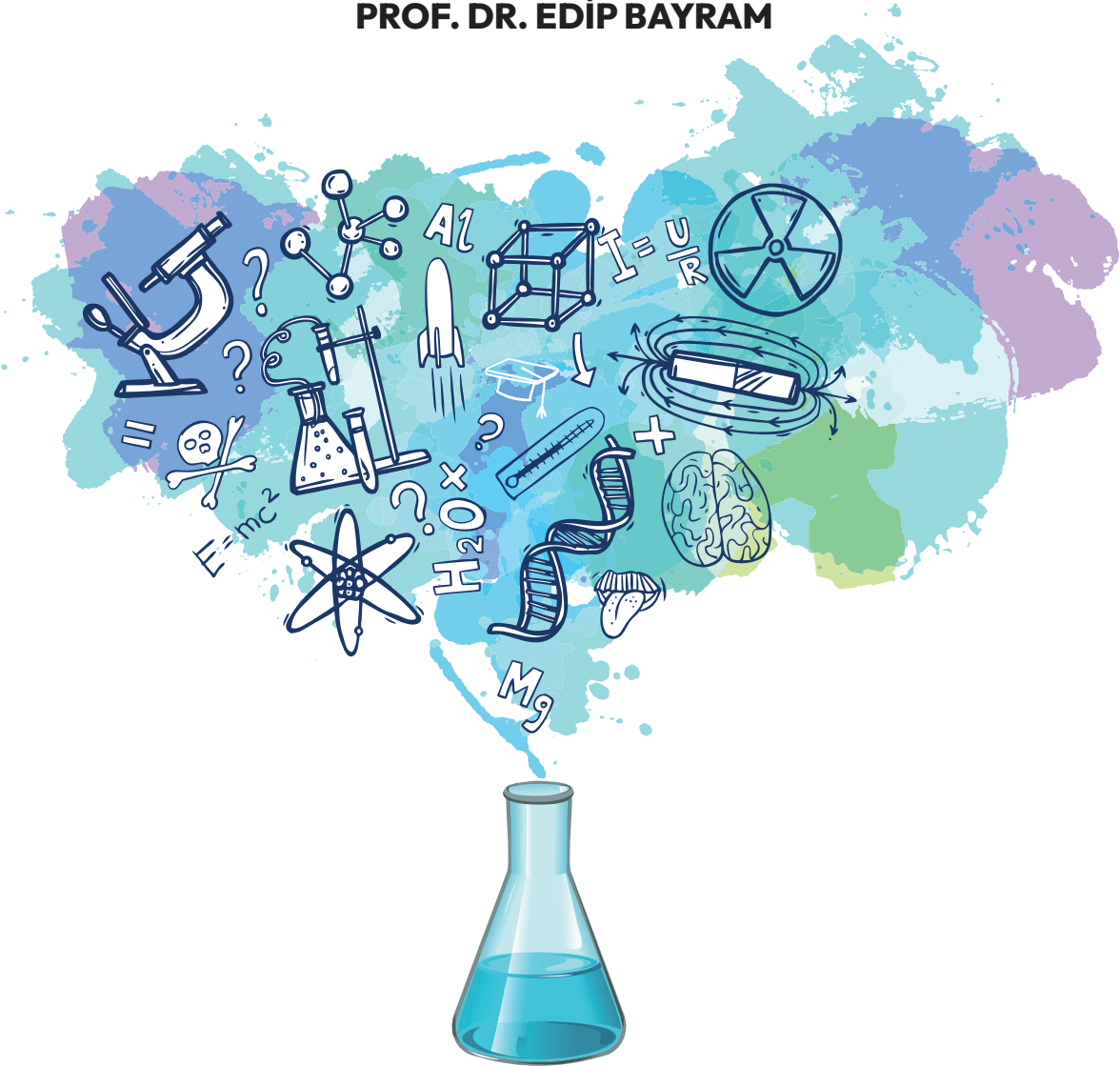


FEN VE MATEMATİK ALANINDA ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

EDİTÖRLER

PROF. DR. GÜZİDE ŞENEL

PROF. DR. EDİP BAYRAM



SERÜVEN
YAYINEVİ

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

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

Birinci Basım / First Edition • © MART 2026

ISBN • 978-625-8671-85-8

© 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.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

FEN VE MATEMATİK ALANINDA ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

EDİTÖRLER

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

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

KAR KRİSTALLERİNDEN KOZMİK PARÇACIKLARA: KUTUPLARDA FİZİK

<i>Çağın KAMIŞCIOĞLU</i>	1
<i>Kutay DOLUNAY</i>	1

BÖLÜM 2

TÜRKİYE'DE FEN EĞİTİMİNDE STEM ÇALIŞMALARININ EĞİLİMLERİ

<i>İsmail TÜRKOĞLU</i>	25
<i>Erdal CANPOLAT</i>	25
<i>Büşra GENÇ</i>	25

BÖLÜM 3

GİRESUN İL GENELİNDEKİ SU KAYNAKLARINDA TOPLAM ALFA-BETA AKTİVİTE DÜZEYLERİNİN BELİRLENMESİ

<i>Birol ERTUĞRAL</i>	49
<i>Cafer Mert YEŞİLKANAT</i>	49
<i>Yaşar KOBYA</i>	49

BÖLÜM 4

TIBBİ GÖRÜNTÜLEMEDE TARİHSEL YOLCULUK

<i>Ayşe ÇÖMÜ</i>	65
<i>Emel ECE</i>	65

BÖLÜM 5

TİYOFEN TÜREVİ AMİD BİLEŞİKLERİNİN SENTEZİ VE SPEKTRAL KARAKTERİZASYONU*

<i>Fatma Şahin</i>	81
<i>Naki Çolak</i>	81
<i>Gülnihal Erten</i>	81

BÖLÜM 6

TL- ALTYARIGRUBUN TL-Bİ İDEALİ, TL- QUASI İDEALİ VE TL- INTERİOR İDEALİ*

Emine Funda OKUMUŞ 95

Sultan YAMAK 95

BÖLÜM 7

ASFERİK, SFERİK VE YÜKSEK İNDEKSİLİ LENSLERİN OPTİK PERFORMANS AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

Şeydanur TAŞER 119

BÖLÜM 8

BUZ İÇİNDE PARÇACIK FİZİĞİ: ICECUBE NÖTRİNO GÖZLEMEVİ

Çağın KAMIŞCIOĞLU 129

Kutay DOLUNAY 129

BÖLÜM 9

ECZANE HİZMETLERİNDE ÖLÇÜM BİLİMİ: FİZİKSEL PRENSİPLER, HATA ANALİZİ VE UYGULAMALAR

Şeydanur TAŞER 141



KAR KRİSTALLERİNDEN KOZMİK PARÇACIKLARA: KUTUPLARDA FİZİK

“ ”

Çağın KAMIŞCIOĞLU¹

Kutay DOLUNAY²

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

² Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye. ktdolunay@gmail.com ORCID:0009-0006-9374-4464

1.Giriş

Dünyamızdaki kutup bölgeleri, çevresel koşulları nedeniyle uzun yıllar sadece jeofizik, meteoroloji ve iklim bilimi araştırmalarının konusu olmuştur. Ancak son otuz yıldan bu yana bu bölgelerin temel fizik ve astrofizik çalışmaları için de benzersiz doğal laboratuvarlar olduğu anlaşılmıştır. Özellikle Antarktika ve Grönland buz örtüleri, yüksek enerjili kozmik parçacıkların incelenmesi için eşsiz deneysel ortamlar sunmaktadır.

Kar ve buzun fiziksel özelliklerini inceleyen bilim dalına literatürde, “Kriyosfer Fiziği” veya daha özel anlamda “Kar Kristali Bilimi (snowflake science)” denilmektedir. Bu alan, buz kristallerinin mikroyapısı, faz davranışı, yoğunluk değişimleri, optik özellikleri ve çevresel koşullara bağlı olarak gelişen morfolojik yapılarını incelemeyi kapsamaktadır. Kar kristallerinin hekzagonal simetrisi, buzun farklı fazlarının sıcaklık–basınç diyagramı üzerindeki dağılımı ve buz içindeki safsızlıkların dağılımı gibi mikroskobik özellikler, sadece atmosferik süreçler açısından değil, elektromanyetik dalgaların madde içindeki yayılımı açısından da belirleyici olmaktadır. Özellikle saf ve kalın buz kütleleri, ışığın saçılması ve soğurulması bakımından oldukça özgün optik özellikler sergilemektedir. Bu özellikler parçacık fiziği için önemli bir çalışma alanı olmaktadır

Kutup buzunun optik ve yapısal özellikleri, yüksek enerjili parçacık fiziğinde nötrinoların keşfi için aktif bir algılama ortamı oluşturmaktadır. Bilindiği gibi elektriksel olarak yüksüz ve madde ile son derece zayıf etkileşen nötrinoların tespiti, modern astrofiziğin en büyük deneysel zorluklarından biridir. Nötrinoların madde ile nadir gerçekleşen etkileşimleri sonucunda oluşan yüklü parçacıklar, ortam içinde ışık hızından daha düşük ancak ortamın faz hızından daha yüksek hızlarla hareket ettiklerinde Çerenkov ışıması üretmektedirler. Derin, berrak ve optik olarak iyi karakterize edilmiş buz kütleleri, bu ışıının kilometre ölçeğinde gözlenebilmesini mümkün kılmaktadır. Bu anlayışla Antarktika’da kurulan IceCube Nötrino Gözlemevinde, buzun doğal bir dedektör hacmi olarak kullanıldığı en büyük astrofizik deneyleri yapılmaktadır. Bu dedektörün performansı; buzun optik saçılma uzunluğu, soğurma katsayısı, yoğunluk profili ve mikroyapısal heterojenlikleri gibi doğrudan kriyosfer fiziğiyle ilişkili parametrelere bağlı bulunmaktadır. Dolayısıyla kar ve buzun fiziksel özellikleri sadece çevre bilimlerinin değil, parçacık etkileşimlerinin yeniden yapılandırılması, enerji tayini ve olay sınıflandırması gibi temel dedektör fiziği problemlerinin de merkezinde yer almaktadır (Aartsen vd., 2018).

Bu çalışmada, kutup bölgelerindeki kar ve buz fiziği ile yüksek enerjili nötrino astrofiziği arasındaki disiplinler arası ilişki ele alınmaktadır. Önce kar kristallerinin mikroyapısı ile buzun makroskobik optik davranışı üzerinde durulmakta, ardından nötrino etkileşimlerinin deneysel olarak gözlenmesi incelenmektedir. Böylece kriyosfer biliminin, evrenin en enerjik ve en uzak

kaynaklarının araştırılması açısından da temel bir rol oynadığı ortaya konulmaktadır.

1.1.Güneş Sisteminin Doğal Buz Laboratuvarları

Parçacık fiziğinde evrenin gizemli parçacıklarını anlamak için her zaman uzayın derinliklerine bakmak gerekmez. Bazen aranan cevap ayaklarımızın altındaki donmuş kar ve buzlarda saklıdır. Bu nedenle güneş sisteminin doğal buz laboratuvarları olan kutuplar önemli araştırma ortamları olmaktadır. Gezegenimizin kutuplarını kaplayan devasa buz kütleleri, sıradan birer iklimsel örtü olmanın çok ötesindedir. Onlar, atmosferik ve termodinamik gürültünün sustuğu yeryüzündeki en uzak bölgelerdir. Aynı zamanda kozmik sinyalleri yakalayan kilometrelerce büyüklükteki mercekler ve güneş sisteminin dış yörüngelerindeki buzlu dünyaları canlandıran eşsiz doğal laboratuvarlardır. Bu nedenle parçacık fiziği açısından buz durağan bir madde olarak değil, astrofiziksel, reolojik ve dinamik bir makroskobik sistem olarak ele alınmakta, donmuş suyun ardındaki fiziğin incelemesini içermektedir.

1.2.Kutupların Fiziksel Eşsizliği

Kutuplar, son yıllarda önemli bilimsel araştırmaların yapıldığı bölgelerdir. Parçacık fiziği açısından doğal bir laboratuvar olmaktadır. Bilindiği gibi bilimsel gözlemlerin en hassas yönü, incelenen sinyalin ortam gürültüsüne, yani Sinyal-Gürültü Oranına (SNR) bağlı olmasıdır. Dünyamızdaki kutup bölgeleri, özellikle Antarktika kıtası, jeofiziksel ve atmosferik parametrelerin uç değerlerde seyretmesi nedeniyle sinyal gürültüsünü almayı kolaylaştıran yeryüzündeki en eşsiz doğal laboratuvardır. Bu fiziksel eşsizlik üç önemli kriterle tanımlanmaktadır. Bunlar atmosferik kararlılık, termodinamik sessizlik ve manyetik geçirgenlik olmaktadır.

İlk kriter, kutuplardaki atmosferik kararlılıktır. Antarktika atmosferi optik ve kızılötesi gözlemler için rakipsiz bir atmosferik görüş kalitesi sunmaktadır. Orta enlemlerdeki gözlemevlerinde atmosferik türbülans kilometrelerce yüksekliğe ulaşırken, Antarktika platosunda güçlü yüzey sıcaklık terselmesi nedeniyle türbülanslı sınır tabaka genellikle yüzeyden itibaren yalnızca 20-30 metre yükseklikte kalmaktadır (Storey, 2005). Bu durum adaptif optik sistemlerinin performansını artırarak, yeryüzünden uzay kalitesinde görüntü alınmasını mümkün kılmaktadır. Buna ek olarak çok düşük olan sıcaklıklar atmosferin su tutma kapasitesini azaltmaktadır. Bu durum yoğunlaşabilir su buharı (Precipitable Water Vapour-PWV) miktarını en aza indirerek, atmosferi kızılötesi ve milimetre altı dalga boylarında şeffaf hale getirmektedir. Böylece uzay kalitesinde görüntü almak kolaylaşmaktadır.

İkinci önemli kriter, ortamın termodinamik durumu, yani termodinamik sessizliktir. Kutuplarda ortalama -60°C 'nin altına düşen yüzey ve atmosfer sıcaklıkları, Planck Yasası gereği, çevresel termal ışımayı ciddi olarak azalt-

maktadır. Özellikle kızılötesi astronomi için gökyüzü parlaklığının minimum olduğu bu koşullar, “Dünya’nın en karanlık gökyüzü” olarak nitelendirilmekte ve kozmik arka plan ışımasının hassas ölçümlerinde termal gürültüyü en aza indirmektedir (Storey, 2005). Bu durum araştırmalarda sinyal gürültülerini almayı kolaylaştırmaktadır.

Üçüncü kriter olarak, kutupların jeomanyetik topolojisi, parçacık fiziği deneyleri için stratejik bir avantaj sağlamasıdır. Ekvatorial bölgelerde güçlü olan jeomanyetik kesim sertliği (geomagnetic cutoff rigidity), kutup bölgelerinde manyetik alan çizgilerinin yüzeye dik girmesi nedeniyle neredeyse sıfıra inmektedir. Bu durum dünyanın manyetik kalkanında bir açıklık yaratarak, kozmik ışınların ve güneş rüzgârı kaynaklı plazmanın atmosferin derinliklerine kadar engelsizce ilerlemesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle IceCube gibi deneyler, sadece nötrinoları değil, aynı zamanda bu manyetik huniden giren kozmik ışınların atmosferde oluşturduğu kozmik ışın yağmurlarını yüksek hassasiyetle inceleyebilmektedir. Sonuç olarak yukarıda sıralanan üç özellik nedeniyle kutuplar parçacık fiziği araştırmalarına fiziksel yönden eşsiz ortamlar sağlamaktadır (Resconi, 2009).

2. Kriyosfer Bilimi

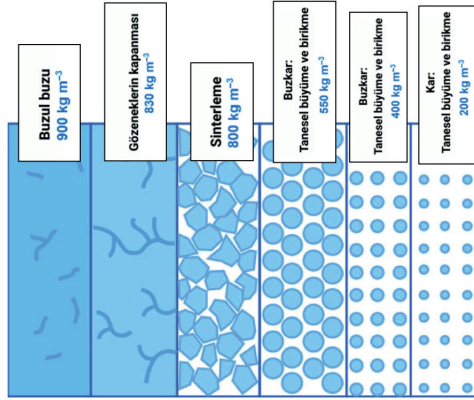
Kutuplar denilince ilk akla gelen kriyosfer bilimi olmaktadır. Kriyosfer” kelimesi, Yunanca soğuk anlamında kullanılan “kryos” kelimesinden gelmektedir (Erenel & Caymaz, 2021). Kriyosfer, katı yağış, kar, deniz, göl ve nehir buzları, buzdağları, buzullar, buz tabakaları, buz rafları, donmuş toprak vb. içeren dünya iklim sisteminin bir parçasıdır. Kriyosfer gezegenin neredeyse her yerinde bulunmaktadır. Örneğin Kuzey Kutbu, Güney Kutbu ve dağlık bölgeler dışındaki yaklaşık 100 ülkede, çoğu enlemde, mevsimsel olarak veya yıl boyunca görülmektedir. Tüm gezegenin iklimini etkilemektedir. Kriyosfer, aynı zamanda mevsimsel kar örtüsü, buzullar, donmuş toprak, göl veya nehirlerdeki buz da dahil olmak üzere, suyun donmuş halde bulunduğu dünya bölgelerini ifade etmektedir. Yani hem iklim sistemi hem de bölge anlamında kullanılmaktadır. Ayrıca Kriyosfer, coğrafi bir haritalamanın ötesinde; gezegenin enerji bütçesini depolayan devasa bir termodinamik sistem ve bünyesinde karmaşık fiziksel süreçler barındıran bir ortamdır. Bu ortamı anlamak, yalnızca iklimsel değişimleri modellemek için değil, buzun içerisine kurulan yüksek enerjili parçacık dedektörlerinin arka plan davranışlarını saptamak için kritik bir önem taşımaktadır.

2.1. Buzul Nedir?

Buzul, kendi ağırlığıyla sıkıştırılmış ve yerçekiminin etkisiyle hareket etmeye başlayan kalıcı bir buz kütesidir. Bu buzul kütleleri, kar yağdığında ve buza dönüşecek kadar uzun süre biriktiğinde oluşmakta ve bu süreç yıllarca sürmektedir. Buzul oluşumunu birçok faktör etkilemekte ve buzun oluştuğu rakıma, iklime ve topografyaya bağlı olarak farklı buzul türleri oluşmaktadır.

Dünya genelinde yaklaşık 650.000 kilometrekarelik bir alanı kaplayan 160.000 buzul olduğu tahmin edilmektedir. Bunlara buzul buzu denilmekte, araştırmalarda malzeme ve termodinamik sistem olarak kullanılmaktadır.

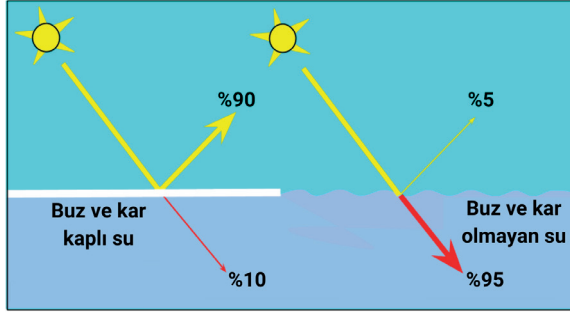
Jeofiziksel ve malzeme bilimi perspektifinden buzul buzu, yeryüzünde erime noktasına en yakın derecelerde bulunan, doğal yollarla oluşmuş polikristalin metamorfik bir kayaç olarak sınıflandırılmaktadır (Hooke, 2005; Cuffey & Paterson, 2010). Yüzeye düşen kar tanelerinin, zamanla üzerlerinde biriken yeni katmanların artan hidrostatik basıncı altında sıkışarak oluşan buzuldaki birleşme süreci, malzeme mühendisliğindeki “sinterleme” mekanizması ile aynı fiziksel temele dayanmaktadır. Bu sıkışma evresinde kar kristalleri, önce kristal sınırlarının birbirine kaynaştığı ve hava boşluklarının daraldığı gözenekli bir ara form olan buzkar (firn) yapısına dönüşmektedir. Şekil 1’de de görüldüğü gibi, sinterleme süreci derinlik arttıkça devam etmekte ve nihayetinde birbirine bağlı hava kanallarının tamamen kapandığı, yüksek yoğunluklu buzul buzu halini almaktadır.



Şekil 1: Sinterleme (Polarpedia, 2026) Firn sayfasındaki görselden uyarlanmıştır.)

Bu metamorfik malzemenin gezegensel ölçekteki en kritik rolü, sahip olduğu yüksek termal kapasite ve faz değiştirme entalpisidir. 1 kilogram suyun katı fazdan sıvı faza geçmesi için gereken gizli erime ısısı yaklaşık 334 kJ/kg gibi son derece yüksek bir değere sahiptir. Kriyosferin sahip olduğu bu muazzam ısı atalet, buz kütlelerinin atmosferik sıcaklık değişimlerine anlık değil, binlerce yıllık dönemlerle tepki vermesini sağlamaktadır. Bu da buzlu Dünya’nın en büyük iklimsel kalkını ve tarihsel bir hafıza kapsülü yapmaktadır. Öte yandan kriyosfer, yeryüzünün ışınlam kaynaklı enerji transferini Albedo parametresi üzerinden doğrudan kontrol etmektedir. Taze kar örtüsü, üzerine düşen kısa dalga boylu güneş radyasyonunun yaklaşık %90’ını uzaya yansıtarak güçlü bir soğutma etkisi yaratmaktadır. Ancak buzun erimesiyle açığa çıkan sıvı okyanus suyunun albedosu 0,05 seviyelerine kadar düşmekte, yani aynı radyasyonun yalnızca %5’ini

yansıtılmaktadır. Şekil 2’de yer alan bu dramatik optik değişim, sistemin çok daha fazla termal enerji soğurmasına yol açarak buzul erimesini hızlandıran ve fiziksel bir döngü olan pozitif geri besleme mekanizmasını tetiklemektedir. Kısaca ısınma erimeyi, erime de ısınmayı hızlandırmakta, bu durum kutupların küresel ısınmadan Dünyadaki diğer bölgelerden daha hızlı etkilenmesine yol açmaktadır. Bu olgudan 4. bölümde detaylıca bahsedilecektir.



Şekil 2: Albedo Etkisi (ArcticNews, 2026) Albedo sayfasındaki görselden uyarlanmıştır.

2.2. Buzul Reolojisi ve Akış Kinetiği

Kriyosfer biliminde buz, statik ve durağan bir kütle olarak değil; uygulanan stres ve zaman ölçeğine bağlı olarak dinamik davranışlar sergileyen viskoelastik bir malzeme olarak ele alınmaktadır. Kısa zaman ölçeklerinde ve ani gerilmelerde kırılğan bir katı gibi davranan buzul buz, kendi hidrostatik ağırlığı altında yüzyılları bulan uzun periyotlarda “sünme” adı verilen sürekli bir plastik deformasyon ve akış göstermektedir (Cuffey & Paterson, 2010; Hooke, 2005). Bu deformasyon, kristal içindeki atom düzlemlerinin kopmadan birbirleri üzerinden kayması prensibine dayanmaktadır. Polikristalin buzun bu akış kinetiği Glen Akış Yasası ile modellenmektedir. Bu yasa, malzemenin şekil değiştirme hızı (ϵ) ile üzerine etki eden kayma gerilmesi (τ) arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi şu şekilde tanımlar (Cuffey & Paterson, 2010):

$$\epsilon = A\tau^n$$

Burada “A”; buzun sıcaklığına, kristal yapısına ve içerdiği safsızlıklara bağlı olan akışkanlık parametresidir. Bu parametre Arrhenius denklemine uygun davranarak, buzun sıcaklığı erime noktasına yaklaştıkça artmakta, kutuplardaki gibi çok düşük sıcaklıklarda ise buzun mekanik olarak son derece sert bir karakter sergilemesine neden olmaktadır.

Denklemdaki en kritik bileşen olan “n” malzemenin uygulanan kuvvete karşı gösterdiği direncin sabit mi kaldığını, yoksa kuvvet arttıkça malzemenin karakter mi değiştirdiğini belirleyen gerilme üssüdür. Laboratuvar ve saha gözlemlerine göre buzul buz $n \approx 3$ ortalama değerini almaktadır (Hooke, 2005; Leppäranta & Uotila, 2025).

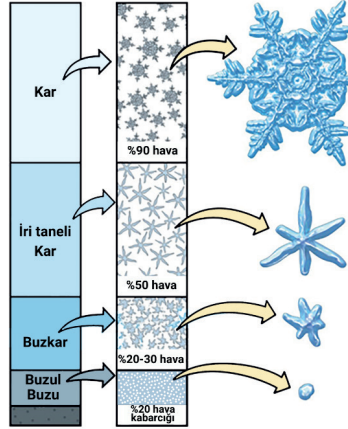
Buzun $n \approx 3$ kuvvet yasasına uyması, onun Newtonyen olmayan, psödoplastik bir akışkan olduğunu kanıtlamaktadır. Bu fiziksel gerçeklik, buzı iten kayma gerilmesindeki iki katlık bir artışın, akış hızında sekiz katlık (2^3) dev bir ivmelenmeye neden olacağı anlamına gelmektedir. Bu reolojik karakter, kutup buzullarını durağan bir zeminden ziyade, derinliğe ve taban topoğrafyasına bağlı olarak farklı hızlarda akan devasa bir viskoelastik yeraltı nehrine dönüştürmektedir (Cuffey & Paterson, 2010).

Bu akış kinetiği, yüksek enerjili parçacık astrofiziği deneyleri için hem bir arka plan problemi hem de aşılması gereken sürekli bir mühendislik ve kalibrasyon zorluğudur. IceCube Nötrino Gözlemevi gibi derin buza gömülü kilometrelerce uzunluktaki dedektör dizilimleri sabit bir zemin içinde değil, Glen Yasası'na uygun olarak yılda metrelerce okyanusa doğru kayan ve deforme olan bir kütlenin içindedir. Buzun derinliğe bağlı olarak değişen diferansiyel kayma gerilmeleri dedektör kablolarını mekanik olarak bükümekte, germekte ve üzerindeki optik modüllerin üç boyutlu uzaysal koordinatlarını sürekli olarak değiştirmektedir (Resconi, 2009). Nötrino etkileşimlerinden doğan Çerenkov fotonlarının geliş yönlerinin nanosaniye hassasiyetinde ölçülerek olayın simüle edilebilmesi için buzun bu viskoelastik akışının matematiksel olarak modellenmesi gerekmektedir.

2.3. Buzun Yapısı ve Optik Safılık

Sığ derinliklerdeki buzul buz, optik spektrumunda oldukça opak bir yapı sergilemektedir. Bunun temel nedeni, buzulun buz kara dönüşüm (firnification) sırasında atmosferden hapsolan mikroskobik hava kabarcıklarının yarattığı güçlü optik saçılma etkisidir. Ancak yüksek enerjili parçacık dedektörleri için gereken kilometre ölçeğindeki optik geçirgenlik, buzulun derinliklerinde gerçekleşen büyük faz geçişi ile sağlanmaktadır.

Antarktika platosunda yaklaşık 800 ila 1000 metre derinliğe inildiğinde, üstteki devasa kütlenin yarattığı hidrostatik basınç kritik bir termodinamik eşiği aşar. Şekil 3'te görülebileceği üzere, bu muazzam basınç altında hava kabarcıkları ezilerek fiziksel formunu kaybeder ve içlerindeki gaz molekülleri, su moleküllerinin oluşturduğu kristal kafesin içerisine hapsedilir. Oluşan bu yeni katı faza klatrat hidrat adı verilmektedir (Cuffey & Paterson, 2010; Lepäranta & Uotila, 2025). Kabarcıkların klatrat hidratlara dönüşerek makroskobik ölçekte ortadan kalkmasıyla, buz içindeki optik saçılma merkezleri de yok olmaktadır. Bu yapısal evrim, derin buz görünür dalga boylarında camdan bile daha şeffaf hale getirerek optik saflığını eşsiz bir boyuta taşımaktadır. Bu olağanüstü optik saflık, IceCube Nötrino Gözlemevi gibi devasa dedektörlerin Çerenkov ışımasını kilometre ölçeğinde devasa bir hacimde tespit edebilmesini sağlamaktadır.



Şekil 3: Basınç Etkisiyle Buzun Değişimi (Antarcticglaciers, 2026) sayfasındaki görselden uyarlanmıştır.

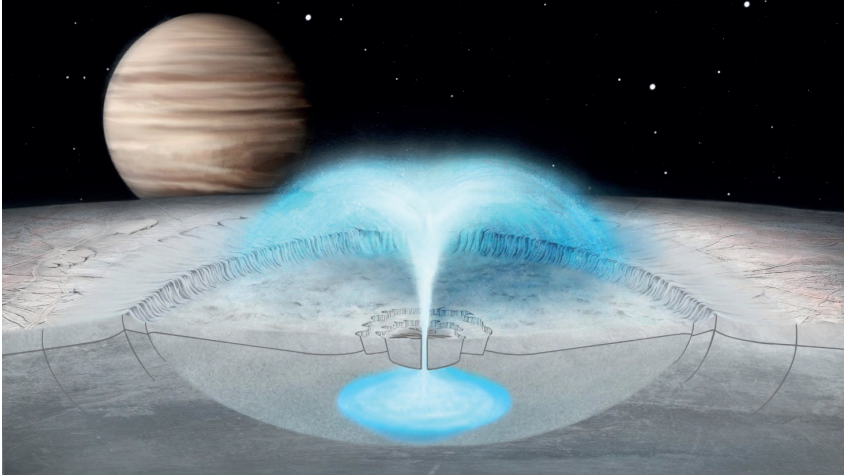
Diğer taraftan viskoelastik akış kinetiği, buzun mikroskobik kristalografisini doğrudan etkilemektedir. Başlangıçta rastgele yönelimli olan buz kristalleri, uygulanan kayma gerilmesi altında bozuldukça, kristallerin ana eksenleri akış yönüne bağlı olarak hizalanmaya başlamaktadır (Hooke, 2005). Malzeme biliminde doku olarak adlandırılan bu kristalografik hizalanma, devasa buzul kütlelerinin optik olarak yöne bağımlı davranmasına yol açmaktadır.

Altıgen buz kristali doğası gereği optik olarak çift kırıcıdır. Yani ışığın ilerleme hızı kristal eksenine göre değişmektedir. Kristallerin doku oluşturarak hizalanması, bu anizotropik etkiyi tüm buzul bloğuna yaymaktadır. Nötrino astrofiziği açısından bu durum, algılanan Çerenkov fotonlarının buz içinde doğrusal ilerlemeyip yönlerine göre bükülmesine ve saçılmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla sinyalin kaynağını ve enerjisini doğru hesaplayabilmek için buzun bu anizotropik dokusunun, yüksek hassasiyetli Monte Carlo simülasyonları ve gelişmiş algoritmalar ile haritalanması gerekmektedir (Yuan, 2023).

2.4. Gezegenlerde Durum

Dünya'daki kriyosferik süreçler, yalnızca gezegenimizin kendi iklimsel ve optik dinamiklerini anlamak için değil, aynı zamanda Güneş Sistemi'nin dış yörüngelerindeki "Buz Dünyaları" olarak bilinen gök cisimlerini incelemek için de eşsiz bir doğal laboratuvar işlevi görmektedir. Özellikle Jüpiter'in uydusu Europa ve Satürn'ün uydusu Enceladus, kilometrelerce kalınlıkta buz kabuklarına ve bu kabukların altında devasa yeraltı sıvı okyanuslarına sahiptir. Antarktika platosunun aşırı soğuk, yüksek basınçlı ve radyasyona maruz kalan ortamı ile kilometrelerce derinlikteki buzul altı gölleri, bu uzak dünyaların jeofiziksel ve astrobiyolojik koşullarını yeryüzünde simüle eden en mükemmel dünyasal analoglar olarak kabul edilmektedir (Priscu vd., 1999).

Buzul reolojisi ve Glen Yasası, yalnızca Dünya'ndaki buzul akışlarını değil, aynı zamanda bu buzlu uyduların kabuk dinamiklerini de yöneten evrensel mekanik yasalardır. Europa'nın yüzeyinde gözlemlenen ve tüm gezegeni saran devasa çatlaklar ile buz kabuğunun tektonik deformasyonu, Dünya'daki buzul mekaniği temel alınarak açıklanmaktadır (Pappalardo vd., 1999). Benzer şekilde, Enceladus'un güney kutbundan uzaya püsküren su gayzerlerinin keşfi, Dünya'daki magmatik süreçlerin buzlu gök cisimlerindeki fiziksel karşılığı olan kriyovulkanizmanın en net kanıtıdır (Porco vd., 2006). Şekil 4'teki bu olay, buzun altındaki basınçlı sıvı suyun, gelgit ısınması ve hidrostatik gerilmeler etkisiyle yüzeyi kırarak uzaya fışkırmasıdır. Dolayısıyla, Antarktika buzunun deformasyon kinetiğini ve kırılma mekaniklerini anlamak, astrofizikçiler için diğer gezegenlerdeki buzul tektoniğini modellemenin temel anahtarı olmaktadır.



Şekil 4: Kriyovulkanizma (Scitechdaily, 2026).

Kriyosfer fiziğinin bu evrensel boyutu, gezegen biliminin en büyük odak noktalarından biri olan astrobiyolojik potansiyelle de doğrudan kesişir. Eğer Europa veya Enceladus'un yeraltı okyanuslarında ekstremofil (aşırı koşullara dayanıklı) bir mikrobiyal yaşam mevcutsa, bu organizmalara veya onların ürettiği biyolojik imzalara dair kimyasal kanıtlar, buz kabuğunun tabanındaki donma-çözülme döngüleri sırasında buzun içine hapsolacaktır. Vostok Gölü üzerindeki yığılma buzlarında keşfedilen mikroorganizmaların gösterdiği gibi, buz kabuğu olası bir biyolojik aktivitenin izlerini dondurarak muhafaza eden kusursuz bir kriyosferik kapsül görevi görür (Priscu vd., 1999). Bu bağlamda, Dünya buzullarında hapsolmuş mikrobiyal yaşamın buza olan optik etkilerinin araştırılması, NASA'nın Europa Clipper gibi gelecek uzay misyonlarında astrobiyolojik yaşam arayışının optik ve spektroskopik olarak nereye ve nasıl odaklanması gerektiğini belirleyen en önemli referans noktasıdır (Howell & Pappalardo, 2020). Makroskobik ölçekte incelediğimiz bu eşsiz ortamın temel

yapı taşı olan kar kristallerinin kuantum ve moleküler seviyedeki serüvenini anlamak için, şimdi yüzeydeki kar kristallerine ait mikroskobik fiziğe ve kristalografi yasalarına inmemiz gerekmektedir.

Sonuç olarak, Dünya'nın kriyosferi yalnızca gezegenimizin iklimsel süreçlerini anlamak için değil, aynı zamanda Güneş Sistemi'ndeki buzlu gök cisimlerinin jeofiziksel ve astrobiyolojik dinamiklerini incelemek için de benzersiz bir doğal laboratuvar sunmaktadır. Antarktika'daki aşırı koşullar ve buzul altı gölleri, Europa ve Enceladus gibi buz kabuklu uyduların ortamlarına güçlü bir dünyasal analog oluşturarak buz deformasyonu, kriyovulkanizma ve olası mikrobiyal yaşamın izleri hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu nedenle kriyosfer süreçlerini anlamak, hem gezegen bilimi hem de astrobiyoloji açısından kritik bir öneme sahiptir ve bu süreçlerin temeli, kar kristallerinin mikrofiziksel ve kristalografik oluşum mekanizmalarında yatmaktadır.

3. Kar Kristallerinin Oluşumu ve Yapısı

Gökyüzünden yeryüzüne süzülen bir kar kristali, basitçe donmuş bir su kütlesi değil; termodinamik yasaların, akışkanlar dinamiğinin ve kuantum mekaniğinin milimetrik ölçekte sergilediği kusursuz bir mimaridir. Bu başlık altında su buharının atmosferdeki karmaşık yolculuğu, nasıl o eşsiz altıgen formlara dönüştüğü ve bu mikroskobik kristallerin içinden geçtikleri gökyüzünün termodinamik hafızasını nasıl taşıdıkları fiziksel bir perspektifle ele alınmaktadır.

3.1. Su Buharından Kafes Yapıya

Atmosferde kar kristalinin oluşumu basit bir donma olayından ibaret değil, oldukça spesifik termodinamik bariyerlerin aşıldığı karmaşık bir faz geçiş sürecidir. Sanılanın aksine, bulut içindeki saf su damlacıkları 0°C'ye ulaşma anında donmazlar. Klasik termodinamik; sistemin yeni bir faz sınırı, yani yeni bir yüzey yaratmaya karşı gösterdiği direnç nedeniyle, saf suyun -40°C'ye kadar "aşırı soğumuş" sıvı fazda kalabileceğini söyler. Bir buz embriyosunun kendi kendine oluşabilmesi, Gibbs serbest enerjisi denklemindeki hacimsel serbest enerji düşüşünün, yaratılan yeni yüzey enerjisini yenebilmesine bağlıdır (Pruppacher & Klett, 2010). Atmosferde bu termodinamik bariyerin aşılması havadaki toz, volkanik kül veya biyolojik aerosoller gibi yabancı bir partikülün devreye girmesiyle gerçekleşir. Bu partiküller, su moleküllerine tutunacakları hazır bir yüzey sunarak aktivasyon enerjisi bariyerini dramatik ölçüde düşürür ve "heterojen çekirdeklenme" adı verilen süreçle -5°C ila -15°C gibi daha ılıman sıcaklıklarda ilk buz kristalinin doğabilmesini sağlar (Pruppacher & Klett, 2010).

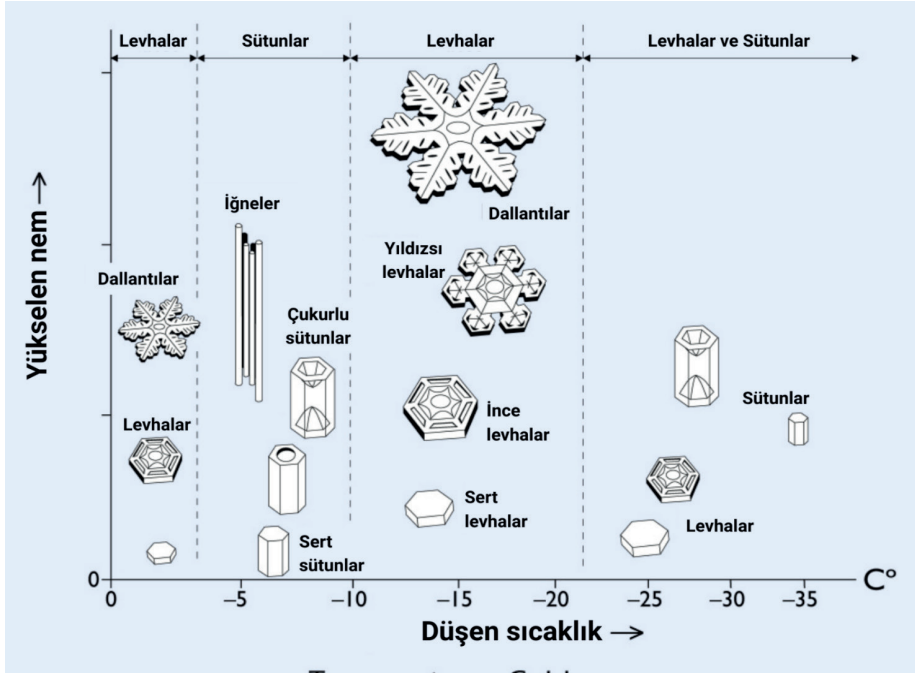
Çekirdek oluştuktan sonra kristalin büyümesi, sıvı damlacıkların donarak kristale eklenmesiyle değil, ortamdaki su buharının doğrudan katı faza geçtiği kırağlaşma süreciyle devam eder. Kristalin etrafındaki havanın aşırı doygun-

luk seviyesi, bu büyümenin ana motorudur. Ancak buhar molekülleri kristale çarptığında anında rastgele dondurulmazlar; yüzey difüzyonu adı verilen kuantum-mekaniksel bir arayışa girerler. Bir su molekülü, enerjisini minimize edebilmek için en çok hidrojen bağı kurabileceği atomik basamaklara veya kırıklara göç eder. Bu yüzey kinetiği, kristalin temel yapısının neden her zaman kusursuz ve pürüzsüz altıgen yüzeyler inşa etme eğiliminde olduğunu açıklar (Libbrecht, 2005). Ancak gökyüzünden mükemmel altıgen plakalar yerine dallanıp budaklanmış dallantılı (dendritic) kar tanelerinin düşmesinin ardından akışkanlar dinamiğindeki en estetik etkilerden biri yatar. Kristal büyüdükçe etrafındaki su buharını tüketerek nemi az olan bir bölge yaratır ve bu nedenle uzaktaki su moleküllerinin kristale doğru yayılması gerekir. Altıgen yapının dışı doğru çıkıntı yapan altı köşesi, nemli havaya yüzeylerden daha fazla nüfuz ettiği için daha fazla su molekülü yakalar. Köşeler uzadıkça avantajları daha da artar ve düz yüzey yapısı bozularak kristal köşelerinden patlayıp dallanmaya başlar. “Difüzyon-sınırlı büyüme” olarak bilinen bu fenomen, literatürde Mullins-Sekerka Kararsızlığı ile modellenir (Langer, 1980; Libbrecht, 2005). Son olarak, bu geometrik büyüme tek taraflı bir kütle transferinden ibaret değildir. Su buharı yüksek enerjili gaz fazından düşük enerjili katı kafese geçerken, termodinamiğin birinci yasası gereği açığa “gizli ısı” çıkarır. Kristalin ısınarak kendi büyümesini durdurmasını engellemek için, açığa çıkan bu ısının da kristalden uzaklaşarak havaya difüze olması şarttır. Dolayısıyla bir kar kristalinin o eşsiz ve tekrarlanamaz nihai formu; su buharının içeri girmesi ve gizli ısının dışarı atılmasıyla oluşan bu “çifte difüzyon” probleminin atmosferik koşullardaki anlık çözümüdür (Libbrecht, 2005).

3.2. Kristal Tipolojisi ve Nakaya Diyagramı

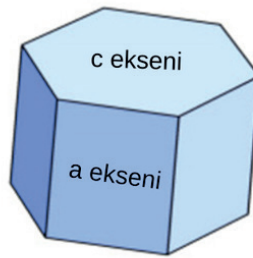
Kar kristallerinin oluşumu ilk bakışta karmaşık gibi görünse de büyüme süreci tamamen termodinamik yasalara bağlıdır. Bu kaosu sistematik bir fiziksel çerçeveye oturtan kişi Japon fizikçi Ukichiro Nakaya’dır. 1930’larda Hokkaido Üniversitesi’nde sıcaklık ve nemin birbirinden bağımsız kontrol edilebildiği bir konveksiyon odası inşa etmiştir. Nakaya, çekirdeklenme yüzeyi olarak malzemenin kendi termal iletkenliği ile kristalin ısı difüzyonunu bozmayacak kusursuz bir yalıtkan olan tavşan tüyünü kullanmış ve tarihteki ilk yapay kar kristalini bu tüyün ucunda üretmiştir (Nakaya, 1954). Nakaya’nın bu üstün deneysel mühendisliği, kar tanesinin pasif bir buz kütlesi olmadığını; içinden geçtiği atmosferin termodinamik özelliklerini kendi yapısına kaydeden bir veri depolama aygıtı olduğunu kanıtlamıştır. Bu tarihi vizyonunu, bilim dünyasında yankı uyandıran o meşhur sözleriyle özetlemiştir: “Kar kristalleri, gökyüzünden gönderilen mektuplardır.”

Nakaya’nın binlerce deneysel veriyi birleştirerek oluşturduğu Şekil 5’teki diyagram, kristalin nihai şeklinin temel olarak iki atmosferik parametreye bağlı olduğunu gösterir.



Şekil 5: Nakaya Diyagramı (Snowcrystals, 2026) sayfasındaki görselden uyarlanmıştır.

Diyagramın yatay eksenini oluşturan sıcaklık, kristalin temel geometrisini belirler. Sıcaklık düştükçe, su moleküllerinin kristalin Şekil 6'da görünen a-eksenine (yanlara) veya c-eksenine (yukarı-aşağı) tutunma eğilimleri arasında kuantum-mekaniksel bir salınım yaşanır.



Şekil 6: Büyüme Eksenleri (Snowcrystals, 2026) sayfasındaki görselden uyarlanmıştır.

Örneğin, -2°C civarında büyüme a-ekseninde yoğunlaşarak düz plakaları oluştururken, -5°C'de termodinamik tercih aniden değişerek c-ekseni büyümesini tetikler ve sütun yapılarını yaratır. -15°C'ye gelindiğinde ise fizik tekrar tersine döner ve büyüme yeniden a-eksenine kayar (Libbrecht, 2005). Diyagramın dikey eksenini olan aşırı doygunluk (nem) ise kristalin karmaşıklığını

kontrol eder. Ortamdaki su buharı arttığında, Bölüm 2.1’de detaylandırılan Mullins-Sekerka kararsızlığı şiddetlenir. Bu durum, basit altıgen yapıları köşelerinden patlatarak o meşhur dallanıp budaklanmış dallantılı formlara dönüştürür. Şekil 7’de dallantı forma sahip kar kristali örneği verilmiştir.



Şekil 7: Dallantı Kar Kristali (7 Şubat 2024 tarihinde Kutay Dolunay tarafından İsveç/ Umeå’da çekilmiştir.)

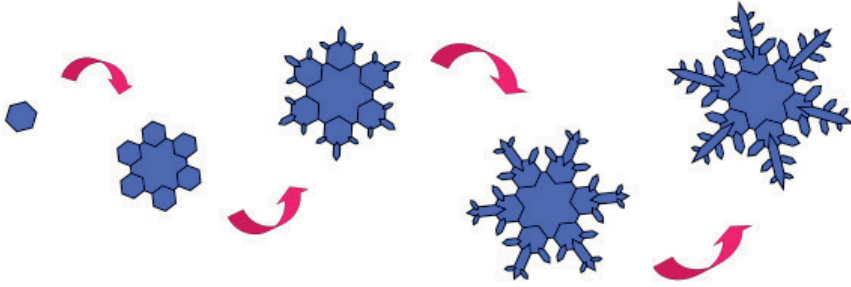
Nakaya Diyagramı’nın günümüz atmosfer fiziğindeki asıl değeri, basit bir sınıflandırma tablosu olmasından değil, güçlü bir atmosferik tersine mühendislik aracı olmasından kaynaklanır. Yeryüzüne düşen bir kar kristali, bulut içinde kilometrelerce yol alırken birbirinden çok farklı sıcaklık ve nem katmanlarından geçer. Örneğin, merkeze doğru dallantılı kollar barındıran ancak uçlarında kapaklılar (capped columns) bulunan asimetrik bir kar kristali mikroskop altına alındığında, Nakaya Diyagramı kullanılarak bu kristalin bulut içindeki uçuş rotası net bir şekilde okunabilir. Kristalin önce -15°C ’lik yüksek nemli bir katmanda doğup dallandığı, ardından düşerken -5°C ’lik daha kuru bir katmana girerek uçlarına sütunlar inşa ettiği doğrudan tespit edilebilir (Nakaya, 1954). Bu bağlamda kar kristalleri, içinden geçtikleri gökyüzünün yüksek çözünürlüklü termodinamik haritasını yeryüzüne taşıyan gerçek birer mektuptur.

3.3. Altıgen Simetri ve Örgü Yapısı

Kar kristallerini mikroskop altına aldığımızda çok garip bir kural dikkat çeker: Havadaki nem ne kadar kaotik olursa olsun veya sıcaklık ne kadar çılgınca değişirse değişsin, oluşan o kar tanesi istisnasız altıgendir. Peki neden hep altı? İşin sırrı gökyüzündeki bulutlarda değil, yalnızca su molekülünün kuantum mekaniğinde ve kimyasal bağlarında gizlidir. Sıvı haldeyken bir su molekülünde oksijen ve hidrojen atomları arasındaki açı yaklaşık 104.5° ’dir.

Ancak su donmaya başladığında sistemin enerjisini en düşük ve kararlı seviyeye çekmek zorundadır. Su molekülleri birbirlerine zayıf hidrojen bağlarıyla tutunmaya başlar. Her bir su molekülü, etrafındaki tam dört komşu su molekülüne kusursuz bir açıyla bağlanarak üç boyutlu bir piramide benzeyen dörtyüzlü bir yapı kurar (Pauling, 1935). İşte bu dörtyüzlü yapılar uç uca eklenip koca bir buz kafesi oluşturduğunda, ortaya tıpkı bir bal peteğine benzeyen altıgenler çıkar. Katı hal fiziğinde bu temel buz yapısına “İce I_h ” denir. Buradaki “h” harfi zaten İngilizcedeki “hexagonal” (altıgen) kelimesinden gelir.

Kar tanesinin büyümesindeki yanlara ve yukarı-aşağı büyüme, aslında bu mikroskopik bal peteği büyümesidir (Libbrecht, 2005). Bal peteğinin yan duvarları a-eksenini, üst ve alt kapakları ise c-eksenini oluşturur. Özetle; gökyüzünden düşen o devasa, karmaşık ve dallanıp budaklanmış kar kristalleri aslında tek başına çok basit bir kurala uyar: Onlar, tek bir oksijen atomunun hidrojen bağlarıyla kurduğu o minicik altıgen kafesin milyonlarca kez büyümüş bir kopyasıdır. Makroskopik şekil, kuantum dünyasının doğrudan bir yansımasıdır.



Şekil 8: Kristalin Büyümesi (Snowcrystals, 2026).

Sonuç olarak, kar kristallerinin her zaman Şekil 8’deki gibi altıgen bir geometriye sahip olması, atmosferdeki rastgele koşulların değil su moleküllerinin moleküler düzeydeki düzenlenme biçiminin bir sonucudur. Donma sırasında hidrojen bağlarıyla oluşan dörtyüzlü moleküler ağ, enerjice en kararlı düzen olan altıgen buz kafesini meydana getirir ve bu yapı makroskopik ölçekte kar kristallerinin karakteristik altı kollu simetrisini belirler. Dolayısıyla gökyüzünden düşen karmaşık kar taneleri, özünde su moleküllerinin kuantum ve kimyasal bağ özelliklerinin büyütülmüş bir yansımasıdır. Şekil 9’da detaylı kar kristalleri sınıflandırılması Türkçe olarak verilmiştir.



Şekil 9: Kar Kristali Tipleri (Snowflakes, 2026) adresinden uyarlanmıştır.

4. Kriyosferik Termodinamik ve Çevresel Etkiler

Kriyosfer, okyanusların üzerinde pasif bir şekilde süzülen donmuş bir su kütlesi değil; kendi faz anomalileriyle kıtaları şekillendiren, güneş radyasyonu ile girdiği optik etkileşimlerle küresel enerji bütçesini yöneten devasa bir

termodinamik motordur. Bu alt başlıkta, suyun eşsiz faz diyagramının jeofiziksel sonuçlarından başlayarak, yüzey albedosunun tetiklediği geri besleme döngülerini ve antropojenik kirliliğin buzun hem termodinamik dengesini hem de optik saflığını hücresel bazda nasıl çürüttüğünü ele alınmaktadır. Kirliliğin yarattığı bu optik ve yapısal bozunma, yalnızca iklimsel bir kriz değil, aynı zamanda buzun bizzat devasa bir astrofiziksel mercecek olarak kullanıldığı yüksek enerji fiziği enstrümantasyonları için de aşılması gereken en kritik mühendislik problemlerinden birini oluşturmaktadır.

4.1. Suyun Faz Diyagramı

Dev buzulların termodinamik dengesini ve hareket mekaniklerini anlamak için öncelikle suyun enteresan faz diyagramına bakmak gerekir. Evrendeki maddelerin neredeyse tamamında katı faz, sıvı fazdan daha yoğundur. Bu durum, standart bir termodinamik faz diyagramında erime eğrisinin pozitif bir eğime sahip olması demektir. Yani basınca maruz kalan bir madde, katı kalabilmek için daha yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyar. Ancak hidrojen bağlarının yarattığı altıgen örgü (Ice I_h), suyun donarken molekülleri birbirinden uzaklaştırarak genleşmesine neden olur. Buzun sıvı sudan daha düşük bir yoğunluğa sahip olmasının faz diyagramındaki doğrudan sonucu, erime eğrisinin negatif bir eğimle yükselmesidir.

Bu termodinamik farklılık, fiziksel kimyada meşhur Clausius-Clapeyron denklemi ile ifade edilir (Atkins & de Paula, 2014):

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T\Delta V}$$

Bu denklemde P basıncı, T sıcaklığı, L gizli erime ısısını ve ΔV faz değişimi sırasındaki hacim farkını temsil eder. Buz eriyip suya dönüştüğünde hacmi küçüldüğü için ΔV değeri negatiftir. Dolayısıyla denklemin sağ tarafı, eğimin (dP/dT) negatif olduğunu matematiksel olarak kanıtlar. Bunun fiziksel karşılığı oldukça dramatiktir: Buzun üzerine uygulanan basınç arttıkça, erime noktası düşer. Sistem, artan dış basınca direnebilmek için Le Chatelier ilkesi gereği daha az hacim kapladığı sıvı faza geçmeye zorlanır.

Bu termodinamik farklılığın, Antarktika gibi kıtasal ölçekli yapılar üzerinde muazzam jeofiziksel sonuçları vardır. Antarktika platosunda yüzey sıcaklıkları -60°C seviyelerinde seyrederken, yaklaşık 4 kilometre derinlikteki buz ve ana kaya sınırında durum tamamen farklıdır. Yüzeyden kilometrelerce aşağı inildiğinde, alttan gelen jeotermal ısı akısı sıcaklığı bir miktar yükseltirken, üstteki devasa buz kütesinin yarattığı hidrostatik basınç erime noktasını sıfırın çok altına çeker. Bu basınçla erime mekanizması sayesinde, Antarktika'nın dondurucu buz kalkanının tam altında, binlerce yıldır donmadan sıvı halde kalmayı başarmış devasa tatlı su gölleri oluşur (Kapitsa vd., 1996). Dünyanın en büyük buzul altı gölü olan Vostok Gölü, bu termodinamik dengenin

en önemli kanıtıdır. Dahası, buz ile ana kaya arasında oluşan bu milimetrik sıvı su katmanı, kıtasal buzulun devasa bir kızak gibi kaya yatağı üzerinde kaymasını sağlayarak buzul mekaniğinin ve akışının temelini oluşturur (Cuffey & Paterson, 2010). Özetle, suyun faz diyagramındaki o küçük negatif eğim olmasaydı, Antarktika statik ve hareketsiz bir buz kütlesi olurdu.

4.2. Albedo Geri Beslemesi

Gezegensel buzulların termodinamik dengesi yalnızca iç dinamiklere bağlı değildir; aynı zamanda Güneş'ten gelen elektromanyetik radyasyon ile buzul yüzeyi arasındaki optik etkileşime doğrudan bağlıdır. Bu etkileşimin merkezinde, bir yüzeyin üzerine düşen kısa dalga boylu güneş radyasyonunu uzaya geri yansıtma kapasitesini (yansıtıcılık katsayısı) ifade eden albedo (α) yatar. Taze kar ve saf buzul yüzeyleri, $\alpha \approx 0.8$ ila 0.9 yani %80-%90 arasında değişen muazzam bir albedo değerine sahiptir. Bu yüksek optik yansıtıcılık, devasa buz kütlelerini termodinamik bir kalkan haline getirerek, gelen güneş enerjisinin sisteme buzu eritecek bir ısı formunda girmesini engeller (Hartmann, 1994). Ancak atmosferik sıcaklık artışları yüzeyde bölgesel erimeler başlattığında, sistemin fizikinde yıkıcı ve geri döndürülemez bir pozitif geri besleme döngüsü tetiklenir.

Buz örtüsü inceliyor eridiğinde, yerini albedosu $\alpha \approx 0.1$ ila 0.2 civarında olan çok daha koyu renkli okyanus sularına veya ana kayaya bırakır. Bu karanlık yüzeyler, yüksek enerjili kısa dalga fotonlarını yansıtmak yerine soğurur ve termodinamiğin birinci yasası gereği bu enerjiyi uzun dalga boylu kızılötesi ışıma (duyulur ısı) olarak ortama geri salar. Sisteme eklenen bu ekstra ısı enerjisi literatürde ısınım salar olarak tanımlanır. Artan ısınım salar, lokal çevrenin sıcaklığını daha da yükseltir; yükselen sıcaklık daha fazla buzun erimesine yol açar, eriyen buz daha fazla karanlık yüzeyi açığa çıkarır ve bu yüzeyler güneş enerjisini daha da büyük bir hızla absorbe eder. Bu mekanizma, buzulun kütle dengesini asimptotik bir çöküşe sürükler. Sistem artık dışarıdan sürekli artan bir sıcaklığa ihtiyaç duymaz; termodinamik kalkan bir kez delindiğinde, buzul kendi erimesiyle kendi sonunu hızlandıran bir ısı motoruna dönüşür (IPCC, 2013). Küresel iklim modellerinde kutup bölgelerinin dünyanın geri kalanından çok daha hızlı ısınmasının yani Kutup Amplifikasyonu'nun altındaki temel fiziksel yasa da tam olarak bu optik ve termodinamik döngüdür.

4.3. Buzun İçini Görmek

Gezegensel buzulların termodinamik yapısını, içerdikleri safsızlıkları ve altlarındaki gizli coğrafyayı incelemek, malzemenin dondurucu ve opak doğası gereği son derece zorlu bir mühendislik gerektirmektedir. Modern bilim, bu devasa kütlelerin içini "görebilmek" için elektromanyetik spektrumun ve fiziksel sondaj teknolojilerinin sınırlarını zorlayan üç temel enstrümantasyon yaklaşımı kullanır. İlk ve en doğrudan yöntem, buzu fiziksel olarak yeryüzüne çıkarmaktır. Vostok veya EPICA gibi derin sondaj projelerinde, kilometrelerce

uzunlukta silindirik buz karotları elde edilir. Bu karotlar, içlerinde hapsolmuş tarihi hava kabarcıkları ve suyun izotopik yapısı sayesinde birer termodinamik zaman makinesi görevi görür. Örneğin, oksijen izotop fraksiyonlanması (oranları) kütle spektrometreleri ile analiz edilerek, o buzun yağdığı yüz binlerce yıl önceki atmosferin sıcaklığı ve çevresel kirlilik seviyeleri milimetrik bir hassasiyetle okunabilir (Petit vd., 1999).

İkinci yöntem, fiziksel sondajın imkânsız olduğu durumlarda devreye giren “Radyo Glasiyoloji”dir (Radioglaciology). Yere Nüfuz Eden Radar (Ground Penetrating Radar-GPR) teknolojisi, buzun içini elektromanyetik dalgalarla tarar. Bu sistemin fiziği, malzemelerin dielektrik sabitleri arasındaki farklara dayanır. Yüzeiden gönderilen mikrodalga veya radyo sinyalleri, kilometrelerce aşağıdaki katı buz ile sıvı su veya ana kaya sınırına çarptığında, bu devasa faz veya yoğunluk farkı nedeniyle güçlü bir şekilde geri yansır. Vostok Gölü gibi buzul altı sıvı kütlelerin haritalandırılması, tamamen bu elektromanyetik yansıma ve kırılma fiziğine dayanır (Plewes & Hubbard, 2001). Ancak Antarktika buzunu sadece bir jeofiziksel inceleme nesnesi olmaktan çıkarıp, bilimin en büyük fiziksel enstrümanına dönüştüren üçüncü ve en radikal yaklaşım, optik sensör teknolojisidir. Parçacık fiziğinde, nötrino etkileşimlerinden doğan o zayıf Çerenkov ışımasını yakalamak için genellikle Super-Kamiokande gibi ultra-saf sıvı suyla doldurulmuş devasa yeraltı tankları inşa edilir. Ancak IceCube projesinde mühendislik yaklaşımı tamamen tersine çevrilmiştir. İnsan eliyle bir su tankı inşa etmek yerine, doğanın milyonlarca yılda devasa bir hidrostatik basınçla şekillendirdiği ve klatrat hidrat fazına geçirek (Bölüm 1.2) evrendeki en şeffaf katı malzemelerden biri haline getirdiği Antarktika buzu, doğrudan bir dedektör ortamı olarak kullanılmıştır.

Buzun 1.5 ila 2.5 kilometre derinliklerine dikey olarak gömülen binlerce Dijital Optik Modül, ortamdaki optik saçılma ve yutulma katsayılarına göre kalibre edilerek, o karanlık ve dondurucu kütlelerin içindeki atom altı parlamaları izler (Halzen & Klein, 2010). Termodinamik bariyerleri aşp, kirliliğin yıkıcı etkilerine direnerek günümüze ulaşan bu antik buz kütlesi, artık sadece Dünya’nın iklim geçmişini değil; derin uzayın ve yüksek enerjili astrofiziğin sınırlarını da aydınlatan devasa bir lense dönüşmüştür.

Sonuç olarak, gezegensel buzullar yalnızca donmuş su kütleleri değil; geçmiş iklim koşullarını, jeofiziksel yapıları ve hatta yüksek enerjili astrofiziksel süreçleri incelemeye imkân tanıyan çok katmanlı doğal arşivlerdir. Derin buz karotu sondajları, atmosferik bileşimin ve sıcaklık değişimlerinin yüz binlerce yıllık kayıtlarını ortaya çıkarırken; radyo-glasiyoloji teknikleri buz kütlelerinin iç yapısını ve buzul altı hidrolik sistemlerini haritalandırmaya olanak tanır. Bunun ötesinde, Antarktika buzunun optik özelliklerinden yararlanan büyük ölçekli dedektör projeleri, bu doğal ortamı parçacık fiziği için benzersiz bir gözlem platformuna dönüştürmüştür. Böylece buzulların incelenmesi, iklim bilimi, jeofizik ve astrofiziği aynı araştırma alanında birleştiren disiplinlerarası

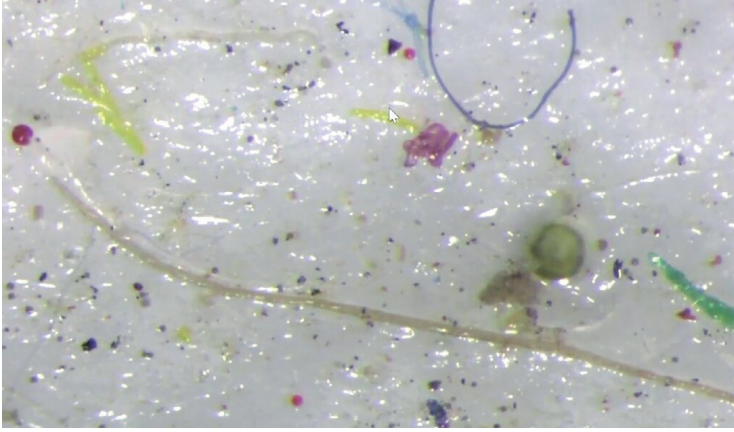
bir araştırma sahası hâline gelmiştir. Gelişen sensör teknolojileri ve uzaktan algılama yöntemleri sayesinde, gelecekte bu donmuş arşivlerin hem Dünya'nın geçmişine hem de evrenin yüksek enerjili süreçlerine dair daha derin bilgiler sunması beklenmektedir.

4.4 Kirliliğin Termodinamiği ve Optik Bozunma

Gezegensel buzullara yönelik insan kaynaklı tehditler, yalnızca Bölüm 3.2'de incelenen makroskobik albedo düşüşüyle sınırlı değildir. Atmosferik sirkülasyonlarla kutuplara kadar taşınan siyah karbon (kurum), mikroplastikler ve kimyasal aerosoller; kar yüzeyine çöktüğünde buzun hücresel bütünlüğünü doğrudan tehdit eder. Bu saldırının ardındaki temel fiziksel mekanizma, kimyasal termodinamikte Kriyoskopik Etki (Erime Noktası Düşmesi) olarak bilinen özelliktir.

Bölüm 2.3'te detaylandırılan kusursuz Ice I_h kafes yapısı, ancak saf su moleküllerinin hidrojen bağlarını eksiksiz kurabilmesiyle mümkündür. Ancak buzun yüzeyine çöken yabancı partiküllerin sebep olduğu kirlilik, sıvı su ile temas ettiğinde çözünerek bu kristalize örgünün arasına girer. Çözünen yabancı maddeler, su moleküllerinin kimyasal potansiyelini düşürür. Sistemin termodinamik dengesi gereği, bu kimyasal potansiyel düşüşü buzun erime noktasının saf suya kıyasla daha aşağı çekilmesine neden olur (Atkins & de Paula, 2014). Bunun fiziksel sonucu olarak yüzeydeki buz, ortam sıcaklığı henüz 0°C'ye ulaşmamış olsa bile, barındırdığı safsızlıklar yüzünden kimyasal olarak erimeye zorlanır. Ancak Şekil 10'da görülen bu kirliliğin ve yapısal bozulmanın; küresel iklimin ötesinde, modern bilim ve astrofizik için çok daha spesifik ve tehlikeli bir sonucu vardır: Optik saflığın yitirilmesi.

Kutup buzulları, özellikle Antarktika'nın derinliklerindeki klatrat hidrat fazına geçmiş antik buz kütleleri (Bölüm 1), evrendeki en şeffaf ve optik açıdan en saf katı ortamlardan biridir. Bu kusursuz şeffaflık yalnızca tesadüfi bir özellik değil; derin uzaydan gelen yüksek enerjili nötrinoların buzun içindeki atomlarla çarpışması sonucu ortaya çıkan o zayıf, mavi Çerenkov Işımasının tespit edilebilmesi için bir önkoşuldur.



Şekil 10: Buzul Kirlilik (Arcticsea, 2026).

Bir Çerenkov fotonunun, devasa buz kütlesi içine yerleştirilmiş optik sensörlere ulaşabilmesi için onlarca metre boyunca saçılmadan ve soğurulmadan ilerlemesi gerekir. Oysa buza sızan siyah karbon, mikro-tozlar ve erime-donma döngülerinin yarattığı yapısal bozulmalar, buzun soğurma ve saçılma katsayılarını dramatik ölçüde artırır (Ackermann vd., 2006). Kirliliğin termodinamik olarak bozduğu bir buz kütlesi, optik olarak bulanıklaşır. Fotonlar sensörlere ulaşmadan yön değiştirir veya yutulur; bu da nötrinin geliş yönünün ve enerjisinin yanlış hesaplanmasına, dolayısıyla dedektörün körleşmesine yol açar. Özetle çevresel kirlilik; sadece buzulun termodinamik bütçesini çöktürmekle kalmaz, aynı zamanda insanlığın evrenin en derin sırlarını çözmek için kullandığı bu devasa ve doğal merceği de kalıcı olarak tahrip etme potansiyeli taşır.

5. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada, kutup bölgelerindeki kar ve buz fiziği ile yüksek enerjili nötrino astrofiziği arasındaki disiplinler arası ilişki incelenmiştir. Önce kar kristallerinin mikroyapısı ile buzun makroskobik optik davranışı üzerinde durulmuş, ardından kar kristallerinin oluşumu ve yapısı ele alınmıştır. Böylece kriyosfer biliminin, evrenin en enerjik ve en uzak kaynaklarının araştırılması açısından da temel bir rol oynadığı ortaya konulmuştur. Çalışmada kriyosferin fiziksel yapısı, kar kristallerinin mikroskobik oluşum mekanizmaları ve gezegensel buzulların termodinamik davranışları; yüksek enerjili parçacık astrofiziği ile olan ilişkileri çerçevesinde ele alınmıştır. Atmosferdeki su buharının heterojen çekirdeklenme süreçleri ile başlayan ve altıgen kristal örgü yapısı ile sonuçlanan kar kristali oluşumu, su moleküllerinin kuantum ve kimyasal bağ özelliklerinin makroskobik ölçekteki bir yansımasıdır. Bu mikroyapısal düzen, zamanla sıkışarak buzul buzuna dönüşmekte ve kriyosferin optik, termodinamik ve mekanik özelliklerini belirleyen temel yapıyı oluşturmaktadır. Buzun reolojik davranışı, Glen akış yasası ile tanımlanan viskoelastik akış karakteri

sayesinde kıtasal ölçekte dinamik bir sistem ortaya çıkarırken, suyun benzersiz faz diyagramı ve albedo geri besleme mekanizmaları küresel iklim dengesi üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte atmosferik kirlilik ve antropojenik etkiler, buzun optik saflığını ve termodinamik kararlılığını bozarak hem iklim sistemi hem de buzul ortamında gerçekleştirilen yüksek hassasiyetli fizik deneyleri için ciddi bir risk oluşturmaktadır.

Antarktika ve Grönland gibi kutup bölgeleri yalnızca Dünya ikliminin düzenleyici unsurları değil, aynı zamanda modern bilimin en büyük doğal laboratuvarlarından biridir. Derin buz sondajları ve radyo-glasiyolojik yöntemler sayesinde buzulların geçmiş atmosfer kayıtları ve iç yapıları ortaya çıkarılabilirken, kilometrelerce kalınlıktaki berrak buz kütleleri yüksek enerjili nötrinoların tespiti için doğal bir dedektör ortamı sağlamaktadır. Bu bağlamda IceCube gibi deneyler, kriyosfer fiziğinin yalnızca çevre bilimleriyle sınırlı olmadığını; parçacık fiziği, astrofizik ve gezegen bilimleri ile doğrudan kesiştiğini göstermektedir. Aynı fiziksel prensipler, Jüpiter'in uydusu Europa veya Satürn'ün uydusu Enceladus gibi buz kabuklu gök cisimlerinin jeofiziksel süreçlerini ve potansiyel astrobiyolojik ortamlarını anlamada da kullanılmaktadır.

Sonuç olarak kriyosfer, hem Dünya'nın iklimsel geçmişini saklayan bir arşiv hem de evrenin yüksek enerjili parçacıklarını incelemeye olanak sağlayan doğal bir dedektör ortamıdır. Kar kristallerinin moleküler düzeydeki oluşumundan başlayarak gezegensel ölçekteki buzul dinamiklerine kadar uzanan bu çok ölçekli fiziksel süreçler, modern bilimin farklı disiplinlerini ortak bir araştırma alanında buluşturmaktadır. Gelişen sensör teknolojileri, uzaktan algılama sistemleri ve çok disiplinli modelleme yöntemleri sayesinde, kriyosfer araştırmalarının gelecekte hem Dünya sistem bilimlerine hem de kozmik kökenli yüksek enerjili olayların anlaşılmasına daha kapsamlı katkılar sağlaması beklenmektedir.

Kaynaklar

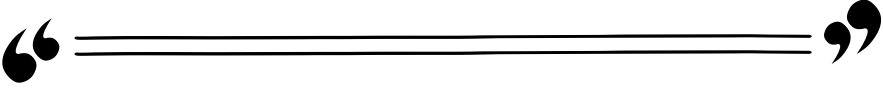
- Aartsen, M. G., et al. (IceCube Collaboration). (2018). Multi-messenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A. *Science*, 361(6398), eaat1378. <https://arxiv.org/abs/1807.08816>.
- Ackermann, M., vd. [IceCube Collaboration]. (2006). Optical properties of deep glacial ice at the South Pole. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D13).
- Antarcticglaciers, (2026). <https://www.antarcticglaciers.org/glacier-processes/mass-balance/firn-and-firn-aquifers/> adresinden 13 Mart 2026 tarihinde erişilmiştir.
- Arcticsea, (2026). https://phys.org/news/2019-08-arctic-sea-ice-microplastics.html#google_vignette adresinden 13 Mart 2026 tarihinde erişilmiştir.
- ArcticNews, (2026) Albedo. <https://arctic-news.blogspot.com/p/albedo.html> adresinden 13 Mart 2026 tarihinde erişilmiştir.
- Atkins, P., & de Paula, J. (2014). *Atkins' Physical Chemistry* (10th ed.). Oxford University Press.
- Cuffey, K. M., & Paterson, W. S. B. (2010). *The Physics of Glaciers* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Erenel, F., & Caymaz, E. (2021). Kriyopolitik ve Kuzey Pasifik jeopolitiği kapsamında ABD, Rusya ve Çin mücadelesi. 5. Ulusal Kutup Bilimleri Çalıştayı Özet Bildiri Kitapçığı içinde (s. 159). TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi. https://mam.tubitak.gov.tr/wp-content/uploads/sites/129/calistay_ozet_bildiri_kitapciği.v8-16-12-2021.pdf
- Halzen, F., & Klein, S. R. (2010). IceCube: An instrument for neutrino astronomy. *Review of Scientific Instruments*, 81(8), 081101.
- Hartmann, D. L. (1994). *Global Physical Climatology* (International Geophysics Series, Vol. 56). Academic Press.
- Hooke, R. L. (2005). *Principles of Glacier Mechanics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Howell, S. M., & Pappalardo, R. T. (2020). NASA's Europa Clipper—a mission to a potentially habitable ocean world. *Nature Communications*, 11(1), 1311.
- IPCC, (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Summary for Policy-makers, Technical Summary and Frequently Asked Questions*. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (T. F. Stocker vd., Ed.). WMO & UNEP.
- Kapitsa, A. P., Ridley, J. K., Robin, G. D. Q., Siegert, M. J., & Zotikov, I. A. (1996). A large deep freshwater lake beneath the ice of central Antarctica. *Nature*, 381(6584), 684-686.
- Langer, J. S. (1980). Instabilities and pattern formation in crystal growth. *Reviews of*

Modern Physics, 52(1), 1-28.

- Leppäranta, M., & Uotila, P. (2025). *Geophysics of the Cryosphere*. Springer.
- Libbrecht, K. G. (2005). The physics of snow crystals. *Reports on Progress in Physics*, 68(4), 855-895.
- Nakaya, U. (1954). *Snow Crystals: Natural and Artificial*. Harvard University Press.
- Pappalardo, R. T., vd. (1999). Does Europa have a subsurface ocean? Evaluation of the geological evidence. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 104(E10), 24015-24055.
- Pauling, L. (1935). The structure and entropy of ice and of other crystals with some randomness of atomic arrangement. *Journal of the American Chemical Society*, 57(12), 2680-2684.
- Petit, J. R., vd. (1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399(6735), 429-436.
- Plewes, L. A., & Hubbard, B. (2001). A review of the use of radio-echo sounding in glaciology. *Progress in Physical Geography*, 25(2), 203-236.
- Porco, C. C., vd. (2006). Cassini observes the active south pole of Enceladus. *Science*, 311(5766), 1393-1401.
- Priscu, J. C., vd. (1999). Geomicrobiology of subglacial ice above Lake Vostok, Antarctica. *Science*, 286(5447), 2141-2144.
- Pruppacher, H. R., & Klett, J. D. (2010). *Microphysics of clouds and precipitation*. Springer Science & Business Media.
- Storey, J. W. V. (2005). Antarctica as a laboratory for physics. *IceCube Collaboration* (Williams, D., vd.). (2020). Status and prospects for the IceCube Neutrino Observatory.
- Yuan, T. (IceCube Collaboration). (2023). Detecting neutrinos in IceCube with Cherenkov light in the South Pole ice. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 1054, 168440.
- Resconi, E. (for the IceCube Collaboration). (2009). Status and prospects of the IceCube neutrino telescope. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 602, 7-13. <https://arxiv.org/abs/0807.3891>
- Polarpedia. (2026). Firn. <https://polarpedia.eu/en/firn/> adresinden 13 Mart 2026 tarihinde erişilmiştir.
- Snowcrystals, (2026) Morphology Diagram. <https://www.snowcrystals.com/science/science.html> adresinden 13 Mart 2026 tarihinde erişilmiştir.
- Scitechdaily, (2026). <https://scitechdaily.com/harbinger-of-extraterrestrial-life-explaining-cryovolcanic-eruptions-on-jupiters-moon-europa/> adresinden 13 Mart 2026 tarihinde erişilmiştir.
- Snowflakes, (2026). <https://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/class/class-old.htm> adresinden 13 Mart 2026 tarihinde erişilmiştir.



TÜRKİYE'DE FEN EĞİTİMİNDE STEM ÇALIŞMALARININ EĞİLİMLERİ¹



İsmail TÜRKOĞLU²

Erdal CANPOLAT³

Büşra GENÇ⁴

¹ Bu çalışma yazarların 'Fen Eğitiminde STEM: Bir İçerik Analiz Çalışması' başlıklı tezinden üretilmiştir.

² Prof. Dr., Fırat Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Fen Bilgisi Eğitimi ABD.
ORCID: 0000-0001-7454-7605

³ Prof. Dr., Fırat Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Fen Bilgisi Eğitimi ABD.
ORCID: 0000-0002-1167-0881

⁴ Yüksek Lisans Öğrencisi, Fırat Üniversitesi, Eğitim Fak. ORCID: 0009-0005-2937-4633

GİRİŞ

Bilgi üretiminin hızlandığı, teknolojik gelişmelerin toplumsal ve ekonomik yapıları dönüştürdüğü çağdaş dünyada eğitim sistemlerinden beklenen işlevler önemli ölçüde değişmiştir. Eğitim, yalnızca bilgi aktarımına dayalı bir süreç olmaktan çıkmış; problem çözme, eleştirel düşünme, disiplinler arası ilişki kurabilme ve bilgiyi gerçek yaşam bağlamlarında kullanabilme gibi üst düzey bilişsel becerilerin geliştirilmesini amaçlayan bütüncül bir yapıya evrilmiştir. Bu dönüşümün merkezinde yer alan alanlardan biri fen eğitimidir. Fen eğitimi, bireylerin doğayı ve toplumsal çevreyi bilimsel düşünme biçimleri aracılığıyla anlamlandırmalarını sağlarken, aynı zamanda teknolojik ve ekonomik gelişmelerle doğrudan ilişkili bir eğitim alanı olarak öne çıkmaktadır (Avinal, 2019; Demirbaş & Yağbasan, 2006).

Fen bilimleri eğitimi, yalnızca mevcut bilimsel bilgilerin aktarılmasını değil; bilginin nasıl üretildiğini, test edildiğini ve dönüştürüldüğünü kavramaya yönelik bir düşünme pratiği sunar. Bu yönüyle fen eğitimi, bireylerin bilimsel süreçleri içselleştirmelerini, yeni durumlar karşısında kanıta dayalı kararlar almalarını ve karşılaştıkları problemlere analitik çözümler geliştirmelerini hedeflemektedir (Topsakal, 2006). Ancak çağdaş eğitim literatürü, bu hedeflerin yalnızca disiplin temelli öğretim yaklaşımlarıyla gerçekleştirilmesinin sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Fen eğitiminin teknoloji, mühendislik ve matematik alanlarıyla bütünleştirilmesi, öğrenme süreçlerinin niteliğini artırmakta ve bilginin gerçek yaşam bağlamlarında anlamlı biçimde kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

Bu bağlamda Science, Technology, Engineering and Mathematics (STEM) eğitimi, fen eğitiminin dönüşümünde öne çıkan bütünelşik bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. STEM yaklaşımı, fen bilimlerini teknoloji kullanımı, mühendislik tasarım süreçleri ve matematiksel düşünme ile bütünleştirerek öğrencilerin disiplinler arası düşünme ve problem çözme becerilerini geliştirmeyi amaçlamaktadır (Sanders, 2009; Kelley & Knowles, 2016). Uluslararası literatürde STEM eğitimi, yalnızca pedagojik bir yenilik olarak değil; inovasyon kapasitesinin artırılması, ekonomik rekabet gücünün desteklenmesi ve nitelikli insan kaynağının yetiştirilmesiyle doğrudan ilişkili stratejik bir eğitim alanı olarak ele alınmaktadır (Capraro & Slough, 2013; Landivar, 2013).

Türkiye’de STEM eğitiminin gelişimi, öğretim programlarında yapılan düzenlemeler, uluslararası değerlendirme sonuçları ve akademik araştırma üretimiyle yakından ilişkilidir. TIMSS ve PISA gibi uluslararası ölçekte gerçekleştirilen değerlendirmelerde elde edilen sonuçlar, fen ve matematik alanlarında yapısal sorunlara işaret etmiş; bu durum STEM temelli yaklaşımların eğitim politikalarında daha görünür hâle gelmesine zemin hazırlamıştır (Ceylan, 2014; Çelen, Çelik & Seferoğlu, 2011). Millî Eğitim Bakanlığı (MEB)

tarafından yayımlanan raporlar ve öğretim programı güncellemeleri, STEM yaklaşımının kurumsal düzeyde benimsendiğini göstermektedir (MEB, 2016; MEB, 2018a). Bununla birlikte, bu kurumsal yönelimin akademik araştırmalara nasıl yansıdığı ve üretilen bilginin yöntemsel derinliği ile sürdürülebilirliği, eleştirel biçimde değerlendirilmesi gereken bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır.

Son yıllarda Türkiye’de fen eğitiminde STEM uygulamalarını konu alan lisansüstü tezlerin sayısında belirgin bir artış gözlenmektedir. Bu artış, STEM alanına yönelik akademik ilginin güçlendiğini göstermesi açısından önemli olmakla birlikte; araştırmaların yöntemsel çeşitliliği, kuramsal katkı düzeyi ve eleştirel derinliği bakımından bazı sınırlılıkları da beraberinde getirmektedir. Çalışmaların büyük ölçüde belirli eğitim kademelerinde yoğunlaşması, benzer veri toplama araçları ve analiz tekniklerinin tekrar edilmesi, STEM araştırmalarının çoğunlukla uygulama etkililiğiyle sınırlı kaldığını düşündürmektedir.

Bu noktada, Türkiye’de STEM alanındaki akademik üretim kültürü ile kurumsal kapasite arasındaki ilişki belirleyici bir rol oynamaktadır. Lisansüstü tezlerin belirli üniversitelerde ve sınırlı sayıda akademik kadro etrafında yoğunlaşması, araştırma altyapısının ve akademik uzmanlığın dengeli dağılmadığını ortaya koymaktadır (Topçu & Çiftçi, 2018). Ayrıca doktora düzeyindeki çalışmaların sayıca sınırlı olması, STEM alanında derinlemesine kuramsal tartışmalar üreten araştırmaların henüz yeterince gelişmediğine işaret etmektedir. Bu durum, niceliksel artışın niteliksel dönüşümle yeterince desteklenmediği bir akademik üretim yapısına işaret etmektedir.

Bu çalışma, Türkiye’de 2014-2021 yılları arasında fen eğitiminde STEM uygulamalarını konu alan lisansüstü tezleri içerik analizi temelinde inceleyerek söz konusu yapısal eğilimleri ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bölümün odağı, tek tek araştırmaları betimlemekten ziyade; Türkiye’de STEM araştırmalarının hangi temalar etrafında yoğunlaştığını, hangi yöntemsel tercihlerle yürütüldüğünü ve bu tercihlerin akademik üretim kültürü ile kurumsal kapasiteyle nasıl ilişkili olduğunu tartışmaktır. Bu doğrultuda giriş bölümünde kuramsal çerçeve çizilmiş, yöntemsel ayrıntılar ise kitap bölümü formatına uygun biçimde izleyen bölümlerde ele alınmıştır.

Bu araştırmanın problem durumu, fen eğitimi alanında STEM uygulamalarına yönelik olarak yapılmış lisansüstü tezlerin genel özelliklerinin neler olduğunun belirlenmesidir. Bu kapsamda, söz konusu yıllar arasında gerçekleştirilen tezlerin yöntemsel, içeriksel ve analitik açıdan nasıl bir dağılım gösterdiğinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu temel problem doğrultusunda, araştırmada aşağıda belirtilen alt problem sorularına yanıt aranmıştır:

1. Tezlerin kullanılan araştırma yöntem ve desenlerine göre dağılımı nasıldır?

2. Tezlerin örneklem belirleme yöntemlerine göre dağılımı nasıldır?
3. Tezlerin ele aldıkları araştırma konularına göre dağılımı nasıldır?
4. Tezlerde kullanılan veri toplama araçlarına göre dağılım nasıldır?
5. Tezlerde tercih edilen veri analiz yöntemlerine göre dağılım nasıldır?
6. Tezlerin araştırma amaçlarına göre dağılımı nasıldır?

YÖNTEM

Bu çalışma, nitel araştırma yaklaşımlarından biri olan içerik analizi yöntemiyle yürütülmüştür. İçerik analizi, belirli bir alanda üretilmiş yazılı dokümanların sistematik ve nesnel biçimde incelenerek ortak temaların, eğilimlerin ve yapısal özelliklerin ortaya konulmasını amaçlayan bir araştırma yöntemidir (Yıldırım & Şimşek, 2008). Bu yönüyle içerik analizi, tekil çalışmaların sonuçlarını tekrar etmekten ziyade, alandaki bilgi üretim süreçlerini bütüncül bir perspektifle değerlendirmeye olanak tanımaktadır.

Araştırmada içerik analizi yöntemi tercih edilmesinin temel gerekçesi, Türkiye’de fen eğitiminde STEM uygulamalarına yönelik olarak hazırlanmış lisansüstü tezlerin yöntemsel, içeriksel ve analitik özelliklerini karşılaştırmalı biçimde inceleyerek alanın genel eğilimlerini ortaya koymaktır. Çalışma, betimleyici bir tarama niteliği taşımakla birlikte, elde edilen bulgular eleştirel ve yorumlayıcı bir çerçevede ele alınmıştır.

Araştırmanın veri kaynağını, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi’nde yer alan ve 2014-2021 yılları arasında hazırlanmış lisansüstü tezler oluşturmaktadır. Tezlere ulaşmak amacıyla “STEM eğitimi”, “FeTeMM” ve “fen eğitimi” anahtar kelimeleri kullanılarak tarama yapılmıştır. Yapılan tarama sonucunda, fen eğitimi alanında STEM uygulamalarını konu alan toplam 192 lisansüstü tez araştırma kapsamına alınmıştır. Bu tezlerin 153’ü yüksek lisans, 39’u doktora düzeyindedir.

Araştırmaya dâhil edilen tezlerin seçiminde; Tezin fen eğitimi alanında yürütülmüş olması, STEM ya da FeTeMM yaklaşımını doğrudan konu edinmesi, 2014-2021 yılları arasında tamamlanmış olması ve tam metnine erişilebilir olması ölçütleri esas alınmıştır. Bu ölçütleri karşılamayan çalışmalar araştırma kapsamı dışında bırakılmıştır.

Araştırma kapsamında incelenen tezler, öncelikle elektronik ortamda temin edilmiş ve her bir tez için bir tez inceleme formu oluşturulmuştur. Bu form aracılığıyla tezlerin; araştırma yöntemi ve deseni, örneklem belirleme yöntemi, ele alınan araştırma konusu, kullanılan veri toplama araçları, tercih edilen veri analiz yöntemleri ve araştırma amaçları sistematik biçimde kodlanmıştır. Kodlama sürecinde, benzer kavramların farklı adlandırmalarla kullanıldığı durumlarda terim birliği sağlanmış; yöntem, desen ve analiz türleri literatürde yaygın kabul gören sınıflandırmalar doğrultusunda ortak

başlıklar altında toplanmıştır. Böylece verilerin karşılaştırılabilirliği ve tutarlılığı artırılmıştır.

Toplanan veriler, içerik analizi yöntemi çerçevesinde analiz edilmiştir. Analiz sürecinde öncelikle tezlerden elde edilen veriler sınıflandırılmış, ardından frekans ve yüzde değerleri hesaplanarak betimsel istatistikler aracılığıyla sunulmuştur. Bu aşamada tezlerin genel eğilimlerini ortaya koymak amacıyla nicel betimleyici tekniklerden yararlanılmıştır.

Elde edilen bulgular, yalnızca sayısal dağılımlar olarak sunulmamış; aynı zamanda Türkiye’de fen eğitiminde STEM alanındaki akademik üretimin yönetsel çeşitliliği, kuramsal derinliği ve araştırma eğilimleri açısından eleştirel bir bakış açısıyla yorumlanmıştır. Böylece içerik analizi, betimleyici bir sınıflandırma sürecinin ötesine taşınarak yorumlayıcı bir çerçevede ele alınmıştır.

Araştırmanın geçerlik ve güvenirliğini artırmak amacıyla kodlama sürecinde açık ve tutarlı ölçütler belirlenmiş, benzer içeriklere sahip veriler aynı kategoriler altında toplanmıştır. Ayrıca, kodlama süreci belirli aralıklarla gözden geçirilerek kategori uyumu kontrol edilmiş ve olası tutarsızlıklar giderilmiştir. Bu yaklaşım, elde edilen bulguların araştırmanın amacıyla uyumlu ve sistematik olmasını sağlamıştır.

BULGULAR

Bu bölümde, Türkiye’de fen eğitiminde STEM uygulamalarını konu alan lisansüstü tezlere ilişkin bulgular; araştırma yöntem ve desenleri, örneklem belirleme yöntemleri, araştırma konuları, veri toplama araçları, veri analiz yöntemleri ve araştırma amaçları başlıkları altında sunulmuştur. Bulgular, frekans ve yüzde değerleri kullanılarak betimlenmiş; yorumlar tablo bulgularıyla sınırlı tutulmuştur.

*Araştırma Yöntem ve Desenlerine İlişkin Bulgular**Tablo 1. Tezlerin Kullanılan Araştırma Yöntem ve Desenlerine Göre Dağılımı*

Araştırma Yöntemi	Araştırma Deseni	Frekans (f)	Yüzde (%)
Nicel	Tam Deneysel Desen	8	3.84
	Yarı Deneysel Desen	51	24.40
	Zayıf Deneysel	19	9.09
	Tek Denekli	1	0.48
	Betimsel	3	1.44
	Tarama	21	10.05
	Karşılaştırmalı	1	0.48
Nitel	Eylem Araştırması	7	3.35
	Durum Çalışması	25	11.96
	Fenomenografik (olgubilim)	11	5.26
	Döküman Analizi	5	2.39
Karma	Açıklayıcı-Doğrulayıcı Sıralı Desen	14	6.69
	İç içe Gömülü Desen	27	12.92
	Çeşitleme	16	7.65

Tablo 1'e göre, incelenen lisansüstü tezlerde nicel araştırma yöntemlerinin ağırlıklı olarak tercih edildiği görülmektedir. Nicel yöntemler içerisinde yarı deneysel desen en yüksek frekansa sahiptir. Tarama ve zayıf deneysel desenler yarı deneysel deseni izlemektedir. Tam deneysel desen ise daha sınırlı sayıda tezde kullanılmıştır. Nitel araştırma yöntemleri kapsamında en sık kullanılan desen durum çalışmasıdır. Bunun yanında fenomenografik (olgubilim) desen ve eylem araştırması da kullanılan nitel desenler arasında yer almaktadır. Karma araştırma yöntemleri içerisinde en yüksek frekans iç içe gömülü desene aittir. Açıklayıcı doğrulayıcı sıralı desen ve çeşitleme deseninin de belirli oranlarda kullanıldığı görülmektedir.

*Örneklem Belirleme Yöntemlerine İlişkin Bulgular**Tablo 2. Tezlerin Örneklem Belirleme Yöntemlerine Göre Dağılımı*

Örneklem Belirleme Yöntemi	Frekans (f)	Yüzde (%)
Basit Seçkisiz Örneklem	35	17.68
Tabakalı Örneklem	2	1.01
Küme Örneklem	3	1.53
Amaçsal Örneklem	52	26.26
Uygun Örneklem	91	45.96
Belirtilmemiş	15	7.56

Tablo 2 incelendiğinde, tezlerde en sık kullanılan örneklem belirleme yöntemi- nin uygun örnekleme olduğu görülmektedir. Bunu amaçsal örnekleme yöntemi iz- lemektedir. Basit seçkisiz örnekleme yöntemi kullanılan tezlerin sayısı daha düşük düzeydedir. Tabakalı örnekleme ve küme örnekleme yöntemlerinin kullanımının oldukça sınırlı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bazı tezlerde örneklem belirleme yönteminin belirtilmediği görülmektedir.

Araştırma Konularına İlişkin Bulgular

Tablo 3. Tezlerin Ele Aldıkları Araştırma Konularına Göre Dağılımı

Araştırma Konuları (Doktora)	Frekans (f)	Yüzde (%)	Araştırma Konuları (Yüksek Lisans)	Frekans (f)	Yüzde (%)
Etkinlik Çalışması	8	11.11	STEM (Tutum-Görüş İnceleme)	41	21.69
Laboratuvar Uygulamaları	5	6.95	Etkinlik Çalışmaları	19	10.05
Kuvvet ve Hareket	4	5.55	Farkındalık Düzeyi İnceleme	16	8.46
Evsel Atıklar ve Geri Dönüşüm	4	5.55	Laboratuvar Uygulamaları	13	6.87
Elektrik Enerjisi	3	4.16	Kuvvet ve Hareket	10	5.29
Basit Makinalar	3	4.16	Kuvvet ve Enerji	8	4.23
Uzay Araştırmaları	3	4.16	Madde ve Isı	7	3.70
Aynalarda Yansıma ve Işığın Soğrulması	3	4.16	Elektrik Enerjisi	6	3.17
İnsan ve Çevre İlişkileri	3	4.16	Aynalarda Yansıma ve Işığın Soğrulması	6	3.17
Canlılar Dünyasını Gezelim Tanıyalım	2	2.78	Ses ve Özellikleri	5	2.65
Işık ve Ses	2	2.78	Enerji Dönüşümleri	4	2.11
Elektrik Devre Elemanları	2	2.78	Kuvvetin Ölçülmesi ve Sürtünme Kuvveti	4	2.11
Kuvvet-İş-Enerji	2	2.78	Madde ve Değişim	3	1.59
Geçmişten Günümüze Aydınlatma ve Ses Teknolojileri	2	2.78	Basınç	3	1.59
Tutum Görüş İnceleme	2	2.78	Basit Makinalar	3	1.59
Özel Öğretim Yöntemleri	2	2.78	Işığın Madde İle Etkileşimi	3	1.59
Güneş Sistemi ve Ötesi	2	2.78	Elektriğin İletimi	2	1.06
Basit Elektrik Devreleri	2	2.78	Yıkıcı Doğa Olayları	2	1.06
Vücudumuzdaki Sistemler	1	1.39	Geçmişten Günümüze Aydınlatma ve Ses Teknolojileri	2	1.06

Mikroskobik Canlılar ve Çevremiz	1	1.39	Maddenin Yapısı ve Özellikleri	2	1.06
Astronomi	1	1.39	Yaşamımızdaki Elektrik	2	1.06
Genetik Mühendisliği	1	1.39	Saf Madde ve Karışımlar	2	1.06
Maddenin Yapısı ve Özellikleri	1	1.39	Evsel Atık ve Geri Dönüşüm	2	1.06
Elektriğin İletimi	1	1.39	Test Geliştirme	2	1.06
Yaşamımızdaki Elektrik	1	1.39	İş-Enerji	2	1.06
Ekosistemdeki Bozulmalar	1	1.39	Madde Döngüleri ve Çevre Sorunları	1	0.53
Maddenin Tanecikli Yapısı	1	1.39	Elektrik Devre Elemanları	1	0.53
Yenilenebilir Enerji Kaynakları	1	1.39	Kütle ve Ağırlık	1	0.53
Madde ve Isı	1	1.39	Kuvvetin Etkileri	1	0.53
Canlıları Tanıyalım	1	1.39	Asit ve Baz	1	0.53
Kütle ve Ağırlık	1	1.39	Dünyamız Ay ve Yaşam Kaynağımız	1	0.53
Kimyasal Tepkimeler	1	1.39	Canlılar ve Enerji İlişkileri	1	0.53
Asit ve Baz	1	1.39	Güneş Sistemi	1	0.53
Kuvvetin Ölçülmesi ve Sürtünme Kuvveti	1	1.39	Canlılar Dünyasını Gezelim ve Tanıyalım	1	0.53
Canlılarda Üreme Büyüme ve Gelişme	1	1.39	Kuvvet ve Katı Basıncı	1	0.53
Öğretim Programı İnceleme	1	1.39	İletken ve Yalıtkan Maddeler	1	0.53
			Canlılar ve Yaşam	1	0.53
			Isı-Sıcaklık	1	0.53
			Vücudumuzdaki Sistemler	1	0.53
			Astronomi	1	0.53
			Canlılarda Üreme, Büyüme ve Gelişme	1	0.53
			Beş Duyumuz	1	0.53
			Kuvveti Tanıyalım	1	0.53
			Maddeyi Tanıyalım	1	0.53
			Ders Kitabı İnceleme	1	0.53

Tablo 3'e göre, doktora tezlerinde en sık ele alınan araştırma konusu etkinlik temelli STEM çalışmalarıdır. Bunu laboratuvar uygulamaları ile kuvvet ve hareket gibi belirli fen konuları izlemektedir. Yüksek lisans tezlerinde ise en yaygın araştırma konusu STEM'e yönelik tutum ve görüşlerin incelenmesidir. Etkinlik çalışmaları

ve STEM farkındalık düzeyine yönelik araştırmalar yüksek lisans tezlerinde öne çıkan diğer konular arasında yer almaktadır. Hem doktora hem de yüksek lisans tezlerinde elektrik enerjisi, madde ve ısı, ışık ve ses, çevre ve geri dönüşüm gibi fen öğretim programında yer alan çeşitli konuların daha düşük frekanslarla ele alındığı görülmektedir.

Veri Toplama Araçlarına İlişkin Bulgular

Tablo 4. Tezlerde kullanılan Veri Toplama Araçlarına Göre Dağılım

Veri Toplama Araçları (Doktora)	Frekans (f)	Yüzde (%)	Veri Toplama Araçları (Yüksek Lisans)	Frekans (f)	Yüzde (%)
Dokümanlar	17	10.11	Görüşme Formu	48	10.50
Görüşme Formu	16	9.52	Akademik Başarı Testi	37	8.09
Akademik Başarı Testi	9	5.35	STEM Tutum Ölçeği	32	7.00
Gözlem	9	5.35	Doküman İnceleme	31	6.78
STEM Tutum Ölçeği	9	5.35	STEM Farkındalık Ölçeği	14	3.06
Bilimsel Yaratıcılık Testi	7	4.16	Öz Yeterlilik İnancı Ölçeği	14	3.06
Bilimsel Süreç Beceri Testi	6	3.57	Entegre FETEMM Öğretimi Yönelim Ölçeği	13	2.84
Öz Değerlendirme Formu	5	2.97	Bilimsel Süreç Beceri Testi	11	2.40
Eleştirel Düşünme Beceri Ölçeği	5	2.97	Problem Çözme Envanteri	11	2.40
Bilimsel Süreç Beceri Ölçeği	5	2.97	STEM Tutum Testi	9	1.96
STEM Kariyer İlgi Ölçeği	5	2.97	STEM Meslek Alanlarına İlgi Ölçeği	9	1.96
Karar Verme Beceri Testi	3	1.78	Görüş Anketi	9	1.96
Açık Uçlu Soru Formu	3	1.78	Fen Öğrenme Motivasyon Ölçeği	8	1.75
Fen Bilimleri Dersi Tutum Ölçeği	3	1.78	Fen Bilgisi Tutum Ölçeği	8	1.75
Problem Çözme Envanteri	3	1.78	Bilimsel Yaratıcılık Ölçeği	8	1.75
STEM Algı Testi	2	1.19	Açık Uçlu Soru Formu	8	1.75
STEM Farkındalık Ölçeği	2	1.19	Bilimsel Yaratıcılık Testi	7	1.53
Fene Yönelik Sorgulayıcı Öğrenme Becerileri Algı Ölçeği	2	1.19	Fen Tabanlı Girişimcilik Ölçeği	7	1.53
Yansıtıcı Düşünme Beceri Ölçeği	2	1.19	Rubrik	6	1.31
STEM Motivasyon Ölçeği	2	1.19	Fene Yönelik Sorgulayıcı Öğrenme Becerileri Algı Ölçeği	6	1.31

Öz Yeterlilik Ölçeği	2	1.19	Problem Çözme Beceri Ölçeği	6	1.31
Rubrikler	2	1.19	Kavramsal Anlama Testi	6	1.31
Etkinlikler	2	1.19	Kelime İlişkilendirme Testi	5	1.09
Problem Çözme Beceri Testi	1	0.59	STEM Algı Testi	4	0.87
Fen Başarı Testi	1	0.59	Mühendis Bilgi Ölçeği	4	0.87
Kelime İlişkilendirme Testi	1	0.59	Yansıtıcı Düşünme Becerisi Ölçeği	4	0.87
Bir İnsan Çiz Testi	1	0.59	STEM Kariyer Algı Ölçeği	3	0.65
Derin Düşünme Formu	1	0.59	Hazır Bulunuşluk Testi	3	0.65
Eleştirel Düşünme Başarı Testi	1	0.59	Çizim Testi	3	0.65
STEM Tutum Testi	1	0.59	Problem Çözme Beceri Testi	3	0.65
Üst Düzey Bilimsel Düşünme Becerileri Testi	1	0.59	Fen Öğretimi Görüş Ölçeği	3	0.65
Witkins Saklı Figürler Testi	1	0.59	STEM Alanlarına Karşı İlgi Ölçeği	3	0.65
Mühendislik Disiplin Bilgi Formu	1	0.59	Girişimcilik Beceri Değerlendirme Ölçeği	3	0.65
Eğitim Durumu Modülü Değerlendirme Formu	1	0.59	Bilimsel Süreç Değerlendirme Testi	2	0.43
Mühendislik Tasarım Süreç Formu	1	0.59	Fen Başarı Testi	2	0.43
Ders Planı Değerlendirme Formu	1	0.59	Erişi Testi	2	0.43
STEM Eğitimi İhtiyaç Analiz Formu	1	0.59	Çevresel Tutum Ölçeği	2	0.43
Problem Çözme Beceri Ölçeği	1	0.59	Eleştirel Düşünme Eğilim Ölçeği	2	0.43
Akademik Benlik Kavrama Ölçeği	1	0.59	Mühendislik İmaj Ölçeği	2	0.43
STEM Semantik Ölçeği	1	0.59	Bilimsel Süreç Beceri Ölçeği	2	0.43
Fene Yönelik Motivasyon Ölçeği	1	0.59	Öğrenci Tutum Ölçeği	2	0.43
STEM Alanlarına İlgi Ölçeği	1	0.59	Etkinlik	2	0.43
21 YY. Öğrenme Becerileri Ölçeği	1	0.59	Fen Bilimleri Dersi Kaygı Ölçeği	2	0.43
Yaratıcı Düşünme Eğilimleri Ölçeği	1	0.59	Tasarım Değerlendirme Ölçeği	2	0.43

STEM İlgi Ölçeği	1	0.59	Cümle Tamamlama Testi	1	0.21
Bilgisayarca Düşünme Ölçeği	1	0.59	Fene Yönelik Tutum Testi	1	0.21
Sorgulayıcı Öğrenme Beceri Algı Ölçeği	1	0.59	Ön Bilgi Testi	1	0.21
Bilgi İşlemsel Düşünme Ölçeği	1	0.59	Araştırmacı Tarafından Geliştirilen Test	1	0.21
STEM Metaforik Algı Ölçeği	1	0.59	Karar Verme Beceri Testi	1	0.21
Girişimcilik Yeterlilikleri Ölçeği	1	0.59	Bireysel Yenilikçilik Ölçeği	1	0.21
Bilişüstü Yeti Ölçeği	1	0.59	Yaşam Boyu Öğrenme Eğilim Ölçeği	1	0.21
Holland Mesleki Seçim Envanteri	1	0.59	Temel Beceri Ölçeği	1	0.21
STEM Eğitimi Anketi	1	0.59	Robotik Tutum Ölçeği	1	0.21
Kontrol Listesi	1	0.59	Kodlamaya Yönelik Tutum Ölçeği	1	0.21
			Katılım Ölçeği	1	0.21
			STEM Beceri Ölçeği	1	0.21
			Öğrenme Yaklaşımları Ölçeği	1	0.21
			Sorgulama Becerileri Ölçeği	1	0.21
			STEM Etkinlik Analiz Ölçeği	1	0.21
			Yapılandırmacı Öğrenme Ölçeği	1	0.21
			Çoklu Zekâ Ölçeği	1	0.21
			TP-STEMK (TP-STEMB) Ölçeği	1	0.21
			Bilimsel Okuryazarlık Ölçeği	1	0.21
			Disiplinli Zihin Ölçeği	1	0.21
			Öz Düzenleme Beceri Ölçeği	1	0.21
			Araştırmacı Tarafından Geliştirilen Ölçek	1	0.21
			Likert Tipi Ölçek	1	0.21
			Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Yönelik Tutum Ölçeği	1	0.21
			Bilimsel Tutum Ölçeği	1	0.21

Fen Laboratuvarı Girişimcilik Ölçeği	1	0.21
Mühendislik ve Fen Tutum Ölçeği	1	0.21
21 YY. Öğrenen Becerileri Ölçeği	1	0.21
STEM Algı Ölçeği	1	0.21
Mühendis Çiz Ölçeği	1	0.21
STEM Tutum Anketi	1	0.21
Bilimin Doğası Anketi	1	0.21
Mühendislik Nedir? Anketi	1	0.21
Performans Değerlendirme Formu	1	0.21
İhtiyaç Belirleme Formu	1	0.21
Veri Kaydı Formu	1	0.21
Mühendislik Alan Bilgi Formu	1	0.21
Mühendislik Tasarım Süreç Formu	1	0.21
STEM Kavram Haritası Formu	1	0.21

Tablo 4 incelendiğinde, dokümanlar, görüşme formları, görüşmeler ve akademik başarı testlerinin hem doktora hem de yüksek lisans tezlerinde sık kullanılan veri toplama araçları olduğu görülmektedir. Yüksek lisans tezlerinde görüşme formları, akademik başarı testleri ve STEM tutum ölçekleri ön plana çıkmaktadır. Doktora tezlerinde ise doküman inceleme ve görüşmelere daha sık yer verildiği belirlenmiştir. Gözlem, rubrik, bilimsel süreç beceri testleri, problem çözme envanterleri ve performans değerlendirme araçlarının kullanımının daha sınırlı olduğu görülmektedir.

*Veri Analiz Yöntemlerine İlişkin Bulgular***Tablo 5. Tezlerde Tercih Edilen Veri Analiz Yöntemlerine Göre Dağılım**

Veri Analiz Yöntemi (Nitel)	Frekans (f)	Yüzde (%)	Veri Analiz Yöntemi (Nicel)	Frekans (f)	Yüzde (%)
İçerik Analizi	98	64	T-Testi	104	18.44
Betimsel Analiz	49	31	Shapiro Wilks Normallik Testi	66	11.70
Tematik Analiz	2	1	Mann-Whitney U Testi	50	8.86
Sürekli Karşılaştırmalı Analiz	5	3	Frekans/Yüzde	46	8.15
Diğer	2	1	Çarpıklık-Basıklık Katsayı Değerleri	46	8.15
			Wilcoxon Testi	44	7.80
			Kolmogorov-Smirnov Testi	42	7.45
			Betimsel İstatistik	32	5.67
			Tek Yönlü Varyans Analizi ANOVA	31	5.49
			Levene Testi	17	3.01
			Kruskal Wallis Testi	16	2.84
			Faktör Analizi	12	2.13
			ANCOVA	9	1.59
			Pearson Korelasyon Katsayısı	8	1.42
			Tukey Testi	6	1.06
			Regresyon Analizi	6	1.06
			Scheffe Testi	3	0.53
			Korelasyon Analizi	3	0.53
			Ki Kare	3	0.53
			MANOVA	3	0.53
			Basit ve Kısmi Doğrusal Korelasyon	2	0.36
			İki Faktörlü ANOVA	2	0.36
			Mixed Between-Within ANOVA	2	0.36
			Box-M Testi	2	0.36
			Freidman Testi	2	0.36
			Madde Korelasyonu	1	0.18
			LSD Testi	1	0.18
			Bonferroni Çoklu Karşılaştırma Testi	1	0.18
			MANCOVA	1	0.18
			Kappa Değeri	1	0.18

Diğer (söylem analizi, meta-analiz, vb.)

Tablo 5'e göre, nitel veri analizinde en sık kullanılan yöntem içerik analizidir. Bunu betimsel analiz izlemektedir. Sürekli karşılaştırmalı analiz ve tematik analiz yöntemleri daha düşük frekanslarla kullanılmıştır. Nicel veri analizinde en yaygın kullanılan yöntem t-testidir. Normallik testleri (Shapiro Wilk, Kolmogorov Smirnov), frekans-yüzde hesaplamaları ve çarpıklık basıklık katsayıları da sıklıkla tercih edilen analiz yöntemleri arasında yer almaktadır. ANOVA, Mann Whitney U, Wilcoxon ve Kruskal Wallis testlerinin kullanımının görece daha sınırlı olduğu görülmektedir. Çok değişkenli analiz teknikleri düşük frekanslarla kullanılmıştır.

Araştırma Amaçlarına İlişkin Bulgular

Tablo 6. Tezlerin Araştırma Amaçlarına Göre Dağılımı

Çalışmanın Amacı (Doktora)	Frekans (f)	Yüzde (%)	Çalışmanın Amacı (Yüksek Lisans)	Frekans (f)	Yüzde (%)
Akademik Başarıya Katkısı	11	11.34	STEM Karşı Tutum	39	13.68
STEM'e Karşı Tutum	10	10.31	Akademik Başarıya Katkısı	36	12.63
Bilimsel Yaratıcılıklarına Etkisi	10	10.31	Problem Çözme Becerilerine Etkisi	25	8.77
Bilimsel Süreç Becerilerine Katkısı	10	10.31	STEM Eğitime Yönelik Görüşlerin İncelenmesi	20	7.02
Eleştirel Düşünme Becerilerine Katkısı	7	7.22	STEM Etkinliklerin Tasarımı, Kullanımı ve Etkililiği Hakkında Görüşlerin I İncelenmesi	20	7.02
STEM Kariyer/Meslek İlgilerine Etkisi	6	6.19	Bilimsel Süreç Becerilerine Katkısı	17	5.96
Problem Çözme Becerilerine Etkisi	6	6.19	STEM Uygulamalarının Fen Öğretimine Yönelik Öz-Yeterlilik Algıları	17	5.96
Fen Dersine Karşı Tutum Ve Motivasyon Üzerindeki Etkileri	5	5.15	STEM Farkındalık Düzeyleri	15	5.26
Öğretim Programına Uygunluğu Kullanımı ve Etkililiği Hakkında Görüş	4	4.12	Bilimsel Yaratıcılıklarına Etkisi	14	4.91
STEM Alanlarıyla İlgili Algı	4	4.12	STEM Kariyer/Meslek İlgilerine Etkisi	11	3.86
STEM Hakkında Görüş İnceleme	4	4.12	Girişimcilik Yeterliliklerine Etkisi	11	3.86

Sorgulayıcı Öğrenme Becerisine Katkısı	3	3.09	Fen Dersine Karşı Tutum ve Motivasyon Üzerindeki Etkileri	10	3.51
Karar Verme Becerisine Katkısı	3	3.10	STEM Eğitimin Fen Öğretimi Üzerinde Etkisi	8	2.81
STEM Entegrasyonu Sağlamada Öz-Yeterlilik Algıları	3	3.10	STEM Alanlarıyla İlgili Algı	8	2.81
Yansıtıcı Düşünme Becerisine Katkısı	2	2.06	Sorgulayıcı Öğrenme Becerilerine Katkısı	7	2.46
Mühendislik Disiplinine Yönelik Görüş ve Yeterliliklerine Etkisi	2	2.06	Mühendislik Ve Teknoloji Kavramına Yönelik Anlayış	5	1.75
STEM Farkındalık Düzeyleri	2	2.06	Kalıcılığa Etkisi	4	1.41
Psiko-Motor Becerilerine Etkisi	1	1.03	Yansıtıcı Düşünme Becerisine Katkısı	4	1.41
STEM Entegrasyonuna İlişkin Algıları	1	1.03	Kavramsal Anlama Üzerinde Etkisi	4	1.41
STEM'in Ders Ünitelerinde Tasarlanması, Uygulanması ve Değerlendirilmesi	1	1.03	Eleştirel Düşünme Becerilerine Katkısı	3	1.05
Girişimcilik Yeterliliklerine Etkisi	1	1.03	STEM Eğitiminin Tasarım Temelli Düşünme Becerisi Üzerine Etkisi	2	0.70
STEM Uygulamalarının Etkisi	1	1.03	Öğretmenlerin STEM'e Yönelik Alan Bilgilerini Ortaya Çıkarmak	2	0.70
			STEM Yaklaşımına Yönelik Hazır Bulunuşluk Hakkındaki Algı	1	0.35
			Çevrimiçi STEM Eğitimi Tasarlamak	1	0.35
			Öğretim Programına Uygunluğu, Kullanımı ve Etkililiği Hakkında Görüş	1	0.35

Tablo 6'ya göre, doktora tezlerinde en sık ele alınan araştırma amacı akademik başarıya katkının incelenmesidir. STEM'e karşı tutum, bilimsel yaratıcılık ve bilimsel süreç becerilerine yönelik amaçlar da doktora tezlerinde öne çıkmaktadır. Yüksek lisans tezlerinde ise en yaygın araştırma amacı STEM'e karşı tutumun incelenmesidir. Akademik başarıya katkı, problem çözme becerileri ve STEM'e yönelik görüşlerin incelenmesi yüksek lisans tezlerinde

sıkça ele alınan diğer amaçlar arasındadır. Farkındalık düzeyi, öz-yeterlilik algıları, kariyer ilgileri, yansıtıcı düşünme, karar verme ve kavramsal anlama gibi amaçların hem doktora hem de yüksek lisans tezlerinde daha düşük frekanslarla yer aldığı görülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, Türkiye’de 2014-2021 yılları arasında fen eğitiminde STEM uygulamalarını konu alan lisansüstü tezler yöntem, örneklem, konu, veri toplama araçları, veri analiz teknikleri ve araştırma amaçları açısından bütüncül biçimde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, STEM alanındaki akademik üretimin belirli eğilimler etrafında şekillendiğini göstermektedir.

Araştırma yöntem ve desenleri incelendiğinde, lisansüstü tezlerde nicel araştırma yöntemlerinin baskın olduğu, özellikle yarı deneysel desenin en sık tercih edilen araştırma deseni olarak öne çıktığı görülmektedir. Bu durum, STEM uygulamalarının etkililiğinin çoğunlukla deneysel karşılaştırmalar yoluyla test edilmeye çalışıldığını göstermektedir. Nitel araştırma yöntemleri kapsamında en sık kullanılan desenin durum çalışması olması, sınırlı sayıda çalışmada STEM uygulamalarının bağlamsal ve süreç temelli biçimde ele alındığını göstermektedir. Bununla birlikte, fenomenografik ve eylem araştırması gibi derinlemesine analiz imkânı sunan nitel desenlerin kullanımının görece sınırlı kaldığı dikkat çekmektedir. Yıldırım & Şimşek (2008), eğitim araştırmalarında nitel desenlerin öğrenme süreçlerini ve pedagojik etkileşimleri anlamada önemli bir rol üstlendiğini vurgulamaktadır. Bu bağlamda, Tablo 1’de ortaya çıkan dağılım, STEM araştırmalarında nitel yaklaşım çeşitliliğinin henüz yeterince gelişmediğini düşündürmektedir. Karma araştırma yöntemleri incelendiğinde ise iç içe gömülü desenin en sık kullanılan karma desen olduğu görülmektedir. Açıklayıcı doğrulayıcı sıralı desen ve çeşitleme desenin de belirli oranlarda tercih edilmesi, bazı çalışmalarda nicel ve nitel verilerin birlikte ele alındığını göstermektedir. Ancak karma yöntemlerin, STEM eğitiminin çok boyutlu yapısını bütüncül biçimde ortaya koyabilecek düzeyde yaygınlaşmadığı anlaşılmaktadır. Kelley & Knowles (2016), bütünlük STEM eğitiminin karma yöntem tasarımlarıyla ele alınmasının, disiplinler arası öğrenme süreçlerinin daha kapsamlı biçimde analiz edilmesine olanak sağlayacağını belirtmektedir. Araştırma yöntem ve desenlerinin genel dağılımı değerlendirildiğinde, STEM alanındaki lisansüstü tezlerin büyük ölçüde etkililik ve sonuç odaklı bir araştırma anlayışına dayandığı görülmektedir. Sanders (2009), STEM araştırmalarının yalnızca “etki var mı?” sorusuna odaklanmasının, STEM’in pedagojik ve kuramsal boyutlarının yeterince tartışılmamasına yol açabileceğini ifade etmektedir. Bu çerçevede Tablo 1 bulguları, Türkiye’de fen eğitiminde STEM araştırmalarının yöntemsel açıdan belirli bir standart oluşturduğunu; ancak desen çeşitliliği ve süreç odaklı yaklaşımlar açısından geliştirilmesi gereken bir alan olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, Türkiye’de fen eğitiminde STEM alanındaki lisan-

süstü tezlerde nicel ve yarı deneysel araştırma desenlerinin baskın olduğunu, buna karşın nitel ve karma yöntemlerin sınırlı düzeyde kullanıldığını göstermektedir. Bu durum, STEM araştırmalarında yöntemsel çeşitliliğin artırılmasına ve özellikle süreç temelli, derinlemesine analizlere olan ihtiyacın devam ettiğini ortaya koymaktadır.

Örneklem belirleme yöntemlerine ilişkin bulgular, tezlerde en sık kullanılan örneklem belirleme yönteminin uygun örneklem olması, araştırmaların önemli bir bölümünün erişilebilir ve kolay ulaşılabilir çalışma gruplarıyla yürütüldüğünü ortaya koymaktadır. Bunu amaçsal örneklem yönteminin izlemesi, araştırmalarda belirli özelliklere sahip katılımcı gruplarına yönelimin yaygın olduğunu göstermektedir. Buna karşın, basit seçkisiz, tabakalı ve küme örneklem gibi olasılıklı örneklem yöntemlerinin sınırlı sayıda tezde kullanıldığı görülmektedir. Bu durum, STEM alanındaki lisansüstü araştırmaların büyük bölümünde genellenebilirliği yüksek örneklem tasarımlarının tercih edilmediğine işaret etmektedir. Yıldırım ve Şimşek (2008), nitel ve karma araştırmalarda olasılıksız örneklemenin yaygın olarak kullanılabileceğini belirtmekle birlikte, örneklem seçim sürecinin açık biçimde gerekçelendirilmesinin yöntemsel şeffaflık açısından kritik olduğunu vurgulamaktadır. Tablo 2’de dikkat çeken bir diğer bulgu, incelenen tezlerin bir bölümünde örneklem belirleme yönteminin belirtilmemiş olmasıdır. Bu durum, araştırma raporlamasında yöntemsel ayrıntıların yeterince açık biçimde sunulmadığını ve çalışmanın tekrarlanabilirliği açısından sınırlılık oluşturabileceğini düşündürmektedir. Araştırma yöntemlerinin açık ve tutarlı biçimde raporlanması, özellikle STEM gibi disiplinler arası ve uygulama temelli alanlarda bilimsel güvenirliğin sağlanması açısından önem taşımaktadır. Sonuç olarak, Türkiye’de fen eğitiminde STEM alanındaki lisansüstü tezlerde örneklem belirleme süreçlerinin ağırlıklı olarak uygun ve amaçsal örneklem yöntemlerine dayandığını, buna karşın olasılıklı örneklem yaklaşımlarının sınırlı düzeyde kullanıldığını ortaya koymaktadır. Bu durum, STEM araştırmalarının erişilebilirlik açısından avantaj sağlamakla birlikte, farklı bağlamları temsil etme ve bulguların genellenebilirliği açısından daha dengeli örneklem tasarımlarına ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Araştırma konularının dağılımı incelendiğinde, doktora tezlerinde en sık ele alınan konunun etkinlik temelli STEM çalışmaları olması, bu düzeydeki araştırmaların daha çok uygulama tasarımı ve sınıf içi etkinliklerin geliştirilmesine odaklandığını ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra laboratuvar uygulamaları, kuvvet ve hareket ile çevre temelli konuların da doktora tezlerinde öne çıkan diğer araştırma alanları arasında yer aldığı görülmektedir. Yüksek lisans tezlerinde ise araştırma konularının büyük ölçüde STEM’e yönelik tutum ve görüş incelemeleri etrafında yoğunlaştığı belirlenmiştir. Etkinlik çalışmaları ve farkındalık düzeyi incelemeleri de yüksek lisans tezlerinde sıklıkla ele alınan konular arasında yer almaktadır. Bu durum, yüksek

lisans düzeyindeki çalışmaların ağırlıklı olarak STEM yaklaşımına ilişkin algı, tutum ve kısa süreli etkilerin belirlenmesine odaklandığını göstermektedir. Kelley & Knowles (2016), STEM eğitiminin bütünleşik yapısının yalnızca tutum ve algı değişkenleriyle sınırlı biçimde ele alınmasının, disiplinler arası öğrenme süreçlerinin yeterince anlaşılmasını güçleştirebileceğini belirtmektedir. Hem doktora hem de yüksek lisans tezlerinde fen bilimleri öğretim programında yer alan belirli ünitelerin (örneğin kuvvet ve hareket, elektrik enerjisi, madde ve ısı, ışık ve ses) sıklıkla tercih edildiği görülmektedir. Buna karşın öğretim programı geliştirme, disiplinler arası öğretim modelleri, STEM entegrasyonunun uzun vadeli etkileri ve kuramsal çerçeve geliştirmeye yönelik çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Sanders (2009), STEM araştırmalarının ağırlıklı olarak uygulama örnekleri ve içerik temelli konularla sınırlandırılmasının, alanın kuramsal gelişimini kısıtlayabileceğini vurgulamaktadır. Ayrıca araştırma konularının dağılımı, STEM uygulamalarının çoğunlukla ölçülebilir ve sınıf içi uygulanabilir fen konuları üzerinden ele alındığını göstermektedir. Moore ve arkadaşları (2015), STEM eğitiminin yalnızca belirli konu alanlarına indirgenmemesi, mühendislik tasarımı süreçleri ve disiplinler arası etkileşimlerin merkezde olduğu daha bütüncül araştırma konularıyla ele alınması gerektiğini belirtmektedir. Sonuç olarak, Türkiye’de fen eğitiminde STEM alanındaki lisansüstü tezlerin konu dağılımının büyük ölçüde etkinlik temelli uygulamalar, tutum ve farkındalık çalışmaları ile belirli fen üniteleri etrafında şekillendiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, STEM araştırmalarında uygulama ve içerik çeşitliliğinin arttığını göstermekle birlikte, kuramsal derinliği yüksek ve disiplinler arası boyutu güçlü araştırma konularına duyulan ihtiyacın devam ettiğini ortaya koymaktadır.

Veri toplama araçları açısından, hem yüksek lisans hem de doktora tezlerinde ölçekler, görüşme formları ve akademik başarı testleri en sık kullanılan veri toplama araçları arasında yer almaktadır. Bu durum, STEM uygulamalarının etkilerinin büyük ölçüde öğrencilerin bilişsel ve duyuşsal özelliklerini ölçmeye yönelik araçlarla değerlendirildiğini göstermektedir. Doktora tezlerinde dokümanlar, görüşme formları ve görüşmelerin öne çıkması; yüksek lisans tezlerinde ise görüşme formları, başarı testleri ve STEM’e yönelik tutum ve farkındalık ölçeklerinin daha yaygın biçimde kullanılması, veri toplama sürecinde benzer araçlara yönelindiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, lisansüstü araştırmalarda veri toplama sürecinin ağırlıklı olarak hazır ölçme araçları ve yapılandırılmış formlar üzerinden yürütüldüğünü göstermektedir. Buna karşın gözlem, rubrik, performans değerlendirme formları, açık uçlu soru formları ve süreç odaklı ölçme araçlarının daha sınırlı sayıda tezde kullanıldığı görülmektedir. STEM eğitiminin doğası gereği mühendislik tasarımı süreçleri, problem çözme ve disiplinler arası etkileşim gibi dinamik öğrenme süreçlerini içermesi, veri toplama sürecinde yalnızca ölçek ve test-

lere dayalı yaklaşımların yetersiz kalabileceğini düşündürmektedir. Moore ve arkadaşları (2015), STEM öğrenme süreçlerinin anlaşılabilmesi için çoklu veri kaynaklarının ve alternatif ölçme araçlarının birlikte kullanılması- nın önemine dikkat çekmektedir. Ayrıca, araştırmacı tarafından geliştirilen ölçme araçlarının sınırlı sayıda kullanılması, veri toplama sürecinde özgün araç geliştirme çalışmalarının yeterince yaygın olmadığını göstermektedir. Yıldırım ve Şimşek (2008), nitel ve karma araştırmalarda veri toplama araç- larının çeşitlendirilmesinin araştırma bulgularının derinliğini ve geçerliğini artıracığını vurgulamaktadır. Bu bağlamda, incelenen tezlerde veri toplama sürecinin ağırlıklı olarak ölçülebilir çıktılara odaklandığı, süreç odaklı ve al- ternatif ölçme yaklaşımlarının ise sınırlı kaldığı söylenebilir. Sonuç olarak, Türkiye’de fen eğitiminde STEM alanındaki lisansüstü tezlerde veri toplama araçlarının büyük ölçüde ölçek, test ve yapılandırılmış formlar etrafında şe- killendiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, alan yazında yaygın bir uygula- maya işaret etmekle birlikte, STEM eğitiminin karmaşık ve çok boyutlu ya- pısının daha kapsamlı biçimde incelenebilmesi için veri toplama araçlarının çeşitlendirilmesine yönelik bir gereksinimi de beraberinde getirmektedir.

Veri analiz yöntemleri incelendiğinde, nitel verilerde içerik analizinin açık ara en sık tercih edilen yöntem olması, incelenen çalışmaların büyük bir bölümünde verilerin tematik olarak sınıflandırılmasına ve betimlenme- sine dayalı bir analiz anlayışının benimsendiğini ortaya koymaktadır. İçerik analizini betimsel analiz yönteminin izlemesi, nitel verilerin çoğunlukla derinlemesine yorumdan ziyade tanımlayıcı bir çerçevede ele alındığını düşün- dürmektedir. Nicel veri analiz yöntemleri incelendiğinde ise t-testi, normallik testleri (Shapiro Wilk, Kolmogorov Smirnov) ve frekans/yüzde hesaplamala- rının en yaygın kullanılan analiz teknikleri olduğu görülmektedir. Bu durum, STEM uygulamalarının etkilerinin çoğunlukla iki grup karşılaştırmasına dayalı, temel istatistiksel analizler aracılığıyla incelendiğini göstermektedir. Buna karşın, faktör analizi, regresyon, MANOVA, ANCOVA ve MANCOVA gibi daha karmaşık ve çok değişkenli analiz tekniklerinin sınırlı sayıda tezde kullanılması dikkat çekmektedir. Bu bulgular, STEM eğitiminin doğası ge- reği çok boyutlu ve karmaşık öğrenme süreçlerini içermesine rağmen, analiz düzeyinde çoğunlukla temel ve sonuç odaklı istatistiksel yaklaşımların ter- cih edildiğini göstermektedir. Moore ve arkadaşları (2015), STEM eğitiminin disiplinler arası yapısının yalnızca çıktı karşılaştırmalarına indirgenemeye- ceğini; süreçlerin, etkileşimlerin ve öğrenme dinamiklerinin daha gelişmiş analiz teknikleriyle ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Benzer şekilde Srikoom ve arkadaşları (2018), etkili STEM öğretiminin anlaşılabilmesi için nitel ve nicel verilerin bütüncül biçimde analiz edilmesinin önemine dik- kat çekmektedir. Nitel veri analizinde tematik analiz, sürekli karşılaştırmalı analiz ve söylem analizi gibi derinlemesine çözümleme sağlayan yöntemle- rin sınırlı düzeyde kullanılması, STEM araştırmalarında pedagojik süreçle-

rin ayrıntılı biçimde incelenmediğine işaret etmektedir. Yıldırım ve Şimşek (2008), nitel araştırmalarda analiz sürecinin yalnızca verileri sınıflandırmakla sınırlı kalmaması, anlam üretmeye yönelik yorumlayıcı bir derinlik kazanması gerektiğini belirtmektedir. Sonuç olarak, Türkiye’de fen eğitiminde STEM alanındaki lisansüstü tezlerde veri analiz süreçlerinin ağırlıklı olarak temel betimsel ve karşılaştırmalı teknikler üzerinden yürütüldüğünü ortaya koymaktadır. Bu durum, STEM araştırmalarının yöntemsel açıdan belirli bir standart oluşturduğunu; ancak analiz çeşitliliği ve derinliği bakımından geliştirilmesi gereken bir alan olduğunu göstermektedir. STEM eğitiminin karmaşık yapısının daha kapsamlı biçimde anlaşılabilmesi için, gelecekte yapılacak çalışmalarda çoklu veri kaynaklarını bütünleştiren ve ileri düzey analiz tekniklerine yer veren araştırma tasarımlarının artırılması gerekmektedir.

Araştırma amaçları genel olarak değerlendirildiğinde, lisansüstü tezlerin büyük bölümünün STEM uygulamalarının akademik başarı, tutum, problem çözme ve bilimsel süreç becerileri üzerindeki etkilerinin incelenmesi ön plana çıkmaktadır. Bu durum, STEM araştırmalarının ağırlıklı olarak öğrenciler üzerindeki ölçülebilir bilişsel ve duyuşsal çıktılara odaklandığını göstermektedir. Doktora tezlerinde en sık ele alınan araştırma amacının akademik başarıya katkı olması, doktora düzeyindeki çalışmaların da büyük ölçüde uygulamaların etkililiğini test etmeye yöneldiğini düşündürmektedir. Benzer biçimde STEM’e karşı tutum, bilimsel yaratıcılık ve bilimsel süreç becerilerine yönelik etkilerin doktora tezlerinde öne çıkması, bu çalışmaların pedagojik sonuçları ortaya koymaya odaklandığını göstermektedir. Ancak doktora tezlerinden beklenen kuramsal derinlik, model geliştirme ya da uzun süreli pedagojik dönüşüm süreçlerine yönelik amaçların sınırlı düzeyde yer alması dikkat çekicidir. Yüksek lisans tezlerinde ise STEM’e yönelik tutumun incelenmesi en yaygın araştırma amacı olarak öne çıkmaktadır. Bunu akademik başarı ve problem çözme becerilerine yönelik çalışmalar izlemektedir. Bu bulgu, yüksek lisans tezlerinin çoğunlukla STEM yaklaşımına ilişkin algı, tutum ve kısa vadeli etkilere odaklandığını göstermektedir. Kelley ve Knowles (2016), STEM eğitiminin bütünleşik doğasının yalnızca tutum ve başarı değişkenleriyle sınırlı biçimde ele alınmasının, disiplinler arası öğrenme süreçlerinin yeterince açıklanamamasına yol açabileceğini vurgulamaktadır. Araştırma amaçlarının dağılımı genel olarak değerlendirildiğinde; öğretim programı geliştirme, STEM entegrasyonunun uzun vadeli etkileri, öğretmen eğitimi, disiplinler arası pedagojik modeller ve kuramsal çerçeve oluşturmayı hedefleyen çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, Sanders’ın (2009) STEM eğitiminin uygulama merkezli biçimde ele alınmasının alanın kuramsal gelişimini sınırladığı yönündeki eleştirileriyle örtüşmektedir. Benzer şekilde Moore ve arkadaşları (2015), STEM araştırmalarının yalnızca “etki” sorusuna değil, “nasıl” ve “neden” sorularına da yanıt verecek biçimde yapılandırılması gerektiğini belirtmektedir. Sonuç olarak, Türkiye’de fen eği-

timinde STEM alanındaki lisansüstü araştırmaların büyük ölçüde etkililik ve çıktı temelli amaçlar etrafında yoğunlaştığını, buna karşın kuramsal, süreç odaklı ve uzun vadeli dönüşümleri hedefleyen araştırma amaçlarının sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Bu durum, STEM alanındaki akademik üretimin niceliksel olarak gelişmesine karşın, araştırma amaçları bakımından daha dengeli ve derinlikli bir yapıya ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

Yüksek lisans ve doktora tezleri arasındaki dağılım, akademik üretim kültürü açısından da önemli ipuçları sunmaktadır. Yüksek lisans tezlerinin sayıca baskın olması ve doktora düzeyindeki çalışmaların sınırlı kalması, STEM alanında uzun soluklu, özgün ve kuramsal katkı üreten araştırmaların yeterince gelişmediğini göstermektedir. Bu bulgu, Topçu ve Çiftçi'nin (2018) Türkiye'de STEM araştırmalarının belirli üniversiteler ve akademik gruplar etrafında yoğunlaştığına yönelik tespitleriyle örtüşmektedir. Sonuç olarak, Türkiye'de fen eğitiminde STEM alanında gerçekleştirilen lisansüstü tezler önemli bir akademik birikim oluşturmakla birlikte, bu birikimin yöntemsel çeşitlilik, kuramsal derinlik ve kurumsal kapasite açısından güçlendirilmesi gerekmektedir. STEM eğitiminin yalnızca sınıf içi uygulamaların etkililiğini ölçen bir alan olarak değil; öğrenme süreçlerini, disiplinler arası etkileşimi ve pedagojik dönüşümü bütüncül biçimde ele alan bir araştırma alanı olarak konumlandırılması, hem akademik üretim kültürünün gelişmesine hem de eğitim politikalarının daha sağlam bir bilimsel zemine oturmasına katkı sağlayacaktır.

ÖNERİLER

- ◆ Gelecek araştırmalarda, çıktı odaklı çalışmaların yanı sıra süreç temelli ve uzun vadeli araştırma tasarımlarına ağırlık verilmesi önerilmektedir.
- ◆ Doktora düzeyindeki çalışmaların, kuramsal çerçeve geliştiren ve disiplinler arası pedagojik modelleri ele alan yapılarla güçlendirilmesi gerekmektedir.
- ◆ Karma yöntem araştırmalarının sistematik biçimde kullanılması, STEM eğitiminin çok boyutlu yapısının daha kapsamlı biçimde incelenmesine katkı sağlayacaktır.
- ◆ Örneklem seçiminde daha temsili ve çeşitli gruplara yönelinmesi, bulguların genellenebilirliğini artıracaktır.
- ◆ Veri toplama ve analiz süreçlerinde alternatif, süreç odaklı ve ileri düzey analiz tekniklerinin kullanımı teşvik edilmelidir.
- ◆ Üniversiteler arası iş birlikleri ve disiplinler arası araştırma ekipleri desteklenerek, STEM alanında sürdürülebilir bir akademik üretim kültürü oluşturulmalıdır.

KAYNAKÇA

- Avinal, M. (2019). *Üç boyutlu yazıcı teknolojisiyle tasarlanan etkinliklerin “Vücudumuzdaki Sistemler” ünitesinin öğretimine etkisinin incelenmesi ve bu teknoloji hakkında öğrenci görüşleri* (Yüksek lisans tezi). Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.
- Capraro, R. M., & Slough, S. W. (2013). Why PBL? Why STEM? Why now? An introduction to STEM project-based learning: An integrated science, technology, engineering and mathematics (STEM) approach. In R. M. Capraro, M. M. Capraro, & J. R. Morgan (Eds.), *STEM project-based learning* (pp. 1–5). Rotterdam, Netherlands: Sense Publishers.
- Ceylan, S. (2014). *Ortaokul fen bilimleri dersindeki asitler ve bazlar konusunda fen, teknoloji, mühendislik ve matematik (FETEMM) yaklaşımı ile öğretim tasarımı hazırlanmasına yönelik bir çalışma* (Yüksek lisans tezi). Uludağ Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Çelen, F. K., Çelik, A., & Seferoğlu, S. S. (2011, Şubat 2–4). Türk eğitim sistemi ve PISA sonuçları. *XIII. Akademik Bilişim Konferansı*’nda sunulan bildiri, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Demirbaş, M., & Yağbasan, R. (2006). Fen bilgisi öğretiminde sosyal öğrenme teorisine dayalı öğretim etkinliklerinin, öğrencilerin akademik başarılarına olan etkisinin incelenmesi. *Kastamonu Eğitim Dergisi*, 14, 113–128.
- Kelley, T. R., & Knowles, J. R. (2016). A conceptual framework for integrated STEM education. *International Journal of STEM Education*, 3(1), 11. doi:10.1186/s40594-016-0046-z
- Landivar, L. C. (2013). *The relationship between science and engineering education and employment in STEM occupations* (American Community Survey Reports). Washington, DC: U.S. Census Bureau.
- Milli Eğitim Bakanlığı [MEB]. (2016). *STEM eğitimi raporu*. Ankara: Yenilik ve Eğitim Teknolojileri Genel Müdürlüğü.
- Milli Eğitim Bakanlığı [MEB]. (2018a). *İlköğretim kurumları (ilkokullar ve ortaokullar) fen bilimleri dersi (3, 4, 5, 6, 7 ve 8. sınıflar) öğretim programı*. Ankara: Talim ve Terbiye Kurulu Başkanlığı.
- Moore, T. J., Johnson, C. C., Peters-Burton, E. E., & Guzey, S. S. (2015). The need for a STEM roadmap. In C. C. Johnson, E. E. Peters-Burton, & T. J. Moore (Eds.), *STEM road map: A framework for integrated STEM education* (pp. 3–12). New York, NY: Routledge.
- Sanders, M. (2009). STEM, STEM education, STEM mania. *The Technology Teacher*, 68(4), 20–26.

- Srikoom, W., Faikhamta, C., & Hanuscin, D. L. (2018). Dimensions of effective STEM integrated teaching practice. *K-12 STEM Education*, 4(2), 313-330.
- Topçu, M. S., & Çiftçi, A. (2018). 21. yüzyıl becerileri ve STEM. In A. D. Öğretir Özçelik & M. N. Tuğluk (Eds.), *Eğitimde ve endüstride 21. yüzyıl becerileri* (pp. 103-126). Ankara: Pegem Akademi.
- Topsakal, S. (2006). *İlköğretim 6., 7. ve 8. sınıflar fen ve teknoloji öğretimi*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım.
- Türk Sanayicileri ve İş İnsanları Derneği [TÜSİAD]. (2014). *STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) alanında eğitim almış işgücüne yönelik talep ve beklentiler araştırması*. İstanbul: TÜSİAD.
- Yıldırım, A., & Şimşek, H. (2008). *Sosyal bilimlerde nitel araştırma yöntemleri* (Geliştirilmiş 6. bs.). Ankara: Seçkin Yayıncılık.



GİRESUN İL GENELİNDEKİ SU KAYNAKLARINDA TOPLAM ALFA-BETA AKTİVİTE DÜZEYLERİNİN BELİRLENMESİ

“ ”

Biol ERTUĞRAL¹

Cafer Mert YEŞİLKANAT²

Yaşar KOBYA³

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

2 Prof. Dr.; Artvin Çoruh Üniversitesi, Eğitim Fakültesi Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi cmyesilkanat@artvin.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-7508-7548

3 Prof. Dr.; Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Temel Bilimler Bölümü ykoby@artvin.edu.tr, ORCID No: 0000-0001-7919-7552

1. GİRİŞSu, insan sağlığının korunması ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından önemli en temel doğal kaynaklardan biridir. Doğal ve yapay radyoaktif maddeler; jeolojik yapı, atmosferik taşınım süreçleri, endüstriyel faaliyetler ve nükleer uygulamalar gibi etkenler sonucu yeraltı ve yerüstü su kaynaklarına karışabilmektedir. Bu yüzden içme ve kullanma sularındaki radyolojik kalite parametrelerinin saptanması hem halk sağlığının korunması hem de ulusal ve uluslararası mevzuatlara uyumun sağlanması bakımından kritik bir önem taşımaktadır.

Doğal radyoaktivitenin temel kaynakları arasında Toryum (Th-232), Uranyum (U-238) Aktinyum serisine ait radyonüklidler ve bunların bozunma ürünleri bulunmaktadır. Bu bozunma süreçleri esnasında alfa ve beta parçacıkları yayılırken, söz konusu radyonüklidler hidrojeokimyasal mekanizmalar yoluyla su ortamına taşınabilmektedir. Buna ek olarak, nükleer enerji üretimi, tıbbi uygulamalar ve çeşitli endüstriyel işlemler sonucunda ortaya çıkan yapay radyonüklidler de su kaynaklarında saptanabilmektedir. İçme suyu aracılığıyla insan vücuduna giren alfa ve beta yayıcı radyonüklidler, uzun süreli maruziyet durumunda radyolojik açıdan risk oluşturabilmektedir (UNSCEAR, 2020).

Toplam alfa ve toplam beta aktivite seviyelerinin tespit, su örneklerinde bulunan tüm alfa ve beta yayıcı radyonüklidlerin birlikte oluşturduğu aktivite konsantrasyonunu belirlemeye yönelik bir tarama yöntemidir. Bu yaklaşım, her bir radyonüklidin ayrı ayrı analizi yapılmadan önce genel bir radyolojik durum değerlendirmesi yapılmasına imkân tanır ve suyun daha ayrıntılı analiz gereksinimi olup olmadığını ortaya koyar. Bu özelliğiyle hızlı, maliyet etkin ve verimli bir izleme yöntemi sunar. Uluslararası radyasyon koruma ilkeleri çerçevesinde, toplam alfa ve toplam beta ölçümleri içme sularının radyolojik kalite kontrolünde ilk adım olarak önerilmektedir (WHO, 2017).

İnsanların maruz kaldığı doğal arka plan radyasyonu; kozmik ışınlardan ve yer kabuğunda bulunan doğal radyonüklitlerin yaydığı radyasyonun bileşiminden oluşur. Bu radyasyonun önemli bir bileşenini de su kaynakları oluşturmaktadır. Yıllık etkin dozun hesaplanabilmesi için çevresel radyasyonun ölçülmesi ve analiz edilmesi zorunludur. Bu çerçevede, toplam alfa ve toplam beta aktivitelerinin ölçümü, çevresel dozun değerlendirilmesinde temel parametreler arasında yer almaktadır (ICRP, 2007).

İçme sularındaki radyolojik parametrelere ait sınır değerler, ulusal ve uluslararası mevzuatlarla tanımlanmıştır. Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization, WHO) içme suyu kılavuzlarında, toplam alfa aktivitesi için 0,5 Bq/L ve toplam beta aktivitesi için 1,0 Bq/L olmak üzere rehber düzeyler önermektedir (WHO, 2011). Avrupa Birliği İçme Suyu Direktifi de benzer biçimde gösterge parametreler belirlemekte ve bu değerlerin aşılması halinde kapsamlı radyonüklid analizlerinin gerçekleştirilmesini şart koş-

maktadır. Radyolojik risk analizleri ve doz hesaplamalarına ilişkin bilimsel veriler ise Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR) ile Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu (International Commission on Radiological Protection, ICRP) tarafından düzenli aralıklarla yayımlanmaktadır. Ülkemizde bu kapsamda yapılan ölçüm ve araştırmalar, önceki adı Türkiye Atom Enerjisi Kurumu olan kurum bünyesinde faaliyet göstermiş Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi laboratuvarlarında yürütülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, Giresun il ve ilçelerinde içme suyu kaynağı olarak değerlendirilen doğal kaynaklar ve çeşmelerden toplam 48 farklı noktadan alınan su örneklerinde toplam alfa ve toplam beta radyoaktivite tayini gerçekleştirilmiştir. Analizler, Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi laboratuvarlarında bulunan Berthold LB770 alfa-beta sayım sistemi ile belirlenmiştir. Analiz sonuçlarının ulusal ve uluslararası limit değerlerle uyumunun incelenmesi suretiyle bölgedeki içme sularının radyolojik açıdan değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Su Numunelerinin Örnekleme Stratejisi ve Toplanması

Bu çalışma, Giresun il merkezi ile Bulancak, Piraziz, Keşap, Espiye, Tirebolu, Güce, Dereli, Yağlıdere, Görele, Çanakçı, Eynesil, Çamoluk, Şebinkarahisar, Doğankent ve Alucra ilçelerini içerecek şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Örnekleme planına uygun olarak, her ilçe ve çevresinde yaklaşık 120°'lik bir açı oluşturacak şekilde konumlandırılan örnekleme noktaları belirlenmiş ve toplamda 48 ayrı lokasyondan su örneği toplanmıştır. Bunun yanı sıra, her bir noktanın coğrafi konumu Global Positioning System (GPS) cihazı kullanılarak saptanmış ve koordinat değerleri (X ve Y) kaydedilmiştir. Bu yaklaşımla, örnekleme sürecinin hem doğruluğu hem de izlenebilirliği güvence altına alınmıştır. Elde edilen konum bilgileri Tablo 1'de verilmiş olup numunelerin alındığı su kaynaklarına ait örnekler de Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 1. Giresun ili ve ilçeleri

Su örnekleri, gününbirlik gerçekleştirilen saha çalışmaları kapsamında Giresun il merkezi ile ilçelerinde yer alan farklı koordinatlardan temin edilmiştir. Örnekleme noktaları, belirli açılarla bir üçgen formu oluşturacak şekilde tasarlanmış ve her bir noktadan 2,5 L hacme sahip polietilen şişelere üçer adet numune alınmıştır. Numune alma işlemi doğrudan su kaynağından yapılmış; örnek kapları ise kullanılmadan önce steril su ile durulanarak dış kaynaklı kontaminasyon olasılığı en aza indirilmeye çalışılmıştır. Toplanan numuneler, bulundukları lokasyonların koordinat bilgileri etiketlere işlenerek kayıt altına alınmıştır.

Tablo 1. Numunelerin alındığı noktalar ve koordinatları

Noktalar		Koordinatlar	
Adı	No	Enlem (derece)	Boylam (Derece)
Giresun-Merkez	1	40,9124	38,3241
	2	40,9101	38,4090
	3	40,8937	38,3767
	4	40,9342	38,2471
Bulancak	5	40,8993	38,2442
	6	40,9246	38,2032
	7	40,9524	38,1239
Piraziz	8	40,9424	38,1581
	9	40,9424	38,1581
	10	40,9157	38,4489
Keşap	11	40,9130	38,5112
	12	40,9183	38,5328
	13	40,7179	38,4698
Dereli	14	40,7345	38,4683
	15	40,7441	38,4499
	16	40,9424	38,6903
Espiye	17	40,9293	38,7062
	18	40,9490	38,7209
	19	40,8847	38,7968
Güce	20	40,8937	38,8180
	21	40,9048	38,8117
	22	40,8593	38,6152
Yağlıdere	23	40,8626	38,6257
	24	40,8976	38,6408
	25	40,9882	38,7770
Tirebolu	26	40,9981	38,8114
	27	41,0009	38,8470
	28	40,8033	38,9218
Doğankent	29	40,8128	38,9272
	30	40,8306	38,9078
	31	41,0315	39,0108
Görece	32	41,0160	38,9985
	33	41,0363	38,9624
	34	40,9087	39,0069
Çanakçı	35	40,9210	39,0131
	36	40,9303	39,0124
	37	41,0505	39,1143
Eynesil	38	41,0315	39,1489
	39	41,0737	39,1768

	40	40,1266	38,7612
Çamoluk	41	40,1330	38,7342
	42	40,1207	38,6925
	43	40,3180	38,6988
Alucra	44	40,3173	38,6846
	45	40,3278	38,7424
	46	40,2833	38,3802
Şebinkarahisar	47	40,3230	38,4388
	48	40,2888	38,4688

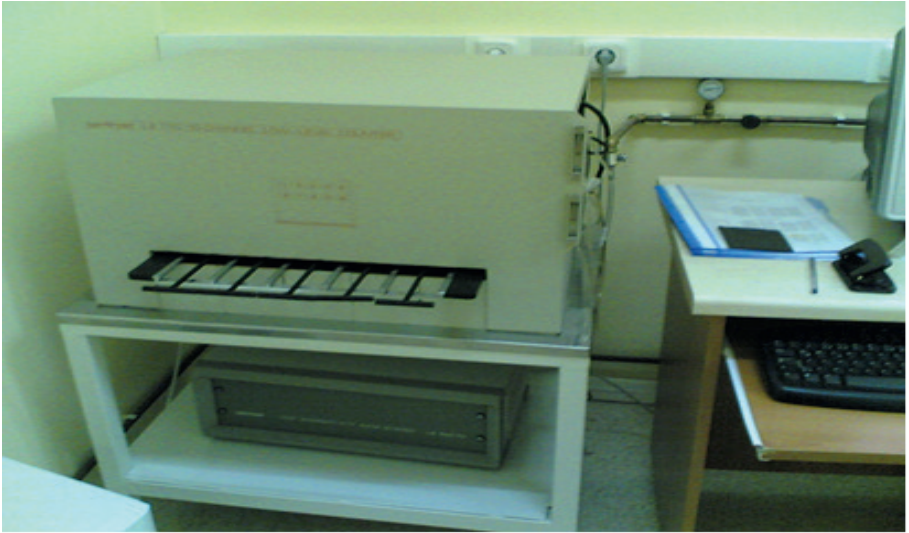
2.2. Numunelerin Toplam Alfa ve Beta Analizine Hazırlanması ve Ölçümü

Su numunelerinin toplanmasında kullanılan polietilen kaplar, önceden bikromik asitle muamele edilerek temizlenmiş, ardından sırasıyla musluk suyu ve çift distile su ile durulanarak numune alımına hazır hale getirilmiştir. Numune almaya başlanmadan önce, sistemde beklemiş olabilecek durağan suyun uzaklaştırılması için musluk suyu birkaç dakika akıtılmış; sonrasında kaplar, numune suyu ile üç kez çalkalanarak koşullandırıldıktan sonra doldurulmuştur. Toplanan numuneler, çözeltideki elementlerin çökmesini ve kap yüzeyine adsorpsiyonunu engellemek amacıyla nitrik asit eklenerek pH ≤ 2 olacak şekilde asitlendirilmiş, uygun biçimde etiketlenerek laboratuvara ulaştırılmıştır.

Laboratuvarda numuneler, çeker ocak içerisinde yaklaşık 60 °C’de hacimleri yaklaşık 100 mL seviyesine düşene kadar buharlaştırılarak ön konsantrasyona tabi tutulmuştur. Yoğunlaştırılan örnekler, darası önceden belirlenmiş paslanmaz çelik planşetlere aktarılmış ve tam kuruma sağlanıncaya kadar kurutma işlemine devam edilmiştir. Desikatörde oda sıcaklığına kadar soğutulan planşetler yeniden tartılarak rezidü kütlesi hesaplanmıştır. Alfa sayımlarında self-absorpsiyon etkisini mümkün olduğunca azaltmak için, her bir planşette biriken tortu miktarının 400 mg’ı geçmemesine dikkat edilmiştir. Bunun ardından planşetler 105 °C’de ilave kurutma işlemine tabi tutulmuş ve toplam alfa ile toplam beta aktivite tayini amacıyla uygun dedektör sistemi kullanılarak 500 dakika boyunca sayım yapılmıştır. Hazırlanan numunelerin toplam alfa ve toplam beta radyoaktivite ölçümleri, ÇNAEM Sağlık Fizik Bölümü Laboratuvarında bulunan ve aynı anda 10 numunenin alfa ve beta sayımını yapabilen çok kanallı ölçüm donanımına sahip, Berthold LB770 model düşük seviyeli alfa-beta ölçüm cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 2. Numunelerin alındığı su kaynak örnekleri



Şekil 3. Toplam alfa ve toplam beta sayım cihazı

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında, Giresun il merkezi ve 15 ilçesinden içme suyu amaçlı kullanılan 48 farklı istasyondan alınan su numunelerinde hidrojeo-kimyasal kalitenin temel göstergelerinden olan toplam alfa ve toplam beta radyoaktivite analizleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Toplam alfa ve toplam beta analiz bulguları

İstasyonlar		Toplam Alfa (Bq/L)	MDA (Bq/L)	Toplam Beta (Bq/L)	MDA (Bq/L)
GİRESUN MERKEZ	1	<0,03	0,03	<0,04	0,04
	2	<0,05	0,02	<0,09	0,09
	3	<0,05	0,05	<0,05	0,05
BULANCAK	4	<0,03	0,03	<0,03	0,03
	5	0,07±0,01	0,02	<0,12	0,12
	6	<0,05	0,05	<0,06	0,06
PİRAZİZ	7	<0,03	0,03	<0,03	0,03
	8	<0,02	0,02	<0,03	0,03
	9	0,07±0,01	0,02	<0,05	0,05
KEŞAP	10	<0,02	0,02	<0,02	0,02
	11	<0,02	0,02	0,06±0,01	0,02
	12	<0,02	0,02	0,14±0,02	0,03
ESPİYE	13	<0,02	0,02	0,05±0,01	0,02
	14	<0,02	0,02	0,08±0,01	0,01
	15	<0,02	0,02	0,12±0,02	0,03
TİREBOLU	16	0,06±0,01	0,02	<0,05	0,05
	17	<0,02	0,02	0,06±0,01	0,02
	18	0,05±0,01	0,02	<0,12	0,12
GÜCE	19	0,10±0,01	0,02	<0,12	0,12
	20	<0,02	0,02	<0,04	0,04
	21	<0,02	0,02	0,14±0,01	0,02
DERELİ	22	<0,02	0,02	<0,03	0,03
	23	<0,02	0,02	0,10±0,03	0,04
	24	<0,02	0,02	0,11±0,01	0,02

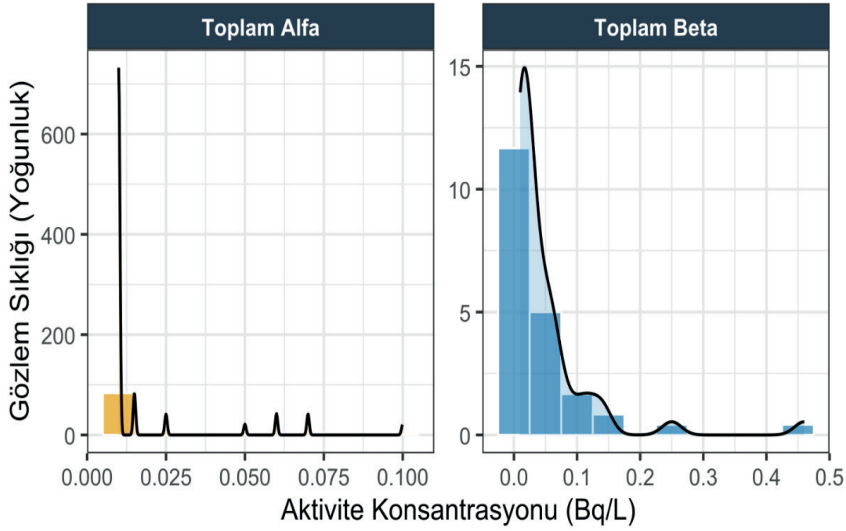
Tablo 2'nin devamı

YAĞLIDERE	25	<0,02	0,02	<0,04	0,04
	26	<0,02	0,02	<0,02	0,02
	27	<0,02	0,02	<0,02	0,02
GÖRELE	28	0,06±0,01	0,02	<0,05	0,05
	29	<0,02	0,02	<0,05	0,02
	30	<0,02	0,02	<0,02	0,02
ÇANAKÇI	31	<0,02	0,02	0,04±0,01	0,02
	32	<0,02	0,02	0,05±0,01	0,02
	33	<0,02	0,02	0,46±0,04	0,03
EYNESİL	34	<0,02	0,02	<0,05	0,05
	35	<0,02	0,02	<0,02	0,02
	36	<0,02	0,02	<0,04	0,04
ÇAMOLUK	37	<0,02	0,02	<0,02	0,02
	38	<0,02	0,02	0,07±0,01	0,02
	39	<0,02	0,02	0,04±0,01	0,02
ŞEBİNKARAHİSAR	40	<0,02	0,02	<0,02	0,02
	41	<0,03	0,03	<0,03	0,03
	42	<0,02	0,02	<0,02	0,02
DOĞANKENT	43	<0,02	0,02	0,25±0,02	0,04
	44	<0,02	0,02	<0,02	0,02
	45	<0,02	0,02	<0,03	0,03
ALUCRA	46	<0,02	0,02	<0,02	0,02
	47	<0,02	0,02	<0,02	0,02
	48	<0,02	0,02	<0,02	0,02

MDA (Bq/L): Minimum Tespit Edilebilir Aktivite

Çevresel radyoaktivite ölçümlerinde sıklıkla karşılaşıldığı üzere, doğal suların büyük bir bölümünde aktivite düzeyleri dedektör sistemlerinin Minimum Tespit Edilebilir Aktivite (MDA) sınırının altında (<MDA) kalmıştır (Tablo 2). Veri setinin genel istatistiksel mimarisini bozmamak ve dağılım modellerini sağlıklı bir şekilde gerçekleştirebilmek amacıyla, uluslararası literatürde radyometrik veri analizleri için kabul gören Yarı-MDA (Half-MDA Substitution) yaklaşımı (Helsel, 2005, 2011) kullanılmış ve <MDA olan veriler, matematiksel olarak MDA/2 kabul edilerek analizlere dâhil edilmiştir.

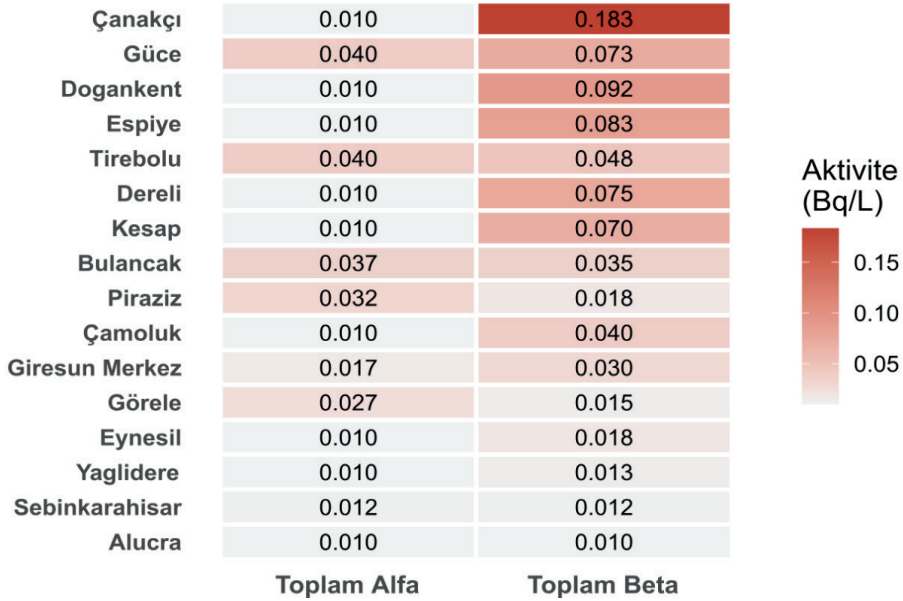
Suların radyolojik karakterizasyonunu belirleyen temel mekanizmalar; suyun temas ettiği yerkabuğundaki kayaçların toryum (Th-232), uranyum (U-238) ve potasyum (K-40) içeriği ile suyun pH, redoks potansiyeli ve çözünürlük kapasitesi gibi fizikokimyasal parametrelerine bağlıdır (Vengosh ve ark., 2022; Vinson ve ark., 2009). Bu bağlamda Giresun ili içme suyu numunelerine toplam alfa ve toplam beta aktivitelerine ait frekans ve yoğunluk dağılımları Şekil 4'de ikili histogram paneli olarak sunulmuştur.



Şekil 4. İçme suyu örneklerinin radyoaktivite frekans dağılımı

Şekil 4 incelendiğinde hem toplam alfa hem de toplam beta radyoaktivite türünde de istatistiksel olarak sağa çarpık bir dağılım olduğu belirgindir. Toplam alfa aktivite yoğunluğunun %80’den fazlası 0,010–0,015 Bq/L bandında dar bir alanda aşırı frekans yığılması sergilerken, nadiren 0,100 Bq/L seviyelerine uzanan ufak dalgalanmalar görülmüştür. Toplam beta dağılımı ise alfa radyasyonuna kıyasla daha homojen ve yayvan bir dağılım profili çizmektedir. Beta ölçümlerinde 0,010 Bq/L seviyelerinden başlayarak 0,250 ve en uçta 0,460 Bq/L değerlerine doğru uzanan veriler, bölgenin çevresel dinamiklerini yansıtmaktadır. Karasal suların beta aktivite içeriği genellikle ortamda doğal olarak bulunan çözünmüş K-40 izotopu ile uranyum ve toryum bozunma serisi kız ürünlerinin (örneğin önemli beta kaynağı olan Ra-228 ve Pb-210) hidrolojik döngüye katılımından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla Şekil 1’deki dağılım modelimiz, ortamda kirlilik arz eden bir radyoaktif anomalinin bulunmadığını, aksine doğal bir radyolojik arka planın (background) gözlemlendiğini ispatlamaktadır.

Çalışma alanındaki radyolojik dinamiklerin coğrafi/mekânsal farklılıklarını tanımlayıcı bir şekilde incelemek adına Şekil 5’de Bölgesel Isı Haritası oluşturulmuştur. Bu harita, 16 farklı ilçenin ortalama alfa ve beta skorlarını renk yoğunluklarıyla derecelendirerek hidrojeolojik anormallikleri veya kümelenmeleri görselleştirmektedir.



Şekil 5. Giresun ilçeleri ortalama radyoaktivite ısı haritası

Isı haritasına göre, Giresun il genelindeki ortalama alfa aktiviteleri 0,010 Bq/L ile 0,040 Bq/L (Tirebolu ve Güce) arasında oldukça dar bir sınırdan izole olmuştur. Toplam beta aktiviteleri ise coğrafi lokasyonlar arasında daha heterojen bir yapı göstermekte olup en belirgin yüksekliği ortalama 0,183 Bq/L ile Çanakçı ilçesi sergilemiştir. Çanakçı'yı, Doğankent (0,092 Bq/L), Espiye (0,083 Bq/L), Dereli (0,075 Bq/L) ve Güce (0,073 Bq/L) izlemektedir.

Bu mekânsal ayrışmanın temelinde yatan ana unsur, Doğu Karadeniz Bölgesi'nin ve bilhassa Giresun yöresinin (Doğu Pontidler tektonik birliğinin) sahip olduğu spesifik litolojik özelliklerdir. Özellikle Çanakçı ve Doğankent aksı gibi iç kesimlere uzanan noktalarda asidik/intruzif magmatik kayaçların (örneğin granitoidlerin) veya volkanik arakatkılı tortulların varlığı (Eyuboglu ve ark., 2021; Metin ve ark., 2024), yer altı ve yer üstü sularında alfa ve beta yayımı yapan radyonüklid konsantrasyonunu bir miktar artırabilmektedir (Koby ve ark., 2014). Benzer şekilde, yüksek rakımlı veya tarımsal aktivitenin yoğunlaştığı kesimlerde gübre kaynaklı antropojenik bileşenler (özellikle azot (N), fosfor (P) ve potasyum (K) içerikli gübrelerde doğal olarak bulunan radyopotasyum, K-40) toplam beta skorlarını minimal ölçekte yükseltme potansiyeline sahiptir (Szaciłowski, 2024). Ancak yine de elde edilen maksimum ilçe ortalamasının (0,183 Bq/L) izotopik bir toksisite (radyotoksisite) eşiğinin çok uzağında olduğu Şekil 5 deki bulgulara açıkça görülmektedir.

Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) İçme Suyu Kılavuzları ve Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR, 2020) raporlarına göre, dünya genelinde taze içme sularındaki doğal toplam alfa

konsantrasyonu ağırlıklı olarak 0,01 ile 0,10 Bq/L aralığındadır. Şekil 5’de sunduğumuz en yüksek Giresun ilçe ortalamasının 0,040 Bq/L ve tüm analizlerde ulaşılan bireysel en yüksek değerin (Güce) 0,10 Bq/L olması, verilerin global ölçekli standart normlarla mükemmel derecede uyumlu olduğunu kanıtlamaktadır. Türkiye perspektifinden bakıldığında; Bozkurt ve ark., (2007) Şanlıurfa yeraltı sularında, Damla ve ark., (2025) Diyarbakır içme sularında, ve Koby ve ark. (2014) ise doğrudan çalışma sahamıza komşu olan Artvin, Rize ve Trabzon illeri sularında Giresun’daki bulgulara çok benzer düzeyde, sıfıra yakın ortalama alfa ve beta aktiviteleri bildirmişlerdir. Özellikle komşu Trabzon-Rize-Artvin bandında ölçülen alfa aktivitelerinin 0,02 - 0,10 Bq/L arasında bulunması, Doğu Karadeniz Havzası’nda su kalite parametreleri bağlamında coğrafi ve bölgesel bir bütünlük olduğunu doğrulamaktadır. Dünyadan farklı litolojik formasyonlara örnek olarak, İtalya (Forte ve ark., 2007), Romanya (Begy ve ark., 2022) veya Çin’in (Niu ve ark., 2025) zengin magmatik bölgelerinde ve kaplıca alanlarında toplam alfa aktivitelerinin yer yer yüksek seviyelerinin tespit edildiği (özellikle Radon ve radyum türevli) dikkate alındığında, Giresun ilinin son derece sedanter (durgun/düşük) bir doğal radyolojik faunaya sahip olduğu ortadadır.

Dünya Sağlık Örgütü, bireylerin 1 yıl boyunca içme sularından alabileceği yıllık limit etkin radyasyon dozunu kontrol altında tutmak amacıyla bir tarama (screening) eşiği belirlemiştir (WHO, 2017). Bu limitler toplam alfa aktivitesi için 0,5 Bq/L, toplam beta aktivitesi için ise 1,0 Bq/L olarak öngörülmüştür. Su numunelerinin ölçüm cihazından elde edilen en ekstrem beta aktivitesi olan 0,46 Bq/L dahi WHO kılavuz limitinin ancak yarısına tekabül etmektedir. Isı haritasında belirgin bir koyu renk yansıması oluşturan Çanakçı ilçesi ortalaması (0,183 Bq/L), WHO limitinden %80 oranında daha düşüktür.

İleri istatistiksel yoğunluk taramaları ve coğrafi radyometrik analizler ışığında, Giresun il merkezi ve ilçelerine hizmet eden içme ve kullanma sularının ulusal ve küresel normlar dahilinde radyometrik düzey olarak uygun kalitede olduğu, radyolojik bir tehdit barındırmadığı belirlenmiştir. Gözlemlenen mikro ölçekli mekânsal varyasyonlar, tamamen yerel hidrojeolojik yapılarından ve Karadeniz tektoniğinin doğasından kaynaklanmaktadır. Gelecek projeksiyonlarında, bölgede kurulabilecek olası maden veya enerji tesislerinin izlenmesi adına bu çalışmada çıkarılan Giresun radyoaktivite referans profil (background) düzeyleri, son derece önemli ve stratejik bir bilimsel altlık oluşturmaktadır. Belirlenen bulguların temelinde Çanakçı, Espiye ve Doğankent gibi nispeten radyometrik sirkülasyonu yüksek noktaların, gelecekteki çevresel izleme planlarına referans olarak önceliklendirilmesi önerilmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Giresun il merkezi ve ilçelerini kapsayan geniş bir havzada, halkın içme suyu olarak faydalandığı 48 farklı istasyonun çevresel radyolojik karakterizasyonu toplam alfa ve toplam beta aktivite konsantrasyonları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, bölgedeki su kaynaklarının radyometrik içerik bakımından son derece düşük seviyelere sahip olduğunu ve numunelerin büyük çoğunluğunun sistem dedeksiyon sınırlarının (MDA) altında seyrettiğini açıkça ortaya koymuştur.

Geliştirilen istatistiksel frekans modelleri ve mekânsal ısı haritası analizleri ışığında; ölçülebilir düzeye ulaşan aktivitelerin bölgesel varyasyonlar sergilediği tespit edilmiştir. Toplam alfa aktivitesinde Güce ve Piraziz yörelerinde, toplam beta aktivitesinde ise bilhassa Çanakçı ve Doğankent istasyonlarında gözlemlenen göreceli yüksekliklerin (aykırı değerlerin), çevresel bir kirlilikten veya dışsal bir radyasyon sızıntısından kaynaklanmadığı, bu durumun, doğrudan Doğu Karadeniz Havzası'nın tipik hidrojeolojik doğasından ve bölge litolojisindeki radyoaktif izotopik (uranyum, toryum, potasyum) kayaç-su etkileşimlerinden kaynaklanan doğal bir radyolojik arka plan (background) olduğu bilimsel olarak düşünülmektedir.

Çalışmanın halk sağlığı bağlamındaki en önemli çıktısı; Giresun ili içme suyu havzalarında tespit edilen en ekstrem radyoaktivite bulgularının (maksimum 0,10 Bq/L alfa ve 0,46 Bq/L beta) dahi Dünya Sağlık Örgütü tarafından belirlenmiş olan içme suyu kılavuz sınır değerlerinin (alfa için 0,5 Bq/L; beta için 1,0 Bq/L) çok gerisinde kalmasıdır. Bu sonuçlar, bölgedeki yeraltı ve yerüstü doğal su kaynaklarının uzun süreli insan tüketimi açısından hiçbir akut veya kronik radyolojik risk taşımadığını, toksisite barındırmadığını ve tam güvenli içme suyu standartlarını karşıladığını doğrulamaktadır.

Sonuç olarak, bu araştırma, Giresun ili su kaynaklarına dair güncel ve son derece kapsamlı bir radyolojik referans veri tabanı sunmuştur. Halk sağlığının ve çevresel kalitenin sürdürülebilirliği adına, içme sularının bu denli temiz ve güvenli formunun korunması büyük önem arz etmektedir. Bölgede gelecekte yapılabilecek madencilik, endüstriyel veya enerji faaliyetlerinin su kaynakları üzerindeki etkilerini izleyebilmek için bu çalışmada elde edilen arka plan verilerinin bir altlık olarak kullanılması ve özellikle nispeten daha yüksek aktivite eğilimi gösteren lokasyonlarda periyodik izleme çalışmalarının rutin hale getirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Begy, R. C., Süle, C. F. S. D. K. ve Giagias, M. N. E. (2022). Radiological investigation of natural carbonated spring waters from Eastern Carpathians , Romania. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 331(3), 1439–1450. doi:10.1007/s10967-022-08195-3
- Bozkurt, A., Yorulmaz, N., Kam, E., Karahan, G. ve Osmanlioglu, A. E. (2007). Assessment of environmental radioactivity for Sanliurfa region of southeastern Turkey. *Radiation Measurements*, 42(8), 1387–1391. doi:10.1016/j.radmeas.2007.05.052
- Damla, N., Yesilkanat, C. M., Kaya, R., Taskin, H. ve Isık, U. (2025). Radiological health risk maps of drinking water in Diyarbakır city , Türkiye. *International Journal of Environmental Health Research*, 35(11), 3233–3249. doi:10.1080/09603123.2025.2482067
- Eyuboglu, Y., Dudás, F. Ö., Zhu, D., Santosh, M., Liu, Z. ve Chatterjee, N. (2021). Late Cretaceous alkaline magmas of the Eastern Pontides Orogenic Belt (NE Turkey) : A review with new geological , geochemical and geochronological data. *Gondwana Research*, 97, 204–239. doi:10.1016/j.gr.2021.05.009
- Forte, M., Rusconi, R., Cazzaniga, M. T. ve Sgorbati, G. (2007). The measurement of radioactivity in Italian drinking waters. *Microchemical Journal*, 85(1), 98–102. doi:10.1016/j.microc.2006.03.004
- Helsel, D. R. (2005). More than obvious: better methods for interpreting nondetect data. *Environmental science & technology*, 39(20), 419A-423A. doi:10.1021/es053368a
- Helsel, D. R. (2011). Computing Interval Estimates. *Statistics for Censored Environmental Data Using Minitab® and R* içinde (ss. 99–141). Wiley. doi:https://doi.org/10.1002/9781118162729.ch7
- ICRP. (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP Publication 103). Elsevier.
- Kobya, Y., Yeşilkanat, C. M. ve Çakir, B. (2014). Artvin, Rize ve Trabzon'daki Doğal Kaynak Sularında Toplam Alfa, Toplam Beta Aktivite Değerlerinin Belirlenmesi ve Jeostatistiksel Olarak Modellenmesi. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 35(4), 1–10.
- Metin, M., Bayram, Y., Ustaoglu, F., Şen, N., Tepe, Y. ve Tokatlı, C. (2024). Investigation of groundwater quality in the Southern Coast of the Black Sea : application of computational health risk assessment in Giresun , Türkiye. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(39), 52306–52325. doi:10.1007/s11356-024-34712-w
- Niu, Z., Deng, Z., Niu, X., Chen, D., Zhu, G., Xu, W. ve Zhang, L. (2025). Origin and risk assessment of natural radioactivity in groundwater from the Eastern Gonghe Basin , Tibetan Plateau, 13. doi:10.26599/JGSE.2025.9280056

- Szacilowski, G. (2024). Evaluation of natural radioactivity and assessment of dose increase due to the use of fertilizers produced in Poland. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 333(7), 3425–3430. doi:10.1007/s10967-023-09241-4
- UNSCEAR. (2020). Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly. https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2020_2021_1.html
- Vengosh, A., Coyte, R. M., Podgorski, J. ve Johnson, T. M. (2022). Science of the Total Environment A critical review on the occurrence and distribution of the uranium- and thorium-decay nuclides and their effect on the quality of groundwater. *Science of the Total Environment*, 808, 151914. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.151914
- Vinson, D. S., Vengosh, A., Hirschfeld, D. ve Dwyer, G. S. (2009). Relationships between radium and radon occurrence and hydrochemistry in fresh groundwater from fractured crystalline rocks , North Carolina (USA). *Chemical Geology*, 260(3–4), 159–171. doi:10.1016/j.chemgeo.2008.10.022
- WHO (2011) Guidelines for Drinking Water Quality. 4th Edition World Health Organization, Geneva, Switzerland. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151_eng.pdf
- WHO. (2017). Guidelines for Drinking-water Quality (4th ed.). World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>



TIBBİ GÖRÜNTÜLEMEDE TARİHSEL YOLCULUK

“ ”

¹Ayşe ÇÖMÜ

²Emel ECE

1 Ayşe ÇÖMÜ, Öğretim Görevlisi, KTO Karatay Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri MYO, Tıbbi Görüntüleme Teknikleri, Konya, Türkiye ORCID: 0000-0003-1334-1683

2 Emel ECE, Dr. Öğretim Üyesi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Kamil Özdağ Fen Fakültesi, Fizik, Karaman, Türkiye ORCID: 0000-0002-5954-3689

1. Giriş

Türkiye’de tıbbi görüntülemenin doğuşu ve gelişimi, 1895 yılında X-ışınlarının keşfinden itibaren hızla şekillenen bilimsel ve teknolojik ilerlemeler doğrultusunda önemli bir evrim geçirmiştir. Bu çalışma, Türkiye’de tıbbi görüntülemenin tarihsel gelişimini, küresel ölçekte yaşanan ilerlemelerle karşılaştırmalı olarak ele almayı amaçlamaktadır. Osmanlı döneminden Cumhuriyet’e uzanan süreçte gerçekleşen altyapı yatırımları, eğitim faaliyetleri ve sağlık politikalarındaki dönüşümlerin görüntüleme alanını nasıl etkilediği, tarihsel kronoloji temelinde sistematik olarak incelenecektir. Böylece Türkiye’nin yaklaşık 130 yılı aşan tıbbi görüntüleme serüveninin temel dönüm noktaları değerlendirilerek günümüz uluslararası eğilimleriyle kurduğu bağlantılar ortaya konacaktır.

Osmanlı Döneminde Radyolojinin Doğuşu

Wilhelm Conrad Röntgen’in 1895 yılında X-ışınlarını keşfetmesi, modern tıp tarihinde dönüm noktası olmuştur. Bu keşif, özellikle tıbbi teşhis ve tedavi süreçlerinde devrim yaratmış ve dünya genelinde hızla uygulanmaya başlanmıştır. X-ışınlarının keşfi, 1896 yılında Fransız fizikçi Antoine Henri Becquerel’in uranyum tuzlarının benzer bir radyasyon yaydığını bulmasıyla daha da geniş bir bilimsel merak uyandırmıştır. Marie ve Pierre Curie uranyum cevherlerini inceleyerek atomlardan yayılan enerjiye dayanan “radyoaktivite” kavramını sistematik olarak geliştirmiş ve 1898 yılında Polonyum ve Radyum elementlerini keşfederek, radyoaktif maddelerin saflaştırılması ve izolasyonu konularında çığır açan çalışmalar yapmıştır. Bu gelişmeleri takiben, Paul-Ulrich Villard radyumdan yayılan ışınların X-ışınlarıyla benzer özellikler taşıyan gama ışınları olduğunu ortaya koymuştur (Allisy, 1996; Gerward, 1999; Giroud, 1986; Mould, 1998).

Radyolojinin gelişim sürecinde, Ernest Rutherford’un atom çekirdeğini keşfetmesi (1911), yapay radyoaktiviteyi tanımlaması (1919) ve James Chadwick’in nötronu bulması (1932) önemli aşamalar olmuştur. Bu keşifler, radyografi ve radyoterapi tekniklerinin tıpta etkin bir şekilde kullanılmasına zemin hazırlamıştır. Radyoloji sayesinde iç organların görüntülenmesi ve radyoterapi aracılığıyla bazı kanser türlerinin tedavisi mümkün hale gelmiştir (Rutherford, 2014; Chadwick, 1932).

Ülkemizde X ışınlarını ilk olarak üretmeyi başararak para cüzdanının röntgenini çekerek içindeki metal parayı gösteren kişi Galatasaray Lisesinde fizik ve matematik öğretmeni olan Mösyö Isoard’dır. X ışınlarını kullanan Röntgen cihazını, Osmanlı İmparatorluğu’nda tıbbi anlamda ilk kez uygulayan kişi ise, 1896 yılında, İstanbul’da, o dönemde tıbbiye öğrencisi olan asistan Doktor Esad Feyzi olmuştur. Esad Feyzi, bu cihazı kullanarak ilk radyografileri çekmiş ve kısa süre içinde cihazın tıbbi teşhis alanındaki potansiyelini ortaya koymuştur. 1897’de Türk-Yunan Savaşı sırasında, Esad Feyzi, Yıldız

Geçici Askeri Hastanesi'nde Alman Kızılhaç tıbbi heyetiyle iş birliği yaparak yaralı askerlerin teşhisinde X-ışını teknolojisini kullanmıştır. Bu durum, dünya çapında askeri cerrahide X-ışınlarının kullanıldığı ilk uygulamalardan biri olarak kabul edilmektedir. Aynı dönemde, Yunanistan'da da İngiliz ve Yunan doktorlar benzer teknikleri kullanarak tıbbi radyografi alanında çalışmalar yapmıştır. Dr. Esad Feyzi, 1898 yılında Türkiye'deki ilk radyoloji kitabı olan "X-Işınları ve Tıbbi ve Cerrahi Uygulamaları" kitabını tamamlamıştır. "X-Işını, Doğası ve Tıbbi Uygulamaları" konulu makalesi, X-ışınlarının nasıl elde edildiğini, özelliklerini ve teşhisteki kullanımını anlattığı makalesi ise 1899 yılında yayımlanmıştır. 1898 yılında Gülhane Askeri Hastanesi, Almanya'dan davet edilen ve Tıp Fakültesi'nin yönetimi, müfredat yenilemesi ve bir eğitim hastanesi kurulması için sözleşme imzalayan Dr. Robert Rieder ve yardımcısı Dr. Franz Burchard Georg Deycke tarafından açılmıştır. Türkiye'deki üçüncü Röntgen cihazı, burada kullanılmıştır. Askeri Tıp Okulu, Yıldız ve Gülhane Hastanelerinde bu ilk Röntgen cihazlarının faydalarını gördükten sonra; yeni cihazlar Ankara Cebeci, Edirne, Haydarpaşa ve Selanik Askeri Hastanelerine, Bakırköy Emraz-i Akliye, Aksaray Haseki, Topkapı Bezmi Alem Vakıf Gureba, Şişli Hamidiye Etfal Hastanelerine tedarik edildi ve radyoloji laboratuvarları kurulmuştur. X-Işınları, 19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın başlarında kanser hastalıklarının tedavisinde denenmeye başlanmış ve böylece bu hastalıkların tedavisinde yeni bir yöntem olan radyoterapi ortaya çıkmıştır. Türkiye'de, X-Işınları ile ilk tedavi denemeleri 1899 yılında Tıp Fakültesi'nde Cemil Paşa tarafından yapılmıştır. 1902 yılında, bu alanda Şişli Hamidiye Etfal Hastanesi'nde bir laboratuvar kurulmuştur.

Cumhuriyetin İlk Yılları ve Kurumsallaşma

Cumhuriyet'in ilanından kısa bir süre sonra, Türkiye'de ilk radyoloji meslek kuruluşu kurulmuştur. 1924 yılında İstanbul'da "Türk Elektrofizyoloji Derneği" adıyla kurulmuş ve "Türk Radyoloji Derneği" olarak bugünkü adını almıştır. Cumhuriyetin ilk yıllarında, Sağlık Bakanlığı, hastanelerin ihtiyaçları için Röntgen cihazlarının temin edilerek kullanıma sunulmasını görev edinmiştir. Böylece 1924 yılında Ankara, Sivas, Diyarbakır, Erzurum ve İstanbul Gureba-yi Müslimin Hastaneleri için gerekli olan Röntgen cihazları alınmıştır (Ulman vd., 2005; Besim ve Başekim, 2018; Taşdelen vd., 2024).

1926 yılında, Viyana'da radyoloji eğitimi almış ve ülkemizin ilk radyoloji profesörü unvanını taşıyan Dr. Selahattin Mehmet Erk, İstanbul Haydarpaşa Tıbbiye Okulu'nda radyoloji bilimi için ilk düzenli eğitim kurslarını başlatmıştır. Bir yıl sonra, 1927'de, "Röntgen Tedavisi Rehberi" isimli bir çeviri eser yayımlayarak alandaki bilgi birikimine katkıda bulunmuştur (Dicle, 2017).

1930'da İstanbul Haseki Kadın Hastalıkları Hastanesi Radyoloji Laboratuvarı için gerekli olan ekipmanın ve Manisa Memleket Hastanesi için gerekli olan Röntgen cihazı ve aksesuarlarının alınmasına karar verilmiştir. Takip

eden yıllarda Sivas ve Aydın için benzer çalışmalar yapılmıştır. (İnce ve Keskinbora, 2023)

1933 yılında Atatürk'ün önderliğinde gerçekleştirilen Üniversite Reformu, Türkiye'de tıbbi alandaki gelişmelere önemli katkılar sağlamıştır. Bu reformla birlikte İstanbul Üniversitesi'nde Radyoloji Kürsüsü kurulmuş ve radyoloji alanında modernleşme süreci başlamıştır. İlk olarak Haydarpaşa'da kurulan Radyoloji Kürsüsü, daha sonra Şişli Etfal Hastanesi'ne taşınmıştır. Reform kapsamında, Nazi rejiminden kaçan ve çoğunluğu Musevi asıllı olan 60-70 kadar Alman bilim insanı, İstanbul Üniversitesi'nde görev yapmak üzere davet edilmiştir. Bu bilim insanlarından biri de dönemin önde gelen fizikçilerinden Prof. Dr. Friedrich Dessauer olmuştur. 1935 yılında, Gureba Hastanesi kampüsündeki bina restore edilerek modern radyoloji cihazlarıyla donatılmış ve burada Radyoloji ve Biyofizik Enstitüsü kurulmuştur. 1937 yılında, Başbakan İsmet İnönü'nün de katılımıyla enstitünün resmi açılışı gerçekleştirilmiştir. Bu merkezde, tıbbi görüntüleme alanında teşhis ve tedavi hizmetlerinin yanı sıra bilimsel araştırmalar da yapılmıştır. Kanser tedavisinde kullanılan “döner sandalye yöntemi” burada geliştirilmiş ve dünya üzerinde ilk kez gırtlak kanseri (larenks kanseri) hastasına uygulanmıştır. (Besim ve Başekim, 2018; Dinç, 2011; Kuter, 2002).

1937 yılında, meclis tarafından radyoloji alanında önemli bir adım atılmış ve 3153 sayılı yasa kabul edilmiştir. “Radyoloji, Radyom ve Elektrikle Tedavi ve Diğer Fizyoterapi Müesseseleri Hakkında Kanun” adıyla yürürlüğe giren bu yasa, radyasyonla çalışan iş yerlerinin izinle faaliyet göstermesi zorunluluğunu getirmiştir. Ayrıca, ilgili tüzüklerin hazırlanması ve gerektiğinde cezai yaptırımların uygulanması öngörülmüştür. Bu yasa kapsamında 1939, 1957 ve 1985 yıllarında üç farklı tüzük çıkarılmıştır (MBS, 1937).

1939 yılında, akademik alandaki ilk radyoloji kitabı olan “*Tıbbi Radyoloji: Teşhis ve Tedavi Esasları*” 1948 yılında radyoizotop tedavi endikasyonlarını içeren ilk broşür Prof. Tefik Berkman tarafından yayımlanmıştır.

Modern Radyolojiye Geçiş ve Teknolojik İlerlemeler

1950 yılında ABD elçiliğinin desteğiyle getirilen P32 maddesi dört hastanın tedavisinde kullanılmıştır. 1955'te gerçekleştirilen tüzük değişikliğiyle, radyodiagnostik ve radyoterapi alanları birbirinden ayrılarak bağımsız uzmanlık dalları haline gelmiştir (Taşdelen vd., 2024).

1950 yılında, yabancı bilim insanlarının ülkeden ayrılmasıyla birlikte, 1953 yılında İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik-Matematik bölümü mezunu olan Seyfettin Kuter Türkiye'de ilk medikal fizikçi olarak atanmıştır. Kuter'in öncülüğünde medikal fizik alanında eğitim programları başlatılmış ve yeni fizikçilerin yetiştirilmesine zemin hazırlanmıştır. İstanbul Üniversitesinde Onkoloji Enstitüsü Tıbbi Radyofizik Anabilim Dalını kurmuştur.

Kendi adını taşıyan Seyfettin Kuter Radyasyon Teknolojisi Müzesi de onun eseridir (Dinç, 2011).

Radyoloji alanında önemli bir adım, 1955 yılında yayın hayatına başlayan ve uzun yıllar boyunca yayımlanmaya devam eden “*Türk Radyoloji Dergisi*” olmuştur. Bu süreçte, Türkiye’nin farklı üniversitelerinde radyoloji kürsüleri kurulmaya devam ederken, 1966 yılında İstanbul’da, Çapa Radyoloji Enstitüsü ev sahipliğinde ilk Ulusal Radyoloji Kongresi düzenlenmiştir (Taşdelen vd., 2024).

1953-1986 yılları arasında, medikal radyasyon fiziği üzerine kurslar düzenlenerek birçok uzmanın yetişmesi sağlanmıştır. 1984 yılında İstanbul Üniversitesi Onkoloji Enstitüsü’nün kurulması ve 1986’da Tıbbi Radyofizik Bilim Dalı’nın açılmasıyla birlikte, yüksek lisans ve doktora düzeyinde akademik programlar başlatılmıştır. Bu programlar, diğer üniversitelere de örnek olmuş ve Türkiye’de medikal fiziğin temelleri bu süreçle atılmıştır. Türkiye’de radyoloji alanında atılan bu önemli adımlar, hem teşhis ve tedavi süreçlerinde başarıyı artırmış hem de akademik çalışmalarla uluslararası düzeyde ses getirmiştir (Kuter, 2002).

1970’li yılların başlarında, radyoloji dünyasında heyecan yaratan yeni teknolojiler ardı ardına kullanıma girmeye başlamıştır. Bu yeniliklerin ilki olan ultrasonografi, 1972 yılında Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi’ne getirilmiştir. Aynı fakülteye 1980 yılında Siemens Phonosonic SM marka, gri skala statik ve gerçek zamanlı görüntüleme yeteneğine sahip daha gelişmiş bir ultrasonografi cihazı da getirilmiştir.

Bilgisayarlı Tomografi (BT) teknolojisi ise Türkiye’ye 1976 yılında ulaşmıştır. İlk BT cihazı, Hacettepe Üniversitesi Radyoloji Bölümü’nde kullanılmaya başlanmıştır. Cihazın gelişi, dönemin popüler dergilerinden *Yankı*’nın kapağında “Beyine giden yol” manşetiyle duyurulmuştur. Dünya genelinde üretilen altı cihazdan biri olan bu cihazla yalnızca kranial bölge incelenebilmiş ve cihazın büyük boyutları, su ve yağ devreleriyle soğutulan röntgen tüpü nedeniyle ses izolasyonu için kurşun kaplı duvarlara ihtiyaç duyulmuştur. Teknik bakımı ise, üniversitede görev yapan iki fizik mühendisi tarafından sağlanmıştır. Bu cihaz, beş yıl boyunca Türkiye’deki tek BT cihazı olarak hizmet vermiştir.

Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRG) ise 1989 yılında ilk kez kullanılmaya başlanmıştır. Dokuz Eylül Üniversitesi Radyoloji Ana Bilim Dalı bünyesinde, 1 Tesla gücündeki Siemens marka sistem, bu alanda Türkiye için bir dönüm noktası olmuştur. BT’den farklı olarak, MRG cihazlarının ülkeye girişi hız kazanmış ve kısa sürede çok sayıda MRG merkezi kurularak ileri görüntüleme teknolojileri yaygınlaşmıştır.

Radyolojinin ülkemizde bağımsız bir ana bilim dalı olarak kabul edilmesi, uzun süren çabalar ve zorlu mücadeleler sonucunda gerçekleşmiştir. İlk radyoloji uygulamaları, cerrahi kliniklerde laboratuvar aracı olarak kullanılmış ve bu durum uzun yıllar devam etmiştir. Ancak, radyolojinin ayrı bir bilim dalı olarak yapılandırılması, 1933 yılındaki üniversite reformuyla kurulan Çapa Radyoloji Enstitüsü'nün açılmasıyla başlamıştır. Bu enstitüden yetişen uzman radyologlar, ilerleyen yıllarda Türkiye'nin farklı bölgelerinde radyoloji pratiğini hayata geçirmiş ve ana bilim dalı başkanlıkları üstlenmişlerdir. Çapa Radyoloji Enstitüsü, yaklaşık yirmi yıl boyunca ülkedeki tek radyoloji merkezi olarak varlığını sürdürmüştür.

1960'lı yılların başlarında, radyoloji alanında üç yeni merkez dikkat çekici çalışmalar yaparak bu alandaki gelişime katkı sağlamıştır. Bu merkezler, Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi, Hacettepe Üniversitesi Tıp Fakültesi ve İzmir'deki Ege Üniversitesi Tıp Fakültesi bünyesinde kurulmuştur. Özellikle 1963 yılında kurulan Hacettepe Üniversitesi Radyoloji Ana Bilim Dalı, Türkiye'de "Klinik Radyoloji" uygulamasını başlatmasıyla ön plana çıkmıştır. Klinik dallarla iş birliğini güçlendiren bu yaklaşım, radyolojinin tıbbi alandaki etkinliğini ve saygınlığını artırmıştır. Hacettepe'de başlatılan klinik radyoloji uygulaması, zamanla ülke genelinde yaygınlaşarak, tıbbi görüntüleme alanında önemli bir dönüm noktası oluşturmuştur.

2. Metot (Gereç ve yöntem)

Bu çalışma, tarihsel-kronolojik bir bakış açısı benimseyerek 1895 yılından günümüze kadar Türkiye'de tıbbi görüntülemenin gelişimini, alanın şekillenmesinde etkili olan anahtar dönüm noktaları üzerinden sistematik biçimde izlemektedir. Araştırmanın temel veri kaynağını, dönemin koşullarını yansıtan arşiv niteliğindeki ikincil kaynaklar, resmi kayıtlar ve kapsamlı literatür taramasından elde edilen bilgiler oluşturmaktadır. Bu veriler, ulusal ve uluslararası akademik çalışmalarla desteklenerek çok katmanlı bir çerçeveye oturtulmuştur. Toplanan bilgiler kronolojik bir yapıya yerleştirilmiş; her dönemin bilimsel, teknolojik, politik ve kurumsal dinamikleri dikkate alınarak olaylar arasındaki karşılıklı etkileşimler, gelişimin itici güçleri ve neden-sonuç ilişkileri ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Böylece çalışmada, Türkiye'de tıbbi görüntülemenin tarihsel dönüşümü bütüncül bir perspektifle ele alınmakta ve bu dönüşümün küresel eğilimlerle olan paralellikleri ve ayrılan yönleri bilimsel temelde ortaya konmaktadır.

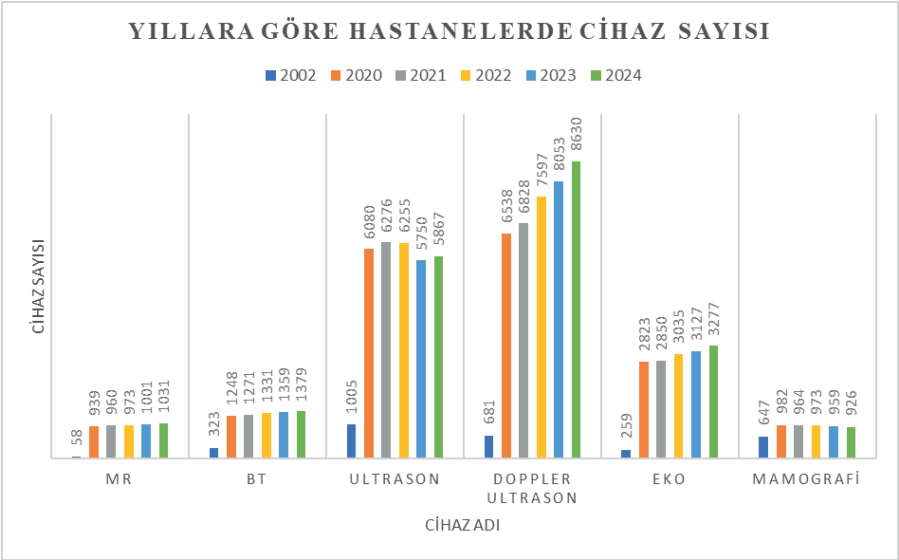
Bulgular

Kronolojik inceleme, X-ışınlarının keşfi sonrasında Türkiye'de tıbbi görüntülemenin ilk kullanımından başlayarak dijitalleşme süreci ve yapay zekâ destekli sistemlere geçişe kadar uzanan bir dizi kritik aşamayı ortaya koymaktadır. 1900'lü yılların başındaki askerî tıp uygulamaları, 20. yüzyılın ortalarında üniversite ve şehir hastanelerinin gelişimiyle bütünleşmiş, ilerleyen

dönemlerde ise dijital kayıt sistemlerinin yaygınlaşmasıyla daha sistematik bir yapıya kavuşmuştur. Küresel eğilimlerle karşılaştırıldığında Türkiye'nin teknolojiyi benimseme hızının yüksek olduğu, ancak kalite güvencesi ve doz yönetimi gibi standartlaştırma süreçlerinin daha yavaş olgunlaştığı görülmektedir.

Röntgen ışınlarının keşfiyle birlikte ülkemizde başlayan radyolojik çalışmalar, cumhuriyetin ilanıyla birlikte hız kazanarak önemli bir sıçrama gerçekleştirmiştir. Ülkemizde, radyoloji alanında dünya genelindeki teknolojik gelişmeler yakından takip edilmekte ve yenilikler hızla uygulamaya geçirilmektedir. Günümüzde, Türkiye'de yaklaşık 4000 radyoloji uzmanı görev yapmakta olup, her 100.000 kişiye ortalama 5 radyolog düşmektedir. Türkiye, dünya ile eş zamanlı olarak mamografi tetkiklerinde tomosentez teknolojisini kullanmaya başlamış ve üç boyutlu görüntüleme imkânını sunmuştur. Koroner arterlere yönelik BT anjiyografi uygulamaları, 70-100 atım/dakika aralığındaki yüksek kalp hızlarında dahi elektrokardiyografi eşliğinde yüksek uzaysal çözünürlükle gerçekleştirilebilmektedir (SİY, 2024).

T.C. Sağlık Bakanlığı tarafından en son yayınlanan Sağlık İstatistikleri Yıllığı 2024 (SİY, 2024) verilerine göre; hastanelerde bulunan MR, BT, Doppler Ultrason, EKO ve Mamografi cihaz sayılarında belirgin bir artış gözlenmiştir. (Şekil 1). Sektörlere göre bakıldığında ise Ultrason, Doppler Ultrason ve EKO cihaz sayılarının diğerlerine kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. (Tablo 1). Bir milyon kişiye düşen MR cihazı sayısının uluslararası karşılaştırılması yapıldığında OECD ülkelerinin % 19,7, Türkiye'nin ise 43 ülke verisi arasından % 12'ye sahip olduğu görülmektedir. (Şekil 2). Benzer şekilde bir milyon kişiye düşen BT cihazı sayısının karşılaştırılmasında, OECD % 28,8, Türkiye ise 16,1 ile yer almaktadır. (Şekil 3). Cihaz sayılarının uluslararası karşılaştırması yapıldığında OECD ülkelerinin ve AB ülkelerinin değerleri birbirine yakın görünüyorken, üye ülkeler de hesaba katılınca Türkiye'nin sahip olduğu sayıların az olmadığı düşünülebilir. (Şekil 4).

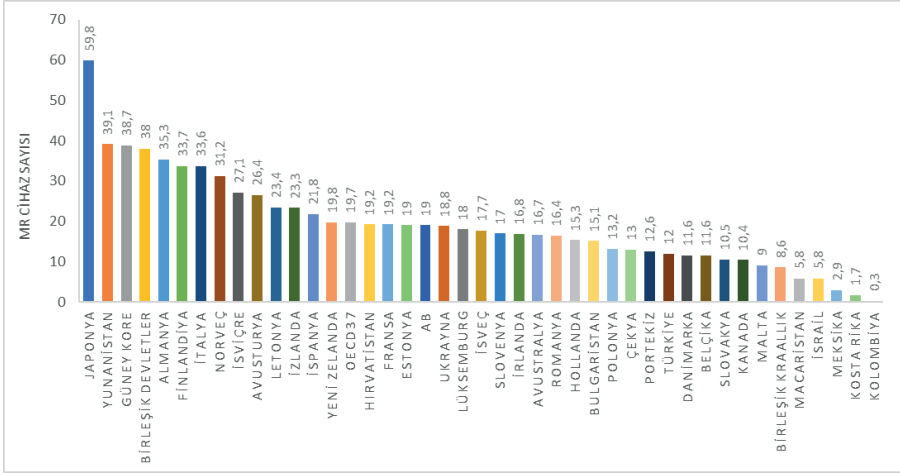


Şekil 1. Yıllara göre hastanelerde cihaz sayıları (Kaynak: Sağlık hizmetleri genel müdürlüğü, *Mamografi cihaz sayısı 2008 yılına aittir.)

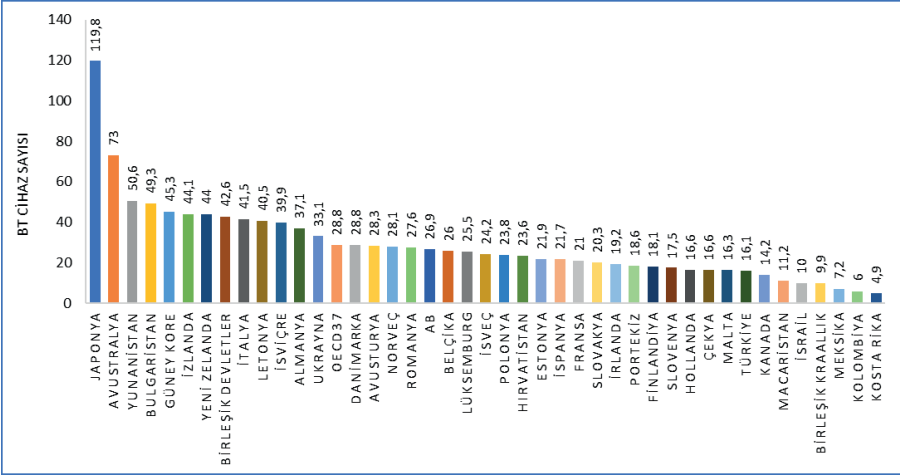
Tablo 1

Sektörlere göre hastanelerde cihaz sayıları, 2023 (Kaynak: Sağlık Hizmetleri Genel Müdürlüğü)

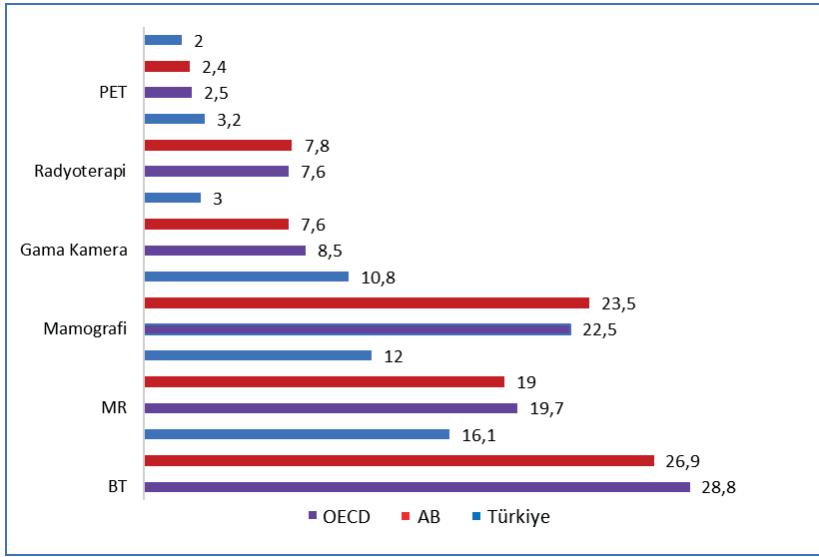
	Sağlık Bakanlığı	Üniversite	Özel	Toplam
MR	405	118	478	1001
BT	664	150	545	1359
Ultrason	2345	1128	2277	5750
Doppler Ultrason	5365	718	1970	8053
EKO	1917	351	859	3127
Mamografi	418	79	462	959
Gama Kamera	146	76	48	270
PET	59	50	60	169
Radyoterapi	93	92	84	269



Şekil 2. 1.000.000 kişiye düşen MR cihazı sayısının uluslararası karşılaştırılması, 2023
(Kaynak: Sağlık Hizmetleri Genel Müdürlüğü, OECD Health Data 2025, EUROSTAT
Veri tabanı Not: Türkiye verisi 2024 yılına aittir. Ülke verileri 2023 yılına veya en yakın
yıla aittir.)



Şekil 3. 1.000.000 kişiye düşen BT cihazı sayısının uluslararası karşılaştırılması, 2023
(Kaynak: Sağlık Hizmetleri Genel Müdürlüğü, OECD Health Data 2025, EUROSTAT
Veri tabanı Not: Türkiye verisi 2024 yılına aittir. Ülke verileri 2023 yılına veya en yakın
yıla aittir.)



Şekil 4. 1.000.000 kişiye düşen cihaz sayılarının uluslararası karşılaştırması, 2023 (Kaynak: Sağlık Hizmetleri Genel Müdürlüğü, OECD Health Data 2025, EUROSTAT Veri Tabanı, Not: Türkiye verileri 2024 yılına aittir. Ülke verileri 2023 yılına veya en yakın yıla aittir.)

Türkiye'deki bölgelere göz önüne alındığında 1.000.000 kişiye düşen MR, Doppler Ultrason, EKO, Mamografi cihaz sayısının İstanbul'da, BT cihazı sayısının Batı Anadolu'da, Ultrason cihaz sayısının Kuzeydoğu Anadolu'da fazla olduğu görülmektedir. Bunun da nüfus yoğunluğu ile ilişkili olduğu söylenebilir. (Tablo 2).

Tablo 2

İBBS-1'e ve sektörlere göre hastanelerde 1.000.000 kişiye düşen MR ve BT cihazı sayısı, 2024 (Kaynak: Sağlık Hizmetleri Genel Müdürlüğü)

	MR	BT	ULTRASON	DOPPLER ULTRASON	EKO	MAMOGRAFİ
İstanbul	14,3	16,7	69,4	131,5	48,2	12,8
Batı Anadolu	14,0	17,9	77,3	118,2	40,2	12,3
Akdeniz	12,8	16,8	65,7	94,2	34,7	11,5
Ege	12,3	16,9	72,4	98,8	39,7	11,7
Türkiye	12,0	16,1	68,5	100,2	38,3	10,8
Doğu Karadeniz	11,8	15,9	59,5	104,5	39,9	11,8
Batı Marmara	11,0	18,0	65,2	86,4	34,2	10,7
Doğu Marmara	10,8	13,9	50,9	93,1	38,7	9,5
Batı Karadeniz	10,8	17,0	78,3	87,7	35,4	11
Orta Anadolu	10,6	14,2	83,4	96,6	36,3	8,7
Ortadoğu Anadolu	10,6	17,0	67,8	62,9	33,5	9,3
Kuzeydoğu Anadolu	9,8	16,8	98,6	87,8	31,8	7,0
Güneydoğu Anadolu	9,3	12,7	59,7	82,3	28,8	7,7

2002 ve 2023 yılları kıyaslandığında; MR cihaz sayısında yaklaşık 17 kat artış gözlenmekte ve bu da MR'ın tanı ve teşhiste vazgeçilmez hale geldiğini ve erişimin ülke genelinde ciddi ölçüde iyileştiğini gösteriyor. BT cihaz sayısında yaklaşık 4 kat artış gözlenmekte ve bu durum özellikle acil tanı süreçlerinde BT kullanımının yaygınlaştığı gösteriyor. Ultrasonda cihaz sayılarının çok yüksek olması ve yaklaşık 5,7 kat artış, en yaygın ve kolay ulaşılabilir görüntüleme yöntemi olduğunun göstergesidir. Doppler Ultrason cihaz sayısında yaklaşık 12 kat artış ve 2019 sonrasındaki hızlı artış damarsal görüntüleme ihtiyacının arttığını gösteriyor. EKO cihazında ise 12 kat artış gözlenmekte ve bu durum kardiyoloji hizmetlerinin genişlediğini ve daha çok hastanede EKO erişimi olduğunu gösteriyor. Mamografi cihaz sayılarında artış var ama diğerlerine göre daha sınırlı. Meme kanseri tarama programlarının yaygınlaşmasıyla sayı genel olarak yükselmiş görünmektedir. Tüm cihaz türlerinde 20 yılda büyük artış görülüyor. Bu, sağlık sisteminin kapasite ve erişilebilirlik açısından ciddi biçimde güçlendiğini gösteriyor. (Tablo 3).

Tablo 3

*Yıllara göre hastanelerde cihaz sayıları (Kaynak: Sağlık Hizmetleri Genel Müdürlüğü)
(*Mamografi cihaz sayısı 2008 yılına aittir.)*

	2002	2020	2021	2022	2023	2024
MR	58	939	960	973	1.001	1031
BT	323	1.248	1.271	1.331	1.359	1379
Ultrason	1.005	6.080	6.276	6.255	5.750	5867
Doppler Ultrason	681	6.538	6.828	7.597	8.053	8630
EKO	259	2.823	2.860	3.035	3.127	3277
Mamografi	647*	982	964	973	959	926

BT teknolojisindeki ilerlemeler sayesinde çekimlerde kesit kalınlığı 0.625 mm'ye kadar düşürülmüş, çift enerji kullanan cihazlarla madde analizleri ve moleküler içerikler saptanabilir hale gelmiştir. MR cihazlarıyla kanser hastalarının tanı ve tedaviye yanıt değerlendirmeleri artık invaziv yöntemlere gerek kalmadan, MR perfüzyon ve difüzyon teknikleri kullanılarak yapılabilmektedir. Modern dijital substraksiyon anjiyografi cihazları sayesinde kılavuz görüntüler oluşturulmakta ve üç boyutlu damarsal haritalar çıkarılarak, vücudun çeşitli bölgelerindeki damar hastalıkları ve kanserler başarılı bir şekilde tedavi edilebilmektedir.

Son yıllarda ise, radyoloji alanında yapay zekâ teknolojileri hızla yaygınlaşmıştır. Yapay zekâ destekli otomatik tanı sistemleri, gelişmiş algoritmalar sayesinde radyoloji uzmanlarının iş yükünü azaltmakta ve tanı süreçlerinde doğruluk oranını artırmaktadır. Yapay zekâ uygulamalarının entegrasyonu, radyolojinin gelecekteki gelişiminde önemli bir rol üstlenmeye devam etmektedir (Taşdelen vd., 2024).

3. Tartışma

Türkiye’de radyoloji alanının gelişim çizgisi, 1895’te Wilhelm Conrad Röntgen’in X-ışınlarını keşfetmesiyle başlayan küresel dönüşümün, Osmanlı İmparatorluğu’nda ve daha sonra Cumhuriyet döneminde hızla karşılık bulduğunu göstermektedir. X-ışınlarının keşfinden hemen sonra Osmanlı hekimleri tarafından klinik uygulamalara uyarlanması, dönemin tıbbi çevrelerinin yenilikçi yaklaşımlara ne kadar açık olduğunu önemli bir göstergesidir. Bu erken benimseme süreci, radyolojinin yalnızca bir görüntüleme aracı değil, aynı zamanda modernleşen tıp anlayışının bir sembolü olarak algılandığını ortaya koymaktadır.

Osmanlı’nın son döneminde radyolojik uygulamaların özellikle askerî tıp merkezlerinde gelişmesi, Türkiye’de radyolojinin kurumsal temellerinin savaş ve travma temelli pratiklerden doğduğunu işaret eder. Balkan Savaşları ile I. Dünya Savaşı sırasında kırıkların değerlendirilmesi ve yabancı cisimlerin lokalizasyonunda radyografinin kullanılması, teknolojinin klinik etkinliğine yönelik farkındalığı artırmıştır. Ancak bu dönemde dünyada olduğu gibi Türkiye’de de radyasyonun zararlarına ilişkin bilgi birikimi sınırlı olduğundan, maruziyetin deterministik etkileri yeterince öngörülemezdir. Bu durum, sonraki yıllarda radyasyon güvenliğine ve koruyucu mevzuatın oluşturulmasına duyulan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır.

Cumhuriyet döneminde sağlık politikalarının yeniden şekillendirilmesiyle birlikte radyoloji, akademik ve kurumsal bir kimlik kazanmıştır. Üniversite reformu sonrasında İstanbul Üniversitesi’nde radyoloji kürsülerinin kurulması, disiplinin bilimsel bir uzmanlık alanı olarak tanınmasını sağlamış ve hem eğitim hem de araştırma faaliyetlerinin sistematik biçimde yürütülmesine zemin hazırlamıştır. Bu süreç, Türkiye’de radyolojik uygulamaların üniversite odaklı geliştiğini; ancak çevre illere ve daha küçük sağlık kuruluşlarına yayılımın daha yavaş ve kademeli ilerlediğini göstermektedir.

Teknolojik gelişmelerin izlenmesi açısından bakıldığında, Türkiye’nin dünya ile uyumlu bir seyir izlediği görülmektedir. 1970’lerden itibaren Bilgisayarlı Tomografi’nin kullanıma girmesi, tanısal doğrulukta önemli artış sağlamış; devamında Manyetik Rezonans Görüntüleme, dijital radyografi ve PACS sistemlerinin entegrasyonu hem görüntü kalitesini yükseltmiş hem de klinik iş akışlarını daha verimli hâle getirmiştir. Bununla birlikte, uzun yıllar boyunca ileri teknolojilere erişimin bölgesel eşitsizlikler içerdiği, büyük şehirler ile kırsal alanlar arasında cihaz ve uzman dağılımında belirgin farklar olduğu anlaşılmaktadır.

Son yıllarda yapay zekâ uygulamalarının dünyada olduğu gibi Türkiye’de de radyoloji pratiğine hızla entegre edilmesi, disiplinin yeni bir dönüşüm evresine girdiğini göstermektedir. Otomatik görüntü analizleri, karar destek sistemleri ve derin öğrenme tabanlı algoritmalar, raporlama süreçle-

rini hızlandırmakta ve tanısal doğruluğu desteklemektedir. Ancak bu teknolojilerin kullanımında etik sorumluluklar, hukuki çerçeveler, veri güvenliği ve uzmanlık rollerinin yeniden tanımlanması gibi konular hâlen tartışılmaya açıktır ve gelecekte daha kapsamlı çalışmalar gerektirecektir.

Genel bir değerlendirme yapıldığında Türkiye'nin radyoloji tarihinin üç baskın eksen etrafında şekillendiği söylenebilir:

- 1. Osmanlı döneminde hızlı teknolojik adaptasyon,**
- 2. Cumhuriyet ile kurumsallaşma ve akademik yapılanmanın güçlenmesi,**
- 3. Son dönemde dijitalleşme ve ileri görüntüleme teknolojilerinin entegrasyonu.**

Bununla birlikte, radyasyon güvenliği kültürünün güçlendirilmesi, uzman dağılımındaki dengesizliklerin giderilmesi ve sürekli mesleki eğitim süreçlerinin standartlaştırılması gibi alanlarda gelişim potansiyeli devam etmektedir.

Sonuç olarak Türkiye'de radyoloji, başlangıçta dış kaynaklı bir bilimsel buluşun hızlı bir şekilde uygulanması ile ortaya çıkmış; zaman içinde kendi akademik birikimini oluşturarak uluslararası literatüre katkı sunabilen bir disipline dönüşmüştür. Gelecekte teknolojik yeniliklere uyum, multidisipliner çalışma kültürü ve hasta güvenliği odaklı yaklaşımlar, Türkiye radyolojisinin gelişiminde belirleyici unsurlar olmaya devam edecektir.

4. Sonuç

Wilhelm Conrad Röntgen'in 1895 yılında X-ışınlarını keşfiyle başlayan bilimsel dönüşüm, Türkiye'de yaklaşık 130 yıl boyunca devam eden kapsamlı bir uyum ve gelişim sürecini tetiklemiştir. Osmanlı İmparatorluğu'nun son dönemlerinde radyografik yöntemlerin hızla uygulanmaya başlanması, dönemin hekimlerinin teknolojik yenilikleri yakından takip edebildiğini ve modern tıbbın gerektirdiği değişime yüksek bir uyum kapasitesi sergilediğini göstermektedir. Cumhuriyet'in ilanı sonrasında gerçekleştirilen kurumsal reformlar, tıp fakültelerinin yeniden yapılandırılması ve uzmanlık alanlarının sistematik biçimde tanımlanması sayesinde radyoloji, bağımsız bir akademik disiplin niteliği kazanmıştır.

Türkiye'nin küresel bilimsel gelişmeleri yakından izleyerek yeni teknolojileri kısa sürede klinik pratiğe entegre etmesi, disiplinin uluslararası ilerlemelerle eş zamanlı bir gelişim seyri izlediğini ortaya koymaktadır. Zaman içerisinde analog görüntüleme tekniklerinden dijital sistemlere geçilmesi; konvansiyonel radyografiye ek olarak bilgisayarlı tomografi ve manyetik rezonans görüntüleme gibi ileri kesitsel yöntemlerin yaygınlaşması, tanısal doğruluğun ve sağlık hizmeti kapasitesinin belirgin şekilde artmasına kat-

kı sağlamıştır. Dijitalleşmenin sunduğu arşivleme, veri saklama ve iş akışı yönetimi avantajları, radyolojinin sağlık hizmetleri içerisindeki konumunu daha da güçlendirmiştir. Günümüzde yapay zekâ destekli görüntü analitiği, teleradyoloji uygulamaları ve büyük veri tabanlı yaklaşımlar, Türkiye’de radyolojinin yalnızca teknoloji tüketen bir alan olmaktan çıkarak bilgi üreten bir disiplin olma potansiyelini ortaya koymaktadır. Geleceğe yönelik değerlendirmeler, Türkiye’de radyoloji alanının sürdürülebilir gelişimi için bölgesel farklılıkların azaltılması, radyasyon güvenliği kültürünün kurumsal düzeyde güçlendirilmesi, sürekli mesleki eğitimin standartlaştırılması ve dijital dönüşümle uyumlu etik-hukuki çerçevelerin geliştirilmesi gibi kritik başlıkların önemini vurgulamaktadır. Bu gereksinimlerin karşılanması, ulusal uygulamalarda tutarlılığı artıracak ve uluslararası standartlarla uyumu belirgin biçimde güçlendirecektir. Türkiye’nin 130 yıllık radyoloji birikimi; güçlü tarihsel temellere dayanan, teknolojik yeniliklere açık ve sürdürülebilir bir gelişim perspektifi sunmaktadır. Disiplinin artan akademik üretkenliği ve teknolojik ilerlemelerle birleşen uygulama kapasitesi, Türkiye’nin radyoloji alanında hem bölgesel hem de küresel ölçekte etkili bir konumda yer alma potansiyelini desteklemektedir. Tarihsel süreçte Esad Feyzi’nin öncülüğünde başlayan radyoloji uygulamalarının özellikle savaş dönemlerinde tıbbi teşhiste sağladığı başarılar, alanın Türkiye’deki modern tıbbın dönüşümündeki kritik rolünü göstermektedir. Bu temeller üzerine, 1896’da başlayan Türkiye’nin radyoloji serüveninin gelecekte daha ileriye taşınabilmesi için nitelikli insan gücünün yetiştirilmesi, modern cihaz altyapısına sahip merkezlerin yaygınlaştırılması, küresel gelişmelerin yakından takip edilmesi ve eğitimin öncelikli bir alan olarak ele alınması gerekmektedir. Halihazırda önemli aşamalar kaydetmiş olan Türkiye’nin yeni hedefinin, radyoloji merkezlerinde kullanılan ileri teknoloji cihazları yerli olarak üretebilmek ve yenilikçi sistemler geliştirebilmek olduğu değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

- Allisy, A. (1996). Henri Becquerel: The discovery of radioactivity. *Radiation Protection Dosimetry*, 68(1-2), 3-10. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a031848>
- Besim, A., & Başekim, Ç. (2018). *Dr. Esad Feyzi Bey: Türk radyolojisinin öncüsü* (ss. 11-43). Türk Radyoloji Derneği Tarih Araştırmaları ve Etik Çalışma Grubu.
- Chadwick, J. (1932). Possible existence of a neutron. *Nature*, 129(3252), 312. <https://doi.org/10.1038/129312a0>
- Dicle, O. (2017). *Türk Radyoloji Derneği'ni kimler kurdu? Türk Radyoloji Dergisi*, 36, 52-55. <https://doi.org/10.5152/turkjradiol.2018.854>
- Dinç, G. (2011). Tıbbi Fizikğin Ülkemizdeki Öncüsü Doç. Dr. Seyfettin Kuter. *Lokman Hekim Dergisi*, 82-82. <https://izlik.org/JA93LC47NX>
- Gerward, L. (1999). Paul Villard and his Discovery of Gamma Rays. *Phys. perspect.* **1**, 367-383. <https://doi.org/10.1007/s000160050028>
- Giroud, F. (1986). *Marie Curie, a life. New York: Holmes & Meier.*
- İnce, F., & Keskinbora, K. (2023). Overview of the history of Turkish radiology in the light of archive documents (1896-1933). *Mersin Üniversitesi Tıp Fakültesi Lokman Hekim Tıp Tarihi ve Folklorik Tıp Dergisi*, 13(2), 303-313. <https://doi.org/10.31020/mutfd.1238285>
- Kuter, S. (2002). Türkiye'de radyoloji ve medikal fizikğin tarihi. *Türk Onkoloji Dergisi*, 17(2), 51-8.
- Mevzuat Bilgi Sistemi, MBS, Radyoloji, Radyom ve Elektrikle Tedavi ve Diğer Fizyoterapi Müesseseleri Hakkında Kanun (1937). T.C. Resmî Gazete (Kanun No. 3153). Mevzuat Bilgi Sistemi. Erişim Adresi: [<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=3153&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=3>]
- Mould, R. F. (1998). The discovery of radium in 1898 by Maria Sklodowska-Curie (1867-1934) and Pierre Curie (1859-1906) with commentary on their life and times. *The British Journal of Radiology*, 71(852), 1229-1254.
- Rutherford, E. (2014). The structure of the atom. In *Collected papers of Lord Rutherford of Nelson* (pp. 445-455). Routledge.
- T.C. Sağlık Bakanlığı. (2024). *Sağlık İstatistikleri Yıllığı 2024* (SİY, 2024). [<https://dosyasb.saglik.gov.tr/Eklenti/52859/0/siy2024tr31122025pdf.pdf>]
- Taşdelen, N., Ekinci, G., Topçuoğlu, O. M., Çelebi, F., & Görmez, A. (2024). Radyolojide son yüzyılda yaşanan gelişmeler ve yenilikler. *Cumhuriyetimizin yüzüncü yılında tıp alanında gelişmeler* (ss. 46-50). Yeditepe Üniversitesi Tıp Fakültesi.
- Ulman, Y. I., Livadas, G., & Yıldırım, N. (2005). The pioneering steps of radiology in Turkey (1896-1923). *European Journal of Radiology*, 55(3), 306-310. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2004.06.003>



TİYOFEN TÜREVİ AMİD BİLEŞİKLERİNİN SENTEZİ VE SPEKTRAL KARAKTERİZASYONU*

“

”

Fatma Şahin¹

Naki Çolak²

Gülnihal Erten³

* Bu çalışma, Fatma Şahin tarafından Prof. Dr. Naki Çolak danışmanlığında Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı'nda 2024 yılında tamamlanan “Spiro[-benzo[β]]tiyofen grubu içeren benzamid türevlerinin sentezi” başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

1 Yüksek lisans öğrencisi, Hitit Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0002-7522-0844

2 Prof. Dr., Hitit Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Kimya Bölümü, ORCID: 0000-0001-7181-9556

3 Öğr. Gör. Dr., Pamukkale Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, ORCID: 0000-0002-5441-2292

Giriş

Tiyofen, yapısında kükürt atomu bulunduran ve heterosiklik bileşikler sınıfında yer alan önemli bir aromatik bileşiktir. Tiyofen ve türevleri farmasötik kimya, malzeme bilimi ve organik sentez alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bileşikler antimikrobiyal, antiinflamatuvar ve antitümör gibi çeşitli biyolojik aktivitelere sahip olmaları nedeniyle farmasötik araştırmalarda önemli bir yere sahiptir (Peng ve ark., 2024; Çolak ve ark., 2023). Ayrıca tiyofen türevlerinin sentezlenmesinin nispeten kolay olması ve doğal kaynaklardan da elde edilebilmesi bu bileşiklerin önemini artırmaktadır (Kenar, 2019).

Amidler ise proteinler ve peptitlerde bulunan amid bağları sayesinde biyolojik sistemlerde önemli rol oynayan fonksiyonel gruplardır. Bunun yanında birçok ilaç ve sentetik molekülün yapısında da amid fonksiyonel grubu bulunmaktadır (Biricik, 2006). Bu nedenle tiyofen çekirdeği içeren amid türevlerinin sentezi ve karakterizasyonu organik kimyada önemli araştırma konularından biri haline gelmiştir.

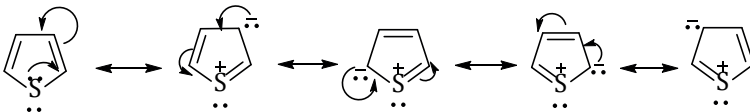
Bu çalışmada tiyofen çekirdeği içeren yeni amid türevlerinin sentezlenmesi ve elde edilen bileşiklerin spektral yöntemlerle karakterizasyonu amaçlanmıştır.

1. HETEROSİKLİK BİLEŞİKLER

Heterosiklik bileşikler, halka yapısında karbon atomlarının yanı sıra en az bir heteroatom (O, N veya S gibi) içeren organik bileşiklerdir. Bu bileşikler organik kimyada önemli bir yere sahip olup özellikle biyolojik sistemlerde yaygın olarak bulunmaktadır. DNA, RNA, klorofil ve birçok vitaminin yapısında heterosiklik birimler yer almaktadır. En yaygın aromatik heterosiklik bileşikler arasında pirol, furan ve tiyofen bulunmaktadır (Altınışik, 2006; Yılmaz, 2021).

1.1. TİYOFEN

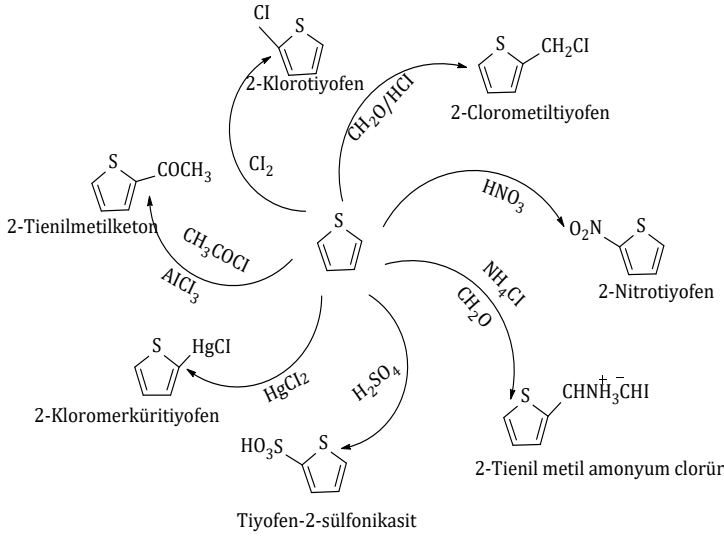
Tiyofen (C_4H_4S), beş üyeli aromatik bir heterosiklik bileşik olup yapısında bir kükürt atomu içerir. Tiyofen $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de eriyen ve $84\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kaynayan renksiz bir sıvıdır ve benzene benzer aromatik özellikler göstermektedir (Ak, 2015). Tiyofen halkasında bulunan iki π bağı ve kükürt atomunun bağ yapmamış elektron çifti toplamda altı π elektronu oluşturarak aromatik karakter kazandırır ve bu nedenle Hückel kuralına uyar.



Şekil 1. Tiyofen bileşiğinin rezonans yapıları

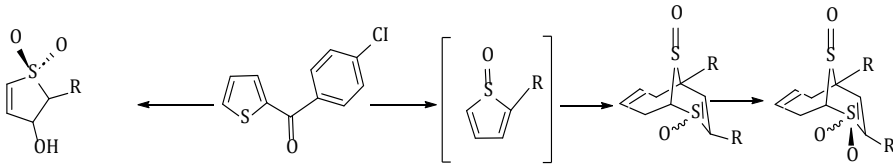
Tiyofen ve türevleri farmasötik kimya, tarım kimyasalları ve polimer üretimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Carey, 2023).

Aromatik karaktere sahip olan tiyofen, başlıca elektrofilik süstitüsyon ve katılma reaksiyonları gerçekleştirebilmektedir. Aromatik bileşikler π -elektron sistemleri nedeniyle nükleofilik özellik gösterir ve elektrofilik süstitüsyon reaksiyonlarına girebilirler. Tiyofen ise bu reaksiyonları aynı grupta yer alan furanlara göre daha yavaş, benzen göre ise daha hızlı gerçekleştirmektedir (Uslu, 2012; Özken, 2009). Bu reaksiyonlar arasında nitrolanma, sülfonlanma, halojenlenme ve Friedel-Crafts açılması sayılabilir (Kılıç, 2016).



Şekil 2. Tiyofenin elektrofilik süstitüsyon reaksiyonları

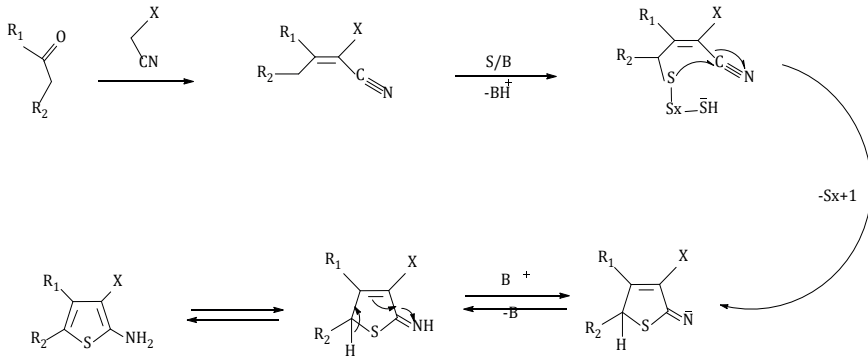
Tiyofen uygun koşullarda katılma reaksiyonları da gerçekleştirebilmektedir. Özellikle Diels-Alder reaksiyonları sırasında tiyofen halkası dien karakteri göstererek sikloadisyon reaksiyonlarına katılabilmektedir. Bu reaksiyonlar sonucunda yüksek sıcaklıklarda kükürt atomunun eliminasyonu ile benzen ve benzen türevleri oluşabilmektedir (Güneş, 2012; Ho ve ark., 1998).



Şekil 3. Tiyofenin Diels-Alder reaksiyonu

1.2. AMİNOTİYOFEN TÜREVLERİ

2-Aminotiyofen türevleri heterosiklik kimyada önemli bir bileşik sınıfı olup birçok biyolojik aktivite göstermektedir. Bu bileşikler ilk olarak Gewald tarafından geliştirilmiş olan ve metilen karbonil bileşiği, aktif metilen bileşiği ve elementel kükürtün baz varlığında tek kap reaksiyonu ile gerçekleşen Gewald reaksiyonu ile sentezlenmektedir (Puterova, 2010; Khalifa ve ark., 2020). Günümüzde bu reaksiyon farklı katalizörler ve reaksiyon koşulları kullanılarak çeşitli 2-aminotiyofen türevlerinin sentezinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

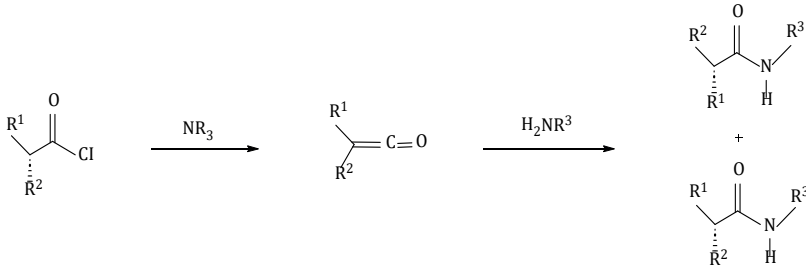


Şekil 4. Gewald reaksiyonu ile 2-aminotiyofen sentezi

1.3. AMİD BİLEŞİKLERİ

Amidler karbonil grubu ile nitrojen atomu arasında bağ içeren önemli fonksiyonel gruplardır. Proteinler ve peptitlerde bulunan amid bağları biyolojik sistemlerde önemli bir rol oynamaktadır. Rezonans etkisi nedeniyle amid bağındaki C-N bağı kısmi çift bağ karakteri gösterir ve bu durum amidlerin düzlemsel bir yapı sergilemesine neden olur (Glover, 2018).

Amid bileşikler farklı yöntemlerle sentezlenebilmektedir. Bu yöntemler arasında en yaygın kullanılanlardan biri açıl klorürlerin aminlerle reaksiyonudur. Bu reaksiyon sonucunda ilgili amid türevleri kolaylıkla elde edilebilmektedir (Xie ve ark., 2024).



Şekil 5. Açıl klorür ve aminlerin reaksiyonu ile amid eldesi

2. MATERYAL VE METOT

2.1 Kullanılan Cihazlar ve Kimyasallar

Bileşiklerin erime noktaları kapiler tüplerde Gallenkamp erime noktası tayin cihazı ile belirlenmiştir. FT-IR spektrumları Hitit Üniversitesi'nde bulunan Thermo Nicolet 6700 Fourier Transform Infrared spektrometresinde Attenuated Total Reflectance (ATR) tekniği kullanılarak kaydedilmiştir. Sentezlenen bileşiklerin NMR spektrumları Giresun Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı (GRÜMLAB)'nda ^1H NMR için 400 MHz ve ^{13}C /APT NMR için 100 MHz cihazları kullanılarak alınmıştır. Bileşiklerin kütle analizleri Hitit Üniversitesi Bilimsel Teknik Uygulama ve Araştırma Merkezi ile Amasya Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. İnce tabaka kromatografisi (İTK) analizlerinde alüminyum tabaka üzerindeki silika jel plakalar kullanılmıştır. Kullanılan kimyasallar Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiş olup herhangi bir saflaştırma işlemi uygulanmadan kullanılmıştır.

2.2 Amin Bileşiklerinin Sentez Yöntemi

2-Amino-4,7-dihidro-5H-spiro[benzo[b]tiyofen-6,2'-[1,3]dioksalon]-3-karbonitril (1) bileşiği, literatürde bildirilen yöntemle sentezlenmiştir (Puterova, 2010; Khalifa ve ark., 2020, Çolak ve ark., 2023). Bu amaçla 1,4-dioksospiro[4,5]dekan-8-on, malononitril, elementel kükürt ve morfolin eşdeğer mol oranlarında kullanılmıştır.

2.2.1 2-Amino-4,7-dihidro-5H-spiro[benzo[b]tiyofen-6,2'-[1,3]dioksalon]-3-karbonitril (1)

Morfolin (1.01 mL, 10 mmol) saf etanol (15 mL) içerisinde çözündürülmüş ve üzerine 1,4-dioksospiro[4,5]dekan-8-on (1.56 g, 10 mmol), malononitril (0.66 g, 10 mmol) ve elementel kükürt (0.32 g, 10 mmol) ilave edilmiştir. Reaksiyon karışımı oda sıcaklığında karıştırılmış ve reaksiyonun ilerleyişi ince tabaka kromatografisi (İTK) ile n-heksan:etil asetat (1:1) çözücü sistemi kullanılarak takip edilmiştir. Yaklaşık 72 saat sonunda karışıma saf su ek-

lenerek ürünün çökmesi sağlanmıştır. Elde edilen ham ürün süzölmüş ve etanolden yeniden kristallendirilerek saflaştırılmıştır.

1.3 Amid Bileşiklerinin Genel Sentezi (2a-c)

Süstitöe benzoil klorür, piridin ve amin bileşigi eşdeğer mol oranlarında alınarak üzerine 20 mL toluen ilave edilmiştir. Reaksiyon karışımı geri soğutucu altında 4 saat süreyle kaynatılarak karıştırılmış ve reaksiyonun ilerleyişi ince tabaka kromatografisi (İTK) ile etil asetat:n-heksan (1:1) çözöcö sistemi kullanılarak takip edilmiştir. Reaksiyon tamamlandıktan sonra karışım oda sıcaklığına soğutulmuş ve piridinyum hidroklorürün uzaklaştırılması amacıyla 10 mL su ile üç kez ekstrakte edilmiştir. Organik fazdan çözöcö uzaklaştırılmış ve elde edilen katı ürün etil alkolde kristallendirilerek saflaştırılmıştır.

1.3.1. N-(3-siyano-4,7-dihidro-5H-spiro[benzo[b]tiyofen-6,2'-[1,3]dioksolan]-2-il)-2-nitrobenzamid (2a)

Verim: %69; EN: 239–240 °C. FT-IR (ATR, cm⁻¹): 3256–3203 (NH), 2980–2896 (alifatik C–H), 2221 (CN), 1662 (C=O). ¹H NMR (400 MHz, DMSO-d₆, δ ppm): 12.41 (s, 1H, NH), 8.26–7.75 (m, 4H, Ar-H), 3.95 (s, 4H, OCH₂), 2.85 (t, 2H, CH₂), 2.68–2.66 (s, 2H, CH₂), 1.92–1.89 (t, 2H, CH₂). ¹³C APT NMR (100 MHz, DMSO-d₆, δ ppm, +): 164.71, 147.33, 146.33, 131.30, 130.73, 126.31, 114.31, 107.75, 64.57, 34.31, 30.98, 22.77; (–): 134.91, 132.12, 129.91, 124.54.

1.3.2. N-(3-siyano-4,7-dihidro-5H-spiro[benzo[b]tiyofen-6,2'-[1,3]dioksolan]-2-il)-3-nitrobenzamid (2b)

Verim: %70; EN: 243–244 °C. FT-IR (ATR, cm⁻¹): 3256 (NH), 3099 (Ar-H), 2995 (alifatik C–H), 2211 (CN), 1681 (C=O). ¹H NMR (400 MHz, DMSO-d₆, δ ppm): 12.10 (s, 1H, NH), 8.78–7.85 (m, 4H, Ar-H), 3.96 (s, 4H, OCH₂), 2.86 (s, 2H, CH₂), 2.71–2.68 (t, 2H, CH₂), 1.93–1.89 (t, 2H, CH₂). ¹³C APT NMR (100 MHz, DMSO-d₆, δ ppm, +): 164.10, 147.98, 133.99, 131.07, 127.49, 114.60, 107.82, 95.88, 64.28, 34.53, 30.99, 22.87; (–): 135.21, 130.71, 127.13, 123.55.

1.3.3. N-(3-siyano-4,7-dihidro-5H-spiro[benzo[b]tiyofen-6,2'-[1,3]dioksolan]-2-il)-4-nitrobenzamid (2c)

2. Verim: %70; EN: 249–250 °C. FT-IR (ATR, cm⁻¹): 3256–3203 (NH), 3085 (Ar-H), 2980–2896 (alifatik C–H), 2221 (CN), 1662 (C=O). ¹H NMR (400 MHz, DMSO-d₆, δ ppm): 12.23 (s, 1H, NH), 8.41–8.17 (m, 4H, Ar-H), 3.96 (s, 4H, OCH₂), 2.85 (s, 2H, CH₂), 2.69 (t, 2H, CH₂), 1.90 (t, 2H, CH₂). ¹³C APT NMR (100 MHz, DMSO-d₆, δ ppm, +): 164.12, 150.22, 147.12, 138.43, 131.02, 127.07, 114.43, 107.70, 96.13, 64.53, 34.27, 30.56, 23.12; (–): 130.80, 123.79. SONUÇ VE TARTIŞMA

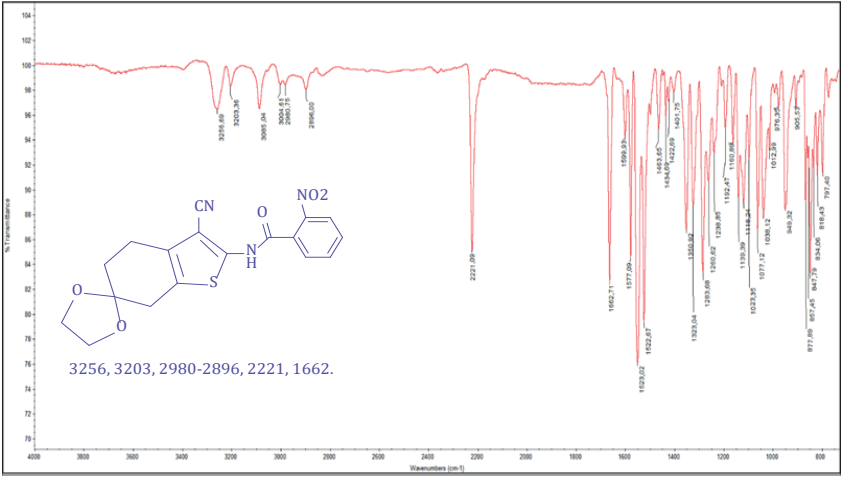
2.1 Spektral Değerlendirme

Sentezlenen 2a–c bileşiklerinin FT-IR spektrumlarında NH gerilme bantları $3272\text{--}3203\text{ cm}^{-1}$ aralığında, alifatik C–H bantları $2993\text{--}2867\text{ cm}^{-1}$ aralığında ve CN gerilme bantları $2225\text{--}2211\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenmiştir. Amid karboniline ait C=O gerilme bandı ise $1681\text{--}1662\text{ cm}^{-1}$ aralığında ortaya çıkmıştır. 2b ve 2c bileşiklerinde aromatik C–H gerilme bantları sırasıyla 3059 ve 3065 cm^{-1} de belirlenmiştir.

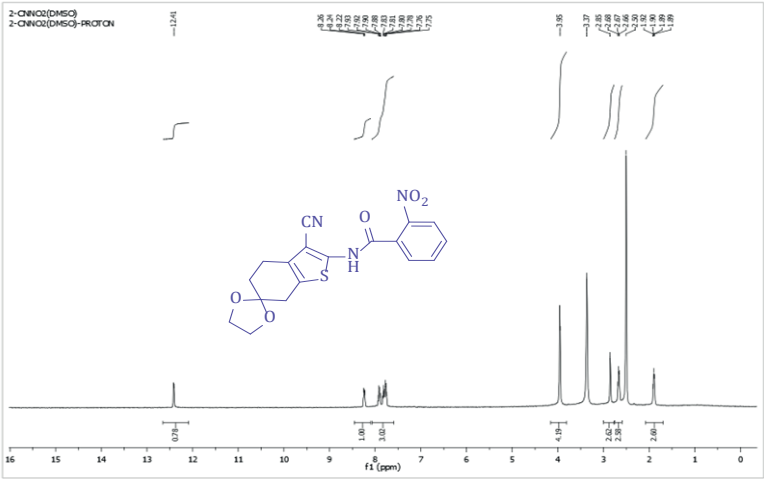
^1H NMR spektrumlarında NH protonları $12.41\text{--}12.10$ ppm aralığında sinyal vermiştir. Aromatik proton sinyalleri 2a için $8.26\text{--}7.75$ ppm, 2b için $8.78\text{--}7.87$ ppm ve 2c için $8.41\text{--}8.17$ ppm aralığında gözlenmiştir. Spiro halkasında iki oksijen arasında bulunan O–CH₂ protonları yaklaşık 3.95 ppm’de singlet olarak ortaya çıkmıştır. Sikloheksan halkasına ait CH₂ protonları ise 2.85 ppm ve $1.99\text{--}1.90$ ppm aralığında gözlenmiştir.

^{13}C APT NMR spektrumlarında amid karboniline ait sinyaller $164\text{--}162$ ppm aralığında, siyano karbonları yaklaşık 114 ppm’de ve tiyofen halkasına ait karbonlar yaklaşık 108 ppm civarında gözlenmiştir. Spiro halkasındaki O–CH₂ karbonları yaklaşık 64 ppm’de, sikloheksan halkasına ait CH₂ karbonları ise $34\text{--}23$ ppm aralığında ortaya çıkmıştır. Aromatik karbon sinyallerinde nitro grubunun konumuna bağlı olarak küçük kimyasal kayma farklılıkları gözlenmiş olup özellikle p-nitro türevinde (2c) aromatik halkanın daha simetrik olması nedeniyle karbon sinyallerinin sayısının daha az olduğu belirlenmiştir.

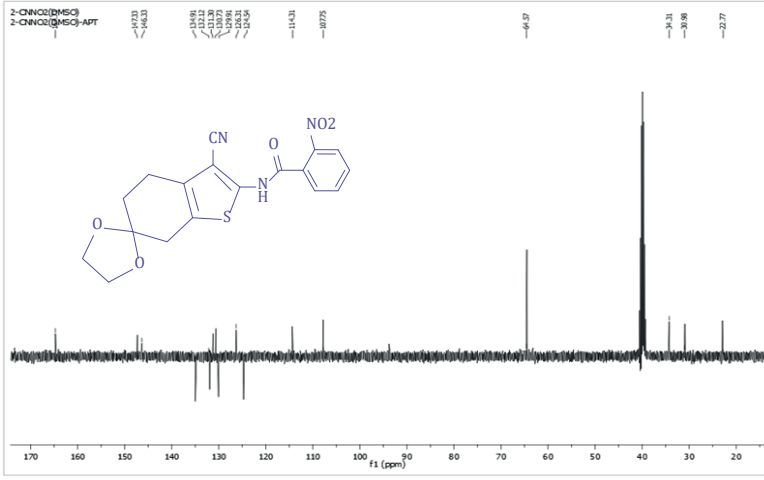
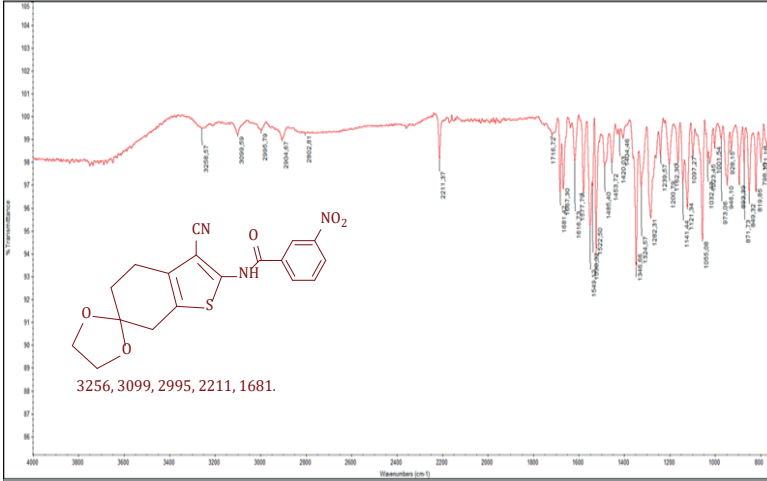
Sonuç olarak bu çalışmada tiyofen çekirdeği içeren yeni amid türevleri başarıyla sentezlenmiş ve elde edilen bileşiklerin yapıları FT-IR, ^1H NMR ve ^{13}C APT NMR spektroskopik yöntemleri ile karakterize edilmiştir. Elde edilen spektral veriler sentezlenen bileşiklerin önerilen yapıları ile uyumlu bulunmuştur. Nitro grubunun aromatik halkadaki konumuna bağlı olarak spektral verilerde küçük farklılıklar gözlenmiş olup bu durum özellikle aromatik karbon sinyallerinde belirgin hale gelmiştir. Bu sonuçlar, uygulanan sentez yönteminin ilgili tiyofen türevi amid bileşiklerinin elde edilmesinde etkili ve güvenilir bir yöntem olduğunu göstermektedir. Sentezlenen bileşiklere ait spektrumlar Şekil 6–14’de sunulmuştur.



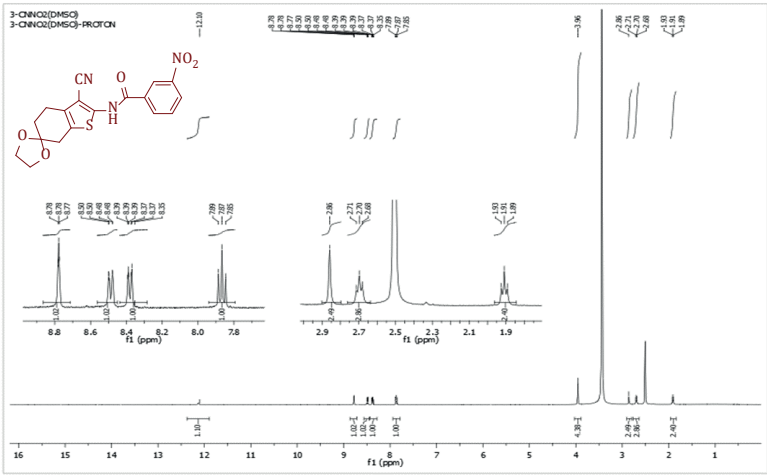
Şekil 6. 2a bileşiğine ait FTIR spektrumu



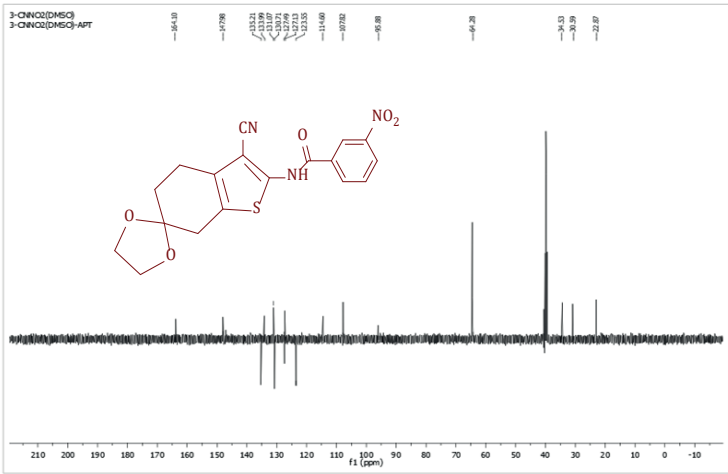
Şekil 7. 2a bileşiğine ait ¹H-NMR spektrumu

Şekil 8. 2a bileşiğine ait ^{13}C -APT NMR spektrumu

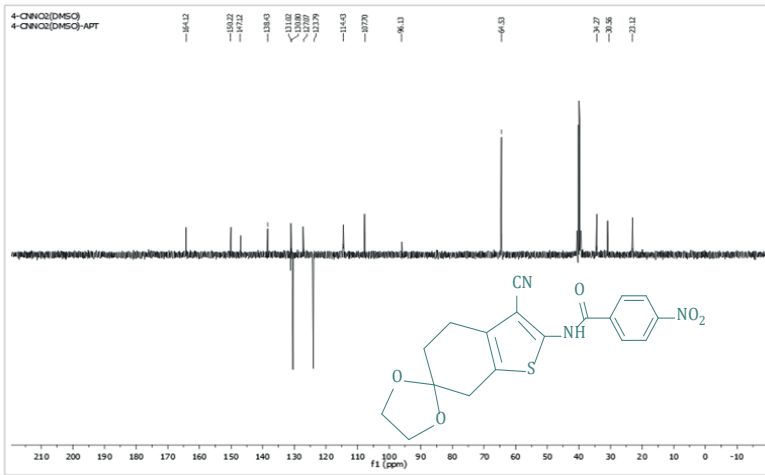
Şekil 9. 2b bileşiğine ait FTIR spektrumu



Şekil 10. 2b bileşiğine ait ¹H-NMR spektrumu



Şekil 11. 2b bileşiğine ait ¹³C-APT NMR spektrumu



Şekil 14. 2c ^{13}C -APT NMR spektrumu

KAYNAKÇA

- Ak, Y. (2015). *Aminotiyofen türevi maddelerin sentezi, bu maddelerin imidazolidin-2,4-dion ile diazo olarak kenetlenmesi ve korozyona karşı inhibitör etkilerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Hitit Üniversitesi, Çorum.
- Altınışık, M. (2006). Asiklik, aromatik ve heterosiklik bileşikler II. Aydın Adnan Men-
deres Üniversitesi.
- Biricik, N., Meriç, N., Kayan, C., & Gümgüm, B. (2006). Mikrodalga yöntemiyle çözü-
cüsüz ortamda amid sentezi. XX. Ulusal Kimya Kongresi Bildirileri.
- Carey, F. (2023). Thiophene: An overview of its properties. *Organic Chemistry: Current
Research*, 12(3), 1–6.
- Çolak, N., Uludağ, N., Serdaroglu, R., & Parthasarathi, R. (2023). Nitrobenzamido
substitution on thiophene-3-carboxylate: Electrochemical investigation, anti-
oxidant activity and molecular docking study. *Journal of Molecular Structure*,
1271, 134030.
- Dabhi, R. A., Dhaduk, M. P., Bhatt, V. D., & Bhatt, B. S. (2022). Green synthesis of
novel spiro heterocyclic compounds as anticancer agents. *Materials Today: Pro-
ceedings*, 65, 367–374.
- Glover, A. S., & Rosser, A. A. (2018). Heteroatom substitution at amide nitrogen. *Mo-
lecules*, 23(11), 2834.
- Güneş, İ. (2012). *Tiyofen halkalı bileşiklerin intramoleküler Diels–Alder reaksiyonları*
(Yüksek lisans tezi). Aksaray Üniversitesi, Aksaray.
- Ho, A. T., Treiber, A., & Dansette, P. M. (1998). Oxidation of 2-(4-chlorobenzoyl)thiop-
hene into 1-oxide Diels–Alder dimers. *Tetrahedron Letters*, 39(28), 5049–5052.
- Kenar, A. (2019). *Echinops microcephalus bitkisinden tiyofen bileşiklerinin izolasyonu
ve biyolojik özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Trakya Üniversitesi,
Edirne.
- Khalifa, E. M., & Algotham, W. M. (2020). Gewald synthesis and antitumor activity
of novel 2-aminothiophene derivatives. *Journal of Molecular Structure*, 1207,
127784.
- Kılıç, K. (2016). *2,3-disüstitüe tiyofen türevlerinin sentezi* (Yüksek lisans tezi). Kırşehir
Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir.
- Lazoğlu, A. (2019). *2,3-dialkinil tiyofen türevlerinin sentezi ve radikal yakalama akti-
vitelerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van.
- Lumpi, D., Steindl, J., Carl, V., Kautny, P., & Fröhlich, J. (2017). Thiophene ring-frag-
mentation reactions. *Tetrahedron*, 73, 472–480.
- Maury, S. K., Kushwaha, A. K., Kamal, A., Singh, H. K., & Singh, S. (2023). Visible li-
ght triggered synthesis of spiro[indoline-3,4'-quinoline]. *Journal of Molecular
Structure*, 1274, 134452.

- Peng, X., Yin, G., Wu, K., Wu, G., & Zhen, J. (2024). Recent advances in the synthesis of thiophenes. *Asian Journal of Organic Chemistry*, 13, e202300631.
- Puterova, Z., Krutosikova, A., & Vegh, D. (2010). Gewald reaction: Synthesis and applications of substituted 2-aminothiophenes. *Arkivoc*, 2010, 209–246.
- Taş, G. (2019). *Ultrasonik ortamda yeni heterohalkalı organik bileşiklerin sentezi ve karakterizasyonu* (Yüksek lisans tezi). Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli.
- Thotla, K., Noole, V., & Reddy, C. K. (2020). Synthesis and antimicrobial activity of benzo[b]thiophene derivatives. *Chemical Data Collections*, 27, 100361.
- Uslu, F. (2012). *Ferrosenol tiyofen türevlerinin sentezleri ve biyolojik aktivitelerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- Xie, Y., Zhang, H., Liu, Y., & Wang, X. (2024). Ultrasonic synthesis of benzothiazole amide derivatives. *Journal of Heterocyclic Chemistry*, 61, 145–152.
- Yadav, A. K., Kumar, V., Pali, P., Ray, S., & Verma, A. (2023). Domino reactions for synthesis of substituted 2-aminothiophenes. *Advanced Synthesis & Catalysis*, 365, 2943–2948.
- Yılmaz, O. (2021). Heterosiklik bileşikler kimyası. Karabük Üniversitesi.
- Zargari, M., Ardeshtiri, H. H., Ghafari, H., & Hassanzadeh, M. M. (2024). Eggshell-based catalyst for eco-friendly synthesis of 2-aminothiophene derivatives. *Helvion*, 10, e29674.
- Zeng, Q., Hui, Y., Wang, Y., Wen, K., & Huang, J. (2023). Enzyme-catalyzed Gewald reaction for synthesis of 2-aminothiophenes. *Journal of Molecular Structure*, 1294, 136511.



TL- ALTYARIGRUBUN TL-Bİ İDEALİ, TL- QUASI İDEALİ VE TL-INTERİOR İDEALİ*

“ ”

Emine Funda OKUMUŞ¹

Sultan YAMAK²

1 Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Matematik Bölümü
Trabzon, Türkiye, eminefundaekinci@ktu.edu.tr,
ORCID: 0000-0002-2878-8448

2 Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Matematik Bölümü
Trabzon, Türkiye, syamak@ktu.edu.tr
ORCID: 0000-0001-6499-4436

* NOT: Bu çalışma tezden üretilmiştir.

TEZ NO: 967611, Yazar: Emine Funda Okumuş, Danışman: Prof. Dr. Sultan Yamak,
Yer Bilgisi: Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/Matematik Ana
Bilim Dalı/Cebir Ve Sayılar Teorisi Bilim Dalı, Konu: Matematik

1. Giriş

Belirsizliği temsil etmek amacıyla bir kümenin bulanık alt kümesi kavramını ortaya ilk olarak Zadeh 1965 yılında öne sürmüştür. Bu yaklaşımı, Goguen 1967 yılındaki çalışmasında bulanık kümelerin değerleri $[0,1]$ yerine kafesler üzerinde taşımıştır. Bu gelişmeleri takiben, Rosenfeld (1971) bulanık grup teorisine yönelik çalışmalara öncülük ederek bulanık alt grupoid ve bulanık alt grup kavramlarını tanıtmış, bulanık kümeler teorisini cebirsel yapılara uyarlamıştır. Bu tarihten itibaren literatürde birçok araştırmacı tarafından bulanık alt yarıgruplar, bulanık alt halkalar, bulanık idealler ve benzeri yapılar için temel sonuçlar verilmiştir (Ajmal & Thomas, 1994; Morderson vd., 2003; Kuroki, 1980; Dixit vd., 1991; Malik vd., 1992; Zahedi, 1993). Özellikle, bir yarıgrupun bulanık ideal kavramı ise ilk olarak Kuroki (1981, 1991, 1992) tarafından ele alınmıştır. Daha sonra bu yapılar t -normlara genişletilmiştir (Anthony & Sherwood, 1979). Bir grubun TL -alt grubu, bir halkanın TL -alt halkası ve TL -ideali, bir yarıgrupun TL -alt yarı grubu, bir modülün TL -alt modülleri kavramları tanımlanmış ve bu yapıların çeşitli özellikleri ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir (Bayrak & Yamak, 2015; Dheena & Mohanraaj, 2011; Ray, 1997; Sessa, 1984; Yu & Wang, 1997).

Matematiğin pek çok alanında uygulamaları bulunan bulanık küme teorisi, özellikle bulanık yarıgruplar teorisi birçok bulanık cebirsel yapıların temelini oluşturmaktadır. Bulanık yarıgrup yapıları teorik sonuçlarının yanı sıra, kesinliği net olmayan durumlarda karar verme adına; kontrol sistemleri, robotik ve sağlık alanları gibi geniş uygulama sahasına sahiptir (Mordeson vd., 2003).

Cebirsel yapıların temel çalışma alanlarından biri de belirli bir küme ya da bulanık altküme tarafından üretilen alt cebirsel yapıların karakterizasyonunun belirlenmesidir. Bu problem klasik cebir ve bulanık cebir alanları olmak üzere iki aşamada tartışılmaktadır. Örneklendirmek gerekirse, klasik cebirsel yapılarda; gruplar teorisinde bir kümeyi içeren en küçük alt grup, halkalar teorisinde bir kümeyi içeren en küçük alt halka, en küçük sol ideal, en küçük sağ ideal, en küçük ideal; modül teorisinde de bir kümeyi içeren en küçük alt modülün belirlenmesi için bir çok karakterizasyon mevcuttur (Hungerford, 2012).

Diğer bir aşaması olan, θ bulanık alt kümesini içeren en küçük bulanık alt grup; en küçük bulanık alt halka, en küçük bulanık sol ideal, en küçük bulanık sağ ideal, en küçük bulanık ideal; en küçük bulanık alt modülün belirlenmesi için birçok yöntem geliştirilmiştir (Ajmal & Thomas, 1998) (Bhambri & Kumar, 2009).

Her bir genelleştirmenin sonucunda bulanık cebirsel yapılar teorisinin, klasik alt cebirsel yapıların sonuçlarından biraz daha uzaklaştığı gözlemlendi. Bu sorunu aşmak adına özel kafesler veya özel t –normlar alınarak bu yapılar incelendi. Son genelleştirme olarak, bir bulanık küme yardımıyla bulanık alt cebirsel yapıların tanımları yeniden ele alındı. Bulanık gruplar teorisinde L –altgrubunun L –altgrupları tanımları verildi (Ajmal vd., 2015). Daha sonra nilpotent L -altgrupları, çözülebilir L –altgrupları ve L - altgrubunun normal altgrubu kavramları çalışıldı (Jahan vd., 2017) (Ajmal & Jahan, 2015) (Jahan vd., 2017, 2022). Bulanık halkalar teorisinde L - bulanık halkasının L -bulanık idealleri tanıtıldı (Martínez, 1999). Bu çalışmalar baz alınarak, yarıgruplar teorisinde bulanık alt cebirsel yapıların keyfi bir TL -alt yarıgrup ile ele alınabileceği problemi bu çalışmanın ana fikrini oluşturmuştur.

2. TL – Altyarıgrubun TL –Bi İdeali, TL – Quasi İdeali ve TL –Interior İdeali

Tanım 2.1: $v \in Sub(S, T, L)$ ve $\mu \in F(S, v, L)$ olsun.

(i) μ ye v nün genelleştirilmiş TL –bi ideali denir $\Leftrightarrow$ Her $x, y, z \in S$ için $\mu(x)Tv(y)T\mu(z)$

$$\leq \mu(xyz),$$

(ii) μ ye v nün TL – bi ideali denir $\Leftrightarrow$ Her $x, y, z \in S$ için $\mu(x)Tv(y)T\mu(z) \leq \mu(xyz)$, $\mu(x)T\mu(y) \leq \mu(xy)$,

(iii) μ ye v nün TL – quasi ideali denir $\Leftrightarrow$ Her $x \in S$ için $(\bigvee_{x=ab} v(a) T\mu(b)) \wedge (\bigvee_{x=cd} \mu(c) Tv(d)) \leq \mu(x)$,

(iv) μ ye v nün TL – interior ideali denir $\Leftrightarrow$ Her $x, y, z \in S$ için $v(x)T\mu(y)Tv(z) \leq \mu(xyz)$.

Tablo 1. TL – Altyarıgrubunun TL –Bi İdeali, TL – Quasi İdeali ve TL – Interior İdeallerinin kümelerinin gösterimleri ve isimlendirilmeleri.

T, L üzerinde t –norm	$T = T_M,$	$L = [0,1]$	$T = T_M,$ $L = [0,1]$
$GBIdeal(S, v, T, L)$ v nün genelleştirilmiş TL – bi ideali	$GBIdeal(S, v, L)$ v nün genelleştirilmiş L – bi ideali	$GBIdeal(S, v, T)$ v nün genelleştirilmiş bulanık T – bi ideali	$GBIdeal(S, v)$ v nün genelleştirilmiş bulanık bi ideali
$BIdeal(S, v, T, L)$ v nün TL – bi deali	$BIdeal(S, v, L)$ v nün L – bi deali	$BIdeal(S, v, T)$ v nün bulanık L – bi deali	$BIdeal(S, v)$ v nün bulanık bi dealı
$QIdeal(S, v, T, L)$ v nün TL – quasi ideali	$QIdeal(S, v, L)$ v nün L – quasi ideali	$QIdeal(S, v, T)$ v nün bulanık T – quasi ideali	$QIdeal(S, v)$ v nün bulanık quasi ideali
$Iideal(S, v, T, L)$ v nün TL – interior ideali	$Iideal(S, v, L)$ v nün L – interior ideali	$Iideal(S, v, T)$ v nün bulanık T – interior ideali	$Iideal(S, v)$ v nün bulanık interior ideali

Önerme 2.2:

- (i) $GBIdeal(S, 1_S, T, L) = GBIdeal(S, T, L),$
- (ii) $BIdeal(S, 1_S, T, L) = BIdeal(S, T, L),$
- (iii) $QIdeal(S, 1_S, T, L) = QIdeal(S, L),$
- (iv) $Iideal(S, 1_S, T, L) = Iideal(S, L).$

Teorem 2.3: $v \in Sub(S, T, L), \mu \in F(S, v, L)$ ve T $\vee$ - dağılımlı bir t -norm olsun. Bu durumda aşağıdaki geçerlidir.

- (i) μ, v' nün genelleştirilmiş TL -bi idealidir $\Leftrightarrow \mu \circ_T v \circ_T \mu \subseteq \mu,$
- (ii) μ, v' nün TL -bi idealidir $\Leftrightarrow \mu \circ_T \mu \subseteq \mu$ ve $\mu \circ_T v \circ_T \mu \subseteq \mu,$
- (iii) μ, v' nün TL -quasi idealidir $\Leftrightarrow \mu \circ_T v \cap v \circ_T \mu \subseteq \mu,$

(iv) μ, v ' nün TL -interior idealidir $\Leftrightarrow v \circ_T \mu \circ_T v \subseteq \mu$.

İspat:

(i) μ v ' nün genelleştirilmiş TL - bi ideali ve $x \in S$ olsun.

$$\begin{aligned} \mu \circ_T v \circ_T \mu(x) &= \bigvee_{x=ab} (\mu \circ_T v)(a) T \mu(b) \\ &= \bigvee_{x=ab} [\bigvee_{a=cd} \mu(c) T v(d)] T \mu(b) \\ &= \bigvee_{x=ab, a=cd} \mu(c) T v(d) T \mu(b) \\ &= \bigvee_{x=cdb} \mu(c) T v(d) T \mu(b) \\ &\leq \bigvee_{x=cdb} \mu(cdb) \\ &= \mu(x) \end{aligned}$$

Tersine olarak, hipotezden her $x, y, z \in S$ için,

$$\begin{aligned} \mu(x) T v(y) T \mu(z) &\leq \bigvee_{xyz=abc} \mu(a) T v(b) T \mu(c) \\ &= \mu \circ_T v \circ_T \mu(xyz) \\ &\leq \mu(xyz) \end{aligned}$$

(ii) (i) ile elde edilir.

(iii) Tanımdan açıktır.

(iv) μ v ' nün TL - interior ideali olsun ve $x \in S$ alınsın.

$$\begin{aligned} v \circ_T \mu \circ_T v(x) &= \bigvee_{x=ab} (v \circ_T \mu)(a) T v(b) \\ &= \bigvee_{x=ab} [\bigvee_{a=cd} v(c) T \mu(d)] T v(b) \\ &= \bigvee_{x=ab, a=cd} v(c) T \mu(d) T v(b) \\ &= \bigvee_{x=cdb} v(c) T \mu(d) T v(b) \\ &\leq \bigvee_{x=cdb} \mu(cdb) \\ &= \mu(x) \end{aligned}$$

Tersine, her $x, y, z \in S$

$$\begin{aligned} v(x) T \mu(y) T v(z) &\leq \bigvee_{xyz=abc} v(a) T \mu(b) T v(c) \\ &= v \circ_T \mu \circ_T v(xyz) \end{aligned}$$

$$\leq \mu(xyz)$$

Teorem 2.4: $\nu \in Sub(S, T, L)$ olsun. Bu durumda aşağıdaki özellikler sağlanır.

- (i) $BIdeal(S, \nu, T, L) \subseteq GBIdeal(S, \nu, T, L)$,
- (ii) $QIdeal(S, \nu, T, L) \subseteq BIdeal(S, \nu, T, L)$,
- (iii) $LIdeal(S, \nu, T, L) \cup RIdeal(S, \nu, T, L) \subseteq QIdeal(S, \nu, T, L)$,
- (iv) $Ideal(S, \nu, T, L) \subseteq Ideal(S, \nu, T, L)$.

İspat:

(i) Tanımdan açıktır.

(ii) $\mu \in QIdeal(S, \nu, T, L)$ ve $x, y, z \in S$ için,

$$\begin{aligned} \mu(x)Tv(y)T\mu(z) &= (\mu(x)Tv(y)T\mu(z)) \wedge (\mu(x)Tv(y)T\mu(z)) \\ &\leq (\bigvee_{xyz=abc} \mu(a)Tv(b)T\mu(c)) \wedge (\bigvee_{xyz=def} \mu(d)Tv(e)T\mu(f)) \\ &\leq \left(\bigvee_{xyz=abc} \nu(a)Tv(b)T\mu(c) \right) \wedge \left(\bigvee_{xyz=def} \mu(d)Tv(e)Tv(f) \right) \\ &\leq \left(\bigvee_{xyz=abc} \nu(ab)T\mu(c) \right) \wedge \left(\bigvee_{xyz=def} \mu(d)Tv(ef) \right) \\ &\leq \left(\bigvee_{xyz=uv} \nu(u)T\mu(v) \right) \wedge \left(\bigvee_{xyz=u'v'} \mu(u')Tv(v') \right) \\ &\leq \mu(xyz) \end{aligned}$$

Son olarak,

$$\begin{aligned} \mu(x)T\mu(y) &\leq (\mu(x)Tv(y)) \wedge (\nu(x)T\mu(y)) \\ &\leq (\bigvee_{xy=ab} \mu(a)Tv(b)) \wedge (\bigvee_{xy=cd} \nu(c)T\mu(d)) \\ &\leq \mu(xy) \end{aligned}$$

olup, $\mu \in BIdeal(S, \nu, T, L)$.

(iii) $\mu \in LIdeal(S, \nu, T, L)$ ve $x \in S$ olsun. Buradan

$$(\bigvee_{x=a,b} v(a)T\mu(b)) \wedge (\bigvee_{x=cd} \mu(c)Tv(d)) \leq \mu(x) \wedge (\bigvee_{x=cd} \mu(c)Tv(d)) \leq \mu(x)$$

Dolayısıyla, $\mu \in QIdeal(S, v, T, L)$ dir. Böylece $LIdeal(S, v, T, L) \subseteq QIdeal(S, v, T, L)$ elde edilir. Benzer şekilde $RIdeal(S, v, T, L) \subseteq QIdeal(S, v, T, L)$ olduğu gösterilir.

(iv) $\mu \in Ideal(S, v, T, L)$ ve $x, y, z \in S$ olsun. Hipotezden,

$$v(x)T\mu(y)Tv(z) \leq \mu(xy)Tv(z) \leq \mu(xyz)$$

Dolayısıyla, $\mu \in Ideal(S, v, T, L)$ dir.

Yukarıdaki Teoremdaki iddiaların tersleri genel olarak doğru olmayabilir. Bunu aşağıdaki örneklerde verebiliriz.

Örnek 2.5: $T = T_M$ t-normu, $S = \{a, b, c, d\}$ yarıgrupundaki ikili işlem tablosu ve $v, \mu \in F(S)$ elemanları aşağıdaki şekilde verilsin.

$\cdot$	a	b	c	d
a	a	a	a	a
b	a	a	a	a
c	a	a	b	a
d	a	a	b	b

	a	b	c	d
$v(x)$	0.9	0.9	0.9	0.9
$\mu(x)$	0.8	0.6	0.7	0.6

Buna göre $\mu \subseteq \nu$ ve $\mu \nu$ nün genelleştirilmiş TL –bi idealidir. Fakat $\mu \nu$ nün TL –bi ideali değildir.

Örnek 2.6: $L = \{0, \alpha, \beta, 1\}$ kafesi Şekil 1 (b) deki gibi; L üzerindeki T t-norm, $S = \{0, a, b, c\}$ yarıgrubundaki ikili işlem tablosu ve $\nu, \mu \in F(S, L)$ elemanları aşağıdaki şekilde verilsin

.	0	a	b	c
0	0	0	0	0
a	0	0	0	0
b	0	0	0	b
c	0	0	b	a

T	0	α	β	1
0	0	0	0	0
α	0	α	0	α
β	0	0	0	β
1	0	α	β	1

	0	a	b	c
$v(x)$	1	α	1	1
$\mu(x)$	α	0	α	β

Buna göre $\mu \subseteq v$ μ, v nün TL –bi idealidir. Fakat μ, v nün TL –quasi ideali değildir.

Örnek 2.7: $S = \{a, b, c, d, e\}$ yarıgrubunda verilen ikili işlem ve $v, \mu \in F(S)$ bulanık alt kümeleri aşağıdaki gibi verilsin,

.	a	b	c	d	e
a	a	a	a	a	a
b	a	b	a	d	a
c	a	e	c	c	e
d	a	b	d	d	b
e	a	e	a	c	a

	a	b	c	d
$\nu(x)$	0.8	0.8	0.8	0.8
$\mu(x)$	0.6	0.6	0.4	0.4

Buna göre $\mu \subseteq \nu$, μ, ν nün bulanık quasi idealidir fakat μ, ν nün bulanık sol veya sağ ideali değildir.

Örnek 2.8: $S = \{a, b, c, d\}$ yarıgrubundaki ikili işlem tablosu Örnek 2.5 deki gibi ve $\nu, \mu \in F(S)$ elemanları aşağıdaki şekilde verilsin.

	a	b	c	d
$\nu(x)$	0.9	0.9	0.9	0.9
$\mu(x)$	0.8	0.6	0.8	0.6

Buna göre $\mu \subseteq \nu$ ve $\mu \nu$ nün bulanık interior idealidir. Fakat $\mu \nu$ nün bulanık sol ideali değildir.

Önerme 2.9: $\mu \in RIdeal(S, \nu, T, L)$ ve $\theta \in LIdeal(S, \nu, T, L)$ olsun. Bu durumda, $\mu \cap \theta \nu$ nün $TL -$ quasi idealidir.

İspat: $\mu \in RIdeal(S, \nu, T, L)$ ve $\theta \in LIdeal(S, \nu, T, L)$ olduğundan

$$((\mu \cap \theta) \circ_T \nu) \cap (\nu \circ_T (\mu \cap \theta)) \subseteq ((\mu \circ_T \nu) \cap (\theta \circ_T \nu)) \cap ((\nu \circ_T \mu) \cap (\nu \circ_T \theta))$$

$$\subseteq (\mu \cap (\theta \circ_T \nu)) \cap ((\nu \circ_T \mu) \cap \theta)$$

$$\subseteq \mu \cap \theta$$

olup Teorem 2.3 (iii) şikkından $\mu \cap \theta \nu$ nün $TL -$ quasi idealidir.

Teorem 2.10: S regüler yarıgrup, $v \in F(S, L)$ ve $\mu \in F(S, T, L)$ olsun. Bu durumda;

(i) $v \in LIdeal(S, L)$ ve $\mu \in GBIdeal(S, v, T, L)$ ise $\mu \in BIdeal(S, v, T, L)$,
 (ii) $v \in RIdeal(S, L)$ ve $\mu \in GBIdeal(S, v, T, L)$ ise $\mu \in BIdeal(S, v, T, L)$.

İspat:

(i) v S' nin L -sol ideali $x, y \in S$ olsun. Buradan $\exists a \in S$ öyle ki $x = xax$

$$\begin{aligned}\mu(xy) &= \mu(xaxy) \geq \mu(x)Tv(ax)T\mu(y) \geq \mu(x)Tv(x)T\mu(y) \\ &\geq \mu(x)T\mu(x)T\mu(y) \\ &= \mu(x)T\mu(y)\end{aligned}$$

Dolayısıyla μ TL – altarıgruptur. Buradan $\mu \in BIdeal(S, v, T, L)$.

(ii) i)'ye benzer şekilde ispat edilir.

Teorem 2.11: S regüler yarıgrup, $v \in Ideal(S, L)$ ve $\mu \in F(S, v, L) \cap F(S, T, L)$ olsun. Bu durumda aşağıdaki önermeler denktir.

- (i) μ, v 'nin TL – idealidir,
 (ii) μ, v 'nin TL – interior idealidir.

İspat:

(i) $\Rightarrow$ (ii) Teorem 2.4 (iv) ile elde edilir.

(ii) $\Rightarrow$ (i) Her $x \in S$ için $\exists a \in S$ öyle ki $x = xax$

$$\begin{aligned}\mu(xy) &= \mu(xaxy) \\ &\geq v(xa)T\mu(x)Tv(y) \\ &\geq v(x)T\mu(x)Tv(y)\end{aligned}$$

$$\geq \mu(x)T\mu(x)Tv(y)$$

$$= \mu(x)Tv(y)$$

Dolayısıyla, μ, v 'nün TL – sağ idealidir. Benzer şekilde μ, v 'nün TL – sol idealidir. Böylece μ, v 'nün iki yanlı TL – idealidir.

Teorem 2.12: $v \in Sub(S, T, L)$ ve $\mu \in F(S, v, L)$ için aşağıdaki özellikler geçerlidir.

(i) $\mu \in GBideal(S, v, T, L)$ ve $\alpha \in L$ için $U(S, \mu, T, \alpha) \neq \emptyset$ ise $U(S, \mu, T, \alpha) \subseteq U(S, v, T, \alpha)$ 'nin genelleştirilmiş bi-idealidir,

(ii) $\mu \in Bideal(S, v, T, L)$ ve $\alpha \in L$ için $U(S, \mu, T, \alpha) \neq \emptyset$ ise $U(S, \mu, T, \alpha) \subseteq U(S, v, T, \alpha)$ 'nin bi-idealidir,

(iii) $\mu \in Qideal(S, v, T, L)$ ve $\alpha \in L$ için $U(S, \mu, T, \alpha) \neq \emptyset$ ise $U(S, \mu, T, \alpha) \subseteq U(S, v, T, \alpha)$ 'nin quasi idealidir,

(iv) $\mu \in Ideal(S, v, T, L)$ ve $\alpha \in L$ için $U(S, \mu, T, \alpha) \neq \emptyset$ ise $U(S, \mu, T, \alpha) \subseteq U(S, v, T, \alpha)$ 'nin interior idealidir.

İspat:

(i) $U(S, \mu, T, \alpha) \subseteq U(S, v, T, \alpha)$ dır. $x, z \in U(S, \mu, T, \alpha)$ ve $y \in U(S, v, T, \alpha)$ olsun.

$$\alpha \geq \mu(xyz)T\alpha \geq (\mu(x)Tv(y)T\mu(z))T\alpha$$

$$= \mu(x)Tv(y)T\alpha,$$

$$= \mu(x)T\alpha = \alpha$$

Böylece, $xyz \in U(S, \mu, T, \alpha)$ dır. Buradan $U(S, \mu, T, \alpha) \subseteq U(S, v, T, \alpha)$ nin genelleştirilmiş bi idealidir.

(ii) $x, y \in U(S, \mu, T, \alpha)$ alınsın.

$$\alpha \geq \mu(xy)T\alpha \geq (\mu(x)T\mu(y))T\alpha$$

$$= \mu(x)T\mu(y)T\alpha$$

$$= \mu(x)T\alpha = \alpha$$

olup, $xy \in U(S, \mu, T, \alpha)$ dır. Böylece $U(S, \mu, T, \alpha)$ S 'nin TL -altıyarıgrubudur. (i) şıkından dolayı $U(S, \mu, T, \alpha)$ $U(S, \nu, T, \alpha)'$ 'nin bi-idealidir.

(iii) $p \in U(S, \mu, T, \alpha) \cdot U(S, \nu, T, \alpha) \cap U(S, \nu, T, \alpha) \cdot U(S, \mu, T, \alpha)$ alınsın. $\exists x, x' \in U(S, \mu, T, \alpha)$ ve

$y, y' \in U(S, \nu, T, \alpha)$ öyle ki $p = xy = y'x'$. Buradan

$$\begin{aligned} \alpha &\geq \mu(p)T\alpha \geq (\bigvee_{p=ab} \nu(a) T\mu(b)) \wedge (\bigvee_{p=cd} \mu(c) T\nu(d))T\alpha \\ &\geq (\nu(y')T\mu(x') \wedge \mu(x)T\nu(y))T\alpha \\ &\geq (\nu(y')T\mu(x')T\mu(x)T\nu(y))T\alpha \\ &= \nu(y')T\mu(x')T\mu(x)T\alpha = \nu(y')T\mu(x')T\alpha = \nu(y')T\alpha = \alpha \end{aligned}$$

Böylece $p \in U(S, \mu, T, \alpha)$ dır. Dolayısıyla $U(S, \mu, T, \alpha)$ $U(S, \nu, T, \alpha)'$ 'nin quasi idealidir.

(iv) $x, z \in U(S, \nu, T, \alpha)$ ve $y \in U(S, \mu, T, \alpha)$ alınsın.

$$\begin{aligned} \alpha &\geq \mu(xyz)T\alpha \geq (\nu(x)T\mu(y)T\nu(z))T\alpha \\ &= \nu(x)T\mu(y)T\alpha, \\ &= \nu(x)T\alpha = \alpha \end{aligned}$$

Dolayısıyla, $U(S, \mu, T, \alpha)$ $U(S, \nu, T, \alpha)'$ 'nin interior idealidir.

Theorem 2.13: $\nu \in Sub(S, T, L)$, $\mu \in F(S, \nu, L)$ ve $Im\mu \cup Im\nu \subseteq D_T$ olsun. Bu durumda aşağıdaki özellikler geçerlidir.

(i) Eğer $\forall \alpha \in L$ için $U(S, \mu, T, \alpha)$, $U(S, \nu, T, \alpha)$ 'nin genelleştirilmiş bi-ideali ise $\mu \in GBIdeal(S, \nu, T, L)$,

(ii) Eğer $\forall \alpha \in L$ için $U(S, \mu, T, \alpha)$, $U(S, \nu, T, \alpha)$ 'nin bi-ideali ise $\mu \in BIdeal(S, \nu, T, L)$,

(iii) Eğer $\forall \alpha \in L$ için $U(S, \mu, T, \alpha)$, $U(S, \nu, T, \alpha)$ 'nin interior ideali ise $\mu \in Ideal(S, \nu, T, L)$.

İspat:

(i) Her $x, y, z \in S$ için $\alpha = \mu(x)Tv(y)T\mu(z)$ olsun.

$$v(y)T\alpha = v(y)T\mu(x)Tv(y)T\mu(z) = \mu(x)Tv(y)Tv(y)T\mu(z) \quad (Imv \subseteq D_T)$$

$$= \mu(x)Tv(y)T\mu(z) = \alpha$$

Böylece $y \in U(S, v, T, \alpha)$ dir. Benzer şekilde $x, z \in U(S, \mu, T, \alpha)$ elde edilir. Böylece $xyz \in U(S, \mu, T, \alpha)$ dir.

$$\mu(xyz) \geq \mu(xyz)T\alpha = \alpha = \mu(x)Tv(y)T\mu(z) .$$

Buradan ise μ, v 'nün genelleştirilmiş TL – biidealidir.

(ii) Her $x, y \in S$ için $\alpha = \mu(x)T\mu(y)$ alınsın.

$$\mu(x)T\alpha = \mu(x)T\mu(x)T\mu(y) = \mu(x)T\mu(y) = \alpha \quad (Im\mu \subseteq D_T)$$

olup, $x \in U(S, \mu, T, \alpha)$ dir. Benzer şekilde $y \in U(S, \mu, T, \alpha)$ olduğu gösterilir. Hipotezden $xy \in U(S, \mu, T, \alpha)$ elde edilir. Böylece,

$$\mu(xy) \geq \mu(xy)T\alpha = \alpha = \mu(x)T\mu(y)$$

olduğundan μ S nin TL – altyarı grubudur. (i) şikkından $\mu \in BIdeal(S, v, T, L)$ dir.

(iii) Her $x, y, z \in S$ için $\alpha = v(x)T\mu(y)Tv(z)$ olsun.

$$v(x)T\alpha = v(x)Tv(x)T\mu(y)Tv(z) \quad (Imv \subseteq D_T) = v(x)T\mu(y)Tv(z) = \alpha$$

Böylece $x \in U(S, \mu, T, \alpha)$ dir. Benzer şekilde $y \in U(S, \mu, T, \alpha)$ ve $z \in U(S, \mu, T, \alpha)$ elde edilir. Böylece $xyz \in U(S, \mu, T, \alpha)$ dir.

$$\mu(xyz) \geq \mu(xyz)T\alpha = \alpha = v(x)T\mu(y)Tv(z) .$$

Buradan ise μ, v 'nün TL – interior idealidir.

Teorem 2.12 ve Teorem 2.13 ile aşağıdaki sonuç elde edilir.

Sonuç 2.14: $v \in Sub(S, L)$, $\mu \in F(S, v, L)$ olsun. Bu durumda aşağıdakiler sağlanır.

(i) Eğer $\forall \alpha \in L$, $\mu_\alpha \neq \emptyset$ için μ_α , v_α 'nın genelleştirilmiş bi-idealidir $\Leftrightarrow \mu \in GIdeal(S, v, L)$,

(ii) Eğer $\forall \alpha \in L$, $\mu_\alpha \neq \emptyset$ için μ_α , v_α 'nın bi-idealidir $\Leftrightarrow \mu \in BIdeal(S, v, L)$,

(iii) Eğer $\forall \alpha \in L, \mu_\alpha \neq \emptyset$ için μ_α, v_α 'nin quasi idealidir $\Leftrightarrow \mu \in QIdeal(S, v, L)$,

(iv) Eğer $\forall \alpha \in L, \mu_\alpha \neq \emptyset$ için μ_α, v_α 'nin interior idealidir $\Leftrightarrow \mu \in Ideal(S, v, L)$.

İspat: $T = \wedge$ alındığında Teorem 2.12 nin özel durumudur.

Önerme 2.15: $\emptyset \neq A \subseteq S, \alpha, \beta \in L$ ve $\alpha < \beta$ ise aşağıdaki özellikler sağlanır.

(i) A, S nin genelleştirilmiş bi-ideali ise $(\alpha, \beta)_A, S'$ nin genelleştirilmiş TL -bi-idealidir,

(ii) $\beta \in D_T$ ve $(\alpha, \beta)_A, S'$ nin genelleştirilmiş TL -bi-ideali ise A, S nin genelleştirilmiş bi-idealidir,

(iii) A, S nin bi-ideali ise $(\alpha, \beta)_A, S'$ nin TL -bi-idealidir,

(iv) $\beta \in D_T$ ve $(\alpha, \beta)_A, S'$ nin TL -bi-ideali ise A, S nin bi-idealidir,

(v) A, S nin quasi ideali ise $(\alpha, \beta)_A, S'$ nin TL -quasi idealidir,

(vi) $\beta \in D_T$ ve $(\alpha, \beta)_A, S'$ nin TL -quasi ideali ise A, S nin quasi-idealidir,

(vii) A, S nin interior idealidir ancak ve ancak $(\alpha, \beta)_A, S'$ nin TL -interior idealidir.

İspat:

(i) A, S nin genelleştirilmiş bi-ideali olsun. Her $x, y, z \in S$ için,

- $x, z \in A$ ise $xyz \in A$ olacağından,

$$(\alpha, \beta)_A(x)T(\alpha, \beta)_A(z) = \beta T \beta \leq \beta = (\alpha, \beta)_A(xyz)$$

olup, eşitlik sağlanır.

- $x \notin A$ veya $y \notin A$ ise T t - norm özeliğinden,

$$(\alpha, \beta)_A(x)T(\alpha, \beta)_A(z) \leq \alpha$$

olup, $(\alpha, \beta)_A(x)T(\alpha, \beta)_A(z) \leq (\alpha, \beta)_A(xyz)$ sağlanır. Dolayısıyla $(\alpha, \beta)_A, S'$ nin genelleştirilmiş TL -bi-idealidir.

(ii) $\beta \in D_T$ ve $(\alpha, \beta)_A, S'$ nin TL -quasi ideali olsun. Her $x, z \in A$ için,

$$(\alpha, \beta)_A(x)T(\alpha, \beta)_A(z) = \beta T \beta = \beta \leq (\alpha, \beta)_A(xyz)$$

olduğundan, $(\alpha, \beta)_A(xyz) = \beta$ dır. Dolayısıyla $xyz \in A$ dır. A, S 'nin genelleştirilmiş bi-idealidir.

(iii)Önerme 2.15 (i) şikkından elde edilir.

(iv)Önerme 2.15 (ii) şikkından elde edilir.

(v) A, S nin quasi ideali olsun. $x \in S$ için,

- Her $a, b \in S$ $x = ab, a \notin A$ veya her $c, d \in S$ $x = cd, d \notin A$ ise

$$(\bigvee_{x=a.b}(\alpha, \beta)_A(a)) \wedge (\bigvee_{x=c.d}(\alpha, \beta)_A(d)) = \alpha \leq (\alpha, \beta)_A(x)$$

• $\exists a, b \in S$ $x = ab, a \in A$ ve $\exists c, d \in S$ $x = cd, d \in A$ ise $x \in AS \cap SA$ olup $x \in A$ dır. Dolayısıyla, $(\bigvee_{x=a.b}(\alpha, \beta)_A(a)) \wedge (\bigvee_{x=c.d}(\alpha, \beta)_A(d)) = \beta \leq (\alpha, \beta)_A(x)$ olup, $(\alpha, \beta)_A, S$ 'nin TL -quasi idealidir.

(vi) $\beta \in D_T$ ve $(\alpha, \beta)_A, S$ 'nin TL -quasi ideali olsun. $x \in AS \cap SA$ alınsın.

$\exists a, b \in S$ $x = ab, a \in A$ ve $\exists c, d \in S$ $x = cd, d \in A$ olup,

$$(\bigvee_{x=a.b}(\alpha, \beta)_A(a)) \wedge (\bigvee_{x=c.d}(\alpha, \beta)_A(d)) = \beta \leq (\alpha, \beta)_A(x)$$

olduğundan $x \in A$ dır. A, S 'nin quasi-idealidir.

(vii) A, S 'nin interior ideali ise $y \in A, x, z \in S$ için $xyz \in A$ olup,

$$(\alpha, \beta)_A(y) = \beta \leq (\alpha, \beta)_A(xyz)$$

olduğundan, $(\alpha, \beta)_A, S$ 'nin TL -interior idealidir.

Tersine $(\alpha, \beta)_A, S$ 'nin TL -interior ideali olsun. $y \in A, x, z \in S$ için,

$$\beta = (\alpha, \beta)_A(y) \leq (\alpha, \beta)_A(xyz)$$

olduğundan, $xyz \in A$ dır. A, S 'nin interior-idealidir.

Sonuç 2.16:

(i) A, S 'nin genelleştirilmiş bi-idealidir $\Leftrightarrow 1_A S$ 'nin genelleştirilmiş L -bi-idealidir,

(ii) A, S 'nin bi-idealidir $\Leftrightarrow 1_A S$ 'nin L - bi-idealidir,

(iii) A, S 'nin quasi idealidir $\Leftrightarrow 1_A S$ 'nin L -quasi idealidir,

(iv) A, S 'nin interior idealidir $\Leftrightarrow 1_A S$ 'nin L -interior idealidir.

İspat: $\alpha = 0$ ve $\beta = 1$ alındığında Önerme 2.15 in özel durumudur.

Teorem 2.17: $v \in Sub(S, T, L)$ olsun. Bu durumda aşağıdakiler geçerlidir.

- (i) $\{\mu_i : i \in \Lambda\} \subseteq GBIdeal(S, v, T, L)$ ise $\bigcap_{i \in \Lambda} \mu_i \in GBIdeal(S, v, T, L)$,
- (ii) $\{\mu_i : i \in \Lambda\} \subseteq BIdeal(S, v, T, L)$ ise $\bigcap_{i \in \Lambda} \mu_i \in BIdeal(S, v, T, L)$,
- (iii) $\{\mu_i : i \in \Lambda\} \subseteq QIdeal(S, v, T, L)$ ise $\bigcap_{i \in \Lambda} \mu_i \in QIdeal(S, v, T, L)$,
- (iv) $\{\mu_i : i \in \Lambda\} \subseteq Ideal(S, v, T, L)$ ise $\bigcap_{i \in \Lambda} \mu_i \in Ideal(S, v, T, L)$.

İspat:

(i) Açık olarak $\bigcap \mu_i \subseteq v$ dür. Her $x, y, z \in S$ için ,

$$\begin{aligned} & \bigcap_{i \in \Lambda} \mu_i(x) T v(y) T \bigcap_{i \in \Lambda} \mu_i(z) = \bigwedge_{i \in \Lambda} \mu_i(x) T v(y) T \bigwedge_{i \in \Lambda} \mu_i(z) \\ & \leq \bigwedge_{i \in \Lambda} \mu_i(x) T v(y) T \mu_i(z) \\ & \leq \bigwedge_{i \in \Lambda} \mu_i(xyz) \\ & = \bigcap_{i \in \Lambda} \mu_i(xyz) \end{aligned}$$

Dolayısıyla, $\bigcap \mu_i$, v nün genelleştirilmiş TL – bi idealidir.

(ii) Her $x, y, z \in S$ için ,

$$\begin{aligned} & \bigcap_{i \in \Lambda} \mu_i(x) T \bigcap_{i \in \Lambda} \mu_i(y) = \bigwedge_{i \in \Lambda} \mu_i(x) T \bigwedge_{i \in \Lambda} \mu_i(y) \\ & \leq \bigwedge_{i \in \Lambda} \mu_i(x) T \mu_i(y) \\ & \leq \bigwedge_{i \in \Lambda} \mu_i(xy) \end{aligned}$$

olup, $\bigcap \mu_i$ ‘ler S ’nin TL altıyarıgrupudur. (i) şikkından dolayı $\bigcap \mu_i \in BIdeal(S, v, T, L)$ dır.

(iii) Her $x \in S$ için,

$$\begin{aligned} & (\bigvee_{x=ab} (\bigwedge_{i \in \Lambda} \mu_i(a)) T v(b)) \wedge (\bigvee_{x=cd} (v(c) T \bigwedge_{i \in \Lambda} \mu_i(d))) \\ & \leq (\bigvee_{x=ab} (\bigwedge_{i \in \Lambda} (\mu_i(a) T v(b))) \wedge (\bigvee_{x=cd} (\bigwedge_{i \in \Lambda} v(c) \mu_i(d))) \\ & \leq (\bigwedge_{i \in \Lambda} \bigvee_{x=ab} \mu_i(a) T v(b)) \wedge (\bigwedge_{i \in \Lambda} \bigvee_{x=cd} v(c) T \mu_i(d)) \end{aligned}$$

$$\leq \bigwedge_{i \in \Lambda} (\bigvee_{x=ab} \mu_i(a) T v(b)) \wedge (\bigvee_{x=cd} v(c) T \mu_i(d))$$

$$\leq \bigwedge_{i \in \Lambda} \mu_i(x)$$

Olup, $\bigcap \mu_i \in QIdeal(S, v, T, L)$ dir.

(iv) Her $x, y, z \in S$ için,

$$v(x) T \bigcap_{i \in \Lambda} \mu_i(y) T v(z) = v(x) T \bigwedge_{i \in \Lambda} \mu_i(y) T v(z)$$

$$\leq \bigwedge_{i \in \Lambda} v(x) T \mu_i(y) T v(z)$$

$$\leq \bigwedge_{i \in \Lambda} \mu_i(xyz)$$

$$= \bigcap_{i \in \Lambda} \mu_i(xyz)$$

Dolayısıyla, $\bigcap \mu_i, v$ nün TL –interior idealidir.

Sonuç 2.18: $v \in Sub(S, T, L)$ ise aşağıdakiler geçerlidir.

(i) $(GBIdeal(S, v, T, L), \subseteq)$ tam kafestir,

(ii) $(BIdeal(S, v, T, L), \subseteq)$ tam kafestir,

(iii) $(QIdeal(S, v, T, L), \subseteq)$ tam kafestir,

(iv) $(Ideal(S, v, T, L), \subseteq)$ tam kafestir.

İspat: Teorem 2.17 ‘den açıktır.

Teorem 2.19: $v \in Sub(S, T, L)$ ve T sonsuz $\vee$ - dağılımlı bir t -norm olsun. Bu durumda $\{\mu_i : i \in \Lambda\} \subseteq Ideal(S, v, T, L)$ ise $\bigcup_{i \in \Lambda} \mu_i \in Ideal(S, v, T, L)$.

İspat: Her $x, y, z \in S$ için,

$$v(x) T \bigcup_{i \in \Lambda} \mu_i(y) T v(z) = v(x) T \bigvee_{i \in \Lambda} \mu_i(y) T v(z)$$

$$= \bigvee_{i \in \Lambda} v(x) T \mu_i(y) T v(z)$$

$$\leq \bigvee_{i \in \Lambda} \mu_i(xyz)$$

olup, $\bigcup_{i \in \Lambda} \mu_i \in Ideal(S, v, T, L)$.

Sonuç 2.20: $(L, \leq)$ sonsuz V –dağılımlı kafes ve T sonsuz V - dağılımlı bir t -norm ise $(Ideal(S, v, T, L), \leq, \cap, \cup)$ sonsuz V –dağılımlı kafestir.

Uyarı: T sonsuz V - dağılımlı bir t -norm için Teorem 2.19 da verilen sonuç genel olarak $GBIdeal(S, v, T, L)$, $BIdeal(S, v, T, L)$, $QIdeal(S, v, T, L)$ kümeleri için geçerli olmayabilir. Bunu aşağıdaki örnekte gözlemleyebiliriz.

Örnek 2.21: $(a, b). (c, d) = (a, d)$ ikili işlemi ile $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ yarıgrubu ve kafesi yapısı Şekil 1 (b)' deki gibi olmak üzere $L = \{0, \alpha, \beta, \gamma, 1\}$ kafesi verilsin. Aşağıdaki şekilde $\mu_1, \mu_2 \in F(S, L)$ elemanları tanımlansın.

$$\mu_2(x, y) = \begin{cases} \alpha, & \{(1,1)\} \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

$$\mu_1(x, y) = \begin{cases} \beta, & \{(0,0)\} \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

Buna göre $\mu_1, \mu_2 \in GBIdeal(\mathbb{N} \times \mathbb{N}, 1_{\mathbb{N} \times \mathbb{N}}, L)$ dır. Fakat $\mu_1 \cup \mu_2 \notin GBIdeal(\mathbb{N} \times \mathbb{N}, 1_{\mathbb{N} \times \mathbb{N}}, L)$. Aynı örnek $BIdeal(S, v, T, L)$, $QIdeal(S, v, T, L)$ kümeleri içinde verilebilir.

Teorem 2.22: $v \in Sub(S, T, L)$, $Imv \subseteq D_T$ ve $\mu, \theta \in F(S, v, L)$ olsun. Bu durumda aşağıdakiler gerçektir.

- (i) $\mu, \theta v$ 'nün genelleştirilmiş TL - bi-ideali ise $\mu T \theta v$ ' nün genelleştirilmiş TL -bi-idealidir,
- (ii) $\mu, \theta v$ 'nün TL -bi-ideali ise $\mu T \theta v$ ' nün TL -bi-idealidir,
- (iii) $\mu, \theta v$ 'nün TL -quasi ideali ise $\mu T \theta v$ ' nün TL -quasi idealidir,
- (iv) $\mu, \theta v$ 'nün TL -interior ideali ise $\mu T \theta v$ ' nün TL -interior idealidir.

İspat:

- (i) $\mu, \theta v$ 'nün genelleştirilmiş TL -bi ideali ve $x, y, z \in S$ olsun.

$$\begin{aligned}
(\mu T\theta)(x)Tv(y)T(\mu T\theta(z)) &= \mu(x)T\theta(x)Tv(y)T\mu(z)T\theta(z) \\
&= \mu(x)T\theta(x)Tv(y)Tv(y)T\mu(z)T\theta(z) \quad (Imv \subseteq D_T) \\
&= \mu(x)Tv(y)T\mu(z)T\theta(x)Tv(y)T\theta(z) \\
&\leq \mu(xyz)T\theta(xyz) = (\mu T\theta)(xyz)
\end{aligned}$$

Böylece, $\mu T\theta \in GBiideal(S, v, T, L)$ dir.

(ii) $\mu T\theta$ TL -altıyarıgrup ve (i) şikkından $\mu T\theta \in Biideal(S, v, T, L)$ dir.

(iii) μ, θ v 'nün TL -quasi ideali olsun.

$$\begin{aligned}
&(\bigvee_{x=ab} (\mu T\theta)(a)Tv(b)) \wedge (\bigvee_{x=cd} v(c)T(\mu T\theta)(d)) \\
&= (\bigvee_{x=ab} \mu(a)T\theta(a)Tv(b)) \wedge (\bigvee_{x=cd} v(c)T\mu(d)T\theta(d)) \\
&= (\bigvee_{x=ab} \mu(a)T\theta(a)Tv(b)Tv(b)) \wedge \\
&(\bigvee_{x=cd} v(c)Tv(c)\mu(d)T\theta(d)) \quad (Imv \subseteq D_T) \\
&\leq \\
&[\bigvee_{x=uv} \mu(u)Tv(v)]T[\bigvee_{x=zt} \theta(z)Tv(t)] \wedge [\bigvee_{x=pq} v(p)T\mu(q)]T[\bigvee_{x=ef} v(e)T\theta(f)] \\
&\leq \\
&[\bigvee_{x=uv} \mu(u)Tv(v)T\bigvee_{x=pq} v(p)T\mu(q)]T[\bigvee_{x=zt} \theta(z)Tv(t)T\bigvee_{x=ef} v(e)T\theta(f)] \\
&\leq \mu(x)T\theta(x) = (\mu T\theta)(x)
\end{aligned}$$

Dolayısıyla $\mu T\theta \in QIdeal(S, v, T, L)$ dir.

(iv) μ, θ v 'nün TL -interior ideali ve $x, y, z \in S$ olsun.

$$\begin{aligned}
v(x)T(\mu T\theta)(y)Tv(z) &= v(x)T\mu(y)T\theta(y)Tv(z) \\
&= v(x)Tv(x)T\mu(y)T\theta(y)Tv(z)Tv(z) \quad (Imv \subseteq D_T) \\
&= v(x)T\mu(y)Tv(z)Tv(x)T\theta(y)Tv(z) \\
&= \mu(xyz)T\theta(xyz)
\end{aligned}$$

Böylece, $\mu T\theta \in IIdeal(S, v, T, L)$ dir.

Teorem 2.23: $v \in Sub(S, T, L)$ ve $\mu, \theta \in F(S, v, L)$ olsun. Bu durumda aşağıdakiler gerçekleşir.

- (i) μv 'nün TL -bi ideali ise $\mu \circ_T \theta v$ 'nün TL -bi idealidir,
- (ii) θv 'nün TL -bi ideali ise $\mu \circ_T \theta v$ 'nün TL -bi idealidir,
- (iii) μv 'nün TL -quasi ideali veya θv 'nün TL -quasi ideali ise $\mu \circ_T \theta v$ 'nün TL -bi idealidir.

İspat:

(i) θv 'nün TL -bi ideali olsun. $\mu, \theta \in F(S, v, L)$ olduğundan, $\mu \circ_T \theta \subseteq v$ dır.

$$(\mu \circ_T \theta) \circ_T (\mu \circ_T \theta) = \mu \circ_T (\theta \circ_T \mu \circ_T \theta) \subseteq \mu \circ_T (\theta \circ_T v \circ_T \theta) \subseteq \mu \circ_T \theta$$

Dolayısıyla $\mu \circ_T \theta$ TL -altarı grubudur. Ayrıca,

$$\begin{aligned} (\mu \circ_T \theta) \circ_T v \circ_T (\mu \circ_T \theta) &\subseteq \mu \circ_T v \circ_T v \circ_T \mu \circ_T \theta \\ &\subseteq \mu \circ_T v \circ_T \mu \circ_T \theta \\ &\subseteq \mu \circ_T \theta \end{aligned}$$

olduğundan $\mu \circ_T \theta v$ 'nün TL -bi idealidir.

(ii) i)'e benzer şekilde yapılır.

(iii) μv 'nün TL -quasi ideali olsun. Teorem 2.3 (iii) şikkından

$(\mu \circ_T \theta) \circ_T \mu \subseteq (\mu \circ_T v) \circ_T v \subseteq (\mu \circ_T v)$ benzer şekilde $(\mu \circ_T \theta) \circ_T \mu \subseteq v \circ_T \mu$ olup, $(\mu \circ_T \theta) \circ_T \mu \subseteq (\mu \circ_T v) \cap (v \circ_T \mu) \subseteq \mu$ dır. Dolayısıyla $(\mu \circ_T \theta) \circ_T (\mu \circ_T \theta) \subseteq (\mu \circ_T v)$ dır.

Ayrıca,

$(\mu \circ_T \theta) \circ_T v \circ_T \mu \subseteq \mu \circ_T v \circ_T v \circ_T v \circ_T \mu \subseteq \mu \circ_T v$ benzer şekilde $(\mu \circ_T \theta) \circ_T v \circ_T \mu \subseteq v \circ_T \mu$ dır. Böylece $(\mu \circ_T \theta) \circ_T v \circ_T \mu \subseteq \mu$ dır. Dolayısıyla $(\mu \circ_T \theta) \circ_T v \circ_T (\mu \circ_T \theta) \subseteq \mu \circ_T \theta$ dır. Böylece $\mu \circ_T \theta v$ 'nün TL -bi idealidir

Kaynaklar

1. Ajmal, N., & Thomas, K. V. (1994). Fuzzy lattices. *Information sciences*, 79(3-4), 271-291.
2. Ajmal, N., & Thomas, K. V. (1998). The join of fuzzy algebraic substructures of a group and their lattices. *Fuzzy sets and systems*, 99(2), 213-224.
3. Ajmal, N., & Jahan, I. (2015). Generated L -subgroup of an L -group. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, 12(2), 129-136.
4. Anthony, J. M., & Sherwood, H. (1979). Fuzzy groups redefined. *Journal of mathematical analysis and applications*, 69(1), 124-130.
5. Bayrak, D., & Yamak, S. (2015). A note on the lattice of TL-submodules of a module. *Annals of Fuzzy Mathematics and Informatics*, 10(2).
6. Bhambri, S. K., & Kumar, P. (2009). Lattices of Fuzzy Submodules. In *International mathematical forum* 4(13), 653-659.
7. Birkhoff, G. (1940). *Lattice theory*. Rhode Island: American Mathematical Soc..
8. Chon, I. (2011). On fuzzy bi-ideals in semigroups. *Korean Journal of Mathematics*, 19(3), 321-330.
9. Clifford, A., & Preston, G. (1976). *Algebraic Theory of Semigroups*. Rhode Island.: American Mathematical Soc..
10. Dixit, V., Kumar, R., & Ajmal, N. (1991). Fuzzy ideals and fuzzy prime ideals of a ring. *Fuzzy sets and systems*, 44(1), 127-138.
11. Dheena, P., & Mohanraaj, G. (2011). T-fuzzy ideals in rings. *International journal of computational cognition*, 9(2).
12. Goguen, J. A. (1967). L-fuzzy sets. *Journal of mathematical analysis and applications*, 18(1), 145-174.
13. Howie, J. M. (1976). *An introduction to semigroup theory*. London: Academic Press.
14. Hungerford, T. W. (2012). *Algebra*. New York: Springer Science & Business Media.
15. Iséki, K. (1956). A characterization of regular semigroup. *Proc. Japan Acad.*, 32, 676-677.
16. Jahan, I., Davvaz, B., & Ajmal, N. (2017). Nilpotent L-subgroups satisfy the normalizer condition. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 33(3), 1841-1854.
17. Jahan, I., Ajmal, N., & Davvaz, B. (2022). Subnormality and theory of L-subgroups. *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, 15(4), 2086-2115.
18. Klement, E. P., Mesiar, R., & Pap, E. (2000). *Triangular norms*. Dordrecht: Springer Science & Business Media.
19. Kuroki, N. (1980). Fuzzy bi-ideals in semigroups. *Commentarii Mathematici Universitatis Sancti Pauli*, 28(1), 17-21.

20. Kuroki, N. (1981). On fuzzy ideals and fuzzy bi-ideals in semigroups. *Fuzzy sets and systems*, 5(2), 203-215.
21. Kuroki, N. (1991). On fuzzy semigroups. *Information sciences*, 53(3), 203-236.
22. Kuroki, N. (1992). Fuzzy generalized bi-ideals in semigroups. *Information sciences*, 66(3), 235-243.
23. Lajos, S. (1968). On Characterization of Regular Semigroups. *Proc. Japan Acad.*, 44(5).
24. Lajos, S. (1969). On the bi ideals in Semigroups. *Proc. Japan Acad.*, 45.
25. Malik, D. S., Mordeson, J. N., & Nair, P. S. (1992). Fuzzy normal subgroups in fuzzy subgroups. *Journal of the Korean Mathematical Society*, 29(1), 1-8.
26. Martinez, L. (1999). Prime and primary L-fuzzy ideals of L-fuzzy rings. *Fuzzy Sets and Systems*, 101(3), 489-494.
27. Mordeson, J. N., Malik, D. S., & Kuroki, N. (2012). *Fuzzy semigroups*. Omaha: Springer.
28. Ray, S. (1997). Modified TL-subgroups of a group. *Fuzzy sets and systems*, 91(3), 375-387.
29. Samuel, A., & Rodgers, B. A. (1965). *Ideals In Semigroups*. North Texas State University, Yüksek Lisans Tezi, Denton.
30. Sessa, S. (1984). On fuzzy subgroups and fuzzy ideals under triangular norms. *Fuzzy Sets and Systems*, 13(1), 95-100.
31. Steinfeld, O. (1980). Quasi-ideals in rings and semigroups. *Semigroup Forum*, 19, 371-372.
32. Yu, Y., & Wang, Z. (1994). TL-subrings and TL-ideals. Part 1. Basic concepts. *Fuzzy sets and Systems*, 68(1), 93-103.
33. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
34. Zahedi, M. M. (1993). Some results on L-fuzzy modules. *Fuzzy Sets and Systems*, 55(3), 355-361.
35. Zhi-Wen, M., & Xue-Ping, W. (1995). Fuzzy ideals generated by fuzzy sets in semigroups. *Information sciences*, 86(4), 203-210.



ASFERİK, SFERİK VE YÜKSEK İNDEKSLİ LENSLERİN OPTİK PERFORMANS AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

“ ”

Şeydanur TAŞER¹

¹ Fizik Öğretmeni Şeydanur TAŞER, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı Patnos Anadolu Lisesi, Ağrı, Türkiye. ORCID: 0009-0003-4229-6364

1. GİRİŞ

Gözlük lensi seçimi, yalnızca reçetede yer alan sferik ya da silindirik değerin karşılanması ibaret değildir. Lensin biçimi, yüzey tasarımı, kırılma indisi, dispersiyon özelliği ve yüzey kaplamaları da kullanıcının elde edeceği görsel performansı doğrudan etkiler. Gözlük lensi tasarımında temel amaç, gerekli diyoptrik düzeltmeyi sağlarken özellikle eğik bakışlarda ortaya çıkabilecek optik yan etkileri mümkün olduğunca azaltmaktır. Bu nedenle asferik lens tasarımları, geleneksel sferik yüzeylere göre eğik astigmatizma, güç hatası ve distorsiyon gibi sorunları daha iyi kontrol edebilmek amacıyla geliştirilmiştir. Yüksek indeksli lens materyalleri ise aynı optik gücü daha ince ve daha estetik bir lens formunda sunabilmeleri nedeniyle uygulamada önemli bir yer edinmiştir (Atchison, 1992; Jalie, 2020).

Ancak daha ince ya da daha yeni teknolojiye sahip bir lensin her koşulda daha iyi optik performans sağlayacağını söylemek doğru olmaz. Asferik lensler, özellikle belirli reçete aralıklarında ve uygun montaj koşulları sağlandığında önemli avantajlar sunar. Buna karşılık çerçeve seçiminin uygun olmaması, lensin eğimi, merkezleme hataları ya da verteks mesafesindeki değişiklikler bu avantajların azalmasına yol açabilir. Benzer şekilde yüksek indeksli lensler estetik açıdan öne çıksa da, düşük Abbe sayıları nedeniyle kromatik sapma ve yansıma gibi bazı optik dezavantajlar gösterebilir (Atchison & Tame, 1993; Pillay, Hansraj, & Rampersad, 2020).

Bu çalışmada asferik, sferik ve yüksek indeksli lensler yalnızca teorik optik özellikleri açısından değil; hangi hastaya hangi lensin daha uygun olduğu, reçetenin çerçeveye ne kadar doğru aktarıldığı, görsel konforun nasıl etkilendiği, estetik beklentilerin lens seçimindeki rolü ve optisyenin ürün danışmanlığı sürecindeki katkısı bakımından da birlikte ele alınacaktır. Böylece lens seçimini sadece materyal ya da yüzey yapısı üzerinden değerlendiren dar bir bakışın ötesine geçilmesi; optik ilkelerin, doğru ölçümün ve kullanıcı beklentilerinin birlikte düşünüldüğü daha bütüncül bir optisyenlik yaklaşımının ortaya konması amaçlanmaktadır (Freeman & Evans, 2010; Fylan, Grunfeld, Turvey, & Desallais, 2005; Jalie, 2020).

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Sferik lenslerde kırıcı yüzeyler küresel bir geometriye sahiptir ve bu yapı, geleneksel oftalmik lens üretiminin en temel tasarım anlayışını oluşturur. Üretim sürecinin görece kolay olması ve maliyet açısından avantaj sağlaması nedeniyle sferik lensler uzun yıllardır yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, göz optik merkezden uzaklaştıkça bu lenslerde eğik astigmatizma, güç hatası, alan eğriliği ve distorsiyon gibi bazı optik yan etkiler daha belirgin hale gelebilir. Gözlük lensi tasarımına ilişkin klasik literatürde bu durum, “best-form” yaklaşımı ve Tscherning elipsleri çerçevesinde açıklanmış; belirli taban

eğrilerinin eğik bakış performansını iyileştirebildiği gösterilmiştir (Atchison, 1992; Smith & Atchison, 1983).”

Asferik lenslerde ise yüzey eğriliği merkezden çevreye doğru kontrollü biçimde değiştirilir. Bu tasarımın temel amacı, belirli bir reçete gücünde daha düz, daha ince ve çoğu durumda çevresel optik performansı daha iyi olan lensler elde etmektir. Özellikle estetik görünümün önemli olduğu durumlarda ve belirli reçete aralıklarında asferik tasarımlar dikkat çekici avantajlar sunabilir. Ancak bu yarar her kullanıcı için aynı düzeyde ortaya çıkmaz; çünkü asferik tasarımın başarısı yalnızca lens gücüne değil, kullanılan asferisite miktarına ve lensin çerçeve üzerindeki gerçek konumuna da bağlıdır (Atchison, 1984; Atchison & Tame, 1992).

Yüksek indeksli lensler ise aynı optik düzeltmenin daha ince merkez veya kenar kalınlığıyla sağlanmasına olanak veren materyallerden üretilir ve bu lenslerde kırılma indisi genellikle 1.60 ve üzerindedir. Kırılma indisinin artması, özellikle yüksek numaralı reçetelerde lensin daha ince görünmesine ve kozmetik açıdan daha kabul edilebilir hale gelmesine katkı sağlar. Bununla birlikte bu avantaj bazı optik sınırlılıkları da beraberinde getirebilir. Yüksek indeksli materyallerde Abbe sayısının çoğu zaman daha düşük olması, özellikle çevresel bakışlarda transvers kromatik aberasyon algısını artırabilir. Ayrıca bu lenslerin yüzeylerinde yansıma eğilimi daha fazla olduğundan, anti-reflektif kaplamalar kullanım açısından çok daha önemli hale gelir (Martinez-Perez & Oliveira, 2024; Pillay et al., 2020).

3. ASFERİK LENSLERİN ÖZELLİKLERİ VE OPTİK PERFORMANS ÜZERİNE ETKİLERİ

Asferik lenslerin geliştirilmesindeki temel optik amaç, küresel yüzeylerin yol açtığı eğik astigmatizma ve güç hatasını azaltmaktır. Klasik çalışmalar, özellikle yüksek artı ve yüksek eksi lenslerde uygun asferik yüzeylerin kullanılmasıyla distorsiyonun ve eğik hata bileşenlerinin anlamlı ölçüde azaltılabildiğini göstermektedir (Katz, 1982). Daha sonraki kuramsal çalışmalar ve optimizasyon temelli yaklaşımlar da, asferik yüzeylerin uygun tasarım hedefleri doğrultusunda kullanıldığında hem görüntü kalitesini hem de kozmetik görünümü birlikte iyileştirebildiğini ortaya koymuştur (Atchison, 1984; Miks, Novak, & Novak, 2010).

Klinik açıdan bakıldığında asferik lenslerin en önemli avantajlarından biri, özellikle orta ve yüksek numaralı reçetelerde daha düz taban eğrileriyle kabul edilebilir bir çevresel optik performans sunabilmesidir. Bu durum yalnızca optik açıdan değil, lensin çerçeve üzerindeki daha ince ve daha estetik görünmesi bakımından da önem taşır. Bununla birlikte asferik lenslerin sağladığı bu yararlar, montaj koşullarına daha duyarlı bir yapı gösterir. Verteks mesafesindeki artış, pantoskopik açının uygun olmaması ya da optik merkezin pupiller merkezle tam uyum göstermemesi, teorik olarak beklenen üstünlü-

gün pratikte azalmasına neden olabilir. Böyle durumlarda bazı kullanıcılar uyum sürecinde zorluk yaşayabilir (Atchison & Tame, 1993; Jalie, 2020).

Bu nedenle asferik lenslerin üstünlüğünü her koşulda ve her kullanıcı için geçerli bir özellik olarak değerlendirmek doğru değildir. Asferik tasarımlar; reçetenin özellikleri, seçilen çerçevenin geometrisi, montaj parametreleri ve kullanıcının beklentileri birlikte ele alındığında anlamlı avantajlar sunar. Özellikle kozmetik görünümün önemli olduğu ve çevresel görüntü kalitesinin korunmasının istendiği durumlarda, asferik lensler güçlü bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.”

4. SFERİK LENSLERİN ÖZELLİKLERİ VE OPTİK PERFORMANS ÜZERİNE ETKİLERİ

Sferik lensler, oftalmik uygulamalarda en uzun süredir kullanılan ve halen en yaygın tercih edilen lens gruplarından biridir. Üretim süreçlerinin iyi biliniyor olması, maliyetlerinin görece düşük kalması, ürünlere kolay erişilebilmesi ve düşük ile orta düzey reçetelerde yeterli performans sunmaları, bu lensleri günümüzde de önemli kılmaktadır. Gözlük lensi tasarımına ilişkin klasik çalışmalar, sferik lenslerde uygun taban eğrisi seçiminin eğik bakış performansı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu nedenle sferik bir lensin başarısı yalnızca reçete gücüyle değil, seçilen lens formuyla da yakından ilişkilidir (Atchison, 1992; Smith & Atchison, 1983).

Bununla birlikte sferik lensler, özellikle yüksek artı ve yüksek eksi değerlerde, çevresel bakış alanında daha fazla eğik astigmatizma, görüntü büyütmesi ya da küçültmesi ve distorsiyon gibi optik yan etkilere neden olabilir. Bu yüzden düşük numaralı ve günlük kullanım amaçlı reçetelerde çoğu zaman yeterli bir seçenek olan sferik tasarım, yüksek ametropiler söz konusu olduğunda daha sınırlı hale gelebilir. Yine de uygun formda seçilmiş bir sferik lens, düşük maliyet avantajı ve üretim kolaylığı nedeniyle birçok klinik ve uygulamalı durumda hâlâ geçerli ve işlevsel bir çözüm olarak değerlendirilmektedir (Jalie, 2020).

5. YÜKSEK İNDEKSİLİ LENSLERİN ÖZELLİKLERİ VE OPTİK PERFORMANS ÜZERİNE ETKİLERİ

Yüksek indeksli lenslerin en dikkat çekici avantajı, aynı optik düzeltmenin daha ince lenslerle sağlanabilmesidir. Bu özellik özellikle yüksek miyopi ve hipermetropi reçetelerinde önem kazanır; çünkü lensin kenar ya da merkez kalınlığını azaltarak hem daha estetik bir görünüm sağlar hem de çerçeve seçiminde daha fazla esneklik sunar. Lens materyallerinin tarihsel gelişimine bakıldığında, cam materyallerden CR-39’a, polikarbonata, Trivex’e ve daha yüksek kırılma indisli organik materyallere doğru uzanan belirgin bir çeşitlenme olduğu görülmektedir (Pillay et al., 2020).

Bununla birlikte yüksek kırılma indisi, optik kalite açısından bazı sınırlılıkları da beraberinde getirebilir. İndis arttıkça birçok materyalde Abbe sayısı düşme eğilimi gösterir. Bu durum, özellikle lensin optik merkezinden uzak bölgelerde oluşan prizmatik etkiyle birleştiğinde, kromatik saçılmanın kullanıcı tarafından daha belirgin algılanmasına neden olabilir. Bu nedenle yüksek indeksli lens seçiminde yalnızca lensin inceliğine odaklanmak yeterli değildir; reçete gücü, pupilla davranışı, çalışma mesafesi ve bireyin görsel hassasiyeti gibi unsurlar da birlikte değerlendirilmelidir (Martinez-Perez & Oliveira, 2024; Pillay et al., 2020).

Ayrıca yüksek indeksli lenslerde yüzey yansımaları daha belirgin olabildiğinden, anti-reflektif kaplamalar görsel konfor açısından özel bir önem taşır. Yüksek indisli polimer lensler için geliştirilen anti-reflektif kaplama uygulamalarının, yansıma düzeyini azaltarak ışık iletimini artırabildiği bildirilmektedir (Kim, 2015). Bu nedenle yüksek indeksli lensler, çoğu zaman yalnızca materyal özelliği üzerinden değil, kaplama teknolojileriyle birlikte değerlendirilmesi gereken bir ürün grubu olarak ele alınmalıdır.”

6. PERFORMANS KIYASLAMASI: KESKİNLİK, DİSTORSİYON VE GÖRSEL KONFOR

Optik performans açısından değerlendirildiğinde, her durumda en iyi sonucu veren tek bir lens tipinden söz etmek doğru değildir. Asferik lensler, özellikle orta ve yüksek numaralı reçetelerde ve uygun montaj koşulları sağlandığında, eğik bakış performansını iyileştirerek çevresel görüntü kalitesi ile distorsiyon kontrolü açısından önemli avantajlar sunabilir. Buna karşılık sferik lensler, düşük numaralı reçetelerde çoğu zaman klinik olarak yeterli bir performans sağlar ve maliyet-etkin bir seçenek olarak öne çıkabilir (Atchison & Tame, 1992; Jalie, 2020).

Yüksek indeksli lensler ise konuyu yalnızca lens geometrisi açısından değil, materyalin optik özellikleri bakımından da değerlendirmeyi gerektirir. Lensin daha ince hale gelmesi ve daha düz formlarda üretilebilmesi hem görsel hem de estetik açıdan avantaj sağlayabilir. Ancak düşük Abbe sayısı ve artan yüzey yansımaları, bazı kullanıcılarda özellikle çevresel bakışlarda ya da gece görüş koşullarında görsel konforun azalmasına neden olabilir. Bu nedenle en uygun lens seçimi, yalnızca laboratuvar ortamında tanımlanan optik kalite ölçütlerine göre değil; kullanıcının uyum süreci, günlük yaşam gereksinimleri ve kişisel görsel beklentileri birlikte değerlendirilerek yapılmalıdır (Martinez-Perez & Oliveira, 2024; Pillay et al., 2020).

7. AYDINLATMA KOŞULLARI VE GÖRÜNÜR IŞIN DAĞILIMINDAKİ FARKLAR

Lens performansı, yalnızca reçete değerleriyle değil, kullanıldığı ortamın aydınlatma koşullarıyla da yakından ilişkilidir. Düşük ışıklı ortamlarda pupilla

çapının büyümesi, lensin optik merkez dışındaki bölgelerinin daha fazla kullanılmasına neden olur. Bu durum da çevresel aberasyonların ve kromatik saçılmanın kullanıcı tarafından daha belirgin hissedilmesine yol açabilir. Bu nedenle kâğıt üzerinde benzer görünen reçeteler, gece araç kullanımı, bilgisayar başında çalışma ya da parlak ışık kaynaklarının bulunduğu ortamlarda kişiler arasında farklı görsel deneyimler oluşturabilir (Atchison, 1992; Jalie, 2020).

Özellikle yüksek indeksli lenslerde yüzey yansımalarının azaltılması hem kontrastın korunması hem de daha iyi bir kozmetik görünüm sağlanması açısından önem taşır. Güncel çalışmalar, anti-reflektif kaplamalar ile yüzey sertleştirici uygulamaların ışık iletimi, dayanıklılık ve kullanıcı konforu üzerinde olumlu katkılar sağlayabildiğini göstermektedir (Kim, 2015; Martinez-Perez & Oliveira, 2024). Bu nedenle optisyenlik uygulamalarında lens materyali seçilirken kaplama özellikleri de ayrı değil, birlikte değerlendirilmelidir.”

8. UYGULAMA ALANLARI VE TASARIM TERİMLERİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRME

Optisyenlik pratiğinde lens seçimini yalnızca ‘asferik mi, sferik mi?’ sorusuna indirgemek yeterli değildir. Uygun lens seçimi yapılırken reçetenin büyüklüğü, anisometri varlığı, çerçevenin boyutu, pupilla merkezleri, verteks mesafesi, pantoskopik açı ve kullanıcının estetik beklentileri birlikte değerlendirilmelidir. Günümüzde gözlük lensi tasarımı giderek daha fazla kişiselleştirme yaklaşımına yönelmektedir. Bu yaklaşımda yalnızca lensin yüzey formu değil, lensin çerçeveye nasıl yerleştirildiği ve gerçek kullanım koşulları da performansın bir parçası olarak kabul edilmektedir (Jalie, 2020; Pascual, Gómez-Pedrero, & Alonso, 2021). Nitekim kişiselleştirilmiş gözlük uygulamalarına ilişkin güncel bulgular, çerçeve ile yüz anatomisinin ve gerçek kullanım parametrelerinin dikkate alınmasının görsel kaliteyi ve kullanıcı memnuniyetini artırabildiğini göstermektedir (Benyó et al., 2023).

Bu çerçevede asferik lensler, özellikle kozmetik beklentinin ve çevresel optik kalite gereksiniminin yüksek olduğu reçetelerde daha uygun bir seçenek olarak öne çıkarken; sferik lensler, düşük ve orta güçlerde maliyetin ve erişilebilirliğin daha önemli olduğu durumlarda tercih edilebilmektedir. Yüksek indeksli lensler ise özellikle yüksek numaralı reçetelerde, lens kalınlığını azaltma ve daha estetik bir görünüm sağlama açısından avantaj sunmaktadır. Bununla birlikte, her üç lens grubunda da doğru ölçüm ve doğru montajın, teorik tasarım üstünlüğünden çoğu zaman daha belirleyici olduğu unutulmamalıdır (Atchison & Tame, 1993).

Bu nedenle optisyenin rolü yalnızca reçeteyi laboratuvara iletmekten ibaret değildir. Optisyen, pupiller aralık ölçümü, monoküler merkezleme, verteks mesafesi, eğim açıları ve çerçeve uyumu gibi dispansasyona ilişkin değişkenleri dikkatle yönetmekle de sorumludur. Bunun yanında kullanıcıya, seçilen lensin sağlayacağı olası yararlar ve uyum sürecinde karşılaşılabilecek durum-

lar hakkında gerçekçi ve anlaşılır bir danışmanlık verilmesi de sürecin önemli bir parçasıdır. Gözlük kullanımında ortaya çıkan intolerans sorunlarına ilişkin bulgular, problemlerin yalnızca reçeteden kaynaklanmadığını; önemli bir bölümünün dispansasyon süreci ve beklenti yönetimiyle ilişkili olabileceğini göstermektedir (Freeman & Evans, 2010). Benzer şekilde, kullanıcıların lens ve çerçeve tercihinde yalnızca görsel netliğin değil; stil, bilgilendirilme ihtiyacı ve karar sürecine katılma beklentisinin de etkili olduğu bildirilmektedir (Fylan et al., 2005)

9. MALZEME TERCİHLERİ, MALİYET VE ÜRETİM ZORLUKLARI

Lens materyali seçimi, yalnızca optik özelliklere bakılarak yapılabilecek bir karar değildir; optik, mekanik ve ekonomik etkenlerin birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Cam lensler çizilmeye karşı dirençli olmaları ve yüksek optik berraklık sunmaları nedeniyle önemli avantajlara sahiptir. Ancak ağır yapıları ve kırılmaya daha yatkın olmaları, günümüzde bu materyallerin kullanım alanını daha sınırlı hale getirmiştir. Organik materyaller ise hafiflik, kolay işlenebilirlik ve darbe dayanımı gibi özellikleri sayesinde öne çıkmış; buna bağlı olarak CR-39, polikarbonat, Trivex ve yüksek indeksli polimerler klinik uygulamada yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır (Martinez-Perez & Oliveira, 2024; Pillay et al., 2020).

Bununla birlikte yüksek indeksli materyallerin geliştirilmesi, çoğu zaman daha karmaşık bir kimyasal yapı, daha hassas kaplama gereksinimi ve daha yüksek üretim maliyeti ile birlikte ilerlemektedir. Asferik ya da yüksek indeksli lenslerin teorik olarak sunduğu üstün performans, üretim doğruluğu ve yüzey kalitesi yeterince korunmadığında klinik uygulamada beklenen ölçüde karşılık bulmayabilir. Bu nedenle maliyet-etkinlik değerlendirmesi yapılırken yalnızca kullanılan ham materyale değil; kaplama kalitesine, işleme toleranslarına, montaj başarısına ve kullanıcı memnuniyetine de birlikte bakılması gerekir (Martinez-Perez & Oliveira, 2024; Miks et al., 2010).

10. SONUÇ

Asferik, sferik ve yüksek indeksli lensler arasında yapılacak seçim, tek başına bir lens tipini mutlak olarak üstün kabul eden bir yaklaşımla değerlendirilmemelidir. Daha doğru bir yaklaşımla, seçim süreci reçete gücü, montaj doğruluğu, materyal özellikleri ve kullanıcının beklentileri arasındaki denge nin kurulmasına dayanmalıdır. Asferik lensler, özellikle eğik bakış performansı ve daha estetik bir görünüm açısından önemli avantajlar sunabilmektedir; ancak bu avantajların klinik olarak hissedilebilmesi, doğru çerçeve seçimi ve doğru ölçüm uygulamalarıyla yakından ilişkilidir. Sferik lensler ise düşük ve orta düzey reçetelerde maliyet-etkin, güvenilir ve çoğu zaman yeterli bir seçenek olmaya devam etmektedir. Yüksek indeksli lensler, özellikle yüksek numaralı reçetelerde daha ince ve estetik bir lens görünümü sağlama açısından öne çıksa da, dispersiyon ve yansıma kaynaklı optik ödünleşmeler nedeniyle

dikkatli değerlendirilmelidir (Atchison, 1992; Jalie, 2020; Pillay et al., 2020).

Sonuç olarak optisyenlik uygulamalarında en uygun lens seçimi, yalnızca materyal bilgisine ya da yüzey formuna bakılarak yapılabilecek bir karar değildir. Bu süreç; optik tasarım ilkelerinin, klinik ölçüm doğruluğunun, kaplama tercihlerinin ve kullanıcı odaklı danışmanlığın birlikte ele alınmasını gerektirir. Düşük ve orta güçlü, maliyet duyarlılığı yüksek ve günlük kullanım beklentisi bulunan olgularda sferik lensler akılcı bir seçenek olarak değerlendirilebilir. Buna karşılık daha ince bir profil, daha düz bir yüzey geometrisi ve çevresel optik performansın daha iyi kontrol edilmesi istenen durumlarda asferik tasarımlar daha uygun bir alternatif haline gelebilir. Yüksek ametropilerde ise yüksek indeksli materyaller lens kalınlığını azaltma ve estetik görünümü iyileştirme açısından belirgin avantaj sağlayabilir; ancak bu grupta Abbe sayısı, yansıma kontrolü ve uygun kaplama seçimi birlikte düşünülmelidir (Martinez-Perez & Oliveira, 2024; Pillay et al., 2020).

Bunun yanında reçetenin doğru şekilde dispanse edilmesi, pupiller merkezleme ve çerçeve uyumu kadar, kullanıcının günlük yaşam gereksinimlerinin önceden anlaşılması da başarılı bir sonuç için belirleyicidir. Sürekli ekran kullanımı, gece sürüşü, kozmetik beklenti ya da hızlı adaptasyon isteği gibi kullanım senaryoları lens seçiminde doğrudan etkili olabilir. Bu nedenle optisyenin danışmanlık rolü, yalnızca ‘hangi lens daha iyidir?’ sorusuna genel bir yanıt vermekle sınırlı görülmemelidir. Asıl önemli olan, ‘hangi lens, hangi kullanıcı için daha uygundur?’ sorusunu sistematik ve kullanıcı odaklı bir yaklaşımla yanıtlatabilmektir (Freeman & Evans, 2010; Fylan et al., 2005).

KAYNAKÇA

- Atchison, D. A. (1984). Third-order theory and aspheric spectacle lens design. *Ophthalmic & Physiological Optics*, 4(2), 179-186. doi:10.1111/j.1475-1313.1984.tb00353.x
- Atchison, D. A. (1992). Spectacle lens design: A review. *Applied Optics*, 31(19), 3579-3585. doi:10.1364/AO.31.003579
- Atchison, D. A., & Tame, S. A. (1992). Performance of aspheric spectacle lenses. *Clinical and Experimental Optometry*, 75(6), 210-217. doi:10.1111/j.1444-0938.1992.tb00767.x
- Atchison, D. A., & Tame, S. A. (1993). Sensitivity of off-axis performance of aspheric spectacle lenses to tilt and decentration. *Ophthalmic & Physiological Optics*, 13(4), 415-421. doi:10.1111/j.1475-1313.1993.tb00502.x
- Benyó, F., István, L., Kiss, H., Gyenes, A., Erdei, G., Juhász, É., Vlasak, N., Unger, C., Andorfi, T., Réz, K., Kovács, I., & Nagy, Z. Z. (2023). Assessment of visual quality improvement as a result of spectacle personalization. *Life*, 13(8), 1707. doi:10.3390/life13081707
- Freeman, C. E., & Evans, B. J. W. (2010). Investigation of the causes of non-tolerance to optometric prescriptions for spectacles. *Ophthalmic & Physiological Optics*, 30(1), 1-11. doi:10.1111/j.1475-1313.2009.00682.x
- Fylan, F., Grunfeld, E. A., Turvey, A., & Desallais, J. (2005). Four different types of client attitudes towards purchasing spectacles in optometric practice. *Health Expectations*, 8(1), 18-25. doi:10.1111/j.1369-7625.2004.00309.x
- Jalie, M. (2020). Modern spectacle lens design. *Clinical and Experimental Optometry*, 103(1), 3-10. doi:10.1111/cxo.12930
- Katz, M. (1982). Aspherical surfaces used to minimize oblique astigmatic error, power error, and distortion of some high positive and negative power ophthalmic lenses. *Applied Optics*, 21(16), 2982-2991. doi:10.1364/AO.21.002982
- Kim, K.-C. (2015). Effective graded refractive-index anti-reflection coating for high refractive-index polymer ophthalmic lenses. *Materials Letters*, 160, 158-161. doi:10.1016/j.matlet.2015.07.108
- Martinez-Perez, C., & Oliveira, A. P. (2024). Meta-analysis of materials and treatments used in ophthalmic lenses: Implications for lens characteristics. *Materials*, 17(23), 5949. doi:10.3390/ma17235949
- Miks, A., Novak, J., & Novak, P. (2010). Third-order design of aspheric spectacle lenses. *Optik*, 121(23), 2097-2104. doi:10.1016/j.ijleo.2009.07.008
- Pascual, E., Gómez-Pedrero, J. A., & Alonso, J. (2021). Improved analytical theory of ophthalmic lens design. *Applied Sciences*, 11(12), 5696. doi:10.3390/app11125696
- Pillay, R., Hansraj, R., & Rampersad, N. (2020). Historical development, applications

and advances in materials used in spectacle lenses and contact lenses. *Clinical Optometry*, 12, 157-167. doi:10.2147/OPTO.S257081

Smith, G., & Atchison, D. A. (1983). Effect of conicoid asphericity on the Tscherning ellipses of ophthalmic spectacle lenses. *Journal of the Optical Society of America*, 73(4), 441-445. doi:10.1364/JOSA.73.000441



BUZ İÇİNDE PARÇACIK FİZİĞİ: ICECUBE NÖTRİNO GÖZLEMEVİ

“ ”

Çağın KAMIŞCIOĞLU¹

Kutay DOLUNAY²

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

² Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye. ktdolunay@gmail.com ORCID:0009-0006-9374-4464

1. Giriş

Nötrinolar, keşfedildikleri yıllardan bu yana fizikçileri büyüleyen, doğası gereği en ilgi çekici temel parçacıklardır. Son yıllarda nötrinolarla ilgili araştırmalar hızla ilerlemektedir. Neredeyse kütsüz olan ve maddeyle çok zayıf etkileşime giren bu parçacıklar, gezegenimizden iz bırakmadan geçmektedirler. Nötrinoları eşsiz kılan özellik, son derece küçük kütleleri ve maddeyle olan zayıf etkileşimleridir. Diğer parçacıkların aksine, nötrinolar, Dünya gibi muazzam kütlelerden, çoğu zaman atomlarla tek bir çarpışma bile yaşamadan geçmeleridir. Bunun nedeni, nötrinoların yalnızca zayıf kuvvet ve yerçekimi yoluyla etkileşime girmesi ve bu nedenle tespit edilmelerinin son derece zor olmasıdır.

Parçacık Fizikinin Standart Modelinde nötrinolar temel parçacık olarak sınıflandırılan atom altı parçacıklar içinde yer almaktadır. Bunlar, beta bozunmasındaki bazı eksik gözlemleri açıklamak için 1930 yılında Wolfgang Pauli tarafından teorik olarak öne sürülmüştü. O yıllarda korkunç bir hipotez olarak değerlendirilmişti. Ardından 1956 yılında Clyde Cowan ve Frederick Reines, tarafından nötrinoların varlıkları deneysel olarak kanıtlanmıştır. Böylece nötrinolar fizikçileri hem şaşırtmış hem de sevindirmiştir. Zamanla parçacık fiziğinin merkezi bir parçacığı haline gelmiştir (Polytechnique Insights, 2022).

Nötrinolar sadece teorik merak konusu değildir; birçok astrofiziksel ve kozmolojik olayı açıklamak için hayati öneme sahiptirler. Nötrinoların incelenmesi, kara deliklerin yakınında veya patlayan yıldızların (süpernovaların) çekirdeklerinde meydana gelenler gibi, Dünya'da yeniden üretilmeyen aşırı koşullar altında gerçekleşen süreçler hakkında paha biçilmez bilgiler sağlamaktadır. Nötrinolar yalnızca süpernova gibi ağır oluşumlar hakkında bilgi sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda evrenin asimetrisi, özellikle de anti-madde ve simetri ile ilgili temel soruları daha iyi anlamamıza da olanak tanımaktadır. Nötrinoların özellikleri, evrenin erken dönemlerinde antimaddeden daha fazla maddenin nasıl oluştuğunu göstermektedir. Bu durum evrenimizin kökeni için merkezi bir soru olmaktadır. Kısaca bu parçacıklar evreni anlamamızda çok önemli bir rol oynamaktadırlar.

Araştırmalar nötrinoların çeşitli türlerinin olduğunu göstermektedir. Standart Model'e göre üç nesil leptona karşılık gelen üç tür nötrino bulunmaktadır. Bunlar elektron nötrinosa, müon nötrinosa ve tau nötrinosa olmaktadır. Her nötrino türünün, antinötrino adı verilen bir karşı parçacığı vardır (IceCube, 2026).

Nötrinolar genellikle yük bakımından nötr olsalar da diğer parçacıklarla etkileşimleri kuantum evreninin birçok sırrını ortaya çıkarabilir. Nötrino türlerindeki bu çeşitlilik, nötrino salınımı fenomenine yol açmaktadır. 1960'larda keşfedilen nötrino salınımı, nötrinoların yolculuk sırasında bir türden diğerine dönüşebildiğini göstermektedir. Bu şaşırtıcı özellik, kütleleri ve uzun mesafe özellikleri ile ilgili temel keşiflere yol açmaktadır (Lesherpas, 2026).

Nötrino gibi yakalanması zor bir parçacığı tespit etmek, gelişmiş teknikler ve devasa bir altyapı gerektirmektedir. Birkaç tespit yöntemi mevcuttur ancak bunlar esas olarak nötrino maddeyle etkileşime girmesi sonucu oluşan yan etkilere dayanmaktadır. En yaygın yaklaşımlardan biri Çerenkov ışığını gözlemlemeye dayanmaktadır. Bir nötrino bir atom çekirdeğiyle çarpıştığında, o belirli ortamda (su veya buz) ışıktan daha yüksek hızlarda hareket eden yüklü parçacıklar üretebilir. Bu, Çerenkov ışığı adı verilen ve özel sensörler tarafından algılanan bir tür ışık parlaması üretir. Güney Kutbu'nda bulunan IceCube Nötrino Gözlemevi bu yöntemle dayanmaktadır. IceCube dedektörü, algılama ortamı olarak bir kübik kilometre saf Antarktika buzunu kullanmaktadır. Buzun altına yerleştirilen binlerce sensör, nötrinoların sıradan maddeyle nadir çarpışmaları sırasında üretilen Çerenkov ışığının parlamalarını kaydetmektedir. Bu çalışmada IceCube Nötrino Gözlemevi ile yürütülen nötrino deneyleri ele alınmaktadır.

1. IceCube Nötrino Gözlemevi

IceCube Nötrino Gözlemevi, Güney Kutbunda buzunun derinliklerinden evreni gözlemlemek amacıyla tasarlanmış, alanında öncü nitelik taşıyan bir algıdır. Bu algı ile nötrino deneylerini yürütmek üzere IceCube İşbirliği oluşturulmuştur. Bu işbirlikte 14 ülkeden 58 kurumda görev yapan yaklaşık 450 fizikçi görev yapmaktadır. Uluslararası düzeyde oluşturulan bu ekip üyelerinin bazıları nötrino deneylerinin bilimsel programının yürütülmesinden sorumludur. Bazı üyeler ise algıcın tasarım ve inşaa aşamalarında aktif rol almıştır. Böylece IceCube İşbirliği tarafından yürütülen deneysel çalışmalar, evrenin keşfine yönelik yeni bir gözlem penceresi açmaktadır. IceCube, kozmolojik kaynaklardan gelen yüksek enerjili nötrinoları (>1 TeV) ve yakınlardaki karanlık maddenin yok oluşlarını veya bozunmalarını tespit etmek için tasarlanmış dünyanın en büyük nötrino dedektörüdür (IceCube, 2026).

Antarktika'da kurulan bu nötrino gözlemevi; yüzey dedektör dizisi IceTop ve daha yoğun yapılandırılmış alt dizin DeepCore bileşenlerini de içerecek şekilde, çok amaçlı deneyleri yapmak üzere tasarlanmıştır. Burada çalışan IceCube araştırmacıları, yalnızca astrofiziksel kaynakları incelemekle kalmayıp, karanlık maddenin doğası ve nötrinoların temel özellikleri gibi çağdaş fiziğin temel problemlerine de odaklanmaktadır. Ayrıca Dünya atmosferiyle etkileşen kozmik ışınlar da gözlemlenmekte ve bu gözlemler, henüz tam olarak açıklanamayan dikkat çekici yapılar ortaya çıkarmaktadır. Yaklaşık bir kilometre-küp hacmindeki buz kütesini kapsayan IceCube, kütleleri son derece küçük olan temel parçacıkları — nötrinoları — tespit etmeyi hedeflemektedir. Yüksek enerjili bu kozmik haberciler, patlayan yıldızlar, gama ışını patlamaları ile kara delikler ve nötron yıldızlarını içeren yıkıcı astrofiziksel olaylar gibi evrendeki en şiddetli süreçlerin anlaşılmasına olanak sağlamaktadır.

IceCube Nötrino Gözlemevi'nin ana finansmanı The National Science Foundation (NSF) tarafından sağlanmış, dünya genelindeki ortak fon sağlayıcı kuruluşlar tarafından da desteklenmiştir. Dedektörün işletimi ve bakımı, lider kurum olan Wisconsin-Madison Üniversitesi sorumluluğundadır. İşbirliğine katılan her ülkenin ilgili fon kuruluşları ise kendi bilim insanlarının araştırma faaliyetlerini desteklemektedir (Aartsen vd., 2018).

1.1. IceCube Algıcının Amacı

IceCube Algıcının amacı iki yönden ele alınmaktadır. Bunlar;

-İlki, güneşten, süpernovalardan veya uzak galaksilerden gelen nötrinoların izini sürerek yüksek enerjili kozmik nötrinoları tespit etmek.

-İkincisi ise süpernova patlamaları, kara delik çarpışmaları gibi evrendeki yüksek enerjili olayları inceleyerek kozmik olayları anlamaktır.

Eğer kozmik ışınlar, Süpernova Kalıntıları (SNR), Aktif Galaktik Çekirdekler (AGN) veya Gama Işını Patlamaları (GRB) gibi astronomik cisimlerde hızlandırılıyorsa, hızlandırılmış parçacıkların bu hızlandırıcı ortamlarla etkileşerek çoğunlukla piyon üretimine yol açması beklenir. Bu açıdan nötrinolar hem kozmik ışınların kökenini hem de evrendeki maksimum enerji sınırını anlamamızı sağlar. IceCube + DeepCore ise hem çok yüksek enerjileri hem de düşük enerjileri kapsayarak bu fiziğin test edilmesini sağlamaktadır. Böylece nötrino fiziği ve temel parçacık fiziği araştırmaları ile nötrino türleri ve davranışlarını anlamak şeklinde sıralanabilir.

2.2. IceCube Algıcının Yapısı

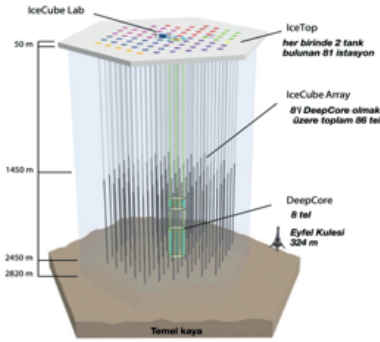
Güney Kutbu'nda yer alan IceCube Nötrino Gözlemevi, Antarktika buzundan oluşan doğal bir ortamı algılayıcı hacim olarak kullanmaktadır. Hacim olarak yaklaşık bir kilometreküplük bir hacme sahip parçacık algıcısıdır. Algıç, Amundsen-Scott Güney Kutbu İstasyonu yakınında yer almakta olup buz yüzeyinin altında, yaklaşık 2.500 metre derinliğe gömülü bulunmaktadır. Yüzeyde bulunan IceTop dizisi ile algıcın merkezinde daha yoğun yerleştirilmiş iç alt sistem DeepCore, gözlemevinin algılama kapasitesini önemli ölçüde artırarak sistemi çok amaçlı bir araştırma altyapısına dönüştürmektedir.

IceCube, şimdiye kadar inşa edilmiş ilk gigaton ölçekli nötrino algıcı olup temel olarak evrendeki en şiddetli astrofiziksel kaynaklardan gelen nötrinoları gözlemlemek amacıyla hazırlanmıştır. Elektrik yükü taşımayan ve son derece küçük kütleye sahip olan nötrinolar, manyetik alanlardan sapmaya uğramadan ve maddede çok az soğurularak Dünya'ya ulaşabilmeleri neticesinde doğrudan kozmik bilgi taşıyıcıları olmaktadır.

Algıcın buz içi (in-ice) bileşeni, her biri 10 inçlik bir fotonçoğaltıcı tüp (PMT) ve ilişkili elektronik sistemler içeren 5.160 adet sayısal optik modülden (Digital Optical Module, DOM) oluşmaktadır. Bu modüller, 86 adet sondaj

kuyusuna yerleştirilmiş düşey “ip” (string) yapıları üzerine monte edilmiştir ve 1.450–2.450 metre derinlik aralığında yaklaşık bir kilometreküplük hacme dağıtılmıştır. Dizilim, yatayda 125 metre aralıklı altıgen (hegzagonal) bir ızgara düzenine sahiptir ve her ip üzerinde 60 DOM bulunmaktadır. Modüller arasındaki düşey mesafe ise 17 metredir.

Dizinin merkezinde bulunan sekiz ip, daha sık bir geometri ile yerleştirilmiştir; bu bölgede yatay ip aralığı yaklaşık 70 metre, düşey DOM aralığı ise 7 metredir. Bu yoğun yapılandırma DeepCore alt dedektörünü oluşturur ve nötrino enerji eşiğini yaklaşık 10 GeV düzeyine düşürerek özellikle nötrino salınımlarının incelenmesine olanak sağlamaktadır (Aartsen vd., 2015).



Algıç Dizaynı

- *1 gigaton enstrümanite edilmiş buz,
- *5.160 DOM sinyalleri sayısallaştırır ve zaman damgası ekler,
- *2 nanosaniye zaman çözünürlüğü,
- *IceCube Laboratuvarı (ICL), veri işleme ve depolama sistemlerini barındırır ve her gün 100 GB veriyi uydu aracılığıyla kuzeye gönderir.

Şekil 1. IceCube Nötrino Gözlemevi şeması. Kaynak: IceCube Collaboration, <https://icecube.wisc.edu/science/icecube/> adresinden uyarlanmıştır.

2.3 Yüzey Dizisi ve Algılama Prensibi

IceTop, IceCube dizisini oluşturan iplerin (string) yüzey hizasındaki konumlarına karşılık gelecek şekilde yerleştirilmiş 81 istasyondan oluşmaktadır. Her istasyonda iki tank bulunmakta ve her tankta aşağı yönlü yerleştirilmiş ikişer DOM(Dijital Optik Modül) bulunmaktadır. DOM'lar, nötrino tarafından tetiklenen parçacıkların buzda yarattığı Cherenkov ışığını algılar. Bu ışık çok zayıftır ve DOM'un içindeki sensörler bunu elektrik sinyallerine çevirir. Başlangıçta IceCube için bir veto ve kalibrasyon dedektörü olarak tasarlanan IceTop, aynı zamanda 300 TeV–1 EeV enerji aralığındaki birincil kozmik ışınların atmosferde oluşturduğu hava duşlarını (air showers) da tespit etmektedir. Bu yüzey dizisi, Güney Yarımküre'de kozmik ışınların geliş yönlerini ölçmenin yanı sıra, kozmik ışın akısını ve bileşimini belirlemeye de olanak sağlamaktadır.

Nötrino astronomisinin gelişimi, kozmik ışınların kökenini anlama arayışıyla yakından ilişkilidir ve bu amaç doğrultusunda erken dönemlerde kilometreküp ölçekli bir nötrino dedektörü fikri ortaya çıkmıştır. Büyük ölçü-

de protonlardan oluşan kozmik ışınlar, günümüzde gözlemlenmiş en yüksek enerjili parçacıklar olmakta ve enerjileri Dünya'daki modern parçacık hızlandırıcılarının ulaşabildiği değerlerin milyon katından daha fazla bulunmaktadır.

1990'lı yılların ortasında kurulan AMANDA (Antarctic Muon and Neutrino Detector Array) deneyi, bir kavram kanıtlama (proof of concept) projesi olarak gerçekleştirilmiş ve Antarktika buzunun olağanüstü optik berraklığının yüksek enerjili nötrinoların tespiti için uygun olduğunu göstermiştir. Günümüze kadar inşa edilmiş tek kilometreküp ölçekli nötrino dedektörü olan IceCube, Aralık 2010 yılında tamamlanmıştır.

Bilindiği gibi nötrinolar doğrudan gözlemlenemezler, ancak buzla etkileşime girdiklerinde elektrik yüklü ikincil parçacıklar üretirler. Bu parçacıklar, buz ortamında ışığın buzdaki hızından daha hızlı ilerlediklerinde Čerenkov ışınımı yayarlar. IceCube algılayıcıları bu ışığı toplar; sinyaller sayısallaştırılır ve zaman damgası eklenir. Elde edilen veriler yüzeydeki IceCube Laboratuvarı'na iletilir ve burada her bir DOM'dan gelen bilgiler birleştirilerek, müon ve nötrinoların yönü ile enerjisini ortaya koyan ışık desenlerine dönüştürülür. Bu algılama prensibinden hareketle tasarlanan IceCube'un temel amacı, buz içinde ya da buzun altındaki kayada gerçekleşen nötrino etkileşimleri sonucu oluşan yüklü parçacıkların yaydığı Čerenkov ışığını tespit ederek astrofiziksel kaynaklardan gelen yüksek enerjili nötrinoları gözlemlemektir.

Uzaydaki yüksek enerjili bir nötrino, Dünya'ya çarparak Antarktika'daki buz tabakasına ulaşır ve nadiren bir proton veya nötronla çarpışır (nükleonla etkileşim). Temelde nötr ve yüklü akım etkileşimleri gözlenir. Bu çarpışmada, yüklü parçacıklar açığa çıkar: örneğin elektron, müon veya tau parçacıkları. Bu parçacıklar buz içindeki ışık hızından daha hızlı hareket edebilir (çok yüksek enerjili oldukları için). Işık, boşlukta $c \approx 3 \times 10^8$ m/s hızında yayılır. Bir ortamda (örneğin buz) ışık hızı $v_0 = c/n$ olur; burada n ortamın kırılma indisi. Antarktika buzı için $n \approx 1.31$ olarak alırsak ani ışık buzda $v_0 \approx 2.29 \times 10^8$ m/s hızında yayılır. Eğer bir yüklü parçacık (elektron, müon vb.) $v > v_0$ hızında hareket ederse, ortamın ışık hızını "aşmış" olur. Parçacık ortam içinde hareket ederken, sürekli olarak elektromanyetik alanını etkiler. Eğer hızı ışık hızından büyükse, bu etkiler ileriye doğru bir şok dalgası gibi birikir. Şekil 2'de de verildiği üzere tıpkı ses hızını aşan bir uçakla oluşan süpersonik şok dalgası gibi bu birikim sonucu, ışık parçacığının yolunu takip eden bir koni şeklinde yayılır.

2.4. Digital Optical Modules' (DOMs)

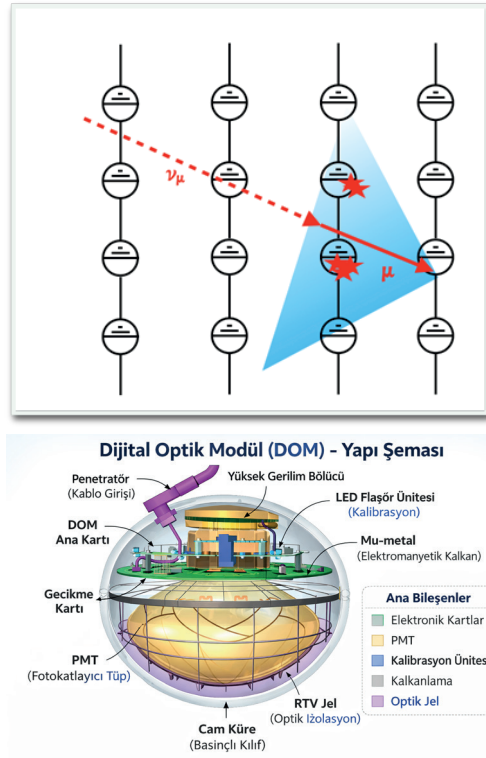
Evren çok yüksek enerjili parçacık hızlandırıcılarla dolu ve bu ortamlarda nötrinolar üretilmektedir. Bu nötrinoları ölçersek, kozmik ışınların nereden geldiğini anlayabiliriz. Çok yüksek enerjili nötrinolar nereden geliyor? Evrede bazı aşırı enerjik kozmik cisimlerde, parçacıklar inanılmaz hızlara çıkarılıyor. Bu ortamlarda birlikte üretiliyor:

Yüklü kozmik ışınlar (protonlar, çekirdekler)

Yüksek enerjili fotonlar (gamma ışınları)

Yüksek enerjili nötrinolar

Enerji seviyesi 10^{11} GeV değerinde olup bu, Büyük hadron Çarpıştırıcısı'nın ulaştığından kat kat yüksek bir değerdir. IceCube Gözlemevi'nin merkezinde, en alttaki en berrak buz bölgesinde yoğunlaştırılmış ve optik modülleri daha sık aralıklarla yerleştirilmiş altı özel dizi eklenerek, yoğun şekilde donatılmış bir derin çekirdek oluşturma planı vardır. Bir DOM dizisi, sıcak su jeti ile açılmış ve suyla doldurulmuş bir deliğe yerleştirilir. Su yeniden donduğunda, DOM'lara artık kalıcı olarak erişilemez. Yer içinden gelen ısı akışı, buz içinde dikey bir sıcaklık gradyanı oluşturur ve bu durum, en alttaki DOM'da -9°C ile en üstteki DOM'da -32°C arasında değişen bir iç çalışma sıcaklığına yol açar. Bir DOM, sinyal sayısallaştırma, okuma, tetikleme, kalibrasyon, veri aktarımı ve çeşitli kontrol fonksiyonları sağlayan karmaşık elektronik devreleri barındırır. DOM elektronığının en önemli özelliği, analog dalga şekillerini 3.3 ns genişliğindeki zaman aralıklarında toplam 422 ns süreyle kaydedebilmesidir (Abbasi, R vd., 2009).



Şekil 2. IceCube DOM şeması. Kaynak: (Abbasi, R vd., 2009)'dan uyarlanmıştır.

DOMlar, buzdan geçen relativistik yüklü parçacıkların ürettiği mavi ve yakın morötesi Cherenkov ışığını algılayan bir fotokatlayıcı tüpler (PMT) içerir. Ortalama olarak 100 metrenin oldukça üzerindeki büyük soğurma uzunluğu nedeniyle fotonlar uzun mesafeler kat edebilir. Buz içindeki saçılma, etkin saçılma uzunluğu olan yaklaşık 24 m'den daha büyük mesafelerde fotonların varış zamanlarını ve yönlerini dağıtır. Sinyal şekli, hem kaynağa olan uzaklığa hem de kaynağın doğrusal uzantısına bağlıdır. Genel olarak, bir iz (track) DOM'dan uzaklaştıkça sinyalin zaman genişliği artar. DOM'un temel işlevi, bir veya daha fazla foton algılandığında "Hit" (olay kaydı) adı verilen dijital bir çıktı kaydı üretmektir. Bir Hit'in temel bileşenleri, DOM içinde yerel olarak oluşturulan bir zaman damgası ve dalga şekli (waveform) bilgisidir. Bir Hit her zaman en az şu bilgileri içerir: bir zaman damgası, yükün kaba bir ölçümü, ve Hit'in kaynağını tanımlayan birkaç bitlik bilgi.

IceCube'un aradığı nötrinolar, son derece şeffaf temel parçacıklardır ve diğer maddelerle nadiren etkileşime girdikleri için tespit edilmeleri son derece zordur. Bununla birlikte, nadir durumlarda bir atom çekirdeği veya elektronla çarpıştıklarında, yüklü parçacıklar oluşur ve Çerenkov radyasyonu adı verilen bir ışık türü yayarlar. IceCube sensörleri bu ışığı toplar, daha sonra dijitalleştirilir ve zaman damgası eklenir. Bu bilgiler, yüzeydeki IceCube Laboratuvarı'ndaki bilgisayarlara gönderilir ve bu bilgisayarlar, bireysel DOM'lardan gelen mesajları, müonların ve nötrinoların yönünü ve enerjisini ortaya çıkaran ışık desenlerine dönüştürür. IceCube, bu Çerenkov radyasyonunu tespit ederek nötrinoların varlığını belirler. Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarı, DESY-Zeuthen ve UW-Madison'ın başlıca katkılarıyla tasarlanan IceCube sensörleri, İsveç'teki Stockholm ve Uppsala üniversitelerinde, Almanya'daki DESY-Zeuthen'de ve ABD'deki Stoughton, Wisconsin'deki Fizik Bilimleri Laboratuvarı'nda üretildi ve test edildi. Her bir sensör dizisi genel bir temaya sahipti ve numaralandırma sisteminden daha etkili bir tanımlama yöntemi olarak her bir sensöre isim verildi.

3. IceCube Nötrino Gözlemevi Bulguları

IceCube Nötrino Gözlemevi, tam yapılandırılmış algıcının kurulmasının ardından 13 Mayıs 2011 tarihinde düzenli bilimsel veri toplamaya başlamıştır. Bu tarih, dizinin tüm sensörleri yerleştikten sonra başlayan tam operasyon dönemi olarak kabul edilmektedir ve o tarihten itibaren IceCube kesintisiz biçimde veri üretmektedir. Bu süre zarfında elde edilen en önemli bulgular-dan biri, Güneş Sistemi dışından gelen yüksek enerjili nötrinoların ilk güçlü kanıtıdır. 2013 yılında yapılan analizlerde, atmosferik arka plandan çok daha yüksek enerjili (~30–1200 TeV) nötrinolar tespit edilmiş ve bu parçacıkların Dünya dışı kaynaklardan geldiği gösterilmiştir. Bu bulgu, nötrinoları doğrudan kozmik hızlandırıcıların "haberci parçacıkları" olarak tanımlayan nötrino astronomisinin başlamasına zemin hazırlamıştır. 2015 yılına kadar yapılan çalışmalar, ~100 TeV üstü olaylarda gözlemlenen nötrino sayısının atmosferik

arka plana göre anlamlı bir fazlalık gösterdiğini ortaya koymuş ve kozmik nötrinoların gerçek bir sinyal olduğu doğrulanmıştır (Aartsen et al., 2013).

2017 yılında tespit edilen yüksek enerjili bir nötrino olayı, TXS 0506+056 blazarı ile korelasyon göstermiş ve böylece ilk kez belirli bir nötrino kaynağı doğrudan tespit edilmiştir (Aartsen et al., 2018). Bu sonuç, nötrino astronomisinin hem teorik hem de gözlemsel açıdan önemli bir adımını temsil etmekte ve gelecekte yüksek enerjili astrofiziksel kaynakların daha sistematik olarak incelenebilmesi için güçlü bir temel sağlamaktadır. IceCube'un verileri, kozmik hızlandırıcılar ve astrofiziksel süreçlerin anlaşılmasında kritik rol oynamaya devam etmektedir.

IceCube deneyinin literatüre katkıları ve akademik etkileri açısından elde ettiği sonuçlar, 2013–2023 yılları arasında nötrino astronomisi literatüründe 500'den fazla hakemli makaleye kaynak teşkil etmiştir. Sağladığı veriler ve geliştirdiği metodolojiler, multi-messenger astronomi, astrofiziksel nötrino kaynaklarının belirlenmesi, kozmik ışın kökenleri ve temel parçacık fiziği alanlarında öncü niteliktedir. Özetle, IceCube, hem kozmik ışın kökenlerini anlamaya hem astrofiziksel kaynakları tanımlamaya hem de yüksek enerjili parçacık fiziğinde yeni fenomenleri keşfetmeye önemli katkılar sağlamış ve bu alanın temel referanslarından biri haline gelmiştir. Özellikle tespit edilen nötrino olayları, multi-messenger astronomi çalışmalarında kritik bir örnek olarak literatürde yerini almıştır (IceCube Collaboration, 2021).

Sonuç ve Değerlendirme

IceCube'un kurulması olağanüstü bir mühendislik başarısı olarak kabul edilmektedir. Bu algıcı kurma çalışmaları zamanında tamamlanmış, bütçe sınırları içinde kalmış ve üst düzey performans sağlamıştır. Güney Kutbunda son derece elverişsiz bir ortamda hassas bir algıcı oluşturma ve çalıştırmanın sayısız zorluğunu aşan fizikçilerin, mühendislerin ve teknisyenlerin azim ve özverisine bir övgü olmaktadır. IceCube Nötrino Gözlemevi, 2010 yılında tamamlanmasından bu yana yüksek enerjili astrofiziksel nötrinoların tespitinde öncü bir rol üstlenmiştir. 2013 yılında gözlemlenen ilk yüksek enerjili astrofiziksel nötrino olayı, uzak galaksilerde gerçekleşen parçacık hızlandırıcı süreçlerin doğrudan gözlemlenmesine olanak sağlamıştır. Bu sayede, kozmik ışınların kökeni ve evrendeki en şiddetli olayların mekanizmaları hakkında doğrudan veri elde edilmiştir.

Bunun yanı sıra IceCube, kara delikler, nötron yıldızları ve gama ışını patlamaları gibi aşırı astrofiziksel olayların nötrino üretim süreçlerini inceleyerek kozmik hızlandırıcıların etkinliğini ve enerji sınırlarını da ortaya koymaktadır. Atmosferik nötrinoların gözlemi, bu sinyaller ile astrofiziksel nötrinolar arasındaki ayrımı mümkün kılarak, gözlemlerin güvenilirliğini artırmaktadır. IceCube'un merkezinde yer alan DeepCore alt dizisi, düşük enerjili nötrinoların gözlemini mümkün kılacak şekilde daha sık yerleştiril-

miş DOM'lardan oluşmaktadır. Yaklaşık 10 GeV enerji eşiğine sahip bu yapı, nötrino salınımlarının detaylı olarak incelenmesini sağlamaktadır. DeepCore, aynı zamanda karanlık madde arayışında kritik bir rol üstlenmekte, özellikle Dünya'nın merkezinden gelen nötrinoların ölçümü, karanlık maddenin doğasına dair olası ipuçları sunmaktadır. Yüzeyde konumlandırılmış IceTop dizisi, kozmik ışınların geliş yönünü ve bileşimini belirlemek için kullanılmaktadır. IceTop, 81 istasyondan oluşmakta ve her istasyonda iki tank ile toplamda dört DOM bulunmaktadır. Bu istasyonlar, atmosferde oluşturulan hava duşlarını (air showers) tespit ederek, 300 TeV – 1 EeV enerji aralığındaki birincil kozmik ışınların ölçümünü gerçekleştirmektedir. IceTop ve IceCube'un birlikte çalışması, yüksek enerjili kozmik ışınların kaynağını belirlemede kritik bir veri seti sağlamaktadır. Böylece nötrino astronomisi ile kozmik ışın fiziği arasında güçlü bir bağ kurulmuş olmaktadır. IceCube'un başarısı, nötrino astronomisi alanında daha geniş ve daha hassas gözlemler için yol açmaktadır. IceCube-Gen2 projesi ile dedektörün hacmi artırılacak, daha yüksek enerjili nötrinoların tespiti mümkün olacak ve multi-messenger astronomi çalışmalarına katkı sağlanacaktır.

Bu gelişmeler, evrendeki en şiddetli olayların anlaşılması, derinleştirilmesi yanı sıra, kozmik ışınların kökeni ve maksimum enerji sınırları hakkında yeni bilgiler sağlayacaktır. IceCube, hem yüksek hem de düşük enerjili nötrinoları kapsayan yapıyla evreni anlamada benzersiz bir pencere sunmaya devam edecektir (IceCube Collaboration, 2011).

Kaynaklar

- Aartsen, M. G. et al. (2013). Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector, 2013, arXiv:1311.5238
- Aartsen, M. G. et al. (2015). Evidence for Astrophysical Muon Neutrinos from the Northern Sky, 2015, Phys. Rev. Lett. 115, 081102 (2015).
- Aartsen, M. G., Ackermann, M., Adams, J., Aguilar, J. A., Ahlers, M., Ahrens, M., ... IceCube Collaboration. (2018). Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A. Science, 361(6398). <https://doi.org/10.1126/science.aat1378>
- Abbasi, R vd., (2009). The IceCube data acquisition system: Signal capture, digitization, and timestamping. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 601(3), 294–316. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.01.001>
- IceCube, (2026). <https://icecube.wisc.edu/science/icecube/> ... adresinden 10 Mart 2022 tarihinde erişilmiştir.
- IceCube Collaboration. (2011). IceCube – Astrophysics and Astroparticle Physics at the South Pole. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1111.5188>
- IceCube Collaboration. (2021). Detection of a particle shower at the Glashow resonance with IceCube. Nature, 591(7849), 220–224. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03256-1>
- Les Sherpas (2026). Modele standard des particules: Quarks, leptons et bosons, <https://sherpas.com> › physique adresinden 02.02.2026 tarihinde erişilmiştir.
- Polytechnique Insights (2022). La physique des particules au quotidien, <https://www.polytechnique-insights.com> › ... adresinden 26 Nisan 2022 tarihinde erişilmiştir.



ECZANE HİZMETLERİNDE ÖLÇÜM BİLİMİ: FİZİKSEL PRENSİPLER, HATA ANALİZİ VE UYGULAMALAR

“ ”

Şeydanur TAŞER¹

¹ Fizik Öğretmeni Şeydanur TAŞER, T.C. Millî Eğitim Bakanlığı Patnos Anadolu Lisesi, Ağrı, Türkiye. ORCID: 0009-0003-4229-6364

1. GİRİŞ

Ölçüm bilimi, fiziksel ya da kimyasal bir büyüklüğün tanımlı bir yöntem, uygun referans sistemi ve açık bir belirsizlik çerçevesi içinde sayısallaştırılmasını konu alır. Sağlık hizmetlerinde olduğu gibi eczane hizmetlerinde de güvenilir ölçüm; kalibrasyon, izlenebilirlik, doğruluk, kesinlik ve ölçüm belirsizliğinin yönetimi ile doğrudan ilişkilidir. İlacın doğru dozda hazırlanması, uygun saklama koşullarının sürdürülmesi, klinik verilerin doğru yorumlanması ve envanter süreçlerinin sağlıklı yürütülmesi, yalnızca pratik düzenin değil hasta güvenliğinin de temel unsurlarıdır (JCGM, 2008, 2012; World Health Organization [WHO], 2017).

Eczane hizmetleri çoğu zaman yalnızca ilaç teminiyle özdeşleştirilse de güncel yaklaşım, bu alanı veri temelli karar verme, süreç güvenliği ve kalite güvencesi boyutlarıyla ele almaktadır. Reçete doğrulama, ilaç-ilaç ve ilaç-gıda etkileşimlerinin incelenmesi, çocuk ve geriyatrik hastalarda doz uyarlaması, soğuk zincir ürünlerinin izlenmesi ve hasta danışmanlığının desteklenmesi gibi süreçlerin tamamı ölçüm ve doğrulama mantığıyla çalışır. Dolayısıyla ölçüm bilimi, eczane hizmetlerinde yalnızca teknik bir araç değil; karar kalitesini, süreç güvenliğini ve mesleki sorumluluğu şekillendiren kurucu bir çerçevedir (WHO, 2011; Institute for Safe Medication Practices [ISMP], 2023).

Bu bölümde ölçüm biliminin kuramsal temelleri, hata analizi yaklaşımı, ölçüm sistemlerinin değerlendirilmesi, veri yönetimi ilkeleri ve regülasyon/etik boyutları eczane hizmetlerine özgü örneklerle birlikte ele alınmaktadır. Hakem değerlendirmesinde öne çıkan tekrar, kavramsal örtüşme ve alan-özgüllük eksikliği sorunları giderilerek; bölüm daha sıkı, daha analitik ve daha doğrudan eczane pratiğine bağlanan bir yapı içinde yeniden düzenlenmiştir. Özellikle soğuk zincir izleme, majistral hazırlama, stok yönetimi, reçete doğrulama ve farmakoekonomik değerlendirme gibi uygulama alanları metnin ana omurgasına entegre edilmiştir (Taylor & Kuyatt, 1994; Eurachem, 2022).

2. ÖLÇÜM BİLİMİ VE ECZANE HİZMETLERİ BAĞLAMI

Eczane hizmetleri; ilacın seçimi, temini, hazırlanması, sunumu, saklanması, kayıt altına alınması ve tedavi sürecine ilişkin bilginin yorumlanmasını kapsayan çok katmanlı bir hizmet alanıdır. Bu hizmet zincirinin her halkasında ölçülebilir değişkenler bulunur: miktar, konsantrasyon, sıcaklık, nem, zaman, kullanım sıklığı, hasta ağırlığı, böbrek-karaciğer fonksiyonuna bağlı doz ayarlama parametreleri ve stok miktarı bunların başlıcalarıdır. Bu nedenle ölçüm bilimi, eczane pratiğinde yalnızca laboratuvar ile ilişkili bir alan değil; doğrudan mesleki karar ve hizmet kalitesi ile bağlantılı bir altyapıdır (WHO, 2011, 2020).

Toplum eczanelerinde ve hastane eczanelerinde ölçüm mantığı farklı yoğunluklarda görünür. Toplum eczanelerinde reçete doğrulama, ilaç kulla-

nım sıklığının açıklanması, doz hesaplarının kontrolü ve stok hareketlerinin doğrulanması öne çıkarken; hastane eczanelerinde yüksek riskli ilaçların hazırlanması, steril ürünlerin süreç kontrolü, klinik farmasi verilerinin izlenmesi ve sıcaklık kontrollü alanların sürekliliği daha belirgin hâle gelir. Her iki bağlamda da ölçümün amacı, yalnızca sayısal sonuç üretmek değil; karar vermeyi güvenilir hâle getirmektir (ISMP, 2023; WHO, 2017).

Alan yazında eczane hizmetlerinin kalitesi genellikle hasta güvenliği, erişim, danışmanlık kalitesi ve hizmet standardizasyonu üzerinden tartışılmaktadır; ancak bu boyutların çoğu ölçüm kalitesiyle iç içedir. Örneğin doğru ilacın doğru hastaya verilmesi, kimlik doğrulama ve reçete eşleşmesinin; soğuk zincir ürününün etkinliğinin korunması ise çevresel izleme verisinin güvenilirliğinin bir sonucudur. Ölçüm bilimi bu nedenle eczane hizmetlerinde görünmez ama belirleyici bir omurga işlevi görür.

3. FİZİKSEL PRENSİPLER: ÖLÇÜM SİSTEMLERİ VE TEMEL KAVRAMLAR

Bir ölçüm sisteminin bilimsel değeri, ölçtüğü büyüklüğün açık tanımlanmasına, referansla ilişkisinin kurulmasına ve sonucun belirsizlikle birlikte yorumlanmasına bağlıdır. Eczane hizmetlerinde kullanılan sistemler yalnızca analitik cihazlardan ibaret değildir; tartım cihazları, buzdolabı veri kaydedicileri, barkod sistemleri, yazılım tabanlı doz hesap modülleri, otomatik sayım cihazları ve stok izleme yazılımları da ölçüm sistemi mantığı içinde değerlendirilmelidir. Bu araçların her biri, belirli bir girdiyi sayısallaştırır ve bu sayısallaştırma üzerinden karar üretilmesine katkıda bulunur (JCGM, 2012).

3.1. Kalibrasyon, İzlenebilirlik ve Referans Çerçevesi

Kalibrasyon, bir ölçüm sisteminin gösterimi ile uygun referans standartları arasındaki ilişkinin belirlenmesi ve gerekiyorsa düzeltme katsayılarının tanımlanması sürecidir. İzlenebilirlik ise ölçüm sonucunun kesintisiz bir karşılaştırma zinciri yoluyla kabul edilmiş bir referansa bağlanabilmesini ifade eder. Eczane hizmetlerinde bu iki kavram özellikle tartım, hacim ölçümü, sıcaklık takibi ve analitik değerlendirme süreçlerinde kritik önemdedir. Kalibrasyonu yapılmamış bir terazide küçük sapmalar bile pediatrik doz hazırlamada klinik açıdan anlamlı hatalara dönüşebilir (JCGM, 2012; International Council for Harmonisation [ICH], 2023).

Soğuk zincir uygulamalarında veri kaydedici cihazların ve termometrelerin doğrulanması da benzer biçimde izlenebilirlik gerektirir. Cihazın yalnızca çalışıyor olması yeterli değildir; ölçtüğü değerin güvenilir olduğunun gösterilmesi gerekir. Bu nedenle kalibrasyon planları, hangi cihazın hangi aralıkla, hangi referansla ve hangi kabul kriterleriyle değerlendirileceğini açıkça tanımlamalıdır. Kalibrasyon kayıtlarının düzenli, tarihli ve denetlenebilir şekilde tutulması kalite güvence sisteminin ayrılmaz bir parçasıdır (WHO, 2020).

3.2. Kesinlik, Hassasiyet ve Tekrarlanabilirlik

Kesinlik (precision), aynı koşullar altında yapılan tekrar ölçümlerin birbirine ne kadar yakın olduğunu; tekrarlanabilirlik ise bu yakınlığın aynı operatör, aynı cihaz ve kısa zaman aralığı gibi sınırlı koşullarda sürdürülmesini ifade eder. Uygulamada hassasiyet kavramı çoğu zaman bu alanı kapsayacak biçimde kullanılmakla birlikte, akademik metinlerde kesinlik ve tekrarlanabilirliğin ayrı ayrı tanımlanması kavramsal açıklık sağlar (JCGM, 2012; Eurachem, 2022).

Eczane hizmetlerinde kesinlik, özellikle tekrarlı sayım, analitik ölçüm, seri doz hazırlama ve sıcaklık/nem izlemelerinde önemlidir. Örneğin aynı stok kaleminin gün içinde farklı personel tarafından farklı sonuçlarla sayılması, ölçüm sisteminin tekrarlanabilirlik ve süreç standardizasyonu sorunu taşıdığını düşündürür. Benzer şekilde majistral preparat hazırlığında aynı formülün ardışık hazırlanışlarında anlamlı kütle veya hacim farkları gözlenmesi, yalnızca operatör becerisiyle değil kullanılan ekipmanın ve prosedürün kararlılığıyla da ilişkilidir.

Bununla birlikte yüksek kesinlik tek başına yeterli değildir. Ölçümler birbirine çok yakın olabilir; ancak sistematik bir yanlılık varsa sonuçlar yine de yanlış kalır. Bu nedenle kesinlik, her zaman doğruluk ve ölçüm belirsizliği ile birlikte değerlendirilmelidir.

3.3. Doğruluk, Yanlılık ve Ölçüm Belirsizliği

Doğruluk, ölçüm sonucunun gerçek ya da kabul edilen referans değere yakınlığını ifade eder. Yanlılık (bias) ise sonucun referans değerden sistematik biçimde sapma eğilimidir. Ölçüm belirsizliği ise sonucun etrafındaki makul değerler aralığını tanımlayan ve ölçümün ne ölçüde güvenle yorumlanabileceğini gösteren parametredir. Bu üç kavramın birlikte ele alınması, eczane hizmetlerinde sayıların sadece “doğru görünüp görünmediğini” değil, karar vermeye ne ölçüde elverişli olduğunu anlamayı sağlar (JCGM, 2008; Taylor & Kuyatt, 1994).

Majistral bir süspansiyonun hazırlanmasında kullanılan terazi sürekli olarak hedef değerden 20 mg fazla gösteriyorsa, sistem yüksek tekrarlanabilirlik gösterse bile doğruluğu düşüktür ve sonuçta sistematik doz hatası oluşur. Benzer biçimde bir buzdolabı göstergesi gerçek sıcaklıktan düzenli olarak 1-2 °C düşük okuma veriyorsa, kayıtlar teknik olarak “istikrarlı” görünebilir; ancak sıcaklığa duyarlı ürünlerin etkinliği riske girebilir. Bu örnekler, eczane hizmetlerinde belirsizlik ve yanlılık kavramlarının soyut teknik terimler değil, doğrudan hizmet güvenliğiyle ilişkili yapılar olduğunu göstermektedir.

Analitik yöntem doğrulamasında doğruluk, kesinlik, seçicilik, doğrusalık, ölçüm aralığı ve sağlamlık gibi parametrelerin birlikte incelenmesi bu nedenle önemlidir. Yöntem yalnızca laboratuvar ortamında değil, gerçek kul-

lanım bağlamında da amaca uygun olduğunu gösterebilmelidir (ICH, 2023; U.S. Food and Drug Administration [FDA], 2018).

4. HATA ANALİZİ TEMELLERİ

Hata analizi, ölçüm sonucunu etkileyen sapmaların tanımlanması, kaynaklarının sınıflandırılması ve etkilerinin yönetilmesi sürecidir. Ölçüm sonuçlarının güvenilir yorumlanabilmesi için yalnızca elde edilen sayıların değil, bu sayıları oluşturan hata bileşenlerinin de görünür kılınması gerekir. Çağdaş kalite sistemlerinde ölçüm belirsizliği ve hata analizi bu nedenle merkezi bir yer tutar (JCGM, 2008).

4.1. Sistematik ve Rastgele Hatalar

Sistematik hata, sonuçları belirli bir yönde sürekli olarak saptıran yanlışlıkları ifade eder. Hatalı kalibrasyon, uygun olmayan yöntem seçimi, yazılım parametrelerinin yanlış tanımlanması, yetersiz personel eğitimi ve çevresel koşulların kontrol edilmemesi sistematik hata kaynakları arasında sayılabilir. Rastgele hata ise ölçümler arasındaki öngörülemez saçılmayı gösterir ve çoğunlukla istatistiksel yöntemlerle değerlendirilir (Eurachem, 2022; JCGM, 2012).

Eczane pratiğinde sistematik hata örnekleri arasında çocuk hastalarda kilogram yerine yanlışlıkla pound cinsinden ağırlık kullanılması, sürekli düşük okuyan bir buzdolabı sensörüne güvenilmesi veya eczane yazılımında yanlış dozaj formunun varsayılan olarak seçili kalması sayılabilir. Rastgele hata ise manuel sayım, veri giriş hatası ya da düzensiz çevresel dalgalanmalar nedeniyle ortaya çıkabilir. İki hata türünün ayırt edilmesi, düzeltici ve önleyici faaliyetlerin uygun biçimde seçilmesi için zorunludur.

4.2. Hata Bütünü, Risk Sınıflaması ve Güven Yönetimi

Hata bütünü yaklaşımı, ölçüm sonucunu etkileyen cihaz, yöntem, örnek, çevre, yazılım ve kullanıcı kaynaklı tüm bileşenlerin birlikte değerlendirilmesini sağlar. Bu yaklaşım özellikle tekil bir hataya odaklanmanın yetersiz kaldığı karmaşık eczane süreçlerinde yararlıdır. Çünkü pratikte hata çoğu zaman tek bir nedenden değil, birbiriyle etkileşen küçük sapmaların toplamından doğar (Taylor & Kuyatt, 1994).

Örneğin majistral bir preparatta görülen doz sapması; terazinin kalibrasyon durumu, kullanılan ölçüm kabının uygunluğu, hammadde etiket doğruluğu, personelin prosedüre uyumu ve son kontrol adımının varlığı ile birlikte değerlendirilmelidir. Benzer şekilde soğuk zincir bozulmaları yalnızca cihaz arızasıyla değil, kapı açılma sıklığı, ürün yerleşimi, alarm eşiklerinin yanlış tanımlanması ve kayıtların yeterince izlenmemesiyle de ilişkili olabilir. Bu nedenle hata yönetimi, eczane hizmetlerinde kök neden analizi ve risk temelli izleme ile desteklenmelidir (WHO, 2017, 2020).

Güven yönetimi bağlamında kabul sınırlarının önceden tanımlanması, sapma kayıtlarının tutulması, kritik kontrol noktalarının belirlenmesi ve tekrar eden hatalara yönelik düzeltici-önleyici faaliyetlerin planlanması gerekir. Böylece hata, yalnızca sonradan fark edilen bir olay olmaktan çıkar; süreç içinde izlenen ve yönetilen bir kalite parametresine dönüşür.

4.3. Eğilim İzleme, Kontrol Grafikleri ve Erken Uyarı Yaklaşımları

Hata tahmini yalnızca geçmiş olayların kaydıyla değil, zaman içindeki eğilimlerin sistematik izlenmesiyle güçlenir. Kontrol grafikleri, hareketli ortalamalar, alarm eşikleri ve zaman serisi incelemeleri ölçüm sistemlerinde henüz kritik düzeye ulaşmamış bozulmaların erken fark edilmesini sağlar. Bu yaklaşım, depo sıcaklık kayıtları, buzdolabı performansı, analitik cihaz yanıtları ve stok farklılıklarının izlenmesinde işlevseldir (Eurachem, 2022).

Eczane hizmetlerinde örneğin bir buzdolabının sıcaklık değerleri kabul sınırları içinde görünmesine rağmen günün belirli saatlerinde düzenli dalgalanma gösteriyorsa, bu durum kapı kullanım yoğunluğu, sensör yerleşimi veya cihaz kapasitesi ile ilişkili yapısal bir soruna işaret edebilir. Benzer biçimde belirli bir ilaç grubunda ay sonu stok farklarının sürekli aynı yönde oluşması, kayıt ve akış süreçlerinde sistematik sorun bulunduğunu düşündürür. Eğilim izleme bu nedenle yalnızca teknik izleme aracı değil, yönetsel karar desteğidir.

5. ÖLÇÜM SİSTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Ölçüm sistemlerinin değerlendirilmesi, bir cihazın çalışıp çalışmadığını denetlemekten daha geniş bir süreçtir. Asıl soru, ölçüm sisteminin amaçlanan kullanım için yeterli olup olmadığıdır. Bu değerlendirme kalibrasyon planlarını, yöntem doğrulamasını, performans göstergelerini, grafiksel incelemeleri ve gerçek kullanım koşullarındaki kararlılığı birlikte kapsar (ICH, 2023; FDA, 2018).

5.1. Kalibrasyon Planları ve Kullanıma Uygunluk Doğrulaması

Kalibrasyon planları, cihazın teknik doğruluğuna ilişkin sistematik bir güvence sağlar; ancak eczane hizmetlerinde bu tek başına yeterli değildir. Sistem, gerçek iş akışı içinde de beklenen performansı göstermelidir. Bu nedenle kullanıma uygunluk doğrulaması, cihazın ya da yazılımın gerçek kullanım senaryolarında güvenilir sonuç üretilip üretilmediğinin değerlendirilmesini içerir.

Örneğin bir buzdolabı sensörü laboratuvar koşullarında doğru sonuç veriyor olabilir; ancak eczanede yoğun kullanım, yanlış yerleşim veya hava akışı problemleri nedeniyle ürünün maruz kaldığı gerçek sıcaklığı yeterince temsil etmeyebilir. Benzer şekilde reçete kontrol yazılımı teorik olarak etkileşimleri işaretliyor olsa da, uyarı eşiği çok düşük tanımlandığında klinik olarak an-

lamsız çok sayıda uyarı üreterek alarm yorgunluğuna neden olabilir. Bu örnekler, doğrulamanın teknik doğruluğun ötesine geçmesi gerektiğini gösterir (ISMP, 2023).

5.2. Performans Göstergeleri: Doğruluk, Süreklilik, Gecikme ve Karar Etkisi

Bir ölçüm sisteminin performansı yalnızca referans değere yakınlıkla değil, sonuçların sürekliliği, zamanında üretimi ve karar süreçlerine etkisiyle birlikte değerlendirilmelidir. Eczane pratiğinde gecikmiş ancak doğru bir uyarı, bazı durumlarda klinik değeri sınırlı bir sonuç olabilir. Bu nedenle performans göstergeleri teknik doğruluk kadar işlevsel uygunluğu da yansıtmalıdır.

Örneğin ilaç etkileşim kontrolünde sistem çok sayıda uyarı üretiyor ancak bunların önemli bir bölümü klinik açıdan önemsizse, teknik duyarlılık yüksek olsa bile pratik fayda düşebilir. Benzer biçimde stok izleme sistemi sayısal olarak doğru çalışsa da veriler gün sonunda senkronize oluyorsa gün içi kritik ilaç eksikliklerini geç fark ettirebilir. Dolayısıyla performans değerlendirmesi, ölçüm sonucunun karar kalitesi üzerindeki etkisini de içermelidir.

5.3. Kalibrasyon Eğrileri, Grafik İnceleme ve Aykırı Değer Yönetimi

Kalibrasyon eğrileri özellikle farmasötik ve biyofarmasötik analizlerde ölçüm sisteminin yanıtı ile bilinen standartlar arasındaki ilişkinin görünür hâle getirilmesini sağlar. Doğrusalık, eğim, kesişim, artıkların dağılımı ve aykırı değerlerin konumu yöntemin güvenilirliği hakkında doğrudan bilgi verir (ICH, 2023; FDA, 2018).

Grafiksel inceleme yalnızca laboratuvar analizi için değil, eczane süreç verileri için de yararlıdır. Sıcaklık-zaman grafikleri, aylık stok farkı grafikleri, hatalı reçete yakalama oranları veya yeniden sipariş gecikmeleri görsel olarak incelendiğinde, yalnızca tablo üzerinden fark edilmeyen örüntüler görünür hâle gelebilir. Ancak aykırı değerler otomatik olarak dışlanmamalı; önce teknik arıza, kullanıcı hatası, veri aktarım sorunu veya gerçek olay olasılığı açısından değerlendirilmelidir.

6. ECZANE HİZMETLERİNDE UYGULAMALI ÖLÇÜM BİLİMİ

Ölçüm biliminin eczane hizmetlerindeki gerçek değeri, kuramsal doğruluğun sahadaki iş akışlarıyla birleştiği noktada görünür olur. Reçete doğrulama, klinik izlem, farmakoekonomik değerlendirme, stok yönetimi ve hasta güvenliği uygulamaları, ölçüm temelli düşünmenin doğrudan yansıdığı alanlardır. Bölümün bu kısmında ölçüm biliminin eczane pratiğine somut katkısı örnek odaklı biçimde ele alınmaktadır.

6.1. Reçete Doğrulama ve İlaç Etkileşim Kontrolleri

Reçete doğrulama süreci; doğru hasta, doğru ilaç, doğru doz, doğru dozaj formu, doğru zamanlama ve uygun kullanım bilgisinin birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Bu sürecin merkezinde ölçüm mantığı yer alır; çünkü doz, sıklık, yaş, kilo, renal fonksiyon ve eş zamanlı ilaç kullanımı gibi değişkenler sayısal ve doğrulanabilir verilerdir. Özellikle pediatrik, geriatric ve çoklu ilaç kullanan hastalarda bu değişkenlerin küçük hataları bile klinik açıdan büyük sonuçlar doğurabilir (ISMP, 2023).

İlaç etkileşim kontrol sistemlerinde de benzer durum geçerlidir. Yazılımın çok duyarlı olması yararlı görünse de, klinik önemi düşük uyarıların aşırı üretimi kullanıcıların gerçekten kritik uyarıları gözden kaçırmasına yol açabilir. Bu nedenle ölçüm bilimi yaklaşımı yalnızca daha fazla veri toplamayı değil, doğru eşiği, doğru sınıflamayı ve doğru yorumlamayı da kapsar. Reçete doğrulama; nicel veri, klinik muhakeme ve süreç standardizasyonunun birleştiği bir ölçüm uygulamasıdır.

6.2. Klinik Sonuç İzleme ve Farmakoeconomik Ölçümler

Klinik sonuç izleme, tedavinin beklenen etkiyi üretip üretmediğini değerlendirmeyi; farmakoeconomik ölçümler ise bu etkinin maliyet, kaynak kullanımı ve sonuçlar açısından nasıl yorumlanacağını ortaya koymayı amaçlar. Eczacı tarafından yürütülen ilaç kullanım gözden geçirmeleri, tedaviye uyum izlemleri ve yan etki bildirim süreçleri, güvenilir veri tanımları olmadan anlamlı biçimde değerlendirilemez. Bu nedenle ölçüm zaman noktalarının, sonuç değişkenlerinin ve veri toplama araçlarının baştan açık biçimde tanımlanması gerekir (Husereau et al., 2022).

Örneğin bir kronik hastalık yönetim programında eczacı danışmanlığının etkisi inceleniyorsa, yalnızca ilaç maliyeti değil; acil başvuru sıklığı, tedaviye uyum, yan etki insidansı ve hasta memnuniyeti gibi çıktılar da uygun yöntemlerle ölçülmelidir. Aksi hâlde ekonomik yorumlar yüzeysel kalır. Gözlemsel tasarımlarda ise örnekleme yaklaşımı, kayıp veri yönetimi, yanlışlık kaynakları ve raporlama şeffaflığı açık biçimde belirtilmelidir (von Elm et al., 2007).

6.3. Envanter Kontrolü, Soğuk Zincir ve Depolama İzlemi

Envanter kontrolü, yalnızca stok miktarının sayılması değil; ürünün doğru yerde, doğru koşullarda, doğru sürede ve doğru kayıtlarla tutulduğunun doğrulanmasıdır. Bu nedenle sayıma dayalı ölçümler ile sıcaklık, nem, zaman ve son kullanma tarihi temelli izleme birlikte yürütülmelidir. Özellikle aşılarda, biyolojik ürünler ve sıcaklığa duyarlı ilaçlarda çevresel izlemin güvenilirliği doğrudan ürün kalitesiyle ilişkilidir (WHO, 2020; United States Pharmacopeia [USP], 2023).

Soğuk zincir yönetiminde yalnızca anlık sıcaklık değeri değil, ürünün maruz kaldığı toplam sıcaklık geçmişi önem taşır. Sensörün yerleşimi, kayıt sıklığı, alarm eşiği, elektrik kesintisi senaryoları ve ürünlerin raf içi dağılımını gerçek risk düzeyini belirler. Benzer şekilde stok farkı analizinde yalnızca “eksik” ya da “fazla” sayısı raporlamak yerine, farkın hangi ürün grubunda, hangi zaman aralığında ve hangi işlem adımıyla yoğunlaştığı araştırılmalıdır. Ölçüm bilimi yaklaşımı, envanter yönetimini salt muhasebe işlemi olmaktan çıkarıp kalite ve güvenlik sürecine dönüştürür.

6.4. Hasta Güvenliği ve Hata Azaltma Stratejileri

Hasta güvenliği, eczane hizmetlerinde ölçüm süreçlerinin nihai değerlendirme alanıdır. Doz, zamanlama, saklama, kimlik doğrulama ve uyarı yönetimi gibi ölçülebilir unsurlardaki küçük sapmalar bile hasta üzerinde ciddi etkilere yol açabilir. Bu nedenle güvenli eczane pratiği, bireysel dikkat kadar sistematik ölçüm güvenilirliğine de bağlıdır (WHO, 2017).

Etkili hata azaltma stratejileri; standart çalışma prosedürleri, çift kontrol uygulamaları, barkod doğrulama, kritik ilaç listeleri, görünüşü-benzer/sesi-benzer ilaçlara yönelik ayırtırma uygulamaları ve düzenli eğitim programlarıyla desteklenmelidir. Ancak bu araçların da etkisi ölçülmeli ve izlenmelidir. Örneğin çift kontrol uygulanıyor olması tek başına yeterli değildir; bu uygulamanın hata yakalama oranını ne ölçüde artırdığı, iş akışını nasıl etkilediği ve hangi aşamalarda zayıfladığı veriyile gösterilmelidir. Böylece hasta güvenliği söylemi, ölçülebilir kalite iyileştirmesine dönüşür.

7. VERİ YÖNETİMİ VE İSTATİSTİKSEL YAKLAŞIMLAR

Veri yönetimi, ölçüm sonucunun üretilmesi kadar saklanması, doğrulanması, bütünlüğünün korunması, analiz edilmesi ve raporlanmasını da kapsar. Güvenilir veri yönetimi olmadan doğru ölçüm sonucu bile yanlış karar üretilebilir. Eczane hizmetlerinde veri; kağıt kayıtlar, yazılım sistemleri, barkod akışları, sensör kayıtları ve hasta görüşme formlarından gelebilir. Bu nedenle veri kalitesinin sağlanması, ölçüm kalitesinin doğal devamıdır.

7.1. Veri Kalitesi, Temsil Gücü ve Örneklem Tasarımı

Veri kalitesi; doğruluk, bütünlük, tutarlılık, zamanlılık ve izlenebilirlik bileşenleri üzerinden değerlendirilmelidir. Eczane hizmetlerinde veri giriş hataları, eksik kayıt, yinelenen kayıt veya geç güncelleme gibi sorunlar istatistiksel sonuçların güvenilirliğini doğrudan zedeler. Özellikle hizmet değerlendirme çalışmalarında hangi verinin birincil kaynak, hangisinin ikincil doğrulama kaynağı olduğu baştan tanımlanmalıdır.

Örneklem tasarımı da aynı derecede önemlidir. Belirli bir dönemde yalnızca belirli saatlerde toplanan reçete verileri, günün geri kalanını temsil etmeyebilir; yalnızca belirli hasta gruplarına ait verilerle yapılan değerlendirme

ise hizmetin geneline genellenemez. Bu nedenle eczane araştırmalarında veri toplama zamanının, örnekleme çerçevesinin ve dışlama nedenlerinin açıkça raporlanması gerekir (von Elm et al., 2007).

7.2. İstatistiksel Analiz: Tanımlayıcı, Karşılaştırmalı ve Süreç İzleme Yaklaşımları

İstatistiksel analiz, ölçüm verilerini yalnızca betimlemek için değil; farkları, eğilimleri ve ilişkileri anlamlandırmak için kullanılır. Ortalama, medyan, standart sapma ve güven aralığı gibi tanımlayıcı ölçütler ilk adımı oluşturur; ancak eczane hizmetlerinde süreç iyileştirme için çoğu zaman karşılaştırmalı ve zaman temelli analizlere de ihtiyaç vardır.

Örneğin müdahale öncesi ve sonrası hata oranlarının karşılaştırılması, belirli bir eğitim programının reçete doğrulama performansına etkisini gösterebilir. Zaman serisi incelemeleri ve kontrol grafikleri, stok farklarının ya da sıcaklık sapmalarının süreç içinde yapısal biçimde değişip değişmediğini ortaya koyabilir. Regresyon modelleri ise çoklu etkenlerin aynı anda değerlendirildiği durumlarda anlamlıdır. Bununla birlikte, yöntem seçimi veri yapısına uygun olmalı; istatistiksel anlamlılık ile klinik veya operasyonel önem birbirine karıştırılmamalıdır.

7.3. Raporlama, Şeffaflık ve Veri Bütünlüğü

Raporlama, ölçüm sonucunun paydaşlarla nasıl paylaşıldığını belirlediği için bilimsel ve mesleki güvenilirliğin temel unsurudur. Kullanılan yöntem, kabul kriterleri, dışlanan veriler, sapmalar, sınırlılıklar ve belirsizlik kaynakları açık biçimde belirtilmeden sunulan sonuçlar yanıltıcı olabilir. Özellikle dijital kayıt sistemlerinde veri bütünlüğü, sonradan izlenebilirlik ve yetkisiz değişikliklere karşı koruma büyük önem taşır.

Bu bağlamda eczane hizmetlerinde yalnızca sonuçların değil, sonuca götüren veri zincirinin de korunması gerekir. Gözlemsel araştırmalarda STROBE ilkeleri; farmakoekonomik değerlendirmelerde ise CHEERS 2022 çerçevesi, raporlama kalitesini güçlendirmek için yararlı rehberler sunar (Husereau et al., 2022; von Elm et al., 2007). Bu rehberlerin kullanımı, çalışmanın yalnızca yayınlanabilirliğini değil; yorumlanabilirliğini ve yeniden değerlendirilebilirliğini de artırır.

8. REGÜLASYONLAR, STANDARTLAR VE ETİK HUSUSLAR

Eczane hizmetlerinde ölçüm uygulamaları; kalite standartları, mesleki rehberler ve düzenleyici beklentilerle uyumlu yürütülmelidir. Kalibrasyon, doğrulama, kayıt tutma, saklama koşullarının izlenmesi, sapma yönetimi ve hasta güvenliği uygulamaları bu çerçevede değerlendirilir. Özellikle iyi eczacılık uygulamaları ve iyi depolama-dağıtım uygulamaları, ölçüm süreçlerinin mesleki hizmet kalitesiyle doğrudan ilişkisini ortaya koymaktadır (WHO, 2011, 2020).

Etik açıdan bakıldığında doğruluk, şeffaflık, izlenebilirlik, mahremiyet ve sorumluluk ilkeleri birlikte korunmalıdır. Yetkisiz veri değişikliği, eksik raporlama, sıcaklık sapmalarının gizlenmesi ya da klinik açıdan anlamlı uyarıların sistematik biçimde göz ardı edilmesi yalnızca teknik kusur değil, etik ihlal niteliği de taşır. Bu nedenle ölçüm bilimi, eczane hizmetlerinde regülasyon ile mesleki etik arasında köprü kuran bir işlev görür.

9. GELECEĞE YÖNELİK GELİŞMELER VE ARAŞTIRMA ALANLARI

Ölçüm biliminin eczane hizmetlerindeki geleceği; dijital izleme sistemleri, nesnelerin interneti tabanlı sensörler, barkod ve RFID entegrasyonu, klinik karar destek yazılımları ve yapay zekâ temelli risk tahmin modelleri ile şekillenmektedir. Ancak bu teknolojilerin değeri yalnızca yenilikçi olmalarında değil, güvenilir biçimde doğrulanmalarında yatar. Ölçüm sistemine yeni teknoloji eklemek, belirsizliği kendiliğinden azaltmaz; aksine yanlış yapılandırılmış sistemlerde yeni hata türleri doğurabilir.

Örneğin yapay zekâ tabanlı bir etkileşim uyarı sistemi teorik olarak yüksek duyarlılık sunsa da eğitim verisinin niteliği, açıklanabilirlik düzeyi, yanlış pozitif oranı ve kullanıcı iş akışına etkisi değerlendirilmeden güvenilir kabul edilemez. Aynı şekilde akıllı sensörlerle desteklenen soğuk zincir takibi, sensör validasyonu, veri aktarım güvenliği ve alarm yönetimi ile birlikte düşünülmelidir. Bu nedenle gelecek araştırmaların teknolojik potansiyel kadar doğrulama stratejileri, veri yönetimi, etik kullanım ve maliyet-etkinlik boyutlarını da birlikte tartışması gerekir.

Araştırma açısından bir diğer gereksinim, eczane hizmetlerine özgü performans göstergelerinin standartlaştırılmasıdır. Hata yakalama oranı, klinik açıdan anlamlı uyarı oranı, alarm yorgunluğu düzeyi, sıcaklık sapmalarının ürün bazlı etkisi ve stok farklarının kök neden dağılımı gibi göstergeler ortak tanımlarla raporlandığında alan içi karşılaştırmalar daha güçlü hâle gelecektir.

10. SONUÇ

Ölçüm bilimi, eczane hizmetlerinde teknik doğruluk ile hasta güvenliği arasındaki ilişkiyi görünür kılan temel bir kuramsal ve uygulamalı çerçevedir. Kalibrasyon, izlenebilirlik, doğruluk, kesinlik, ölçüm belirsizliği, hata analizi ve veri bütünlüğü gibi kavramlar; eczane pratiğinde reçete doğrulamadan soğuk zincir yönetimine, majistral hazırlamadan farmakoeconomik değerlendirmeye kadar uzanan geniş bir etki alanına sahiptir.

Bu bölümün gözden geçirilmiş hâli, ölçüm biliminin eczane hizmetlerinde yalnızca genel bir kalite söylemi üretmediğini; somut süreçler, somut riskler ve somut iyileştirme araçları sunduğunu ortaya koymaktadır. Güvenilir eczane hizmeti, doğru cihaz ve doğru yazılım kullanımından daha fazlasını gerektirir: doğru prosedür, doğru veri yorumu, doğru raporlama kültürü

ve sürekli gözden geçirmeyi zorunlu kılar. Dolayısıyla ölçüm biliminin etkin kullanımı, eczane hizmetlerinde teknik yeterlilikten operasyonel güvenilirliğe ve etik sorumluluğa uzanan bütüncül bir kalite güvencesi yaklaşımı anlamına gelir.

Gelecekte bu alanın daha da güçlenmesi için, eczane hizmetlerine özgü ölçüm göstergelerinin standardize edilmesi, dijital sistemlerin doğrulama çerçevelerinin netleştirilmesi ve hizmet araştırmalarında daha şeffaf raporlama kültürünün yaygınlaştırılması gerekmektedir. Böyle bir yaklaşım, eczacılık hizmetlerinin yalnızca daha verimli değil, aynı zamanda daha güvenli, karşılaştırılabilir ve bilimsel olarak daha savunulabilir hâle gelmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Taylor, B. N., & Kuyatt, C. E. (1994). Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results (NIST Technical Note 1297). National Institute of Standards and Technology. <https://www.nist.gov/pml/nist-technical-note-1297>
- Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008). BIPM. https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf
- Joint Committee for Guides in Metrology. (2012). International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (3rd ed., JCGM 200:2012). BIPM. https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_200_2012.pdf
- Eurachem. (2022). Quantifying uncertainty in analytical measurement (2022 reprint of the 1995 first ed.). Eurachem. https://eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/QUAM95_2022.pdf
- International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use. (2023). ICH Q2(R2): Validation of analytical procedures. https://database.ich.org/sites/default/files/ICH_Q2%28R2%29_Guideline_2023_1130.pdf
- U.S. Food and Drug Administration. (2018). Bioanalytical method validation: Guidance for industry. <https://www.fda.gov/files/drugs/published/Bioanalytical-Method-Validation-Guidance-for-Industry.pdf>
- World Health Organization. (2011). Joint FIP/WHO guidelines on good pharmacy practice: Standards for quality of pharmacy services. In WHO technical report series (No. 961, Annex 8). <https://www.who.int/publications/m/item/annex-8-trs-961>
- World Health Organization. (2017). Medication without harm: WHO global patient safety challenge. <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-HIS-SDS-2017.6>
- World Health Organization. (2020). Good storage and distribution practices for medical products. In WHO technical report series (No. 1025, Annex 7). <https://www.who.int/publications/m/item/trs-1025-annex-7>
- Institute for Safe Medication Practices. (2023). ISMP targeted medication safety best practices for community pharmacy: 2023-2024. https://www.ismp.org/system/files/resources/2023-03/ISMP_TargetedMedicationSafetyBestPractices_CommunityPharmacy_031523B_MS5210%20%281%29.pdf
- Husereau, D., Drummond, M., Augustovski, F., de Bekker-Grob, E., Briggs, A. H., Carswell, C., Caulley, L., Chaiyakunapruk, N., Greenberg, D., Loder, E., Mauskopf, J., Mullins, C. D., Petrou, S., Pwu, R.-F., Staniszewska, S., & CHEERS 2022 ISPOR Good Research Practices Task Force. (2022). Consolidated Health Economic Evaluation Reporting Standards 2022 (CHEERS 2022) statement: Up-

dated reporting guidance for health economic evaluations. *BMJ*, 376, e067975. <https://doi.org/10.1136/bmj-2021-067975>

von Elm, E., Altman, D. G., Egger, M., Pocock, S. J., Gøtzsche, P. C., & Vandenbroucke, J. P. (2007). The Strengthening of Reporting of Observational Studies in Epidemiology (STROBE) statement: Guidelines for reporting observational studies. *PLoS Medicine*, 4(10), e296. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0040296>

United States Pharmacopeia. (2023). <1079> Risks and mitigation strategies for the storage and transportation of finished drug products. USP-NF. https://doi.org/10.31003/USPNF_M99798_05_01