önemli rol oynamaktadır. Eyer noktaları, bazı yönlerde minimum bazı yönlerde ise maksimum davranışı gösteren kritik noktalar olarak tanımlanmaktadır. Özellikle yüksek boyutlu parametre uzaylarında eyer noktalarının sayısının oldukça fazla olabileceği ve bu durumun optimizasyon algoritmalarının yakınsama sürecini zorlaştırabileceği belirtilmektedir. Bu nedenle modern optimizasyon yöntemleri yalnızca yerel minimumlardan kaçınmayı değil, aynı zamanda eyer noktalarından da

etkin bir şekilde uzaklaşmayı hedeflemektedir (Boyd & Vandenberghe, 2004; Dauphin et al., 2014; Goodfellow et al., 2016). Bir diğer önemli problem ise yüksek boyutluluk (high-dimensionality) problemidir. Özellikle modern makine öğrenmesi modellerinde parametre sayısının yüksek olması optimizasyon sürecinin hesaplama maliyetini artırmakta ve parametre uzayında yapılan aramayı zorlaştırmaktadır. Ayrıca yüksek boyutlu parametre uzaylarında gerçekleştirilen optimizasyon işlemleri, algoritmaların yakınsama hızını da olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bunun yanı sıra gradyan tabanlı optimizasyon yöntemlerinde gradyan kaybolması (vanishing gradient) ve gradyan patlaması (exploding gradient) gibi problemler de ortaya çıkabilmektedir. Bu problemler modelin öğrenme sürecini zorlaştırarak eğitim sürecinin kararsız hale gelmesine neden olabilmektedir (Pascanu, Mikolov & Bengio, 2013). Makine öğrenmesi algoritmalarında optimizasyon sürecini zorlaştıran bir diğer önemli faktör ise hiperparametre seçimi problemidir. Öğrenme oranı, düzenleme parametreleri ve model mimarisi gibi hiperparametrelerin uygun şekilde seçilmemesi model performansını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu nedenle hiperparametre optimizasyonu makine öğrenmesi çalışmalarında önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir (Hastie, Tibshirani & Friedman, 2009).

Bu bölümde makine öğrenmesi algoritmalarında optimizasyon sürecinde ortaya çıkan

temel problemler ele alınmaktadır. Bu kapsamda, belirtilen problemlerin makine öğrenmesi modellerinin performansı üzerindeki etkileri incelenmekte ve literatürde önerilen çözüm yaklaşımları değerlendirilmektedir.

2. Makine Öğrenmesinde Optimizasyon Problemlerinin Türleri

Makine öğrenmesi algoritmalarının temel amacı, belirli bir veri kümesi üzerinde en iyi performansı sağlayacak model parametrelerini belirlemektir. Bu süreç genellikle bir kayıp (loss) veya amaç (objective) fonksiyonunun minimize edilmesi şeklinde formüle edilen bir optimizasyon problemi olarak ifade edilmektedir. Bu bağlamda model eğitimi, parametre uzayında en uygun çözümün bulunmasını hedefleyen bir optimizasyon süreci olarak değerlendirilmektedir. Ancak bu optimizasyon problemleri çoğu zaman karmaşık matematiksel yapılara sahiptir ve çözüm sürecinde çeşitli zorluklar ortaya çıkabilmektedir. Makine öğrenmesinde karşılaşılan optimizasyon problemleri farklı kategoriler altında incelenebilmektedir. Bu problemler genellikle model yapısından, veri özelliklerinden veya kullanılan optimizasyon yöntemlerinden kaynaklanmaktadır. Literatürde makine öğrenmesi optimizasyon problemleri genel olarak konveks ve konveks olmayan optimizasyon problemleri, yüksek boyutluluk problemleri, gradyan tabanlı optimizasyon sorunları ve hiperparametre optimizasyonu ile ilişkili problemler olarak sınıflandırılmaktadır (Boyd & Vandenberghe, 2004). Söz konusu problemler genel olarak optimizasyon

yüzeyinin özelliklerinden kaynaklanan problemler (yerel minimum ve eyer noktaları), parametre uzayının yapısından kaynaklanan problemler (yüksek boyutluluk), gradyan tabanlı öğrenme sürecinde ortaya çıkan problemler (gradyan kaybolması ve gradyan patlaması) ve model yapılandırmasına bağlı problemler (hiperparametre seçimi) şeklinde ortaya çıkmaktadır.

Konveks optimizasyon problemlerinde amaç fonksiyonu konveks bir yapıya sahiptir ve bu tür problemlerde yerel minimum noktası aynı zamanda küresel minimum noktasına karşılık gelmektedir. Bu özellik optimizasyon sürecini önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır. Lineer regresyon gibi bazı klasik makine öğrenmesi algoritmaları konveks optimizasyon problemlerine örnek olarak verilebilir. Bu tür modellerde optimizasyon algoritmaları genellikle güvenilir ve kararlı bir şekilde küresel optimum çözüme yakınsamaktadır (Hastie, Tibshirani & Friedman, 2009). Buna karşılık birçok makine öğrenmesi algoritması konveks olmayan optimizasyon problemleri içermektedir. Bu tür problemlerde kayıp fonksiyonları birden fazla yerel minimum, eyer noktası (saddle point) ve karmaşık optimizasyon yüzeyleri içerebilmektedir. Bu durum optimizasyon algoritmalarının küresel optimum çözüme ulaşmasını zorlaştırmakta ve model eğitiminin daha karmaşık bir hale gelmesine neden olabilmektedir (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016).

Makine öğrenmesinde optimizasyon problemlerinin bir diğer önemli sınıflandırması deterministik ve stokastik optimizasyon yaklaşımlarıdır. Deterministik optimizasyon yöntemlerinde parametre güncellemeleri tüm veri kümesi kullanılarak gerçekleştirilirken, stokastik optimizasyon yöntemlerinde güncellemeler rastgele seçilen veri örnekleri veya mini veri grupları üzerinden yapılmaktadır. Özellikle büyük veri kümeleri ile çalışan makine öğrenmesi uygulamalarında hesaplama maliyetini azaltması ve daha hızlı yakınsama sağlayabilmesi nedeniyle stokastik optimizasyon yöntemleri yaygın olarak tercih edilmektedir.

Makine öğrenmesi optimizasyon problemleri aynı zamanda sürekli ve ayrık optimizasyon problemleri olarak da sınıflandırılabilir. Sürekli optimizasyon problemlerinde model parametreleri sürekli değerler alırken, bazı model seçimi ve hiperparametre optimizasyonu problemlerinde ayrık parametreler söz konusu olabilmektedir.

Bu tür problemlerin çözümü genellikle farklı optimizasyon stratejilerinin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu problemlerin doğru şekilde sınıflandırılması ve anlaşılması, uygun optimizasyon yöntemlerinin seçilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle makine öğrenmesi çalışmalarında optimizasyon problemlerinin türlerinin ve özelliklerinin detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir. Bu problemlerin sistematik bir şekilde ele alınabilmesi için literatürde çeşitli sınıflandırmalar önerilmiştir. Makine öğrenmesinde yaygın olarak karşılaşılan optimizasyon problemi türleri ve temel özellikleri Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo-1		
Optimizasyon Problem Türü	Açıklama	Makine Öğrenmesinde Örnek
Konveks Optimizasyon	Amaç fonksiyonu konvektir ve yerel minimum aynı zamanda küresel minimumdur.	Lineer regresyon, lojistik regresyon
Konveks Olmayan Optimizasyon	Amaç fonksiyonu birden fazla yerel minimum ve eyer noktası içerebilir.	Sinir ağları, karmaşık makine öğrenmesi modelleri
Yüksek Boyutluluk Problemi	Parametre sayısının fazla olması arama uzayını genişletir ve optimizasyonu zorlaştırır.	Büyük ölçekli makine öğrenmesi modelleri
Deterministik Optimizasyon	Parametre güncellemeleri tüm veri kümesi kullanılarak yapılır.	Batch Gradient Descent
Stokastik Optimizasyon	Parametre güncellemeleri rastgele seçilen örnekler veya mini-batch üzerinden yapılır.	SGD, Mini-batch Gradient Descent
Sürekli Optimizasyon	Model parametreleri sürekli değerler alır.	Regresyon modelleri
Ayrık Optimizasyon	Parametreler ayrık değerler alır.	Model seçimi, hiperparametre optimizasyonu

Tablo-1 incelendiğinde makine öğrenmesinde karşılaşılan optimizasyon problemlerinin farklı kaynaklardan ortaya çıktığı görülmektedir. Bu sınıflandırma, makine öğrenmesi optimizasyon problemlerinin yalnızca algoritmik yapılarla değil aynı zamanda veri özellikleri ve model karmaşıklığı ile de yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu problemler bazı durumlarda modelin matematiksel yapısından, bazı durumlarda veri kümesinin özelliklerinden ya da kullanılan optimizasyon yöntemlerinin sınırlılıklarından kaynaklanabilmektedir.

Makine öğrenmesinde optimizasyon problemlerinin farklı kategoriler altında sınıflandırılması, uygun optimizasyon yöntemlerinin belirlenmesi ve model eğitiminin daha etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi açısından önemli bir kavramsal çerçeve sunmaktadır.

2.1 Yerel Minimum Problemi ve Konveks Olmayan Optimizasyon

Makine öğrenmesi algoritmalarının eğitim sürecinde karşılaşılan önemli optimizasyon problemlerinden biri yerel minimum (local minimum) problemidir. Birçok makine öğrenmesi modeli konveks olmayan (non-convex) kayıp fonksiyonlarına sahiptir. Bu tür fonksiyonlar birden fazla minimum noktası içerebilmekte ve optimizasyon algoritmaları bu noktalar arasında küresel minimumu bulmakta zorlanabilmektedir (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016). Bir optimizasyon probleminde küresel minimum (global minimum), amaç fonksiyonunun tüm parametre uzayındaki en küçük değerini ifade eder. Buna karşılık yerel minimum noktası, fonksiyonun yalnızca belirli bir komşuluk bölgesinde en küçük değere sahip olduğu noktadır. Eğer optimizasyon

algoritması yerel minimum noktasına yakınsarsa model parametreleri küresel optimumdan uzak bir çözümde sabitlenebilir ve bu durum model performansının sınırlı kalmasına neden olabilir.

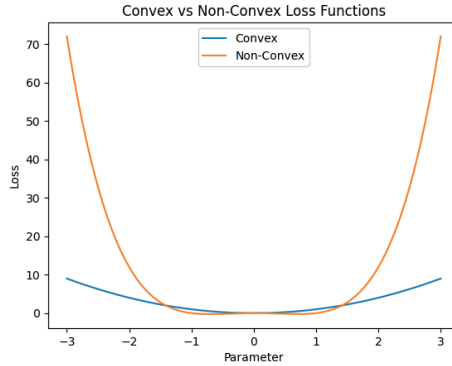
Matematiksel olarak bir kayıp fonksiyonu $L(\theta)$ için yerel minimum noktası aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$L(\theta^*) \leq L(\theta), \forall \theta \in N(\theta^*)$$

Burada $N(\theta^*)$, (θ^*) noktasının belirli bir komşuluğunu ifade etmektedir. Küresel minimum ise tüm parametre uzayı için aşağıdaki koşulu sağlar:

$$L(\theta^*) \leq L(\theta), \forall \theta$$

Makine öğrenmesi modellerinde konveks olmayan optimizasyon problemleri çoğu zaman karmaşık kayıp fonksiyonu yüzeylerinden oluşmaktadır. Bu yüzeyler çok sayıda yerel minimum noktası ve eyer noktası (saddle point) içerebilmektedir. Parametre sayısının yüksek olduğu modellerde bu durum daha belirgin hale gelmekte ve optimizasyon sürecini zorlaştırmaktadır (Bishop, 2006).

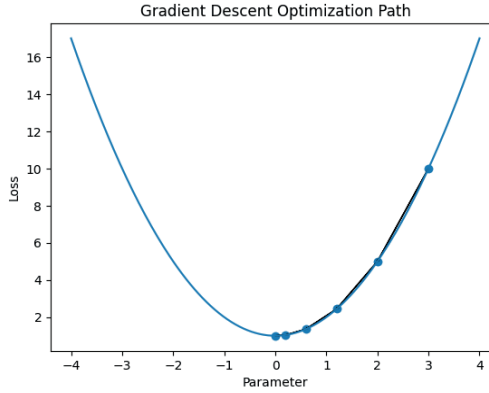


Şekil 1. Konveks ve konveks olmayan kayıp fonksiyonlarının optimizasyon yüzeylerinin karşılaştırılması. Konveks fonksiyonlarda yerel minimum küresel minimuma eşitken, konveks olmayan fonksiyonlarda birden fazla yerel minimum ve eyer noktası bulunabilmektedir.

Yerel minimum probleminin yanı sıra eyer noktaları da optimizasyon sürecinde önemli zorluklar yaratmaktadır. Eyer noktaları, fonksiyonun bazı yönlerde minimum bazı yönlerde ise maksimum davranışı gösterdiği kritik noktalar. Gradyan tabanlı optimizasyon algoritmaları bu noktalarda gradyanın sıfıra yakın olması nedeniyle ilerleme kaydetmekte zorlanabilir. Bu durum optimizasyon sürecinin yavaşlamasına veya durmasına neden olabilmektedir. Yerel minimum ve konveks olmayan optimizasyon problemlerini azaltmak amacıyla literatürde çeşitli yöntemler önerilmiştir. Rastgele başlatma (random initialization), momentum tabanlı optimizasyon algoritmaları, adaptif öğrenme oranı yöntemleri ve stokastik optimizasyon teknikleri bu problemlerin

etkisini azaltmaya yardımcı olabilmektedir. Özellikle stokastik gradyan inişi (Stochastic Gradient Descent) ve Adam gibi optimizasyon yöntemleri optimizasyon sürecinde parametrelerin farklı yönlerde güncellenmesini sağlayarak yerel minimum probleminin etkisini azaltabilmektedir (Kingma & Ba, 2015).

Gradient descent algoritması kayıp fonksiyonunun gradyanını kullanarak parametreleri iteratif olarak günceller ve minimum noktaya doğru ilerler. Bu optimizasyon sürecinin görsel bir temsili Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Gradient descent algoritmasının optimizasyon sürecindeki iteratif yakınsaması.

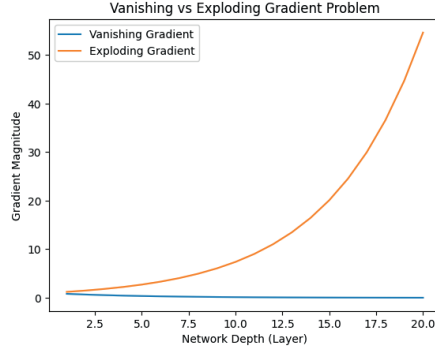
Gradient descent algoritması kayıp fonksiyonunun gradyanını kullanarak parametreleri iteratif olarak günceller ve minimum noktaya doğru ilerler. Bu güncelleme kuralı kayıp fonksiyonunun en hızlı azalış yönünü takip etmeye dayanır. Şekilde başlangıç noktasından itibaren gerçekleştirilen ardışık parametre güncellemeleri ve algoritmanın minimum noktaya doğru yakınsama süreci gösterilmektedir. Bu yöntem özellikle büyük ölçekli optimizasyon problemlerinde yaygın olarak kullanılan temel optimizasyon algoritmalarından biridir.

Sonuç olarak yerel minimum ve konveks olmayan optimizasyon problemleri makine öğrenmesi algoritmalarının eğitim sürecinde önemli zorluklar oluşturmaktadır. Bu problemlerin anlaşılması ve uygun optimizasyon stratejilerinin geliştirilmesi, makine öğrenmesi modellerinin daha kararlı ve etkili bir şekilde eğitilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

2.2 Gradyan Kaybolması ve Gradyan Patlaması Problemleri

Makine öğrenmesi algoritmalarında, özellikle çok katmanlı sinir ağlarının eğitiminde karşılaşılan önemli optimizasyon problemlerinden biri gradyan kaybolması (vanishing gradient) ve gradyan patlaması (exploding gradient) problemidir. Bu problemler gradyan tabanlı optimizasyon yöntemlerinin kul-

lanıldığı modellerde ortaya çıkmakta ve modelin öğrenme sürecini önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016). Özellikle çok katmanlı ağ yapılarında bu durum daha belirgin hale gelmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Derin sinir ağlarında gradyan kaybolması ve gradyan patlaması problemlerinin temsili gösterimi.

Sinir ağlarının eğitiminde geriye yayılım (backpropagation) algoritması kullanılarak hata gradyanları katmanlar boyunca geriye doğru iletilir. Bu süreçte ağın çıktığı katmanından başlayarak gradyan değerleri hesaplanır ve model parametreleri bu değerlere göre güncellenir. Ancak çok katmanlı ağ yapılarında gradyan değerleri katmanlar boyunca giderek küçülebilir veya aşırı büyüyebilir. Gradyan kaybolması problemi, geriye yayılım sırasında gradyan değerlerinin katmanlar boyunca giderek küçülmesi durumudur. Özellikle sigmoid ve tanh gibi aktivasyon fonksiyonlarının kullanıldığı ağlarda gradyan değerleri çok küçük hale gelebilmektedir. Bu durumda erken katmanlardaki ağırlıklar yeterince güncellenemez ve modelin öğrenme süreci yavaşlayabilir veya tamamen durabilir (Bishop, 2006). Buna karşılık gradyan patlaması problemi gradyan değerlerinin aşırı büyümesi durumudur. Bu durumda parametre güncellemeleri çok büyük adımlarla gerçekleşir ve model parametreleri kararsız hale gelebilir. Özellikle tekrarlayan sinir ağları (Recurrent Neural Networks – RNN) gibi yapılarda gradyan patlaması problemi daha sık gözlemlenmektedir.

Matematiksel olarak parametre güncellemesi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta \nabla L(\theta_t)$$

Burada η öğrenme oranını, $\nabla(L(\theta_t))$ ise kayıp fonksiyonunun gradyanını ifade etmektedir. Eğer gradyan değeri çok küçükse parametre güncellemesi ihmal edilebilir düzeyde olur; çok büyük olduğunda ise model parametreleri kontrolsüz şekilde değişebilir.

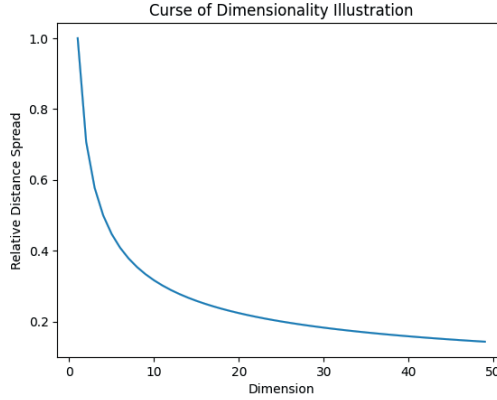
Gradyan kaybolması ve gradyan patlaması problemlerini azaltmak amacıyla literatürde çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında uygun ağırlık başlatma stratejilerinin kullanılması, ReLU gibi farklı aktivasyon fonksiyonlarının tercih edilmesi, batch normalization yönteminin uygulanması, gradient clipping tekniklerinin kullanılması ve LSTM veya GRU gibi gelişmiş sinir ağı mimarilerinin kullanılması yer almaktadır. Bu yaklaşımlar gradyan değerlerinin katmanlar boyunca daha dengeli bir şekilde yayılmasını sağlayarak optimizasyon sürecinin daha kararlı hale gelmesine katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak gradyan kaybolması ve gradyan patlaması problemleri çok katmanlı sinir ağlarının eğitim sürecinde önemli zorluklar oluşturmaktadır. Bu problemlerin etkisini azaltmaya yönelik geliştirilen yöntemler modern makine öğrenmesi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakta ve model performansının artırılmasına katkı sağlamaktadır.

2.3 Yüksek Boyutluluk Problemi (Curse of Dimensionality)

Makine öğrenmesi algoritmalarında optimizasyon sürecini zorlaştıran önemli problemlerden biri yüksek boyutluluk problemidir. Veri kümesinde kullanılan özellik (feature) sayısının artması model parametre uzayının boyutunun büyümesine neden olmakta ve bu durum optimizasyon algoritmalarının performansını önemli ölçüde etkileyebilmektedir.

Özellik sayısının artmasıyla birlikte veri noktaları yüksek boyutlu uzaylarda giderek daha seyrek bir dağılım göstermektedir. Literatürde bu durum “curse of dimensionality” olarak adlandırılmaktadır (Bellman, 1961) (Şekil 4). Boyut sayısının artmasıyla birlikte veri uzayının hacmi hızla büyümekte ve veri noktaları arasındaki mesafelerin ayırt ediciliği azalmaktadır. Bu durum veri yoğunluğunun azalmasına ve istatistiksel tahminlerin güvenilirliğinin düşmesine neden olabilmekle birlikte özellikle mesafe temelli makine öğrenmesi algoritmalarında benzerlik ölçümlerinin güvenilirliğini azaltarak model öğrenme sürecini zorlaştırabilmektedir. Örneğin k-en yakın komşu (k-nearest neighbors – k-NN) gibi algoritmalarda veri noktaları arasındaki mesafelerin anlamlı bir şekilde ayrıştırılması zorlaşabilmektedir. Bunun sonucunda modelin genelleme performansı olumsuz yönde etkilenebilmektedir (Hastie, Tibshirani & Friedman, 2009).



Şekil 4. Boyut sayısının artmasıyla veri uzayındaki mesafe dağılımında meydana gelen değişimi gösteren curse of dimensionality örneği.

Optimizasyon açısından değerlendirildiğinde yüksek boyutluluk problemi parametre uzayının genişlemesine neden olmaktadır. Model parametrelerinin sayısının artması, optimizasyon algoritmalarının arama yapması gereken çözüm uzayını önemli ölçüde büyötmektedir. Bu durum optimizasyon algoritmalarının yakınsama hızını düşürebilmekte ve hesaplama maliyetini artırmaktadır (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016). Ayrıca yüksek boyutlu veri kümelerinde aşırı öğrenme (overfitting) problemi de daha sık ortaya çıkabilmektedir. Model çok sayıda parametre içerdiğinde eğitim verisine aşırı uyum sağlayabilir ve yeni veri üzerinde zayıf performans gösterebilir. Bu nedenle yüksek boyutlu makine öğrenmesi problemlerinde düzenleme (regularization) yöntemleri önemli bir rol oynamaktadır (Bishop, 2006).

Yüksek boyutluluk problemini azaltmak amacıyla literatürde çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Özellik seçimi (feature selection) ve boyut indirgeme (dimensionality reduction) teknikleri bu problemlerin etkisini azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis – PCA), doğrusal diskriminant analizi (LDA) ve otomatik kodlayıcı (autoencoder) tabanlı yöntemler yüksek boyutlu veri kümelerinde etkili sonuçlar sağlayabilmektedir (Jolliffe, 2002).

Sonuç olarak yüksek boyutluluk problemi makine öğrenmesi algoritmalarında optimizasyon sürecini zorlaştıran temel faktörlerden biridir. Bu nedenle yüksek boyutlu veri kümeleri ile çalışırken uygun özellik seçimi, boyut indirgeme ve düzenleme yöntemlerinin kullanılması model performansının artırılması açısından büyük önem taşımaktadır.

2.4 Hiperparametre Optimizasyonu Problemi

Makine öğrenmesi modellerinin başarısı yalnızca model parametrelerinin doğru şekilde öğrenilmesine değil, aynı zamanda hiperparametrelerin uygun

biçimde seçilmesine de bağlıdır. Hiperparametreler, model eğitimi başlamadan önce belirlenen ve öğrenme süreci sırasında veri üzerinden doğrudan öğrenilmeyen ayarlardır. Öğrenme oranı, düzenleme katsayıları, karar ağacı derinliği veya sinir ağı katman sayısı gibi değerler hiperparametrelere örnek olarak verilebilir (Hastie, Tibshirani & Friedman, 2009).

Hiperparametre optimizasyonu, makine öğrenmesi modellerinin performansını artırmak amacıyla uygun hiperparametre değerlerinin belirlenmesini ifade etmektedir. Ancak hiperparametrelerin seçimi çoğu zaman karmaşık bir optimizasyon problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun temel nedeni hiperparametre uzayının genellikle yüksek boyutlu ve ayrık bir yapıya sahip olmasıdır. Ayrıca her hiperparametre kombinasyonunun değerlendirilmesi için modelin yeniden eğitilmesi gerektiğinden hesaplama maliyeti oldukça yüksek olabilmektedir (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016).

Makine öğrenmesinde hiperparametre optimizasyonu için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri **Grid Search** yöntemidir. Bu yöntemde hiperparametreler için belirli değer aralıkları tanımlanır ve tüm olası kombinasyonlar sistematik bir şekilde denenir. Grid Search yöntemi basit ve anlaşılır bir yaklaşım sunmasına rağmen hiperparametre sayısının artması durumunda hesaplama maliyeti hızla artabilmektedir (Bergstra & Bengio, 2012).

Bir diğer yaklaşım ise **Random Search** yöntemidir. Bu yöntemde hiperparametre uzayından rastgele örnekler seçilerek model performansı değerlendirilir. Yapılan çalışmalar, özellikle yüksek boyutlu hiperparametre uzaylarında Random Search yönteminin Grid Search yöntemine kıyasla daha verimli sonuçlar elde edebileceğini göstermektedir (Bergstra & Bengio, 2012).

Son yıllarda hiperparametre optimizasyonu için daha gelişmiş yöntemler de geliştirilmiştir. Bunlardan biri **Bayesian Optimization** yaklaşımıdır. Bu yöntemde hiperparametre uzayındaki olası çözümler olasılıksal modeller kullanılarak değerlendirilir ve model performansını iyileştirme potansiyeline sahip yeni hiperparametre kombinasyonları seçilir. Bu yaklaşım özellikle hesaplama maliyetinin yüksek olduğu makine öğrenmesi problemlerinde etkili bir optimizasyon stratejisi sunmaktadır (Snoek, Larochelle & Adams, 2012).

Hiperparametre optimizasyonu sürecinde **çapraz doğrulama (cross-validation)** yöntemleri de yaygın olarak kullanılmaktadır. Çapraz doğrulama teknikleri, farklı veri alt kümeleri üzerinde model performansını değerlendirerek hiperparametre seçim sürecinin daha güvenilir bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır (Hastie, Tibshirani & Friedman, 2009). Sonuç olarak hiperparametre optimizasyonu, makine öğrenmesi algoritmalarının performansını doğrudan etkileyen önemli bir optimizasyon problemidir. Uygun hiperparametre değerlerinin belirlenmesi modelin genelleme performansını artırmakta ve aşırı öğrenme gibi problemlerin azaltılmasına katkı sağlamakta-

dır. Bu nedenle hiperparametre optimizasyonu günümüzde makine öğrenmesi araştırmalarında önemli bir çalışma alanı olarak kabul edilmektedir.

3. Makine Öğrenmesinde Optimizasyon Problemleri için Modern Çözüm Yaklaşımları

Makine öğrenmesi algoritmalarında karşılaşılan optimizasyon problemleri, özellikle büyük ölçekli veri kümelerinin ve karmaşık model yapılarının yaygınlaşmasıyla birlikte daha belirgin hale gelmiştir. Yerel minimum problemleri, gradyan kaybolması, yüksek boyutluluk ve hiperparametre seçimi gibi zorluklar araştırmacıları daha gelişmiş optimizasyon teknikleri geliştirmeye yönlendirmiştir. Bu bağlamda modern makine öğrenmesi literatüründe çeşitli yöntemler önerilmiş ve uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016).

Bu problemlerin çözümüne yönelik yaklaşımlardan biri gelişmiş optimizasyon algoritmalarının kullanılmasıdır. Özellikle momentum tabanlı yöntemler ve adaptif öğrenme oranı kullanan optimizasyon algoritmaları, optimizasyon sürecinin daha kararlı ve hızlı ilerlemesine yardımcı olmaktadır.

Momentum yöntemi, parametre güncellemelerinde önceki gradyan bilgilerini de kullanarak optimizasyon algoritmasının daha dengeli hareket etmesini sağlar. Bu yaklaşım fiziksel momentum kavramından esinlenmekte ve optimizasyon algoritmasının daha kararlı bir şekilde ilerlemesine yardımcı olup, kayıp fonksiyonu yüzeyinde sıkça karşılaşılan dar ve uzun vadi yapılarında optimizasyon algoritmalarının zigzag hareketini azaltarak minimum noktaya daha hızlı yakınsamasına katkı sağlamaktadır (Ruder, 2016).

Makine öğrenmesi modellerinde yaygın olarak kullanılan bir diğer yaklaşım adaptif optimizasyon algoritmalarıdır. AdaGrad, RMSProp ve Adam gibi yöntemler her parametre için farklı öğrenme oranları kullanarak optimizasyon sürecini daha verimli hale getirmektedir. Özellikle Adam algoritması hem momentum hem de adaptif öğrenme oranı mekanizmalarını birleştirerek birçok makine öğrenmesi uygulamasında başarılı sonuçlar elde etmiştir (Kingma & Ba, 2015).

Optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan önemli yöntemlerden biri de düzenlileştirme teknikleridir. Düzenlileştirme yöntemleri modelin karmaşıklığını kontrol ederek aşırı öğrenme problemini azaltmayı amaçlamaktadır. L1 ve L2 düzenlileştirme yöntemleri model parametrelerine ceza terimleri ekleyerek daha basit ve genellenebilir modeller elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca Dropout gibi yöntemler özellikle sinir ağı modellerinde aşırı öğrenmenin azaltılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Srivastava et al., 2014).

Yüksek boyutluluk problemlerinin çözümünde boyut indirgeme teknikleri de önemli bir rol oynamaktadır. Temel Bileşenler Analizi (PCA), doğrusal diskriminant analizi ve otomatik kodlayıcı tabanlı yöntemler veri boyutunu azaltarak optimizasyon algoritmalarının daha verimli çalışmasına katkı sağlamaktadır (Jolliffe, 2002).

Son yıllarda makine öğrenmesinde optimizasyon problemlerinin çözümüne yönelik olarak otomatik makine öğrenmesi (AutoML) yaklaşımları da geliştirilmiştir. AutoML sistemleri model seçimi, hiperparametre optimizasyonu ve özellik seçimi gibi süreçleri otomatik hale getirerek optimizasyon sürecinin daha sistematik bir şekilde yönetilmesini amaçlamaktadır (Feurer et al., 2015). Sonuç olarak makine öğrenmesi algoritmalarında ortaya çıkan optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilen modern yöntemler model performansının artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Gelişmiş optimizasyon algoritmaları, düzenlileştirme teknikleri, boyut indirgeme yöntemleri ve otomatik makine öğrenmesi yaklaşımları makine öğrenmesi modellerinin daha etkili ve güvenilir bir şekilde eğitilmesine katkı sağlamaktadır.

4. Sonuç ve Gelecek Araştırma Yönleri

Makine öğrenmesi algoritmalarının başarısı büyük ölçüde optimizasyon süreçlerinin etkinliğine bağlıdır. Bu bölümde makine öğrenmesi algoritmalarında ortaya çıkan temel optimizasyon problemleri ele alınmış ve bu problemlerin model performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Özellikle yerel minimum problemleri, gradyan kaybolması ve gradyan patlaması, yüksek boyutluluk ve hiperparametre optimizasyonu gibi zorlukların makine öğrenmesi modellerinin eğitim sürecinde önemli rol oynadığı görülmektedir.

Makine öğrenmesi modellerinde optimizasyon problemleri genellikle model yapısının karmaşıklığı ve veri özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Parametre sayısının artması optimizasyon algoritmalarının yakınsama davranışını önemli ölçüde etkileyebilmekte ve eğitim sürecinin daha karmaşık hale gelmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle optimizasyon yöntemlerinin doğru seçimi ve uygulanması makine öğrenmesi modellerinin başarısını belirleyen temel faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016).

Literatürde bu problemlerin çözümüne yönelik olarak birçok yöntem geliştirilmiştir. Momentum tabanlı optimizasyon algoritmaları, adaptif öğrenme oranı yöntemleri, düzenlileştirme teknikleri ve boyut indirgeme yaklaşımları makine öğrenmesi modellerinin daha kararlı ve etkili bir şekilde eğitilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca hiperparametre optimizasyonu ve otomatik makine öğrenmesi yöntemleri model performansını artırmak için önemli araçlar haline gelmiştir (Feurer et al., 2015).

Gelecekte makine öğrenmesi alanında optimizasyon problemlerine yönelik araştırmaların daha da önem kazanması beklenmektedir. Özellikle büyük ölçekli veri kümeleri için daha verimli ve ölçeklenebilir optimizasyon algoritmalarının geliştirilmesi önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Bunun yanı sıra meta-öğrenme ve otomatik model tasarımı gibi yeni yaklaşımların makine öğrenmesi optimizasyon problemlerinin çözümünde önemli katkılar sağlayabileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak makine öğrenmesi algoritmalarında optimizasyon problemlerinin anlaşılması ve bu problemlere yönelik etkili çözüm yöntemlerinin geliştirilmesi daha güçlü ve genellenebilir modellerin oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Bu nedenle optimizasyon yöntemleri makine öğrenmesi araştırmalarının temel bileşenlerinden biri olmaya devam edecektir. Ayrıca ölçeklenebilir optimizasyon algoritmaları ve otomatik model tasarımı gelecekteki araştırmalar için önemli bir yön oluşturmaktadır. Özellikle ölçeklenebilir optimizasyon algoritmalarının geliştirilmesi, meta-öğrenme yaklaşımları ve otomatik model tasarımı gibi konuların gelecekteki araştırmalarda önemli bir rol oynaması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Bellman, R. E. (2015). *Adaptive control processes: a guided tour*. Princeton university press.
- Bergstra, J., & Bengio, Y. (2012). Random search for hyper-parameter optimization. *Journal of machine learning research*, 13(2).
- Bishop, C. M., & Nasrabadi, N. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning* (Vol. 4, No. 4, p. 738). New York: springer.
- Boyd, S., & Vandenberghe, L. (2004). *Convex optimization*. Cambridge university press.
- Dauphin, Y. N., Pascanu, R., Gulcehre, C., Cho, K., Ganguli, S., & Bengio, Y. (2014). Identifying and attacking the saddle point problem in high-dimensional non-convex optimization. *Advances in neural information processing systems*, 27.
- Feurer, M., Klein, A., Eggensperger, K., Springenberg, J., Blum, M., & Hutter, F. (2015). Efficient and robust automated machine learning. *Advances in neural information processing systems*, 28.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., & Bengio, Y. (2016). *Deep learning* (Vol. 1, No. 2, pp. 1-800). Cambridge: MIT press.
- Hastie, T. (2009). The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction.
- Jolliffe, I. (2025). Principal Component Analysis. In *International Encyclopedia of Statistical Science* (pp. 1945-1948). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kingma, D. P., & Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv preprint arXiv:1412.6980*.
- Pascanu, R., Mikolov, T., & Bengio, Y. (2013, May). On the difficulty of training recurrent neural networks. In *International conference on machine learning* (pp. 1310-1318). Pmlr.
- Ruder, S. (2016). An overview of gradient descent optimization algorithms. *arXiv preprint arXiv:1609.04747*.
- Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Salakhutdinov, R. (2014). Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting. *The journal of machine learning research*, 15(1), 1929-1958.
- Snoek, J., Larochelle, H., & Adams, R. P. (2012). Practical bayesian optimization of machine learning algorithms. *Advances in neural information processing systems*, 25.



FARKLI FREKANS VE SES ŞİDDETLERİNİN PİEZOELEKTRİK ENERJİ ÜRETİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

“ ”

*Burak Gül*¹

*Hakan Yılmaz*²

*Nida Çırak*³

*Songül Ayna*⁴

1 Burak Gül, Uzman Öğretmen, Ali Kuşçu Bilim ve Sanat Merkezi,
ORCID: 0000-0001-9268-5497

2 Hakan Yılmaz, Başöğretmen, Ali Kuşçu Bilim ve Sanat Merkezi,
ORCID: 0009-0009-3488-0222

3 Nida Çırak, Uzman Öğretmen, Ali Kuşçu Bilim ve Sanat Merkezi,
ORCID: 0009-0004-7869-7407

4 Songül Ayna, Başöğretmen, Gazi Ortaokulu, ORCID: 0000-0002-9113-4746

GİRİŞ

Enerjiye olan talep; ısınma, aydınlatma, ulaşım ve çeşitli sektörlerde yakıt kullanımına bağlı gereksinimlerin etkisiyle sürekli bir artış eğilimi göstermektedir. Bu artış yalnızca temel ihtiyaçlardan değil, aynı zamanda bireylerin yaşam standartlarının yükselmesine paralel olarak ortaya çıkan tüketim alışkanlıklarından da kaynaklanmaktadır. Artan enerji ihtiyacı, doğal kaynakların hızla tükenmesine, çevresel bozulmaların derinleşmesine ve ülkelerin enerji bakımından dışa bağımlılıklarının artmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, enerji maliyetleri işletmeler açısından rekabet baskısını artırırken, hane halkı ve ulusal ekonomiler üzerinde de ciddi bir ekonomik yük oluşturmaktadır. Enerji talebindeki bu yükseliş, mevcut tüketim düzeyi ve enerji kalitesi korunarak toplumsal refahın sürdürülebilir biçimde artırılıp artırılamayacağı sorusunu da beraberinde getirmektedir. Üretim ve tüketim alışkanlıklarında köklü değişiklikler yapılmadığı sürece, gelecek kuşaklara yaşanabilir bir çevre bırakılması güç görünmektedir. Nitekim çevresel denge bozulması, enerji maliyetlerindeki artış, gelir dağılımındaki olumsuzluklar ve fosil yakıt rezervlerinin giderek azalması bu sürecin temel göstergeleri arasında yer almaktadır (Aydın, 2016).

Bu bağlamda değerlendirildiğinde, enerji talebindeki artışın yalnızca niceliksel bir büyüme olmadığı, aynı zamanda ekonomik, çevresel ve toplumsal boyutlarıyla çok yönlü bir sorun alanı oluşturduğu anlaşılmaktadır. Özellikle mevcut tüketim alışkanlıklarının sürdürülebilirlik ilkeleriyle uyumlu olmaması, enerji politikalarının yeniden yapılandırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu durum, enerji üretiminde çeşitliliğin artırılması ve çevre dostu teknolojilere yönelimin hızlandırılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Diğer yandan, enerji kaynaklarının sınırlı olması ve fosil yakıtların çevresel etkileri dikkate alındığında, alternatif ve yenilenebilir enerji çözümlerinin geliştirilmesi stratejik bir öncelik haline gelmektedir. Bu noktada, yalnızca büyük ölçekli enerji yatırımları değil, aynı zamanda mikro düzeyde enerji üretimini mümkün kılan yenilikçi yaklaşımlar da önem kazanmaktadır. Enerjinin daha verimli kullanılması ve farklı kaynaklardan elde edilebilmesi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynamaktadır. Enerjiye ilişkin sorunların çözümü, yalnızca arzın artırılmasıyla değil, aynı zamanda tüketim alışkanlıklarının yeniden düzenlenmesi ve teknolojik yeniliklerin etkin biçimde kullanılmasıyla mümkün olacaktır. Bu çerçevede geliştirilecek alternatif enerji üretim yöntemleri, hem çevresel etkilerin azaltılmasına hem de enerji bağımsızlığının güçlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Alternatif enerji üretim yöntemleri, hem çevresel etkilerin azaltılmasına hem de enerji bağımsızlığının güçlendirilmesine katkı sağlayacaktır. Nitekim küresel ölçekte nüfus artışı, refah düzeyinin yükselmesi ve teknolojik ilerlemelerin hız kazanması, enerji tüketimini sürekli artırarak dünya genelindeki

enerji gereksinimini daha da kritik bir noktaya taşımaktadır. Bu artan talebin karşılanabilmesi ve sürdürülebilir bir enerji geleceğinin oluşturulabilmesi için, sınırlı rezervlere sahip yenilenemez enerji kaynaklarının planlı ve kontrollü biçimde kullanılması kadar, yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyelinin etkin bir şekilde değerlendirilmesi de büyük önem taşımaktadır. Türkiye özelinde mevcut enerji kaynaklarının kapsamlı biçimde analiz edilmesi; ortaya çıkan gereksinimlere ve karşılaşılan sorunlara uygun, sürdürülebilir ve uygulanabilir çözüm stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Koç ve Kaya, 2015).

Sürdürülebilir çözüm stratejilerinin başarıya ulaşabilmesi için, ülkelerin mevcut enerji üretim ve tüketim yapılarının ayrıntılı biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir. Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, 2023 yılı verileri elektrik enerjisi üretiminde kömür ve doğal gazın, tüketim tarafında ise özellikle kömürün halen önemli bir paya sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, enerji arzında fosil kaynaklara olan bağımlılığın devam ettiğini ortaya koyarken, artan enerji ihtiyacının karşılanabilmesi adına yenilenebilir enerji yatırımlarının önemini daha da belirgin hale getirmektedir. Nitekim 2023 yılı Aralık ayı sonu itibarıyla kurulu güç kapasitesinde ve santral sayısında yaşanan artış, Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılığı azaltma ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme konusunda ilerleme kaydettiğini göstermektedir. Ancak artan enerji talebinin uzun vadede sürdürülebilir biçimde karşılanabilmesi için yalnızca yeni yatırımların yapılması yeterli olmayıp, aynı zamanda enerji verimliliğini artırmaya yönelik uygulamaların da yaygınlaştırılması gerekmektedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024). Bu bağlamda, ülke ölçeğindeki büyük enerji yatırımlarının yanında, farklı alanlarda enerji üretimini destekleyecek yenilikçi uygulamaların geliştirilmesi de sürdürülebilir yaşam hedefleri açısından önem taşımaktadır.

Enerji üretiminde çeşitliliğin artırılmasına yönelik yenilikçi yaklaşımların geliştirilmesi giderek daha önemli hale gelmektedir. Sanayileşmenin hız kazanması, teknolojik ilerlemelerin ivmelenmesi ve küresel nüfus artışı, elektrik enerjisine olan talebi belirgin biçimde artırmakta ve mevcut enerji kaynaklarının bu talebi karşılamada yetersiz kalabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, artan gereksinime yanıt verebilecek alternatif ve yenilikçi çözümlerin geliştirilmesi kaçınılmaz bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda araştırma-geliştirme çalışmalarıyla öne çıkan yöntemlerden biri piezoelektrik temelli enerji üretim teknolojileridir (Aslan, Bilgin ve Erfidan, 2016).

Piezoelektrik sistemlerde enerji dönüşümü, mekanik etki ile elektriksel çıktı arasında doğrudan bir ilişkiye dayanmaktadır. Başka bir ifadeyle, piezoelektrik malzemeler üzerine uygulanan mekanik kuvvetler, malzeme içerisinde elektriksel yük oluşumuna yol açmaktadır (Ali, Raza, Li, Gul ve Kim,

2019). Bu etki iki temel prensip üzerinden açıklanmaktadır. Doğrudan piezoelektrik etki, malzemeye uygulanan mekanik kuvvet sonucunda elektriksel potansiyel farkının oluşmasını ifade eder ve piezoelektrik jeneratörlerin çalışma temelini oluşturur. Ters piezoelektrik etki ise, malzemeye elektrik enerjisi uygulandığında mekanik titreşimlerin meydana gelmesini ifade etmekte olup, piezoelektrik motorların çalışma prensibine dayanak oluşturmaktadır (Aslan, Bilgin ve Erfidan, 2016).

Piezoelektrik etki 19. yüzyılın erken dönemlerinde keşfedilmiş olmasına rağmen, bu teknolojinin uygulama alanlarını genişletmeye yönelik mühendislik ve bilimsel çalışmalar günümüzde de devam etmektedir (Manjón-Sanz ve Dolgos, 2018). Türkiye'nin artan enerji gereksinimi göz önünde bulundurulduğunda, yenilenebilir enerji kaynaklarının hem çeşitlendirilmesi hem de daha verimli hale getirilmesi büyük önem taşımaktadır. Piezoelektrik malzemelerin doğrudan etki prensibi aracılığıyla mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilme özelliği, bu alanda dikkat çeken alternatiflerden biri olarak öne çıkmaktadır. Alanyazın incelendiğinde, piezoelektrik malzemeler kullanılarak farklı ortamlarda ve çeşitli yöntemlerle elektrik üretimine yönelik çalışmaların gerçekleştirildiği görülmektedir. Nitekim Çalışır, Sürmeli ve Akçay (2020) metro istasyonlarında insan hareketlerinden kaynaklanan mekanik etkileri kullanarak enerji üretimini ele almış, Aslan (2016) ise asfalt yüzeyler üzerinden basınç temelli enerji elde edilmesine yönelik araştırmalar yürütmüştür. Bununla birlikte, mevcut çalışmaların büyük ölçüde doğrudan mekanik etkilere dayandığı; ses enerjisinin piezoelektrik malzemeler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesine yönelik uygulamaların ise sınırlı olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, ses temelli enerji dönüşümüne odaklanan mevcut çalışmanın özgün yönünü ortaya koymaktadır. Geliştirilen tasarımın, yüksek ses düzeyine sahip ortamlarda uygulanabilir olması, sistemin farklı kullanım alanlarına uyarlanabilme potansiyelini artırmakta ve yaygın etki açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

YÖNTEM

Bu araştırmada nicel araştırma yaklaşımlarından biri olan tasarım ve geliştirme deseni benimsenmiştir. Tasarım ve geliştirme araştırmaları (TGA), yeni ürün, model ya da süreçlerin oluşturulmasını ve geliştirilen bu yapıların uygulanabilirlik, etkililik ve verimlilik açısından sistematik biçimde değerlendirilmesini amaçlayan araştırma türleri arasında yer almaktadır (Büyüköztürk, Çakmak, Akgün, Karadeniz ve Demirel, 2021). Bu çalışma kapsamında özgün bir ürün ortaya konulması hedeflendiğinden, araştırma tip 1 geliştirme araştırması olarak sınıflandırılmıştır.

Araştırma sürecinde öncelikle ilgili alanyazın kapsamlı biçimde incelenmiş, ardından elde edilen kuramsal bilgiler doğrultusunda tasarım çerçevesi oluşturulmuştur. Geliştirme sürecinde ise TGA yaklaşımının öngördüğü aş-

malar izlenerek sistematik bir ilerleme sağlanmıştır. Veri toplama sürecinde doküman analizi yöntemi kullanılmış; elde edilen veriler analiz edilerek tasarımın şekillendirilmesinde temel alınmıştır. Tüm bu süreç boyunca tasarım ve geliştirme aşamaları, literatürde belirtilen ilkelere uygun şekilde yapılandırılmıştır (Büyüköztürk vd., 2021).

1. Aşama: Bu aşamada tasarım ve geliştirme yapmak için gerekli sorun durumu, bu durumun özellikleri alanyazın dikkate alınarak betimlenir.

2. Aşama: Tasarım aşamasında, özellikleri bir önceki aşamada belirlenen sorunu çözmeye yönelik olarak nasıl bir ürün (araç, süreç, öğretim programı, materyal ya da model) geliştirileceği, bu ürünün sahip olması gereken özellikler, ürünün nasıl kullanılacağı ve neye benzemesi gerektiği yine alanyazındaki bilgiler dikkate alınarak hazırlanır.

3. Aşama: Geliştirme aşamasındaki bir önceki aşamada belirlenen tasarım hazırlanır, uygulanabilir bir ürün olarak ortaya çıkartılır. Ancak bu ürünün tasarıma ve analize uygunluğu da alanyazındaki bilgilerden yararlanır.

4. Aşama: Son aşama olan değerlendirmede toplanan veriler dikkate alınarak baştan sona, yürütülen araştırmanın genel etkisi, getirdiği katkı, ürünün güçlü yönleri, geliştirilmesi gereken yönleri açığa çıkarılır ve bu sayede hem kurumsal bilginin gerçek yaşamdaki işe yararlılığı ortaya çıkarılmış hem de süreç içinde bulgular ışığında yeni bilgiler üretilmiş olur (Büyüköztürk vd., 2021).

BULGULAR

Bu bölümde, tasarım ve geliştirme araştırması kapsamında yürütülen süreçten elde edilen bulgular sunulmuştur. Tasarım ve geliştirme (TGA) yaklaşımının aşamaları doğrultusunda elde edilen sonuçlar, ürünün geliştirilme süreci, uygulanabilirliği ve değerlendirme aşamasında ortaya çıkan çıktılar çerçevesinde ele alınmış ve sistematik olarak açıklanmıştır.

1. Aşama

Enerji, doğa ve toplum yaşamının temel bir bileşenidir. Üretimi, dönüşümü ve tüketimi, çevre ve sürdürülebilir kalkınma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Enerji üretim faaliyetleri, ekosistemleri bozan ve önemli çevresel sorunlara yol açan sera gazı salınımları da dahil olmak üzere çeşitli çevresel etkenlere yol açmaktadır. Çevreye minimum etkiyle enerji üretmek ve tüketmek, sürdürülebilir kalkınma için kritik bir öneme sahiptir. Günümüzde ülkelerin ekonomik ve sosyal kalkınması için ucuz, temiz, güvenilir ve kolay erişilebilen enerji kaynaklarına duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları ile etkin ve ucuz enerji üretim ve kullanım teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik yoğun araştırmalar sürdürül-

mektedir. Özellikle artan nüfus, şehirleşme ve sanayileşme, fosil yakıtlardan elde edilen enerjinin daha da artmasına neden olmaktadır. Bu durum, fosil yakıtların tükenmesi ve fiyatlarının artması, çevreye ve insan sağlığına olan zararları gibi sorunları beraberinde getirmektedir (Öztürk, 2021).

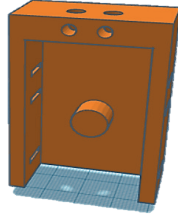
Enerji ihtiyacını karşılamak için, yenilenemeyen enerji kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere iki tür kaynak kullanılmaktadır. Yenilenemeyen kaynaklar, fosil yakıtlar olarak da bilinir ve çevresel sorunlara ciddi ve potansiyel tehlikelere yol açabilir. Ayrıca, bu kaynakların rezervleri sınırlıdır ve bir gün tükenme riski bulunmaktadır. Bu nedenle, alternatif kaynakların bulunması bir zorunluluktur (Çukurçayır ve Sağır, 2008).

Jobert ve Karanfil (2007) yaptıkları araştırmada ülkemizde son kırk yıldaki enerji tüketimi ve gelir seviyesi arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Yapılan inceleme sonucunda ülkemizde enerji konusundaki politikasını geliştirmesi orta ve uzun vadede ekonomisini pozitif yönde katkı sağlayacağı sonucuna ulaşmışlardır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı' nın 2024 Aralık Ayı Sonu Raporu dikkate alındığında ülkemizin enerji bakımından dışa bağımlılığını azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarını artırmak gereklidir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024).

Yapılan araştırmalar yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması sürdürülebilir yaşam için oldukça önemlidir. Bundan dolayı yenilenebilir enerji kaynağı gibi kullanılabilen piezoelektrik malzemeler aracılığıyla ses enerjisinden elektrik enerjisi üretilmesi yeni bir enerji kaynağı oluşturacaktır. Özellikle yüksek ses enerjisinin meydana geldiği fabrika, havalimanı, konser alanı, sinema, tiyatro, düğün salonu ve hoparlör sistemlerinden elektrik üretilebileceği düşünülmektedir.

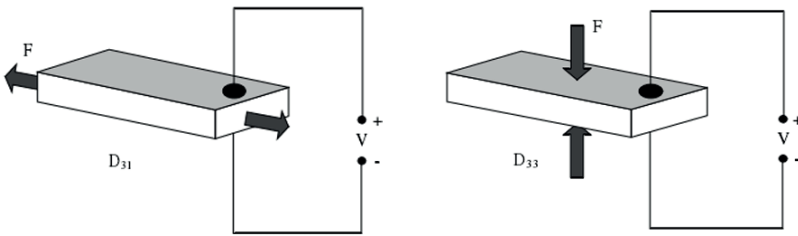
2. Aşama

Bu aşamada, araştırma kapsamında geliştirilen sistemin temel bileşenlerinden biri olan piezoelektrik diskin uygun, verimli ve işlevsel bir şekilde konumlandırılabilmesi amacıyla, söz konusu diskin yerleştirileceği aparata yönelik ayrıntılı bir üç boyutlu (3D) tasarım süreci yürütülmüştür. Tasarım sürecinde, piezoelektrik malzemenin titreşimlere karşı duyarlılığını en üst düzeye çıkaracak geometrik yapı, malzeme uyumu ve kullanım koşulları dikkate alınmış; aynı zamanda aparatın hem üretilebilir hem de uygulanabilir olmasına özen gösterilmiştir. Bu doğrultuda oluşturulan 3D model (Şekil 1), araştırmanın ilerleyen aşamalarında gerçekleştirilecek üretim ve uygulama süreçlerine temel teşkil edecek şekilde yapılandırılmıştır.



Şekil 1: Piezoelektrik disk yerleştirilecek aparat

Şekil 2’de, farklı piezoelektrik malzeme türlerine dayalı olarak enerji toplama ve depolama amacıyla geliştirilen sistemlerin görsel temsillerine yer verilmiştir. Bu sistemler, piezoelektrik malzemelerin farklı yönelim ve çalışma prensiplerine göre değişen enerji dönüşüm verimliliklerini ortaya koyması açısından önem taşımaktadır. Araştırma kapsamında, özellikle ses dalgalarından kaynaklanan mekanik titreşimlerin daha etkin bir şekilde algılanıp elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi hedeflenmiştir. Alanyazındaki kuramsal bilgiler ve önceki uygulama örnekleri dikkate alınarak, titreşim yönüne paralel yük üretme kapasitesiyle öne çıkan ve D33 modu olarak ifade edilen piezoelektrik malzeme türünün kullanılmasının daha uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bu tercih, sistemin ses kaynaklı düşük genlikli titreşimlere karşı daha yüksek duyarlılık göstermesi ve enerji dönüşüm verimliliğinin artırılması beklentisine dayanmaktadır.

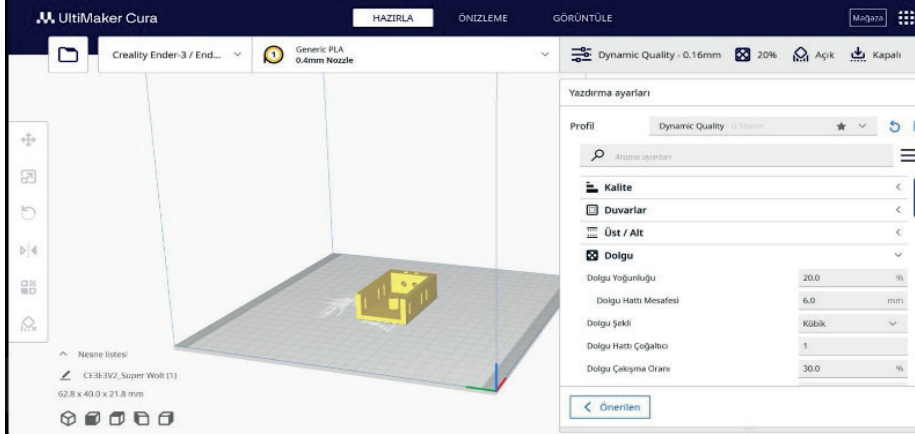


Şekil 2: Piezoelektrik enerji toplayıcı türleri (Gao, Ao, ve Jiang, 2018).

3. Aşama

Bu aşamada, önceki süreçte üç boyutlu olarak tasarlanan aparatın fiziksel üretimine geçilebilmesi amacıyla, 3D yazıcı ortamında gerekli teknik hazırlıklar ve son ayarlamalar gerçekleştirilmiştir. Tasarımın dijital modelden somut ürüne dönüştürülmesi sürecinde, yazıcı parametreleri (katman kalınlığı, doluluk oranı, baskı hızı ve malzeme seçimi gibi) optimize edilerek

üretim verimliliği ve ürün kalitesi artırılmaya çalışılmıştır. Basım sürecine ilişkin aşamalar Şekil 3 ve Şekil 4'te ayrıntılı olarak sunulmakta; elde edilen nihai ürünün fiziksel görünümü ve yapısal özellikleri ise Şekil 6'da gösterilmektedir.

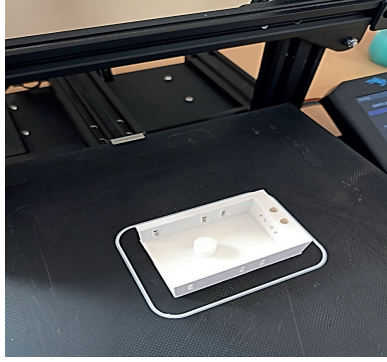


Şekil 3: Tasarlanan aparatın 3D yazıcı ayarlarının yapılması



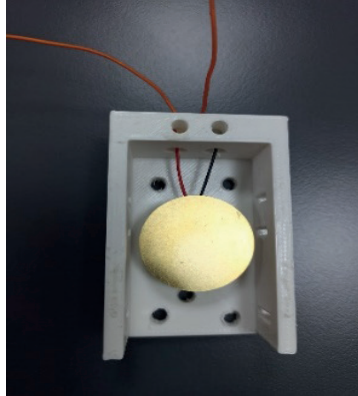
Şekil 4: Tasarlanan aparatın 3D yazıcıda basım aşaması

Şekil 4'te sunulan basım süreci incelendiğinde, tasarlanan modelin katmanlı üretim tekniği kullanılarak aşamalı biçimde oluşturulduğu görülmektedir. Bu süreçte her bir katmanın düzgün ve hatasız bir şekilde yerleştirilmesi, elde edilecek ürünün mekanik dayanıklılığı ve işlevselliği açısından büyük önem taşımaktadır. Baskı sırasında ortaya çıkabilecek olası deformasyonların önüne geçebilmek için yazıcı ayarlarının kararlı bir şekilde sürdürülmesine dikkat edilmiş ve üretim süreci boyunca düzenli kontroller gerçekleştirilmiştir. Bu sayede tasarımın dijital ortamda planlanan özelliklerine uygun bir fiziksel çıktıya dönüştürülmesi hedeflenmiştir.



Şekil 5: Tasarlanan aparatın 3D yazıcıdan basılmış hali

Üç boyutlu yazıcıdan elde edilen aparat üzerinde, sistemin işlevselliğini artırmaya yönelik olarak çeşitli yapısal düzenlemeler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, özellikle hava akışını optimize etmek ve piezoelektrik diskin maruz kaldığı titreşimlerin etkinliğini artırmak amacıyla aparat yüzeyinde belirli noktalara kontrollü delikler açılmıştır (Şekil 5). Oluşturulan bu boşlukların, ortamdaki ses dalgalarının daha verimli bir şekilde yönlendirilmesine katkı sağlayarak piezoelektrik malzemenin titreşim hassasiyetini artırması hedeflenmiştir. Böylece, mekanik titreşimlerin elektrik enerjisine dönüşüm sürecinde daha yüksek verim elde edilmesi amaçlanmıştır. Yapılan bu düzenlemelerin ardından piezoelektrik diskin aparata entegre edilmiş son durumu Şekil 6'da sunulmaktadır.



Şekil 6: Piezoelektrik diskin aparat içinde son durumu

4. Aşama

Bu aşamada, alanyazında yer alan kuramsal bilgiler ve tasarım-geliştirme sürecinde elde edilen bulgular bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiş

ve prototip, işlevsel kullanım aşamasına hazır hale getirilmiştir. Geliştirilen sistem, temel olarak 3D yazıcı teknolojisi ile üretilmiş piezoelektrik disk aparatı, bu aparat içerisine entegre edilen piezoelektrik disk ve üretilen elektriksel çıktının ölçülmesini sağlayan bir multimetreden oluşmaktadır. Prototipin tasarımında, mekanik titreşimlerin piezoelektrik eleman üzerine etkin bir şekilde iletilmesi ve bu enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünün en verimli şekilde gözlemlenebilmesi hedeflenmiştir. Sistem bileşenleri arasında yer alan piezoelektrik disk, mekanik deformasyonlara bağlı olarak elektriksel potansiyel farkı üreten temel aktif eleman olarak görev yapmaktadır. 3D yazıcı ile üretilen aparat ise hem disk için yapısal bir taşıyıcı görev üstlenmekte hem de tasarlanan geometrik özellikleri sayesinde titreşimlerin kontrol altına alınmasına ve yönlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sayede sistem, yalnızca bir yerleştirme düzeneği olmanın ötesine geçerek, enerji dönüşüm sürecini destekleyen fonksiyonel bir yapı haline getirilmiştir.

Prototipte kullanılan multimetre, piezoelektrik disk tarafından üretilen gerilim değerlerinin anlık ve güvenilir bir şekilde ölçülmesini sağlamak amacıyla sisteme entegre edilmiştir. Bu ölçümler, tasarımın performans değerlendirmesi açısından kritik veri sağlayarak, farklı tasarım parametrelerinin enerji üretimi üzerindeki etkisinin analiz edilmesine imkan tanımaktadır. Böylece prototip, yalnızca bir üretim düzeneği değil aynı zamanda deneysel veri toplama platformu olarak da işlev görmektedir. Şekil 7’de, tüm bileşenlerin bir araya getirildiği ve sistemin nihai formunu aldığı prototipin son hali sunulmaktadır. Bu yapı, tasarım sürecinin teorik altyapı ile deneysel uygulamanın bütünleştirildiği kritik bir aşamasını temsil etmektedir.



Şekil 7: Prototipin deneme için hazırlanmış hali

Deneysel çalışma kapsamında, sistemin performansını değerlendirmek ve ses enerjisinden elektrik enerjisine dönüşüm kapasitesini analiz etmek amacıyla kontrollü bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, piezoelektrik ta-

banlı düzenek bir hoparlörün yanına yerleştirilmiş ve farklı ses şiddetleri oluşturularak sistemin ürettiği gerilim değerleri ölçülmüştür. Uygulama sürecinde elde edilen veriler, volt (V) cinsinden Tablo 1’de sistematik bir şekilde kayıt altına alınmış ve deneysel sürecin nicel değerlendirilmesine temel oluşturmuştur. Elde edilen bulgular, ses enerjisinin mekanik titreşimler aracılığıyla piezo-elektrik disk üzerinde elektriksel potansiyel fark oluşturabildiğini göstermiştir. Bu sonuç, sistemin temel çalışma prensibi olan enerji dönüşüm mekanizmasını doğrular niteliktedir. Deneysel süreçte yalnızca farklı ses şiddetleri değil, aynı zamanda farklı frekans ve içerik özelliklerine sahip ses kaynaklarının da enerji üretimi üzerindeki etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir.

Bu kapsamda, farklı akustik özelliklere sahip üç ayrı müzik parçası seçilmiş ve bu parçalar M1, M2 ve M3 şeklinde kodlanarak deneysel çalışmaya dahil edilmiştir. Seçilen müzikler aracılığıyla, sesin yalnızca şiddetinin değil aynı zamanda frekans yapısının ve ritmik özelliklerinin de üretilen elektriksel gerilim değerleri üzerindeki etkisinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen veriler tablo haline getirilmiş, ayrıca değişkenler arasındaki ilişkinin daha net görülebilmesi amacıyla grafiksel gösterimler ile desteklenmiştir.

Deneysel ölçümlerde kullanılan ses düzeylerinin (dB) ve frekans değerlerinin belirlenebilmesi için, Şekil 8’de gösterildiği üzere Arduino Science Journal mobil uygulamasının ses sensörü özelliklerinden yararlanılmıştır. Bu uygulama aracılığıyla hem ses şiddeti hem de frekans değerleri eş zamanlı olarak ölçülmüş, böylece deneysel verilerin daha güvenilir ve tekrarlanabilir olması sağlanmıştır. Elde edilen tüm bu veriler, sistemin farklı akustik koşullar altında gösterdiği performansın detaylı şekilde analiz edilmesine imkan tanımıştır.



Şekil 8: Arduinio Science Journal ses sensör değerleri

Şekil 8’de, deneysel süreçte kullanılan ses kaynaklarına ait akustik parametrelerin ölçüm sonuçları sunulmaktadır. Bu kapsamda, ses şiddeti (dB) ve frekans (Hz) değerleri, Arduino Science Journal mobil uygulaması aracılığıyla eş zamanlı olarak kaydedilmiş ve sistematik biçimde analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, deney süresince oluşturulan ses ortamının nicel özelliklerini ortaya koyarak, deneysel koşulların bilimsel olarak tanımlanmasına imkan sağlamıştır.

Ses şiddeti ölçümlerinde minimum 47 dB, ortalama 74 dB ve maksimum 84 dB değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Bu değerler, deneyin orta ve yüksek şiddet aralığında gerçekleştirildiğini göstermekte olup, piezoelektrik sistemin farklı akustik uyarım seviyelerine verdiği tepkilerin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle ses şiddetindeki değişimlerin, sistem tarafından üretilen elektriksel gerilim değerleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu varsayımı bu ölçümlerle desteklenmiştir.

Frekans analizine bakıldığında ise minimum 37,6 Hz, ortalama 343,4 Hz ve maksimum 3072,2 Hz değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bu geniş frekans aralığı, farklı müzik türleri ve ses bileşenlerinin deneysel sürece dahil edildiğini göstermekte olup, piezoelektrik elemanın yalnızca ses şiddetine değil aynı zamanda frekans değişimlerine de duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek frekans bileşenlerinde gözlemlenen artışlar, sistemin titreşim cevabının frekans bağımlı karakterini destekler niteliktedir.

Elde edilen bu veriler, deneysel tasarımın akustik değişkenler açısından yeterli çeşitliliği sağladığını ve sistem performansının farklı ses koşulları altında kapsamlı bir şekilde değerlendirilebildiğini göstermektedir. Böylece, ses enerjisinden elektrik enerjisine dönüşüm mekanizmasının hem şiddet hem de frekans parametreleri bağlamında analiz edilmesi mümkün hale gelmiştir.

Tablo 1: M1 ile elde edilen veriler

	Ses Seviyesi (Ortalama) dB	Frekans (Ortalama) Hz	Gerilim Volt	Zaman Saniye
1.	74	339	0,202	30
2.	74	343	0,156	30
3.	73	265	0,180	30

Tablo 1’de, M1 kodu ile belirlenen müzik parçası kullanılarak gerçekleştirilen üç ayrı denemeye ait ölçüm sonuçları sistematik olarak sunulmuştur. Bu denemeler, aynı ses kaynağı altında tekrarlanabilirliği değerlendirmek ve piezoelektrik sistemin kararlılığını analiz etmek amacıyla yapılmıştır. Elde edilen veriler, ses enerjisinin elektrik enerjisine dönüşüm sürecinde meydana gelen değişkenliği ortaya koyarak sistem performansının deneysel olarak incelenmesine olanak sağlamıştır.

Yapılan ölçümler incelendiğinde, en yüksek gerilim üretiminin 74 dB ses düzeyi ve 343 Hz frekans değerine karşılık gelen birinci denemede elde edildiği görülmektedir. Bu durum, sistemin belirli akustik koşullar altında daha verimli enerji dönüşümü gerçekleştirebildiğini göstermektedir. Özellikle aynı ses şiddeti değerlerine sahip birinci ve ikinci denemeler karşılaştırıldığında, birinci denemede üretilen elektriksel gerilimin daha yüksek olması, yalnızca ses şiddetinin değil, aynı zamanda frekans yapısı, titreşim sürekliliği ve anlık dalgalanmaların da enerji üretimi üzerinde etkili olabileceğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, piezoelektrik sistemlerin sadece temel akustik şiddet parametresine değil, aynı zamanda sesin zamansal ve frekanssal dağılımına da duyarlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla elde edilen sonuçlar, enerji dönüşüm mekanizmasının çok değişkenli bir yapıya sahip olduğunu ve deneysel verilerin bu bağlamda değerlendirilmesi gerektiğini desteklemektedir.

Tablo 2: M2 ile elde edilen veriler

	Ses Seviyesi (Ortalama) dB	Frekans (Ortalama) Hz	Gerilim Volt	Zaman Saniye
1.	75	220	0,220	30
2.	75	251	0,179	30
3.	75	215	0,206	30

Tablo 2’de M2 şarkısı kullanılarak gerçekleştirilen üç ayrı deneysel uygulamaya ilişkin ölçüm sonuçları ayrıntılı biçimde sunulmuştur. Elde edilen veriler genel olarak değerlendirildiğinde, deneysel düzende tüm uygulamalarda ses şiddetinin sabit tutulmasına rağmen (75 dB), frekans değişiminin sistem tarafından üretilen gerilim miktarı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. Özellikle birinci denemede 220 Hz frekans değerinde elde edilen sonuçların, diğer denemelere kıyasla daha yüksek gerilim üretimi ile sonuçlandığı tespit edilmiştir. Bu durum, piezoelektrik tabanlı enerji dönüşüm sistemlerinde yalnızca ses şiddetinin değil, aynı zamanda titreşim frekansının da elektriksel çıktı üzerinde kritik bir değişken olduğunu ortaya koymaktadır.

Deneysel bulgular, piezoelektrik diskin mekanik titreşimlere verdiği yanıtın frekans duyarlılığı ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Sabit ses basıncı altında bile, farklı frekans bileşenleri diskin rezonans davranışını değiştirebilmekte ve bu durum üretilen elektriksel potansiyel farkında anlamlı değişimlere yol açabilmektedir. Bu bağlamda, 220 Hz frekansının sistemin mekanik-elektriksel dönüşüm verimliliğini artıran bir etki oluşturduğu ve bu frekans bandında piezoelektrik malzemenin daha etkin bir titreşim genliği sergilediği düşünülmektedir.

Elde edilen sonuçlar ayrıca, ses kaynağı olarak kullanılan M2 şarkısının spektral içeriğinin deneysel çıktılar üzerinde etkili olabileceğini de göstermektedir. Çünkü müzik sinyalleri, tek bir frekanstan ziyade çoklu frekans bileşenleri içeren karmaşık dalga formlarıdır. Bu nedenle, aynı ses seviyesinde yapılan ölçümlerde dahi frekans dağılımındaki farklılıklar, piezoelektrik yüzeyde oluşan mekanik uyarımın şiddetini değiştirmekte ve buna bağlı olarak elektriksel gerilim üretiminde varyasyonlar ortaya çıkarmaktadır.

Sonuç olarak, Tablo 2’de elde edilen bulgular, sistem performansının yalnızca akustik şiddet parametresi ile açıklanamayacağını; frekans içeriği ve titreşim karakteristiğinin de en az ses düzeyi kadar belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu durum, piezoelektrik enerji hasadı uygulamalarında optimum enerji üretimi için uygun frekans aralıklarının belirlenmesinin kritik bir tasarım parametresi olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 3: M3 ile elde edilen veriler

	Ses Seviyesi (Ortalama) dB	Frekans (Ortalama) Hz	Gerilim Volt	Zaman Saniye
1.	77	327	0,270	30
2.	75	277	0,200	30
3.	76	374	0,220	30

Tablo 3’te M3 şarkısı kullanılarak gerçekleştirilen üç ayrı deneysel ölçümün sonuçları ayrıntılı olarak sunulmuştur. Elde edilen bulgular genel olarak değerlendirildiğinde, deneysel süreç boyunca ses şiddetinin sabit veya birbirine yakın değerlerde tutulmasına rağmen, frekans değişiminin üretilen elektriksel gerilim üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Özellikle birinci denemede 77 dB ses düzeyi ve 327 Hz frekans değerinde elde edilen sonuçların, diğer denemelere kıyasla daha yüksek gerilim üretimi sağladığı tespit edilmiştir.

Bu durum, piezoelektrik enerji dönüşüm sistemlerinde akustik uyarımın yalnızca şiddet boyutunun değil, aynı zamanda frekans bileşeninin de kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. 327 Hz frekansında gözlemlenen daha yüksek gerilim üretimi, piezoelektrik diskin mekanik rezonans özellikleri ile ilişkili olabileceğini düşündürmektedir. Rezonans koşullarına yakın frekanslarda, potansiyel olarak daha büyük genlikli titreşimler üretmekte ve bu durum elektriksel potansiyel farkının artmasına yol açmaktadır.

Ayrıca, M3 şarkısının karmaşık spektral yapısı dikkate alındığında, yalnızca tek bir baskın frekans yerine birden fazla harmonik bileşenin sisteme etki ettiği anlaşılmaktadır. Bu harmonik yapı, piezoelektrik yüzeyde oluşan

mekanik zorlanmayı değişken hale getirerek, deneyler arasında gözlenen gerilim farklılıklarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Buna rağmen, birinci denemede elde edilen yüksek değer, belirli bir frekans bileşeninin sistem verimliliğini artırıcı yönde etkide bulunduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, Tablo 3'teki veriler, piezoelektrik tabanlı enerji hasadı sistemlerinde sabit ses şiddetine rağmen frekans içeriğinin performans üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymakta ve özellikle 327 Hz civarındaki uyarımların daha yüksek elektriksel çıktı üretebildiğini göstermektedir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Zaman içerisinde çoğalan nüfus, şehirleşme ve sosyal hayattaki gelişim, endüstriden ulaşım, ev ve işyerlerindeki enerji tüketimine kadar çok geniş bir yelpazede enerji ihtiyacına olan ihtiyacı artırmaktadır. Enerji insanoğlunun yaşam kalitesini artırmasına rağmen, atmosferdeki sera gazı oranının artması toplumsal sağlığı tehlikeye sokabilecek düzeylere ulaşmaktadır (Aydın, 2016). Bundan dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelimin artması toplumsal hayatın ve endüstrinin enerji ihtiyacını karşılamada yanında sera gazı emisyonundaki artışı engelleyecektir.

Enerji ihtiyacı günlük hayatımızda ekonomik büyümeyi sağlayan ve endüstrinin rekabet edebilme kapasitesi artıran bir gereksinimdir. Küresel ısınma değişimini iyileştirebilmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek doğru bir yol olacaktır (Neha ve Joon, 2021). Bunun yanında fosil yakıtların kullanımını azaltarak yenilenebilir enerjileri kaynaklarının kullanım oranlarının artırılması sosyal, çevresel ve maddi problemlerin kontrolünü sağlamaya katkı sağlayacaktır (Mohtasham, 2015). Yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılabilen piezoelektrik 1800'lü yıllarda keşfedilmiş ve birçok farklı alanda kullanıldığı bilinmektedir (Manjón-Sanz ve Dolgos, 2018).

Bu araştırma yenilenebilir enerji kaynağı olarak tercih edilen piezoelektrik malzemeleri kullanarak ses enerjisinden elektrik enerjisi üretmek amacıyla yapılmıştır. Üretilen tasarım hoparlör yanında M1, M2 ve M3 ile kodlanan 3 farklı şarkıda denenerek üretilen gerilim miktarına ait veriler kaydedilmiştir. En yüksek üretilen elektrik enerjisi miktarının M3 ile kodlanan müzikle yapılan 1. denemede olduğu tespit edilmiştir. Üretilen gerilim miktarının 0,27V olduğu dikkate alındığında yüksek bir enerji miktarı olmadığı söylenebilir. Ancak bu konuda yapılacak olan çalışmalar ile ses enerjisinin olduğu her yerde elektrik üretilebileceği düşünülmektedir. Aslan (2016) piezoelektrik malzemeler kullanarak asfalt zeminlerde elektrik üretebilmek için yaptığı çalışmada maksimum 3,16 voltluk bir değere ulaşabilmiştir. Yaptığımız araştırma ile bu araştırma arasında üretilen enerji miktarının farklı olmasının sebebi asfalt zemine doğrudan basınç uygulanması ve çokça piezoelektrik malzeme kullanılmasıdır. Benzer bir çalışmayı Çalışır, Sürmeli ve Akçay (2020) metro istasyonlarında elektrik üretmek için piezoelektrik malzeme

kullanarak yolcuların yapılan tasarım üzerinde yaptıkları basınç sayesinde 7 W güç üretebildikleri sonucuna ulaşmışlardır. Bu çalışmada geliştirdiğimiz tasarımda piezoelektrik malzemeye doğrudan mekanik bir etki olmadığından dolayı üretilen elektrik enerjisi miktarı daha az olması beklenen bir sonuçtur. Gök ve Karadöl (2018) yaptıkları çalışmada ayakkabı tabanına piezoelektrik malzeme uygulaması yaparak elektrik üretmeyi amaçlamışlardır. Denemeler sonucunda 0,47V gerilim üretebilmişlerdir. Bu yapılan çalışma geliştirdiğimiz ürün ile karşılaştırıldığında ayakkabıda basınç uygulanmasına rağmen üretilen gerilimin çok farklı olmadığı tespit edilmiştir. Daha fazla piezoelektrik malzeme kullanarak ses enerjisinden aynı gerilim üretilebilir.

Zaman içerisinde çeşitli araştırmalar sayesinde ses enerjisinden elektrik enerjisi üretme miktarının daha yüksek seviyelere çıkarılabileceği düşünülmektedir. Yüksek ses seviyesine sahip olan havalimanı, fabrika, konser salonu, düğün salonu, stadyumlar, sinema salonu, otoyollar gibi birçok alanda ses enerjisinden elektrik enerjisi üretilebileceği yapılan bu çalışma ile ortaya konmuştur.

Üretilen elektrik enerjisinin yenilenebilir enerji kaynağı gibi kullanılabilir olduğundan küresel ısınmaya sebep olmayacak ve doğaya zarar veremeyecektir (Neha ve Joon, 2021). Dünya’da artan sera gazı salınımı göz önüne alındığında, çevre dostu enerji üretim yaklaşımlarının geliştirilmesi ve piezoelektrik gibi düşük çevresel etkiye sahip malzemelerin kullanım alanlarının genişletilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, ses enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesine yönelik geliştirilen sistemlerin, özellikle yoğun gürültüye maruz kalan kentsel ve endüstriyel bölgelerde alternatif bir enerji hasadı yöntemi olarak değerlendirilebileceği söylenebilir. Her ne kadar bu çalışmada elde edilen gerilim değerleri sınırlı düzeyde kalsa da, sistemin temel prensibi açısından bakıldığında ölçeklenebilir bir yapı sunduğu görülmektedir.

Araştırma bulguları genel olarak değerlendirildiğinde, piezoelektrik malzemeler ile ses enerjisinden elektrik üretiminin mümkün olduğu ancak elde edilen enerji miktarının doğrudan mekanik basınç uygulanan sistemlere kıyasla daha düşük seviyelerde kaldığı anlaşılmaktadır. Bunun temel nedeni, ses dalgalarının piezoelektrik yüzeye doğrudan ve yüksek yoğunluklu bir kuvvet uygulamamasıdır. Bu durum, enerji dönüşüm verimliliğini sınırlayan önemli bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Buna rağmen, frekans ve ses şiddeti gibi akustik değişkenlerin üretilen gerilim üzerinde etkili olduğu ve özellikle belirli frekans aralıklarında daha yüksek çıktılar elde edilebildiği gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, sistemin geliştirilmesi durumunda daha yüksek verimlilik değerlerine ulaşılabilirliğini göstermektedir. Özellikle piezoelektrik yüzey alanının artırılması, rezonans frekansına uygun tasarımların yapılması

ve çoklu piezoelektrik elemanların birlikte kullanılması gibi iyileştirmeler ile enerji üretim kapasitesinin artırılması mümkündür. Bu bağlamda, ilerleyen çalışmalarda sistemin farklı ses kaynakları ve değişken frekans aralıklarında test edilmesi, performansın daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma ses enerjisinin çevresel bir kaynak olarak değerlendirilebileceğini ve uygun tasarımlar ile elektrik enerjisine dönüştürülebileceğini ortaya koymaktadır. Her ne kadar mevcut sistemde üretilen enerji miktarı günlük kullanım için yeterli düzeyde olmasa da, yenilikçi iyileştirmeler ile bu yaklaşımın sürdürülebilir enerji üretim sistemlerine entegre edilebileceği düşünülmektedir.

ÖNERİLER

Enerji, günümüz toplumlarının en temel gereksinimlerinden biri haline gelmiş; nüfus artışı, şehirleşme ve teknolojik gelişmeler bu ihtiyacı giderek artırmıştır. Bununla birlikte yenilenemez enerji kaynaklarının kullanımı, sera gazı salınımını artırarak çevresel sorunların ve iklim değişikliğinin önemli nedenlerinden biri olmuştur. Bu durum, sürdürülebilir ve çevre dostu enerji üretim yaklaşımlarına olan ihtiyacı daha da belirgin hale getirmiştir. Piezoelektrik malzemeler, mekanik ve akustik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilme özellikleri sayesinde bu kapsamda değerlendirilebilecek önemli fonksiyonel materyaller arasında yer almaktadır.

Her ne kadar piezoelektrik etki 1800'lü yıllarda keşfedilmiş olsa da, bu teknolojinin günlük yaşam uygulamalarına ve geniş ölçekli enerji sistemlerine entegrasyonu henüz istenilen düzeyde değildir. Bu durum, konuya yönelik bilimsel araştırmaların artırılması ve teknolojik geliştirmelerin hızlandırılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma bulguları doğrultusunda, gelecekte yapılacak çalışmalara ve uygulamalara yönelik çeşitli öneriler aşağıda sunulmaktadır.

1. Piezoelektrik malzemeler kullanılarak elektrik üretimine yönelik araştırmaların artırılması gerekmektedir. Özellikle malzeme verimliliğinin geliştirilmesi, enerji dönüşüm devrelerinin optimize edilmesi ve depolama sistemlerinin iyileştirilmesi gibi alanlara odaklanması, sistem performansını artıracaktır. Ayrıca piezoelektrik elemanların dayanıklılığı ve hassasiyetinin artırılması, gerçek yaşam uygulamalarında daha etkili sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

2. Ses enerjisinden elektrik üretimini mümkün kılacak yeni tasarımların geliştirilmesi önem taşımaktadır. Gürültü kirliliğinin yoğun olduğu şehir merkezleri, ulaşım alanları, fabrikalar ve kalabalık yaşam alanları bu tür sistemler için potansiyel uygulama bölgeleri olarak değerlendirilebilir. Rezonans esasına dayalı ve frekans uyumlu tasarımlar sayesinde enerji dönüşüm verimliliğinin artırılması mümkün olabilir.

3. Piezoelektrik teknolojilerin günlük yaşamda kullanılabilir basit, ekonomik ve erişilebilir sistemlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Giyilebilir enerji üretim sistemleri, zemin tabanlı enerji hasadı uygulamaları ve küçük ölçekli akustik enerji dönüştürücüler bu kapsamda değerlendirilebilecek örneklerdir. Bu tür uygulamalar, teknolojinin laboratuvar ortamından çıkıp günlük yaşama entegre edilmesini hızlandıracaktır.

KAYNAKLAR

- Ali, F., Raza, W., Li, X., Gul, H. ve Kim, K. (2019). Piezoelectric energy harvesters for biomedical applications. *Nano Energy*, 57, 879-902. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.012>.
- Aslan, H. (2016). Piezoelektrik Malzemelerle Asfalt Yollarda Elektrik Enerjisi Üretimi Published in 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 3-5 November.
- Aslan, E., Bilgin, M. Z., ve Erfidan, T. (2016). Piezoseramik Malzemelerle Elektrik Enerjisi Üretilmesi Ve Depolanması. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5(2).
- Aydın, M. (2016). Enerji Verimliliğinin Sürdürülebilir Kalkınmadaki Rolü: Türkiye Değerlendirmesi. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 14(28), 409-441.
- Büyüköztürk, Ş., Çakmak-Kılıç, E., Akgün, Ö.E., Karadeniz, Ş., ve Demirel, F. (2021). *Bilimsel Araştırma Yöntemleri* (30. baskı). Ankara: Pegem Akademi.
- Çalışır, A., Sürmeli, B., ve Akçay, M. T. (2020). Metro İstasyonlarında Piezoelektrik Malzeme Kullanarak Elektrik Enerjisi Üretilmesi. *İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(1), 1-6.
- Çukurçayır, M. A., ve Sağır, H. (2008). Enerji Sorunu, Çevre Ve Alternatif Enerji Kaynakları. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*(20), 257-278.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2024). <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>.
- Gao, S., Ao, H., ve Jiang, H. (2018). Development of wearable equipment and piezoelectric vibration energy harvest devices. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 397, 012080-012080. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/397/1/012080>.
- Gök, M.O. ve Karadöl, İ.(2018).Piezoelektrik Uygulamalı Ayakkabı Tasarımı.*Journal of Social and Humanities Sciences Research*
- Jobert, T., & Karanfil, F. (2007). Sectoral Energy Consumption by Source and Economic Growth in Turkey. *Energy policy*, 35(11), 5447-5456.
- Koç, E. ve Kaya, K. (2015). “Enerji Kaynakları–Yenilenebilir Enerji Durumu,” *Mühendis ve Makina*, cilt 56, sayı 668, s. 36-47.
- Manjón-Sanz, A. ve Dolgos, M R. (2018). Applications of Piezoelectrics: Old and New. *Chemistry of Materials*, 30(24), 8718-8726. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b03296>.
- Mohtasham, J. (2015). Review Article-Renewable Energies. *Energy Procedia*, 74, 1289-1297. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.774>.
- Neha, ve Joon, R. (2021). Renewable Energy Sources: A Review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1979(1), 012023-012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1979/1/012023>.
- Öztürk, H. H., (2021). *Yenilenebilir Enerji Kaynakları*. İstanbul: Birsan Yayınevi.



BAĞIMLILIĞIN MOLEKÜLER
VE BİYOKİMYASAL
MEKANİZMALARI: ÖDÜL
SİSTEMİ, NÖROADAPTASYON VE
NÖROİNFLAMASYON

“ ”

Zuhal Emire¹

1 Öğr. Gör. Dr., Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Simav Sağlık Hizmetleri MYO,
Kozmetik Teknolojisi Bölümü, Kütahya, Türkiye.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0583-7198>

1. Giriş

Bağımlılık, yalnızca irade zayıflığı veya davranışsal bir tercih olarak açıklanamayacak kadar karmaşık, çok boyutlu ve biyolojik temeli güçlü bir süreçtir (Leshner, 1997). Güncel nörobilim literatüründe bağımlılık; tekrarlayan madde kullanımı sonucunda ödül, motivasyon, stres, bellek ve öğrenimle ilişkili beyin devrelerinde ortaya çıkan kalıcı işlevsel, hücre ve moleküler değişikliklerle karakterize edilen, kronik ve nüks edebilen bir bozukluk olarak değerlendirilmektedir (Volkow ve Blanco, 2023). Bu yaklaşım, bağımlılığı yalnızca davranışsal sonuçları üzerinden değil; hücre ve sinyal yolları, nörotransmitter dengesi, reseptör adaptasyonları, gen ekspresyonu, epigenetik düzenleme, sinaptik plastisite, oksidatif stres ve nöroinflamasyon gibi mekanizmalar üzerinden de incelemeyi gerekli kılmaktadır (Chéron ve d’Exaerde, 2021; Darceq ve Kieffer, 2024; Gipson ve diğerleri, 2021; Hediye ve diğerleri, 2025; Nestler, 2025; Zhang ve diğerleri, 2026).

Bununla birlikte, bağımlılığın “beyin hastalığı” olarak tanımlanması literatürde tartışmasız kabul edilen bir yaklaşım değildir. Bu modele yönelik eleştiriler, bağımlılığın deterministik biçimde yorumlanması, remisyon ve iyileşme süreçlerindeki heterojenliğin yeterince açıklanamaması, kompulsivite kavramına aşırı vurgu yapılması ve bağımlılığa özgü tekil bir nöral imzanın henüz tanımlanamamış olması üzerinde yoğunlaşmaktadır. Heilig ve arkadaşları (2021), bu eleştirilerin bazı yönlerinin geçerli olduğunu kabul etmekle birlikte, bağımlılığın nörobiyolojik temelini güçlü olduğunu ve çağdaş bir beyin hastalığı modelinin sosyal, çevresel ve psikolojik etkenleri dışlamadan ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Madde kullanım bozuklukları; kontrol kaybı, kompulsif madde arayışı, zararlı sonuçlara rağmen kullanımı sürdürme, tolerans, yoksunluk, yoğun madde isteği/aşerme (craving) ve sosyal ya da mesleki işlevsellikte bozulma gibi klinik özelliklerle ilişkilidir (Volkow ve Blanco, 2023). Bu klinik belirtilerin arkasında özellikle mezokortikolimbik dopamin sistemi, glutamaterjik plastisite, GABAerjik inhibitör kontrol, endojen opioid sistem, stres yanıt sistemleri ve prefrontal kortikal düzenleme gibi biyolojik ağların etkileşimi yer almaktadır (Koob ve Volkow, 2016; Lüscher ve Janak, 2021; Nestler, 2025). Bağımlılığın moleküler mekanizmalarını anlamak, yalnızca patofizyolojinin açıklanması açısından değil; yeni farmakolojik hedeflerin, biyobelirteçlerin ve kişiselleştirilmiş tedavi stratejilerinin geliştirilmesi açısından da önemlidir (Chéron ve d’Exaerde, 2021; Guerrin ve diğerleri, 2025; Zhang ve diğerleri, 2026).

Bu bölümde bağımlılığın moleküler ve biyokimyasal temelleri; dopaminerjik ödül sistemi, nörotransmitter değişimleri, sinaptik plastisite, tolerans ve yoksunlukla ilişkili nöroadaptasyonlar, hücre içi sinyal yolları, transkripsiyon faktörleri, epigenetik mekanizmalar, oksidatif stres,

nöroinflamasyon, genetik yatkınlık ve güncel terapötik hedefler çerçevesinde ele alınmaktadır.

2. Bağımlılığın Nörobiyolojik Temeli ve Ödül Devreleri

Bağımlılığın merkezinde, beynin ödül ve motivasyon sistemlerinde meydana gelen adaptif fakat zamanla maladaptif hale gelen değişiklikler bulunmaktadır. Mezokortikolimbik dopamin sistemi bu bağlamda temel bir rol oynar (Koob ve Volkow, 2016; Volkow, Fowler, Wang, Baler ve Telang, 2008). Bu sistemin ana bileşenleri arasında ventral tegmental alan (VTA), nucleus accumbens (NAc), prefrontal korteks, amigdala ve hipokampus yer almaktadır. VTA'daki dopaminerjik nöronlardan NAc'ye dopamin salınımı, ödül öğrenmesi, motivasyonel değer atama ve pekiştirme süreçleri açısından kritik öneme sahiptir (Covey, Roitman ve Garriss, 2014; Volkow ve diğerleri, 2008).

Doğal ödüller, örneğin beslenme, sosyal etkileşim veya üreme davranışı, dopamin sistemini fizyolojik düzeyde aktive eder. Buna karşılık kötüye kullanılan birçok madde, doğrudan veya dolaylı yollarla dopamin salınımını daha güçlü, hızlı veya fizyolojik sınırların üzerinde uyabilir. Psikostimülanlar, özellikle kokain ve amfetamin türevleri, dopamin taşıyıcıları ve monoamin geri alım sistemleri üzerinden sinaptik dopamin düzeylerini artırırken; opioidler, GABAerjik inhibitör ara nöronları baskılayarak VTA dopamin nöronlarının aktivitesini artırabilir (Koob ve Volkow, 2016; Nestler, 2025). Alkol, nikotin, kannabinoidler ve diğer maddeler ise farklı reseptör sistemleri üzerinden mezolimbik ödül devrelerini etkileyebilir.

Bununla birlikte, bağımlılık yalnızca dopamin artışı ile açıklanamaz. Akut madde etkisi sırasında ortaya çıkan ödül yanıtı, zamanla öğrenme, alışkanlık oluşumu, stres duyarlılığı, yürütücü kontrol kaybı ve çevresel ipuçlarına karşı aşırı duyarlılıkla birleşir (Lüscher, 2016; Lüscher ve Janak, 2021). Bu süreçte dopaminerjik sinyalizasyonun yanında glutamat, GABA, opioid peptidler, serotonin, noradrenalin, endokannabinoidler ve stres nöropeptidleri de bağımlılığın gelişiminde rol oynar (Edwards ve Koob, 2010; Koob ve Volkow, 2016). Son yıllarda bağırsak-beyin ekseninin de mikrobiyota kaynaklı metabolitler ve immün-metabolik sinyaller aracılığıyla bağımlılık biyolojisini etkileyebilecek tamamlayıcı bir düzenleyici sistem olabileceği öne sürülmektedir (Koperska ve Kiraly, 2025; Ru ve diğerleri, 2025).

3. Dopamin, Pekiştirme ve Motivasyonel Duyarlılaşma

Dopamin, bağımlılık literatüründe uzun süre “haz molekülü” olarak nitelendirilmiş olsa da güncel yaklaşımlar dopaminin yalnızca hazdan değil; ödül beklentisi, motivasyonel önem, öğrenme ve davranışın pekiştirilmesi süreçlerinden de sorumlu olduğunu ortaya koymaktadır (Robinson ve Berridge, 2008; Volkow ve diğerleri, 2008). Robinson ve Berridge'in

“incentive salience” teorisine göre tekrarlayan madde maruziyeti, maddeyle ilişkili çevresel ipuçlarının aşırı motivasyonel değer kazanmasına yol açabilir (Robinson ve Berridge, 2008).

Madde kullanımı sırasında dopaminerjik sistemin tekrarlayan biçimde uyarılması, maddenin ve maddeyle ilişkili ipuçlarının pekiştirici gücünü artırırken doğal ödüllere verilen yanıtın azalmasına neden olabilir (Covey ve diğerleri, 2014; Edwards ve Koob, 2010; Volkow ve diğerleri, 2008). Bu süreç, “incentive sensitization” olarak adlandırılan motivasyonel duyarlılaşma modeli ile açıklanır (Bickel ve diğerleri, 2017; Robinson ve Berridge, 2008). Bu modele göre tekrarlayan madde maruziyeti, maddenin oluşturduğu hazdan bağımsız olarak maddeyle ilişkili ipuçlarına karşı aşırı “isteme” yanıtı oluşturabilir (Feltenstein ve See, 2008; Koob, 2015).

Böylece birey artık yalnızca haz almak için değil, yoğun madde isteği ve otomatikleşmiş motivasyonel yönelimler nedeniyle madde arayışına girebilir (Field ve diğerleri, 2016; Koob ve Volkow, 2016). Bu biyolojik durum, nüks riskinin neden uzun süre devam edebildiğini açıklayan temel mekanizmalardan biridir (Edwards ve Koob, 2010; Lüscher ve Janak, 2021). Dopaminerjik sistemdeki bu işlevsel değişimler, bağımlılığı yalnızca bir “haz arayışı” bozukluğu olmaktan çıkarıp ödül sisteminin, motivasyonel süreçlerin ve karar verme mekanizmalarının nöronal ağlar düzeyinde yeniden yapılandığı kronik bir patoloji haline getirmektedir (Lüscher, 2016; Nestler, 2025).

4. Glutamat, GABA ve Sinaptik Plastisite

Bağımlılığın kalıcı hale gelmesinde glutamaterjik sinaptik plastisite merkezi bir mekanizmadır. Glutamat, merkezi sinir sisteminin temel eksitator nörotransmitteri olarak öğrenme ve bellek süreçlerinde kritik rol oynarken, kronik madde kullanımı bu süreçleri manipüle ederek ödül devrelerinde maladaptif bir yeniden yapılanmaya yol açar (Huijstee ve Mansvelders, 2015). Madde maruziyeti; prefrontal korteks, NAc, amigdala ve hipokampus arasındaki glutamaterjik projeksiyonların gücünü ve duyarlılığını değiştirebilir. Bu durum özellikle maddeyle ilişkili ipuçlarına karşı gelişen aşırı duyarlılık, yoğun madde isteği ve nüks davranışı ile ilişkilidir (Koob ve Volkow, 2016; Lüscher, 2016).

NMDA ve AMPA tipi glutamat reseptörleri, bu süreçteki moleküler anahtarlardır. Tekrarlayan madde kullanımı sonrasında AMPA/NMDA reseptör oranı, AMPA reseptör alt birim kompozisyonu ve dendritik diken yoğunluğundaki değişimler, ödül devrelerinde sinaptik iletimin patolojik biçimde yeniden şekillenmesine neden olabilir (Russo ve diğerleri, 2010). Bu yapısal değişiklikler, maddeyle ilişkili öğrenilmiş davranışları güçlendirerek davranışsal esnekliği azaltır ve bağımlılığın kompulsif doğasına katkıda bulunur (Kasanez ve diğerleri, 2010).

GABAerjik sistem ise eksitator-inhibitör dengesinin korunması açısından hayati bir işlev görür. GABAerjik ara nöronlar, dopaminerjik nöronların aktivitesini kontrol ederek ödül sistemini modüle eder (Chéron ve d'Exaerde, 2021). Bağımlılık sürecinde yalnızca glutamaterjik iletimin güçlenmesi değil, aynı zamanda GABAerjik inhibitör kontrolün zayıflaması da temel bir adaptasyon olarak ortaya çıkar (Chéron ve d'Exaerde, 2021; Liu, Pu ve Poo, 2005). Örneğin, birçok bağımlılık yapıcı madde GABAerjik inhibisyonu baskılayarak dopaminerjik nöronları disinhibe edebilir (Bocklisch ve diğerleri, 2013). Bu dengenin bozulması hem akut ödül yanıtlarını güçlendirir hem de kronik nöroadaptasyon süreçlerini pekiştirerek bağımlılığın nüks eğilimli karakterini oluşturur (Chéron ve d'Exaerde, 2021; Lüscher, 2016).

Glutamat homeostazi ile nöroimmün sinyalizasyon arasındaki etkileşimler de giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Mikroglial ve astrositik aktivasyon, glutamat taşıyıcıları ve sinaptik glutamat düzeyleri üzerinde etkili olarak madde arama davranışı ve nüksle ilişkili plastisite süreçlerini modüle edebilir (Gipson ve diğerleri, 2021). Bağırsak-beyin ekseninde yapılan güncel çalışmalar ise mikrobiyota kaynaklı metabolitlerin nöroinflamasyon, metabolik sinyalizasyon ve ödül devreleri üzerinden bağımlılık fenotiplerini etkileyebileceğini öne sürmektedir; ancak bu alanın klinik bağımlılık tedavisine aktarılabilmesi için daha fazla nedensel ve translasyonel kanıtı ihtiyaç vardır (Koperska ve Kiraly, 2025; Ru ve diğerleri, 2025).

5. Tolerans, Yoksunluk ve Nöroadaptasyon

Tolerans, aynı etkinin oluşması için zamanla daha yüksek madde dozlarına ihtiyaç duyulması veya aynı dozun daha zayıf etki oluşturmasıdır. Moleküler düzeyde tolerans; reseptör duyarsızlaşması, reseptör içselleştirilmesi, ikinci haberci sistemlerinde adaptasyon, nörotransmitter salınımindaki değişiklikler ve karşıt düzenleyici mekanizmaların aktive olması ile ilişkilidir (Tyler ve Leggio, 2024).

Yoksunluk ise maddenin kesilmesi veya azaltılması sonrasında ortaya çıkan fizyolojik ve psikolojik belirtileri ifade eder. Yoksunluk döneminde ödül devrelerinde dopaminerjik tonusun azalması, stres sistemlerinin aktivasyonu, kortikotropin salgılatıcı faktör ve dinorfin/kappa-opioid sistemlerinin devreye girmesi gibi mekanizmalar negatif duygudurum, anksiyete, irritabilite, disfori ve hiperkatifeia olarak adlandırılan artmış negatif duygulanım hali ile ilişkilidir (Koob, 2020; Koob, Powell ve White, 2020; Tyler ve Leggio, 2024). Bu nedenle bağımlılık döngüsü yalnızca pozitif pekiştirme ile değil, aynı zamanda yoksunluk belirtilerinden kaçınmaya yönelik negatif pekiştirme ile de sürdürülür (Feltenstein, See ve Fuchs, 2020; Koob, 2020; Koob ve diğerleri, 2020).

Koob ve Volkow tarafından önerilen üç aşamalı bağımlılık döngüsü bu süreci açıklamada temel bir model sunmaktadır (Koob ve Volkow, 2021;

Lüscher ve Janak, 2021). Birinci aşama “binge/intoxication”, yani yoğun kullanım ve intoksikasyon evresidir. İkinci aşama “withdrawal/negative affect”, yani yoksunluk ve olumsuz duygudurum evresidir. Üçüncü aşama ise “preoccupation/anticipation”, yani takıntılı düşünce, beklenti ve madde arayışı evresidir. Bu aşamalar sırasıyla bazal gangliyonlar, genişletilmiş amigdala ve prefrontal korteks ile ilişkili devrelerin disfonksiyonu ile bağlantılıdır (Koob ve diğerleri, 2020; Koob ve Volkow, 2021). Bu döngüsel model, bağımlılığın dürtüsel bir “haz arayışından” kompulsif bir “yoksunluktan kaçınma” haline geçişini temsil eden karmaşık bir nörobiyolojik kaskadı yansıtmaktadır (Fang ve diğerleri, 2022; Koob ve diğerleri, 2020).

Bu döngü boyunca gelişen nöronal uyum, yani nöroadaptasyon, hücre içi sinyal yolları, transkripsiyonel değişiklikler ve epigenetik düzenlenmelerle yakından ilişkilidir. Bu nedenle tolerans ve yoksunluk yalnızca klinik belirtiler olarak değil, aynı zamanda ödül, stres ve yürütücü kontrol devrelerinde biriken moleküler değişimlerin dışavurumu olarak değerlendirilmelidir.

6. Hücre İçi Sinyal Yolları: cAMP/PKA, CREB, Δ FosB ve BDNF

Bağımlılığın moleküler temelinde, reseptör düzeyindeki değişikliklerden daha kalıcı olan hücre içi sinyal yolları ve gen ekspresyonu düzenlemeleri yer almaktadır. Dopamin D1 reseptör aktivasyonu, Gs proteinleri üzerinden adenilat siklazı aktive ederek cAMP düzeylerini artırabilir. Artan cAMP, protein kinaz A aktivasyonuna yol açar ve bu yolak CREB gibi transkripsiyon faktörlerinin fosforilasyonunu etkileyebilir (Koob, 2015; Koob ve Volkow, 2016; Torregrossa, Corlett ve Taylor, 2011). CREB, NAc ve diğer ödül bölgelerinde gen ekspresyonunu düzenleyerek tolerans, negatif duygudurum ve yoksunlukla ilişkili süreçlere katkıda bulunabilir (Chao ve Nestler, 2004; Koob, 2015; Torregrossa ve diğerleri, 2011).

Δ FosB, bağımlılık biyolojisinde en çok çalışılan transkripsiyon faktörlerinden biridir (Nestler, 2008, 2012; Nestler, Barrot ve Self, 2001). Tekrarlayan madde maruziyeti ile özellikle NAc’de birikebilir ve stabil yapısı nedeniyle uzun süreli gen ekspresyon değişikliklerine aracılık edebilir (Nestler, 2008; Nestler ve diğerleri, 2001). Δ FosB’nin bu şekilde birikimi, bağımlılıkla ilişkili davranışların sürdürülmesinde ve nüks eğilimi yaratan kalıcı moleküler hafıza mekanizmalarında kritik rol oynayabilir (Arjmand ve diğerleri, 2024; Nestler, 2025; Wright ve Dong, 2020).

BDNF, sinaptik plastisite, nöronal sağkalım ve öğrenme süreçlerinde görev alan önemli bir nörotrofik faktördür (Castrén ve Antila, 2017; Russo, Mazei-Robison, Ables ve Nestler, 2008). Madde kullanımı BDNF ekspresyonunu beyin bölgesine, madde türüne ve maruziyet süresine bağlı olarak değiştirebilir (Castrén ve Antila, 2017; Cooper, Robison ve Mazei-Robison, 2017). BDNF/TrkB sinyalizasyonu MAPK/ERK, PI3K/Akt ve PLC γ yolları üzerinden sinaptik güçlenme, dendritik yapı ve nöronal adaptasyon

süreçlerini etkileyebilir (Dong ve Nestler, 2014; Krasnova ve diğerleri, 2013; Russo ve diğerleri, 2008).

Yakın tarihli preklinik bir etanol maruziyeti çalışması, VTA'da BDNF/TrkB sinyalizasyonunun GABAerjik sinaptik plastisiteyi restore edebildiğini ve etanol arama davranışını azaltabildiğini göstermiştir (Xiong ve diğerleri, 2026). Bu bulgu, BDNF/TrkB ekseninin bağımlılık araştırmalarında umut vadeden bir moleküler hedef olabileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte, BDNF gibi moleküler düzeyde umut vadeden terapötik hedeflerin klinik uygulamaya aktarılmasında önemli bir translasyonel boşluk bulunmaktadır (Vandaele ve Daepfen, 2022). Hayvan modellerinde elde edilen başarılı sonuçların insan klinik çalışmalarında aynı etkiyi göstermemesi; deneysel tasarımlardaki farklılıklar, sosyal faktörlerin veya uzun süreli kronik maruziyetin hayvan modellerinde tam olarak yansıtılamaması ve bağımlılık davranışlarının türler arasında ölçülenmesindeki zorluklardan kaynaklanabilir (Jensen, Jensen ve Madsen, 2022; Nieto, Grodin, Aguirre, Izquierdo ve Ray, 2021; Vandaele ve Daepfen, 2022).

7. Epigenetik Mekanizmalar ve Uzun Süreli Gen Ekspresyon Değişiklikleri

Bağımlılıkta önemli sorulardan biri, madde kullanımı kesildikten sonra bile yoğun madde isteği ve nüks riskinin neden uzun süre devam edebildiğidir. Bu kalıcılığı açıklayan mekanizmalardan biri, gen ekspresyonunu DNA dizisini değiştirmeden düzenleyen dinamik ve çevresel uyarılara duyarlı epigenetik düzenlenmelerdir (Stewart, Fulton ve Maze, 2020; Vagga, Jankar, Ganjare ve Makhe, 2024). Epigenetik mekanizmalar; DNA metilasyonu, histon modifikasyonları ve kodlamayan RNA'lar aracılığıyla transkripsiyonel programları uzun süreli olarak değiştirebilir (Chéron ve d'Exaerde, 2021; Hediyeal ve diğerleri, 2025; Vagga ve diğerleri, 2024).

Kronik madde maruziyeti, ödül devrelerinde, özellikle NAc bölgesinde kromatin yapısını yeniden şekillendirebilir (Anderson ve Taniguchi, 2022; Cheng ve diğerleri, 2023). Histon asetilasyonundaki artış genellikle daha açık kromatin yapısı ve artmış transkripsiyonel aktivite ile ilişkilidir (Anderson ve Taniguchi, 2022; Chéron ve d'Exaerde, 2021). DNA metilasyonu ise geleneksel olarak gen susturulması ile ilişkilendirilse de, güncel çalışmalar DNA metilasyonunun TET enzimleri ve diğer düzenleyici mekanizmalar aracılığıyla dinamik biçimde değişebilen bir süreç olduğunu göstermektedir (Liu ve diğerleri, 2025; Stewart ve diğerleri, 2020). Bu epigenetik değişiklikler, sinaptik proteinlerin, reseptörlerin ve nörotrofik faktörlerin ekspresyonunu modüle ederek uzun süreli davranışsal adaptasyonlara zemin hazırlayabilir (Hediyeal ve diğerleri, 2025; Vagga ve diğerleri, 2024).

MikroRNA'lar ve uzun kodlamayan RNA'lar gibi kodlamayan RNA'lar da bağımlılıkta transkripsiyon sonrası düzenleme açısından önemlidir (Gowen

ve diğerleri, 2020; Li ve diğerleri, 2022; Occhipinti ve diğerleri, 2023). Bu moleküller mRNA stabilitesini ve transkripsiyonunu değiştirerek sinaptik plastisite, nöroinflamasyon ve bağımlılıkla ilişkili nöronal adaptasyon süreçlerini etkileyebilir (Gowen ve diğerleri, 2020; Occhipinti ve diğerleri, 2023; Seyednejad ve Sartor, 2022). Epigenetik mekanizmaların potansiyel geri döndürülebilirliği, madde kullanım bozukluklarının tedavisinde bu mekanizmaları hedefleyen yeni farmakolojik yaklaşımların geliştirilmesi için umut verici bir alan oluşturmaktadır (Chéron ve d'Exaerde, 2021; Hediye ve diğerleri, 2025; Liu ve diğerleri, 2025).

Örneğin nikotin bağımlılığında histon asetilasyonu ve DNA metilasyonu gibi kromatin düzenleyici mekanizmaların, öğrenme ve ödül işleme ile ilişkili gen bölgelerinde madde arama davranışını etkileyebileceği bildirilmiştir (Muenstermann ve Clemens, 2023). Bununla birlikte, epigenetik hedefli yaklaşımların klinik uygulamaya aktarılması; hedef özgüllüğünün artırılması, beyin bölgesine özgü etkilerin anlaşılması ve olası yan etkilerin minimize edilmesi için daha fazla transkripsiyonel çalışmayı gerektirmektedir (Anderson ve Taniguchi, 2022; Liu ve diğerleri, 2025; Seyednejad ve Sartor, 2022).

8. Oksidatif Stres, Mitokondriyal Disfonksiyon ve Nöroinflamasyon

Bağımlılıkta klasik ödül devresi modellerine ek olarak oksidatif stres ve nöroinflamasyon giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Berríos-Cárcamo ve diğerleri, 2020; Viola ve diğerleri, 2022). Kronik madde kullanımı, reaktif oksijen türlerinin artışı, antioksidan savunma sistemlerinin zayıflaması, mitokondriyal fonksiyon bozukluğu ve glial hücre aktivasyonu ile ilişkilendirilmektedir (Kohno ve diğerleri, 2019; Viola ve diğerleri, 2022).

Metamfetamin kullanımı sonucunda dopamin metabolizması, monoamin oksidaz aktivitesi ve mitokondriyal elektron taşıma zincirindeki bozulmalar reaktif oksijen türlerinin oluşumuna katkıda bulunabilir (Kohno ve diğerleri, 2019). Artan oksidatif stres; lipid peroksidasyonu, protein oksidasyonu, DNA hasarı ve hücresel sinyal yollarının bozulması ile sonuçlanabilir (Lirio, Santos, Silva ve Rodrigues, 2022; Viola ve diğerleri, 2022). Özellikle beyin dokusu yüksek oksijen tüketimi, yüksek doymamış yağ asidi içeriği ve sınırlı antioksidan kapasitesi nedeniyle oksidatif hasara karşı oldukça duyarlıdır (Lirio ve diğerleri, 2022; Viola ve diğerleri, 2022).

Nöroinflamasyon sürecinde mikroglia ve astrositler temel rol oynamaktadır. Mikroglial aktivasyon sonucunda TNF- α , IL-1 β ve IL-6 gibi proinflamatuvar sitokinler, kemokinler, nitrik oksit ve reaktif oksijen türleri salınabilir (Kohno ve diğerleri, 2019; Morcuende, Navarrete, Nieto, Manzanares ve Femenía, 2021). Bu inflamatuvar mediyatörler sinaptik iletimi, glutamat homeostazını ve nöronal plastisiteyi doğrudan etkileyebilir (Berríos-Cárcamo ve diğerleri, 2020; Gipson ve diğerleri, 2021). Bu nedenle

nöroinflamasyon, bağımlılıkta yalnızca nörotoksositeyle değil, aynı zamanda yoğun madde isteği, stres duyarlılığı ve nüks riskinin sürdürülmesiyle de ilişkilendirilmektedir (Berrios-Cárcamo ve diğerleri, 2020; Namba, Leyrer-Jackson, Nagy, Olive ve Neisewander, 2021).

Bağırsak-beyin eksenini de bu bağlamda geliştirmekte olan bir araştırma alanıdır. Güncel çalışmalar, bağırsak kaynaklı metabolitlerin mezolimbik ödül devreleri, nöroimmün sinyalizasyon ve inflamatuvar yanıtlar üzerinden bağımlılık biyolojisini etkileyebileceğini öne sürmektedir (Koperska ve Kiraly, 2025; Ru ve diğerleri, 2025). Ancak bu bulguların büyük bölümü henüz mekanistik ve translasyonel düzeydedir; bu nedenle bağırsak-beyin ekseninin bağımlılık tedavisinde doğrudan klinik hedef olarak kullanılabilmesi için daha güçlü nedensel kanıtlara ihtiyaç vardır.

9. Genetik Yatkınlık ve Gen-Çevre Etkileşimi

Bağımlılık gelişimi, biyolojik, psikolojik ve çevresel faktörlerin karmaşık etkileşimi nedeniyle bireyler arasında belirgin bir heterojenlik sergiler (Troup, 2024). Aynı maddeye maruz kalan bireylerin yalnızca bir kısmında madde kullanım bozukluğu gelişmesi; genetik yatkınlık, çevresel stresörler, erken yaşam deneyimleri, psikiyatrik eş tanılar, sosyal faktörler ve epigenetik düzenlenmelerin etkileşimini düşündürmektedir (Miller, Bogdan, Agrawal ve Hatoum, 2024; Volkow ve Blanco, 2023). Aile, ikiz ve genom çapında ilişkilendirme çalışmaları, madde kullanım bozukluklarında genetik bileşenin önemli olduğunu ve bu yatkınlığın tek bir genle açıklanamayacak kadar karmaşık olduğunu göstermektedir (Hatoum ve diğerleri, 2023; Miller ve diğerleri, 2024).

Son yıllarda yapılan geniş ölçekli genom çalışmaları, bağımlılık riskinin çok sayıda genetik varyantın küçük etkilerinin birikmesiyle oluşan poligenik bir yapı gösterdiğini ortaya koymuştur. Hatoum ve arkadaşları (2023), bir milyondan fazla bireyi kapsayan çok değişkenli genom çapında ilişkilendirme meta-analizinde madde kullanım bozuklukları için genel ve maddeye özgü genetik risk lokuslarının ayrıştırılabileceğini bildirmiştir. Dopamin reseptörleri, dopamin taşıyıcıları, nikotinik asetilkolin reseptörleri, alkol metabolizmasında görevli enzimler, glutamat sinyalizasyonu ve sinaptik plastisiteyle ilişkili genler bağımlılık biyolojisinde araştırılan başlıca genetik alanlardır (Hatoum ve diğerleri, 2023; Jordan ve Xi, 2022; Miller ve diğerleri, 2024).

Bununla birlikte genetik yatkınlık deterministik değildir. Çevresel koşullar, kronik stres, travma, sosyal destek, erken yaşta maddeye maruziyet ve epigenetik mekanizmalar bağımlılık riskini dinamik biçimde artırabilir veya azaltabilir (Anderson ve Taniguchi, 2022; Stewart ve diğerleri, 2020). Bu nedenle bağımlılığın biyokimyasal açıklaması, genetik varyasyonları çevresel deneyimler ve epigenetik düzenlenmelerle birlikte değerlendiren bütüncül bir gen-çevre etkileşimi çerçevesine ihtiyaç duyar.

10. Güncel Terapötik Yaklaşımlar Açısından Moleküler Hedefler

Bağımlılık tedavisinde uygulanan farmakolojik stratejiler madde türüne göre farklılık gösterse de, moleküler mekanizmaların daha derinlemesine anlaşılması yeni tedavi hedeflerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Portelli, Munjal ve Leggio, 2020). Güncel klinik uygulamada opioid kullanım bozukluklarında opioid reseptör agonistleri ve antagonistleri, alkol kullanım bozukluğunda glutamaterjik, GABAerjik ve opioid sistemleri hedefleyen ajanlar, nikotin bağımlılığında ise nikotinik asetilkolin reseptörlerini düzenleyen farmakolojik ajanlar standart tedavi yaklaşımları arasında yer almaktadır (Ansari ve Osser, 2020; D'Sa, Gaddis ve Strain, 2025; Volkow ve Blanco, 2023).

Buna karşın, mevcut tedaviler her hastada beklenen yanıtı oluşturmamakta ve etkinlikleri sınırlı kalabilmektedir (Chéron ve d'Exaerde, 2021; Heilig, Augier, Pfarr ve Sommer, 2019). Bu bağlamda glutamat homeostazını modüle eden ajanlar, stres yanıt sistemlerini hedefleyen bileşikler, nöroinflamasyonu baskılamaya yönelik stratejiler, BDNF/TrkB sinyal yolları, epigenetik düzenleyiciler ve kişiselleştirilmiş farmakogenetik yaklaşımlar güncel araştırmaların odak noktasını oluşturmaktadır (Estrada-Medina, Briones-Llamoctanta ve Turpo-Chaparro, 2026; Gipson ve diğerleri, 2021; Guerrin ve diğerleri, 2025; Verdejo-García ve diğerleri, 2019).

Bu hedeflerin birçoğu halen deneysel veya erken translasyonel aşamada olduğundan, klinik kullanıma entegre edilebilmeleri için kapsamlı kanıtlara gereksinim vardır (Chéron ve d'Exaerde, 2021; Haass-Koffler ve Schank, 2020; Verdejo-García ve diğerleri, 2019). Dolayısıyla, yeni terapötik stratejilerin sunumunda klinik kesinlik vurgusundan ziyade, mevcut literatürdeki kanıt düzeyinin şeffaf biçimde aktarılması temel ilke olmalıdır. Bu yaklaşım, bağımlılığı yalnızca beyin devreleri düzeyinde değil; biyolojik, psikolojik, sosyal ve çevresel belirleyicilerin etkileşimi içinde ele alan çağdaş tedavi paradigmasıyla uyumludur (Heilig ve diğerleri, 2021; Volkow ve Blanco, 2023).

11. Sonuç

Bağımlılık, dopaminerjik ödül sisteminin akut aktivasyonu ile tetiklenen; ancak zaman içerisinde glutamaterjik plastisitedeki değişimler, GABAerjik kontrol mekanizmalarının zayıflaması, stres devrelerinin kronik aktivasyonu, transkripsiyonel ve epigenetik yeniden düzenlenmeler, oksidatif stres, nöroinflamatuvar süreçler ve genetik yatkınlık gibi çok sayıda biyolojik mekanizmanın karmaşık etkileşimiyle süreklilik kazanan dinamik bir patofizyolojik süreçtir (Berrios-Cárcamo ve diğerleri, 2020; Nestler, 2025; Volkow ve Blanco, 2023). Bu nedenle bağımlılığın moleküler mekanizmalarını anlamak, hem patofizyolojinin açıklanması hem de yeni tedavi yaklaşımlarının geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Biyokimyasal açıdan bakıldığında bağımlılık, reseptör düzeyinde başlayan sinyal değişikliklerinin hücre içi ikinci haberci sistemlere, transkripsiyon faktörlerine, epigenetik düzenleyicilere, sinaptik yapıya ve nöral devre fonksiyonuna kadar uzanan çok katmanlı bir adaptasyon süreci olarak değerlendirilebilir. Bu çok katmanlı yapı, bağımlılığın neden yalnızca kısa süreli detoksifikasyonla çözülemeyeceğini ve neden uzun dönemli, bütüncül, biyopsikososyal ve kişiselleştirilmiş yaklaşımlara ihtiyaç duyulduğunu açıklamaktadır.

Gelecek perspektifinde bağımlılık araştırmaları ve tedavisi, “herkese uyan tek model” yaklaşımından uzaklaşarak bireyin genetik, psikolojik, çevresel ve sosyal özelliklerini temel alan hassas tıp/kışiselleştirilmiş tedavi yaklaşımına doğru evrilmektedir (Guerrin ve diğerleri, 2025). Dijital sağlık araçları, yapay zeka destekli analizler, biyobelirteç temelli sınıflandırmalar ve nöroplastisiteyi hedefleyen çok modlu müdahalelerin klinik uygulamalara entegrasyonu, bağımlılık tedavisinde daha yüksek etkinlik ve sürdürülebilir iyileşme potansiyeli sunabilir. Bu süreçte nörobiyolojik mekanizmaların moleküler düzeyde aydınlatılması ve bu bilgilerin klinik pratiğe translasyonel bir köprüyle aktarılması, bağımlılığı kronik ve nüks edebilen bir hastalık olarak yönetmede temel rehberlerden biri olacaktır.

KAYNAKÇA

- Anderson, E. M., & Taniguchi, M. (2022). Epigenetic effects of addictive drugs in the nucleus accumbens. *Frontiers in Molecular Neuroscience*, 15, 828055. doi:10.3389/fnmol.2022.828055
- Ansari, A., & Osser, D. N. (2020). Treatments for substance use disorders. In *Psychopharmacology* (pp. 267-324). Oxford University Press. doi:10.1093/med/9780197537046.003.0007
- Arjmand, S., Ilaghi, M., Shafie'ei, M., Gobira, P. H., Grassi-Oliveira, R., & Wegener, G. (2024). Exploring the potential link between Δ FosB and N-acetylcysteine in craving/relapse dynamics: Can N-acetylcysteine stand out as a possible treatment candidate? *Acta Neuropsychiatrica*, 37. doi:10.1017/neu.2024.38
- Berrios-Cárcamo, P., Quezada, M., Quintanilla, M. E., Morales, P., Ezquer, M., Herrera-Marschitz, M., ... Ezquer, F. (2020). Oxidative stress and neuroinflammation as a pivot in drug abuse: A focus on the therapeutic potential of antioxidant and anti-inflammatory agents and biomolecules. *Antioxidants*, 9(9), 830. doi:10.3390/antiox9090830
- Bickel, W. K., Mellis, A. M., Snider, S. E., Athamneh, L. N., Stein, J. S., & Pope, D. (2017). 21st century neurobehavioral theories of decision making in addiction: Review and evaluation. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, 164, 4-21. doi:10.1016/j.pbb.2017.09.009
- Bocklisch, C., Pascoli, V., Wong, J. C. Y., House, D. R. C., Yvon, C., de Roo, M., ... Lüscher, C. (2013). Cocaine disinhibits dopamine neurons by potentiation of GABA transmission in the ventral tegmental area. *Science*, 341(6153), 1521-1525. doi:10.1126/science.1237059
- Castrén, E., & Antila, H. (2017). Neuronal plasticity and neurotrophic factors in drug responses. *Molecular Psychiatry*, 22(8), 1085-1095. doi:10.1038/mp.2017.61
- Chao, J. R., & Nestler, E. J. (2004). Molecular neurobiology of drug addiction. *Annual Review of Medicine*, 55, 113-132. doi:10.1146/annurev.med.55.091902.103730
- Cheng, J., He, Z., Chen, Q., Jiang, L., Peng, Y., Zhang, J., ... Niu, S. (2023). Histone modifications in cocaine, methamphetamine and opioids. *Heliyon*, 9(6), e16407. doi:10.1016/j.heliyon.2023.e16407
- Chéron, J., & d'Exaerde, A. de K. (2021). Drug addiction: From bench to bedside. *Translational Psychiatry*, 11(1), 424. doi:10.1038/s41398-021-01542-0
- Cooper, S., Robison, A. J., & Mazei-Robison, M. S. (2017). Reward circuitry in addiction. *Neurotherapeutics*, 14(3), 687-697. doi:10.1007/s13311-017-0525-z
- Covey, D. P., Roitman, M. F., & Garris, P. A. (2014). Illicit dopamine transients: Reconciling actions of abused drugs. *Trends in Neurosciences*, 37(4), 200-210. doi:10.1016/j.tins.2014.02.002
- Darcq, E., & Kieffer, B. L. (2024). Neuroscience and addiction research: Current advances and perspectives. *Journal of Neural Transmission*, 131(5), 405-408.

doi:10.1007/s00702-024-02763-5

- Dong, Y., & Nestler, E. J. (2014). The neural rejuvenation hypothesis of cocaine addiction. *Trends in Pharmacological Sciences*, 35(8), 374-383. doi:10.1016/j.tips.2014.05.005
- D'Sa, A. A. B. B., Gaddis, A., & Strain, E. C. (2025). Current treatments for substance use disorders. In *Textbook of Addiction Treatment* (pp. 685-696). Oxford University Press. doi:10.1093/med/9780197640654.003.0050
- Edwards, S., & Koob, G. F. (2010). Neurobiology of dysregulated motivational systems in drug addiction. *Future Neurology*, 5(3), 393-410. doi:10.2217/fnl.10.14
- Estrada-Medina, R., Briones-Llamoctanta, B. E., & Turpo-Chaparro, J. E. (2026). Neuroplasticity and recovery of the brain affected by substance use disorder: Multilevel mechanisms and new therapeutic strategies (2020-2025). *Frontiers in Molecular Neuroscience*, 19, 1760387. doi:10.3389/fnmol.2026.1760387
- Fang, Y., Sun, Y., Liu, Y., Liu, T., Hao, W., & Liao, Y. (2022). Neurobiological mechanisms and related clinical treatment of addiction: A review. *Psychoradiology*, 2(4), 180-189. doi:10.1093/psyrad/kkac021
- Feltenstein, M. W., & See, R. E. (2008). The neurocircuitry of addiction: An overview. *British Journal of Pharmacology*, 154(2), 261-274. doi:10.1038/bjp.2008.51
- Feltenstein, M. W., See, R. E., & Fuchs, R. A. (2020). Neural substrates and circuits of drug addiction. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 11(4), a039628. doi:10.1101/cshperspect.a039628
- Field, M., Werthmann, J., Franken, I. H. A., Hofmann, W., Hogarth, L., & Roefs, A. (2016). The role of attentional bias in obesity and addiction. *Health Psychology*, 35(8), 767-780. doi:10.1037/hea0000405
- Gipson, C. D., Rawls, S. M., Scofield, M. D., Siemsen, B. M., Bondy, E. O., & Maher, E. E. (2021). Interactions of neuroimmune signaling and glutamate plasticity in addiction. *Journal of Neuroinflammation*, 18(1), 56. doi:10.1186/s12974-021-02072-8
- Gowen, A., Odegaard, K. E., Hernandez, J. B., Chand, S., Koul, S., Pendyala, G., & Yelamanchili, S. V. (2020). Role of microRNAs in the pathophysiology of addiction. *Wiley Interdisciplinary Reviews: RNA*, 12(3), e1637. doi:10.1002/wrna.1637
- Guerrin, C. G. J., Tesselaar, D. R. M., Booij, J., Schellekens, A., & Homberg, J. R. (2025). Precision medicine in substance use disorders: Integrating behavioral, environmental, and biological insights. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 176, 106311. doi:10.1016/j.neubiorev.2025.106311
- Haass-Koffler, C. L., & Schank, J. R. (2020). Translational research in the neurobiological mechanisms of alcohol and substance use disorders. *Neurotherapeutics*, 17(1), 1-3. doi:10.1007/s13311-020-00833-6
- Hatoum, A. S., Johnson, E. C., Colbert, S. M. C., Polimanti, R., Zhou, H., Walters, R. K., ... Agrawal, A. (2023). Multivariate genome-wide association meta-a-

- analysis of over 1 million subjects identifies loci underlying multiple substance use disorders. *Nature Mental Health*, 1, 210-223. doi:10.1038/s44220-023-00034-y
- Hediyal, T. A., Shukri, O., Stone, E. M., Foroughi, A., Samikkannu, T., & Pendyala, G. (2025). Decoding encoded cravings: Epigenetic drivers of addiction. *Brain Sciences*, 15(9), 927. doi:10.3390/brainsci15090927
- Heilig, M., Augier, E., Pfarr, S., & Sommer, W. H. (2019). Developing neuroscience-based treatments for alcohol addiction: A matter of choice? *Translational Psychiatry*, 9(1), 255. doi:10.1038/s41398-019-0591-6
- Heilig, M., MacKillop, J., Martinez, D., Rehm, J., Leggio, L., & Vanderschuren, L. J. M. J. (2021). Addiction as a brain disease revised: Why it still matters, and the need for consilience. *Neuropsychopharmacology*, 46, 1715-1723. doi:10.1038/s41386-020-00950-y
- Huang, Z., Wu, D., Qu, X., Li, M., Zou, J., & Tan, S. (2020). BDNF and nicotine dependence: Associations and potential mechanisms. *Reviews in the Neurosciences*, 32(1), 79-91. doi:10.1515/revneuro-2020-0044
- Jensen, K. L., Jensen, S. B., & Madsen, K. L. (2022). A mechanistic overview of approaches for the treatment of psychostimulant dependence. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 854176. doi:10.3389/fphar.2022.854176
- Jordan, C. J., & Xi, Z. (2022). Identification of the risk genes associated with vulnerability to addiction: Major findings from transgenic animals. *Frontiers in Neuroscience*, 15, 811192. doi:10.3389/fnins.2021.811192
- Kasanetz, F., Deroche-Gamonet, V., Berson, N., Balado, E., Lafourcade, M., Manzoni, O. J., & Piazza, P. V. (2010). Transition to addiction is associated with a persistent impairment in synaptic plasticity. *Science*, 328(5986), 1709-1712. doi:10.1126/science.1187801
- Kohno, M., Link, J., Dennis, L. E., McCready, H., Huckans, M., Hoffman, W. F., & Loftis, J. M. (2019). Neuroinflammation in addiction: A review of neuroimaging studies and potential immunotherapies. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, 179, 34-42. doi:10.1016/j.pbb.2019.01.007
- Koob, G. F. (2015). The dark side of emotion: The addiction perspective. *European Journal of Pharmacology*, 753, 73-87. doi:10.1016/j.ejphar.2014.11.044
- Koob, G. F. (2020). Drug withdrawal. In *Neurobiology of Addiction* (pp. 97-116). Oxford University Press. doi:10.1093/med/9780197517277.003.0007
- Koob, G. F., & Volkow, N. D. (2016). Neurobiology of addiction: A neurocircuitry analysis. *The Lancet Psychiatry*, 3(8), 760-773. doi:10.1016/S2215-0366(16)00104-8
- Koob, G. F., & Volkow, N. D. (2021). Neurocircuitry of addiction. In J. D. Avery & J. J. Avery (Eds.), *The Stigma of Addiction: An Essential Guide* (pp. 1-18). American Psychiatric Association Publishing. doi:10.1176/appi.books.9781615373970.kb01

- Koob, G. F., Powell, P., & White, A. M. (2020). Addiction as a coping response: Hyperkatifeia, deaths of despair, and COVID-19. *American Journal of Psychiatry*, 177(11), 1031-1037. doi:10.1176/appi.ajp.2020.20091375
- Koperska, M., & Kiraly, D. D. (2025). Microbiome-derived metabolites in substance use disorders: Mechanisms and implications. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1551(1), 93-114. doi:10.1111/nyas.15416
- Krasnova, I. N., Chiflikyan, M., Justinová, Z., McCoy, M. T., Ladenheim, B., Jayanthi, S., ... Cadet, J. L. (2013). CREB phosphorylation regulates striatal transcriptional responses in the self-administration model of methamphetamine addiction in the rat. *Neurobiology of Disease*, 58, 132-143. doi:10.1016/j.nbd.2013.05.009
- Leshner, A. I. (1997). Addiction is a brain disease, and it matters. *Science*, 278(5335), 45-47. doi:10.1126/science.278.5335.45
- Li, X., Xie, B., Lu, Y., Yang, H., Wang, J., Yu, F., ... Ma, C. (2022). Transcriptomic analysis of long non-coding RNA-microRNA-mRNA interactions in the nucleus accumbens related to morphine addiction in mice. *Frontiers in Psychiatry*, 13, 915398. doi:10.3389/fpsyt.2022.915398
- Lirio, P. H. C., dos Santos, M. C., Silva, I., & Rodrigues, L. C. M. (2022). Oxidative stress in substance use disorders: Endogenous and exogenous mechanisms of repair. In *Biochemistry*. IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.108886
- Liu, Q., Pu, L., & Poo, M. (2005). Repeated cocaine exposure in vivo facilitates LTP induction in midbrain dopamine neurons. *Nature*, 437(7061), 1027-1031. doi:10.1038/nature04050
- Liu, Y., Wang, X., Zhang, P., Haghparsat, A., He, W., & Zhang, J. (2025). Research progress of DNA methylation on the regulation of substance use disorders and the mechanisms. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 19, 1566001. doi:10.3389/fncel.2025.1566001
- Lüscher, C. (2016). The emergence of a circuit model for addiction. *Annual Review of Neuroscience*, 39, 257-276. doi:10.1146/annurev-neuro-070815-013920
- Lüscher, C., & Janak, P. H. (2021). Consolidating the circuit model for addiction. *Annual Review of Neuroscience*, 44, 173-195. doi:10.1146/annurev-neuro-092920-123905
- Miller, A. P., Bogdan, R., Agrawal, A., & Hatoum, A. S. (2024). Generalized genetic liability to substance use disorders. *Journal of Clinical Investigation*, 134(11), e172881. doi:10.1172/JCI172881
- Morcuende, A., Navarrete, F., Nieto, E., Manzanares, J., & Femenía, T. (2021). Inflammatory biomarkers in addictive disorders. *Biomolecules*, 11(12), 1824. doi:10.3390/biom11121824
- Muenstermann, C., & Clemens, K. J. (2023). Epigenetic mechanisms of nicotine dependence. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 156, 105505. doi:10.1016/j.neubiorev.2023.105505

- Namba, M. D., Leyrer-Jackson, J. M., Nagy, E. K., Olive, M. F., & Neisewander, J. L. (2021). Neuroimmune mechanisms as novel treatment targets for substance use disorders and associated comorbidities. *Frontiers in Neuroscience*, 15, 650785. doi:10.3389/fnins.2021.650785
- Nestler, E. J. (2008). Transcriptional mechanisms of addiction: Role of Δ FosB. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1507), 3245-3255. doi:10.1098/rstb.2008.0067
- Nestler, E. J. (2012). Transcriptional mechanisms of drug addiction. *Clinical Psychopharmacology and Neuroscience*, 10(3), 136-143. doi:10.9758/cpn.2012.10.3.136
- Nestler, E. J. (2025). The biology of addiction. *Science Signaling*, 18(872), eadq0031. doi:10.1126/scisignal.adq0031
- Nestler, E. J., Barrot, M., & Self, D. W. (2001). Δ FosB: A sustained molecular switch for addiction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(20), 11042-11046. doi:10.1073/pnas.191352698
- Nieto, S. J., Grodin, E. N., Aguirre, C. G., Izquierdo, A., & Ray, L. A. (2021). Translational opportunities in animal and human models to study alcohol use disorder. *Translational Psychiatry*, 11(1), 496. doi:10.1038/s41398-021-01615-0
- Occhipinti, C., La Russa, R., Iacoponi, N., Lazzari, J., Costantino, A., Di Fazio, N., ... Fineschi, V. (2023). miRNAs and substances abuse: Clinical and forensic pathological implications: A systematic review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(23), 17122. doi:10.3390/ijms242317122
- Portelli, J., Munjal, V., & Leggio, L. (2020). Current and emerging pharmacotherapies for addiction treatment. In *The Routledge Handbook of Philosophy and Science of Addiction* (pp. 321-342). Routledge. doi:10.4324/9780429203121-22
- Robinson, T. E., & Berridge, K. C. (2008). The incentive sensitization theory of addiction: Some current issues. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1507), 3137-3146. doi:10.1098/rstb.2008.0093
- Ru, Y., Jia, J., Xun, Y., Ba, X., Yan, J., Zhang, H., & Zhang, Y. (2025). From bugs to behavior: Targeting the gut-brain interface for addiction therapeutics. *Gut Microbes*, 17(1), 2569740. doi:10.1080/19490976.2025.2569740
- Russo, S. J., Dietz, D., Dumitriu, D., Morrison, J. H., Malenka, R. C., & Nestler, E. J. (2010). The addicted synapse: Mechanisms of synaptic and structural plasticity in nucleus accumbens. *Trends in Neurosciences*, 33(6), 267-276. doi:10.1016/j.tins.2010.02.002
- Russo, S. J., Mazei-Robison, M. S., Ables, J. L., & Nestler, E. J. (2008). Neurotrophic factors and structural plasticity in addiction. *Neuropharmacology*, 56(Suppl. 1), 73-82. doi:10.1016/j.neuropharm.2008.06.059
- Seyednejad, S. A., & Sartor, G. C. (2022). Noncoding RNA therapeutics for substance use disorder. *Advances in Drug and Alcohol Research*, 2, 10807. doi:10.3389/adar.2022.10807

- Stewart, A. F., Fulton, S. L., & Maze, I. (2020). Epigenetics of drug addiction. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 11(7), a040253. doi:10.1101/cshperspect.a040253
- Torregrossa, M. M., Corlett, P. R., & Taylor, J. R. (2011). Aberrant learning and memory in addiction. *Neurobiology of Learning and Memory*, 96(4), 609-623. doi:10.1016/j.nlm.2011.02.014
- Troup, L. J. (2024). Editorial: Individual differences in addictive behaviors. *Frontiers in Psychology*, 15, 1386489. doi:10.3389/fpsyg.2024.1386489
- Tyler, R. E., & Leggio, L. (2024). Biological basis of addiction and alcohol use disorder. *Clinical Liver Disease*, 23(1), e0177. doi:10.1097/CLD.0000000000000177
- Vagga, A., Jankar, J. S., Ganjare, R., & Makhe, P. A. (2024). Role of DNA methylation and histone modification in drug abuse: Overview and recent updates. *Multi-disciplinary Reviews*, 8(3), 2025096. doi:10.31893/multirev.2025096
- van Huijstee, A. N., & Mansvelder, H. D. (2015). Glutamatergic synaptic plasticity in the mesocorticolimbic system in addiction. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 8, 466. doi:10.3389/fncel.2014.00466
- Vandaele, Y., & Daeppen, J. B. (2022). From concepts to treatment: A dialog between a preclinical researcher and a clinician in addiction medicine. *Translational Psychiatry*, 12(1), 401. doi:10.1038/s41398-022-02177-5
- Verdejo-García, A., Lorenzetti, V., Manning, V., Piercy, H., Bruno, R., Hester, R., ... Ekhtiari, H. (2019). A roadmap for integrating neuroscience into addiction treatment: A consensus of the Neuroscience Interest Group of the International Society of Addiction Medicine. *Frontiers in Psychiatry*, 10, 877. doi:10.3389/fpsyg.2019.00877
- Viola, T. W., Orso, R., Florian, L. F., Garcia, M. G., Gomes, M. G. S., Mardini, E. M., ... Grassi-Oliveira, R. (2022). Effects of substance use disorder on oxidative and antioxidative stress markers: A systematic review and meta-analysis. *Addiction Biology*, 28(1), e13254. doi:10.1111/adb.13254
- Volkow, N. D., & Blanco, C. (2023). Substance use disorders: A comprehensive update of classification, epidemiology, neurobiology, clinical aspects, treatment and prevention. *World Psychiatry*, 22(2), 203-229. doi:10.1002/wps.21073
- Volkow, N. D., Fowler, J. S., Wang, G.-J., Baler, R., & Telang, F. (2008). Imaging dopamine's role in drug abuse and addiction. *Neuropharmacology*, 56(Suppl. 1), 3-8. doi:10.1016/j.neuropharm.2008.05.022
- Wright, W. J., & Dong, Y. (2020). Psychostimulant-induced adaptations in nucleus accumbens glutamatergic transmission. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 10(12), a039255. doi:10.1101/cshperspect.a039255
- Xiong, J., Dou, M.-Y., Wang, Y., Zeng, T., Qi, X., Wei, J.-N., ... Guan, Y. (2026). BDNF restores impaired long-term potentiation of GABAergic synapses induced by chronic ethanol exposure in the VTA and attenuates reward-seeking behavior. *Molecular Psychiatry*. doi:10.1038/s41380-026-03532-4

Zhang, W., Xu, M., Wang, C., Liang, H., Zhu, X., Pan, Y., & Guo, F. (2026). Addictive drug abuse and depression: A focus on epigenetics. *Communications Biology*, 9(1). doi:10.1038/s42003-026-09705-9



MONOAMİN OKSİDAZLAR:
NÖROBİYOKİMYASAL ROL,
OKSİDATİF STRES VE TERAPÖTİK
HEDEFLER ÜZERİNE GÜNCEL
YAKLAŞIMLAR

“ ”

Güven BUDAK¹

Hülya AKINCIOĞLU²

1 Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Patnos Meslek Yüksekokulu, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü Ağrı TÜRKİYE. gbudak@agri.edu.tr,
Orcid ID: 0009-0007-4203-3926

2 Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Temel Eczacılık Bilimleri Bölümü Ağrı TÜRKİYE. hgakincioglu@agri.edu.tr,
Orcid ID: 0000-0001-5453-0953

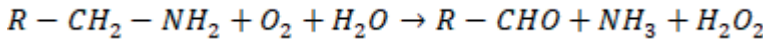
1. Monoamin Oksidazların Biyokimyasal Temeli

Monoamin oksidazlar (MAO), biyogenik aminlerin katabolizmasında merkezi rol oynayan, flavin adenin dinükleotid (FAD) bağımlı oksidoredüktaz enzimleridir. Bu enzimler, başta dopamin, serotonin ve norepinefrin olmak üzere monoamin nörotransmitterlerin oksidatif deaminasyonu yoluyla inaktivasyonundan sorumludur. MAO enzimleri, ökaryotik hücrelerde mitokondrinin dış membranına kovalent olarak bağlı şekilde lokalize olup hem merkezi sinir sistemi hem de periferik dokularda yaygın olarak eksprese edilir (Shih et al., 1999; Binda et al., 2002). Bu lokalizasyon, enzimin yalnızca nörotransmitter metabolizmasında değil, aynı zamanda hücrel redoks dengesinin düzenlenmesinde de aktif rol oynadığını göstermektedir.

MAO ailesi iki izoenzimden oluşur: MAO-A ve MAO-B. Bu izoformlar, ayrı genler tarafından kodlanmakta olup (insanlarda sırasıyla *MAOA* ve *MAOB*), amino asit dizilimleri bakımından yaklaşık %70 homoloji gösterirler, ancak substrat spesifiteleri, inhibitör duyarlılıkları ve doku dağılımları açısından belirgin farklılıklar sergilerler (Youdim & Bakhle, 2006). MAO-A, serotonin ve norepinefrin gibi monoaminlere yüksek afinite gösterirken, MAO-B daha çok feniletılamin ve benzilamin gibi substratları tercih eder; dopamin ise her iki izoenzim tarafından da metabolize edilebilir (Tipton et al., 2004). Bu farklılıklar, MAO izoenzimlerinin fizyolojik ve patofizyolojik süreçlerdeki rollerinin ayrışmasına zemin hazırlar.

Yapısal açıdan MAO enzimleri, integral membran proteinleri olup aktif bölgelerinde FAD kofaktörünü içerirler. FAD, enzime kovalent olarak bağlanmış olup katalitik aktivitenin merkezinde yer alır (Binda et al., 2002). X-ışını kristalografisi çalışmaları, MAO-B'nin aktif bölgesinin hidrofobik bir cep şeklinde organize olduğunu ve substrat erişiminin spesifik kanallar aracılığıyla sağlandığını göstermiştir. Bu yapısal özellikler, inhibitör tasarımında kritik öneme sahiptir ve MAO-B inhibitörlerinin seçiciliğini belirleyen temel faktörlerden biridir (Edmondson et al., 2009).

MAO'nun katalitik mekanizması, klasik bir oksidatif deaminasyon reaksiyonuna dayanır. Bu süreçte amin substratı, FAD kofaktörü aracılığıyla okside edilerek ilgili aldehit türevine dönüştürülürken, eş zamanlı olarak amonyak (NH₃) ve hidrojen peroksit (H₂O₂) oluşur. Reaksiyon genel olarak şu şekilde özetlenebilir:



Bu reaksiyon iki temel aşamada gerçekleşir: ilk aşamada substrat amin, FAD tarafından okside edilerek iminyum ara ürününe dönüştürülür; ikinci aşamada ise bu ara ürün hidrolize uğrayarak aldehit ve amonyak oluşturur. Ardından indirgenmiş FADH₂, moleküler oksijen ile reaksiyona girerek yenisinden okside edilir ve bu sırada hidrojen peroksit açığa çıkar (Edmondson et al.,

2007). Bu mekanizma, MAO'nun yalnızca bir katabolik enzim olmadığını, aynı zamanda hücre içinde reaktif oksijen türlerinin (ROS) önemli bir kaynağı olduğunu ortaya koymaktadır.

MAO kaynaklı H_2O_2 üretimi, özellikle nöronal hücrelerde oksidatif stresin önemli bir bileşenidir. Hidrojen peroksit, Fenton reaksiyonları aracılığıyla hidroksil radikali gibi daha reaktif türlere dönüşebilir ve bu durum lipid peroksidasyonu, protein oksidasyonu ve DNA hasarı ile sonuçlanabilir (Youdim et al., 2006). Bu bağlamda MAO aktivitesi, mitokondriyal fonksiyon ve hücrel redoks homeostaz arasında doğrudan bir köprü oluşturur. Özellikle MAO-B'nin yaşla birlikte artan ekspresyonu, nörodejeneratif süreçlerde oksidatif hasarın artmasına katkıda bulunan önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir (Saura et al., 1994).

Enzimin mitokondri dış membranına lokalize olması, substrat erişimi ve ürünlerin hücre içi dağılımı açısından da fonksiyonel önem taşır. MAO aktivitesi sonucunda oluşan aldehytler, aldehyt dehidrogenazlar tarafından metabolize edilirken, hidrojen peroksit antioksidan savunma sistemleri (katalaz, glutatyon peroksidaz) tarafından detoksifiye edilir. Ancak bu sistemlerin yetersiz kaldığı durumlarda, MAO kaynaklı ROS üretimi hücrel hasarı tetikleyebilir (Naoi et al., 2012).

Sonuç olarak, monoamin oksidazlar yalnızca nörotransmitter yıkımından sorumlu enzimler olarak değil, aynı zamanda hücrel redoks dengesi, mitokondriyal fonksiyon ve oksidatif stres yanıtının kritik düzenleyicileri olarak değerlendirilmelidir. Bu çok yönlü biyokimyasal rol, MAO enzimlerini hem temel biyokimya hem de translasyonel tıp açısından önemli bir araştırma odağı haline getirmiştir.

2. MAO ve Oksidatif Stres: Nörodejenerasyonun Merkezinde Bir Enzim

Monoamin oksidazların (MAO) biyokimyasal aktivitesi yalnızca monoamin nörotransmitterlerin katabolizması ile sınırlı değildir; bu enzimler aynı zamanda hücrel redoks dengesinin önemli belirleyicilerinden biri olarak işlev görür. MAO katalizi sırasında oluşan hidrojen peroksit (H_2O_2), fizyolojik koşullarda antioksidan sistemler tarafından detoksifiye edilebilse de özellikle yüksek enzim aktivitesi veya antioksidan kapasitenin yetersiz olduğu durumlarda reaktif oksijen türlerinin (ROS) birikimine yol açarak oksidatif stresin temel kaynaklarından biri haline gelir (Youdim et al., 2006; Edmondson et al., 2007).

MAO kaynaklı ROS üretimi, mitokondriyal fonksiyon ile doğrudan bağlantılıdır. Enzimin mitokondri dış membranında lokalize olması, üretilen H_2O_2 'nin mitokondriye yakın mikroçevrede birikmesine neden olur. Bu durum, özellikle elektron transport zinciri (ETZ) bileşenlerinin oksidatif mo-

difikasyonuna ve mitokondriyal membran potansiyelinin bozulmasına yol açabilir (Naoi et al., 2012). Mitokondriyal disfonksiyonun ilerlemesiyle birlikte ATP üretimi azalır, sitokrom c salınımı artar ve apoptotik sinyal yolları aktive edilir. Bu süreç, MAO aktivitesinin doğrudan hücrel ölüm mekanizmaları ile ilişkili olduğunu göstermektedir.

Hidrojen peroksit, nispeten stabil bir ROS türü olmasına rağmen, geçiş metalleri (özellikle Fe^{2+}) varlığında Fenton reaksiyonları aracılığıyla oldukça reaktif hidroksil radikallerine ($\bullet OH$) dönüşebilir. Bu radikaller, lipid peroksidasyonu başta olmak üzere protein karbonilasyonu ve DNA hasarı gibi geri dönüşümsüz moleküler hasarlara yol açar (Halliwell & Gutteridge, 2015). Özellikle nöronal hücrelerde yüksek lipid içeriği ve sınırlı antioksidan kapasite, bu hücreleri MAO kaynaklı oksidatif strese karşı daha duyarlı hale getirir.

MAO'nun oksidatif stres ile ilişkisi, nörodejeneratif hastalıkların patogenezinde kritik bir yer tutmaktadır. Parkinson hastalığında (PD), özellikle substantia nigra pars compacta bölgesinde MAO-B ekspresyonunun artmış olduğu gösterilmiştir. Bu artış, dopamin metabolizması sırasında oluşan H_2O_2 üretimini artırarak dopaminerjik nöronlarda oksidatif hasarı tetikler (Jenner, 2003). Ayrıca dopaminin MAO aracılı yıkımı sonucu oluşan aldehit ara ürünleri (örneğin 3,4-dihidroksifenilasetaldehit; DOPAL), doğrudan nörotoksik etki gösterebilir ve protein agregasyonu süreçlerine katkıda bulunabilir (Goldstein et al., 2013).

Alzheimer hastalığında (AD) ise MAO aktivitesi, özellikle astrositlerde artmış MAO-B ekspresyonu ile ilişkilendirilmiştir. Bu durum, amiloid- β ($A\beta$) birikimi ile oksidatif stresin artmasına katkı sağlar ve nöronal hasarın ilerlemesini hızlandırır (Saura et al., 1994). Son yıllarda yapılan çalışmalar, MAO-B'nin $A\beta$ üretimi ve tau patolojisi ile dolaylı olarak ilişkili olabileceğini ve bu enzimin yalnızca bir metabolik aktör değil, aynı zamanda nöroinflammatuar süreçlerin modülatörü olduğunu ortaya koymuştur (Park et al., 2019).

MAO ve oksidatif stres ilişkisi, yalnızca kronik nörodejeneratif hastalıklarla sınırlı değildir; akut nörolojik olaylarda da önemli rol oynar. Özellikle iskemik inme ve reperfüzyon hasarı sırasında, MAO aktivitesine bağlı ROS üretimi belirgin şekilde artar. Reperfüzyon fazında artan oksijen varlığı, MAO'nun katalitik döngüsünü hızlandırarak H_2O_2 üretimini artırır ve bu durum kan-beyin bariyeri (BBB) bütünlüğünün bozulmasına katkıda bulunur (Carinci et al., 2010). Bu bağlamda MAO, nörovasküler ünitenin oksidatif stres aracılı disfonksiyonunda kritik bir bileşen olarak değerlendirilmektedir.

Son yıllarda MAO'nun ferroptozis ile olan ilişkisi de dikkat çekmektedir. Ferroptozis, demir bağımlı lipid peroksidasyonu ile karakterize bir hücre ölümü şeklidir ve MAO kaynaklı H_2O_2 üretimi bu süreci tetikleyen önemli faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır. MAO aktivitesinin artması, lipid peroksidasyonunu artırarak glutatyon peroksidaz 4 (GPX4) sisteminin bas-

kılanmasına ve ferroptotik hücre ölümüne zemin hazırlayabilir (Stockwell et al., 2017). Bu durum, MAO'nun klasik apoptotik yolların ötesinde alternatif hücre ölüm mekanizmalarında da rol oynadığını göstermektedir.

MAO'nun oksidatif stres üretimindeki rolü, bu enzimi terapötik hedef olarak daha da önemli hale getirmiştir. MAO inhibitörlerinin nöroprotektif etkilerinin yalnızca nörotransmitter düzeylerini artırmalarına değil, aynı zamanda ROS üretimini azaltmalarına da bağlı olduğu düşünülmektedir (Youdim et al., 2006). Özellikle MAO-B inhibitörleri (örneğin selegilin ve rasajilin) hem antioksidan etkileri hem de mitokondriyal stabiliteyi koruyucu özellikleri nedeniyle nörodejeneratif hastalıklarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sonuç olarak, monoamin oksidazlar yalnızca nörotransmitter metabolizmasının son basamağında görev alan enzimler değil, aynı zamanda hücresel oksidatif stresin önemli düzenleyicileri ve nörodejeneratif süreçlerin merkezinde yer alan biyokimyasal aktörlerdir. Güncel literatür, MAO'nun rolünün klasik katabolik fonksiyonunun ötesine geçerek, mitokondriyal disfonksiyon, ferroptozis ve nöroinflamasyon gibi kompleks süreçleri kapsayacak şekilde genişlediğini göstermektedir. Bu nedenle MAO enzimleri hem hastalık patogenezinin anlaşılmasında hem de yeni nesil terapötik stratejilerin geliştirilmesinde kritik bir hedef olmaya devam etmektedir.

3. Terapötik Hedef Olarak MAO: Klasikten Yeni Nesil Yaklaşımlara

Monoamin oksidazlar (MAO), nörotransmitter metabolizmasındaki merkezi rolleri ve oksidatif stres üretimindeki katkıları nedeniyle uzun süredir terapötik hedef olarak değerlendirilmektedir. MAO inhibitörleri (MAOIs), ilk olarak 1950'lerde antidepresan olarak klinik kullanıma girmiş ve daha sonra nörodejeneratif hastalıkların tedavisinde önemli bir farmakolojik sınıf haline gelmiştir. Ancak bu ajanların terapötik potansiyeli, klasik monoamin hipotezinin ötesine geçerek günümüzde çok daha geniş bir biyokimyasal ve translasyonel çerçevede yeniden değerlendirilmektedir.

Klasik MAO inhibitörleri, enzimin aktif bölgesine bağlanarak monoaminlerin yıkımını engeller ve böylece sinaptik serotonin, dopamin ve norepinefrin düzeylerini artırır. Bu etki özellikle depresyon ve Parkinson hastalığında klinik fayda sağlar (Patel et al., 2025).

İlk nesil inhibitörler (örn. fenelzin, tranilsipromin) genellikle irreversibl ve non-selektif olup MAO-A ve MAO-B'yi birlikte inhibe eder. Bu durum terapötik etkinlik sağlamakla birlikte ciddi yan etkilere yol açar. Özellikle tiramin metabolizmasının engellenmesi sonucu ortaya çıkan "cheese effect" (hipertansif kriz), bu ilaçların klinik kullanımını sınırlayan en önemli faktörlerden biridir (Birkenhager et al., 2024).

Daha sonra geliştirilen ikinci nesil ajanlar, özellikle izoenzim seçiciliği hedeflenerek tasarlanmıştır. MAO-A inhibitörleri (moklobemid gibi) depresyon tedavisinde kullanılırken, MAO-B inhibitörleri (selegilin, rasajilin) Parkinson hastalığında dopamin yıkımını azaltarak semptom kontrolü sağlar (Alborghetti & Nicoletti, 2019).

Ancak bu ajanların önemli sınırlılıkları bulunmaktadır:

- İrreversibl inhibisyon → uzun süreli enzim inaktivasyonu
- İlaç–gıda ve ilaç–ilaç etkileşimleri
- Sınırlı nöroprotektif kanıt (klinik düzeyde tartışmalı)

Bu sınırlamalar, MAO’yu hedef alan yeni nesil stratejilerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır.

Güncel literatür, MAO inhibitörlerinin etkilerinin yalnızca monoamin düzeylerini artırmakla sınırlı olmadığını göstermektedir. Bu ajanların:

- ROS üretimini azaltma
- Mitokondriyal stabiliteyi koruma
- Nöroinflamasyonu baskılama

gibi çok boyutlu etkileri olduğu ortaya konmuştur (Ostadkarampour & Putnins, 2021).

Örneğin selegilin, yalnızca MAO-B inhibisyonu yoluyla dopamin düzeyini artırmakla kalmaz, aynı zamanda mitokondri aracılı apoptotik yolları baskılayarak hücre sağkalımını artırabilir (Matveychuk et al., 2022).

Benzer şekilde rasajilin ve safinamid gibi ajanlar:

- glutamat eksitotoksitesini azaltma
- nörotrofik faktörleri artırma
- oksidatif hasarı sınırlama

gibi etkiler göstererek klasik farmakolojik çerçevenin ötesine geçmektedir.

Bu bulgular, MAO inhibitörlerinin artık yalnızca “semptomatik tedavi ajanları” değil, aynı zamanda hastalık modifiye edici potansiyel taşıyan moleküller olarak değerlendirildiğini göstermektedir.

Son yıllarda MAO inhibitörlerinin geliştirilmesinde en dikkat çekici paradigma değişimi, tek hedefli inhibitörlerden çok hedefli (multi-target-directed ligands; MTDLs) yapılara geçiştir. Bu yaklaşım, nörodejeneratif hastalıkların multifaktöriyel doğasını dikkate alarak aynı molekülün birden fazla patolojik süreci hedeflemesini amaçlamaktadır.

Güncel çalışmalar, MAO inhibitörlerinin şu hedeflerle birlikte tasarlandığını göstermektedir:

- Kolinesteraz inhibitörleri (Alzheimer için)
- Antioksidan sistemler
- Anti-inflamatuvar yollar
- Metal şelatörleri

Bu çoklu hedef yaklaşımı, özellikle Alzheimer ve Parkinson gibi kompleks hastalıklarda daha etkili terapötik stratejiler sunmaktadır (Guglielmi et al., 2022).

Ayrıca yeni nesil inhibitörlerde dikkat çeken diğer gelişmeler şunlardır:

Reversibl ve seçici inhibitörler

Monoamin oksidaz inhibitörlerinin (MAOIs) geliştirilmesinde en önemli paradigma değişimlerinden biri, irreversibl inhibitörlerden reversibl ve izoenzim-seçici inhibitörlere geçiş olmuştur. Klasik irreversibl inhibitörler (örn. fenelzin, tranilsipromin ve selegilin), MAO enzimine kovalent bağlanarak enzimin kalıcı inaktivasyonuna neden olur. Bu durum, terapötik etkinlik açısından avantaj sağlasa da, enzimin yeniden sentezlenmesini gerektirdiği için uzun süreli farmakolojik etkiler ve ciddi yan etkilere yol açmaktadır (Youdim & Bakhle, 2006).

Bu bağlamda, reversibl inhibitörler, enzimin aktif bölgesine non-kovalent etkileşimlerle bağlanarak daha kontrollü bir inhibisyon profili sunar. Özellikle MAO-A için geliştirilen reversibl inhibitörler (RIMAs; reversible inhibitors of monoamine oxidase A), tiramin metabolizmasının tamamen baskılanmasını önleyerek hipertansif kriz riskini belirgin şekilde azaltır. Moklobemid bu sınıfın en iyi bilinen temsilcisi olup, sinaptik monoamin düzeylerini artırırken periferik MAO aktivitesini tamamen bloke etmemesi sayesinde daha güvenli bir profil sunar (Finberg & Gillman, 2011).

Reversibl inhibisyonun bir diğer önemli avantajı, substrat kompetisyonuna izin vermesidir. Yani yüksek tiramin alımı durumunda substrat, inhibitörü kompetitif olarak yerinden uzaklaştırabilir ve bu durum fizyolojik bir “güvenlik mekanizması” oluşturur. Bu özellik, irreversibl inhibitörlerde gözlenmeyen önemli bir farmakodinamik avantajdır ve klinik kullanım açısından belirleyici olmuştur (Youdim et al., 2006).

Seçicilik (selectivity) ise modern MAO inhibitör tasarımının ikinci temel bileşenidir. MAO-A ve MAO-B izoenzimlerinin aktif bölgelerindeki yapısal farklılıklar, izoform-spesifik inhibitörlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. MAO-B’nin daha geniş ve iki bölmeli aktif cebi, özellikle hidrofobik ligandların bağlanmasını kolaylaştırırken, MAO-A’nın daha dar aktif bölgesi

substrat spesifitesini sınırlar (Binda et al., 2002). Bu yapısal farklılıklar, yapı-temelli ilaç tasarımı (structure-based drug design) yaklaşımlarının temelini oluşturmuştur.

Örneğin rasajilin ve safinamid gibi MAO-B'ye selektif inhibitörler, Parkinson hastalığında dopamin yıkımını azaltırken serotonin metabolizmasını minimal düzeyde etkiler. Bu seçicilik hem yan etkilerin azaltılmasına hem de hedefe yönelik tedavi stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlar (Blair et al., 2017). Ayrıca safinamid gibi bazı ajanlar, MAO-B inhibisyonuna ek olarak voltaj bağımlı sodyum kanallarını modüle ederek glutamat salınımını azaltır; bu durum seçici inhibitörlerin aynı zamanda çoklu etki profiline sahip olabileceğini göstermektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, reversibl ve seçici inhibitörlerin yalnızca güvenlik avantajı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda ince ayarlı (fine-tuned) enzim modülasyonu imkânı sunduğunu ortaya koymuştur. Özellikle tam inhibisyon yerine parsiyel inhibisyonun tercih edilmesi, MAO'nun fizyolojik redoks sinyalizasyonundaki rolünü koruyarak istenmeyen yan etkilerin önüne geçebilir. Bu yaklaşım, MAO'nun tamamen baskılanmasının her zaman terapötik olarak avantajlı olmadığına dair artan kanıtlarla uyumludur (Edmondson et al., 2009).

Bununla birlikte, reversibl ve seçici inhibitörlerin de bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Reversibl bağlanma nedeniyle daha kısa etki süresi, dozlama sıklığını artırabilir ve hasta uyumunu etkileyebilir. Ayrıca yüksek seçicilik, bazı durumlarda terapötik etkinliği sınırlayabilir; örneğin dopamin metabolizmasının hem MAO-A hem de MAO-B tarafından gerçekleştirildiği durumlarda yalnızca tek izoenzimin inhibisyonu yeterli olmayabilir.

Güncel ilaç geliştirme stratejileri, bu sınırlılıkları aşmak amacıyla reversibl, seçici ve aynı zamanda çok hedefli özellikler taşıyan hibrit moleküller geliştirmeye yönelmiştir. Bu yeni nesil ajanlar, MAO inhibisyonunu antioksidan, anti-inflamatuar veya mitokondri koruyucu etkilerle birleştirerek daha etkili ve güvenli tedavi seçenekleri sunmayı amaçlamaktadır.

Sonuç olarak, reversibl ve seçici MAO inhibitörleri, klasik irreversible inhibitörlere kıyasla daha üstün bir güvenlik profili ve daha kontrollü farmakodinamik özellikler sunmaktadır. Bu yaklaşım, MAO'nun biyolojik rolünün daha iyi anlaşılmasıyla birlikte, gelecekte kişiselleştirilmiş ve bağlama duyarlı tedavi stratejilerinin temelini oluşturacak önemli bir gelişim alanı olarak öne çıkmaktadır.

Yapı-temelli ilaç tasarımı

Monoamin oksidaz-B (MAO-B) enziminin üç boyutlu kristal yapısının çözülmesi, MAO inhibitörlerinin geliştirilmesinde köklü bir paradigma değişimine yol açmıştır. Özellikle Proceedings of the National Academy of Sciences

ces'te yayımlanan öncü çalışmalar, insan MAO-B'nin yüksek çözünürlüklü kristal yapısını ortaya koyarak, enzimin aktif bölgesinin detaylı mimarisini tanımlamıştır (Binda et al., 2002). Bu gelişme, klasik “deneme-yanılma” temelli ilaç keşfi yaklaşımından, rasyonel ve hedefe yönelik (rational drug design) stratejilere geçişin temelini oluşturmuştur.

MAO-B'nin aktif bölgesi, fonksiyonel açıdan dikkat çekici bir mimariye sahiptir ve iki ana bölümden oluşur: substrat giriş kanalı (entrance cavity) ve katalitik cep (substrate cavity). Bu iki bölme, Ile199 gibi kritik amino asit kalıntıları tarafından kontrol edilen dinamik bir “kapı” mekanizması ile birbirine bağlanır (Edmondson et al., 2009). Bu yapısal özellik, inhibitörlerin bağlanma modunu belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Özellikle “dual cavity” yapısı, daha büyük ve hidrofobik ligandların MAO-B'ye selektif olarak bağlanmasına olanak tanırken, MAO-A'nın daha dar aktif bölgesi bu tür molekülleri sınırlamaktadır.

Yapı-temelli ilaç tasarımı yaklaşımı, bu kristal yapı verilerini kullanarak ligand-enzim etkileşimlerini atomik düzeyde analiz etmeye dayanır. Bu kapsamda:

- X-ışını kristalografisi
- moleküler docking
- moleküler dinamik simülasyonları

gibi teknikler kullanılarak inhibitör adaylarının aktif bölgeye bağlanma şekli, bağlanma enerjisi ve konformasyonel stabilitesi değerlendirilmektedir (Binda et al., 2007). Bu yöntemler sayesinde, inhibitörlerin yalnızca bağlanma afinitesi değil, aynı zamanda seçicilik ve kinetik profilleri de optimize edilebilmektedir.

MAO-B'nin aktif bölgesinde yer alan aromatik amino asit kalıntıları (özellikle Tyr398 ve Tyr435), π - π etkileşimleri yoluyla ligand bağlanmasında kritik rol oynar. Ayrıca FAD kofaktörünün izoalloksazin halkası ile inhibitörler arasında oluşan etkileşimler, katalitik mekanizmanın inhibisyonunda belirleyicidir (Edmondson et al., 2007). Bu bilgiler, inhibitör tasarımında spesifik fonksiyonel grupların eklenmesi veya modifiye edilmesi için önemli bir rehber sağlamıştır.

Yapı-temelli tasarımın en önemli çıktılarından biri, yüksek seçiciliğe sahip MAO-B inhibitörlerinin geliştirilmesidir. Örneğin rasajilin ve safinamid gibi ajanların geliştirilmesinde, aktif bölgeye özgü bağlanma modlarının optimize edilmesi kritik rol oynamıştır. Özellikle safinamid, aktif bölge ile güçlü hidrofobik ve π -etkileşimler kurarak yüksek afinite ve seçicilik göstermektedir (Wells et al., 1989). Bu tür moleküller, yalnızca inhibitör değil, aynı zamanda yapı-aktivite ilişkisi (SAR) çalışmalarının da temelini oluşturmuştur.

Son yıllarda yapı-temelli ilaç tasarımı, klasik küçük molekül inhibitörlerinin ötesine geçerek daha kompleks stratejileri de kapsamaktadır. Özellikle:

- Fragment-based drug design (FBDD)
- in silico yüksek verimli tarama (virtual screening)
- yapay zeka destekli ligand optimizasyonu

gibi yaklaşımlar, MAO inhibitörlerinin geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, binlerce potansiyel molekülün hızlı şekilde taranmasını ve en uygun adayların belirlenmesini mümkün kılmaktadır (Li-onta et al., 2014).

Bununla birlikte, yapı-temelli ilaç tasarımının bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Kristal yapılar genellikle enzimin statik bir anını temsil ederken, MAO gibi dinamik proteinlerde konformasyonel değişiklikler inhibitör bağlanmasını önemli ölçüde etkileyebilir. Özellikle Ile199 “kapı” mekanizmasının açık veya kapalı konformasyonu, ligand bağlanmasını doğrudan belirleyebilir. Bu nedenle günümüzde moleküler dinamik simülasyonları, statik kristal yapı verilerini tamamlayan kritik araçlar haline gelmiştir.

Ayrıca, in vitro ortamda yüksek afinite gösteren inhibitörlerin in vivo koşullarda aynı etkinliği göstermemesi, farmakokinetik ve biyoyararlanım gibi faktörlerin de dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, yapı-temelli ilaç tasarımının tek başına yeterli olmadığını ve çok disiplinli bir yaklaşım gerektirdiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, MAO-B kristal yapısının çözülmesi, monoamin oksidaz inhibitörlerinin geliştirilmesinde devrim niteliğinde bir ilerleme sağlamış ve hedefe yönelik ilaç tasarımını mümkün kılmıştır. Günümüzde yapı-temelli yaklaşımlar, yalnızca daha güçlü ve seçici inhibitörlerin geliştirilmesine değil, aynı zamanda MAO’nun biyolojik fonksiyonlarının daha derinlemesine anlaşılmasına da katkı sağlamaktadır. Gelecekte bu yaklaşımın, yapay zeka ve sistem biyolojisi ile entegre edilerek daha etkili ve kişiselleştirilmiş tedavi stratejilerine zemin hazırlaması beklenmektedir.

Yeni kimyasal iskeletler

Monoamin oksidaz-B (MAO-B) inhibitörlerinin geliştirilmesinde son yıllarda öne çıkan en önemli stratejilerden biri, klasik propargilamin temelli yapıların ötesine geçerek yeni kimyasal iskeletlerin (scaffold) keşfi ve optimizasyonudur. Bu yaklaşım hem inhibitörlerin seçiciliğini ve etkinliğini artırmayı hem de mevcut ajanların sınırlılıklarını aşmayı hedeflemektedir. Özellikle son on yılda yapılan çalışmalar, farklı heterosiklik ve aromatik çekirdekler içeren çok sayıda yeni molekülün nanomolar düzeyde güçlü ve seçici MAO-B inhibitörleri olarak tanımlandığını göstermektedir (Yi et al., 2023).

Bu yeni nesil scaffold'lar arasında özellikle kumarin, kalkon ve benzo-furan türevleri dikkat çekmektedir. Bu yapıların ortak özelliği, MAO-B'nin hidrofobik aktif bölgesine yüksek afinite ile bağlanabilen aromatik ve planar sistemler içermeleridir. Ayrıca bu moleküller, π - π etkileşimleri ve hidrofobik bağlanma üzerinden Tyr398 ve Tyr435 gibi kritik amino asit kalıntıları ile güçlü etkileşimler kurarak yüksek inhibitör etkinliği sergilemektedir (Binda et al., 2007).

Kumarin tabanlı inhibitörler, MAO-B'ye karşı yüksek seçicilik gösteren en önemli scaffold sınıflarından biridir. Kumarin çekirdeği, aktif bölgenin aromatik karakteri ile uyumlu bir yapı sunarak güçlü π - π etkileşimleri oluşturur. Yapı-aktivite ilişkisi (SAR) çalışmaları, özellikle 7. ve 3. pozisyonlarda yapılan substitüsyonların inhibitör etkinliği ve seçiciliği üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Elektron verici grupların eklenmesi, genellikle MAO-B seçiciliğini artırırken, hacimli substitüentler aktif bölgenin geniş yapısı ile uyumlu şekilde bağlanmayı güçlendirmektedir (Catto et al., 2006).

Kalkonlar, α,β -doymamış karbonil yapıları sayesinde hem MAO inhibisyonu hem de antioksidan özellikler sergileyen dikkat çekici moleküllerdir. Bu çift fonksiyonlu yapı, özellikle nörodejeneratif hastalıklarda avantaj sağlamaktadır. Kalkon türevlerinde aromatik halkalar arasındaki konjugasyon, MAO-B aktif bölgesine uygun bir geometri sağlayarak bağlanma afinitesini artırır. Ayrıca substitüsyon paternine bağlı olarak MAO-A/MAO-B seçiciliği ayarlanabilmektedir. Bu özellik, kalkonları multi-target-directed ligand (MTDL) tasarımları için ideal adaylar haline getirmektedir (Wang et al., 2021).

Benzofuran yapıları, özellikle nöroaktif bileşiklerin geliştirilmesinde geniş kullanım alanı bulmuş ve MAO-B inhibitörleri açısından da güçlü adaylar olarak öne çıkmıştır. Bu scaffold hem hidrofobik etkileşimleri hem de heteroatom içeriği sayesinde aktif bölge ile çok yönlü bağlanma imkânı sunar. Benzofuran türevlerinin modifikasyonu ile elde edilen bazı bileşiklerin, düşük nanomolar düzeyde MAO-B inhibisyonu gösterdiği ve yüksek seçicilik sergilediği bildirilmiştir (Coaviche-Yoval et al., 2024).

Yeni kimyasal iskeletlerin geliştirilmesinde SAR çalışmaları kritik rol oynamaktadır. Bu çalışmalar, aşağıdaki parametrelerin inhibitör etkinliği üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur:

- Aromatik halka sayısı ve konjugasyon düzeyi
- Elektron verici/çekici substitüentlerin konumu
- Molekülün lipofilisitesi (BBB geçişi açısından kritik)
- Sterik uyumluluk (aktif bölge hacmi ile ilişkili)

Özellikle MAO-B'nin geniş aktif bölgesi, daha büyük ve hidrofobik moleküllerin bağlanmasına olanak tanıdığı için, scaffold modifikasyonları ile seçicilik artırılabilir. Buna karşılık MAO-A'nın daha dar yapısı, bu tür moleküllerin bağlanmasını sınırlar ve bu durum izoenzim seçiciliğinin temelini oluşturur (Edmondson et al., 2009).

Her ne kadar yeni kimyasal scaffold'lar umut verici sonuçlar ortaya koymuş olsa da, bu moleküllerin büyük çoğunluğu henüz prelinik aşamadadır. İn vitro ortamda elde edilen yüksek inhibitör etkinliği, her zaman in vivo biyoyararlanım, kan-beyin bariyeri geçişi ve metabolik stabilite ile uyumlu olmayabilir. Bu durum, ilaç geliştirme sürecinde önemli bir translasyonel boşluk oluşturmaktadır.

Ayrıca yalnızca güçlü inhibisyonun yeterli olmadığı, MAO'nun redoks biyolojisindeki çift yönlü rolü nedeniyle parsiyel ve kontrollü inhibisyonun daha avantajlı olabileceği yönünde görüşler giderek güç kazanmaktadır. Bu nedenle güncel eğilim, yalnızca potent inhibitörler geliştirmekten ziyade:

- seçici
- reversibl
- çok hedefli
- farmakokinetik açıdan optimize edilmiş

moleküller tasarlamaya yönelmiştir.

Yeni kimyasal iskeletlerin geliştirilmesi, MAO-B inhibitör araştırmalarında önemli bir ilerleme sağlamış ve klasik inhibitörlerin sınırlılıklarını aşmaya yönelik güçlü bir alternatif sunmuştur. Kumarin, kalkon ve benzofuran türevleri gibi scaffold'lar, yüksek afinite ve seçicilik özellikleri ile dikkat çekmekte olup, aynı zamanda çoklu biyolojik etkilere sahip hibrit moleküllerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Ancak bu alandaki en önemli zorluk, güçlü in vitro sonuçların klinik başarıya dönüştürülmesidir. Bu nedenle gelecekteki çalışmaların, kimyasal optimizasyon ile biyoyararlanım ve hedef doku spesifitesi gibi parametreleri de bütüncül şekilde ele alması gerekmektedir.

Propargilamin türevleri (yeni jenerasyon)

2020 sonrası çalışmalar, klasik propargilamin yapısının modifiye edilmesiyle daha selektif ve etkili inhibitörlerin geliştirildiğini göstermektedir.

Güncel araştırmalar, MAO inhibitörlerinin yalnızca nörolojik hastalıklarla sınırlı kalmayabileceğini ortaya koymaktadır. İlaç yeniden konumlandırma (drug repurposing) çalışmaları, MAO inhibitörlerinin şu alanlarda potansiyel taşıdığını göstermektedir:

- inflamatuvar hastalıklar

- kanser
- metabolik hastalıklar

Ayrıca hesaplamalı biyoloji ve yapay zekâ destekli çalışmalar, mevcut ilaçların MAO-B inhibitörü olarak yeniden kullanılabileceğini göstermektedir (Shahwan et al., 2024).

Bu yaklaşım, klasik ilaç geliştirme süreçlerine kıyasla daha hızlı ve maliyet etkin çözümler sunmaktadır.

Her ne kadar MAO inhibitörlerinin nöroprotektif etkileri deneysel modellerde güçlü şekilde gösterilmiş olsa da, klinik düzeyde bu etkinin tutarlılığı halen tartışmalıdır. Özellikle Parkinson hastalığında yapılan bazı klinik çalışmalar, MAO-B inhibitörlerinin hastalık progresyonunu yavaşlatma konusunda sınırlı kanıt sunduğunu göstermektedir.

Bu durum, MAO'nun tek başına hedeflenmesinin yeterli olmayabileceğini ve daha kompleks, çoklu hedef stratejilerin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Günümüzdeki eğilim, MAO'yu:

- izole bir enzim değil
- redoks, inflamasyon ve metabolizma ağlarının bir parçası

olarak değerlendirmek yönündedir.

Monoamin oksidazlar, klasik olarak nörotransmitter katabolizmasında görev alan enzimler olarak tanımlanmış olsa da, güncel literatür bu enzimlerin çok daha geniş bir biyolojik rol üstlendiğini göstermektedir. Terapötik açıdan bakıldığında, MAO inhibitörleri artık yalnızca semptomatik tedavi ajanları değil, aynı zamanda oksidatif stres, mitokondriyal disfonksiyon ve nöroinflamasyon gibi süreçleri hedefleyen çok yönlü moleküller olarak değerlendirilmektedir. Yeni nesil ilaç tasarım stratejileri, MAO'yu çoklu hedefli yaklaşımların merkezine yerleştirmekte ve bu enzimleri geleceğin nöroprotektif tedavilerinde kritik bir bileşen haline getirmektedir.

4. Güncel Literatür Perspektifi ve Gelecek Yönelimler

Monoamin oksidazların (MAO) biyolojik rolü, uzun yıllar boyunca nörotransmitter katabolizması ile sınırlı bir çerçevede değerlendirilmiştir. Ancak son on yılda biriken deneysel ve klinik veriler, bu enzimlerin fonksiyonel kapsamının belirgin şekilde genişlediğini ve MAO'nun hücrel redoks dengesi, mitokondriyal homeostaz ve nöroinflamasyonun kesişim noktasında yer alan çok yönlü bir düzenleyici olduğunu ortaya koymuştur. Bu bağlamda MAO, klasik bir metabolik enzimden ziyade sistem biyolojisi perspektifinde bir “metabolik düğüm noktası (metabolic hub)” olarak yeniden tanımlanmaktadır.

4.1 MAO ve Redoks Ağları: Tek Enzimden Sistem Regülatörüne

Güncel çalışmalar, MAO'nun ürettiği hidrojen peroksidin yalnızca zararlı bir yan ürün olmadığını, aynı zamanda hücrel sinyal iletiminde rol oynayan bir “redoks sinyali” olarak işlev görebileceğini göstermektedir. Özellikle düşük düzeyde H_2O_2 üretimi, protein kinazlar ve fosfatazlar üzerinden sinyal yollarını modüle edebilirken, yüksek düzeylerde bu durum oksidatif hasara yol açmaktadır (Angelova & Abramov, 2018).

Bu çift yönlü etki, MAO'nun rolünü “zararlı ROS üreticisi” tanımının ötesine taşımakta ve onu hücrel adaptasyon süreçlerinde aktif bir oyuncu haline getirmektedir. Nitekim son yıllarda yapılan çalışmalar, MAO aktivitesinin hücre tipine, metabolik duruma ve mikroçevresel koşullara bağlı olarak değişken sonuçlar doğurduğunu göstermektedir. Bu durum, MAO hedefli terapötik stratejilerin neden her hastada aynı klinik sonucu vermediğini açıklayan önemli bir faktördür.

4.2 MAO ve Mitokondriyal Dinamikler: Enerji Metabolizmasının Kesişim Noktası

MAO'nun mitokondri dış membranına lokalizasyonu, bu enzimi doğrudan mitokondriyal fonksiyonun düzenleyicisi haline getirmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, MAO aktivitesinin yalnızca ROS üretimi ile değil, aynı zamanda mitokondriyal dinamikler (füzyon/fisyon dengesi), biyogenez ve mitofaji süreçleri ile de ilişkili olduğunu göstermektedir (Dias et al., 2013).

Özellikle MAO-B aktivitesinin artışı ile:

- mitokondriyal fragmentasyon
- ATP üretiminde azalma
- mitokondriyal DNA hasarı

arasında güçlü bir ilişki olduğu gösterilmiştir. Bu durum, MAO'nun nörodejeneratif hastalıklarda yalnızca bir “yan oyuncu” değil, doğrudan enerji metabolizmasını etkileyen bir düzenleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

4.3 MAO ve Ferroptozis: Yeni Bir Hücre Ölüm Paradigması

Son yıllarda MAO'nun ferroptozis ile olan ilişkisi dikkat çekici bir araştırma alanı haline gelmiştir. Ferroptozis, demir bağımlı lipid peroksidasyonu ile karakterize bir hücre ölümü şeklidir ve özellikle nörodejeneratif hastalıklarda önemli rol oynar (Stockwell et al., 2017).

MAO kaynaklı H_2O_2 üretimi:

- lipid peroksidasyonunu artırır
- demir metabolizmasını etkiler

- glutasyon sistemini baskılar

Bu etkiler, ferroptotik hücre ölümünü tetikleyebilecek uygun bir biyokimyasal ortam oluşturur. Ancak mevcut literatürde MAO'nun ferroptozisteki rolü henüz tam olarak aydınlatılamamıştır ve bu alan önemli bir araştırma boşluğu olarak öne çıkmaktadır. Özellikle MAO inhibitörlerinin ferroptozisi doğrudan modüle edip etmediği sorusu, gelecekteki çalışmalar için kritik bir araştırma alanıdır.

4.4 Nöroinflamasyon ve Glial Hücreler: MAO'nun Genişleyen Rolü

Geleneksel olarak nöron odaklı değerlendirilen MAO aktivitesinin, aslında glial hücrelerde (özellikle astrositler ve mikroglia) daha belirgin olduğu gösterilmiştir. Alzheimer hastalığında astrositik MAO-B ekspresyonunun artışı, nöroinflamasyonun sürdürülmesinde önemli rol oynar (Park et al., 2019).

Son çalışmalar, MAO aktivitesinin:

- sitokin üretimini artırabileceğini
- mikrogial aktivasyonu modüle edebileceğini
- nörovasküler üniteyi etkileyebileceğini

ortaya koymaktadır. Bu bulgular, MAO'nun yalnızca nöronal değil, aynı zamanda immün-metabolik bir düzenleyici olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

4.5 İlaç Geliştirme Perspektifi: Neden MAO Hâlâ “Zor Bir Hedef”?

Monoamin oksidazlar (MAO), yaklaşık yetmiş yılı aşkın süredir farmakolojik olarak hedeflenen enzimler arasında yer almasına rağmen, bu enzimlere yönelik ilaç geliştirme süreci halen önemli bilimsel ve klinik zorluklar içermektedir. İlk nesil MAO inhibitörlerinin klinik başarılarına rağmen, bu ajanların sınırlı güvenlik profili ve translasyonel etkinlik sorunları, MAO'nun “tam olarak çözülmüş” bir hedef olmadığını göstermektedir. Güncel literatür, bu zorlukların yalnızca farmakolojik değil, aynı zamanda biyokimyasal ve sistemik düzeyde kompleks nedenlere dayandığını ortaya koymaktadır.

MAO'nun hedeflendiği hastalıklar —özellikle depresyon, Parkinson ve Alzheimer hastalıkları— doğası gereği multifaktöriyel patolojilerdir. Bu hastalıklarda nörotransmitter dengesizliği, oksidatif stres, mitokondriyal disfonksiyon, nöroinflamasyon ve protein agregasyonu gibi birçok süreç eş zamanlı olarak rol oynar. Bu nedenle yalnızca MAO aktivitesinin modülasyonu, çoğu zaman hastalık progresyonunu anlamlı düzeyde değiştirmek için yeterli değildir (Youdim et al., 2006).

Bu durum, MAO'nun “tek hedefli” tedavi stratejilerinde neden sınırlı başarı gösterdiğini açıklamakta ve çoklu hedef yaklaşımlarının gerekliliğini desteklemektedir.

MAO aktivitesi sonucu oluşan hidrojen peroksit (H_2O_2), klasik olarak zararlı bir yan ürün olarak değerlendirilmiş olsa da, güncel çalışmalar bu molekülün aynı zamanda hücrel sinyal iletiminde rol oynayan bir redoks mediyatörü olduğunu göstermektedir (Angelova & Abramov, 2018).

Bu bağlamda MAO'nun tamamen inhibe edilmesi:

- fizyolojik redoks sinyallerinin bozulmasına
- hücrel adaptasyon mekanizmalarının zayıflamasına

yol açabilir. Dolayısıyla, MAO inhibisyonunun terapötik etkisi doza, dokuya ve hastalık bağlamına bağımlı olup, “daha fazla inhibisyon daha iyi sonuç verir” yaklaşımı geçerliliğini yitirmiştir. Bu durum, MAO'yu hedef alan ilaçların geliştirilmesini önemli ölçüde karmaşıktırmaktadır.

MAO inhibitörlerinin hayvan modellerinde gösterdiği güçlü nöroprotektif etkiler, klinik çalışmalarda her zaman doğrulanamamıştır. Özellikle Parkinson hastalığında yapılan bazı uzun dönemli klinik çalışmalar, MAO-B inhibitörlerinin hastalık progresyonunu yavaşlatma konusundaki etkisinin sınırlı veya tartışmalı olduğunu ortaya koymuştur (Olanow et al., 2009).

Bu translasyonel boşluğun temel nedenleri arasında:

- hayvan modellerinin hastalığın tüm yönlerini yansıtmaması
- insanlarda hastalık heterojenitesi
- farmakokinetik farklılıklar

yer almaktadır. Bu durum, MAO hedefli ilaç geliştirme süreçlerinde prelinik modellerin yeniden değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

MAO-A ve MAO-B izoenzimleri arasındaki fonksiyonel örtüşme, selektif inhibitörlerin etkinliğini sınırlayabilecek önemli bir faktördür. Örneğin dopamin metabolizması her iki izoenzim tarafından gerçekleştirilebildiği için yalnızca MAO-B'nin inhibisyonu bazı durumlarda yeterli olmayabilir (Tipton et al., 2004).

Ayrıca organizma, enzim inhibisyonuna karşı çeşitli kompensatuvar mekanizmalar geliştirebilir:

- alternatif metabolik yolların aktivasyonu
- enzim ekspresyonunun artması
- reseptör düzeyinde adaptasyonlar

Bu dinamik yanıtlar, uzun dönemli tedavi etkinliğini azaltabilir ve ilaç geliştirme sürecini zorlaştırır.

MAO'nun yalnızca merkezi sinir sisteminde değil, karaciğer, bağırsak ve kardiyovasküler sistem gibi periferik dokularda da ekspresse edilmesi, sis-

temik yan etkilerin ortaya çıkmasına neden olabilir. Özellikle non-selektif MAO inhibitörlerinde görülen tiramin ilişkili hipertansif krizler, bu enzimlerin periferik fonksiyonlarının göz ardı edilemeyeceğini göstermektedir (Finberg & Gillman, 2011).

Bu nedenle ideal bir MAO inhibitörü:

- hedef dokuya spesifik
- sınırlı sistemik etkiye sahip
- kontrollü inhibisyon sağlayan

bir profil sergilemelidir. Ancak bu özelliklerin aynı molekülde bir araya getirilmesi, ilaç tasarımı açısından önemli bir zorluk oluşturmaktadır.

MAO enzimleri statik yapılar değildir; aktif bölge konformasyonu ligand bağlanmasına bağlı olarak değişebilir. Özellikle MAO-B’de tanımlanan “kapı” mekanizması (Ile199), inhibitör bağlanmasını doğrudan etkileyen dinamik bir yapısal özelliktir (Edmondson et al., 2009).

Bu durum, kristal yapı verilerine dayalı ilaç tasarımının her zaman gerçek biyolojik koşulları yansıtmayabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, yapı-temelli yaklaşımların moleküler dinamik simülasyonları ve biyofiziksel analizlerle desteklenmesi gerekmektedir.

4.6 Gelecek Yönelimler: MAO Araştırmalarında Yeni Paradigmalar

Monoamin oksidazların (MAO) biyolojik rolüne ilişkin anlayış, son yıllarda önemli bir dönüşüm geçirmiştir. Uzun süre boyunca yalnızca monoamin nörotransmitterlerin yıkımından sorumlu enzimler olarak değerlendirilen MAO-A ve MAO-B, güncel literatürde artık redoks homeostazı, mitokondriyal fonksiyon, nöroinflamasyon ve hücreler arası sinyalizasyonun kesişiminde yer alan çok boyutlu düzenleyiciler olarak ele alınmaktadır (Youdim et al., 2006; Angelova & Abramov, 2018). Özellikle MAO-B’nin reaktif astrogliyoz ile ilişkili bir biyobelirteç olarak tanımlanması, bu enzimin yalnızca terapötik bir hedef değil, aynı zamanda hastalık progresyonunun izlenmesinde kullanılabilecek bir moleküler gösterge olduğunu ortaya koymuştur (Jaisa-aad et al., 2024). Bu gelişmeler, MAO araştırmalarının gelecekte daha bütüncül ve çok katmanlı yaklaşımlar doğrultusunda ilerleyeceğini göstermektedir.

Bu bağlamda sistem biyolojisi ve ağ analizi yaklaşımları, MAO’nun fonksiyonel rolünü anlamada giderek daha merkezi hale gelmektedir. Nörodejeneratif hastalıkların multifaktöriyel doğası, tek bir enzimin izolasyon içinde incelenmesinin yetersiz olduğunu ortaya koymuştur. MAO’nun mitokondriyal enerji metabolizması, reaktif oksijen türleri üretimi, inflamatuvar yanıtlar ve nörotransmitter döngüleri ile olan etkileşimleri, onu hücresel metabolik ağların önemli bir düğüm noktası haline getirmektedir (Hopkins et al., 2008). Metabolomik çalışmalar, MAO aktivitesinin yalnızca monoamin

metabolizması ile sınırlı kalmayıp daha geniş metabolik ve sistemik süreçlerle ilişkili olduğunu göstermiştir (Cuperlovic-Culf et al., 2021). Bu nedenle gelecekte MAO'nun fonksiyonunun, farklı hücre tipleri ve hastalık evreleri bağlamında multi-omik veri entegrasyonu ile daha ayrıntılı biçimde çözümlenmesi beklenmektedir.

Kişiselleştirilmiş tıp yaklaşımları da MAO araştırmalarının önemli bir diğer yönelimini oluşturmaktadır. MAOA ve MAOB genlerinde tanımlanan polimorfizmlerin enzim aktivitesi ve tedavi yanıtı üzerindeki etkileri giderek daha fazla ilgi görmektedir. Özellikle MAOA genindeki promotör varyantların transkripsiyonel aktiviteyi değiştirebildiği ve bunun davranışsal fenotiplerle ilişkili olabileceği gösterilmiştir (McDermott et al., 2009). Bununla birlikte klinik yanıtın yalnızca genetik faktörlerle açıklanamayacağı, epigenetik düzenlemeler ve çevresel etkilerin de önemli rol oynadığı bilinmektedir. DNA metilasyonu gibi epigenetik mekanizmaların MAO ekspresyonunu modüle edebileceği ve bu durumun hastalık biyolojisini etkileyebileceği gösterilmiştir (Zhu et al., 2023). Bu nedenle gelecekte MAO temelli kişiselleştirilmiş tedavi yaklaşımlarının, genetik ve epigenetik verilerin birlikte değerlendirildiği daha kompleks modeller üzerinden geliştirilmesi gerekecektir.

Nanoteknolojik ilaç taşıma sistemleri, MAO inhibitörlerinin klinik kullanımındaki önemli sınırlılıkları aşmaya yönelik umut verici bir yaklaşım sunmaktadır. Mevcut MAO inhibitörlerinin sistemik dağılımı, hedef dışı etkilerin ortaya çıkmasına neden olmakta ve bu durum tedavi güvenliğini sınırlamaktadır. Nanotaşıyıcı sistemlerin kan-beyin bariyerini aşabilme ve ilaçları spesifik hücre popülasyonlarına yönlendirebilme potansiyeli, bu sorunun çözümüne katkı sağlayabilir (Feng et al., 2024). Özellikle nörovasküler üniteye yönelik hedefleme stratejileri, MAO inhibitörlerinin astrositler veya vasküler hücreler gibi spesifik hücre tiplerine yönlendirilmesini mümkün kılacak yeni yaklaşımlar sunmaktadır (Wu et al., 2023). Bununla birlikte bu teknolojilerin büyük ölçüde preklinik aşamada olduğu ve klinik uygulamaya geçişte önemli teknik ve güvenlik zorluklarının bulunduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Kombinasyon tedavileri ve çoklu hedef stratejiler, MAO araştırmalarında en güçlü paradigma değişimlerinden birini temsil etmektedir. Nörodejeneratif hastalıkların kompleks yapısı, tek hedefli tedavi yaklaşımlarının sınırlı kalmasına neden olmuştur. Parkinson hastalığında MAO-B inhibitörlerinin levodopa ile birlikte kullanılması, bu yaklaşımın klinikteki başarılı örneklerinden biridir ve semptom kontrolünü artırdığı gösterilmiştir (Tsuboi et al., 2022). Bunun ötesinde güncel çalışmalar, MAO inhibitörlerinin antioksidan, anti-inflamatuar ve nöroprotektif ajanlarla birlikte kullanılmasının daha etkili olabileceğini göstermektedir. Ayrıca çoklu hedefli ligand tasarımları, MAO inhibisyonunu diğer terapötik mekanizmalarla birleştirerek daha kapsamlı bir tedavi yaklaşımı sunmaktadır (Zhang et al., 2021). Bununla birlikte kombi-

nasyon tedavilerinin farmakokinetik uyumsuzluklar ve ilaç etkileşimleri gibi önemli sınırlılıkları bulunmaktadır ve bu nedenle biyobelirteç temelli hasta seçimi ile desteklenmesi gerekmektedir.

Son olarak, MAO'nun biyolojik rolünün yalnızca nörodejeneratif hastalıklarla sınırlı olmadığı giderek daha net anlaşılmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, MAO'nun immün sistem, kardiyovasküler fonksiyon ve kanser biyolojisi gibi alanlarda da rol oynayabileceğini göstermektedir. Özellikle MAO-B'nin astroglioz ile ilişkili bir biyobelirteç olarak tanımlanması, bu enzimin tanısal ve prognostik potansiyelini de gündeme getirmiştir (Jaisa-ad et al., 2024). Bu genişleyen perspektif, MAO'nun yalnızca bir enzim değil, çok katmanlı biyolojik süreçlerin merkezinde yer alan dinamik bir düzenleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Tüm bu gelişmeler ışığında, MAO araştırmalarının geleceği klasik enzim inhibisyonu yaklaşımından uzaklaşarak daha entegre ve bağlama duyarlı bir modele doğru evrilmektedir. Bu yeni paradigmada temel soru artık MAO'nun nasıl inhibe edileceği değil, hangi hücrede, hangi bağlamda ve hangi düzeyde modüle edilmesinin en uygun terapötik sonucu vereceğidir. Bu yaklaşım, MAO hedefli tedavilerin daha etkili, güvenli ve kişiselleştirilmiş hale gelmesini sağlayacak temel çerçeveyi oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

- Alborghetti, M., & Nicoletti, F. (2019). Different generations of MAO-B inhibitors in Parkinson's disease. *Neural Regeneration Research*.
- Angelova, P. R., & Abramov, A. Y. (2018). Role of mitochondrial ROS in the brain: From physiology to neurodegeneration. *FEBS Letters*, 592(5), 692–702.
- Angelova, P. R., & Abramov, A. Y. (2018). Role of mitochondrial ROS in the brain. *FEBS Letters*, 592(5), 692–702.
- Binda, C., Hubálek, F., Li, M., Edmondson, D. E., & Mattevi, A. (2002). Crystal structure of human monoamine oxidase B. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(15), 9750–9755.
- Binda, C., Li, M., Hubálek, F., Restelli, N., Edmondson, D. E., & Mattevi, A. (2007). Insights into the mode of inhibition of human mitochondrial monoamine oxidase B. *Journal of Medicinal Chemistry*, 50(23), 5848–5852.
- Binda, C., Newton-Vinson, P., Hubálek, F., Edmondson, D. E., & Mattevi, A. (2002). Structure of human monoamine oxidase B, a drug target for the treatment of neurological disorders. *Nature Structural Biology*, 9(1), 22–26.
- Birkenhager, T. K., & Heijnen, W. T. (2024). Monoamine oxidase inhibitors: Seriously underused in the treatment of major depression. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 150(6), 497–499.
- Blair, H. A., & Dhillon, S. (2017). Safinamide: a review in Parkinson's disease. *CNS drugs*, 31(2), 169–176.
- Carinci, A. J., Ross, D. S., & Weingarten, T. N. (2010). Monoamine oxidase inhibitors and anesthesia: A review. *Journal of Clinical Anesthesia*, 22(7), 563–570.
- Catto, M., Nicolotti, O., Leonetti, F., Carotti, A., & Altomare, C. (2006). Coumarin derivatives as MAO inhibitors. *Journal of Medicinal Chemistry*, 49(16), 4912–4925.
- Chatzipieris, F. P., Kokkalis, A., Georgiou, N., Petsas, E., Apostolou, E. V., Vougioukalakis, G. C., & Mavromoustakos, T. (2025). New prospects in the inhibition of monoamine oxidase-B (MAO-B) utilizing propargylamine derivatives for the treatment of Alzheimer's disease: a review. *ACS omega*, 10(25), 26208–26232.
- Coaviche-Yoval, A., Tovar-Miranda, R., Rodríguez, J. E., Lagos-Cruz, J. A., Luna, H., Andrade-Jorge, E., & Trujillo-Ferrara, J. G. (2024). Benzofurans as Acetylcholinesterase Inhibitors for Treating Alzheimer's Disease: Synthesis, in vitro Testing, and in silico Analysis. *ChemMedChem*, 19(13), e202300615.
- Cuperlovic-Culf, M., Cunningham, E. L., Teimoorinia, H., Surendra, A., Pan, X., Bennett, S. A. L., Jung, M., McGuiness, B., Passmore, A. P., Beverland, D., & Green, B. D. (2021). Metabolomics and computational analysis of the role of monoamine oxidase activity in delirium and SARS-COV-2 infection. *Scientific reports*, 11(1), 10629.

- Dias, V., Junn, E., & Mouradian, M. M. (2013). The role of oxidative stress in Parkinson's disease. *Journal of Parkinson's Disease*, 3(4), 461–491.
- Edmondson, D. E., Binda, C., & Mattevi, A. (2007). Structural insights into the mechanism of amine oxidation by monoamine oxidases A and B. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 464(2), 269–276.
- Edmondson, D. E., Binda, C., & Mattevi, A. (2007). Structural insights into the mechanism of amine oxidation by monoamine oxidases A and B. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 464(2), 269–276.
- Edmondson, D. E., Binda, C., & Mattevi, A. (2009). Molecular and mechanistic properties of MAO. *Biochemistry*, 48(20), 4220–4230.
- Edmondson, D. E., Binda, C., Wang, J., Upadhyay, A. K., & Mattevi, A. (2009). Molecular and mechanistic properties of the membrane-bound mitochondrial monoamine oxidases. *Biochemistry*, 48(20), 4220–4230.
- Feng, X., Jia, P., & Zhang, D. (2024). Nanocarrier drug delivery system: promising platform for targeted depression therapy. *Frontiers in pharmacology*, 15, 1435133.
- Finberg, J. P. M., & Gillman, K. (2011). Selective inhibitors of monoamine oxidase type B and the “cheese effect”. *International Review of Neurobiology*, 100, 169–190.
- Goldstein, D. S., Sullivan, P., Holmes, C., Miller, G. W., Sharabi, Y., Kopin, I. J., & Mash, D. C. (2013). Determinants of buildup of the toxic dopamine metabolite DOPAL in Parkinson's disease. *Journal of Neurochemistry*, 126(5), 591–603.
- Guglielmi, P., Carradori, S., D'Agostino, I., Campestre, C., & Petzer, J. P. (2022). An updated patent review on monoamine oxidase (MAO) inhibitors. *Expert Opinion on Therapeutic Patents*, 32(8), 849–883.
- Halliwell, B., & Gutteridge, J. M. C. (2015). *Free radicals in biology and medicine* (5th ed.). Oxford University Press.
- Hopkins, A. L. (2008). Network pharmacology: the next paradigm in drug discovery. *Nature chemical biology*, 4(11), 682–690.
- Jaisa-Aad, M., Muñoz-Castro, C., Healey, M. A., Hyman, B. T., & Serrano-Pozo, A. (2024). Characterization of monoamine oxidase-B (MAO-B) as a biomarker of reactive astrogliosis in Alzheimer's disease and related dementias. *Acta Neuropathologica*, 147(1), 66.
- Jenner, P. (2003). Oxidative stress in Parkinson's disease. *Annals of Neurology*, 53(S3), S26–S36.
- Lionta, E., Spyrou, G., Vassilatis, D. K., & Cournia, Z. (2014). Structure-based virtual screening. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 14(16), 1923–1938.
- Matveychuk, D., MacKenzie, E. M., Kumpula, D., Song, M. S., Holt, A., Kar, S., ... & Baker, G. B. (2022). Overview of the neuroprotective effects of the MAO-inhibiting antidepressant phenelzine. *Cellular and molecular neurobiology*, 42(1), 225–242.

- McDermott, R., Tingley, D., Cowden, J., Frazzetto, G., & Johnson, D. D. (2009). Monoamine oxidase A gene (MAOA) predicts behavioral aggression following provocation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(7), 2118–2123.
- Naoi, M., & Maruyama, W. (2010). Monoamine oxidase inhibitors as neuroprotective agents in age-dependent neurodegenerative disorders. *Current pharmaceutical design*, 16(25), 2799–2817.
- Naoi, M., Maruyama, W., & Shamoto-Nagai, M. (2012). Type A and B monoamine oxidase in age-related neurodegenerative disorders: Their distinct roles in neuronal death and survival. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 12(20), 2177–2188.
- Olanow, C. W., Rascol, O., Hauser, R., Feigin, P. D., Jankovic, J., Lang, A., ... & TEMPO Study Investigators. (2009). A double-blind, delayed-start trial of rasagiline in Parkinson's disease. *New England Journal of Medicine*, 361(13), 1268–1278.
- Ostadkarampour, M., & Putnins, E. E. (2021). Monoamine oxidase inhibitors: a review of their anti-inflammatory therapeutic potential and mechanisms of action. *Frontiers in pharmacology*, 12, 676239.
- Park, J. H., Ju, Y. H., Choi, J. W., Song, H. J., Jang, B. K., Woo, J., ... & Chun, H. (2019). Newly developed reversible MAO-B inhibitor circumvents the shortcomings of irreversible inhibitors in Alzheimer's disease. *Science Advances*, 5(3), eaav0316.
- Patel P, Saadabadi A. Monoamine Oxidase Inhibitors (MAOIs) [Updated 2025 Dec 13]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK539848/>
- Saura, J., Luque, J. M., Cesura, A. M., Da Prada, M., Chan-Palay, V., Huber, G., Löffler, J., & Richards, J. G. (1994). Increased monoamine oxidase B activity in plaque-associated astrocytes of Alzheimer brains revealed by quantitative enzyme radioautography. *Neuroscience*, 62(1), 15–30.
- Shahwan, M., Prasad, P., Yadav, D. K., Altwaijry, N., Khan, M. S., & Shamsi, A. (2024). Identification of high-affinity Monoamine oxidase B inhibitors for depression and Parkinson's disease treatment: bioinformatic approach of drug repurposing. *Frontiers in pharmacology*, 15, 1422080.
- Shih, J. C., Chen, K., & Ridd, M. J. (1999). Monoamine oxidase: From genes to behavior. *Annual Review of Neuroscience*, 22, 197–217.
- Stockwell, B. R., Friedmann Angeli, J. P., Bayir, H., Bush, A. I., Conrad, M., Dixon, S. J., ... & Jiang, X. (2017). Ferroptosis: A regulated cell death nexus linking metabolism, redox biology, and disease. *Cell*, 171(2), 273–285.
- Tipton, K. F., Boyce, S., O'Sullivan, J., Davey, G. P., & Healy, J. (2004). Monoamine oxidases: Certainties and uncertainties. *Current Medicinal Chemistry*, 11(15), 1965–1982.

- Tsuboi, T., Satake, Y., Hiraga, K., Yokoi, K., Hattori, M., Suzuki, M., Hara, K., Ramirez-Zamora, A., Okun, M. S., & Katsuno, M. (2022). Effects of MAO-B inhibitors on non-motor symptoms and quality of life in Parkinson's disease: A systematic review. *npj Parkinson's Disease*, 8(1), 75.
- Wang, X.-Q., Zhou, L.-Y., Tan, R.-X., Liang, G.-P., Fang, S.-X., Li, W., Xie, M., Wen, Y.-H., Wu, J.-Q., & Chen, Y.-P. (2021). Design, Synthesis, and Evaluation of Chalcone Derivatives as Multifunctional Agents against Alzheimer's Disease. *Chemistry & Biodiversity*, 18(11), e2100341.
- Wells, D. G., & Bjorksten, A. R. (1989). Monoamine oxidase inhibitors revisited. *Canadian journal of anaesthesia*, 36(1), 64-74.
- Wu, D.-D., Salah, Y. A., Ngowi, E. E., Zhang, Y.-X., Khattak, S., Khan, N. H., Wang, Y., Li, T., Guo, Z.-H., Wang, Y.-M., & Ji, X.-Y. (2023). Nanotechnology prospects in brain therapeutics concerning gene-targeting and nose-to-brain administration. *Isience*, 26(8).
- Yi, C., Liu, X., Chen, K., Liang, H., & Jin, C. (2023). Design, synthesis and evaluation of novel monoamine oxidase B (MAO-B) inhibitors with improved pharmacokinetic properties for Parkinson's disease. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 252, 115308.
- Youdim, M. B. H., & Bakhle, Y. S. (2006). Monoamine oxidase: Isoforms and inhibitors in Parkinson's disease and depressive illness. *British Journal of Pharmacology*, 147(S1), S287-S296.
- Youdim, M. B. H., Edmondson, D., & Tipton, K. F. (2006). The therapeutic potential of monoamine oxidase inhibitors. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(4), 295-309.
- Zhang, C., Lv, Y., Bai, R., & Xie, Y. (2021). Structural exploration of multifunctional monoamine oxidase B inhibitors as potential drug candidates against Alzheimer's disease. *Bioorganic Chemistry*, 114, 105070.
- Zhu, J. H., Bo, H. H., Liu, B. P., & Jia, C. X. (2023). The associations between DNA methylation and depression: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Affective Disorders*, 327, 439-450.



GÜNEŞİN DERİNLİKLERİNDEN DÜNYAYA: NÖTRİNOLAR VE KUTUP IŞIKLARI

“=====”

Çağın KAMIŞCIOĞLU¹

¹ Doç. Dr. Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü,
Ankara, Türkiye, gunesc@ankara.edu.tr ORCID:0000-0003-2610-6447

1. Giriş

Güneş, Dünya'ya en yakın yıldız olup Güneş Sistemi'nin merkezinde yer almaktadır. Sahip olduğu güçlü kütle çekimi sayesinde sistemde bulunan sekiz gezegenin ve diğer gök cisimlerinin belirli yörüngelerde hareket etmesini sağlamaktadır. Dünya için temel bir enerji kaynağı olan Güneş; ışık ve ısı yayarak yaşamın devamlılığında önemli bir rol üstlenmektedir. Yaklaşık 4,6 milyar yıldır enerji üretmeye devam eden Güneş, yapısında gerçekleşen nükleer füzyon tepkimeleri nedeniyle doğal bir nükleer reaktör olarak değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra, gökyüzündeki görünür hareketleri tarih boyunca insanlar için zamanın belirlenmesinde önemli bir referans olmuştur. Güneş, yalnızca yaşam için gerekli enerjiyi sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda yaydığı parçacıklar ve oluşturduğu manyetik etkiler nedeniyle bilimsel araştırmalar açısından da büyük önem taşımaktadır. Özellikle güneş rüzgârları, yüksek enerjili parçacıklar, nötrinolar ve kutup ışıkları gibi olaylar, Güneş'in Dünya üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada öncelikle Güneş'in temel özellikleri, yapısı ve katmanları ele alınacak; ardından Güneş'ten yayılan parçacıklar, güneş rüzgârları, güneş nötrinoları ve bunların Dünya üzerindeki etkileri ile kutup ışıkları üzerinde durulacaktır.

1.1.Güneş'in Yapısı

Güneş, Güneş Sistemi'nin merkezinde yer alan ve tüm sistemi kütle çekimi etkisiyle bir arada tutan bir yıldızdır. Başta Dünya olmak üzere, sistemde bulunan tüm gök cisimlerinin yapıları ve değişimleri üzerinde önemli etkiler gösteren Güneş'in uzaya yaydığı enerji, oluşturduğu manyetik etkinlikler, bu etkinliklerin değişimleri ile yayılan parçacıklar ve nötrinolar, bilim insanları tarafından incelenen temel konular arasında yer almaktadır. Bu nedenle Güneş hakkında kapsamlı araştırmalar yapılmaktadır.

Yaklaşık 4,6 milyar yıl önce, güneş bulutsusu adı verilen devasa, dönen bir gaz ve toz bulutunda oluşan Güneş, Dünya'dan yaklaşık 150 milyon kilometre uzaklıkta olup güneş sistemimizin tek yıldızıdır. Antik Mısırlılar, Meksika Aztekleri, Kuzey ve Güney Amerika yerli kabileleri, Çinliler ve daha birçok kültür de dahil olmak üzere dünyanın dört bir yanındaki kültürlerin mitolojisinde ve dininde merkezi bir rol oynamış, eski çağlardan bu yana ilham kaynağı olmuştur. Birçok kültürde farklı adı olan Güneş'in Latince karşılığı "sol" kelimesidir. Bu kelime güneşle ilgili her şeyin temel sıfatı olan "solar" olmaktadır.

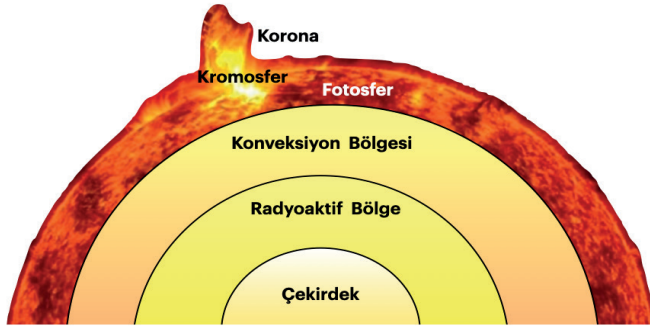
Güneş'in yerçekimi, güneş sistemini bir arada tutarak, en büyük gezegenlerden en küçük parçacıklara kadar her şeyi yörüngesinde tutmasına rağmen yarıçapı 700.000km olan büyüklüğü açısından ortalama bir yıldızdır. Güneş ve Dünya arasındaki bağlantı ve etkileşimler mevsimleri, okyanus akıntıları, hava durumunu, iklimi, radyasyon kuşaklarını ve kutup ışıklarını yönlendirir. Dünya'daki bakış açımızdan Güneş, gökyüzünde değişmeyen bir ışık

ve ısı kaynağı gibi görünse de Güneş, sürekli değişen dinamik bir yıldızdır. Güneş'in varlığını besleyen tek şey nükleer enerjidir. İki tür nükleer enerji mümkündür: füzyon ve fisyon. Her ikisi de bir atomun çekirdeğini başka bir çekirdeğe dönüştürür. Fisyon, uranyum gibi büyük kütleli çekirdekleri helyum ve kurşun gibi daha az kütleli çekirdeklere ayırarak enerji üretir.

Füzyon ise hidrojen gibi hafif çekirdekleri birleştirerek helyum gibi daha büyük kütleli çekirdekler oluşturarak enerji üretir (NASA-a, 2026).

1.2.Güneş'in Katmanları

Güneş, kendi çekim kuvvetiyle bir arada tutulan, hidrojen ve helyumdan oluşan devasa, sıcak, parlayan bir küredir ve çeşitli bölgeleri vardır. Şekil 1'de gösterildiği üzere iç bölgeler arasında çekirdek, radyoaktif bölge ve konveksiyon bölgesi bulunur. Dışa doğru ilerledikçe, görünür yüzey veya fotosfer, ardından kromosfer, geçiş bölgesi ve son olarak da Güneş'in geniş dış atmosferi olan korona gelir.

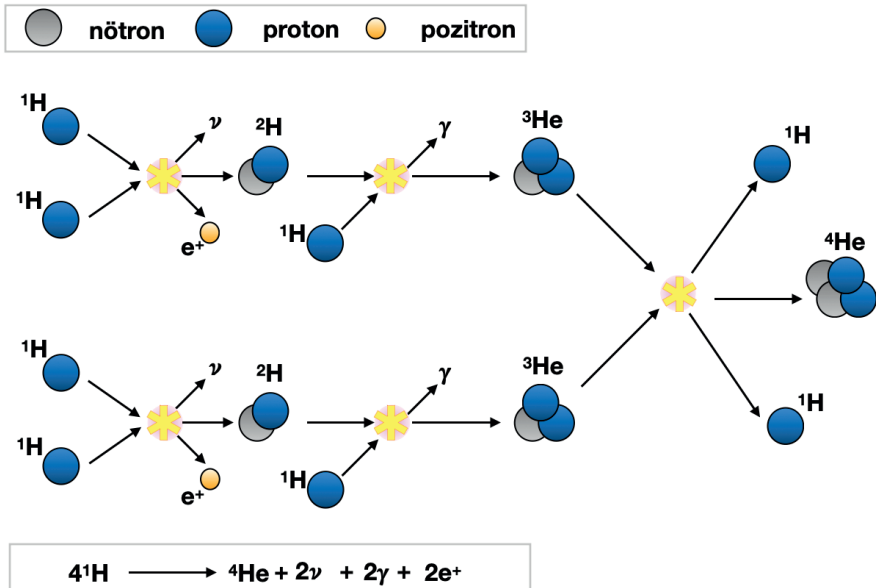


Şekil1. Güneş'in katmanları

Çekirdek: Güneş'in en sıcak kısmı, sıcaklıkların 15 milyon °C'yi aştığı çekirdeğidir. Enerjisini burada üreten Güneş'in çekirdeğinde 15 milyon santigrat derece sıcaklıkta, hidrojen gazı maddenin dördüncü hali olan plazmaya dönüşür. Bu, plazmanın muazzam basıncı ve yoğunluğuyla birleştiğinde, hidrojen çekirdeklerinin birleşmesine, helyum oluşmasına ve bu süreçte muazzam miktarda enerji açığa çıkmasına neden olur. Plazmada, atomlardaki negatif yüklü elektronlar, pozitif yüklü atom çekirdeklerinden (veya iyonlardan) tamamen ayrılır. Güneş'in yerçekimi kuvveti, pozitif yüklü hidrojen çekirdeklerini hapseder ve yüksek sıcaklıklar, çekirdeklerin hızla hareket etmesine neden olur. Sonuç olarak, pozitif yükler arasında var olan doğal elektrostatik itmeyi aşarak yüksek hızlarda çarpışırlar ve daha sonra daha ağır helyumu oluşturmak üzere birleşirler. İlk aşamada iki proton birleşir ve bunlardan biri nötrona dönüşerek döteryum olarak bilinen ağır hidrojen izotopunun çekirdeğini oluşturur. Ardından, döteryum çekirdeği başka bir protonla birleşerek

helyum-3 olarak bilinen hafif helyum izotopunu oluşturur. Son olarak, iki helyum-3 çekirdeği birleşerek helyum-4'ü oluşturur ve iki protonu serbest bırakır.

Pozitif yüklü çekirdeklerin bir araya gelmesi için, elektriksel itmelerinin üstesinden gelinmesi gerekir. Pozitif yüklü çekirdekler birbirine yeterince yaklaştığında güçlü nükleer kuvvet devreye girer. Elektrik kuvvetinden çok daha güçlüdür ve çekirdeklerin birbirine yapışmasını sağlar. Bu çekirdekleri birbirine yeterince yaklaştırmak için yüksek sıcaklıklar ve yüksek yoğunluklar gerekir. Yüksek sıcaklıklarda, çekirdekler kaynaşmaları için yeterince yakınlaşacak kadar hızlı hareket ederler. Yüksek yoğunluklar, çarpışmaların gerçekleşmesi için küçük bir hacim içinde yeterli sayıda çekirdek olmasını sağlar. Bu aşırı koşulların doğal olarak olduğu tek yer yıldızların çekirdekleridir. Yıldızların çekirdeklerindeki sıcaklıklar, hidrojen çekirdeklerini birleştirmek için gereken yaklaşık 8 milyon K'nin üzerindedir. Daha fazla pozitif yüke sahip çekirdekler için itme miktarı daha büyüktür, bu nedenle daha fazla pozitif yüke sahip elementlerin kaynaşması, küçük pozitif yüke sahip elementlerin kaynaşması için gerekenden daha yüksek sıcaklıklar ve yoğunluklar gerektirir. Bu nedenle yıldızlar diğer çekirdekleri kaynaştırmadan önce hidrojen çekirdeklerini kaynaştırırlar. Örneğin, helyum çekirdeklerinin füzyonu 100 milyon °C'nin üzerinde sıcaklık gerektirir ve daha ağır çekirdekler daha da yüksek sıcaklıklar gerektirir (NASA, 2026-b; ESA, 2026).



Şekil 2. Güneş'te proton-proton zinciri (EUROfusion, 2026'dan uyarlanmıştır).

Proton–proton zinciri, Güneş gibi orta büyüklükteki yıldızlarda enerjinin temel kaynağı olan bir nükleer füzyon sürecidir. Şekil 2’de de gösterildiği gibi bu süreçte hidrojen çekirdekleri birleşerek helyuma dönüşür ve büyük miktarda enerji açığa çıkar. Güneş’in çekirdeğinde sıcaklık yaklaşık 15 milyon °C civarındadır. Bu aşırı sıcaklık ve basınç altında protonlar birbirine yaklaşabilir ve füzyon başlar. Genel olarak, dört proton bir helyum çekirdeğine dönüştürülür. Helyum çekirdeğinin kütlesi orijinal dört protondan biraz daha az olduğu için enerji açığa çıkar ve bu enerji yavaş bir şekilde yüzeye doğru yolculuğuna başlar (EUROfusion, 2026).

Radyoaktif Bölge: Bu katman, çekirdeğin hemen üzerinde yer alır. Çekirdek kadar yoğun olmasa da radyasyon bölgesindeki plazma son derece sıkışık olduğu için konveksiyon gerçekleşemez. Bunun yerine çekirdekte üretilen enerji plazma boyunca radyasyon yoluyla yavaş yavaş yayılır. Fotonların radyasyon bölgesini kat etmesi yaklaşık 170.000 yıl sürer. Bunun nedeni, fotonların her ne kadar ışık hızında hareket etse de bir atom tarafından emilmeden önce yalnızca birkaç milimetre ilerleyebilmesi ve ardından rastgele bir yönde yeniden yayılmasıdır. Bu bölgeye bazen ‘radyasyon bölgesi’ de denir (NASA-b, 2026).

Konveksiyon Bölgesi: Bu katman, daha içteki radyasyon bölgesi ile fotosfer arasında bulunur. Buradaki plazma sürekli hareket halindedir ve ısıyı konveksiyon yoluyla dış katmanlara taşır. Konveksiyon bölgesinin alt kısımlarındaki plazma yaklaşık 2 milyon °C’ye kadar ısınarak yükselir. Yüzeye yakın bölgelerde ise daha soğuk plazma (yaklaşık 4500–6000 °C) yoğunlaşarak tekrar aşağıya doğru iner. Bu süreç, kaynayan bir suyun oluşturduğu hareketlere benzer; ancak burada söz konusu olan, yaklaşık 200.000 km derinliğe ulaşan ve tüm Güneş’i saran son derece geniş ve türbülanslı bir dolaşım sistemidir (NASA-b, 2026).

Fotosfer ve Kromosfer: Güneş’in görünür “yüzeyi” olarak kabul edilen bir katmandır. Güneş’ten yayılan enerjinin büyük kısmı, konveksiyon bölgesinin üst sınırında yer alan ve yalnızca birkaç yüz kilometre kalınlığındaki bu ince katmandan uzaya ulaşır. Çekirdekte üretilen enerji, burada serbestçe yayılma imkânı bulur. Fotosferin sıcaklığı bölgeden bölgeye değişiklik gösterse de genellikle 4500 ile 6000 °C arasında seyrederek. Kromosfer ise fotosferin üstündeki katmandır ve plazma yoğunluğunun önemli ölçüde düştüğü yerdir. Genel olarak, kromosfer yaklaşık 1000-2000 km kalınlığında olup sıcaklığı yaklaşık 4000 ile 25.000 °C arasında değişmektedir (NASA-b, 2026).

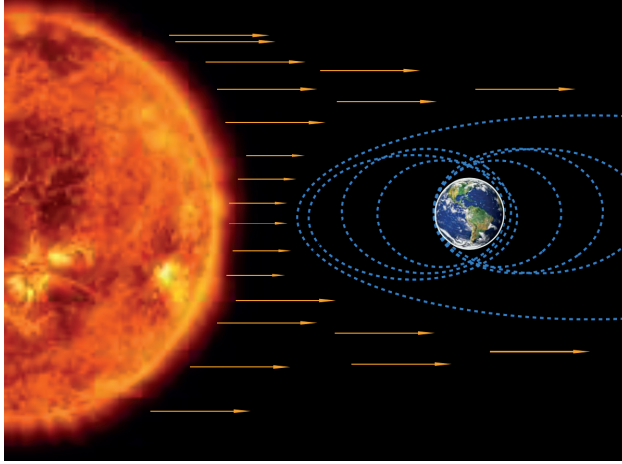
Korona: Bu katman, Güneş’in dış atmosferidir ve uzaya milyonlarca kilometre uzanır. En kolay şekilde tam güneş tutulması sırasında görülebilir. Koronadaki plazma, bir milyon derecenin üzerinde son derece sıcaktır, ancak çok seyrektir ve Güneş rüzgârı koronadan kaynaklanır. Güneş’in en büyük gizemlerinden birinde, Güneş’in dış atmosferi olan korona, yüzeyden uzak-

laştıkça daha da ısınır. Korona, 2 milyon °C'ye kadar ulaşabilir; bu da fotosferden çok daha sıcaktır (NASA-b, 2026).

2. Güneş Rüzgârları

Güneş Sistemi'ndeki gezegenlerin arası boş gibi görünse de aslında boş değildir. Saatte 2 milyon km'den fazla hızlarda Güneş'ten sürekli olarak dışarı fırlatılan parçacıklarla doludur. Buna “güneş rüzgârı” denilmekte ve bu rüzgârlar sayesinde Güneş, güneş sistemimizin her parçasına dokunmaktadır. Güneş rüzgârı, büyük ölçüde elektronlar, protonlar ve alfa parçacıklarından oluşmaktadır. Bunun yanı sıra, az miktarda da olsa ağır iyonlar ile karbon, azot ve oksijen gibi elementlerin çekirdekleri de içermektedir. Bu parçacıklar elektriksel olarak yüklü olduğundan, Güneş rüzgârı aynı zamanda Güneş'in manyetik alanının bir bölümünü de uzaya taşımaktadır. Bu yüklü parçacıklar sürekli olarak Dünya'ya doğru akmakta ancak bu akışın şiddeti Güneş'in etkinliğine bağlı olarak değişmektedir. Genellikle düzenli ve sakin olan Güneş rüzgârı, zaman zaman koronal kütle atımları (CME) ya da güneş fırtınaları olarak bilinen güçlü patlamalarla kesintiye uğramaktadır. Bu olaylar sırasında çok daha yoğun ve hızlı parçacık akışları meydana gelmektedir.

Güneş fırtınaları, uzaydaki çevresel koşulları önemli ölçüde etkileyerek “uzay hava durumu” olarak adlandırılan olguyu ortaya çıkarmaktadır. Güneş rüzgârı dışarı doğru akarken, Güneş'in manyetik alanını da beraberinde sürüklemektedir. Şekil 3'de gösterildiği gibi Güneş'in dönüşü nedeniyle uzayan güneş manyetik alanı spiral bir şekil almaktadır. Güneş rüzgarının parçacıkları yüklü olduğundan, Güneş'ten dışarı fırlarken bu spiral manyetik alan çizgilerini takip ederler. Hareket ederken, parçacıklar ve manyetik alan plazma dalgaları olarak bilinen dalgalar oluşturabilir. Güneş rüzgarları uzayda ilerlerken, Dünya da dahil olmak üzere diğer gök cisimlerinin manyetik alanlarıyla temas ederler. Bu rüzgarlar Dünya'nın manyetosferini (Dünya'nın manyetik alanını çevreleyen ve yüksek yüklü parçacıkların gezegene doğrudan çarpmasını engelleyen geniş bir alan) etkilerler.



Şekil3. Güneş rüzgârı ve Dünya'nın manyetik alanı

Çalışmalar, güneş rüzgarlarının manyetosferin şekline katkıda bulunduğunu, üzerine basınç uyguladığını ve aynı zamanda uyguladığı dışı doğru basınca tepki verdiğini göstermektedir. 2005 yılında, yörüngedeki üç ayrı güneş rüzgârı monitörü, güneş rüzgarının manyetosfere çarpmasını kaydederek böyle bir karşılaşmayı göstermiştir (Bisi ve ark., 2010).

Güneş rüzgarları Dünya'nın manyetik alanıyla etkileşime girdiğinde, yüklü parçacıklar bu alan tarafından hapsedilebilir ve atmosferdeki gazlarla çarpışmaya girer. Bu çarpışmalar sonucunda aurora adı verilen doğal ışık olayları oluşur. Bazı durumlarda güneş rüzgarları, Dünya'yı çevreleyen manyetosferde bozulmalara yol açarak jeomanyetik fırtınalara neden olur. Bu tür fırtınalar, elektrik şebekelerinde kesintilere ve uydu ile iletişim sistemlerinde aksamalara kadar varabilen ciddi etkilere sebep olabilir. Güneş rüzgarlarının etkileri, yüklü parçacıkların manyetosferle nasıl etkileşime girdiği manyetosferin gücüne bağlı olarak değişir. Örneğin, Dünya birçok güneş rüzgârı etkisine dayanabilen güçlü bir manyetosfere sahiptir. Ancak telekomünikasyon ve enerji sistemlerini bozabilecek bozulmalara karşı zayıftır. Bu etkileşimler, yüklü parçacıklara karşı koruyucu kalkan görevi gören Dünya'nın manyetosferini önemli ölçüde etkiler. Güneş rüzgarları manyetosferle çarpıştığında, jeomanyetik fırtınalara yol açabilir ve kutup ışıkları gibi güzel doğal olayları yaratabilir.

Uydu teknolojileri, güneş rüzgarları ile Dünya'nın manyetik alanı arasındaki etkileşimleri gözlemlemek için de paha biçilmez bir değere sahiptir. 2009 yılında bilim insanları, Alman küçük uydu görevi olan Challenging Minisatellite Payload'ı kullanarak, Dünya'nın kuzey kutup bölgesinin üzerindeki manyetik alanı alt atmosferden izlediler. Bu çalışma, güneş rüzgarlarının Dünya'nın üst atmosferini nasıl etkileyebileceğine dair yeni ve daha önce görülmemiş bir örnek ortaya koydu. Uzay tabanlı sistemler ve teknolojilerin

yanı sıra, gökbilimciler ve astrofizikçiler, koronal aktiviteyi izlemek ve güneş rüzgarlarını takip etmek için sıklıkla yer tabanlı teleskoplar (radyo teleskopları gibi) kullanırlar. Böylece Güneşin manyetik aktivitesini ve güneş rüzgarları yoluyla Dünya'ya geçişini izleyebilmekte ve bu iki sistemi kullanarak, bu alanların güneş rüzgarlarıyla etkileşime girmesiyle oluşan küresel manyetik alanların modellerini oluşturmayı bekliyorlar (EBSCO, 2026).

Güneş rüzgarlarının incelenmesinde, sadece manyetik fırtınalar ve kutup ışıkları gibi tetikledikleri olayları incelemek yeterli değildir. Bilim insanları, bu özellikleri ve olayları daha geniş ve kapsamlı bir çerçeveye yerleştirmenin gerekliliğini kabul etmektedir. İşte bu noktada bilgisayar modelleri hayati önem taşımaktadır. Örneğin, 2011 yılında bilim insanları, CME'ler ve farklı yoğunluk ve hızdaki güneş rüzgarları da dahil olmak üzere sekiz yıllık (1998-2006) güneş rüzgârı olaylarını analiz ettiler. Bu olaylardan (rüzgâr hızı ve benzeri özellikler dahil) verileri derlemek için istatistiksel bir program kullanan modeller, gelen güneş rüzgarlarının şiddetini ve kapsamını doğru bir şekilde tahmin edebilmektedir (Dobrijevic, 2022; EBSCO, 2026).

2.1. Kutup Işıkları ve Oluşumu

Güneş'ten gelen yüklü parçacıkların, Dünya'nın manyetik alanı ve atmosferiyle etkileşmesi sonucu Kutup Işıkları oluşur. Bu olay, fiziksel ve elektromanyetik süreçlerin birleşiminden meydana gelir. Kutup ışıkları özellikle Dünya'nın kuzey ve güney kutuplarına yakın bölgelerinde görülür. Bunun nedeni, Dünya'nın manyetik alanının Güneş'ten gelen parçacıkları bu bölgelere yönlendirmesidir. Manyetik alan çizgileri kutuplarda yoğunlaştığı için parçacıklar en çok bu bölgelerden atmosfere girer. Kuzey kutbunda görülen kutup ışıklarına Aurora Borealis, güney kutbunda görülenlere ise Aurora Australis denir. "Aurora" kelimesi, Roma mitolojisindeki şafak tanrıçasının adından gelmektedir. "Borealis" Latince "kuzey", "Australis" ise "güney" anlamına gelir (NOAA, 2026).

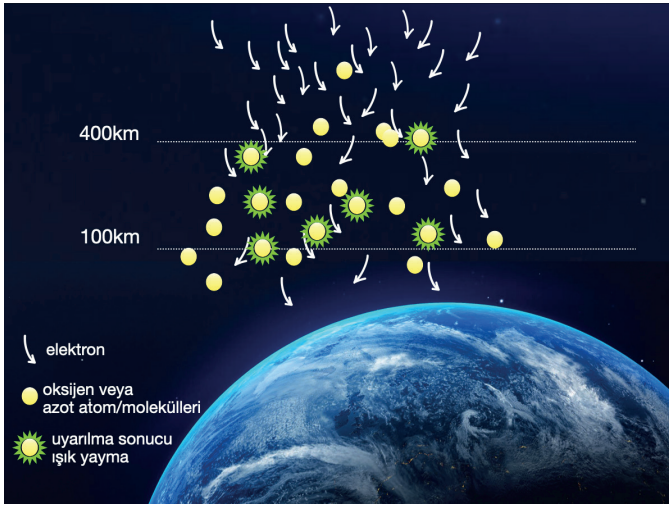
Kutup Işıkları, Güneş'ten yayılan güneş rüzgârı ile Dünya'nın koruyucu manyetik alanı olan manyetosfer arasındaki etkileşim sonucu oluşur. Bu olay aynı zamanda jeomanyetik etkinliğin bir göstergesidir. Güneş rüzgârının hızının artması ve bu rüzgâra eşlik eden gezegenler arası manyetik alanın güneye yönelmesi, jeomanyetik etkinliği artırır. Bunun sonucunda kutup ışıkları daha parlak ve hareketli hâle gelir; ayrıca kutup bölgelerinden daha uzak alanlarda da gözlemlenebilir. Orta şiddetteki güneş rüzgârları bile kutup ışıklarının oluşumu için yeterlidir. Bu nedenle büyük bir jeomanyetik fırtına meydana gelmese bile Dünya'nın herhangi bir bölgesinde zayıf kutup ışıkları görülebilir (EB, 2026).

Güneş rüzgârı ile Dünya'ya çoğunlukla elektronlar, protonlar ve alfa parçacıkları ulaşır. Görünür kutup ışıklarının temel kaynağı genellikle elektronlardır. Bunun nedeni, elektronların protonlardan çok daha hafif olmasıdır.

Bu sayede elektronlar Dünya'nın manyetik alanı içinde daha kolay hızlanarak atmosfere yönlendirilir. Atmosfere girdiklerinde Şekil 4'de gösterildiği gibi oksijen ve azot atomlarıyla çarpışırlar. Bu çarpışmalar sırasında elektronlar enerjilerini atom ve moleküllere aktararak onları uyarılmış hâle geçirir. Atomlar ve moleküller temel enerji düzeylerine geri dönerken foton yayarlar. Gözle görülen bu ışımlar sonucunda kutup ışıkları oluşur. Protonlar da “proton kutup ışıkları” oluşturabilir. Ancak bu tür kutup ışıkları genellikle daha sönüktür ve insan gözüyle görülmeleri daha zordur. Çoğu zaman morötesi dalga boylarında gözlemlenirler (Omholt, 1971).

2.2.Kutup Işıkları'nın Gözlemlenmesi

Kutup ışıkları Şekil 5'deki gibi farklı renklerde olabilmektedir. Farklı renklerde görünmesinin nedeni, atmosferdeki farklı atom ve moleküllerin farklı miktarlarda enerji yaymasıdır. Güneş rüzgârından gelen yüksek enerjili parçacıklar Dünya atmosferindeki gazlarla çarpıştığında bu gazlar uyarılır ve daha sonra eski enerji düzeylerine dönerken belirli dalga boylarında ışık yayarlar. Her gaz farklı enerji seviyelerinde ışık yaydığı için auroralarda çeşitli renkler ortaya çıkar. Şekil 6'da gösterildiği üzere en yaygın görülen yeşil renk, yaklaşık 100–300 kilometre yükseklikte bulunan oksijen atomlarından kaynaklanır.



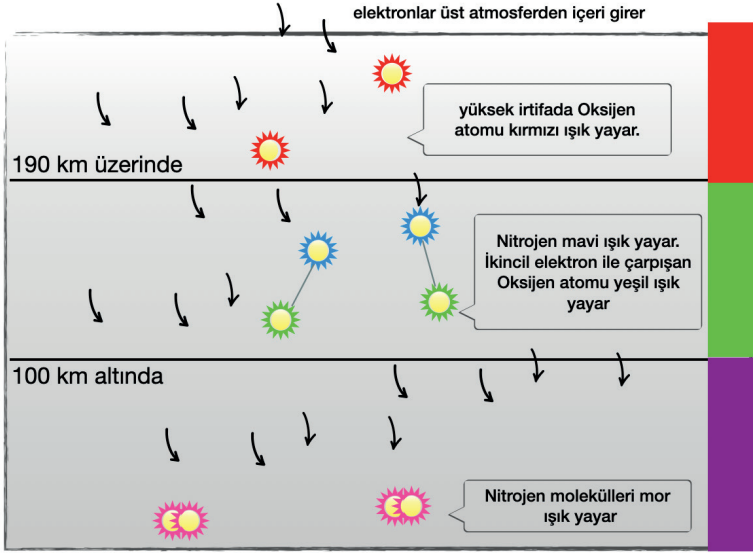
Şekil4.Yüksek enerjili parçacıkların atmosferle çarpışması sonucu kutup ışıkları oluşur (NASA-c, 2025'ten uyarlanmıştır).



Şekil5.Kutup Işıkları. Kaynak: NASA-c (2025). <https://science.nasa.gov/sun/auroras/>

Daha yüksek irtifalarda bulunan oksijen atomları ise kırmızı ışık yayar. Mavi ve mor tonlar atmosferdeki azot molekülleriyle ilişkilidir. Güçlü auro-ra etkinliklerinde oksijen ve azot ışımlarının birleşmesiyle pembe tonlar da görülebilir. Aurora renkleri ayrıca parçacıkların enerjisine, atmosferin yoğunluğuna ve çarpışmaların gerçekleştiği yüksekliğe bağlı olarak değişiklik gösterir. Yani Kutup ışıklarının renkleri irtifaya göre değişmektedir.

Kuzey ışıkları manyetik alan çizgilerine hapsediği için daha çok Dünya'nın kuzey ve güney kutbu etrafında bir halka veya oval oluşturur ve gece yarısına yakın en parlak halini alır. Bu nedenle ışıkları uzaydan görmek kolay olmaktadır. Dünya' dan görmek için kuzey ışıklarının simetrik olduğu ve kuzey yarımküredeki kuzey ışığı özelliklerinin güney yarımkürede de yansıtıldığı hatırlanmalıdır. İlk olarak, karanlık vakit tercih edilir. Yaz aylarında kutup bölgelerinde güneş günde 24 saat boyunca yukarıda olduğundan iyi bir zaman değildir. İkincisi, hava açık olmalı ve şehir gibi ışık kaynaklarından uzaklaşmak gerekir. Yerel saatle 22:00 ile 01:00 arası en parlak ve en aktif olduğu zamandır. Son olarak, biraz jeomanyetik aktivite olması iyidir çünkü, ışıkların daha parlak hale gelmesine, ekvatora doğru daha fazla hareket etmesine ve daha aktif hale gelmesine neden olur (NOAA,2013).



Şekil6. Farklı yüksekliklerde farklı renkte Kutup Işıkları oluşur (NASA-c, 2025'ten uyarlanmıştır).

Kutup ışıkları, Güneş'ten gelen yüklü parçacıkların Dünya atmosferiyle etkileşmesi sonucu oluşan göz alıcı elektromanyetik olaylardır. Ancak evrende yalnızca ışık yayan parçacıklar değil, maddeyle son derece zayıf etkileşen ve çoğu zaman fark edilmeden geçen parçacıklar da bulunmaktadır. Bu parçacıkların en dikkat çekici örneklerinden biri nötrinolardır.

3. Nötrinolar ve Özellikleri

Nötrino fiziği, 1930 yılında Wolfgang Pauli tarafından öne sürülen “nötron” hipotezine dayanmaktadır. Pauli, beta bozunumu süreçlerinde ortaya çıkan enerji korunumu ve açısal momentum korunumu problemlerini açıklayabilmek amacıyla, yüksüz, spin-1/2'li ve başlangıçta kütsüz olduğu varsayılan bir fermiyonun varlığını önermiştir. Bu hipotez, 1933 yılında Enrico Fermi tarafından geliştirilen beta bozunumu kuramı ile kuramsal bir çerçeveye kavuşturulmuştur. Fermi, Pauli'nin öngördüğü parçacığı “nötrino” olarak adlandırmış ve beta bozunumunu açıklayan dört-fermionlu etkileşimin vektörel yapıda olduğunu ileri sürmüştür. Daha sonraki deneysel çalışmalar, özellikle beta bozunumunda parite ihlalinin gözlemlenmesi ve nötrinoların yalnızca sol eli bileşenlere sahip olduğunun ortaya konulması, zayıf etkileşimlerin V–A (vektör–eksenel vektör) yapıda olduğunu göstermiştir. Bu gelişmeler doğrultusunda, nötrinoların kütsüz olduğu varsayımı altında kiral simetri kullanılarak nötrinoların madde ile etkileşimlerini tanımlayan kuramsal yapı formüle edilmiştir.

1950'li yılların sonlarından itibaren, evrendeki nötrino kaynaklarının açıklanması ve deneysel olarak doğrulanmasına yönelik yoğun çalışmalar yürütülmüştür. Nötrino kaynakları genel olarak doğal ve yapay kaynaklar olmak üzere iki temel sınıfta incelenmektedir. Bu kaynaklarda üretilen nötrinoların enerjileri çoğunlukla MeV ile GeV aralığında değişmektedir. Elektrik yüküne sahip olmamaları ve nötrino salınımı gibi özellikleri nedeniyle, nötrinolar madde ile son derece zayıf etkileşen parçacıklar olarak tanımlanmaktadır. Bu durum, nötrinoların dedektörlerde doğrudan tespit edilmesini oldukça güç hâle getirmektedir. Bir dedektörde nötrino gözlemlenebilirliği artırabilmek amacıyla, nötrinoların madde ile etkileşim olasılığını yükselten çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu doğrultuda gerçekleştirilen çalışmalar, dünyanın en büyük parçacık dedektörlerinin inşasına öncülük etmiştir.

Parçacık Fiziğinde Standart Model, maddenin temel yapı taşlarını ve bu parçacıklar arasındaki etkileşimleri açıklamak amacıyla geliştirilmiş kuramsal bir çerçevedir. Günümüze kadar elde edilen teorik ve deneysel sonuçlar, Standart Modelin büyük ölçüde tutarlı ve başarılı bir teori olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, modelin açıklamakta yetersiz kaldığı bazı temel problemler de bulunmaktadır. Bu problemlerin başında nötrininonun kütlesi gelmektedir. Standart Model'de nötrino kütlesiz bir parçacık olarak tanımlanmasına rağmen, nötrino salınımı olgusu nötrinoların küçük fakat sıfırdan farklı bir kütleye sahip olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, nötrinoların kütleli olması, Standart Modelin ötesinde yeni fizik yaklaşımlarının gerekliliğine işaret etmektedir (Kamişcioğlu, 2022; Kamişcioğlu, 2023; Kamişcioğlu, 2024).

3.1. Güneş Nötrinoları

Güneş'in çekirdek katmanında meydana gelen füzyon reaksiyonları sonucunda protonlar helyuma dönüşürken fotonlar ve nötrinolar da doğmaktadır. Güneş tarafından salınan enerjinin yaklaşık %97'si yüklü parçacıklar veya fotonlar şeklinde üretilirken ~%3'ü ise nötrinoların kinetik enerjisi şeklinde ortaya çıkmaktadır. Meydana gelen fotonlar çekirdeğin o yoğun ortamında çarpışmalar sonucu yön değiştirmekte ve ışık hızında hareket eden fotonlara *rastgele yürüyüş modeli* uygulandığında, güneş ışığının yaşı için elde edilen cevapların çoğu 10.000 ile 170.000 yıl arasında çıkmaktadır. Yani fotonların Güneş'i terk etmesi oldukça uzun zaman almaktadır. Ancak beraber doğan nötrinolar ise çekirdekten hasarsız bir şekilde çıkmakta ve yüksüz ve etkileşim yapma kapasiteleri oldukça düşük olduğu için 2-3 saniye sonra Güneş'in yüzeyine ulaşabilmektedir. Bu durum nötrinoları, başka türlü gözlemleyemediğimiz güneş süreçleri hakkında bilgi taşıyan önemli parçacıklar statüsüne çıkarmaktadır (NASA-d, 2007).

Nötrinoların maddeyle çok zayıf etkileşimleri ve Güneş'in merkezinden neredeyse hiç engellenmeden çıkarak doğrudan Dünya'ya ulaşabilmeleri nötrinoların, Güneş'in çekirdeğinde neler olduğunu gösteren doğrudan kanıt

olarak görülmesine sebep oluyordu. Bu nedenle Raymond Davis Jr. ve John Bahcall 1968’ de Homestake deneyi ile Güneş’in enerjisini gerçekten nükleer füzyonla üretilip üretilmediğini test etmek için nötrinoları saymak istediler. Çünkü Güneş’in merkezinde gerçekleşen proton-proton füzyon reaksiyonları sırasında çok büyük miktarda elektron nötrinosu oluşması gerekiyordu. Eğer hesaplanan miktarda nötrino bulunursa standart güneş modeli doğrulanmış olacaktı. Raymond Davis Jr. ve John Bahcall tarafından gerçekleştirilen Homestake deneyi, Homestake Mine içinde kurulan büyük bir dedektörde yapıldı. Deneyde yaklaşık 615 ton tetra kloroetilen kullanılarak Güneş’ten gelen elektron nötrinoları, klor-37 atomlarıyla etkileştirilerek argon-37 atomlarına dönüşmesi sonucu oluşan radyoaktif argon atomları sayılarak nötrino miktarı ölçüldü. Ancak deney sonucunda, teorik olarak beklenen nötrino sayısının yalnızca yaklaşık üçte biri gözlemlendi ve bu durum “solar nötrino problemi”nin ortaya çıkmasına neden oldu. Böyle bir problemin ortaya çıkışı üç olasılığı düşündürdü. Güneş modeli yanlış olabilirdi, deney hatalı olabilirdi veya nötrinolar hakkında bilinmeyen bir fizik olabilir. Uzun süre insanlar ilk iki ihtimali düşündüler (Cleveland, 1994).

1980’lerde gerçekleştirilen Kamioka Gözlemevi içindeki Kamiokande deneyinin temel amacı, Homestake deneyinde ortaya çıkan solar nötrino problemini doğrulamaktır. Fizikçiler gerçekten Güneş’ten beklenenden daha az nötrino gelip gelmediğini anlamak istiyordu. Ayrıca Kamiokande, nötrinoların doğrudan Güneş yönünden geldiğini gösterebilen ilk deneylerden biri oldu. Deneyde büyük bir su tankı kullanıldı ve nötrinoların elektronlarla çarpışması sonucu oluşan Çerenkov ışığı gözlemlendi. Sonuç olarak Homestake deneyindeki eksik nötrino sonucu doğrulandı ve problemin deney hatasından kaynaklanmadığı daha güçlü biçimde anlaşılmış oldu (SKC, 2026).

1990’lara gelindiğinde ise GALLEX İş birliği ve SAGE İş birliği, Güneş’ten gelen düşük enerjili elektron nötrinolarını ölçerek solar nötrino probleminin tüm enerji aralığında geçerli olup olmadığını test etmek istediler. Bu deneyler, Gran Sasso National Laboratory ve Baksan Neutrino Observatory gibi yerlerde yapıldı ve nötrinoların galyum çekirdekleriyle etkileşimini ölçen reaksiyon kullanıldı. Sonuç olarak her iki deney de teorik beklentiden daha az nötrino tespit etti; bu durum, nötrino eksikliğinin yalnızca yüksek enerjili nötrinolara özgü olmadığını gösterdi ve problemin Güneş modeli hatasından değil, nötrinoların kendisinden kaynaklanan bir fiziksel olgu olabileceği fikrini güçlendirdi.

1998’de Super-Kamiokande deneyi ise, atmosferik ve Güneş nötrinolarını yüksek hassasiyetle incelemek amacıyla gerçekleştirildi. Büyük bir yeraltı su tankında, nötrinoların su içindeki elektronlarla etkileşmesi sonucu oluşan Çerenkov ışığı gözlenerek ölçüm yapıldı. Deneyin temel amacı, özellikle nötrinoların Dünya’ya gelirken tür değiştirip değiştirmediğini test etmektir. Sonuçlar, yukarıdan gelen (atmosferik) müon nötrinolarının beklenenden daha

az tespit edildiğini ve bu azalmanın geliş yönüne bağlı olduğunu gösterdi. Bu bulgular, nötrinoların yolculuk sırasında tür değiştirdiğini yani “nötrino salınımı” yaptığını güçlü şekilde kanıtladı ve böylece nötrinoların kütleli olduğu sonucuna ulaşıldı (SKC, 2026; Nakahata, 2022; GSU, 2026).

3.2. Nötrinolar ve Kutup Işıkları

Güneşten gelen parçacıklar ve enerji akışları, Dünyada farklı iki fiziksel olguya neden olmaktadır. Bunlar gözle görülen kutup ışıkları ve gözle görülmeyen nötrinolardır. İkisi arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Farklılıklar etkileşim türleri, enerji aralıkları, gözlemlenmesi ve fiziksel anlam yönüyle ele alınmaktadır.

Etkileşim Türleri: Güneş kaynaklı parçacıklar ve enerji akışları, Dünya’da birbirinden tamamen farklı iki fiziksel olgu oluşturabilmektedir. Her ikisi de aynı astrofiziksel kaynağın sonucu olsa da maddeyle etkileşim biçimleri, taşıdıkları enerji, gözlemlenebilir olmaları ve fiziksel anlamları açısından kökten farklıdır. Biri atmosferde görsel bir ışık şöleni üretirken, diğeri neredeyse hiçbir maddeyle etkileşmeden evrenin derinliklerinden bilgi taşımaktadır. Kutup ışıkları, Güneş’ten gelen yüklü parçacıkların Dünya’nın manyetik alanı boyunca ilerleyip atmosfer atomlarıyla elektromanyetik etkileşime girmesi sonucu oluşmaktadır. Özellikle oksijen ve azot atomlarının uyarılmasıyla farklı renklerde görünür ve ışık yayılır. Bu nedenle kutup ışıkları güçlü ve doğrudan gözlemlenebilen etkileşimlerin sonucu oluşur. Nötrinolar ise yalnızca zayıf nükleer kuvvet ve kütleçekim yoluyla etkileşir. Elektriksel yük de taşımadıkları için elektromanyetik etkileşime girmezler. Dünyaya ulaşan milyarlarca nötrino her saniye insan bedeninden geçmesine rağmen neredeyse hiçbir etki oluşturmaz.

Enerji Aralıkları: Kutup ışıklarını oluşturan parçacıkların enerjileri genellikle keV(10^3) düzeyindedir ve bu enerji atmosfer atomlarını uyarıma yeterlidir. Nötrinoların enerjileri ise kaynaklarına göre değişim gösterir. Güneş nötrinoları MeV seviyesinde olup, kozmik nötrinolar TeV(10^{12}) hatta PeV(10^{15}) seviyelerine ulaşabilir. Bu nedenle nötrinolar, evrendeki yüksek enerjili parçacıklardır.

Gözlemlenmesi: Kutup ışıkları zaten görsel bir şölen olduğu için doğrudan çıplak gözle gözlemlenebilir. Renkleri ve şekilleri atmosferdeki atom/molekül türüne, yüksekliğe ve parçacık yoğunluğuna bağlıdır. Bu nedenle hem bilimsel hem de görsel açıdan dikkat çekici doğal bir olaydır. Nötrinolar ise doğrudan gözlenemezler. Teorik olarak ortaya atıldığı günden bugüne çeşitli yöntemler ve algıçlarla tespit dilmeye çalışılmışlardır ancak hepsi dolaylı yoldan bir gözlemdir. Oldukça nadir etkileşmesi, zayıf etkileşim yapması, yüksüz olması gibi özellikleri süreci oldukça zorlaştırmaktadır. Bu nedenle bir çok kaynakta hayalet parçacık olarak nitelendirilirler.

Fiziksel Anlamı: Kutup ışıkları, Güneş-Dünya etkileşiminin ve Güneş rüzgarının doğrudan göstergesidir. Dünya'nın manyetik alan yapısını ve güneş fırtınalarının etkilerini anlamada önemli bilgiler vermektedir. Nötrinolar ise yıldızlardaki reaksiyonlar, süpernovalar, kara delikler ve erken evren gibi doğrudan gözlemlenemeyen süreçler hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Maddeyle çok az etkileştikleri için kaynaklarından neredeyse bozulmadan gelen bu parçacıkları anlamak için tespit etmek gerekir ancak sahip oldukları özellikleri onları “evrenin hayalet parçacıkları” hâline getirmektedir.

4. Sonuç

Kutup ışıkları ve nötrinolar, Güneş'in derinliklerinden gelen farklı parçacıkların Dünya ve evren ölçeğinde oluşturduğu iki önemli fiziksel olgudur. Her iki olayın kaynağı benzer kozmik süreçler olmasına rağmen, maddeyle etkileşim biçimleri, gözlemlenebilirlikleri ve taşıdıkları fiziksel bilgiler açısından birbirlerinden temel olarak ayrılırlar. Kutup ışıkları, Güneş rüzgârı ile Dünya'nın manyetik alanı ve atmosferi arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkan, doğrudan gözlemlenebilen elektromanyetik bir görsel olaydır. Buna karşılık nötrinolar, Güneş'in çekirdeğinde yaratılıp neredeyse maddeyle etkileşmeyen yapıları sayesinde doğrudan gözlemlenemeyen, ancak gelişmiş algıçlar aracılığıyla dolaylı olarak tespit edilebilen temel parçacıklardır.

Bu iki olgu birlikte değerlendirildiğinde, Güneş'in yalnızca ışık ve ısı kaynağı olmadığı, aynı zamanda farklı türde parçacıklar aracılığıyla Dünya'ya sürekli bilgi taşıyan dinamik bir sistem olduğu görülmektedir. Kutup ışıkları Güneş-Dünya etkileşiminin atmosferdeki görünür sonucu iken, nötrinolar Güneş'in iç yapısı ve evrendeki yüksek enerjili süreçler hakkında doğrudan bilgi taşıyan görünmez habercilerdir. Bu nedenle her iki olay da astrofizik ve parçacık fiziği açısından evreni anlamada tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir.

Sonuç olarak, kutup ışıkları ve nötrinoların incelenmesi hem Güneş'in yapısının hem de temel parçacık fiziğinin anlaşılmasına önemli katkılar sunmakta ve modern fiziğin farklı ölçeklerdeki olayları birleştiren bütüncül yapısını ortaya koymaktadır.

KAYNAKÇA

- Bisi, M. M., Breen, A. R., Jackson, B. V., et al. (2010). From the Sun to the Earth: The 13 May 2005 coronal mass ejection. *Solar Physics*, 265(1–2), 49–127. <https://doi.org/10.1007/s11207-010-9602-8>
- Cleveland, B. T. (1994). A review of the Homestake solar neutrino experiment. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 32, 13–32.
- Dobrijevic, D. (2022). Solar wind: What is it and how does it affect Earth? Space.com. <https://www.space.com/22215-solar-wind.html>
- EB, (2026). Encyclopaedia Britannica. (3 Mayıs 2026). The ionospheric dynamo. Britannica. <https://www.britannica.com/science/geomagnetic-field/The-ionospheric-dynamo>.
- EBSCO, (2026). Solar wind interactions. EBSCO Research Starters: Physics. Erişim tarihi: 6 Mayıs 2026, <https://www.ebsco.com/research-starters/physics/solar-wind-interactions>.
- ESA, (2026). European Space Agency. (20 Mayıs 2026). Güneş'in anatomisi. Erişim tarihi: 20 Mayıs 2026, https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/01/Anatomy_of_the_Sun.
- EUROfusion, (2026). Fusion on the Sun. Erişim tarihi: 11 Mayıs 2026, <https://euro-fusion.org/fusion/fusion-on-the-sun/>.
- GSU, (2026). Georgia State University. (11 Mayıs 2026). Solar neutrinos. Erişim tarihi: 11 Mayıs 2026, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/solneu.html>
- Kamişcioğlu, Ç. (2022). Grand Story of a Tiny Particle: Neutrino. A.Demirçalı (Ed.) *Current Debates in Science and Mathematics*, (s.45-59). Duvar Yayınları, E-ISBN:978-625-8109-82-5, 1.Baskı: Ekim 2022, Ankara.
- Kamişcioğlu, Ç. (2023). Scientific Study of Particle Names. H. Akgül, H.Baba, N.İ-yit (Ed.), *International Studied in Science and Mathematics*, (s.1-16). Serüven Publishing E-ISBN:978-625-6450-60-8, 1.Baskı: Haziran 2023, Ankara.
- Kamişcioğlu, Ç. (2024). Günlük Yaşamda Parçacık Fiziği. F. Güneş ve A.D. Işık (Ed.) *Eğitim ve Bilim* pp.42-51), Ankara: Sınırsız Eğitim ve Araştırma Derneği Yayınları. E-ISBN 978-605-71819-7-8, 1.Baskı; Eylül 2024, Ankara.
- Nakahata, M. (2022). History of solar neutrino observations. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2022(12), 12B103. <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac121>
- NASA-a, (2026). National Aeronautics and Space Administration. The Sun. Erişim tarihi: 20 Mayıs 2026, <https://science.nasa.gov/sun/>.
- NASA-b, (2026). National Aeronautics and Space Administration. The Sun. Erişim tarihi: 10 Mayıs 2026, <https://science.nasa.gov/sun/facts/#hds-sidebar-nav-8>.

- NASA-c, (2025, 4 Şubat). Auroras. NASA Science. Erişim tarihi: 10 Mayıs 2026. <https://science.nasa.gov/sun/auroras/>.
- NASA-d, (2007). Sunlight and Earth. NASA Space Physics Data Facility. https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/documents/old/websites/sunearthday.nasa.gov/2007/locations/ttt_sunlight.php
- NOAA, (2013). Aurora. Science On a Sphere. <https://sos.noaa.gov/catalog/datasets/aurora/>.
- NOAA, (2026). National Oceanic and Atmospheric Administration, Space Weather Prediction Center. (3 Mayıs 2026). Aurora tutorial. Erişim tarihi: 3 Mayıs 2026, <https://www.swpc.noaa.gov/content/aurora-tutorial>.
- Omholt, A., (1971). The Proton Aurora. In: The Optical Aurora. Physics and Chemistry in Space, vol 4. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46269-6_3.
- SKC, (2026). Super-Kamiokande Collaboration. (2026). Super-Kamiokande official website. Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo. <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/sk/>



KAHRAMANMARAŞ
DULKADİROĞLU İLÇESİNİN
TRABZON CADDESİNDE
GÜRÜLTÜ DOZUNUN
HESAPLANMASI

“ ”

Ömer SÖĞÜT¹

Cemil EFE²

1 Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü 46100 Kahramanmaraş-Türkiye.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1987-1116>, omersogut@gmail.com.

2 Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü 46100 Kahramanmaraş-Türkiye.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0751-3461>, cemilefe3333@gmail.com.

1. GİRİŞ

Bütün canlıların içerisinde bulunduğu ve birbirleriyle etkileşim içinde olduğu ortam çevre olarak tanımlanmaktadır. Bu ortamda oluşabilecek herhangi bir olumsuzluk yaklaşık olarak tüm canlıları etkilemektedir. Çevre kirliliği bu olumsuz etkilerin en önemlilerinden biridir ve çevre kirliliği kaynaklarına ve çevrenin özelliklerine göre ayrılabilir. Çevre kirliliği olarak gürültü, toprak, su, hava, gıda ve ışık kirliliği gibi birçok kirlilik sayılmaktadır (Polat, 2011; Denli, 2020). Gürültü istenmeyen ve rahatsızlık veren ses aralığı olarak tanımlanabilir. Çevresel gürültü veya toplum gürültüsü, Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2011) tarafından “endüstriyel işyerlerindeki gürültü hariç tüm kaynaklardan yayılan gürültü” olarak tanımlanmıştır (Berglund ve ark., 1999). Çevresel gürültü, insan sağlığı üzerindeki etkileri iyi bilinen, yaygın bir kirleticidir. Diğer birçok çevresel tehlikenin aksine, doğrudan yutulmaz veya solunmaz, ancak işitsel ve işitsel olmayan yollarla vücuda girer ve fizyolojik sistemler üzerinde hem akut hem de kronik etkiler gösterir (Basner ve ark., 2014). Gürültü istenmeyen ses olarak tanımlanmaktadır. İnsanlar gürültüye maruz kalmaya alışma eğiliminde olsalar da, alışma derecesi bireyler arasında farklılık göstermektedir (Basner ve ark., 2011). Gürültüye maruz kalma kronikleşirse ve belirli seviyeleri aşarsa, olumsuz sağlık sonuçları görülebilir. Günümüzde gürültü kirliliği insanların rahatsız olduğu en önemli çevre kirliliklerinden biridir. Gürültü kirliliğinin insan sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz psikososyal ve fizyolojik etkilere neden olduğu yapılan çalışmalarla ispatlanmıştır. İnsanlar üzerindeki gürültünün etkisi, yayılan sesin frekansına, şiddetine, türüne ve maruz kalma şekline, insanların karakterlerine göre farklılık gösterebilmektedir. Yapılan araştırmalarda gürültünün insanlar üzerinde psikolojik, fiziksel, performans ve fizyolojik yönden olumsuz etkileri olduğu sonucu çıkarılmıştır. Gürültünün işitme kaybına ek olarak vücut üzerinde çok sayıda fiziksel etkisi vardır. Bunlar; göz bebeği genişlemesi, tiroit hormonunun üretiminde artış, kalp atım hızında artış,

adrenalin üretiminde artış, kortikotrofinde artış, mide ve karın hareketinde artışı, kas reaksiyonu ve kan damarlarının daralmasıdır. İşitme bozukluğu tipik olarak işitme eşiğinde bir artış olarak tanımlanır (WHO, 1994).

Bilimsel olarak ses, bir kaynaktan dalgalar veya basınç dalgalanmaları şeklinde yayılan bir enerjidir. İletilmesi için ortama ihtiyaç vardır ve insan kulağı veya başka bir alıcı tarafından algılanır. Ses frekans aralıkları: <20 Hz aralığı, infrason (insan kulağının duyabileceği alt sınırın altındaki frekanslara sahip ses dalgaları); 20 – 200 Hz aralıkları, düşük frekanslı sesler; 200 – 2000 Hz aralıkları orta frekanslı sesler ve 2000 – 20.000 Hz yüksek frekanslı sesler olarak sayılabilir. Çevresel gürültü ise insan faaliyetlerinden kaynaklanan ve istenmeyen dış ortam gürültüsünü tanımlamak için kullanılan bir kavramdır (web1). Gürültü, günlük yaşamın kaçınılmaz ve her yerinde bulunan bir unsurdur. Bu nedenle hem işitsel hem de işitsel olmayan sağlık etkilerine neden olabilir. Özellikle işyerlerinde gürültünün neden olduğu en yaygın sağlık problemi işitme kaybıdır. Son araştırmalara göre gürültüye bağlı kıl hücresi ve sinir hasarında rol oynayan moleküler mekanizmalar hakkında ki bilgiler de önemli ölçüde artmıştır. Bu anlamda önleyici ve tedavi edici ilaçların muhtemelen 10 yıl içinde kullanıma sunulması ihtimali olduğu rapor edilmektedir. Çevresel gürültü ile ilgili olarak yapılan gözlemsel ve deneysel çalışmalar, gürültüye maruz kalmanın uyku bozukluğuna ve gündüz uykusuna neden olduğunu, kişisel performansı etkilediği, hipertansiyon ve kardiyovasküler hastalıkla neden olduğu ve okul çocuklarında bilişsel performansı bozduğu da tespit edilmiştir. Bu nedenle, halk sağlığı için yeterli gürültü önleme ve azaltma çalışmalarının yapılması hem ülke ekonomisi hem de sağlıklı bir nesil için çok önemlidir (Basner ve ark., 2014). On yıllarca süren araştırmalar, çevresel gürültünün -özellikle karayolu trafiği, demiryolları ve uçaklar gibi ulaşım kaynaklarından kaynaklanan gürültünün- uyku bozukluğu, bilişsel bozukluk, kardiyovasküler hastalık ve yaşam kalitesinde azalma dahil olmak üzere bir dizi olumsuz sonuçla ilişkili

olduğunu göstermiştir (Brown ve Van Kamp, 2017; (Miedema, 2001; Muzet, 2007; Van Kempen ve Babisch, 2012; Sørensen ve ark., 2012; Stansfeld ve Matheson, 2003). Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), gürültüyü Batı Avrupa'da hava kirliliğinden sonra en önemli ikinci çevresel stres faktörü olarak kabul etmektedir (DSÖ, 2011). Buna rağmen, gürültü kirliliği birçok ulusal ve uluslararası halk sağlığı forumlarında yeterince dikkate alınmamaktadır (Passchier-Vermeer ve Passchier, 2000). Örnek olarak, gürültü kirliliği Avrupa dışında büyük halk sağlığı izleme çerçevelerinde veya hastalık yükü tahminlerinde nadiren yer almaktadır. Üstelik az sayıda ülke, hava kalitesi veya iklim adaptasyon stratejilerinde görülen aciliyetle ilgili olarak kapsamlı gürültü eylem planları geliştirmiştir. Uygulamada, gürültü düzenlemesinden sorumluluk genellikle çevre veya ulaşım otoritelerine aittir ve sağlık üzerindeki etkileri halk sağlığı planlamasına, eğitimine ve savunuculuğuna yeterince entegre edilmemektedir. Gürültü kirliliğinin halk sağlığı eğitim ve araştırmalarında diğer çevre kirliliklerine göre nispeten daha az vurgulanmasını birkaç nedenle açıklanabilir. Birincisi, gürültünün sağlık üzerindeki etkilerinin belirlenmesi, hava kirliliği ve benzeri gibi diğer çevre kirliliklerine göre olan eş doğrusal ilişkisi nedeniyle sıklıkla karmaşıklaşmasıdır. İkinci olarak, gürültü kirliliği bazen nüfus düzeyinde çevresel sağlık belirleyicisi olmaktan ziyade estetik veya yaşam tarzı sorunu olarak ele alınmasıdır. Üçüncüsü, ulaşım ve sanayi faaliyetlerini çevreleyen siyasi-ekonomik baskılar, düzenleyici sonuçların maliyetli veya sosyal açıdan tartışmalı olduğu alanlarda kamu sağlığı denetiminin genişletilmesini dolaylı olarak engelliyor olması olabilir. Son olarak, çağdaş halk sağlığı pedagojisi, daha geniş sosyal, kültürel ve altyapısal belirleyicilerden ziyade mekanik fizyolojik yollara öncelik verme eğiliminde olması ve bu durumunda gürültü gibi etkileri bağlam, yer ve yaşanmış deneyimle şekillenen çevresel stres faktörlerini dezavantajlı duruma düşürmektedir (Aletta, 2025).

İşitme hasarı riski hem ses seviyesiyle hem de gürültülü ortamda geçirilen süreyle artmaktadır. Ancak risk aynı zamanda sesin özelliklerine de

bağlıdır. Üstelik gürültüye duyarlılık kişiden kişiye göre farklılık göstermektedir. Bazı kişiler kısa bir süre sonra işitme hasarı yaşayabilirken, diğerleri uzun süreler, hatta bazen tüm çalışma hayatları boyunca çok gürültülü ortamlarda herhangi bir işitme hasarı oluşmaktan çalışabilmektedirler. Yoğun gürültüye kısa bir süre maruz kaldıktan sonra daha sessiz bir alana geçildiğinde, düşük seviyedeki sesler işitilmeyebilir. Bu durum geçici işitme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Gürültü seviyesi çok yüksek değilse veya maruziyet süresi çok uzun değilse, bir süre sonra normal işitme hali tekrar geri döner. Ancak yüksek işitsel gürültüden etkilenen sadece işitme duyusu değildir. Gürültü aynı zamanda kan dolaşımını etkileyebilir ve strese ve diğer psikolojik etkilere de neden olabilir. Normal mesafelerde bir konuşma gerçekleştirebilmek için, iş yerindeki ses seviyesi en fazla 65 ile 70 dB olmalıdır. Gürültü, konuşmayı anlama yeteneğini önemli ölçüde etkiler. Örneğin, yaklaşık 70 dB'de telefon görüşmesi yapmak zordur. Rahatsız edici ve rahatsız edici olmayan gürültü arasındaki genel bir sınır belirlemek zordur. Bir gürültünün değerlendirilmesi, en azından orta düzeydeki gürültü seviyeleri söz konusu olduğunda, büyük ölçüde gürültüye ve kaynağına karşı tutumlara bağlıdır.

Çok düşük frekanslar, yeterince yoğun olduklarında algılanabilir. 20 Hz'in altındaki düşük frekanslı sesler infrases olarak tanımlanırken, insan kulağı tarafından işitilemese de vücut ve zihin üzerinde belirgin etkiler ile bilinçaltı düzeyde bir tehdit algısı oluşturabileceği rapor edilmiştir (web 2). 20-100 Hz'nin altındaki düşük frekanslı ses olan infrases, insan psikolojisi ve fizyolojisini derinden etkileyebilir ve infrasese maruz kalan bir kişi de kaygı, yorgunluk, baş ağrısı ve mide bulantısı gibi semptomlara neden olabilmektedir. Bununla birlikte, yoğun infrasesin (10 Hz'nin altındaki frekanslarda yaklaşık 100 dB'nin üzerindeki ses seviyeleri) diğer şeylerin yanı sıra baş ağrısı ve yorgunluğa neden olabileceği bilinmektedir. İşitme aralığının üzerindeki frekanslara sahip ses (yaklaşık 20000 Hz), yani ultrason,

bilindiği kadarıyla orta şiddette vücut üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir.

Bu çalışmada Kahramanmaraş Dulkadiroğlu ilçesinin Trabzon caddesinde gürültü kirlilik seviyesi ölçüldü ve gürültü dozu hesaplandı. Elde edilen sonuçlar ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşların sınır değerleri ile karşılaştırıldı.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Ölçümlerin Yapılması

Bu çalışmada, Trabzon caddesi boyunca gürültü kirlilik düzeyi tespit edildi. Bu çalışma, 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş depreminden önce yapıldı. Trabzon Caddesinin tercih edilmesinin nedeni hem iş yerleri hem de insan kalabalığı açısından Kahramanmaraş'ın en kalabalık ve en yoğun caddelerinden biri olmasıdır. Depremde hemen hemen tamamen yıkılan Trabzon Caddesi bu gün yeniden inşa edilmektedir. Trabzon Caddesi boyunca gürültü kirlilik seviyesinin doğru ve homojen olarak ölçülebilmesi amacıyla, ölçümler 200 m aralıklarla önceden belirlenmiş olan 5 farklı noktada, pazartesi, salı, perşembe, cuma ve cumartesi olmak üzere beş gün boyunca ve günün aynı saatleri arasında (08:30-15:30) yapıldı. Ölçümlerde Testo 815 gürültü ölçer cihazı kullanıldı. Testo 815 gürültü ölçüm cihazı A/C frekans ağırlıklandırma özelliğine ve 30-80 dB; 50-100 dB; 80-130 dB ölçüm aralıklarına sahiptir. Cihazın bu özellikleri kullanıldı. Testo 815 cihazının kalibrasyonu için CEM SC-03 marka ses seviyesi kalibrasyon cihazı kullanıldı. Ölçümlere başlamadan önce ölçümlerin güvenilirliğini ve doğruluğunu sağlamak amacıyla Testo 815 gürültü ölçer cihazı CEM SC-05 ses seviyesi kalibratör cihazı ile kalibre edildi. Testo 815 gürültü ölçer cihazının Fotoğrafı Şekil 1'de ve CEM SC-05 ses seviyesi kalibratör cihazının fotoğrafı da Şekil 2'de verildi. Tablo 1'de Testo 815 gürültü ölçer cihazının teknik özellikleri verildi.



Şekil 1. Testo-815 gürültü ölçüm cihazı



Şekil 2. CEM SC-05 ses seviyesi kalibratörü

Gürültü seviyesi ölçüm cihazının kalibrasyonunu yapabilmek için ses seviyesi kalibratörü öncelikle Testo-815 gürültü ölçüm cihazının mikrofon kısmına takılır ve ses seviyesi kalibratörü cihazı 94 dB'e getirilerek Testo-815 gürültü ölçüm cihazına 94 dB'lik bir ses seviyesi gönderilir ve gönderilen bu değerin Testo-815 gürültü ölçüm cihazının ekranında görülmesi beklenir. Şayet desibelmetre cihazı 94 dB değerinden farklı bir değer ölçerse (yüksek veya düşük) cihazın ayar tornavidası ile ses seviyesi 94 dB'ye ayarlanır. Cihazın doğru değeri ölçtüğünü kontrol etmek için CEM SC-05 ses seviyesi kalibratörü üzerindeki regülatör 114 dB'ye ayarlanır ve bu seviyenin Testo-815 gürültü ölçüm cihazının ekranında görülmesi beklenir. Ekranda 114 dB ses düzeyi görüldüğünde cihazın kalibrasyonu tamamlanmış olur. Ancak cihazın

teknik özellikleri nedeniyle ± 0.1 dB 'lık bir sapma normal olarak değerlendirilir.

Tablo 1. Testo-815 gürültü ölçüm cihazının teknik özellikleri

Cihazın ölçebildiği değer aralığı	+ 32... +130 dB
Ölçüm yapabildiği frekans sınırları	31,5 Hz... 8 kHz
Ölçümün gerçek değere yakınlığı	± 1.0 dB
Ölçebildiği en küçük değişim	0.1 dB
Ölçüm hızı	5 sn.
Farklı frekanslara uygulanan filtreleme	AC
Kapsanan minimum ve maksimum değerler	30 - 80 dB; 50-100 dB; 80-130 dB
Ölçüm yanıt süresi	HIZLI 125 msn / YAVAŞ 1 sn.
Kullanılan enerji kaynağı	9V blok batarya, 6F22
Tek şarj ile kullanım süresi	70 saat

2.2. Eşdeğer Gürültü Seviyesinin (L_{eq}) Hesaplanması

Eşdeğer Gürültü Seviyesi (L_{eq}), belirli bir zaman dilimi boyunca ölçülen değişken ses enerjilerinin toplamına eşdeğer olan sabit ses basınç seviyesini temsil etmektedir. Literatürde zamanın ortalama ses seviyesi (L_{AT}) olarak da adlandırılan bu parametre, özellikle gürültünün insan sağlığı ve konforu üzerindeki etkilerini minimize etmek amacıyla yürütülen çalışmalarda temel gösterge kabul edilmektedir. C anlıların özellikle insanların işitme sisteminin düşük şiddetteki seslere duyarlılığı ile orta ve yüksek frekanslara olan hassasiyeti dikkate alındığında, bu ölçümler genellikle A frekans ağırlıklı ses seviyesini temsil eden dB(A) olarak yapılmaktadır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (Çevre ve Orman Bakanlığı) yönetmelikleri uyarınca, çevresel gürültü değerlendirmeleri günün farklı zamanlarını kapsayan gündüz, akşam ve gece (L_{gag}) göstergeleri üzerinden sistematize edilmektedir (Çevre ve Orman Bakanlığı, 2008). Gündüz gürültü hesabı ($L_{gündüz}$); 07:00 ile 19:00

saatleri arasını kapsar. Ancak A frekans ağırlıklı uzun dönem ses seviyesinin ortalamasını temsil etmesine rağmen yılın gündüz saatlerindeki eşdeğer gürültü seviyesini ifade eder. Akşam gürültü hesabı ($L_{akşam}$); 19:00 ile 23:00 saatleri arasını kapsar. Ancak A frekans ağırlıklı uzun dönem ses seviyelerinin enerji bazlı ortalamasıdır ve yıl boyunca akşam periyodunda oluşan gelen eşdeğer gürültü seviyesini temsil eder. Gece gürültü hesabı (L_{gece}); 23:00 ile 07:00 saatleri arasını kapsar. Fakat A frekans ağırlıklı uzun dönem ses seviyelerinin enerji bazlı ortalamasını temsil eder. Bu parametre, yıl boyunca gece süresinde meydana gelen eşdeğer gürültü seviyesini temsil eder ve uyku bozuklukları ve gece maruziyeti gibi sağlık etkilerinin değerlendirilmesinde temel gösterge olarak kullanılmaktadır. Eşdeğer gürültü seviyesi (L_{eq}), ölçülen anlık ses basınçlarının enerji ortalamasını temsil eden aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$L_{eq}=10\log_{10}\left(\frac{1}{10}\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}}\right) \quad (1)$$

burada ‘i’ başlangıç değerini, ‘n’ ölçüm sayısını ve $L(i)$ ölçülen dB(A) değerini ifade eder. Eşdeğer gürültü seviyesi ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşların belirlediği limit değerleri aştığında insan sağlığına zarar verebilir. Tablo 2’de bazı toplumsal alanlardaki en yüksek L_{eq} değeri ve insan üzerine etkisi gösterilmiştir.

Tablo 2. Bazı toplumsal alanlardaki en yüksek L_{eq} değeri ve insan üzerine etkisi

Alan	En yüksek L_{eq} (dBA) değeri	Zaman (ölçülen saat)	Gün içerisindeki zaman	Bireye olan etkileri
Oturma odası	50	16	Gündüz	Stres
Yatak odası	30	8	Gece	Uyku bozukluğu
Hastanedeki hasta odaları	30-35	8	Gündüz ve gece	Uyku bozukluğu, kaygı, endişe
Okul sınıfları	35	8	Gündüz	Stres, odaklanma kaybı, baş ağrısı
Açık havada toplumsal alan	55	16	Gündüz	Baş ağrısı, iletişim bozuklukları

2.3. Gürültü Dozu ve Gürültü Dozunun Hesaplanması

OSHA standartlarına göre çalışanların gürültüye maruz kalma seviyelerinin hesaplamasını gereklidir. Gürültüye maruz kalma, bir a ses dozimetresi veya bir desibelmetre ile ölçülebilir. Çalışma nöbeti boyunca ses seviyesi (L) sabit kaldığında, gürültü dozu (D) yüzde olarak denklem 2 ile hesaplanır.

$$D=100x\frac{C}{T} \quad (2)$$

burada D % olarak doz seviyesini, C saat olarak toplam çalışma süresini ve T ölçülen ses seviyesine karşılık gelen referans zamanın seviyesini (L) temsil etmektedir. L tablo 3'den tespit edilebilir veya denklem 3 ile hesaplanabilir. İş postası (nöbeti) boyunca maruz kalınan gürültü, farklı seviyelerdeki iki veya daha fazla gürültü bölümünden oluşuyorsa, iş günü boyunca maruz kalınan toplam gürültü dozu denklem 3 ile hesaplanmaktadır (Field ve Long, 2018).

$$D=100x(\frac{C_1}{T_1}+\frac{C_2}{T_2}+\frac{C_3}{T_3}+...+\frac{C_n}{T_n}) \quad (3)$$

burada D % olarak gürültü dozu, C_n, belirli bir gürültü seviyesindeki toplam maruz kalma süresini temsil etmektedir. T_n ise Tablo 3'de verilen veya ilgili denklemle hesaplanan ilgili seviye için referans süredir. Denklem 1, çalışan için yüzde dozu belirler. %100'lük doz, izin verilen maksimum dozdur. Referans süre düzeyi T ise aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$T=\frac{8}{2^{(\frac{L-90}{5})}} \quad (4)$$

burada T referans süreyi ve L dBA olarak maruz kalınan (ölçülen) gürültü düzeyini temsil etmektedir (Field ve Long, 2018).

Tablo 3. İşyerinde izin verilen maksimum gürültüye maruz kalma düzeyi ve günlük maruz kalma süreleri

Süre (saat/gün)	Ses seviyesi (dBA)
8	90
6	92
4	95
3	97
2	100
1.5	102
1	105
0.5	110
0.25	115
0.125	120
0.063	125
0.031	130

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

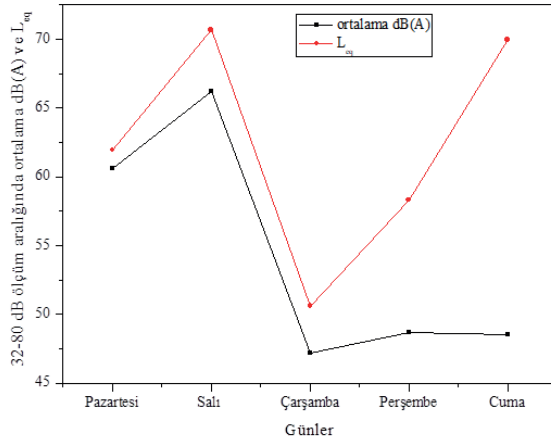
Bu araştırmada, Kahramanmaraş Dulkadiroğlu ilçesinin Trabzon caddesinde gürültü kirlilik seviyesi ölçüldü ve ölçüm verileri kullanılarak gürültü dozu hesaplandı. Gürültü ölçümleri yaya yoğunluğu, trafik ve diğer çevresel gürültü kaynaklarını dikkate alınarak yapıldı. Ölçümler hem dB(A) hem de dB(C) frekans ağırlıklandırma ölçeklerinde yapıldı. dB(A) frekans ağırlıklandırma ölçeği, insan kulağının işitme eşliğine karşılık gelen, ses yüksekliğini değerlendirmek için kullanılan bir ölçektir. Bu nedenle gürültü seviyeleri genellikle dB(C) yerine dB(A) (A ağırlıklı ses seviyeleri) olarak ölçülür. dB(A) ağırlıklandırma ölçeği genel olarak çevresel gürültü ölçümlerinde ve değerlendirilmesinde kullanılırken, dB(C) ağırlıklandırma ölçeği genellikle makine, araç, gereç ve cihazlar gibi aletlerin gürültü ölçümlerinde ve değerlendirilmesinde kullanılır. Yapılan ölçüm sonuçları ile hesaplanan eşdeğer gürültü seviyesi ve ortalama gürültü seviyesi değerleri

Tablo 4-9’da ve hesaplanan gürültü dozu değerleri de Tablo 10’da verildi. Şekil 3-5’de 32-80, 50-100 ve 80-130 dB ölçüm aralıklarında ortalama dB(A) değerleri ile eşdeğer gürültü (L_{eq}) düzeyinin günlere göre değişiminin karşılaştırılması verildi. Şekil 6’da gürültü doz katsayısı (D) ile gürültü dozunun yüzde değerlerinin günlere göre değişimi verildi. Tablo 4’den görüldüğü gibi Pazartesi günü 32-80 dB ölçüm aralığında en büyük gürültü değeri 67.90 dB(A) olarak 5. noktada ölçülürken en küçük değer 57.20 dB(A) olarak 2. noktada ölçüldü. 50-100 dB ölçeğinde ölçülen en küçük değer 63.30 dB(A) olarak 2. noktada ve en büyük gürültü değeri ise 74.60 dB(A) olarak 5. noktada ölçüldü. 80-130 dB ölçüm aralığında en büyük gürültü değeri 101dB(A) olarak 5. noktada ölçülürken en küçük gürültü değeri 86.30dB(A) olarak 2. noktada ölçülmüştür.

Tablo 4. Günlere göre gürültü ölçüm değerleri ve eşdeğer gürültü (L_{eq}) seviyesi ($n \pm \sigma$; $n=3$)

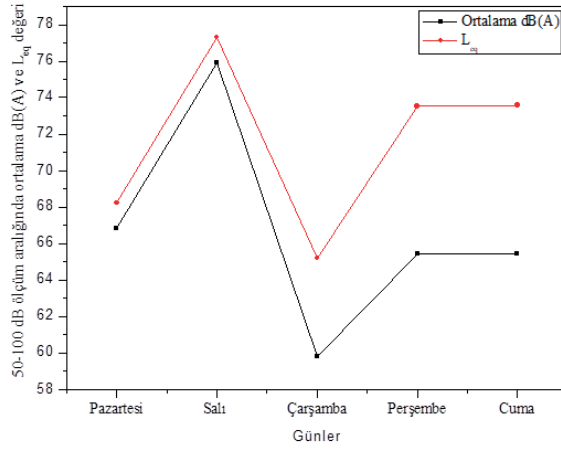
Ölçüm konumları	Pazartesi			Salı			Çarşamba			Pazartesi	
	dB(A)			dB(A)			dB(A)				
	32-80	50-100	80-130	32-80	50-100	80-130	32-80	50-100	80-130	32-80	50-100
1.N	58.70 ± 1.47	64.60 ± 1.66	88.20 ± 1.67	59.20 ± 1.08	68.10 ± 1.26	92.40 ± 1.74	43.50 ± 0.80	52.60 ± 1.02	81.40 ± 1.51	39.70 ± 0.75	50.00 ± 0.75
2.N	57.20 ± 1.44	63.30 ± 1.45	86.30 ± 1.56	59.70 ± 1.16	77.30 ± 1.41	93.70 ± 1.72	48.90 ± 0.89	54.30 ± 0.98	82.50 ± 1.60	41.20 ± 0.76	50.00 ± 0.76
3.N	59.10 ± 1.22	65.40 ± 1.16	91.30 ± 1.72	63.20 ± 1.16	75.60 ± 1.41	102.50 ± 2.01	39.80 ± 0.72	56.70 ± 1.05	84.60 ± 1.62	43.40 ± 0.79	50.00 ± 0.79
4.N	58.40 ± 1.15	66.30 ± 1.27	92.40 ± 1.91	71.40 ± 1.36	77.40 ± 1.46	98.30 ± 1.85	46.60 ± 0.84	62.30 ± 1.18	97.80 ± 1.85	54.60 ± 1.01	50.00 ± 1.01
5.N	67.90 ± 1.43	74.60 ± 1.43	101.00 ± 2.12	77.60 ± 1.47	81.20 ± 1.46	99.10 ± 1.97	57.30 ± 1.08	73.50 ± 1.43	108.30 ± 2.17	64.80 ± 1.36	50.00 ± 1.36
Ortalama	60.65	66.84	91.90	66.20	75.90	97.20	47.20	59.80	91.00	48.70	50.00
L_{eq}	61.94	68.22	94.75	70.68	77.29	98.54	50.62	65.17	101.81	58.33	50.00

Tablo 4’den görüldüğü gibi Salı günü için 32-80 dB ölçüm aralığında en büyük gürültü değeri 77.60 dB(A) olarak 5. noktada tespit edilirken en küçük değer 59.20 dB(A) olarak 1. noktada tespit edilmiştir. 50-100 dB ölçüm aralığında ölçülen en küçük değer 68.10 dB(A) olarak 1. noktada ve en büyük gürültü değeri 81.20 dB(A) olarak 5. noktada ölçüldü. 80-130 dB ölçüm aralığında en büyük gürültü değeri 102.50 dB(A) olarak 3. noktada ölçülürken en küçük gürültü değeri 92.40 dB(A) olarak 1. noktada ölçüldü. Tablo 4’den görüldüğü gibi Çarşamba günü için 32-80 dB ölçeğinde en büyük gürültü değeri 57.30 dB(A) olarak 5. noktada ölçülürken, en küçük değer 39.80dB(A) olarak 3. noktada ölçülmüştür. 50-100 dB ölçüm aralığında ölçülen en büyük gürültü değeri 73.50 dB(A) olarak 5. noktada ve en küçük gürültü değeri 52.60 dB(A) olarak 1. noktada ölçüldü. 80-130 dB ölçeğinde ölçülen en büyük gürültü değeri 108.30 dB(A) olarak 5. noktada ve en küçük gürültü değeri de 81.40 dB(A) olarak 1. noktada ölçüldü. Tablo 4’den görüldüğü gibi Perşembe günü için 32-80 dB ölçüm aralığında ölçülen en büyük gürültü değeri 64.80 dB(A) olarak 5. noktada ve en küçük değer 39.70 dB(A) olarak 1. noktada ölçüldü. 50-100 dB ölçüm aralığında en büyük gürültü değeri de 81.50 dB(A) olarak 5. noktada ve en küçük gürültü değeri 51.30 dB(A) olarak 1. noktada ölçüldü. 80-130 dB ölçüm aralığında en küçük gürültü değeri 88.60 dB(A) olarak 1. noktada ölçülürken en büyük gürültü değeri 106.90 dB(A) olarak 5. noktada ölçüldü. Tablo 4’den görüldüğü gibi 32-80 dB ölçüm aralığında Cuma günü için en büyük gürültü değeri 76.90 dB(A) olarak 5. noktada ve ölçülürken en küçük değer 36.90 dB(A) olarak 1. noktada ölçüldü. 50-100 dB ölçüm aralığı için yapılan ölçümlerde en küçük gürültü değeri 52.30 dB(A) olarak 1. noktada ve en büyük gürültü değeri de 82.60 dB(A) olarak 5. noktada ölçüldü. 80-130 dB ölçüm aralığında en büyük gürültü değeri 116.80 dB(A) olarak 5. noktada ve en küçük değer de 80.40 dB(A) olarak 1. noktada ölçüldü. Şekil 3’de 32-80 dB ölçüm aralığında ortalama dB(A) değerleri ile (L_{eq}) eşdeğer gürültü düzeyinin günlere göre değişiminin karşılaştırılması verildi.



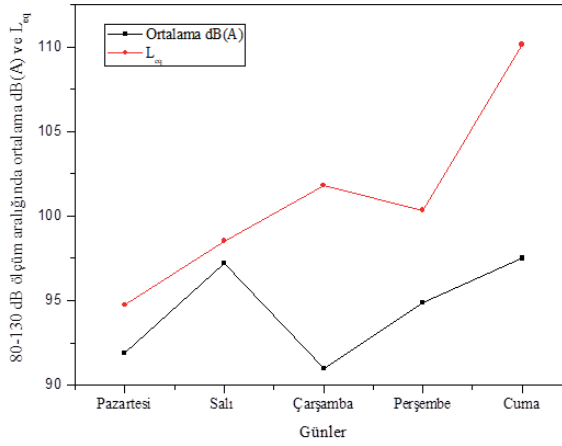
Şekil 3. 32-80 dB ölçüm aralığında ortalama dB(A) değerleri ile (L_{eq}) eşdeğer gürültü düzeyinin günlere göre değişiminin karşılaştırılması

Tablo 4. ve Şekil 3'den görüldüğü gibi 32-80 dB ölçeğinde en büyük ortalama dB(A) değerleri 66.20 dB(A) olarak Salı günü için yapılan ölçüm değerlerinden hesaplanırken, en küçük değer 47.20 dB(A) olarak Çarşamba günü yapılan ölçüm değerlerinden hesaplandı. 32-80 dB ölçüm aralığında yapılan ölçümlerden hesaplanan en büyük eşdeğer gürültü seviyesi 70.68 dB(A) olarak Salı günü için yapılan ölçüm değerlerinden hesaplanırken en küçük eşdeğer gürültü seviyesi de 50.62 dB(A) olarak Çarşamba günü için yapılan ölçüm değerlerinden hesaplandı. Şekil 4'de 50-100 dB ölçüm aralığında ortalama dB(A) değerleri ile (L_{eq}) eşdeğer gürültü düzeyinin günlere göre değişiminin karşılaştırılması verildi.



Şekil 4. 50-100 dB ölçüm aralığında ortalama dB(A) değerleri ile (L_{eq}) eşdeğer gürültü düzeyinin günlere göre değişiminin karşılaştırılması

Tablo 4. ve Şekil 4.'den görüldüğü gibi 50-100 dB ölçeği için en büyük ortalama dB(A) değerleri 75.90 dB(A) olarak Salı günü için yapılan ölçüm değerlerinden hesaplanırken, en küçük değer 59.80 dB(A) olarak Çarşamba günü için yapılan ölçüm değerlerinden hesaplandı. 50-100 dB ölçüm aralığında hesaplanan en büyük eşdeğer gürültü seviyesi Salı günü için 77.29 dB(A) olarak tespit edilirken en küçük eşdeğer gürültü seviyesi Çarşamba günü için 65.17 dB(A) olarak tespit edilmiştir. Şekil 5'de 80-130 dB ölçüm aralığında ortalama dB(A) değerleri ile (L_{eq}) eşdeğer gürültü düzeyinin günlere göre değişiminin karşılaştırılması verildi.

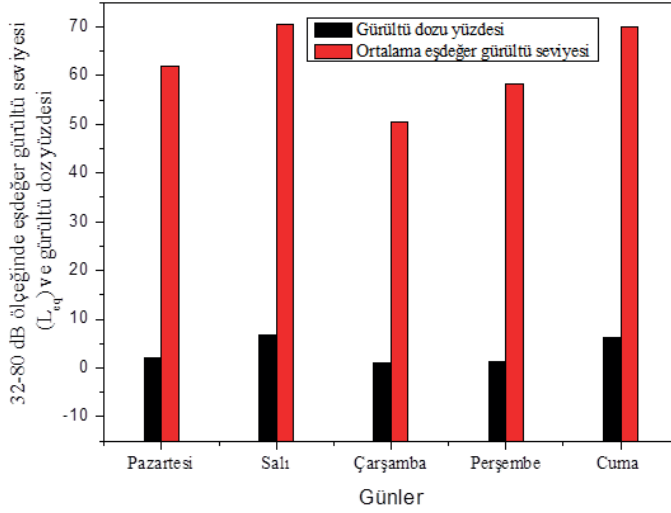


Şekil 5. 80-130 dB ölçüm aralığında ortalama dB(A) değerleri ile (L_{eq}) eşdeğer gürültü düzeyinin günlere göre değişiminin karşılaştırılması

Tablo 4. ve Şekil 5’den görüldüğü gibi 80-130 dB ölçeğinde yapılan hesaplamalarda en büyük ortalama dB(A) değerleri 97.50 dB(A) olarak Cuma günü için ölçülen değerlerden hesaplanırken, en küçük değer 91 dB(A) olarak Çarşamba günü için yapılan ölçümlerden hesaplandı. 80-130 dB ölçüm aralığı için en büyük eşdeğer gürültü seviyesi Cuma günü yapılan ölçüm değerlerinden 111.90 dB(A) olarak hesaplanırken, en küçük eşdeğer gürültü seviyesi Çarşamba günü için yapılan ölçüm değerlerinden 661.94 dB(A) olarak hesaplandı. Tablo 5’de 32-80 dB gürültü ölçeği için ortalama eşdeğer gürültü, referans süre, gürültü doz katsayısı ve doz yüzdesi değerleri verildi. Şekil 6’da 32-80 dB ölçeğinde gürültü doz yüzdesi ile L_{eq} ortalama eşdeğer gürültü seviyesinin günlere göre değişimi verildi. Doz katsayısının $D=1$ değerleri için 85 dB(A) sınır değer olarak alınmakta ve bunun değerinde %100 doz yüzdesine karşı geliyor demektir. Buna göre $L_{eq}=85+10\log_{10}(D)$ denklemi ile doz katsayılarının karşı geldiği dB(A) değerleri hesaplanabilir. 32-80 dB, 50-100 dB ve 80-130 dB gürültü ölçeklerinde haftalık ortalama eşdeğer gürültü, referans süre, gürültü doz katsayısı ve doz yüzdesi ile D ’nin karşı geldiği dB(A) değerleri Tablo 5’de verildi. 32-80 dB ölçeğinde gürültü doz yüzdesi ile ortalama eşdeğer gürültü seviyesinin günlere göre değişimi Şekil 6’da, 50-100 dB ölçeğinde gürültü doz yüzdesi ile ortalama eşdeğer gürültünün günlere göre değişimi Şekil 7’de ve 80-130 dB ölçeğinde gürültü doz yüzdesi ile ortalama eşdeğer gürültünün günlere göre değişimi Şekil 8’de verildi.

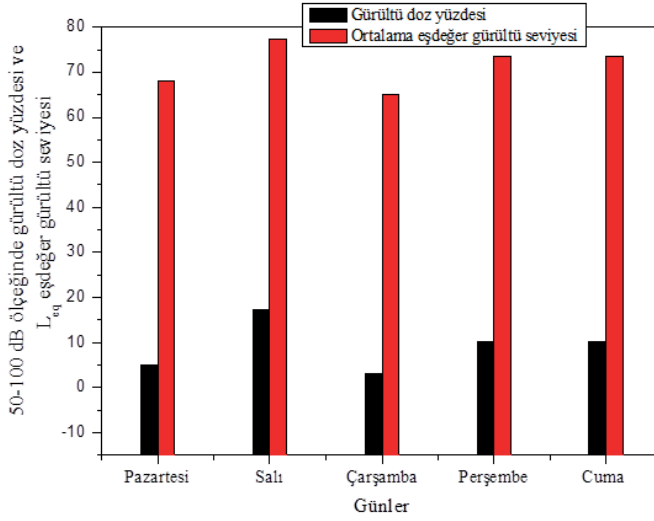
Tablo 5. Ortalama eşdeğer gürültü, referans süre, gürültü doz katsayısı ve doz yüzdesi ile D'nin karşı geldiği dB(A) değerleri

Günler →	32-80 dB gürültü ölçeği					Haftalık ortalama (C=40 saat için)
	Pa-zar-tesi	Salı	Çar-şamba	Per-şembe	Cuma	
L_{eq} dB(A)	61.94	70.68	50.62	58.33	69.96	62.31
Referans Süre, T (Sa)	391.26	116.48	1879.33	645.38	128.7	372.09
Doz katsayısı (D)	0.02	0.07	0.010	0.010	0.06	0.11
D'ye karşı gelen dB(A) değeri	68.00	73.50	65.00	65.00	72.80	75.33
Doz yüzdesi	2.040	6.87	1.13	1.24	6.22	10.80
Günler→	50-100 dB gürültü ölçeği					Haftalık ortalama (C=40 saat için)
	Pa-zar-tesi	Salı	Çar-şamba	Per-şembe	Cuma	
L_{eq} dB(A)	68.22	77.29	65.17	73.54	73.57	71.56
Referans Süre, T (Sa)	163.82	46.59	250.04	78.36	78.03	103.14
Doz katsayısı (D)	0.05	0.17	0.03	0.10	0.10	0.388
D'ye karşı gelen dB(A) değeri	72.65	77.37	69.87	75.65	75.65	80.88
Doz yüzdesi	4.88	17.17	3.20	10.21	10.25	38.80
Günler→	80-130 dB gürültü ölçeği					Haftalık ortalama (C=40 saat için)
	Pa-zar-tesi	Salı	Çar-şamba	Per-şembe	Cuma	
L_{eq} dB(A)	94.75	98.54	101.81	100.35	110.15	101.12
Referans Süre, T (Sa)	4.140	2.450	1.560	1.910	0.49	1.712
Doz katsayısı (D)	1.930	3.270	5.140	4.20	16.34	23.364
D'ye karşı gelen dB(A) değeri	87.90	90.20	92.10	91.20	97.10	98.68
Doz yüzdesi	193.19	326.71	514.08	419.89	1633.62	2336.45



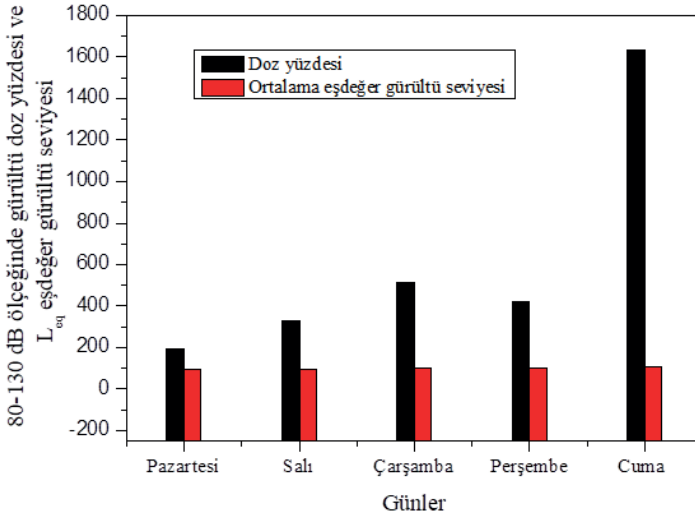
Şekil 6. 32-80 dB ölçeğinde gürültü doz yüzdesi ile ortalama eşdeğer gürültü seviyesinin günlere göre değişimi

Tablo 5 ve Şekil 6'dan görüldüğü gibi, 32-80 dB ölçeğinde yapılan gürültü ölçüm değerlerinde en büyük ortalama eşdeğer gürültü seviyesi 70.680 dB(A) olarak Salı günü yapılan ölçüm değerlerinden hesaplandı. En büyük gürültü dozu, $D=0.070$ ile doz yüzdesi de 6.87 olarak Salı günü için yapılan hesaplamalardan elde edildi. Tablo 5'den görüldüğü gibi 32-80 dB gürültü ölçeğinde haftanın tüm günleri için yapılan gürültü ölçümlerinin tüm değerleri $D<1$ olduğu için 85 dB(A) gürültü doz sınırını aşmamıştır.



Şekil 7. 50-100 dB ölçeğinde gürültü doz yüzdesi ile ortalama eşdeğer gürültünün günlere göre değişimi

Tablo 5 ve Şekil 7'den görüldüğü gibi 50-100 dB ölçeğinde yapılan gürültü ölçümlerinden yapılan hesaplamalarda en büyük ortalama eşdeğer gürültü seviyesi 77.290 dB(A) olarak Salı günü için hesaplanırken, en büyük gürültü dozu, $D=0.170$ ile doz yüzdesi 17.170 olarak da Salı günü için hesaplanmıştır. Tablo 5'den görüldüğü gibi 50-100 dB gürültü ölçeğinde haftanın tüm günleri için yapılan gürültü ölçümlerinin tüm değerleri $D<1$ olduğu için 85 dB(A) gürültü doz sınırı aşılmamıştır.



Şekil 8. 80-130 dB ölçeğinde gürültü doz yüzdesi ile ortalama eşdeğer gürültünün günlere göre değişimi

Tablo 5 ve Şekil 8’den görüldüğü gibi 80-130 dB ölçeği için yapılan ölçümlerde en büyük ortalama eşdeğer gürültü seviyesi 110.150 dB(A) olarak Cuma günü yapılan ölçüm değerlerinden hesaplandı. En büyük gürültü dozu, $D=16.340$ ile doz yüzdesi de 1633.620 olarak Cuma günü için yapılan ölçüm verilerinden tespit edildi. Tablo 5’den görüldüğü gibi 80-130 dB gürültü ölçeğinde haftanın tüm günleri için yapılan gürültü ölçümlerinin tüm değerleri $D>1$ olduğu için 85 dB(A) gürültü doz sınırı aşılmıştır. Özellikle haftalık ortalama $C=40$ saat için hesaplanan gürültü doz değeri 98.680 dB(A) oldukça büyük ve riskli bir seviyede olduğu tespit edildi. Tablo 5’den de görüldüğü gibi doz değeri arttıkça desibel değeri de logaritmik olarak artarken izin verilen süre azalmaktadır. Çevresel gürültünün değerlendirilmesi ve yönetimi ile ilgili olarak 30 Kasım 2022 yılında 32029 sayılı resmi gazetede yayınlanan yönetmeliğe göre endüstri tesisleri ve ulaşım kaynaklarının gündüz, akşam ve gece için izin verilen eşdeğer çevresel gürültü düzeyleri sırasıyla 65 dB(A), 60 dB(A) ve 55 dB(A) olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte müzik yayını

yapan işyerleri için gündüz, akşam ve gece vakitleri için izin verilen çevresel eşdeğer gürültü düzeyleri sırasıyla 60 dB(A), 55 dB(A) ve 50 dB(A) olarak tanımlanmıştır. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının 04.06.2010 tarihinde 27601 sayılı resmi gazetede yayınlatmış olduğu çevresel gürültünün değerlendirilmesi ve yönetimi yönetmeliğine göre mevcut kara yolları için çevresel gürültü sınır değerleri $L_{gündüz}$ için 65 dB(A), $L_{akşam}$ için 60 dB(A) ve L_{gece} için 55 dB(A) olarak tanımlanırken, planlanan veya yenilenmiş ya da onarılmış yollarda çevresel gürültü sınır değerlerinin $L_{gündüz}$ için 60 dB(A), $L_{akşam}$ için 55 dB(A) ve L_{gece} için 50 dB(A) olması gerektiği rapor edilmiştir. Aynı yönetmeliğe göre liman, iskele, koy, göl, boğaz, deniz ile nehir gibi yerlerde su ulaşımında kullanılan ulaşım araçlarının yaydığı çevresel gürültü seviyesi $L_{gündüz}$ için 65 dB(A), $L_{akşam}$ için 60 dB(A) ve L_{gece} için 55 dB(A) sınır değerlerini aşamayacağı rapor edilmiştir. 2002/49/EC(END) sayılı Avrupa Birliği Çevresel Gürültü direktifinde de 55 dB(A) ortalama gürültü seviyesi gündüz, akşam ve gece için rahatsızlığın başlangıç seviyesi olarak kabul etmiştir (web1, 2; WHO, 2018). Örneğin karayolu trafiği için gündüz, akşam ve gece için sınır değerler sırasıyla 55-65 dB(A), 50-60 dB(A) ve 45-55 dB(A) olarak belirlenmiştir (web1, 2; WHO, 2018). Dünya Sağlık Örgütü 2018 yılında Avrupa bölgesi için yayınladığı çevresel gürültü yönergelerinde kaynağına göre çevresel gürültü için sınır değerler tanımlanmıştır. Ancak karayolu trafiği için tanımlanan sınır değer eşdeğer gürültü seviyesinin 53 dB(A)'yı geçmemesidir (web1, 2). Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının 4 Haziran 2010'da 27601 sayılı resmi gazetede yayınlanan çevresel gürültünün değerlendirilmesi ve yönetimi yönetmeliğine göre hassas alanlarda yani hastane, okul ve konut alanlarında gündüz, akşam ve gece için limit değerler sırasıyla 60 dB(A), 55 dB(A), 50 dB(A) olarak tanımlanmıştır. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) ile Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliğine göre dersliklerde ders sırasında arka planda oluşan gürültünün 35 dB(A), okulun avlusunda, oyun ve spor

aktivitelerinin yapıldığı alanlarda ise gürültünün seviyesi için sınır değerin 55 dB(A) olması gerektiği rapor edilirken, dersliklerde pencereler açıkken iç ortamda bulunan gürültü seviyenin 45 dB(A) olabileceğini rapor edilmiştir (Denli, 2020; Avşar ve Gönüllü, 2000; Polat, 2004).

Tablo 4 ve Tablo 5’den görüldüğü gibi Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının bu yönetmenliğe ve 2002/49/EC(END) sayılı Avrupa Birliği Çevresel Gürültü Direktifi ile tanımlanan çevresel eşdeğer gürültü sınır değerlerine göre 32-80 dB ölçeği ile 50-100 dB ölçeğinde, 5 farklı ölçüm noktasında yapılan ölçümler genel olarak sınır değerlerine çok yakın, biraz büyük ya da küçüktür. Ancak 80-130 dB gürültü ölçeğinde haftanın günleri için yapılan ölçüm sonuçları Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından tanımlanan sınır değerlerinden çok büyük ve insan sağlığı açısından riskli seviyededir. Gürültüye uzun süre maruz kalmak kalıcı ya da geçici sağırılığa neden olabilir. Ses seviyesi ne kadar yüksek ve süre ne kadar uzun olursa, işitme kaybı riski de o kadar artmaktadır (WHO, 2021; Berglund ve ark., 1999). Gürültüye bağlı olarak oluşabilen diğer bir yaygın sorun da kulak çınlamasıdır. Uzun süreli yüksek seslere maruz kalmak, insan vücudunda kortizol ve adrenalin gibi stres hormonlarının salınmasına neden olabilir; bu da uzun vadede yüksek tansiyon, kalp ritim bozuklukları ve kardiyovasküler hastalık riskini artırabilir. Gürültü, merkezi sinir sistemini etkileyerek baş ağrısı, migren ve sinir gerginliği gibi sorunlara yol açabilir. Uzun süreli gürültüye maruz kalma ayrıca kas gerginliğine, omurga rahatsızlıklarına ve kas-iskelet sistemi problemlerine de neden olabilir (Clark and Paunovic, 2018; web 3). Bunlara ek olarak gürültü insanlarda konsantrasyon eksikliği ve dikkat dağınıklığı ile sosyal ilişkilerde iletişim bozukluklarına da neden olabilir. Üstelik gürültü performans ve yaşam alanlarında genel davranış üzerinde de olumsuz etkilere neden olabilir (Doğan ve Çataltepe, 2018). Uzun süreli yüksek düzeyde gürültüye maruz kalmanın, özellikle okul çocuklarında çaresizlik duygusuna katkıda bulunabileceğine

dair endişeler bulunmaktadır (Evans ve Lepore, 1993). Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), günde sekiz saatten fazla 80 dB'den yüksek gürültüye maruz kalmanın güvenli olmadığını rapor etmiştir (Clark and Paunovic, 2018). Gürültünün insan sağlığına zarar verdiği bilindiği gibi hayvan popülasyonları üzerinde de olumsuz etkilere yol açabileceği bilinmektedir. Gürültü yabani hayvanların korkmasına ve yaşam alanlarını değiştirmelerine neden olurken, çiftlik hayvanların da fizyolojik ve etolojik nedenler sebebiyle davranış değişikliklerine neden olabilmektedir (Doğan ve Çataltepe, 2018). Yeni üretilen araçlar önceki modellere göre daha sessiz olsalar da, artan nüfusla birlikte karayolu trafiği de artmaya devam ederek gürültü seviyelerinin yükselmesine neden olmuşlardır. Birçok şehir merkezinde ve ana caddelerinde trafik sıkışıklığı son derece yüksek seviyelere ulaşmış haldedir. Bu durum, neredeyse her gün trafik sıkışıklığına neden olarak araç trafiğini ve gürültüsünü dayanılmaz hale getirmektedir (Titu ve ark., 2022). Bu nedenle, şehir merkezlerinde, caddelerde ve sokaklarda trafik gürültüsünü ve dolayısıyla etkilerini azaltmak yetkililerin öncelikli hedeflerinden biri olmalıdır. Bu hedefe ulaşmak için de şehir merkezlerindeki yol kavşaklarında kentsel yol trafiği doğru bir şekilde düzenlenmelidir. Bunun dışında yapılması gereken en önemli hedeflerden birinin de ışık kirliliği, radyasyon kirliliği, hava kirliliği, su kirliliği ve kimyasal kirlilik gibi gürültü kirliliğinin de insan sağlığı açısından en az diğer çevresel kirlilikler kadar zararlı olabileceğinin gürültüyle ilgili sağlık sorunlarının kapsamı ve ciddiyeti ilgili eğitim-öğretim kurumlarının ders programlarında yerini almalıdır.

KAYNAKLAR

- Avşar Y., ve Gönüllü, M.T., 2000. İstanbul İli Örneğinde Bazı Okullarda İç ve Dış Ortam Gürültülerinin Eğitim Kalitesi Açısından Değerlendirilmesi, GAP 2000 Sempozyumu. 16-18 Ekim 2000.
- Aletta F., 2025. Noise pollution and public health curricula: a missing link in environmental health preparedness, *Academia Global and Public Health*, 1-5.
- Basner M., Müller U., Elmenhorst E.M., 2011. Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation. *Sleep* 34,11-23.
- Basner M., Babisch W., Davis A., Brink M., Clark C., Janssen S., Stansfeld S., 2014. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *Lancet.*, 383(9925),1325-32.
- Berglund B., Lindvall T. and Schwela D.,1999. Guidelines for Community Noise. World Health Organisation, Geneva, 121.
- Basner M., Müller U., Elmenhorst E.M., 2011. Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation. *Sleep* 34,11-23.
- Basner M., Babisch W., Davis A., Brink M., Clark C., Janssen S., Stansfeld S., 2014. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *Lancet.*, 383(9925),1325-32. doi:10.1016/S0140-6736(13)61613-X.
- Brown A.L., Van Kamp I., 2017. WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review of transport noise interventions and their impacts on health. *Int J Environ Res Public Health.*,14(8), 873.
- Clark C. and Paunovic K., 2018. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Quality of Life, Wellbeing and Mental Health, *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 2400; doi:10.3390/ijerph15112400.
- Çevre ve Orman Bakanlığından, Çevresel Gürültünün, 2008. Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği (2002/49/EC), cuma resmî gazete Sayı 26809.
- Çevre ve Orman Bakanlığından, 2010. Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi Ve Yönetimi Yönetmeliği, Resmi gazete tarihi, 04.06.2010 resmi gazete sayısı, 27601.
- Doğan H., Çataltepe Ö.A., 2018. Gürültünün İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri, *Journal of Health and Sport Sciences (JHSS)*, 1(1-2-3), 29-38.

- Denli G., 2020. Ortaokullarda Gürültü Düzeyi, Gürültünün Öğrencilerin Fiziksel Ve Ruhsal Sağlığına Etkisi: Aydın İli Örneği, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Halk Sağlığı Hemşireliği Yüksek Lisans Programı, HSH-2020-0003, p.98.
- Evans G.W., and Lepore S.J., 1993. Nonauditory Effects of Noise on Children: A Critical Review 10(1), Children's Environments 31-51.
- Field, L. H., and Long, M. (2018). Introduction to agricultural engineering technology. Springer.
- Miedema H.M.E., 2001. Oudshoorn CGM. Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. Environ Health Perspect 109, 409-1
- Muzet A., 2007. Environmental noise, sleep and health. Sleep Med Rev 11, 135–42.
- Passchier-Vermeer W., Passchier W.F., 2000. Noise exposure and public health. Environ Health Perspect., 108(Suppl1), 123-31.
- Polat Z., 2011. Gürültülü Ortamlarda Çalışanlarda Görülen Psikolojik Bozuklukların Değerlendirilmesi, Çağdaş Tıp Dergisi 1(1), 11-15.
- Polat S., 2004. Gürültünün Eğitim Öğretim Ortamına Etkileri, XIII, Ulusal Eğitim Bilimleri Kurultayı, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Sørensen M., Andersen Z.J., Nordsborg R.B., et al. 2012. Road traffic noise and incident myocardial infarction: a prospective cohort study. PLoS One 7, e39283.
- Stansfeld S.A., Matheson M.P., 2003. Noise pollution: non-auditory effects on health. Br Med Bull 68, 243- 57.
- Titu A.M., Boroiu A.A., Mihailescu S., Pop A.B., and Boroiu A., 2022. Assessment of Road Noise Pollution in Urban Residential Areas—A Case Study in Pitești, Romania, Appl. Sci. 12, 1-16. doi.org/10.3390/app12084053
- Van Kempen E., Babisch W., 2012. The quantitative relationship between road traffic noise and hypertension: a meta-analysis. J Hypertens 30, 1075-86.
- WHO, 2011. Regional Office for Europe. Burden of disease from environmental noise: quantification of healthy life years lost in Europe. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2011.
- WHO, 2021. World Report On Hearing. ISBN 978-92-4-002049-8 (print version).

Web1:<https://www.health.gov.au/sites/default/files/documents/2020/02/enhealthguide-ance-the-health-effects-of-environmental-noise.pdf>

Web2: <https://www.e-psikiyatri.com/infrases-nedirinsanlari-nasil-etkiliyor>

Web3:<https://satemmobil saglik.com/birinci-derece-gurultulerin-insan-sagligi-uzerindeki-etkileri>



Tİ VE AG ELEMENTLERİ İLE BAZI KOMPLEKSLERİN $K\beta/K\alpha$ X-IŞINI ŞİDDET ORANLARININ ÖLÇÜMÜ

“ ”

Birol ERTUĞRAL¹

Ömer SÖĞÜT²

1 Prof. Dr.; Giresun Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, birol.ertugral@giresun.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-4376-3476

2 Prof. Dr.; Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 46100 Kahramanmaraş/Türkiye
osogut@ksu.edu.tr, ORCID No:0000-0003-1987-1116

1. GİRİŞ

Bütün canlıların içerisinde bulunduğu ve birbirleriyle etkileşim içinde olduğu ortam çevre olarak tanımlanmaktadır. Bu ortamda oluşabilecek herhangi bir olumsuzluk yaklaşık olarak tüm canlıları etkilemektedir. Çevre kirliliği bu olumsuz etkilerin en önemlilerinden biridir ve çevre kirliliği kaynaklarına ve çevrenin özelliklerine göre ayrılabilir. Çevre kirliliği olarak gürültü, toprak, su, hava, gıda ve ışık kirliliği gibi birçok kirlilik sayılmaktadır (Polat, 2011; Denli, 2020). Gürültü istenmeyen ve rahatsızlık veren ses aralığı olarak tanımlanabilir. Çevresel gürültü veya toplum gürültüsü, Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2011) tarafından “endüstriyel işyerlerindeki gürültü hariç tüm kaynaklardan yayılan gürültü” olarak tanımlanmıştır (Berglund ve ark., 1999). Çevresel gürültü, insan sağlığı üzerindeki etkileri iyi bilinen, yaygın bir kirleticidir. Diğer birçok çevresel tehlikenin aksine, doğrudan yutulmaz veya solunmaz, ancak işitsel ve işitsel olmayan yollarla vücuda girer ve fizyolojik sistemler üzerinde hem akut hem de kronik etkiler gösterir (Basner ve ark., 2014). Gürültü istenmeyen ses olarak tanımlanmaktadır. İnsanlar gürültüye maruz kalmaya alışma eğiliminde olsalar da, alışma derecesi bireyler arasında farklılık göstermektedir (Basner ve ark., 2011). Gürültüye maruz kalma kronikleşirse ve belirli seviyeleri aşarsa, olumsuz sağlık sonuçları görülebilir. Günümüzde gürültü kirliliği insanların rahatsız olduğu en önemli çevre kirliliklerinden biridir. Gürültü kirliliğinin insan sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz psikososyal ve fizyolojik etkilere neden olduğu yapılan çalışmalarla ispatlanmıştır. İnsanlar üzerindeki gürültünün etkisi, yayılan sesin frekansına, şiddetine, türüne ve maruz kalma şekline, insanların karakterlerine göre farklılık gösterebilmektedir. Yapılan araştırmalarda gürültünün insanlar üzerinde psikolojik, fiziksel, performans ve fizyolojik yönden olumsuz etkileri olduğu sonucu çıkarılmıştır. Gürültünün işitme kaybına ek olarak vücut üzerinde çok sayıda fiziksel etkisi vardır. Bunlar; göz bebeği genişlemesi, tiroit hormonunun üretiminde artış, kalp atım hızında artış,

adrenalin üretiminde artış, kortikotrofinde artış, mide ve karın hareketinde artışı, kas reaksiyonu ve kan damarlarının daralmasıdır. İşitme bozukluğu tipik olarak işitme eşiğinde bir artış olarak tanımlanır (WHO, 1994).

Bilimsel olarak ses, bir kaynaktan dalgalar veya basınç dalgalanmaları şeklinde yayılan bir enerjidir. İletilmesi için ortama ihtiyaç vardır ve insan kulağı veya başka bir alıcı tarafından algılanır. Ses frekans aralıkları: <20 Hz aralığı, infrason (insan kulağının duyabileceği alt sınırın altındaki frekanslara sahip ses dalgaları); 20 – 200 Hz aralıkları, düşük frekanslı sesler; 200 – 2000 Hz aralıkları orta frekanslı sesler ve 2000 – 20.000 Hz yüksek frekanslı sesler olarak sayılabilir. Çevresel gürültü ise insan faaliyetlerinden kaynaklanan ve istenmeyen dış ortam gürültüsünü tanımlamak için kullanılan bir kavramdır (web1). Gürültü, günlük yaşamın kaçınılmaz ve her yerinde bulunan bir unsurdur. Bu nedenle hem işitsel hem de işitsel olmayan sağlık etkilerine neden olabilir. Özellikle işyerlerinde gürültünün neden olduğu en yaygın sağlık problemi işitme kaybıdır. Son araştırmalara göre gürültüye bağlı kıl hücresi ve sinir hasarında rol oynayan moleküler mekanizmalar hakkında ki bilgiler de önemli ölçüde artmıştır. Bu anlamda önleyici ve tedavi edici ilaçların muhtemelen 10 yıl içinde kullanıma sunulması ihtimali olduğu rapor edilmektedir. Çevresel gürültü ile ilgili olarak yapılan gözlemsel ve deneysel çalışmalar, gürültüye maruz kalmanın uyku bozukluğuna ve gündüz uykusuna neden olduğunu, kişisel performansı etkilediği, hipertansiyon ve kardiyovasküler hastalıkla neden olduğu ve okul çocuklarında bilişsel performansı bozduğu da tespit edilmiştir. Bu nedenle, halk sağlığı için yeterli gürültü önleme ve azaltma çalışmalarının yapılması hem ülke ekonomisi hem de sağlıklı bir nesil için çok önemlidir (Basner ve ark., 2014). On yıllarca süren araştırmalar, çevresel gürültünün -özellikle karayolu trafiği, demiryolları ve uçaklar gibi ulaşım kaynaklarından kaynaklanan gürültünün- uyku bozukluğu, bilişsel bozukluk, kardiyovasküler hastalık ve yaşam kalitesinde azalma dahil olmak üzere bir dizi olumsuz sonuçla ilişkili

olduğunu göstermiştir (Brown ve Van Kamp, 2017; (Miedema, 2001; Muzet, 2007; Van Kempen ve Babisch, 2012; Sørensen ve ark., 2012; Stansfeld ve Matheson, 2003). Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), gürültüyü Batı Avrupa'da hava kirliliğinden sonra en önemli ikinci çevresel stres faktörü olarak kabul etmektedir (DSÖ, 2011). Buna rağmen, gürültü kirliliği birçok ulusal ve uluslararası halk sağlığı forumlarında yeterince dikkate alınmamaktadır (Passchier-Vermeer ve Passchier, 2000). Örnek olarak, gürültü kirliliği Avrupa dışında büyük halk sağlığı izleme çerçevelerinde veya hastalık yükü tahminlerinde nadiren yer almaktadır. Üstelik az sayıda ülke, hava kalitesi veya iklim adaptasyon stratejilerinde görülen aciliyetle ilgili olarak kapsamlı gürültü eylem planları geliştirmiştir. Uygulamada, gürültü düzenlemesinden sorumluluk genellikle çevre veya ulaşım otoritelerine aittir ve sağlık üzerindeki etkileri halk sağlığı planlamasına, eğitimine ve savunuculuğuna yeterince entegre edilmemektedir. Gürültü kirliliğinin halk sağlığı eğitim ve araştırmalarında diğer çevre kirliliklerine göre nispeten daha az vurgulanmasını birkaç nedenle açıklanabilir. Birincisi, gürültünün sağlık üzerindeki etkilerinin belirlenmesi, hava kirliliği ve benzeri gibi diğer çevre kirliliklerine göre olan eş doğrusal ilişkisi nedeniyle sıklıkla karmaşıklaşmasıdır. İkinci olarak, gürültü kirliliği bazen nüfus düzeyinde çevresel sağlık belirleyicisi olmaktan ziyade estetik veya yaşam tarzı sorunu olarak ele alınmasıdır. Üçüncüsü, ulaşım ve sanayi faaliyetlerini çevreleyen siyasi-ekonomik baskılar, düzenleyici sonuçların maliyetli veya sosyal açıdan tartışmalı olduğu alanlarda kamu sağlığı denetiminin genişletilmesini dolaylı olarak engelliyor olması olabilir. Son olarak, çağdaş halk sağlığı pedagojisi, daha geniş sosyal, kültürel ve altyapısal belirleyicilerden ziyade mekanik fizyolojik yollara öncelik verme eğiliminde olması ve bu durumda gürültü gibi etkileri bağlam, yer ve yaşanmış deneyimle şekillenen çevresel stres faktörlerini dezavantajlı duruma düşürmektedir (Aletta, 2025).

İşitme hasarı riski hem ses seviyesiyle hem de gürültülü ortamda geçirilen süreyle artmaktadır. Ancak risk aynı zamanda sesin özelliklerine de

bağlıdır. Üstelik gürültüye duyarlılık kişiden kişiye göre farklılık göstermektedir. Bazı kişiler kısa bir süre sonra işitme hasarı yaşayabilirken, diğerleri uzun süreler, hatta bazen tüm çalışma hayatları boyunca çok gürültülü ortamlarda herhangi bir işitme hasarı oluşmaktan çalışabilmektedirler. Yoğun gürültüye kısa bir süre maruz kaldıktan sonra daha sessiz bir alana geçildiğinde, düşük seviyedeki sesler işitilmeyebilir. Bu durum geçici işitme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Gürültü seviyesi çok yüksek değilse veya maruziyet süresi çok uzun değilse, bir süre sonra normal işitme hali tekrar geri döner. Ancak yüksek işitsel gürültüden etkilenen sadece işitme duyusu değildir. Gürültü aynı zamanda kan dolaşımını etkileyebilir ve strese ve diğer psikolojik etkilere de neden olabilir. Normal mesafelerde bir konuşma gerçekleştirebilmek için, iş yerindeki ses seviyesi en fazla 65 ile 70 dB olmalıdır. Gürültü, konuşmayı anlama yeteneğini önemli ölçüde etkiler. Örneğin, yaklaşık 70 dB'de telefon görüşmesi yapmak zordur. Rahatsız edici ve rahatsız edici olmayan gürültü arasındaki genel bir sınır belirlemek zordur. Bir gürültünün değerlendirilmesi, en azından orta düzeydeki gürültü seviyeleri söz konusu olduğunda, büyük ölçüde gürültüye ve kaynağına karşı tutumlara bağlıdır.

Çok düşük frekanslar, yeterince yoğun olduklarında algılanabilir. 20 Hz'in altındaki düşük frekanslı sesler infrases olarak tanımlanırken, insan kulağı tarafından işitilemese de vücut ve zihin üzerinde belirgin etkiler ile bilinçaltı düzeyde bir tehdit algısı oluşturabileceği rapor edilmiştir (web 2). 20-100 Hz'nin altındaki düşük frekanslı ses olan infrases, insan psikolojisi ve fizyolojisini derinden etkileyebilir ve infrasese maruz kalan bir kişi de kaygı, yorgunluk, baş ağrısı ve mide bulantısı gibi semptomlara neden olabilmektedir. Bununla birlikte, yoğun infrasesin (10 Hz'nin altındaki frekanslarda yaklaşık 100 dB'nin üzerindeki ses seviyeleri) diğer şeylerin yanı sıra baş ağrısı ve yorgunluğa neden olabileceği bilinmektedir. İşitme aralığının üzerindeki frekanslara sahip ses (yaklaşık 20000 Hz), yani ultrason,

bilindiği kadarıyla orta şiddette vücut üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir.

Bu çalışmada Kahramanmaraş Dulkadiroğlu ilçesinin Trabzon caddesinde gürültü kirlilik seviyesi ölçüldü ve gürültü dozu hesaplandı. Elde edilen sonuçlar ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşların sınır değerleri ile karşılaştırıldı.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Ölçümlerin Yapılması

Bu çalışmada, Trabzon caddesi boyunca gürültü kirlilik düzeyi tespit edildi. Bu çalışma, 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş depreminden önce yapıldı. Trabzon Caddesinin tercih edilmesinin nedeni hem iş yerleri hem de insan kalabalığı açısından Kahramanmaraş'ın en kalabalık ve en yoğun caddelerinden biri olmasıdır. Depremde hemen hemen tamamen yıkılan Trabzon Caddesi bu gün yeniden inşa edilmektedir. Trabzon Caddesi boyunca gürültü kirlilik seviyesinin doğru ve homojen olarak ölçülebilmesi amacıyla, ölçümler 200 m aralıklarla önceden belirlenmiş olan 5 farklı noktada, pazartesi, salı, perşembe, cuma ve cumartesi olmak üzere beş gün boyunca ve günün aynı saatleri arasında (08:30-15:30) yapıldı. Ölçümlerde Testo 815 gürültü ölçer cihazı kullanıldı. Testo 815 gürültü ölçüm cihazı A/C frekans ağırlıklandırma özelliğine ve 30-80 dB; 50-100 dB; 80-130 dB ölçüm aralıklarına sahiptir. Cihazın bu özellikleri kullanıldı. Testo 815 cihazının kalibrasyonu için CEM SC-03 marka ses seviyesi kalibrasyon cihazı kullanıldı. Ölçümlere başlamadan önce ölçümlerin güvenilirliğini ve doğruluğunu sağlamak amacıyla Testo 815 gürültü ölçer cihazı CEM SC-05 ses seviyesi kalibratör cihazı ile kalibre edildi. Testo 815 gürültü ölçer cihazının Fotoğrafı Şekil 1'de ve CEM SC-05 ses seviyesi kalibratör cihazının fotoğrafı da Şekil 2'de verildi. Tablo 1'de Testo 815 gürültü ölçer cihazının teknik özellikleri verildi.



Şekil 1. Testo-815 gürültü ölçüm cihazı



Şekil 2. CEM SC-05 ses seviyesi kalibratörü

Gürültü seviyesi ölçüm cihazının kalibrasyonunu yapabilmek için ses seviyesi kalibratörü öncelikle Testo-815 gürültü ölçüm cihazının mikrofona takılır ve ses seviyesi kalibratörü cihazı 94 dB'e getirilerek Testo-815 gürültü ölçüm cihazına 94 dB'lik bir ses seviyesi gönderilir ve gönderilen bu değerin Testo-815 gürültü ölçüm cihazının ekranında görülmesi beklenir. Şayet desibelmetre cihazı 94 dB değerinden farklı bir değer ölçerse (yüksek veya düşük) cihazın ayar tornavidası ile ses seviyesi 94 dB'ye ayarlanır. Cihazın doğru değeri ölçtüğünü kontrol etmek için CEM SC-05 ses seviyesi kalibratörü üzerindeki regülatör 114 dB'ye ayarlanır ve bu seviyenin Testo-815 gürültü ölçüm cihazının ekranında görülmesi beklenir. Ekranda 114 dB ses düzeyi görüldüğünde cihazın kalibrasyonu tamamlanmış olur. Ancak cihazın

teknik özellikleri nedeniyle ± 0.1 dB 'lık bir sapma normal olarak değerlendirilir.

Tablo 1. Testo-815 gürültü ölçüm cihazının teknik özellikleri

Cihazın ölçebildiği değer aralığı	+ 32... +130 dB
Ölçüm yapabildiği frekans sınırları	31,5 Hz... 8 kHz
Ölçümün gerçek değere yakınlığı	± 1.0 dB
Ölçebildiği en küçük değişim	0.1 dB
Ölçüm hızı	5 sn.
Farklı frekanslara uygulanan filtreleme	AC
Kapsanan minimum ve maksimum değerler	30 - 80 dB; 50-100 dB; 80-130 dB
Ölçüm yanıt süresi	HIZLI 125 msn / YAVAŞ 1 sn.
Kullanılan enerji kaynağı	9V blok batarya, 6F22
Tek şarj ile kullanım süresi	70 saat

2.2. Eşdeğer Gürültü Seviyesinin (L_{eq}) Hesaplanması

Eşdeğer Gürültü Seviyesi (L_{eq}), belirli bir zaman dilimi boyunca ölçülen değişken ses enerjilerinin toplamına eşdeğer olan sabit ses basınç seviyesini temsil etmektedir. Literatürde zamanın ortalama ses seviyesi (L_{AT}) olarak da adlandırılan bu parametre, özellikle gürültünün insan sağlığı ve konforu üzerindeki etkilerini minimize etmek amacıyla yürütülen çalışmalarda temel gösterge kabul edilmektedir. C anlıların özellikle insanların işitme sisteminin düşük şiddetteki seslere duyarlılığı ile orta ve yüksek frekanslara olan hassasiyeti dikkate alındığında, bu ölçümler genellikle A frekans ağırlıklı ses seviyesini temsil eden dB(A) olarak yapılmaktadır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (Çevre ve Orman Bakanlığı) yönetmelikleri uyarınca, çevresel gürültü değerlendirmeleri günün farklı zamanlarını kapsayan gündüz, akşam ve gece (L_{gag}) göstergeleri üzerinden sistematize edilmektedir (Çevre ve Orman Bakanlığı, 2008). Gündüz gürültü hesabı ($L_{gündüz}$); 07:00 ile 19:00

saatleri arasını kapsar. Ancak A frekans ağırlıklı uzun dönem ses seviyesinin ortalamasını temsil etmesine rağmen yılın gündüz saatlerindeki eşdeğer gürültü seviyesini ifade eder. Akşam gürültü hesabı ($L_{akşam}$); 19:00 ile 23:00 saatleri arasını kapsar. Ancak A frekans ağırlıklı uzun dönem ses seviyelerinin enerji bazlı ortalamasıdır ve yıl boyunca akşam periyodunda oluşan gelen eşdeğer gürültü seviyesini temsil eder. Gece gürültü hesabı (L_{gece}); 23:00 ile 07:00 saatleri arasını kapsar. Fakat A frekans ağırlıklı uzun dönem ses seviyelerinin enerji bazlı ortalamasını temsil eder. Bu parametre, yıl boyunca gece süresinde meydana gelen eşdeğer gürültü seviyesini temsil eder ve uyku bozuklukları ve gece maruziyeti gibi sağlık etkilerinin değerlendirilmesinde temel gösterge olarak kullanılmaktadır. Eşdeğer gürültü seviyesi (L_{eq}), ölçülen anlık ses basınçlarının enerji ortalamasını temsil eden aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$L_{eq}=10\log_{10}\left(\frac{1}{10}\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}}\right) \quad (1)$$

burada ‘i’ başlangıç değerini, ‘n’ ölçüm sayısını ve $L(i)$ ölçülen dB(A) değerini ifade eder. Eşdeğer gürültü seviyesi ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşların belirlediği limit değerleri aştığında insan sağlığına zarar verebilir. Tablo 2’de bazı toplumsal alanlardaki en yüksek L_{eq} değeri ve insan üzerine etkisi gösterilmiştir.

Tablo 2. Bazı toplumsal alanlardaki en yüksek L_{eq} değeri ve insan üzerine etkisi

Alan	En yüksek L_{eq} (dBA) değeri	Zaman (ölçülen saat)	Gün içerisindeki zaman	Bireye olan etkileri
Oturma odası	50	16	Gündüz	Stres
Yatak odası	30	8	Gece	Uyku bozukluğu
Hastanedeki hasta odaları	30-35	8	Gündüz ve gece	Uyku bozukluğu, kaygı, endişe
Okul sınıfları	35	8	Gündüz	Stres, odaklanma kaybı, baş ağrısı
Açık havada toplumsal alan	55	16	Gündüz	Baş ağrısı, iletişim bozuklukları

2.3. Gürültü Dozu ve Gürültü Dozunun Hesaplanması

OSHA standartlarına göre çalışanların gürültüye maruz kalma seviyelerinin hesaplamasını gereklidir. Gürültüye maruz kalma, bir a ses dozimetresi veya bir desibelmetre ile ölçülebilir. Çalışma nöbeti boyunca ses seviyesi (L) sabit kaldığında, gürültü dozu (D) yüzde olarak denklem 2 ile hesaplanır.

$$D=100x\frac{C}{T} \quad (2)$$

burada D % olarak doz seviyesini, C saat olarak toplam çalışma süresini ve T ölçülen ses seviyesine karşılık gelen referans zamanın seviyesini (L) temsil etmektedir. L tablo 3'den tespit edilebilir veya denklem 3 ile hesaplanabilir. İş postası (nöbeti) boyunca maruz kalınan gürültü, farklı seviyelerdeki iki veya daha fazla gürültü bölümünden oluşuyorsa, iş günü boyunca maruz kalınan toplam gürültü dozu denklem 3 ile hesaplanmaktadır (Field ve Long, 2018).

$$D=100x(\frac{C_1}{T_1}+\frac{C_2}{T_2}+\frac{C_3}{T_3}+...+\frac{C_n}{T_n}) \quad (3)$$

burada D % olarak gürültü dozu, C_n, belirli bir gürültü seviyesindeki toplam maruz kalma süresini temsil etmektedir. T_n ise Tablo 3'de verilen veya ilgili denklemle hesaplanan ilgili seviye için referans süredir. Denklem 1, çalışan için yüzde dozu belirler. %100'lük doz, izin verilen maksimum dozdur. Referans süre düzeyi T ise aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$T=\frac{8}{2^{(\frac{L-90}{5})}} \quad (4)$$

burada T referans süreyi ve L dBA olarak maruz kalınan (ölçülen) gürültü düzeyini temsil etmektedir (Field ve Long, 2018).

Tablo 3. İşyerinde izin verilen maksimum gürültüye maruz kalma düzeyi ve günlük maruz kalma süreleri

Süre (saat/gün)	Ses seviyesi (dBA)
8	90
6	92
4	95
3	97
2	100
1.5	102
1	105
0.5	110
0.25	115
0.125	120
0.063	125
0.031	130

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

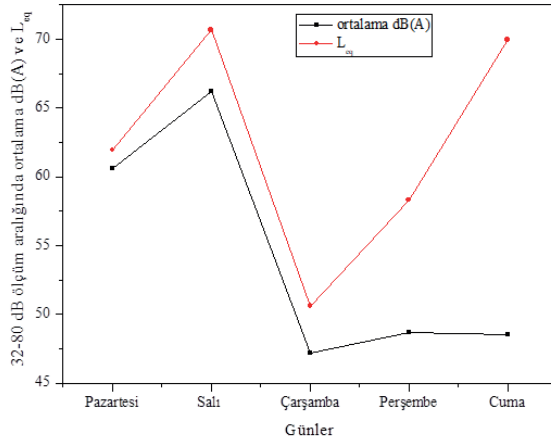
Bu araştırmada, Kahramanmaraş Dulkadiroğlu ilçesinin Trabzon caddesinde gürültü kirlilik seviyesi ölçüldü ve ölçüm verileri kullanılarak gürültü dozu hesaplandı. Gürültü ölçümleri yaya yoğunluğu, trafik ve diğer çevresel gürültü kaynaklarını dikkate alınarak yapıldı. Ölçümler hem dB(A) hem de dB(C) frekans ağırlıklandırma ölçeklerinde yapıldı. dB(A) frekans ağırlıklandırma ölçeği, insan kulağının işitme eşiğine karşılık gelen, ses yüksekliğini değerlendirmek için kullanılan bir ölçektir. Bu nedenle gürültü seviyeleri genellikle dB(C) yerine dB(A) (A ağırlıklı ses seviyeleri) olarak ölçülür. dB(A) ağırlıklandırma ölçeği genel olarak çevresel gürültü ölçümlerinde ve değerlendirilmesinde kullanılırken, dB(C) ağırlıklandırma ölçeği genellikle makine, araç, gereç ve cihazlar gibi aletlerin gürültü ölçümlerinde ve değerlendirilmesinde kullanılır. Yapılan ölçüm sonuçları ile hesaplanan eşdeğer gürültü seviyesi ve ortalama gürültü seviyesi değerleri

Tablo 4-9’da ve hesaplanan gürültü dozu değerleri de Tablo 10’da verildi. Şekil 3-5’de 32-80, 50-100 ve 80-130 dB ölçüm aralıklarında ortalama dB(A) değerleri ile eşdeğer gürültü (L_{eq}) düzeyinin günlere göre değişiminin karşılaştırılması verildi. Şekil 6’da gürültü doz katsayısı (D) ile gürültü dozunun yüzde değerlerinin günlere göre değişimi verildi. Tablo 4’den görüldüğü gibi Pazartesi günü 32-80 dB ölçüm aralığında en büyük gürültü değeri 67.90 dB(A) olarak 5. noktada ölçülürken en küçük değer 57.20 dB(A) olarak 2. noktada ölçüldü. 50-100 dB ölçeğinde ölçülen en küçük değer 63.30 dB(A) olarak 2. noktada ve en büyük gürültü değeri ise 74.60 dB(A) olarak 5. noktada ölçüldü. 80-130 dB ölçüm aralığında en büyük gürültü değeri 101dB(A) olarak 5. noktada ölçülürken en küçük gürültü değeri 86.30dB(A) olarak 2. noktada ölçülmüştür.

Tablo 4. Günlere göre gürültü ölçüm değerleri ve eşdeğer gürültü (L_{eq}) seviyesi ($n \pm \sigma$; $n=3$)

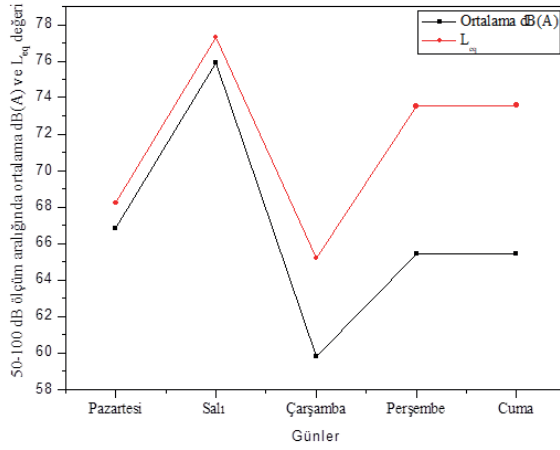
Ölçüm konumları	Pazartesi			Salı			Çarşamba			Pazartesi	
	dB(A)			dB(A)			dB(A)				
	32-80	50-100	80-130	32-80	50-100	80-130	32-80	50-100	80-130	32-80	50-100
1.N	58.70 ± 1.47	64.60 ± 1.66	88.20 ± 1.67	59.20 ± 1.08	68.10 ± 1.26	92.40 ± 1.74	43.50 ± 0.80	52.60 ± 1.02	81.40 ± 1.51	39.70 ± 0.75	50.00 ± 0.75
2.N	57.20 ± 1.44	63.30 ± 1.45	86.30 ± 1.56	59.70 ± 1.16	77.30 ± 1.41	93.70 ± 1.72	48.90 ± 0.89	54.30 ± 0.98	82.50 ± 1.60	41.20 ± 0.76	50.00 ± 0.76
3.N	59.10 ± 1.22	65.40 ± 1.16	91.30 ± 1.72	63.20 ± 1.16	75.60 ± 1.41	102.50 ± 2.01	39.80 ± 0.72	56.70 ± 1.05	84.60 ± 1.62	43.40 ± 0.79	50.00 ± 0.79
4.N	58.40 ± 1.15	66.30 ± 1.27	92.40 ± 1.91	71.40 ± 1.36	77.40 ± 1.46	98.30 ± 1.85	46.60 ± 0.84	62.30 ± 1.18	97.80 ± 1.85	54.60 ± 1.01	50.00 ± 1.01
5.N	67.90 ± 1.43	74.60 ± 1.43	101.00 ± 2.12	77.60 ± 1.47	81.20 ± 1.46	99.10 ± 1.97	57.30 ± 1.08	73.50 ± 1.43	108.30 ± 2.17	64.80 ± 1.36	50.00 ± 1.36
Ortalama	60.65	66.84	91.90	66.20	75.90	97.20	47.20	59.80	91.00	48.70	50.00
L_{eq}	61.94	68.22	94.75	70.68	77.29	98.54	50.62	65.17	101.81	58.33	50.00

Tablo 4’den görüldüğü gibi Salı günü için 32-80 dB ölçüm aralığında en büyük gürültü değeri 77.60 dB(A) olarak 5. noktada tespit edilirken en küçük değer 59.20 dB(A) olarak 1. noktada tespit edilmiştir. 50-100 dB ölçüm aralığında ölçülen en küçük değer 68.10 dB(A) olarak 1. noktada ve en büyük gürültü değeri 81.20 dB(A) olarak 5. noktada ölçüldü. 80-130 dB ölçüm aralığında en büyük gürültü değeri 102.50 dB(A) olarak 3. noktada ölçülürken en küçük gürültü değeri 92.40 dB(A) olarak 1. noktada ölçüldü. Tablo 4’den görüldüğü gibi Çarşamba günü için 32-80 dB ölçeğinde en büyük gürültü değeri 57.30 dB(A) olarak 5. noktada ölçülürken, en küçük değer 39.80dB(A) olarak 3. noktada ölçülmüştür. 50-100 dB ölçüm aralığında ölçülen en büyük gürültü değeri 73.50 dB(A) olarak 5. noktada ve en küçük gürültü değeri 52.60 dB(A) olarak 1. noktada ölçüldü. 80-130 dB ölçeğinde ölçülen en büyük gürültü değeri 108.30 dB(A) olarak 5. noktada ve en küçük gürültü değeri de 81.40 dB(A) olarak 1. noktada ölçüldü. Tablo 4’den görüldüğü gibi Perşembe günü için 32-80 dB ölçüm aralığında ölçülen en büyük gürültü değeri 64.80 dB(A) olarak 5. noktada ve en küçük değer 39.70 dB(A) olarak 1. noktada ölçüldü. 50-100 dB ölçüm aralığında en büyük gürültü değeri de 81.50 dB(A) olarak 5. noktada ve en küçük gürültü değeri 51.30 dB(A) olarak 1. noktada ölçüldü. 80-130 dB ölçüm aralığında en küçük gürültü değeri 88.60 dB(A) olarak 1. noktada ölçülürken en büyük gürültü değeri 106.90 dB(A) olarak 5. noktada ölçüldü. Tablo 4’den görüldüğü gibi 32-80 dB ölçüm aralığında Cuma günü için en büyük gürültü değeri 76.90 dB(A) olarak 5. noktada ve ölçülürken en küçük değer 36.90 dB(A) olarak 1. noktada ölçüldü. 50-100 dB ölçüm aralığı için yapılan ölçümlerde en küçük gürültü değeri 52.30 dB(A) olarak 1. noktada ve en büyük gürültü değeri de 82.60 dB(A) olarak 5. noktada ölçüldü. 80-130 dB ölçüm aralığında en büyük gürültü değeri 116.80 dB(A) olarak 5. noktada ve en küçük değer de 80.40 dB(A) olarak 1. noktada ölçüldü. Şekil 3’de 32-80 dB ölçüm aralığında ortalama dB(A) değerleri ile (L_{eq}) eşdeğer gürültü düzeyinin günlere göre değişiminin karşılaştırılması verildi.



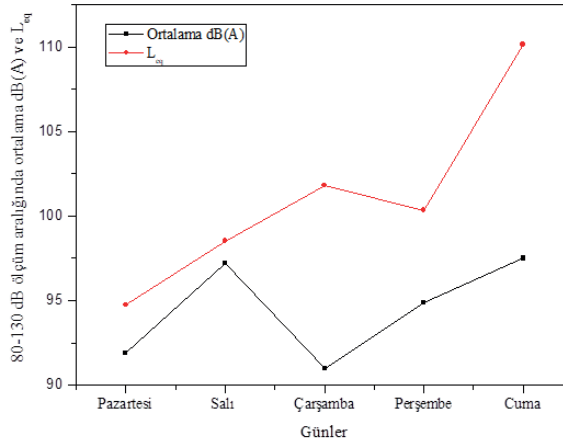
Şekil 3. 32-80 dB ölçüm aralığında ortalama dB(A) değerleri ile (L_{eq}) eşdeğer gürültü düzeyinin günlere göre değişiminin karşılaştırılması

Tablo 4. ve Şekil 3'den görüldüğü gibi 32-80 dB ölçeğinde en büyük ortalama dB(A) değerleri 66.20 dB(A) olarak Salı günü için yapılan ölçüm değerlerinden hesaplanırken, en küçük değer 47.20 dB(A) olarak Çarşamba günü yapılan ölçüm değerlerinden hesaplandı. 32-80 dB ölçüm aralığında yapılan ölçümlerden hesaplanan en büyük eşdeğer gürültü seviyesi 70.68 dB(A) olarak Salı günü için yapılan ölçüm değerlerinden hesaplanırken en küçük eşdeğer gürültü seviyesi de 50.62 dB(A) olarak Çarşamba günü için yapılan ölçüm değerlerinden hesaplandı. Şekil 4'de 50-100 dB ölçüm aralığında ortalama dB(A) değerleri ile (L_{eq}) eşdeğer gürültü düzeyinin günlere göre değişiminin karşılaştırılması verildi.



Şekil 4. 50-100 dB ölçüm aralığında ortalama dB(A) değerleri ile (L_{eq}) eşdeğer gürültü düzeyinin günlere göre değişiminin karşılaştırılması

Tablo 4. ve Şekil 4.'den görüldüğü gibi 50-100 dB ölçeği için en büyük ortalama dB(A) değerleri 75.90 dB(A) olarak Salı günü için yapılan ölçüm değerlerinden hesaplanırken, en küçük değer 59.80 dB(A) olarak Çarşamba günü için yapılan ölçüm değerlerinden hesaplandı. 50-100 dB ölçüm aralığında hesaplanan en büyük eşdeğer gürültü seviyesi Salı günü için 77.29 dB(A) olarak tespit edilirken en küçük eşdeğer gürültü seviyesi Çarşamba günü için 65.17 dB(A) olarak tespit edilmiştir. Şekil 5'de 80-130 dB ölçüm aralığında ortalama dB(A) değerleri ile (L_{eq}) eşdeğer gürültü düzeyinin günlere göre değişiminin karşılaştırılması verildi.

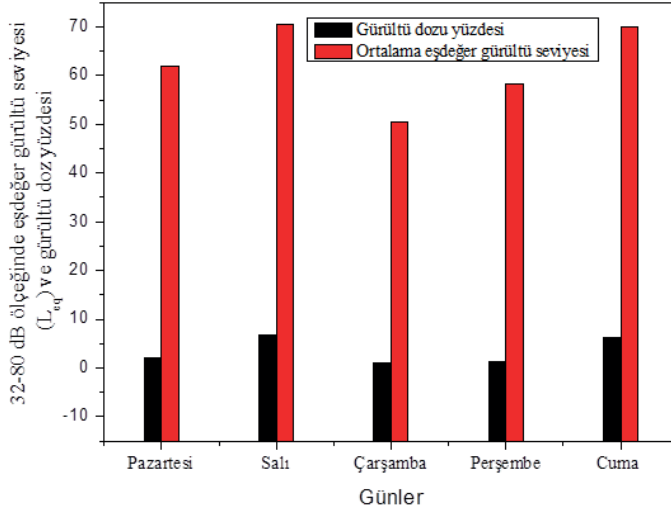


Şekil 5. 80-130 dB ölçüm aralığında ortalama dB(A) değerleri ile (L_{eq}) eşdeğer gürültü düzeyinin günlere göre değişiminin karşılaştırılması

Tablo 4. ve Şekil 5’den görüldüğü gibi 80-130 dB ölçeğinde yapılan hesaplamalarda en büyük ortalama dB(A) değerleri 97.50 dB(A) olarak Cuma günü için ölçülen değerlerden hesaplanırken, en küçük değer 91 dB(A) olarak Çarşamba günü için yapılan ölçümlerden hesaplandı. 80-130 dB ölçüm aralığı için en büyük eşdeğer gürültü seviyesi Cuma günü yapılan ölçüm değerlerinden 111.90 dB(A) olarak hesaplanırken, en küçük eşdeğer gürültü seviyesi Çarşamba günü için yapılan ölçüm değerlerinden 661.94 dB(A) olarak hesaplandı. Tablo 5’de 32-80 dB gürültü ölçeği için ortalama eşdeğer gürültü, referans süre, gürültü doz katsayısı ve doz yüzdesi değerleri verildi. Şekil 6’da 32-80 dB ölçeğinde gürültü doz yüzdesi ile L_{eq} ortalama eşdeğer gürültü seviyesinin günlere göre değişimi verildi. Doz katsayısının $D=1$ değerleri için 85 dB(A) sınır değer olarak alınmakta ve bunun değerinde %100 doz yüzdesine karşı geliyor demektir. Buna göre $L_{eq}=85+10\log_{10}(D)$ denklemi ile doz katsayılarının karşı geldiği dB(A) değerleri hesaplanabilir. 32-80 dB, 50-100 dB ve 80-130 dB gürültü ölçeklerinde haftalık ortalama eşdeğer gürültü, referans süre, gürültü doz katsayısı ve doz yüzdesi ile D ’nin karşı geldiği dB(A) değerleri Tablo 5’de verildi. 32-80 dB ölçeğinde gürültü doz yüzdesi ile ortalama eşdeğer gürültü seviyesinin günlere göre değişimi Şekil 6’da, 50-100 dB ölçeğinde gürültü doz yüzdesi ile ortalama eşdeğer gürültünün günlere göre değişimi Şekil 7’de ve 80-130 dB ölçeğinde gürültü doz yüzdesi ile ortalama eşdeğer gürültünün günlere göre değişimi Şekil 8’de verildi.

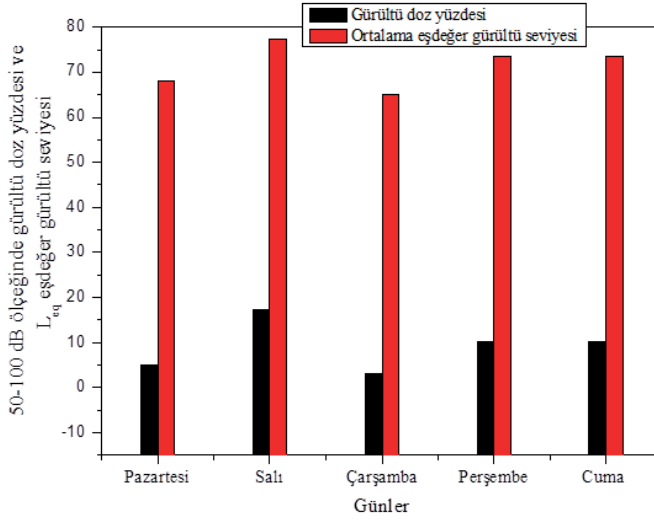
Tablo 5. Ortalama eşdeğer gürültü, referans süre, gürültü doz katsayısı ve doz yüzdesi ile D'nin karşı geldiği dB(A) değerleri

Günler →	32-80 dB gürültü ölçeği					Haftalık ortalama (C=40 saat için)
	Pa-zar-tesi	Salı	Çar-şamba	Per-şembe	Cuma	
L_{eq} dB(A)	61.94	70.68	50.62	58.33	69.96	62.31
Referans Süre, T (Sa)	391.2 6	116.48	1879.3 3	645.38	128.7	372.09
Doz katsayısı (D)	0.02	0.07	0.010	0.010	0.06	0.11
D'ye karşı gelen dB(A) değeri	68.00	73.50	65.00	65.00	72.80	75.33
Doz yüzdesi	2.040	6.87	1.13	1.24	6.22	10.80
Günler→	50-100 dB gürültü ölçeği					Haftalık ortalama (C=40 saat için)
	Pa-zar-tesi	Salı	Çar-şamba	Per-şembe	Cuma	
L_{eq} dB(A)	68.22	77.29	65.17	73.54	73.57	71.56
Referans Süre, T (Sa)	163.8 2	46.59	250.04	78.36	78.03	103.14
Doz katsayısı (D)	0.05	0.17	0.03	0.10	0.10	0.388
D'ye karşı gelen dB(A) değeri	72.65	77.37	69.87	75.65	75.65	80.88
Doz yüzdesi	4.88	17.17	3.20	10.21	10.25	38.80
Günler→	80-130 dB gürültü ölçeği					Haftalık ortalama (C=40 saat için)
	Pa-zar-tesi	Salı	Çar-şamba	Per-şembe	Cuma	
L_{eq} dB(A)	94.75	98.54	101.81	100.35	110.15	101.12
Referans Süre, T (Sa)	4.140	2.450	1.560	1.910	0.49	1.712
Doz katsayısı (D)	1.930	3.270	5.140	4.20	16.34	23.364
D'ye karşı gelen dB(A) değeri	87.90	90.20	92.10	91.20	97.10	98.68
Doz yüzdesi	193.1 9	326.71	514.08	419.89	1633.62	2336.45



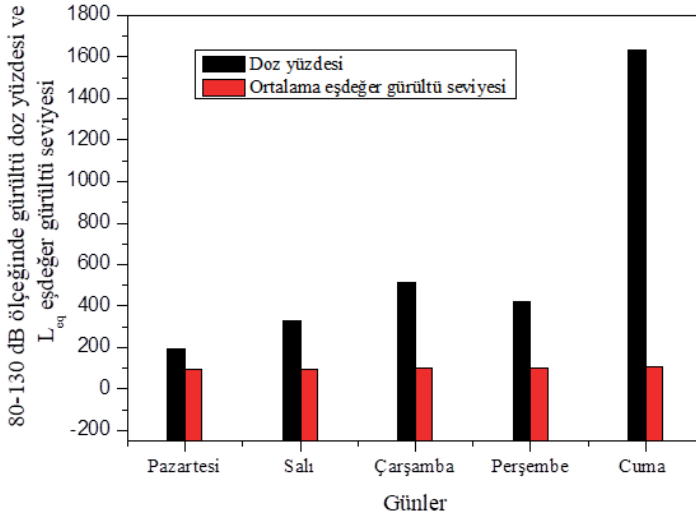
Şekil 6. 32-80 dB ölçeğinde gürültü doz yüzdesi ile ortalama eşdeğer gürültü seviyesinin günlere göre değişimi

Tablo 5 ve Şekil 6'dan görüldüğü gibi, 32-80 dB ölçeğinde yapılan gürültü ölçüm değerlerinde en büyük ortalama eşdeğer gürültü seviyesi 70.680 dB(A) olarak Salı günü yapılan ölçüm değerlerinden hesaplandı. En büyük gürültü dozu, $D=0.070$ ile doz yüzdesi de 6.87 olarak Salı günü için yapılan hesaplamalardan elde edildi. Tablo 5'den görüldüğü gibi 32-80 dB gürültü ölçeğinde haftanın tüm günleri için yapılan gürültü ölçümlerinin tüm değerleri $D<1$ olduğu için 85 dB(A) gürültü doz sınırını aşmamıştır.



Şekil 7. 50-100 dB ölçeğinde gürültü doz yüzdesi ile ortalama eşdeğer gürültünün günlere göre değişimi

Tablo 5 ve Şekil 7’den görüldüğü gibi 50-100 dB ölçeğinde yapılan gürültü ölçümlerinden yapılan hesaplamalarda en büyük ortalama eşdeğer gürültü seviyesi 77.290 dB(A) olarak Salı günü için hesaplanırken, en büyük gürültü dozu, $D=0.170$ ile doz yüzdesi 17.170 olarak da Salı günü için hesaplanmıştır. Tablo 5’den görüldüğü gibi 50-100 dB gürültü ölçeğinde haftanın tüm günleri için yapılan gürültü ölçümlerinin tüm değerleri $D<1$ olduğu için 85 dB(A) gürültü doz sınırı aşılmamıştır.



Şekil 8. 80-130 dB ölçeğinde gürültü doz yüzdesi ile ortalama eşdeğer gürültünün günlere göre değişimi

Tablo 5 ve Şekil 8’den görüldüğü gibi 80-130 dB ölçeği için yapılan ölçümlerde en büyük ortalama eşdeğer gürültü seviyesi 110.150 dB(A) olarak Cuma günü yapılan ölçüm değerlerinden hesaplandı. En büyük gürültü dozu, $D=16.340$ ile doz yüzdesi de 1633.620 olarak Cuma günü için yapılan ölçüm verilerinden tespit edildi. Tablo 5’den görüldüğü gibi 80-130 dB gürültü ölçeğinde haftanın tüm günleri için yapılan gürültü ölçümlerinin tüm değerleri $D>1$ olduğu için 85 dB(A) gürültü doz sınırı aşılmıştır. Özellikle haftalık ortalama $C=40$ saat için hesaplanan gürültü doz değeri 98.680 dB(A) oldukça büyük ve riskli bir seviyede olduğu tespit edildi. Tablo 5’den de görüldüğü gibi doz değeri arttıkça desibel değeri de logaritmik olarak artarken izin verilen süre azalmaktadır. Çevresel gürültünün değerlendirilmesi ve yönetimi ile ilgili olarak 30 Kasım 2022 yılında 32029 sayılı resmi gazetede yayınlanan yönetmeliğe göre endüstri tesisleri ve ulaşım kaynaklarının gündüz, akşam ve gece için izin verilen eşdeğer çevresel gürültü düzeyleri sırasıyla 65 dB(A), 60 dB(A) ve 55 dB(A) olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte müzik yayını

yapan işyerleri için gündüz, akşam ve gece vakitleri için izin verilen çevresel eşdeğer gürültü düzeyleri sırasıyla 60 dB(A), 55 dB(A) ve 50 dB(A) olarak tanımlanmıştır. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının 04.06.2010 tarihinde 27601 sayılı resmi gazetede yayınlatmış olduğu çevresel gürültünün değerlendirilmesi ve yönetimi yönetmeliğine göre mevcut kara yolları için çevresel gürültü sınır değerleri $L_{gündüz}$ için 65 dB(A), $L_{akşam}$ için 60 dB(A) ve L_{gece} için 55 dB(A) olarak tanımlanırken, planlanan veya yenilenmiş ya da onarılmış yollarda çevresel gürültü sınır değerlerinin $L_{gündüz}$ için 60 dB(A), $L_{akşam}$ için 55 dB(A) ve L_{gece} için 50 dB(A) olması gerektiği rapor edilmiştir. Aynı yönetmeliğe göre liman, iskele, koy, göl, boğaz, deniz ile nehir gibi yerlerde su ulaşımında kullanılan ulaşım araçlarının yaydığı çevresel gürültü seviyesi $L_{gündüz}$ için 65 dB(A), $L_{akşam}$ için 60 dB(A) ve L_{gece} için 55 dB(A) sınır değerlerini aşamayacağı rapor edilmiştir. 2002/49/EC(END) sayılı Avrupa Birliği Çevresel Gürültü direktifinde de 55 dB(A) ortalama gürültü seviyesi gündüz, akşam ve gece için rahatsızlığın başlangıç seviyesi olarak kabul etmiştir (web1, 2; WHO, 2018). Örneğin karayolu trafiği için gündüz, akşam ve gece için sınır değerler sırasıyla 55-65 dB(A), 50-60 dB(A) ve 45-55 dB(A) olarak belirlenmiştir (web1, 2; WHO, 2018). Dünya Sağlık Örgütü 2018 yılında Avrupa bölgesi için yayınladığı çevresel gürültü yönergelerinde kaynağına göre çevresel gürültü için sınır değerler tanımlanmıştır. Ancak karayolu trafiği için tanımlanan sınır değer eşdeğer gürültü seviyesinin 53 dB(A)'yı geçmemesidir (web1, 2). Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının 4 Haziran 2010'da 27601 sayılı resmi gazetede yayınlanan çevresel gürültünün değerlendirilmesi ve yönetimi yönetmeliğine göre hassas alanlarda yani hastane, okul ve konut alanlarında gündüz, akşam ve gece için limit değerler sırasıyla 60 dB(A), 55 dB(A), 50 dB(A) olarak tanımlanmıştır. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) ile Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliğine göre dersliklerde ders sırasında arka planda oluşan gürültünün 35 dB(A), okulun avlusunda, oyun ve spor

aktivitelerinin yapıldığı alanlarda ise gürültünün seviyesi için sınır değerin 55 dB(A) olması gerektiği rapor edilirken, dersliklerde pencereler açıkken iç ortamda bulunan gürültü seviyesinin 45 dB(A) olabileceğini rapor edilmiştir (Denli, 2020; Avşar ve Gönüllü, 2000; Polat, 2004).

Tablo 4 ve Tablo 5’den görüldüğü gibi Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının bu yönetmenliğe ve 2002/49/EC(END) sayılı Avrupa Birliği Çevresel Gürültü Direktifi ile tanımlanan çevresel eşdeğer gürültü sınır değerlerine göre 32-80 dB ölçeği ile 50-100 dB ölçeğinde, 5 farklı ölçüm noktasında yapılan ölçümler genel olarak sınır değerlerine çok yakın, biraz büyük ya da küçüktür. Ancak 80-130 dB gürültü ölçeğinde haftanın günleri için yapılan ölçüm sonuçları Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından tanımlanan sınır değerlerinden çok büyük ve insan sağlığı açısından riskli seviyededir. Gürültüye uzun süre maruz kalmak kalıcı ya da geçici sağırlığa neden olabilir. Ses seviyesi ne kadar yüksek ve süre ne kadar uzun olursa, işitme kaybı riski de o kadar artmaktadır (WHO, 2021; Berglund ve ark., 1999). Gürültüye bağlı olarak oluşabilen diğer bir yaygın sorun da kulak çınlamasıdır. Uzun süreli yüksek seslere maruz kalmak, insan vücudunda kortizol ve adrenalin gibi stres hormonlarının salınmasına neden olabilir; bu da uzun vadede yüksek tansiyon, kalp ritim bozuklukları ve kardiyovasküler hastalık riskini artırabilir. Gürültü, merkezi sinir sistemini etkileyerek baş ağrısı, migren ve sinir gerginliği gibi sorunlara yol açabilir. Uzun süreli gürültüye maruz kalma ayrıca kas gerginliğine, omurga rahatsızlıklarına ve kas-iskelet sistemi problemlerine de neden olabilir (Clark and Paunovic, 2018; web 3). Bunlara ek olarak gürültü insanlarda konsantrasyon eksikliği ve dikkat dağınıklığı ile sosyal ilişkilerde iletişim bozukluklarına da neden olabilir. Üstelik gürültü performans ve yaşam alanlarında genel davranış üzerinde de olumsuz etkilere neden olabilir (Doğan ve Çataltepe, 2018). Uzun süreli yüksek düzeyde gürültüye maruz kalmanın, özellikle okul çocuklarında çaresizlik duygusuna katkıda bulunabileceğine

dair endişeler bulunmaktadır (Evans ve Lepore, 1993). Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), günde sekiz saatten fazla 80 dB'den yüksek gürültüye maruz kalmanın güvenli olmadığını rapor etmiştir (Clark and Paunovic, 2018). Gürültünün insan sağlığına zarar verdiği bilindiği gibi hayvan popülasyonları üzerinde de olumsuz etkilere yol açabileceği bilinmektedir. Gürültü yabani hayvanların korkmasına ve yaşam alanlarını değiştirmelerine neden olurken, çiftlik hayvanların da fizyolojik ve etolojik nedenler sebebiyle davranış değişikliklerine neden olabilmektedir (Doğan ve Çataltepe, 2018). Yeni üretilen araçlar önceki modellere göre daha sessiz olsalar da, artan nüfusla birlikte karayolu trafiği de artmaya devam ederek gürültü seviyelerinin yükselmesine neden olmuşlardır. Birçok şehir merkezinde ve ana caddelerinde trafik sıkışıklığı son derece yüksek seviyelere ulaşmış haldedir. Bu durum, neredeyse her gün trafik sıkışıklığına neden olarak araç trafiğini ve gürültüsünü dayanılmaz hale getirmektedir (Titu ve ark., 2022). Bu nedenle, şehir merkezlerinde, caddelerde ve sokaklarda trafik gürültüsünü ve dolayısıyla etkilerini azaltmak yetkililerin öncelikli hedeflerinden biri olmalıdır. Bu hedefe ulaşmak için de şehir merkezlerindeki yol kavşaklarında kentsel yol trafiği doğru bir şekilde düzenlenmelidir. Bunun dışında yapılması gereken en önemli hedeflerden birinin de ışık kirliliği, radyasyon kirliliği, hava kirliliği, su kirliliği ve kimyasal kirlilik gibi gürültü kirliliğinin de insan sağlığı açısından en az diğer çevresel kirlilikler kadar zararlı olabileceğinin gürültüyle ilgili sağlık sorunlarının kapsamı ve ciddiyeti ilgili eğitim-öğretim kurumlarının ders programlarında yerini almalıdır.

KAYNAKLAR

- Avşar Y., ve Gönüllü, M.T., 2000. İstanbul İli Örneğinde Bazı Okullarda İç ve Dış Ortam Gürültülerinin Eğitim Kalitesi Açısından Değerlendirilmesi, GAP 2000 Sempozyumu. 16-18 Ekim 2000.
- Aletta F., 2025. Noise pollution and public health curricula: a missing link in environmental health preparedness, *Academia Global and Public Health*, 1-5.
- Basner M., Müller U., Elmenhorst E.M., 2011. Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation. *Sleep* 34,11-23.
- Basner M., Babisch W., Davis A., Brink M., Clark C., Janssen S., Stansfeld S., 2014. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *Lancet.*, 383(9925),1325-32.
- Berglund B., Lindvall T. and Schwela D.,1999. Guidelines for Community Noise. World Health Organisation, Geneva, 121.
- Basner M., Müller U., Elmenhorst E.M., 2011. Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation. *Sleep* 34,11-23.
- Basner M., Babisch W., Davis A., Brink M., Clark C., Janssen S., Stansfeld S., 2014. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *Lancet.*, 383(9925),1325-32. doi:10.1016/S0140-6736(13)61613-X.
- Brown A.L., Van Kamp I., 2017. WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review of transport noise interventions and their impacts on health. *Int J Environ Res Public Health.*,14(8), 873.
- Clark C. and Paunovic K., 2018. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Quality of Life, Wellbeing and Mental Health, *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 2400; doi:10.3390/ijerph15112400.
- Çevre ve Orman Bakanlığından, Çevresel Gürültünün, 2008. Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği (2002/49/EC), cuma resmî gazete Sayı 26809.
- Çevre ve Orman Bakanlığından, 2010. Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi Ve Yönetimi Yönetmeliği, Resmi gazete tarihi, 04.06.2010 resmi gazete sayısı, 27601.
- Doğan H., Çataltepe Ö.A., 2018. Gürültünün İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri, *Journal of Health and Sport Sciences (JHSS)*, 1(1-2-3), 29-38.

- Denli G., 2020. Ortaokullarda Gürültü Düzeyi, Gürültünün Öğrencilerin Fiziksel Ve Ruhsal Sağlığına Etkisi: Aydın İli Örneği, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Halk Sağlığı Hemşireliği Yüksek Lisans Programı, HSH-2020-0003, p.98.
- Evans G.W., and Lepore S.J., 1993. Nonauditory Effects of Noise on Children: A Critical Review 10(1), Children's Environments 31-51.
- Field, L. H., and Long, M. (2018). Introduction to agricultural engineering technology. Springer.
- Miedema H.M.E., 2001. Oudshoorn CGM. Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. Environ Health Perspect 109, 409-1
- Muzet A., 2007. Environmental noise, sleep and health. Sleep Med Rev 11, 135–42.
- Passchier-Vermeer W., Passchier W.F., 2000. Noise exposure and public health. Environ Health Perspect., 108(Suppl1), 123-31.
- Polat Z., 2011. Gürültülü Ortamlarda Çalışanlarda Görülen Psikolojik Bozuklukların Değerlendirilmesi, Çağdaş Tıp Dergisi 1(1), 11-15.
- Polat S., 2004. Gürültünün Eğitim Öğretim Ortamına Etkileri, XIII, Ulusal Eğitim Bilimleri Kurultayı, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Sørensen M., Andersen Z.J., Nordsborg R.B., et al. 2012. Road traffic noise and incident myocardial infarction: a prospective cohort study. PLoS One 7, e39283.
- Stansfeld S.A., Matheson M.P., 2003. Noise pollution: non-auditory effects on health. Br Med Bull 68, 243- 57.
- Titu A.M., Boroiu A.A., Mihailescu S., Pop A.B., and Boroiu A., 2022. Assessment of Road Noise Pollution in Urban Residential Areas—A Case Study in Pitești, Romania, Appl. Sci. 12, 1-16. doi.org/10.3390/app12084053
- Van Kempen E., Babisch W., 2012. The quantitative relationship between road traffic noise and hypertension: a meta-analysis. J Hypertens 30, 1075-86.
- WHO, 2011. Regional Office for Europe. Burden of disease from environmental noise: quantification of healthy life years lost in Europe. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2011.
- WHO, 2021. World Report On Hearing. ISBN 978-92-4-002049-8 (print version).

Web1:<https://www.health.gov.au/sites/default/files/documents/2020/02/enhanced-health-effects-of-environmental-noise.pdf>

Web2: <https://www.e-psikiyatri.com/infrases-nedir-insanlari-nasil-etkiliyor>

Web3:<https://satemmobil saglik.com/birinci-derece-gurultulerin-insan-sagligi-uzerindeki-etkileri>