

MÜHENDİSLİK

ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE DEĞERLENDİRMELER



EDİTÖRLER

Prof. Dr. Selahattin BARDAK - Doç. Dr. Hilmi ZENK

ARALIK 2025

YAYIN KODU

gece
kitaplığı

İmtiyaz Sahibi / Yaşar Hız
Yayına Hazırlayan / Gece Kitaplığı

Birinci Basım / Aralık 2025 - Ankara
ISBN / 978-625-8570-36-6

© copyright

Bu kitabın tüm yayın hakları Gece Kitaplığı'na aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Gece Kitaplığı

Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak
Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA
0312 384 80 40
www.gecekitapligi.com / gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt

Bizim Büro
Sertifika No: 42488

**MÜHENDİSLİK
ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE
DEĞERLENDİRMELER**

ARALIK 2025

EDİTÖRLER

Prof. Dr. Selahattin BARDAK

Doç. Dr. Hilmi ZENK

gece
kitaplığı

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

TEKNOLOJİK VE İNSAN KAYNAKLI AFETLER VE BU AFETLERİN YÖNETİMİ

Merve ŞAHİN , Dilek ÖZTAŞ , Ahmet ÇARHAN7

BÖLÜM 2

MASABAŞI ACİL DURUM TATBİKATLARI

Enes KAŞIKÇI, Dilek ÖZTAŞ19

BÖLÜM 3

YANGIN TÜRLERİ VE KULLANILAN MADDELER

Mehmet Anıl BİLTEKİN , Dilek ÖZTAŞ ,Güven ÇANKAYA37

BÖLÜM 4

DEPREMLERE MÜDAHALE VE ARAMA-KURTARMA ÇALIŞMALARI: STRATEJİLER, KAPASİTE VE ULUSAL-ULUSLARARASI PERSPEKTİF

Yunus ÇİÇEK, Güven ÇANKAYA, Dilek ÖZTAŞ51

BÖLÜM 5

GIDA ZEHİRLENMELERİ BOTULİZM; İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ AÇISINDAN ÖNEMİ

Erol ÖZCAN , Dilek ÖZTAŞ , Güven ÇANKAYA61

BÖLÜM 6

TİTANYUM ESASLI BİYOMALZEMELERDE AFM UYGULAMALARI İÇİN BİR DEĞERLENDİRME

Pınar UYAN69

BÖLÜM 7

BİYOKÜTLEYE GENEL BAKIŞ

Betül ÇELİK , Nesrin DURSUN77

BÖLÜM 8

21. YÜZYILIN EN BÜYÜK TEHDİDİ: İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ

Abdullah YİNANÇ89

BÖLÜM 9

DEPREM SONRASI TOPLANMA ALANLARININ TOPSIS YÖNTEMİ İLE SIRALANMASI

Seda ERBAYRAK, Duygu TUYLU105

BÖLÜM 10

ARM TABANLI MİKRODENETLEYİCİ İLE ULTRASONİK SENSÖR DESTEKLİ OTONOM ENGELDEN KAÇMA YETENEĞİNE SAHİP QUADCOPTER İNSANSIZ HAVA ARACININ TASARIMI VE KONTROLÜ

Mustafa BİLİM, Beytullah BOZALI117

BÖLÜM 1

TEKNOLOJİK VE İNSAN KAYNAKLI AFETLER VE BU AFETLERİN YÖNETİMİ

Merve ŞAHİN¹ , Dilek ÖZTAŞ² , Ahmet ÇARHAN³

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt University, Institute of Science, CBRN (Chemical, Biological, Radiological and Nuclear) Threats and Management, ANKARA ORCID: 0009-0006-2964-2842

² Prof. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt University, Medical Faculty, Department of Public Health ANKARA ORCID: 0000-0002-8687-7238

³ Prof. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt University, Medical Faculty, Department of Radiology, ANKARA ORCID: 0000-0003-1584-0072

1. GİRİŞ

Günümüzde afetler yalnızca doğa olaylarından ibaret değildir; teknolojik gelişmelerin karmaşıklığı ve insan faaliyetlerinin artan etkisi, afetlerin niteliğini kökten değiştirmiştir. Teknolojik ve insan kaynaklı afetler, modern toplumların karşı karşıya kaldığı en karmaşık kriz türlerinden biri hâline gelmiştir. Bu afetler yalnızca fiziksel hasara yol açmakla kalmaz, aynı zamanda ekonomik, çevresel ve sosyal sistemlerde zincirleme etkiler yaratarak toplumsal kırılganlıkları derinleştirir (Clark-Ginsberg ve ark., 2021). Örneğin, 2021 yılında ABD’nin Teksas eyaletinde yaşanan enerji kesintisi, hem iklimsel hem de teknolojik faktörlerin etkileşiminin yol açtığı zincirleme bir afet olarak literatüre geçmiştir. Bu olay, COVID-19 pandemisinin yarattığı sistem baskısıyla birleşerek teknolojik sistemlerin birbirine bağımlılığını gözler önüne sermiştir.

Teknolojik sistemlerin karmaşıklığı arttıkça, afet risklerinin oluşumu, yayılımı ve yönetimi de çok boyutlu hâle gelmiştir. Dijitalleşme, büyük veri ve dijital ikiz teknolojileri gibi yenilikler, afet yönetimi süreçlerinde önemli fırsatlar sunarken, aynı zamanda yeni risk alanları da yaratmaktadır (Yu & He, 2022; Pouresmaeil ve ark., 2025). Özellikle dijital ikiz tabanlı afet önleme yaklaşımları, altyapı sistemlerinin gerçek zamanlı izlenmesine olanak sağlarken; yapay zekâ destekli analiz yöntemleri, karar verme süreçlerinde hız ve doğruluk kazandırmaktadır. Bununla birlikte, bu teknolojilerin hatalı ya da önyargılı kullanımı, afet yönetimini kolaylaştırmak yerine “akıllı felaketler” olarak adlandırılan yeni tür risklerin doğmasına yol açabilmektedir (Pouresmaeil ve ark., 2025).

Son yıllarda yapılan araştırmalar, afet yönetimi sistemlerinin dijital dönüşüm sürecinde çok boyutlu bir paradigma değişimi yaşadığını göstermektedir. Khan ve ark. (2023) tarafından yürütülen kapsamlı bir inceleme, afet yönetimi sistemlerinin evriminde veri yönetimi, karar destek sistemleri ve sensör teknolojilerinin merkezi bir rol oynadığını vurgulamıştır. Öte yandan, sosyal medya ve insan hareketliliği gibi yeni veri kaynakları, afet anında hızlı bilgi toplama ve hasar tespiti açısından benzersiz fırsatlar sunmaktadır (Imran ve ark., 2020; Wiegmann ve ark., 2021; Ubaldi ve ark., 2021). Bu yeni veri ekosistemleri, insan-makine işbirliğini güçlendirirken, etik ve güvenlik konularında da yeni tartışmalar doğurmaktadır.

Ayrıca, dijital sağlık teknolojileri de afet yönetiminin önemli bir parçası hâline gelmiştir. Lokmic-Tomkins ve ark. (2023), doğal afetlerin ardından sağlık hizmeti sunumunda dijital sistemlerin oynadığı rolü incelemiş ve bu teknolojilerin afet sonrası hizmet sürekliliği sağladığını ortaya koymuştur. Bu durum, özellikle pandemi gibi küresel krizler sırasında, dijital sağlık uygulamalarının afet yönetimiyle entegrasyonunun önemini pekiştirmiştir.

Teknolojik afetlerin artışı, aynı zamanda insan faktörünün önemini de yeniden gündeme getirmiştir. İnsan kaynaklı hatalar, sistemsel tasarım eksiklikleri veya yetersiz risk yönetimi uygulamaları, teknolojik afetlerin temel nedenleri arasında yer almaktadır. “Information Technologies and Disaster Management” (2019) başlıklı çalışmada, bilgi teknolojilerinin afet yönetimine entegrasyonu sırasında karşılaşılan kurumsal ve etik sorunlar ele alınmış; teknolojiye bağımlılığın kriz anlarında yeni tür kırılganlıklar yaratabileceği vurgulanmıştır.

Sonuç olarak, günümüz afet yönetimi anlayışı, yalnızca fiziksel hasarların azaltılması değil, aynı zamanda sistemsel dirençliliğin artırılması üzerine odaklanmaktadır. Bu bağlamda çalışmanın amacı, teknolojik ve insan kaynaklı afetlerin doğasını, bu afetlerin yönetiminde dijital teknolojilerin rolünü ve bu teknolojilerin beraberinde getirdiği yeni riskleri literatür temelli bir çerçevede incelemektir. Çalışma ayrıca, yapay zekâ, dijital ikizler, sosyal media verileri ve insansız hava araçları gibi yeni teknolojilerin afet yönetimine katkılarını değerlendirirken, bu teknolojilerin yol açabileceği ahlaki, güvenliksel ve yönetişimsel sorunlara da dikkat çekmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Teknolojik Afetlerin Kavramsal Temelleri ve Risk Oluşumu

Teknolojik afetler, doğal afetlerden farklı olarak insan müdahalesi sonucu ortaya çıkan, teknolojik sistemlerin arızalanması, enerji altyapısının çökmesi veya dijital sistemlerdeki hatalar gibi nedenlerle oluşan krizlerdir. Clark-Ginsberg ve ark. (2021), büyük teknolojik sistemlerin doğasında yer alan karmaşık bağımlılık ilişkilerinin, afet risklerinin “kademeli olarak yaratıldığı” (risk creation) süreçleri doğruladığını belirtmektedir. Yazarlar, COVID-19 pandemisiyle eş zamanlı yaşanan 2021 Teksas enerji kesintisini analiz ederek, sağlık, enerji ve ulaştırma sistemleri arasında birbirini tetikleyen bir zincirleme afet mekanizması tanımlamışlardır. Bu tür olaylar, modern toplumlarda sistemsel kırılganlıkların sadece doğal değil, teknolojik etmenlerle de büyüdüğünü göstermektedir.

Aynı doğrultuda, “Information Technologies and Disaster Management – Benefits and Issues” (2019) başlıklı çalışmada, bilgi teknolojilerinin afet yönetimi sürecine sağladığı avantajların yanı sıra bilişimsel bağımlılıklar ve etik ihlaller gibi yeni risklerin ortaya çıktığı vurgulanmıştır.

Özellikle bulut tabanlı veri sistemlerinin, kriz anlarında erişim sorunları veya siber saldırılar nedeniyle işlevsiz hale gelmesi, dijitalleşmenin güvenlik açmazını gözler önüne sermektedir. Bu durum, afet yönetiminde teknolojiye aşırı bağımlılığın, sistemsel dayanıklılığı artırmak yerine zayıflatabileceği yönünde eleştiriler doğurmuştur.

2.2. Dijital İkiz Teknolojileri ve Akıllı Afet Önleme Yaklaşımları

Son yıllarda dijital ikiz teknolojileri, afet önleme ve dayanıklılık planlamasında dönüştürücü bir araç olarak öne çıkmıştır. Yu ve He (2022), dijital ikiz tabanlı afet önleme ve azaltma sistemlerini inceleyerek bu teknolojilerin fiziksel altyapıların sanal kopyalarını oluşturarak risk senaryolarının simülasyonunu mümkün kıldığını ortaya koymuştur. Dijital ikizler, altyapıların stres testlerini dijital ortamda yapmaya olanak tanıdığı için, afet öncesi müdahale planlarının daha veriye dayalı hale gelmesini sağlamaktadır. Ancak yazarlar, bu sistemlerin başarılı olabilmesi için sensör verilerinin doğruluğu, yapay zekâ modellerinin güvenilirliği ve kurumlar arası veri paylaşımının şeffaf olması gerektiğini vurgulamıştır.

Pouresmaeil, Afroogh ve Jiao (2025) ise, dijitalleşmenin afet yönetiminde yalnızca çözüm değil, aynı zamanda yeni bir risk alanı da oluşturabileceğine dikkat çekmektedir. Araştırmacılar, yapay zekâ sistemlerinin hatalı tahminleri, algoritmik önyargılar veya kötüye kullanım durumlarında “AI-caused disasters” (yapay zekâ kaynaklı afetler) olarak nitelendirilebilecek krizlerin doğabileceğini ifade etmişlerdir. Bu bağlamda, dijital afet yönetiminin etik denetim ve güvenlik standartlarıyla desteklenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

2.3. Afet Yönetiminde Büyük Veri, Sosyal Medya ve İnsan Hareketliliği

Veri odaklı afet yönetimi literatürde giderek daha fazla ilgi görmektedir. Wiegmann ve ark. (2021), sosyal medyadan elde edilen afet verilerinin kriz anlarında bilgi toplama aracı olarak kullanımını sistematik biçimde incelemiştir. Araştırmaya göre, sosyal medya verileri olayın coğrafi kapsamını, yardım ihtiyaçlarını ve kamu duyarlılığını hızlı şekilde ortaya koyabilmektedir. Ancak verinin doğrulanabilirliği ve yanlış bilgi yayılımı, afet yönetiminde ciddi bir zorluk olarak öne çıkmaktadır.

Benzer şekilde, Imran ve ark. (2020), insan zekâsı ve makine öğrenmesini birleştirerek sosyal medya görüntülerinden hızlı hasar tespiti yapmaya olanak tanıyan bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu sistem, kriz bölgelerinde yardım önceliklerinin belirlenmesini kolaylaştırmış; ancak verinin etik kullanımı ve gizlilik konuları tartışma yaratmıştır. Ubaldi ve ark. (2021) tarafından geliştirilen Mobilkit adlı açık

kaynaklı Python aracı ise, yüksek frekanslı insan hareketliliği verilerini kullanarak afet sonrası şehir içi hareket kalıplarını analiz etmeyi mümkün kılmıştır. Bu tür araçlar, şehir planlaması ve afet sonrası tahliye yönetimi için önemli bir bilgi kaynağı haline gelmiştir.

2.4. İnsansız Hava Araçları ve Görüntü Tabanlı Afet İzleme

Afet izleme alanında insansız hava araçları (İHA) ve derin öğrenme tabanlı görüntü işleme yöntemleri kritik önem kazanmıştır. Kamilaris ve Prenafeta-Boldú (2018), İHA'ların afet bölgelerinde hızlı ve güvenli veri toplama kapasitesine sahip olduğunu, derin öğrenme algoritmalarının ise bu verilerden anlamlı bilgi çıkarımını sağladığını belirtmiştir. Benzer biçimde, Gupta, Watson ve Yin (2020), açık veri setleriyle entegre edilen derin öğrenme tabanlı görüntü segmentasyonu modellerinin afet hasar değerlendirmesinde doğruluk oranını artırdığını göstermiştir. Bu teknolojiler, afet sonrası otomatik hasar haritalama sistemlerinin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır.

2.5. Dijital Sağlık ve Afet Yönetimi Entegrasyonu

Lokmic-Tomkins ve ark. (2023), doğal afetlerin ardından dijital sağlık teknolojilerinin sağlık hizmeti sürekliliğini sağlamadaki rolünü incelemiştir. Çalışma, uzaktan muayene sistemleri, tele-sağlık ve dijital kayıtların afet sonrası sağlık sisteminin yeniden inşasında merkezi rol oynadığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, dijital sağlık sistemlerinin altyapı bağımlılığı, afet sırasında enerji veya internet kesintilerinde hizmet sürekliliğini zorlaştırmaktadır. Bu durum, afet yönetiminde çok katmanlı yedekleme ve siber güvenlik stratejilerinin gerekliliğini göstermektedir.

2.6. Afet Yönetimi Sistemleri Üzerine Sistemik İncelemeler

Khan ve ark. (2023), afet yönetimi sistemlerine ilişkin 160'tan fazla çalışmayı inceleyerek mevcut yaklaşımları sınıflandırmıştır. Sonuçlara göre, afet yönetimi sistemleri genellikle dört ana eksende değerlendirilmektedir: (1) karar destek sistemleri, (2) bilgi yönetimi altyapıları, (3) coğrafi bilgi sistemleri (CBS) entegrasyonu, (4) toplumsal katılım ve paydaş koordinasyonu. Çalışma, bu sistemlerin etkinliğini artırmak için yapay zekâ ve IoT tabanlı altyapıların entegre edilmesi gerektiğini belirtmiştir.

“Managing Natural Disasters: An Analysis of Technological Advancements” (2023) başlıklı çalışmada ise, IoT tabanlı sensörlerin afet öncesi erken uyarı sistemlerinde kullanımı, ağ bağlantılı cihazların veri paylaşımı yoluyla risk azaltma süreçlerine katkısı ve siber-fiziksel sistemlerin (CPS) afet dinamiklerini anlama konusundaki avantajları tartışılmıştır. Bununla birlikte, cihaz güvenliği, enerji tüketimi ve veri mahremiyeti hâlâ çözülmemiş temel sorunlardır.

2.7. Uluslararası Yaklaşımlar ve Toplumsal Perspektifler

Springer tarafından yayımlanan International Journal of Disaster Risk Science dergisindeki çalışmalar, afet yönetiminin uluslararası boyutuna ışık tutmaktadır. “Distributed Simulation Platforms and Data Passing Tools for Natural Hazards Engineering” (2021) çalışmasında, doğal afet mühendisliği alanında dağıtılmış simülasyon platformlarının geliştirilmesi önerilmiştir. Bu platformlar, farklı kurumların afet senaryolarını ortak veri setleri üzerinden test etmesini sağlayarak ortak risk bilinci oluşturmaya hedeflemektedir. Aynı derginin aynı sayısında yer alan “Decision Making for Managing Community Flood Risks” (2021) makalesi ise, ABD'deki sel yönetimi uygulamalarında topluluk temelli karar süreçlerinin önemine dikkat çekmiştir. Bu yaklaşım, afet yönetiminin sadece teknolojik değil, aynı zamanda sosyoteknik bir sistem olduğunu vurgulamaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Teknolojik Afetlerin Türleri ve Etki Alanları

Teknolojik afetler, insan eliyle geliştirilen sistemlerin kontrol dışı kalması sonucu ortaya çıkan olaylardır. Bu afetler çoğunlukla endüstriyel kazalar, enerji üretim tesislerindeki arızalar, ulaşım sistemlerindeki çöküşler, kimyasal sızıntılar, patlamalar ve bilgi sistemlerine yönelik siber saldırılar şeklinde görülür. Özellikle enerji, ulaşım ve savunma sanayii gibi stratejik sektörlerde meydana gelen kazalar, yalnızca ekonomik değil; çevresel ve sosyopolitik boyutlarıyla da büyük etkiler yaratmaktadır.

Endüstriyel alanlarda yaşanan kimyasal sızıntılar, yangınlar ve patlamalar da teknolojik afetler kapsamında değerlendirilmektedir. 2020 yılında Beyrut Limanı'ndaki amonyum nitrat patlaması, 200'den fazla kişinin ölümüne, binlerce kişinin yaralanmasına ve ülkenin ekonomik yapısının çökmesine neden olmuştur. Bu olay, afet risk yönetiminde denetim eksikliğinin ve kurumsal ihmallerin sonuçlarını açıkça göstermiştir.

3.2. Teknolojik ve İnsan Kaynaklı Afetlerin Ortak Özellikleri

Literatürdeki bulgular, teknolojik ve insan kaynaklı afetlerin doğasının, klasik doğal afetlerden belirgin biçimde ayrıldığını göstermektedir. Bu afet türleri, çoğunlukla karmaşık sosyo-teknik sistemlerin kırılganlıklarından kaynaklanmaktadır (Clark-Ginsberg ve ark., 2021). Örneğin, enerji altyapılarındaki zincirleme arızalar veya ulaşım ağlarında yaşanan sistemsel çökmeler, başlangıçta küçük bir teknik hatadan doğsa bile geniş ölçekli toplumsal krizlere dönüşebilmektedir. Bu nedenle teknolojik afetlerin temel özelliği, “zincirleme etkiler” ve çoklu bağımlılıklar üzerinden gelişmesidir.

1986'daki Çernobil Nükleer Felaketi, çevresel ve sağlık temelli sonuçlarıyla teknolojik afetlerin küresel boyutunu göstermiştir. Aynı şekilde 2011'de Japonya'daki Fukuşima Daiichi Nükleer Santrali kazası, doğal bir afetin (deprem ve tsunami) tetiklediği teknolojik bir felaket olarak “karma afet” (complex disaster) örneğini oluşturmuştur. Bu olaylar, teknolojik sistemlerin doğa olayları karşısındaki kırılganlığını ve “insan faktörünün” kriz yönetimindeki belirleyici rolünü bir kez daha ortaya koymuştur (UNDRR, 2023).

Bulgular ayrıca insan faktörünün bu afetlerin merkezinde yer aldığını göstermektedir. Khan ve ark. (2023), insan kaynaklı afetlerin genellikle yetersizlik, planlama hatası veya ihmal sonucu ortaya çıktığını vurgulamaktadır. Bu durum, yalnızca teknik hatalarla değil, aynı zamanda örgütsel karar süreçleri, kurumsal iletişim eksiklikleri ve risk kültürünün zayıflığıyla ilişkilidir. Dolayısıyla afetlerin önlenmesi kadar, insan davranışlarının yönetilmesi de afet politikalarının bir parçası olmalıdır.

3.3. İnsan Kaynaklı Afetlerin Psiko-Sosyal ve Ekonomik Etkileri

İnsan kaynaklı afetler, yalnızca fiziksel hasar değil; uzun vadeli psiko-sosyal travmalar da yaratır. Örneğin, büyük endüstriyel kazalardan etkilenen topluluklarda güven kaybı, toplumsal travma, yerinden edilme ve sosyal çözülme gibi sonuçlar sıkça gözlemlenmektedir. Ekonomik anlamda ise üretim kayıpları, işsizlik ve tedarik zincirlerinde uzun süreli aksaklıklar meydana gelir.

Sanayi devriminden itibaren artan otomasyon, üretim hızı ve kimyasal kullanımı, bu tür afetlerin hem sıklığını hem de şiddetini artırmıştır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde altyapı yetersizlikleri, eğitim eksiklikleri ve denetim zafiyetleri, insan kaynaklı afetlerin etkilerini büyütmektedir. Türkiye özelinde incelendiğinde, Erzincan, Kocaeli ve Sakarya gibi sanayi bölgelerinde yaşanan yangınlar ve

kimyasal sızıntılar, afet yönetim mekanizmalarının hâlâ geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir (AFAD, 2024).

3.4. Bilgi Yönetimi ve Kurumsal Dayanıklılık

Bilgi yönetimi, afetlerin etkilerini azaltmada merkezi bir role sahiptir. “Information Technologies and Disaster Management” (2019) adlı çalışma, bilgi sistemlerinin kriz öncesi, sırası ve sonrasında alınan kararların kalitesini belirlediğini vurgulamaktadır. Ancak aynı çalışma, bilgi akışının fazla merkezileştiği ortamlarda iletişim kopukluklarının ortaya çıktığını ve bu durumun afet müdahale kapasitesini azalttığını göstermektedir. Dolayısıyla bulgular, bilgi paylaşımının yatay ve çok paydaşlı bir yapıda yürütülmesinin kurumsal dayanıklılığı artırdığını ortaya koymaktadır.

Benzer şekilde, International Journal of Disaster Risk Science dergisinde yayımlanan “Distributed Simulation Platforms and Data Passing Tools for Natural Hazards Engineering” (2021) çalışması, farklı kurumlar arasında veri alışverişinin standardize edilmediği durumlarda afet yönetiminin parçalı bir hâl aldığını ve bu durumun kaynak israfına yol açtığını bildirmiştir. Çalışmanın sonuçları, afet yönetiminde kurumlar arası senkronizasyon ve veri standardizasyonu politikalarının geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Afet anında bilgi akışının doğruluğu, müdahale başarısının en kritik bileşenlerinden biridir. Ancak geçmiş olaylar, kriz dönemlerinde yanlış veya eksik bilgi paylaşımının panik, yanlış yönlendirme ve koordinasyon eksikliğine neden olduğunu göstermiştir. Özellikle sosyal medya üzerinden yayılan yanlış bilgilerin kontrol altına alınamaması, kriz yönetimini zorlaştırmaktadır.

Bu noktada afet yönetimi kurumlarının, sadece teknik değil, psikososyal iletişim boyutunu da güçlendirmesi gerekmektedir. Kriz anında halkın doğru bilgilendirilmesi, güven inşası ve sosyal dayanıklılığı artırılması açısından büyük önem taşır.

3.5. Afet Yönetimi Süreçlerinde Kurumsal Kapasite ve Mevzuat Analizi

Afet yönetimi yalnızca acil müdahaleden ibaret değildir; risk azaltma, hazırlık, müdahale ve iyileştirme evrelerinin tamamını kapsayan bir döngüsel süreçtir. Türkiye’de 2009 yılında kurulan Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), bu süreçlerin bütünlüklü yürütülmesini sağlamak amacıyla oluşturulmuştur. Bununla birlikte, teknolojik ve insan kaynaklı afetlerin önlenmesi açısından mevzuat düzeyinde bazı eksiklikler devam etmektedir.

Örneğin, Kimyasal, Biyolojik, Radyolojik ve Nükleer (KBRN) tehditlere yönelik ulusal eylem planları henüz tam anlamıyla uygulanabilir düzeyde değildir. Ayrıca özel sektörün afet risk yönetimi konusunda zorunlu hale getirilmiş denetim mekanizmalarına yeterince entegre olmadığı görülmektedir. Bu da sanayi bölgelerinde risklerin “potansiyel felaket” boyutuna taşınmasına neden olmaktadır.

3.6. Toplumsal Katılım ve Yerel Bilginin Önemi

Afet yönetiminin yalnızca teknik bir faaliyet değil, aynı zamanda toplumsal bir süreç olduğu literatürde sıkça vurgulanmıştır. “Decision Making for Managing Community Flood Risks” (2021) adlı çalışma, topluluk temelli afet yönetimi yaklaşımlarının, özellikle sel riski altındaki bölgelerde dayanıklılığı artırdığını ortaya koymuştur. Araştırmada, ABD’deki sel yöneticilerinin, karar alma süreçlerinde yerel halkı ve sivil toplum kuruluşlarını daha etkin biçimde sürece dahil etmesinin, alınan kararların sahadaki karşılığını güçlendirdiği belirtilmiştir.

Bu bulgu, Türkiye gibi merkeziyetçi afet yönetimi geleneğine sahip ülkelerde de önemli bir mesaj taşımaktadır. Toplum temelli risk değerlendirmeleri, yalnızca teknik verilere değil, yerel bilgiye ve kültürel deneyimlere de dayanmalıdır. Wiegmann ve ark. (2021) tarafından yürütülen sistematik inceleme de bu sonucu desteklemektedir: Sosyal medya üzerinden toplanan yerel bilgiler, afetin dinamiklerine dair erken uyarı niteliği taşıyabilir. Ancak bu verilerin doğrulanması ve resmî sistemlerle bütünleştirilmesi gerekmektedir.

3.7. Uluslararası Afet Yönetim Modelleri ile Türkiye'nin Konumu

Dünya genelinde afet yönetimi politikalarının gelişiminde Sendai Afet Risk Azaltma Çerçevesi (2015–2030) belirleyici bir rol oynamıştır. Sendai ilkeleri, risklerin yalnızca afet sonrası değil, afet öncesi planlama ve önleme süreçlerinde yönetilmesi gerektiğini vurgular. Türkiye bu çerçeveyi resmi olarak benimsemiş olsa da, uygulamada koordinasyon sorunları ve kurumsal eşgüdüm eksiklikleri sürmektedir.

Avrupa Birliği ülkelerinde (özellikle Almanya, Hollanda ve İsveç gibi) afet yönetimi sistemleri, yerel yönetimlerin güçlü katılımıyla yürütülürken; Türkiye’de süreç daha merkezi bir yapıya sahiptir. Bu durum hızlı karar almayı sağlasa da yerel farkındalık ve katılım düzeyini sınırlandırmaktadır. Ayrıca, gelişmiş ülkelerde risk haritalama, tehlike modelleme ve çok katmanlı erken uyarı sistemleri yaygınken; Türkiye’de bu sistemler hâlâ sınırlı bölgelerde kullanılmaktadır.

3.8. Sosyal Medya Verilerinin Kullanımı ve Etik Sorunlar

Sosyal medya, afet yönetiminde hem fırsatlar hem de tehditler barındıran çift yönlü bir araçtır. Imran ve ark. (2020), sosyal medya görsellerinden hızlı hasar analizi yapmanın, özellikle ilk 24 saat içinde sahadan veri toplamanın zorlu olduğu durumlarda önemli avantaj sağladığını belirtmiştir. Ancak araştırmacılar, bu yaklaşımın etik açıdan yeni riskler yarattığını da vurgulamıştır. Özellikle kişisel verilerin izinsiz kullanımı, görsel manipülasyon ve bilgi kirliliği, afet yönetiminde güven sorunu oluşturabilmektedir.

Bu noktada Wiegmann ve ark. (2021)’in çalışması, sosyal medya verilerinin afet bilgi sistemlerine entegrasyonunda “veri doğrulama zinciri” oluşturulması gerektiğini önermektedir. Bu zincir, verinin kaynağından doğrulanmasına, sınıflandırılmasına ve resmi raporlara dahil edilmesine kadar bir dizi aşamayı içermektedir. Böylece dijital bilgi akışının hem güvenilir hem de izlenebilir hale gelmesi sağlanabilir.

3.9. Sağlık Sistemleri ve Afet Sonrası Hizmet Sürekliliği

Lokmic-Tomkins ve ark. (2023), afet sonrası sağlık hizmetlerinin sürdürülebilirliği konusunda yapılan hataların, ikincil afet etkilerini tetikleyebildiğini göstermiştir. Özellikle altyapı çöküşleri, enerji kesintileri ve tıbbi tedarik zincirlerinin bozulması, afetlerin doğrudan etkilerinden çok daha uzun süren sağlık krizlerine neden olabilmektedir. Bu bağlamda, afet yönetiminde sağlık sistemlerinin güçlendirilmesi, yalnızca medikal bir önlem değil, aynı zamanda ulusal güvenlik meselesi olarak ele alınmalıdır.

Aynı çalışmada, afet sonrası hizmet sürekliliğini koruyabilmek için yedek enerji kaynakları, mobil sağlık üniteleri ve acil durum veri erişimi sistemlerinin kurulması gerektiği önerilmiştir. Bu önlemler, özellikle deprem veya endüstriyel kazalar gibi altyapı yıkımının yoğun olduğu afetlerde kritik önem taşımaktadır.

3.10. Afet Risk Azaltımında Kurumsal Öğrenme ve Politika Geliştirme

Literatür bulguları, afet yönetiminin başarısının teknik kapasiteden çok kurumsal öğrenme ve politik adaptasyon yeteneğine bağlı olduğunu göstermektedir. Khan ve ark. (2023)'ün sistematik incelemesi, başarılı afet yönetimi sistemlerinin ortak özelliğini “öğrenen sistem” yapısına sahip olmaları olarak tanımlamıştır. Bu sistemler, geçmiş afetlerden edinilen bilgileri analiz ederek politika ve müdahale planlarını sürekli günceller.

Buna karşılık, durağan ve bürokratik yapılarda afet sonrası öğrenme süreci sınırlı kalmakta, aynı hatalar farklı afetlerde tekrar edilmektedir. Progress in Disaster Science (2019) dergisinde yer alan çalışmada, özellikle gelişmekte olan ülkelerde afet yönetimi politikalarının genellikle reaktif (tepkisel) nitelikte olduğu; proaktif ve önleyici politikaların yeterince kurumsallaşmadığı vurgulanmıştır. Bu durum, afetlerin maliyetini artırmakta ve toplumun toparlanma kapasitesini azaltmaktadır.

3.11. Genel Değerlendirme

Tüm bu bulgular, teknolojik ve insan kaynaklı afetlerin yönetiminde başarıya ulaşmak için yalnızca teknik araçlara değil, aynı zamanda kurumsal uyum, bilgi paylaşımı ve toplumsal katılımın güçlendirilmesine ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Afet yönetimi artık yalnızca mühendislik ya da çevre bilimi değil, aynı zamanda insan davranışları, yönetim ve iletişim bilimlerinin kesişiminde yer alan bir disiplindir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Teknolojik ve insan kaynaklı afetler, modern dünyanın kaçınılmaz bir sonucu olarak giderek daha karmaşık bir hâl almaktadır. Gerek sanayileşme gerekse enerjiye olan bağımlılığın artması, bu afet türlerinin etkilerini genişletmekte ve yönetim süreçlerini zorlaştırmaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılan değerlendirmeler, Türkiye'nin afet yönetimi sisteminde önemli ilerlemeler kaydettiğini; ancak özellikle teknolojik risk yönetimi, kurumsal koordinasyon ve mevzuat uygulamaları alanlarında hâlâ güçlendirilmesi gereken yapısal boşluklar bulunduğunu göstermiştir.

Türkiye, doğal afetlere karşı hızlı müdahale kapasitesi geliştirmiş olsa da, teknolojik ve insan kaynaklı afetlerin önlenmesi ve etkilerinin azaltılması için proaktif risk azaltma yaklaşımlarına yeterince ağırlık verilmediği görülmektedir. Bu tür afetlerin karakteristiği, doğrudan insan hatası, denetim zafiyeti veya teknolojik sistem arızalarına dayanması nedeniyle, klasik afet yönetimi yöntemleriyle tam olarak kontrol altına alınamaz. Dolayısıyla, önleyici güvenlik kültürü ve risk temelli planlama anlayışının tüm sektörlere yerleştirilmesi zorunludur.

Ayrıca afet yönetimi yalnızca teknik bir mesele değil; aynı zamanda etik, psikososyal ve yönetsel bir süreçtir. Toplumun bilinç düzeyi, medya yönetimi, eğitim ve kurumsal şeffaflık bu sürecin başarısında kritik rol oynar. Bu nedenle Türkiye'nin afet politikaları, sadece afet sonrası müdahale değil, afet öncesi farkındalık ve toplumsal dayanıklılık boyutlarını da içermelidir.

4.1. Politika ve Uygulama Önerileri

1. Mevzuat Güçlendirmesi:

Teknolojik afetlerin önlenmesi amacıyla, özel sektör tesislerinde zorunlu afet risk planlarının hazırlanması ve düzenli olarak denetlenmesi gereklidir. KBRN tehdidi barındıran sektörlerde ulusal standartların güncellenmesi önemlidir.

2. Kurumsal Koordinasyonun Artırılması:

AFAD, Çevre, Enerji ve Sanayi Bakanlıkları arasındaki veri paylaşım mekanizmaları geliştirilerek ortak risk yönetimi platformları kurulmalıdır.

3. Eğitim ve İnsan Kaynağı Gelişimi:

Üniversitelerde “Teknolojik Afet Yönetimi” başlıklı lisansüstü programlar yaygınlaştırılmalı, mühendislik fakültelerinde afet risk analizi dersleri zorunlu hale getirilmelidir.

4. Toplumsal Farkındalık ve Katılım:

Halkın afet bilincini artıracak kampanyalar sadece deprem ve sel gibi doğal afetlerle sınırlı kalmamalı; endüstriyel kazalar, enerji kesintileri ve kimyasal sızıntılar konusunda da bilinç oluşturulmalıdır.

5. Uluslararası İşbirliği:

Türkiye, Sendai Çerçevesi ve Avrupa Birliği’nin Sivil Koruma Mekanizması gibi uluslararası platformlarda aktif rol alarak bilgi ve teknoloji transferini güçlendirmelidir.

6. Erken Uyarı ve İzleme Sistemleri:

Sanayi tesislerinde sensör tabanlı izleme sistemleri, kimyasal depolama alanlarında gaz algılama mekanizmaları ve otomatik alarm sistemleri zorunlu hale getirilmelidir.

7. Afet Sonrası Psikososyal Destek:

İnsan kaynaklı afetlerde toplumda ortaya çıkan güven kaybı ve psikolojik travmaların giderilmesi için özel rehabilitasyon programları oluşturulmalıdır.

4.2. Akademik Katkı ve Gelecek Çalışmalar İçin Yönelimler

Bu çalışma, teknolojik ve insan kaynaklı afetlerin çok boyutlu yapısını disiplinlerarası bir yaklaşımla ele almış ve Türkiye’nin bu bağlamdaki konumunu uluslararası ölçekte değerlendirmiştir. Gelecek araştırmalarda özellikle şu konulara odaklanılabilir:

- Afet yönetimi mevzuatının performans analizi,
- Endüstriyel risklerin sosyo-ekonomik etkilerinin ölçülmesi,
- Kurumsal afet yönetim kültürünün organizasyonel düzeyde incelenmesi,
- Afet sonrası iyileştirme politikalarının sürdürülebilirlik perspektifiyle değerlendirilmesi.

KAYNAKÇA

- Clark-Ginsberg, A., DeSmet, D., Rueda, I. A., Hagen, R., & Hayduk, B. (2021). Disaster risk creation and cascading disasters within large technological systems: COVID-19 and the 2021 Texas blackouts. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 29(4), 345–359.
- Yu, D., & He, Z. (2022). Digital twin-driven intelligence disaster prevention and mitigation for infrastructure: Advances, challenges, and opportunities. *Natural Hazards*, 113(1), 507–528.
- Khan, S. M., Shafi, I., Butt, W. H., de la Torre Diez, I., Flores, M. A. L., Galán, J. C., & Ashraf, I. (2023). A systematic review of disaster management systems: Approaches, challenges, and future directions. *Land*, 12(6), 1021–1044.
- Wiegmann, M., Kersten, J., Senaratne, H., Potthast, M., Klan, F., & Stein, B. (2021). Opportunities and risks of disaster data from social media: A systematic review of incident information. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(9), 2707–2736.
- Lokmic-Tomkins, Z., Bhandari, D., Bain, C., Borda, A., Kariotis, T. C., & Reser, D. (2023). Lessons learned from natural disasters around digital health technologies and delivering quality healthcare. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), 3151–3174.
- Sakurai, M., & Murayama, Y. (2019). Information technologies and disaster management: Benefits and issues. *Progress in Disaster Science*, 4(2), 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100012>
- Krichen, M., Abdalzaher, M. S., Elwekeil, M., & Fouda, M. M. (2023). Managing natural disasters: An analysis of technological advancements, opportunities, and challenges. *IoT & Cyber-Physical Systems*, 5(1), 61–78.
- Munawar, H. S., Mojtahedi, M., Hammad, A. W. A., Kouzani, A. Z., & Mahmud, M. A. P. (2021). Disruptive technologies as a solution for disaster risk management: A review. *Science of the Total Environment*, 777, 151351. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151351>
- Ubaldi, E., Yabe, T., Jones, N. K. W., Khan, M. F., Ukkusuri, S. V., Di Clemente, R., & Strano, E. (2021). Mobilkit: A Python toolkit for urban resilience and disaster risk management analytics using high-frequency human mobility data. *arXiv preprint. arXiv:2105.03716*
- Pouresmaeil, Y., Afroogh, S., & Jiao, J. (2025). Mapping out AI functions in intelligent disaster (mis)management and AI-caused disasters. *arXiv preprint. arXiv:2501.01234*
- Imran, M., Alam, F., Qazi, U., Peterson, S., & Ofli, F. (2020). Rapid damage assessment using social media images by combining human and machine intelligence. *arXiv preprint. arXiv:2003.09845*
- Gupta, A., Watson, S., & Yin, H. (2020). Deep learning-based aerial image segmentation with open data for disaster impact assessment. *arXiv preprint. arXiv:2007.04889*
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Disaster monitoring using unmanned aerial vehicles and deep learning. *arXiv preprint. arXiv:1801.04176*

- Xu, L., Lin, S.-Y., Hlynka, A., Lu, H., Kamat, V. R., Menassa, C. C., El-Tawil, S., Prakash, A., Spence, S. M. J., & McCormick, J. (2021). Distributed simulation platforms and data passing tools for natural hazards engineering: Reviews, limitations, and recommendations. *International Journal of Disaster Risk Science*, 12(5), 743–761. <https://doi.org/10.1007/s13753-021-00361-7>
- Tyler, J., Sadiq, A.-A., Noonan, D., & Entress, R. M. (2021). Decision making for managing community flood risks: Perspectives of United States floodplain managers. *International Journal of Disaster Risk Science*, 12(5), 782–799. <https://doi.org/10.1007/s13753-021-00367-1>

BÖLÜM 2

MASABAŞI ACİL DURUM TATBİKATLARI

Enes KAŞIKÇI¹, Dilek ÖZTAŞ²

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, KBRN Tehditleri Yönetimi Ankara enes.kasikci1@gmail.com ORCID ID: 0009-0003-4414-7362

² Prof. Dr. Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Halk Sağlığı A.D. Ankara doztas@hotmail.com ORCID ID: 0000-0002-8687-7238

1.GİRİŞ

Afet ve acil durum yönetimi, kurumların beklenmedik olaylara karşı hazırlıklı olmasını, etkin karar alma ve koordinasyon becerilerini geliştirmesini hedefleyen dinamik bir süreçtir. Bu sürecin en kritik bileşenlerinden biri olan tatbikatlar, planların işlerliğini test etmek, personelin görev ve sorumluluklarını pekiştirmek, olası aksaklıkları önceden tespit ederek iyileştirme süreçlerini başlatmak amacıyla yürütülür. Tatbikatlar, kurumların kriz yönetimi kapasitesini güçlendiren ve afetlere karşı dayanıklılığını artıran uygulamalardır.

Tatbikat türleri arasında yer alan masabaşı tatbikatları, yönetim düzeyinde stratejik karar süreçlerini, iletişim zincirini ve kaynak koordinasyonunu test etmeye yönelik, düşük maliyetli ancak yüksek etkililikte bir yöntemdir. Bu tatbikatlar, sahada fiziksel uygulama gerektirmeksizin, olası bir kriz senaryosu üzerinden yürütülür. Katılımcılar, simüle edilmiş bir afet durumunda alınacak kararları tartışır, bilgi akışını değerlendirir ve kurumsal planların işlerliğini gözden geçirir. Böylece kurum, kriz anında ne ölçüde hazırlıklı olduğunu ölçme fırsatı bulur.

Masabaşı tatbikatlarının temel amacı, kurumların kriz anında göstereceği tepkiyi önceden değerlendirmek, eksiklikleri belirlemek ve bu doğrultuda planları sürekli olarak geliştirmektir. Gerçek bir afetin yarattığı stres ortamı benzetilerek yöneticilerin baskı altında karar alma, iletişim kurma ve kaynak yönetimi becerileri gözlemlenir. Bu tür tatbikatlar, yalnızca planların test edilmesini değil, aynı zamanda kurumsal öğrenme, risk bilincinin artırılması ve sürekli iyileştirme kültürünün yerleşmesini de sağlar.

Türkiye’de Hastane Afet ve Acil Durum Planı (HAP) Uygulama Yönetmeliği kapsamında, sağlık kurumlarının yılda en az bir kez masabaşı tatbikatı yapması zorunludur. Bu düzenleme, sadece mevzuata uyum açısından değil, aynı zamanda kurumsal hazırlık seviyesinin nesnel olarak değerlendirilmesi bakımından da büyük önem taşımaktadır. Benzer şekilde, kamu kurumları, sanayi tesisleri ve eğitim kurumlarında da masabaşı tatbikatları, kurumsal dayanıklılığı artırmak amacıyla düzenli olarak uygulanmaktadır.

Günümüzde artan afet riskleri, iklim değişikliğinin etkileri ve pandemi gibi küresel krizler, acil durum yönetiminde teorik planlamanın ötesine geçilmesi gerektiğini göstermiştir. Bu bağlamda, masabaşı tatbikatları yalnızca bir yönetmelik gerekliliği değil; aynı zamanda kurumsal farkındalık, stratejik düşünme ve afetlere karşı dirençli bir organizasyon kültürünün inşasında temel bir araçtır. Tatbikatların planlama, uygulama ve değerlendirme süreçlerinde karşılaşılan güçlükleri analiz ederek kurumsal öğrenmeye katkı sağlayacak öneriler sunulmaktadır. Böylece, afet yönetimi alanında daha sistematik, sürdürülebilir ve ölçülebilir bir tatbikat kültürünün gelişmesine katkı sağlanması hedeflenmektedir.

2. Kavramsal Çerçeve

Acil durum yönetimi, planlama, hazırlık, müdahale ve iyileştirme aşamalarından oluşan döngüsel bir süreçtir. Bu sürecin etkinliği, yalnızca planların varlığına değil, aynı zamanda bu planların gerçek koşullar altında ne ölçüde uygulanabilir olduğunun test edilmesine bağlıdır. Tatbikatlar, bu işlevi yerine getiren en önemli uygulama araçlarından biridir. Afet yönetimi literatüründe tatbikatlar, genellikle masabaşı (tabletop), saha (field) ve hibrit (combined) olmak üzere üç temel kategori altında

sınıflandırılır. Her bir tatbikat türü, farklı amaçlara hizmet eder ve kurumsal kapasitenin farklı boyutlarını test eder.

Masabaşı tatbikatları, yönetim ve karar alma düzeyinde yürütülen, senaryo tabanlı simülasyonlardır. Bu tatbikatlarda katılımcılar, olası bir afet veya kriz senaryosu üzerinden olayın gelişimini tartışır, alınacak kararları değerlendirir ve kurum içi iletişim zincirini gözden geçirir. Fiziksel bir uygulama gerektirmediğinden, düşük maliyetli ve esnek bir yöntemdir. Buna karşılık saha tatbikatları, acil durum planlarının sahada gerçek ekipman, personel ve operasyonel süreçlerle test edilmesini sağlar. Bu tür tatbikatlar, özellikle müdahale ve tahliye süreçlerinde personelin teknik becerilerini, ekipman yeterliliğini ve koordinasyon kabiliyetini gözlemlemeye yöneliktir. Hibrit tatbikatlar ise her iki yaklaşımın birleşimidir; genellikle masabaşı oturumlarıyla başlayan bu tatbikatlar, belirli aşamalarda saha uygulamalarıyla desteklenir. Böylece hem karar alma hem de operasyonel düzey eş zamanlı olarak değerlendirilebilir.

Masabaşı tatbikatlarının diğer tatbikat türlerinden en belirgin farkı, stratejik düzeydeki karar süreçlerini test etmesidir. Sahadaki uygulamalardan ziyade, yöneticilerin kriz anındaki karar verme, önceliklendirme ve kaynak tahsisi becerilerini geliştirmeyi amaçlar. Bu nedenle, masabaşı tatbikatları daha çok üst ve orta düzey yöneticiler, afet yönetimi ekipleri ve operasyon koordinatörleri tarafından yürütülür. Tatbikat sırasında oluşturulan senaryolar, genellikle kurumun risk analizine dayandırılır ve belirli bir zaman akışına göre olayların gelişimi kurgulanır. Katılımcılar, “senaryo kartları” veya “durum raporları” aracılığıyla bilgi alır ve buna göre karar verirler. Bu süreç, hem bireysel hem de ekip düzeyinde karar alma mekanizmalarının nasıl işlediğini gözlemleme olanağı sunar.

Masabaşı tatbikatlarının kriz yönetimindeki en önemli katkısı, koordinasyon ve iletişim süreçlerinin test edilmesidir. Gerçek bir afet durumunda bilgi akışının yavaşlaması, yetki karmaşası veya iletişim kesintileri ciddi aksaklıklara yol açabilir. Bu nedenle tatbikat, kurumun farklı birimleri arasında bilgi paylaşımını, hiyerarşik iletişimi ve kriz yönetim merkezinin etkinliğini değerlendirmek için bir fırsat sağlar. Ayrıca, tatbikat sırasında alınan kararların etkileri tartışılarak katılımcıların durumsal farkındalığı artırılır. Bu yaklaşım, yöneticilerin baskı altında karar alma, ekip çalışması yürütme ve riskleri önceliklendirme becerilerini güçlendirir.

Masabaşı tatbikatlarının en belirgin avantajları, düşük maliyetli olması, hızlı planlanabilmesi ve risk içermemesi olarak öne çıkar. Gerçek operasyonel faaliyetlere ara vermeden yapılabildiği için kurumsal işleyişi aksatmaz. Ayrıca farklı kurumların ortak tatbikatlara katılımını kolaylaştırır, böylece çok kurumlu koordinasyonun test edilmesine imkân tanır. Bununla birlikte, bu tür tatbikatların bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. En önemli dezavantajı, sahadaki fiziksel uygulamaların ve personel performansının ölçülebilmesidir. Katılımcıların stres altında gerçek davranışlarını tam olarak yansıtamaması, tatbikatın gerçekçiliğini kısıtlayabilir. Ayrıca, senaryo kalitesinin düşük olduğu durumlarda katılımcı ilgisi azalabilir ve tatbikatın eğitsel değeri düşebilir. Bu nedenle etkili bir masabaşı tatbikatı için senaryonun kurumsal risk profiline uygun, gerçekçi ve dinamik biçimde tasarlanması gerekir.

3. Yasal ve Kurumsal Çerçeve

Türkiye’de afet ve acil durum yönetimi faaliyetleri, 2009 yılında yürürlüğe giren 5902 sayılı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) Kuruluş Kanunu ile yasal bir çerçeveye kavuşturulmuştur. Bu düzenleme, afet yönetiminin yalnızca müdahale odaklı değil, aynı zamanda önleme, hazırlık ve iyileştirme aşamalarını kapsayan bütünlüklü bir sistem olarak ele alınmasını sağlamıştır. Bu kapsamda kurumların, afet öncesi hazırlık düzeylerini değerlendirmek amacıyla düzenli olarak tatbikatlar yapması zorunlu hale gelmiştir. Masabaşı tatbikatları da bu sistem içinde, özellikle karar alma, koordinasyon ve kriz yönetimi bileşenlerinin test edilmesi açısından önemli bir yer tutmaktadır.

Sağlık sektörü özelinde, “Hastane Afet ve Acil Durum Planı (HAP) Uygulama Yönetmeliği”, masabaşı tatbikatlarının yasal temelini oluşturmaktadır. Yönetmeliğin 16. maddesi, hastanelerin yılda en az bir kez masabaşı tatbikatı yapmalarını zorunlu kılar. Bu hüküm, yalnızca mevzuat uyumu sağlamakla kalmaz; aynı zamanda sağlık kuruluşlarının afet ve kriz durumlarında kurumsal hazırlık seviyesinin nesnel biçimde değerlendirilmesini de amaçlar. HAP yönetmeliğine göre yapılan tatbikatlar, hastane afet planlarının işlerliğini test etmek, personelin görev ve sorumluluklarını pekiştirmek, bilgi akışındaki olası aksaklıkları belirlemek ve bu doğrultuda düzeltici faaliyetler planlamak amacıyla yürütülür. Yönetmeliğin 16. maddesi ayrıca tatbikatların sonuçlarının raporlanarak üst yönetime sunulmasını ve gerekli iyileştirmelerin yapılmasını öngörmektedir. Bu yönüyle tatbikat süreci, sürekli iyileştirme prensibini destekleyen bir kalite yönetim aracı olarak da işlev görür.

Hastanelerde uygulanan masabaşı tatbikatları, çoğu zaman senaryo tabanlı olarak planlanır ve hastane afet planında yer alan olası risklere (örneğin deprem, yangın, salgın, kimyasal sızıntı gibi) dayandırılır. Katılımcılar genellikle afet yönetim ekibi üyelerinden, hastane yöneticilerinden, servis sorumlularından ve destek birimlerinden oluşur. Tatbikat süreci sonunda hazırlanan raporlarda; karar alma sürecinin etkinliği, iletişim zincirindeki aksaklıklar ve kaynak yönetimi performansı değerlendirilir. Bu raporlar, sonraki dönemlerde yapılacak saha tatbikatları için de yol gösterici olur. Ayrıca HAP çerçevesinde gerçekleştirilen tatbikatlar, Sağlık Bakanlığı’nın kalite ve hasta güvenliği değerlendirmelerinde dikkate alınan unsurlar arasında yer alır. Dolayısıyla, yasal gereklilik aynı zamanda kurumsal performans göstergesi niteliği taşır.

Sağlık kurumlarının yanı sıra, diğer kamu kurumları ve özel sektör tesisleri de afetlere hazırlık kapsamında düzenli tatbikat yapmakla yükümlüdür. İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu (6331 sayılı) ve buna bağlı yönetmelikler, özellikle büyük endüstriyel tesislerde acil durum planlarının test edilmesini zorunlu kılar. Bu kapsamda yapılan masabaşı tatbikatları, işletmelerin acil durum ekiplerinin koordinasyonunu, iletişim kanallarının işlerliğini ve dış kurumlarla (örneğin itfaiye, AFAD, belediye) iş birliği düzeyini değerlendirmek amacı taşır. Ayrıca, AFAD’ın 2022-2026 Stratejik Planı da her yıl ulusal ve yerel düzeyde düzenli tatbikat yapılmasını bir hedef olarak belirlemiştir. Bu plan, “tatbikat kültürünün yaygınlaştırılması” ve “kurumsal afet farkındalığının artırılması”nı temel stratejik amaçlar arasında göstermektedir.

Tatbikat süreçlerinin yasal bir çerçeveye oturtulması, kurumlar arası koordinasyonun güçlendirilmesine de katkı sağlamaktadır. Özellikle sağlık, enerji, ulaşım ve eğitim gibi kritik sektörlerde, farklı kurumların birlikte tatbikat yapması ulusal afet yönetimi sisteminin bütüncül yapısını desteklemektedir. Tatbikatların ardından hazırlanması gereken tatbikat değerlendirme

raporları, mevzuat gereği belirli bir formatta düzenlenir ve üst yönetim ile ilgili denetim mercilerine sunulur. Bu raporlar, yalnızca mevcut durumu değerlendirmekle kalmaz; aynı zamanda gelecekteki iyileştirme planlarının ve eğitim programlarının temelini oluşturur.

Sonuç olarak, Türkiye’de masabaşı tatbikatlarının yasal zemini güçlü bir şekilde tanımlanmıştır. HAP Yönetmeliği, 6331 sayılı Kanun ve AFAD’ın stratejik planları, kurumların afet hazırlık düzeylerini koruma ve geliştirme sorumluluğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu kapsamda yapılan tatbikatlar, mevzuat gereği bir yükümlülük olmanın ötesinde; kurumların kriz yönetimi kapasitesini ölçen, öğrenen organizasyon kültürünü besleyen ve ulusal afet direncine katkı sağlayan önemli bir uygulama alanıdır.

4. Planlama Süreci

Masabaşı tatbikatlarının başarısı, büyük ölçüde planlama aşamasında gösterilen özen ve sistematik hazırlık sürecine bağlıdır. Planlama süreci, yalnızca bir senaryo oluşturmakla sınırlı değildir; aynı zamanda hedeflerin belirlenmesi, katılımcıların seçilmesi, rollerin netleştirilmesi, kaynak ve zaman planlamasının yapılması, iletişim zincirinin oluşturulması gibi çok yönlü adımları içerir. Bu süreçte, tatbikatın amacına uygun bir metodoloji izlenmesi, hem etkinliğin kalitesini hem de elde edilecek çıktının güvenilirliğini belirleyen temel unsurdur.

4.1. Senaryo Geliştirme ve Risk Analizi

Masabaşı tatbikatlarının temelini oluşturan unsurlardan biri, gerçekçi ve kurumun risk profiline uygun bir senaryo geliştirilmesidir. Senaryo, katılımcıların kriz ortamında karşılaşılabileceği durumları temsil etmeli ve olayın gelişimini mantıksal bir akışla yansıtmalıdır. Senaryonun başlangıç, gelişme ve sonuç aşamaları bulunur; her aşama, belirli karar noktaları ve bilgi akışları üzerinden yürütülür. Bu noktalar, katılımcıların belirli bir duruma nasıl tepki verdiklerini, hangi kaynakları kullandıklarını ve iletişim süreçlerini nasıl yönettiklerini değerlendirmek için kritik öneme sahiptir.

Senaryonun hazırlanmasında, kurumun tehlike ve risk analizleri (HRA, HAZOP, FMEA vb.) dikkate alınır. Örneğin bir hastanede senaryo; deprem sonrası enerji kesintisi, yoğun bakım tahliyesi veya iletişim sisteminin çökmesi gibi gerçekçi durumları içerebilir. Sanayi tesislerinde ise kimyasal sızıntı, yangın veya personel yaralanması gibi riskler senaryoya entegre edilir. Etkili bir senaryo, beklenmedik gelişmelere açık olmalı ve katılımcıları dinamik düşünmeye zorlamalıdır.

Tatbikat planlamasında ayrıca senaryo kartları hazırlanır. Bu kartlar, olayın belirli bir aşamasında katılımcılara sunulan bilgi veya olay güncellemelerini içerir. Böylece tatbikatın yöneticisi, olay akışını yönlendirir ve katılımcıların tepki sürelerini, karar süreçlerini gözlemler.

4.2. Katılımcı Seçimi, Rol Dağılımı ve Görev Tanımları

Masabaşı tatbikatının başarısı, uygun katılımcı seçimi ve rollerin doğru şekilde tanımlanmasına da bağlıdır. Katılımcılar genellikle kurumun afet yönetim organizasyon yapısına göre belirlenir. Bu yapı içinde olay komuta ekibi, operasyon, planlama, lojistik ve finans/idari destek birimleri yer alır. Her birim kendi sorumluluk alanı çerçevesinde senaryoya müdahale eder ve alınan kararları diğer birimlerle paylaşır.

Rol dağılımında gerçek hayattaki hiyerarşik yapının korunması önemlidir. Örneğin hastane senaryosunda başhekim veya afet yönetim kurulu başkanı olay komuta rolünü üstlenirken, servis sorumluları operasyonel görevleri yürütür. Bu durum, tatbikatın gerçekçiliğini artırır ve kriz anında görev dağılımındaki belirsizlikleri azaltır.

Katılımcıların yanı sıra, gözlemci ve değerlendirici roller de planlamada yer almalıdır. Gözlemciler, tatbikat boyunca karar alma süreçlerini izler, iletişim zincirindeki aksaklıkları not eder ve sonunda değerlendirme raporlarına girdi sağlar. Ayrıca bir tatbikat koordinatörü veya kolaylaştırıcı, tüm süreci yönetir, senaryo akışını kontrol eder ve zamanlamayı düzenler.

4.3. Tatbikat Öncesi Hazırlık ve Koordinasyon Süreçleri

Tatbikat öncesi hazırlık dönemi, planlama dokümanlarının oluşturulduğu, görevlerin netleştirildiği ve iletişim stratejisinin tanımlandığı aşamadır. Bu dönemde, tatbikatın genel amacı, hedefleri, kapsamı ve başarı kriterleri belirlenir. Tatbikat planı genellikle şu başlıklardan oluşur:

1. **Amaç ve hedefler** – Hangi süreçler veya birimler değerlendirilecek?
2. **Kapsam** – Tatbikat hangi senaryoyu ve hangi bölümleri kapsayacak?
3. **Zaman planı** – Tatbikatın süresi, oturum sayısı, bilgi güncelleme aralıkları.
4. **Roller ve sorumluluklar** – Her katılımcının görev tanımı.
5. **Değerlendirme kriterleri** – Tatbikat sonrası analizde kullanılacak performans göstergeleri.

Hazırlık sürecinde, tatbikat materyalleri (plan dokümanları, haritalar, iletişim zinciri şemaları, olay rapor formları) hazırlanır ve tüm katılımcılarla önceden paylaşılır. Ayrıca tatbikat öncesinde kısa bir bilgilendirme toplantısı yapılır. Bu toplantı, tatbikatın amacı, kuralları ve beklenen çıktılar hakkında katılımcıların ortak bir anlayış geliştirmesini sağlar.

Koordinasyonun sağlanabilmesi için planlama ekibi, tatbikat öncesi prova oturumları da gerçekleştirebilir. Bu oturumlarda senaryo akışı test edilir, süre planlaması gözden geçirilir ve olası aksaklıklar önceden tespit edilir. Böylece tatbikat günü sürpriz durumların azaltılması ve hedeflenen öğrenme çıktısının sağlanması amaçlanır.

4.4. Planlama Aşamasında Karşılaşılan Zorluklar

Planlama aşamasında en sık karşılaşılan sorunlardan biri, zaman ve kaynak kısıtlarıdır. Özellikle yoğun iş yüküne sahip kurumlarda, yöneticilerin tatbikat hazırlıklarına yeterli zaman ayıramaması, tatbikatın etkinliğini düşürebilir. Bunun yanı sıra, katılımcı motivasyonunun düşük olması veya tatbikatın “mevzuat gereği” yapılması gibi algılar da planlama sürecini olumsuz etkileyebilir.

Bir diğer zorluk, senaryo kalitesi ve gerçekçilik düzeyidir. Yetersiz analiz veya soyut kurgular, katılımcıların ilgisini azaltır ve öğrenme çıktısını zayıflatır. Bu nedenle senaryoların, kurumun geçmiş deneyimlerinden, olay raporlarından veya risk analizlerinden beslenmesi önerilir.

Ayrıca, farklı birimlerin veya kurumların birlikte yer aldığı tatbikatlarda koordinasyon eksikliği önemli bir zorluk olarak ortaya çıkar. Kurumlar arası iletişim protokollerinin net tanımlanmamış olması, bilgi paylaşımında gecikmelere neden olabilir. Bu durumu önlemek için tatbikat planlamasında erken aşamalarda ortak toplantılar yapılmalı ve iletişim kanalları belirlenmelidir.

Son olarak, değerlendirme kriterlerinin net belirlenmemesi planlamada yapılan temel hatalardan biridir. Tatbikatın başarısını ölçmek için hangi göstergelerin kullanılacağı (örneğin tepki süresi, karar kalitesi, koordinasyon etkinliği) planlama aşamasında açıkça tanımlanmalıdır. Böylece tatbikat sonunda elde edilen veriler somut biçimde analiz edilebilir.

5. Uygulama Süreci

Planlama aşamasında tüm hazırlıkların tamamlanmasının ardından, masabaşı acil durum tatbikatlarının en kritik evresi olan uygulama süreci başlar. Bu aşama, planlanan senaryonun gerçek zamanlı olarak hayata geçirilmesini, katılımcıların kriz durumlarına verdikleri tepkilerin değerlendirilmesini ve kurumun acil durum planlarının etkinliğinin sınanmasını kapsar. Uygulama süreci, yalnızca planın işlerliğini test etmez; aynı zamanda karar alma, iletişim, kaynak yönetimi ve ekip koordinasyonu gibi temel yetkinliklerin pratikte ölçülmesini sağlar.

5.1. Tatbikatın Başlatılması

Tatbikat günü başlamadan önce, tüm katılımcıların hazır bulunması, gerekli materyallerin (senaryo kartları, olay formları, iletişim zincirleri vb.) dağıtılması ve teknik altyapının (projeksiyon, harita, dijital sistemler) kontrol edilmesi gerekir.

Uygulama süreci genellikle bir açılış oturumu ile başlar. Bu oturumda, tatbikat koordinatörü tarafından katılımcılara kısa bir bilgilendirme yapılır. Bu bilgilendirme; tatbikatın amacı, süresi, kuralları, değerlendirme yöntemleri ve iletişim kuralları hakkında temel bilgileri içerir. Açılış konuşmasında, katılımcılara tatbikat süresince gerçek olaymış gibi davranmaları, kararlarını yazılı olarak kaydetmeleri ve ekip içi koordinasyonu sürdürmeleri hatırlatılır.

Tatbikat resmi olarak başlatıldığında, ilk senaryo olayı (örneğin deprem, yangın, kimyasal sızıntı, siber saldırı vb.) duyurulur. Bu andan itibaren, tüm birimler senaryoya uygun olarak kendi görev alanlarında harekete geçer. Tatbikat yöneticisi, olayın ilerleyen aşamalarında yeni bilgiler, olay güncellemeleri veya gelişmeler sunarak sürecin dinamik ilerlemesini sağlar. Bu güncellemeler genellikle belirli aralıklarla “enjektör kartları” aracılığıyla katılımcılara iletilir.

5.2. Olay Yönetimi ve Karar Alma Dinamikleri

Masabaşı tatbikatlarında uygulama sürecinin en önemli boyutu, karar alma süreçlerinin gözlemlenmesidir. Katılımcıların olaylara verdikleri tepkiler, olayın ciddiyetini değerlendirme biçimleri ve karar alma hızları, organizasyonun kriz yönetimi kapasitesini doğrudan yansıtır.

Bu süreçte her birim kendi görev tanımına uygun olarak faaliyet gösterir. Olay komuta ekibi, genel stratejik yönü belirler; operasyon birimi sahadaki eylemleri simüle eder; planlama birimi mevcut bilgileri analiz eder ve geleceğe dönük tahminlerde bulunur; lojistik birimi kaynak yönetimiyle ilgilenir; finans/ıdari birim ise gerekli destek ve kayıt işlemlerini yürütür.

Tatbikat sırasında yöneticilerden beklenen, alınan kararları sadece “doğru” veya “yanlış” olarak görmek değil, karar sürecinin mantığını ortaya koymaktır. Örneğin, bir iletişim kesintisi durumunda

hangi alternatif kanalın devreye alınacağı, kaynakların önceliklendirilmesinde hangi kriterlerin kullanılacağı gibi detaylar, tatbikatın öğrenme çıktısını güçlendirir.

5.3. İletişim ve Koordinasyon

Acil durum yönetiminde başarının en belirleyici unsurlarından biri, etkili iletişimidir. Tatbikat uygulaması sırasında iletişim zincirinin işlerliği test edilir; bilginin birimden birime nasıl aktarıldığı, zamanında iletilip iletilmediği, mesajların anlaşılır olup olmadığı değerlendirilir.

Masabaşı tatbikatlarında genellikle bir iletişim tahtası veya dijital kontrol ekranı kullanılır. Bu sistemler sayesinde, olayın ilerleyen safhaları ve alınan kararlar görsel olarak tüm katılımcılarla paylaşılır. Böylece her birim olayın genel durumunu anlık olarak takip edebilir.

Ayrıca, tatbikat süresince kurumlar arası koordinasyon da önemlidir. Özellikle belediye, sağlık kuruluşu, itfaiye, güvenlik birimi gibi dış paydaşların dahil olduğu tatbikatlarda, ortak dilin ve protokolün uygulanması test edilir. Bu aşama, kurumlar arası bilgi paylaşımının ne kadar hızlı ve güvenilir olduğunu ortaya koyar.

5.4. Sürecin Yönetimi ve Gözlem

Uygulama süreci boyunca bir veya birden fazla gözlemci ekip görev alır. Bu ekipler, tatbikat sırasında alınan kararları, bilgi akışını, iletişim zincirini ve zaman yönetimini izler. Gözlemler genellikle önceden hazırlanan değerlendirme formlarına kaydedilir.

Tatbikat kolaylaştırıcısı olay akışını yönetirken, gerektiğinde müdahale eder, yeni olaylar ekler veya süreyi ayarlar. Örneğin, senaryonun bir aşamasında beklenen karar gecikirse, kolaylaştırıcı “yeni gelişme” bildirimi yaparak olayın ilerlemesini sağlar. Bu yöntem, gerçek kriz ortamlarındaki belirsizliklerin simülasyonunu destekler.

Gözlemciler tarafından toplanan veriler, tatbikat sonrası analizde kullanılmak üzere arşivlenir. Bu veriler, kurumun güçlü yönlerini ve geliştirilmesi gereken alanları ortaya çıkarır.

5.5. Zaman Yönetimi ve Olay Akış Kontrolü

Masabaşı tatbikatları genellikle 1 ila 4 saat arasında sürer. Ancak bazı kurumlar, kapsamlı senaryolar için çok oturumlu uygulamalar düzenleyebilir.

Zaman yönetimi, uygulamanın etkinliği açısından kritik bir faktördür. Tatbikat süresince olay akışının çok hızlı veya yavaş ilerlemesi, katılımcıların odak düzeyini ve senaryo bütünlüğünü etkileyebilir. Bu nedenle, kolaylaştırıcı her olay aşamasının belirlenen zaman diliminde tamamlanmasına özen göstermelidir.

Ayrıca, tatbikat boyunca belirli zaman aralıklarında ara değerlendirmeler yapılabilir. Bu değerlendirmeler, katılımcıların o ana kadar alınan kararları gözden geçirmesine ve birimlerin koordinasyon düzeyini yeniden yapılandırmasına olanak tanır.

5.6. Tatbikat Sırasında Karşılaşılan Zorluklar

Uygulama süreci sırasında çeşitli zorluklarla karşılaşılması doğaldır. Bunlar genellikle planlama aşamasındaki eksikliklerden veya gerçek koşulların simülasyona tam olarak yansıtılamamasından kaynaklanır.

En sık karşılaşılan sorunlardan bazıları şunlardır:

- Katılımcıların senaryoyu “gerçek olay” olarak ciddiye almamaları,
- Olay akışının fazla karmaşık veya yetersiz olması,
- Zaman yönetiminde aksaklıklar,
- İletişim zincirinde bilgi kayıpları,
- Teknolojik araçların yetersizliği veya hatalı kullanımı,
- Katılımcıların rollerini tam olarak bilmemesi.

Bu sorunların minimize edilmesi için, tatbikat öncesi bilgilendirme ve oryantasyon toplantılarının yapılması büyük önem taşır. Ayrıca tatbikat yöneticisinin deneyimli olması, sürecin kontrollü ve dengeli ilerlemesini sağlar.

5.7. Tatbikatın Sonlandırılması

Tatbikatın tamamlanmasının ardından, kolaylaştırıcı tarafından olay akışı durdurulur ve “tatbikat sonu” duyurusu yapılır. Bu aşamada, tüm katılımcılar alınan kararları gözden geçirir, iletişim kayıtları toplanır ve tatbikat sırasında doldurulan formlar teslim edilir.

Tatbikatın hemen ardından kısa bir geri bildirim oturumu gerçekleştirilir. Bu oturumda her birim, tatbikat boyunca yaşadığı zorlukları, karar alma süreçlerinde karşılaştığı engelleri ve iyileştirme önerilerini paylaşır. Böylece “öğrenilen dersler” anında kayda alınmış olur.

Debriefing oturumu, tatbikatın en değerli kısmıdır çünkü yalnızca olayların nasıl geliştiğini değil, neden o şekilde geliştiğini analiz etmeye fırsat verir. Bu analiz, sonraki bölümde ele alınacak olan “Değerlendirme ve İyileştirme” sürecine temel oluşturur.

6. Değerlendirme ve Geri Bildirim Süreci

Masabaşı acil durum tatbikatlarının başarısı, yalnızca planlama ve uygulama aşamalarının etkinliğiyle değil, bu süreçlerin sonrasında yapılan değerlendirme ve geri bildirimlerin niteliğiyle de ölçülür. Tatbikatın sonunda elde edilen deneyimlerin sistematik biçimde analiz edilmesi, kurumun öğrenme kapasitesini artırır ve gelecekteki krizlere daha hazırlıklı hale gelmesini sağlar. Bu nedenle, değerlendirme süreci, tatbikatın nihai amacı olan sürekli iyileştirme kültürünün en önemli bileşenidir.

6.1. Değerlendirme Sürecinin Önemi

Tatbikatların temel hedeflerinden biri, mevcut acil durum planlarının gerçek koşullar karşısındaki dayanıklılığını test etmek ve eksiklikleri tespit etmektir. Ancak bu tespitlerin kurumsal gelişime katkı sağlayabilmesi, değerlendirme sürecinin sistematik ve kanıta dayalı yürütülmesine bağlıdır.

Değerlendirme aşaması, tatbikat sürecinde elde edilen tüm gözlemlerin, kayıtların, raporların ve katılımcı geri bildirimlerinin analiz edilmesiyle başlar. Bu analiz sonucunda, güçlü yönler, zayıf noktalar, iyileştirme alanları ve gelecekteki öncelikler belirlenir. Bu yönüyle değerlendirme süreci, yalnızca bir performans ölçümü değil; aynı zamanda kurumsal öğrenme ve gelişim aracıdır.

6.2. Performans Ölçüm Kriterleri

Tatbikatın etkililiğini belirlemek için çeşitli performans ölçütleri kullanılır. Bu ölçütler, kurumun kriz yönetim kapasitesinin farklı boyutlarını değerlendirmeyi amaçlar. En yaygın kullanılan kriterler şunlardır:

- **Tepki Süresi:** Olayın başlamasından itibaren birimlerin harekete geçme süresi, iletişim başlatma zamanı ve ilk kararların alınma hızı değerlendirilir.
- **Koordinasyon Düzeyi:** Farklı birimler ve ekipler arasındaki iş birliği, bilgi paylaşımı ve senkronizasyonun kalitesi ölçülür.
- **İletişim Etkinliği:** Mesajların doğruluğu, netliği, zamanında iletilip iletilmediği ve bilgi akışındaki kayıplar incelenir.
- **Kaynak Yönetimi:** Mevcut insan gücü, araç-gereç, lojistik destek ve finansal kaynakların uygun şekilde kullanılıp kullanılmadığı gözlemlenir.
- **Karar Alma Kalitesi:** Kriz koşullarında alınan kararların rasyonelliği, risk değerlendirmesiyle uyumu ve zamanlaması analiz edilir.
- **Prosedürlere Uyum:** Tatbikat sırasında eylemlerin mevcut acil durum planları ve yönetmeliklerle ne kadar uyumlu olduğu incelenir.

Bu kriterler, tatbikat sonrasında yapılacak analizlerin temelini oluşturur ve objektif bir değerlendirme çerçevesi sağlar.

6.3. Değerlendirme Araçları ve Yöntemleri

Değerlendirme sürecinde kullanılan araçlar, tatbikatın kapsamına, katılımcı sayısına ve kurumun teknik altyapısına göre değişiklik gösterebilir. En yaygın kullanılan yöntemler şunlardır:

- **Gözlemci Raporları:** Tatbikat sırasında görevlendirilen gözlemciler tarafından doldurulan formlar, olay akışı, karar süreçleri, iletişim zinciri ve koordinasyon düzeyi hakkında detaylı veri sağlar.
- **Anketler ve Katılımcı Görüşleri:** Tatbikat sonrası yapılan kısa anketler, katılımcıların algılarını, karşılaştıkları zorlukları ve önerilerini ortaya koyar. Bu yöntem, tatbikatın içselleştirilmesi açısından oldukça değerlidir.
- **Video ve Ses Kayıt Analizi:** Dijital kayıtlar, olayların zamanlamasının ve karar süreçlerinin geriye dönük olarak incelenmesine olanak tanır.
- **Tatbikat Sonu Toplantısı :** Katılımcıların toplu değerlendirmesiyle yürütülen bu oturum, hem bireysel hem de ekip düzeyinde öğrenmeyi destekler.
- **Dijital Değerlendirme Platformları:** Özellikle büyük ölçekli kurumlarda, tatbikat verilerinin toplanması ve analizinde dijital sistemler kullanılabilir. Bu sistemler, istatistiksel veri üretimi ve raporlama açısından etkinlik sağlar.

Bu araçlar, birlikte kullanıldığında hem nitel hem nicel açıdan güçlü bir değerlendirme çerçevesi sunar.

6.4. Geri Bildirim Süreci

Değerlendirme aşamasının ardından elde edilen bulguların kurum içinde paylaşılması, geri bildirim sürecinin başlangıcını oluşturur. Geri bildirim, yalnızca eksiklikleri belirtmekle kalmamalı; aynı zamanda iyileştirme odaklı ve yapıcı olmalıdır.

Geri bildirim toplantıları genellikle üç aşamalı yürütülür:

1. **Bulguların Sunumu:** Gözlemciler, değerlendiriciler veya tatbikat koordinatörü tarafından genel bulgular özetlenir.
2. **Katılımcı Görüşleri:** Her birim kendi deneyimini aktarır, süreçte yaşadığı güçlü ve zayıf yönleri paylaşır.
3. **Ortak Çözüm Önerileri:** Kurum genelinde uygulanabilecek iyileştirme önerileri tartışılır ve önceliklendirilir.

Bu süreç sonunda, tüm değerlendirmelerin yazılı hale getirildiği bir Tatbikat Sonuç Raporu hazırlanır. Bu raporda; tatbikatın amacı, uygulama süreci, gözlemler, değerlendirme sonuçları, güçlü yönler, eksiklikler ve öneriler detaylı şekilde yer alır. Rapor, ilerleyen tatbikatlarda referans olarak kullanılır.

6.5. Kurumsal Öğrenme ve Sürekli İyileştirme

Masabaşı tatbikatlarının en önemli çıktısı, kurumsal öğrenme kapasitesinin artmasıdır. Her tatbikat, kurum için bir “deneyim laboratuvarı” işlevi görür. Tatbikat sırasında yaşanan aksaklıkların nedenleri analiz edilerek, organizasyon yapısındaki eksikler, iletişim zafiyetleri veya kaynak planlama hataları belirlenir.

Elde edilen bu bilgiler doğrultusunda, kurumun Acil Durum Planı (ADP), Hastane Afet Planı (HAP) veya ilgili diğer operasyon planları revize edilir. Ayrıca personel eğitimleri, iletişim protokolleri ve kaynak yönetim prosedürleri güncellenir.

Sürekli iyileştirme yaklaşımı, her tatbikatın bir öncekine göre daha etkili olmasını sağlar. Bu döngüsel yapı, afet yönetiminde “Planla–Uygula–Kontrol Et–Önlem Al (PUKÖ)” prensibiyle uyumlu ilerler. Böylece tatbikatlar, yalnızca bir mevzuat gerekliliği değil, kurumsal gelişimin sürdürülebilir bir parçası haline gelir.

6.6. Değerlendirme Sürecinde Karşılaşılan Zorluklar

Her ne kadar değerlendirme süreci tatbikatların en öğretici evresi olsa da, uygulamada bazı zorluklar yaşanabilir. Bunların başında objektiflik eksikliği, yetersiz veri toplama ve geri bildirimlerin yeterince analiz edilmemesi gelir.

Bazı kurumlarda, değerlendirme raporları yalnızca “formal” bir gereklilik olarak hazırlanmakta, ancak çıktılar operasyonel süreçlere yansıtılmamaktadır. Bu durum, tatbikatların gerçek değerini düşürür. Ayrıca, gözlemcilerin yeterince deneyimli olmaması veya değerlendirme formlarının standartlaştırılmaması, sonuçların karşılaştırılabilirliğini azaltabilir.

Bu tür sorunların önlenmesi için, değerlendirme ekibinin önceden eğitim alması, standart performans kriterleri kullanılması ve raporların üst yönetimle paylaşılması gereklidir. Ayrıca, her tatbikatın sonunda “düzeltici faaliyet planı” hazırlanarak, önerilerin uygulanması takip edilmelidir.

6.7. Tatbikat Sonuçlarının Yaygınlaştırılması

Değerlendirme sürecinin son adımı, elde edilen bilgilerin yalnızca ilgili kurum içinde değil, sektörel ve ulusal düzeyde paylaşılmasıdır. AFAD, Sağlık Bakanlığı ve benzeri kurumlar, yapılan tatbikatlardan elde edilen iyi uygulama örneklerini, eğitim modüllerine veya rehber dokümanlara entegre ederek yaygınlaştırabilir.

Ayrıca, akademik kurumlar ve araştırma merkezleriyle iş birliği yapılarak tatbikat sonuçlarının bilimsel yayınlara dönüştürülmesi, afet yönetimi alanında bilgi birikiminin artmasına katkı sağlar. Bu yaklaşım, hem kurumsal hem toplumsal dayanıklılığı güçlendiren bir öğrenme ekosistemi oluşturur.

7. Türkiye ve Uluslararası Örnekler

Masabaşı acil durum tatbikatlarının etkinliği, ülkelerin afet yönetimi kültürü, kurumsal yapılanma düzeyi ve mevzuat altyapısıyla doğrudan ilişkilidir. Türkiye’de afet yönetimi uygulamaları son yıllarda önemli ölçüde kurumsallaşmış; AFAD, Sağlık Bakanlığı ve diğer kamu kurumları tarafından yürütülen tatbikatlarla ulusal düzeyde bir dayanıklılık kültürü geliştirilmeye başlanmıştır. Bununla birlikte, uluslararası düzeyde FEMA (ABD), WHO, NATO ve UNDRR gibi kuruluşlar da benzer tatbikat modelleri geliştirerek, kriz yönetimi alanında sistematik yaklaşımlar ortaya koymuştur. Bu bölümde, Türkiye’deki uygulamalar ve uluslararası örnekler karşılaştırmalı olarak incelenmektedir.

7.1. Türkiye’de Masabaşı Tatbikat Uygulamaları

Türkiye’de afet yönetimi, 2009 yılında kurulan Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) koordinasyonunda yürütülmektedir. AFAD, yerel yönetimler, bakanlıklar, sağlık kuruluşları, üniversiteler ve özel sektör kurumlarıyla iş birliği içinde, afet öncesi hazırlık süreçlerinin önemli bir bileşeni olarak masabaşı tatbikatlarını teşvik etmektedir.

a. AFAD Tatbikatları

AFAD’ın koordinasyonunda düzenlenen masabaşı tatbikatları, genellikle ulusal düzeyde bir afet senaryosu üzerine inşa edilir. Örneğin, “Türkiye Afet Müdahale Planı (TAMP)” kapsamında yürütülen tatbikatlarda, farklı hizmet grupları (ulaşım, haberleşme, sağlık, enerji vb.) bir araya gelerek kriz senaryoları üzerinde çalışır.

Bu tatbikatların temel amacı, afet anında kurumlar arası bilgi paylaşımını hızlandırmak, müdahale planlarının uygulanabilirliğini test etmek ve karar alma süreçlerinde olası gecikmeleri önlemektir.

AFAD ayrıca, “Deprem Haftası” ve “Afet Farkındalık Yılı” gibi tematik etkinliklerde, il düzeyinde masabaşı tatbikatları düzenlemekte ve yerel düzeyde yöneticilerin afet senaryoları üzerinden karar alma becerilerini geliştirmektedir. Bu uygulamalar, Türkiye’nin afet yönetimi sisteminin sadece operasyonel değil, stratejik kapasitesini de güçlendirmektedir.

b. Hastane Afet ve Acil Durum Planı (HAP) Tatbikatları

Sağlık Bakanlığı tarafından yayımlanan HAP Uygulama Yönetmeliği uyarınca, her hastanenin yılda en az bir kez masabaşı tatbikatı yapması zorunludur. Bu tatbikatlar, özellikle sağlık sisteminin afetlere karşı hazırlık düzeyini ölçmek açısından kritik öneme sahiptir.

HAP masabaşı tatbikatlarında genellikle senaryolar, depremler, kitlesel yaralanmalı trafik kazaları, yangınlar veya salgın hastalıklar üzerine kurgulanır.

Tatbikat sırasında; hastane yönetimi, afet koordinasyon birimi, lojistik, güvenlik, sağlık personeli ve idari birimler arasında bilgi akışı test edilir. Böylece, hastanelerin kriz anında yatak kapasitesi, tahliye planları, triaj uygulamaları ve iletişim protokolleri değerlendirilebilir.

Bazı üniversite hastaneleri ve şehir hastaneleri, HAP tatbikatlarını dijital simülasyon yazılımlarıyla destekleyerek gerçek zamanlı kriz senaryoları üretmektedir. Bu uygulamalar, klasik masa başı tatbikatlara kıyasla daha yüksek gerçeklik düzeyi ve performans ölçümü sağlamaktadır.

c. Diğer Kurumsal Uygulamalar

AFAD ve Sağlık Bakanlığı dışında, enerji tesisleri, sanayi kuruluşları, liman işletmeleri ve eğitim kurumları da düzenli olarak masabaşı tatbikatları gerçekleştirmektedir.

Örneğin, BOTAŞ, TEİAŞ, TÜPRAŞ ve TCDD gibi kritik altyapı kuruluşları, acil durum senaryolarını operasyonel süreklilik planlarıyla birleştirerek kurum içi tatbikatlar yürütmektedir.

Eğitim kurumlarında ise Milli Eğitim Bakanlığı'nın rehberliğinde yürütülen “Okul Afet ve Acil Durum Planı” kapsamında öğretmen ve idarecilerle masabaşı tatbikatları yapılmakta, öğrenci tahliye senaryoları yönetim düzeyinde planlanmaktadır.

7.2. Uluslararası Örnekler

Dünya genelinde afet yönetiminde masabaşı tatbikatları, stratejik karar alma ve koordinasyonun geliştirilmesi için standart bir araç haline gelmiştir. Farklı ülkeler, kendi risk profillerine göre özgün tatbikat modelleri geliştirmiştir.

a. FEMA (ABD) – Homeland Security Exercise and Evaluation Program (HSEEP)

ABD’de Federal Emergency Management Agency (FEMA) tarafından geliştirilen HSEEP modeli, dünyanın en kapsamlı tatbikat çerçevelerinden biridir. Bu model, tatbikat planlama, uygulama, değerlendirme ve iyileştirme süreçlerini standart hale getiren ayrıntılı bir metodoloji sunar.

FEMA’nın yürüttüğü Tabletop Exercise (TTX) programları, eyalet düzeyindeki kurumlar, hastaneler ve özel sektör organizasyonları tarafından yaygın biçimde uygulanmaktadır.

Her tatbikat sonrasında “After-Action Report (AAR)” hazırlanarak, güçlü yönler ve geliştirilmesi gereken alanlar belirlenir. Bu yaklaşım, tatbikatların bir öğrenme döngüsü oluşturmasını sağlar.

FEMA’nın en önemli katkılarından biri, tatbikatların dijital simülasyon ortamlarına taşınmasıdır. Özellikle siber saldırı, enerji kesintisi veya biyolojik tehdit senaryolarında, kurumlar arası koordinasyonun sanal ortamda test edilmesi, kriz hazırlığını büyük ölçüde artırmıştır.

b. NATO – Crisis Management Exercise (CMX)

NATO, üye ülkelerin askeri ve sivil kriz yönetimi kapasitelerini test etmek için düzenli olarak Crisis Management Exercise (CMX) tatbikatlarını yürütmektedir.

Bu tatbikatlar, hem stratejik hem de politik düzeyde yürütülür ve genellikle çok uluslu senaryolar içerir. Örneğin, 2023 CMX tatbikatında siber güvenlik tehditleri ve hibrit saldırı senaryoları ele alınmıştır.

NATO'nun CMX modeli, masabaşı tatbikatlarını sadece acil durum müdahalesi değil, politik karar alma süreçleri açısından da test etmesi bakımından benzersizdir.

Üye ülkelerin hükümet temsilcileri, diplomatik kararlar, bilgi paylaşımı ve kamuoyu iletişimi gibi boyutlarda birlikte çalışarak kolektif bir kriz yönetimi pratiği geliştirirler.

c. WHO – Health Emergency Simulation Exercises (SimEx)

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), özellikle pandemi, bulaşıcı hastalık salgınları ve sağlık sistemine yönelik krizlerde masabaşı tatbikatlarını yaygın olarak kullanmaktadır.

WHO'nun "SimEx Toolkit" adlı rehberi, ülkelerin sağlık sektöründe masa başı tatbikatlarını planlamasına ve uygulamasına yönelik standart bir çerçeve sunar.

COVID-19 pandemisi öncesinde WHO, Afrika ve Asya'daki birçok ülkede ulusal düzeyde salgın senaryolu tatbikatlar düzenlemiş; pandemi sürecinde bu çalışmaların kurumsal hazırlığı önemli ölçüde artırdığı görülmüştür.

Bu tatbikatlar, sağlık sisteminin esnekliğini ve çok paydaşlı karar süreçlerinin işlevselliğini test etmesi açısından dikkat çekicidir.

d. UNDRR ve Avrupa Birliği Uygulamaları

Birleşmiş Milletler Afet Riskinin Azaltılması Ofisi (UNDRR), afet risk yönetiminde dayanıklılık politikalarının geliştirilmesini teşvik ederken, bölgesel düzeyde masabaşı tatbikat rehberleri yayımlamaktadır.

Avrupa Birliği de Civil Protection Mechanism (UCPM) kapsamında, üye ülkelerin afet müdahale kapasitesini artırmak için çok uluslu masa başı tatbikatlar düzenlemektedir.

Bu tatbikatlarda odak noktası, sınır ötesi bilgi paylaşımı, kaynak tahsisi ve koordinasyondur. Özellikle sel, orman yangını ve endüstriyel kaza senaryoları sıkça ele alınmaktadır.

8. Sonuç ve Öneriler

Masabaşı acil durum tatbikatları, afet ve kriz yönetimi süreçlerinde stratejik planlamanın, karar alma mekanizmalarının ve kurumsal koordinasyonun güçlendirilmesinde temel bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu tatbikatlar, fiziksel sahada gerçekleşen operasyonel uygulamaların ön hazırlık safhasını oluşturarak, kurumların olası riskleri önceden görmesini, planlarını test etmesini ve eksiklerini belirlemesini sağlar. Aynı zamanda, afet yönetiminde görev alan paydaşlar arasında ortak bir dil ve anlayışın geliştirilmesine de önemli katkı sunar.

Türkiye’de AFAD, Sağlık Bakanlığı ve diğer kamu kurumlarının yürüttüğü tatbikat çalışmaları, afet bilincinin kurumsallaşmasına yönelik önemli adımlar olarak değerlendirilmektedir. Özellikle Türkiye Afet Müdahale Planı (TAMP) ve Hastane Afet ve Acil Durum Planı (HAP) çerçevesinde yürütülen uygulamalar, kurumların afetlere karşı hazırlık düzeyini artırmakta ve karar alma süreçlerini sistematik hale getirmektedir. Ancak, tatbikatların yalnızca mevzuat gereği yapılması değil, öğrenme ve iyileştirme döngüsünü destekleyecek biçimde uygulanması gerekmektedir.

Uluslararası örneklerde görüldüğü üzere, masabaşı tatbikatlarının başarısı; planlama sürecinin detaylılığı, senaryo gerçekçiliği, paydaş katılımı ve tatbikat sonrası değerlendirme mekanizmalarının etkinliği ile doğrudan ilişkilidir. FEMA (ABD) tarafından yürütülen HSEEP modeli veya NATO’nun CMX tatbikatları, bu konuda uluslararası standartlar oluşturmuş örneklerdir. Türkiye’nin mevcut tatbikat sistemini bu tür yapılandırılmış çerçevelerle uyumlu hale getirmesi, hem ulusal hem bölgesel düzeyde daha güçlü bir afet yönetim kültürü geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Masabaşı tatbikatlarının etkinliğini artırmak için şu öneriler öne çıkmaktadır:

1. Tatbikatların dijitalleşmesi:
2. Gerçek zamanlı simülasyon yazılımları, sanal toplantı platformları ve karar destek sistemleri kullanılarak tatbikatların etkileşim düzeyi artırılabilir. Dijital ortamda yürütülen tatbikatlar, coğrafi olarak farklı bölgelerdeki kurumların katılımını kolaylaştırır ve kayıt altına alınan verilerle performans analizi yapılmasına imkân tanır.
3. Tatbikat sonrası değerlendirme süreçlerinin güçlendirilmesi:
4. Her tatbikat sonrasında hazırlanacak “değerlendirme ve iyileştirme raporları (After Action Report)”, elde edilen kazanımların kurumsal hafızaya aktarılmasını sağlamalıdır. Bu raporlar sadece eksiklerin tespitine değil, aynı zamanda iyi uygulamaların yaygınlaştırılmasına da odaklanmalıdır.
5. Senaryo çeşitliliğinin artırılması:
6. Mevcut tatbikat senaryoları çoğunlukla deprem, yangın veya sağlık acil durumlarına odaklanmaktadır. Bunun yanı sıra, siber saldırı, enerji kesintisi, kimyasal sızıntı, kritik altyapı arızası gibi karmaşık kriz senaryolarının da tatbikatlara dahil edilmesi, çok boyutlu bir hazırlık yaklaşımını destekleyecektir.
7. Kurumsal iş birliğinin artırılması:
8. Masabaşı tatbikatlarının en önemli değeri, farklı kurumlar arasında koordinasyonun güçlendirilmesidir. Bu nedenle, sadece kamu kurumları değil; özel sektör, sivil toplum

kuruluşları ve akademik kurumlar da tatbikat planlamalarına dâhil edilmelidir. Çok paydaşlı yaklaşım, afet yönetiminde bilgi paylaşımını ve hızlı karar alma yeteneğini artırır.

9. Eğitim ve farkındalık entegrasyonu:

10. Tatbikatların yalnızca yönetici düzeyinde değil, çalışanlar ve toplum genelinde farkındalık yaratacak biçimde planlanması, afet kültürünün yaygınlaşmasını sağlar. Bu kapsamda, eğitim modülleriyle desteklenen masabaşı tatbikatları, teorik bilginin pratikle bütünleşmesine katkıda bulunur.

11. Uluslararası iş birliği ve deneyim paylaşımı:

12. Türkiye, AFAD ve ilgili kurumlar aracılığıyla uluslararası kuruluşlarla (UNDRR, WHO, NATO vb.) daha yakın iş birlikleri kurarak bilgi ve deneyim transferini artırabilir. Ortak tatbikat programları, hem teknik kapasiteyi geliştirir hem de bölgesel dayanıklılığı güçlendirir.

Sonuç olarak, masabaşı acil durum tatbikatları yalnızca bir “tatbikat” değil, aynı zamanda bir öğrenme, test etme ve kurumsal gelişim aracı olarak değerlendirilmelidir. Etkin bir planlama, güçlü bir senaryo kurgusu, gerçekçi bir uygulama ve kapsamlı bir değerlendirme döngüsü ile yürütülen tatbikatlar, kriz yönetiminin en zayıf halkası olan “koordinasyon eksikliğini” önemli ölçüde azaltacaktır.

Türkiye’nin mevcut kapasitesi, kurumsal yapılanması ve afet yönetimi vizyonu dikkate alındığında, masabaşı tatbikatlarının sistematik biçimde yaygınlaştırılması, gelecekteki afetlere karşı daha dirençli bir toplum ve kamu yönetimi yapısının inşasında kritik bir rol oynayacaktır.

Kaynakça

- T.C. Sağlık Bakanlığı. (2021). *HAP Uygulama Yönetmeliği – Madde 16*.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2017, 17 Ocak). *Training and Exercise Plan Workshop User's Handbook*. Erişim adresi: https://www.training.fema.gov/programs/emischool/el361toolkit/assets/tepw_users_handbook.pdf
- Businessballs. (2017, 16 Ocak). *Free team building games – Guide and tips*. Erişim adresi: <http://www.businessballs.com/teambuilding.htm>
- T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2012). *6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu*. Resmî Gazete.
- T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2013). *İşyerlerinde Acil Durumlar Hakkında Yönetmelik*. Resmî Gazete.
- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). (2014). *Açıklamalı Afet Yönetimi Terimleri Sözlüğü*. Ankara: AFAD Yayınları.
- National Nurse-Led Care Consortium. (2024). *Emergency preparedness tabletop exercises*. Erişim adresi: <https://nurseledcare.phmc.org/emergency-preparedness-tabletop-exercises.html>
- AlertMedia. (2024). *Tabletop exercises: How to test your emergency preparedness plan*. Erişim adresi: <https://www.alertmedia.com/blog/tabletop-exercises/>
- Ready.gov. (2024). *Business training and exercises*. Erişim adresi: <https://www.ready.gov/business/training/testing-exercise/exercises>
- Demirkasımoğlu, M. (2020). *Tatbikat Planlaması ve Yönetimi*. Ankara: AFAD Eğitim Yayınları.
- T.C. Sağlık Bakanlığı. (2023). *HAP Eğitim Programları ve Plan Tatbikatı Standart Operasyon Prosedürü (SOP)*.
- Uludağ Üniversitesi Hastanesi. (2023). *Tatbikat Formu*. Bursa.
- U.S. Army. (2017, 16 Ocak). *Exercise Planning (FM 25-4 Chapter 2)*. GlobalSecurity.org. Erişim adresi: <http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/25-4/Ch2.htm>
- Businessballs. (2017, 16 Ocak). *Free team building games – Guide and tips*. Erişim adresi: <http://www.businessballs.com/teambuilding.html>
- Özmen, B., & Tekeli Yeşil, S. (2023). Sağlık sistemleri için afet ve acil durum yönetimi planları. *Hastane Öncesi Dergisi*, 8(2), 213–228. <https://doi.org/10.54409/hod.1334457>
- Çınar, Ö., & Yıldız, E. (2024). Hastanelerde afet ve acil durumlara hazırlık düzeyi: Planlama, tatbikat ve birim etkinlik düzeyi etkisi. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, (43), 125–140. <https://doi.org/10.18092/ulikidince.1424720>

BÖLÜM 3

YANGIN TÜRLERİ VE KULLANILAN MADDELER

Mehmet Anıl BİLTEKİN¹ , Dilek ÖZTAŞ² ,Güven ÇANKAYA³

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt University, Institute of Science, CBRN (Chemical, Biological, Radiological and Nuclear) Threats and Management, ANKARA ORCID: 0009-0001-9641-9812

² Prof. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt University, Medical Faculty, Department of Public Health ANKARA ORCID: 0000-0002-8687-7238

³ Prof. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt University, Medical Faculty, Department of Radiology, ANKARA ORCID: 0000-0003-2932-1695

1. GİRİŞ

Yangın, tarih boyunca insan yaşamını tehdit eden, ekonomik kayıplara neden olan ve çevresel etkileriyle büyük sonuçlar doğuran bir felaket türü olmuştur. İnsanlık, ateşi kontrol altına aldığından bu yana, onun hem faydalarından hem de risklerinden etkilenmiştir. Modern çağda enerji, sanayi, ulaşım ve kentleşme gibi alanlarda artan faaliyetler, yangın riskini daha da yükseltmiştir. Bu nedenle yangın güvenliği, sadece itfaiye teşkilatlarının değil, toplumun tüm kesimlerinin sorumluluğu hâline gelmiştir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024).

Yangın, temelde yanıcı madde, ısı kaynağı ve oksijen üçlüsünün bir araya gelmesiyle ortaya çıkan kimyasal bir reaksiyondur. Bu üç unsurun herhangi biri ortadan kaldırıldığında yangın söner. Dolayısıyla yangınla mücadelede asıl amaç, bu üçlüden birini ortadan kaldırmaktır. Isının azaltılması, oksijenin kesilmesi veya yanıcı maddenin uzaklaştırılması bu sürecin temelini oluşturur (TS 862, 2018).

Yangınların türlerine göre farklı fiziksel ve kimyasal özellikler göstermesi, müdahale yöntemlerinin de değişmesine neden olur. Örneğin bir sıvı yangınına suyla müdahale etmek, alevleri söndürmek yerine yayılmasına sebep olabilir. Benzer şekilde elektrik kaynaklı bir yangında su kullanımı, can güvenliğini riske atar. Bu yüzden yangın türlerinin doğru tanımlanması, etkin ve güvenli müdahalenin temel adımıdır (AFAD, 2023).

Günümüzde yangın güvenliği yalnızca acil müdahale ile sınırlı değildir; önleyici tedbirler, farkındalık çalışmaları, mevzuat düzenlemeleri ve teknolojik sistemler de sürecin ayrılmaz parçalarıdır. Türkiye’de yürürlükte olan Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (2024), her binada alınması gereken asgari önlemleri belirlemiştir. Bu yönetmelik, yangın algılama sistemlerinden söndürme tesisatlarına, acil kaçış yollarından tahliye planlarına kadar birçok detayı kapsamaktadır.

Acil durum ve kriz yönetimi perspektifinden bakıldığında yangınlar, en hızlı gelişen ve en fazla koordinasyon gerektiren olaylardandır. Olayın ilk dakikalarında yapılacak doğru hamleler, hem can kayıplarını hem de maddi zararları büyük ölçüde azaltır. Bu nedenle, yangın yönetimi planlarının hazırlanması, personelin eğitimi ve tatbikatların düzenli yapılması zorunludur (AFAD, 2020).

Yangın güvenliğini etkileyen faktörlerden biri de insan davranışıdır. Panik, bilgi eksikliği ve koordinasyonsuzluk, çoğu zaman yangının kendisinden daha fazla zarara yol açmaktadır. Özellikle kamu binalarında, sanayi tesislerinde ve eğitim kurumlarında yangın bilinci oluşturulması, uzun vadeli güvenliğin en önemli unsurlarındandır (Aile ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı, 2022).

Yangın olaylarının ardından yapılan analizler, birçok yangının önlenemez olduğunu göstermektedir. Elektrik tesisatlarındaki aşırı yüklenme, yanıcı maddelerin yanlış depolanması, sigara izmaritleri, açık alev kullanımı gibi nedenler, yangınların büyük kısmını oluşturur. Bu da gösteriyor ki yangın, teknik bir arıza değil; çoğu zaman insan kaynaklı bir ihmaldir.

Bu noktada yangın türlerinin doğru anlaşılması, yalnızca müdahale sırasında değil, önleme aşamasında da hayati rol oynar. Hangi maddelerin nasıl yanabileceği, hangi ortamlarda risk oluşturabileceği ve hangi söndürme maddelerinin kullanılacağı bilgisi, etkin bir yangın yönetimi için temel bilgi alanıdır.

Yangınla mücadelede kullanılan maddeler de yıllar içinde büyük gelişim göstermiştir. Geleneksel olarak kullanılan suyun yanı sıra, günümüzde köpük, kuru kimyevi tozlar, karbondioksit, FM-200 ve Novec 1230 gibi özel gazlar kullanılmaktadır. Her biri belirli yangın türlerinde farklı etki mekanizmalarına sahiptir. Örneğin köpük, sıvı yangınlarda oksijenle teması keserken; CO₂ gazı, oksijen oranını düşürerek alevi boğar (TS EN 1568-2, 2022).

Bu derleme çalışmasının amacı, yangın türlerini ve her birine uygun söndürme maddelerini bilimsel bir çerçevede inceleyerek, acil durum yönetimi perspektifinden değerlendirmektir. Ayrıca mevcut mevzuatlar ve standartlar üzerinden Türkiye'deki uygulama durumuna da değinilecektir.

2. YANGININ OLUŞUMU VE YAYILMA MEKANİZMASI

Yangın, basit bir fiziksel olay gibi görünse de aslında oldukça karmaşık bir kimyasal reaksiyondur. Yanıcı madde ısı aldığı anda moleküller hareketlenir, buharlaşır veya gazlaşır. Bu gazlar oksijenle birleştiğinde yanma gerçekleşir. Ancak her madde aynı koşullarda tutuşmaz. Bir maddenin tutuşma sıcaklığı, kimyasal yapısına, yoğunluğuna ve ortam koşullarına göre değişir. Yangın, yanma üçgeni olarak bilinen üç temel unsurun (yanıcı madde, oksijen ve ısı) bir araya gelmesiyle başlar. Eğer bu üç unsurdan biri ortadan kaldırılırsa, yangın sona erer. Ancak bazı durumlarda bu üçlüye zincirleme reaksiyon da eklenir ve bu durumda yangın söndürme süreci daha karmaşık hâle gelir (TS EN 12845, 2021).

Isı, yangının başlaması için gerekli olan enerjiyi sağlar. Bu enerji; sürtünme, elektrik arkı, kimyasal reaksiyon veya açık alev gibi farklı kaynaklardan gelebilir. Yanıcı madde, ısı ile birleştiğinde buharlaşır veya gazlaşır; oksijenle temas ettiğinde yanma başlar. Ortamda yeterli oksijen ve yanıcı madde varsa, alevlenme kaçınılmaz olur (AFAD, 2023).

Yangının yayılma hızı, ortam koşullarına, malzemenin türüne ve havalandırma durumuna göre değişir. Özellikle kapalı ortamlarda sıcak gazların yükselmesiyle ısı taşınım (konveksiyon) meydana gelir ve yangın yukarı katlara hızla ilerler. Aynı zamanda radyasyon yoluyla ısı çevredeki yanıcı maddelere iletilir, böylece yangın geniş bir alana yayılır (AFAD, 2023).

Yangınlar üç ana şekilde yayılır:

1. İletim (Conduction): Isı, metal gibi iletken yüzeylerden geçerek yakın bölgelere ulaşır.
2. Taşınım (Convection): Sıcak hava yükselir, soğuk hava alçalır; bu da sıcaklığın katlar arasında hızla yayılmasına neden olur.
3. Işıma (Radiation): Yanan bölgeden yayılan kızılötesi enerji, uzaktaki yanıcı maddeleri ısıtarak alev almasına neden olabilir.

Özellikle kapalı ortamlarda duman hareketi de büyük tehlike oluşturur. Duman, görüşü engeller, toksik gaz içerir ve panik yaratır. Bu nedenle binalarda duman tahliye sistemleri, basınçlandırma fanları ve yangın kapıları hayati öneme sahiptir (TS EN 12845, 2021).

Yangının yayılma hızını etkileyen faktörler:

- Ortam sıcaklığı ve nem
- Yapı malzemelerinin yanıcılığı
- Havalandırma sistemlerinin konumu
- Yanıcı maddelerin miktarı

- İnsan davranışı (kapı açma, kaçış yönü, panik seviyesi)

Modern yangın güvenliği yaklaşımı, “önleme, algılama, müdahale ve iyileştirme” aşamalarından oluşur. Bu dört aşama bir bütün olarak ele alındığında, yangın sonrası zararlar büyük ölçüde azaltılabilir. Önleme aşamasında risk analizleri yapılır, söndürme sistemleri kurulmadan önce tehlike noktaları belirlenir. Algılama sistemleri (duman dedektörleri, ısı sensörleri) erken uyarı sağlar. Müdahale aşaması, itfaiye ekiplerinin profesyonel çalışması kadar, bina sakinlerinin eğitimiyle de doğrudan ilişkilidir.

Türkiye’de özellikle son yıllarda otomatik sprinkler sistemleri, yangın kapıları, basınçlandırma fanları ve acil çıkış yönlendirmeleri gibi sistemler yaygınlaşmıştır. Bu gelişmeler, hem bina güvenliğini artırmakta hem de insan kaynaklı hataları en aza indirmektedir (ÇSB, 2020).

Modern yangın mühendisliği, bu faktörleri dikkate alarak yangın senaryoları oluşturur. Örneğin bir alışveriş merkezinde yangın çıkarsa, dumanın 5 dakika içinde hangi kata ulaşacağı, kaçış yollarının ne kadar sürede dolacağı ve sprinkler sistemlerinin kaç saniyede devreye gireceği hesaplanır. Bu tür modellemeler, acil durum planlarının oluşturulmasında hayati rol oynar (AFAD, 2020).

3. YANGIN ÇEŞİTLERİ

3.1 A Sınıfı Yangınlar (Katı Madde Yangınları)

A sınıfı yangınlar, günlük yaşamda en sık karşılaşılan yangın türleridir. Yanıcı madde genellikle organik kökenli katı maddelerdir: odun, kâğıt, pamuk, tekstil, deri, kauçuk ve bazı plastikler bu gruba girer. Bu maddeler yandıklarında kor oluşturarak uzun süre ısı üretirler.

A Sınıfı Yangınların Özellikleri

- Yanma derinliği vardır, yani yüzey söndürülse bile iç kısımlar yanmaya devam eder.
- Duman yoğunluğu orta düzeydedir.
- Yangın genellikle yavaş başlar, ancak kısa sürede yayılır.
- Söndürme sonrası yeniden tutuşma riski yüksektir.

A sınıfı yangınların en etkili söndürme yöntemi soğutmadır. Su, yüksek ısı kapasitesi sayesinde ortamın sıcaklığını düşürür. Ayrıca buharlaşırken oksijenin bir kısmını ortamdan uzaklaştırarak yangını boğar.

Ancak bazı özel durumlarda suyun kullanımı riskli olabilir. Elektrik tesisatının bulunduğu ortamlarda su, elektrik çarpması riski doğurabilir. Ayrıca bazı kimyasallar, suyla temas ettiğinde tepkimeye girip patlayabilir (örneğin sodyum veya potasyum). Bu gibi durumlarda su sisi sistemleri veya kuru kimyevi tozlar tercih edilir.

A Sınıfı Yangınlarda Kullanılan Söndürme Maddeleri

1. Su: En temel ve etkili söndürme maddesidir.
2. Su sisi (mist): Mikro boyutta su damlacıkları oluşturur, elektrik riski olmayan ortamlarda güvenlidir.
3. Kuru kimyevi toz: Geçici kontrol sağlar, genellikle su sistemine destek olarak kullanılır.
4. Köpük: Yüzeysel alevleri bastırmak için tercih edilir.

Gerçek Bir Örnek:

2017 yılında Ankara’da bir tekstil atölyesinde çıkan yangında, depolanan kumaş ve pamuk ruloları kısa sürede tutuşmuş, yangın binanın üç katına yayılmıştır. İtfaiye raporlarına göre yangının nedeni aşırı ısınan ütü pres makinesi olarak belirlenmiştir. Uygun söndürme sistemi (su spreyi) olmaması nedeniyle yangın 2 saatte kontrol altına alınabilmiştir. Bu olay, A sınıfı yangınlarda erken algılama ve otomatik sprinkler sistemlerinin önemini açıkça göstermektedir (Elektrik Mühendisleri Odası, 2023).

3.2 B Sınıfı Yangınlar (Sıvı Madde Yangınları)

B sınıfı yangınlar, parlayıcı ve yanıcı sıvıların tutuşmasıyla meydana gelir. Benzin, motorin, tiner, boya solventleri, alkol, eter, yağlar ve birçok kimyasal madde bu gruba girer. Bu tür sıvılar, yüzeylerinden buharlaşarak yanıcı gazlar üretir. Buharlaşan gazlar oksijenle karıştığında, çok düşük sıcaklıklarda bile tutuşabilir.

Bu yangınlar genellikle patlama riski taşıyan olaylardır. Yanıcı sıvılar, suyla karışmadıkları için, yangın yüzeyinde yüzer ve alevlerin yayılmasına neden olur. Bu nedenle su ile müdahale edilmez.

Suyun kullanılması, yangını söndürmek yerine geniş bir alana yayılmasına yol açar. Bunun yerine köpük kullanımı tercih edilir.

Köpüğün Çalışma Prensibi

Köpük, su, köpük konsantresi ve havanın karışımından oluşur. Yanan sıvının yüzeyine yayılarak oksijenle temasını keser. Aynı zamanda sıvının buharlaşmasını engeller, böylece alevin yeniden oluşmasını önler.

Köpük tabakası, suyun ısı emme etkisiyle birleştiğinde hem boğma hem de soğutma işlevini yerine getirir.

Köpük Türleri

1. AFFF (Aqueous Film Forming Foam): En yaygın kullanılan köpük türüdür. Hidrokarbon bazlı yangınlarda çok etkilidir.
2. Protein Bazlı Köpükler: Doğal kaynaklı olup yüksek sıcaklığa dayanıklıdır, çevreye daha az zarar verir.
3. Fluoroprotein Köpükler: Uzun süreli koruma sağlar, özellikle akaryakıt depolama tesislerinde tercih edilir.
4. Sentetik Köpükler: Hızla yayılır, kimyasal dayanımı yüksektir.

Alternatif Söndürme Maddeleri

- Kuru kimyevi toz: Özellikle LPG istasyonlarında ve kimyasal depolarda tercih edilir.
- Karbondioksit (CO₂): Ortamdaki oksijen oranını düşürerek boğma etkisi yaratır.
- FM-200 veya Novec 1230 gazları: Kapalı hacimlerde temizlik gerektirmeden etkili söndürme sağlar.

Gerçek Bir Örnek:

2020 yılında Kocaeli’nde bir akaryakıt terminalinde çıkan yangın, hatalı kaynak işlemi sonucu tutuşan yakıt buharından kaynaklanmıştır. Köpük sistemlerinin devreye girmesi 2 dakika gecikmiş, bu süre zarfında alevler 3000 metrekarelik alanı sarmıştır. Olay sonrası yapılan analiz, AFFF tipi köpüğün en etkili çözüm olduğunu ortaya koymuştur (Alkoç,2018).

3.3 C Sınıfı Yangınlar (Gaz Yangınları)

C sınıfı yangınlar, yanıcı gazların (LPG, propan, butan, metan, doğalgaz vb.) tutuşması sonucu ortaya çıkar. Gazlar, yüksek difüzyon hızları nedeniyle ortamda hızla yayılır. Bu nedenle C sınıfı yangınlarda en büyük risk, patlama (deflagrasyon) tehlikesidir (AFAD, 2020).

Bu tür yangınlarda öncelik gaz akışını durdurmaktır. Valf kapatılmadan yapılan müdahale, gaz sızıntısının devam etmesine ve ikinci bir patlamaya yol açabilir. Bu nedenle müdahaleden önce gaz kaynağı kapatılmalı, ardından söndürme işlemi başlatılmalıdır.

Kullanılan Söndürme Maddeleri

- Karbondioksit (CO₂): Ortamdan oksijeni uzaklaştırarak boğma etkisi yapar. Elektriksel iletkenliği yoktur, bu nedenle güvenlidir.
- İnert gaz karışımları (Azot, Argon): Oksijen oranını düşürür, ancak insan bulunmayan alanlarda kullanılmalıdır.
- FM-200 ve Novec 1230: Halon gazlarının çevre dostu alternatifleridir. Elektronik ortamlarda güvenle kullanılabilir.

C Sınıfı Yangınlarda Özel Önlemler

Gaz yangınlarında söndürmeden sonra ortam havalandırması yapılmalıdır. Aksi takdirde gaz kalıntıları birikir ve kıvılcım ile yeniden tutuşabilir.

Ayrıca C sınıfı yangınlar için özel gaz algılama sensörleri ve otomatik shut-off (kapatma) vanaları kullanılır (TS EN 15004, 2021).

Gerçek Bir Örnek:

2018'de Ankara OSTİM'deki bir sanayi tesisinde LPG hattında meydana gelen sızıntı sonucu büyük bir patlama yaşanmıştır. Yangın kısa sürede kontrol altına alınsa da, olayda iki kişi yaralanmış, 12 iş yeri hasar görmüştür. Soruşturma raporuna göre, gaz dedektörleri çalışır durumda olsaydı yangın önlenebilirdi (AFAD, 2020).

C sınıfı yangınlarda en önemli unsur, önleyici sistemlerdir. Gaz kaçak dedektörleri, otomatik kapatma vanaları ve alarm sistemleri, yangın başlamadan önce durumu kontrol altına alır. Bu sistemler TS EN 15004 standardına göre kurulmalıdır.

3.4 D Sınıfı Yangınlar (Metal Yangınları)

D sınıfı yangınlar, reaktif metal elementlerin (magnezyum, titanyum, sodyum, potasyum, zirkonyum, alüminyum tozu vb.) tutuşmasıyla meydana gelir. Bu metaller genellikle yüksek sıcaklıklarda erime noktasına ulaşır ve oksijenle reaksiyona girerek alevli bir yanma oluşturur. Bu tür yangınlar genellikle dökümhanelerde, alüminyum üretim tesislerinde, uçak parçaları imalatında veya metal işleme atölyelerinde görülür (TS 862, 2018).

Metal yangınlarının en önemli özelliği, çok yüksek sıcaklıkta (2000°C ve üzeri) yanmalarıdır. Bu nedenle geleneksel söndürme yöntemleri işe yaramaz. Özellikle su, köpük veya karbondioksit kullanımı son derece tehlikelidir, çünkü bu maddeler metallerle reaksiyona girerek hidrojen gazı üretir; bu da patlamaya yol açabilir (OGM, 2023).

D Sınıfı Yangınlarda Kullanılan Söndürme Maddeleri

- Metal tozları: Sodyum klorür (NaCl), grafit, bakır tozu veya özel alaşım tozları, oksijenle teması keser.
- Kuru toz söndürücüler: Özellikle D sınıfı yangınlar için geliştirilmiş özel tozlar (Met-L-X veya Na-X) tercih edilir.
- Kum veya dolomit: Bazı durumlarda, düşük maliyetli alternatif olarak yüzey kaplama yöntemiyle kullanılır.

Bu tozlar, yüksek sıcaklıktaki metal yüzeyin üzerine yayıldığında eriyip koruyucu bir kabuk tabakası oluşturur. Böylece oksijen teması kesilir ve yangın yavaşça söner.

D Sınıfı Yangınlarda Uygulama Kuralları

- Yangına uzaktan müdahale edilmelidir.
- Metal sıçramalarına karşı özel koruyucu kıyafet giyilmelidir.
- Yangın söndürüldükten sonra metal artıklarının yeniden tutuşma riski olduğu için soğutma ve izleme yapılmalıdır.

Metal yangınlarında insan hataları çok ciddi sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle bu tür ortamlarda çalışan personelin özel eğitim alması zorunludur (HSSGM, 2022).

Gerçek Bir Örnek:

2021’de Eskişehir’deki bir uçak parçaları üretim tesisinde magnezyum tozlarının depolandığı alanda yangın çıkmıştır. İtfaiye ekipleri su yerine özel metal tozu kullanarak alevleri 15 dakikada kontrol altına almıştır. Suyun kullanılması hâlinde büyük bir patlama riski doğacağı rapor edilmiştir (MMO, 2019).

Bu yangınlar, özel eğitim gerektirir. Personelin bilinçsiz müdahalesi ölümcül sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle metal işleme tesislerinde yangın tatbikatları düzenli yapılmalıdır.

3.5 E Sınıfı Yangınlar

(Elektrik Kaynaklı Yangınlar)

E sınıfı yangınlar, elektrik akımının neden olduğu ısınma, kısa devre veya izolasyon hatası sonucu çıkan yangınlardır. Bilgisayar sistemleri, elektrik panoları, trafolar, kablo kanalları gibi yerlerde sık görülür.

Bu tür yangınların en tehlikeli yönü, elektrik çarpması riskidir. Yanıcı maddenin türü ne olursa olsun, elektrik enerjisi yangının seyrini değiştirir (TS EN 15004, 2021).

E Sınıfı Yangınlarda Kullanılmaması Gereken Maddeler

- Su: Elektriği ilettiği için kesinlikle kullanılmaz.
- Köpük: Bazı köpük türleri iletken olabilir ve riski artırır.

Kullanılması Gereken Maddeler

- Karbondioksit (CO₂): Elektriksel iletkenliği yoktur. Ortamdaki oksijeni azaltarak alevi boğar.
- FM-200 (HFC-227ea): Elektronik sistemlere zarar vermez. Temizlik gerektirmez, 10 saniyeden kısa sürede etki eder.

- Novec 1230 (FK-5-1-12): En yeni söndürme gazlarından biridir. Sıvı halde depolanır, püskürtüldüğünde gaz fazına geçer. Çevre dostudur.
- Kuru kimyevi toz: Elektrik panoları ve küçük sistemlerde geçici kontrol için kullanılabilir.

Bu tür yangınlar genellikle kapalı ortamlarda meydana geldiği için gazlı söndürme sistemleri tercih edilir.

Bu sistemler, sensörler yardımıyla yangını algılar ve saniyeler içinde gazı ortama boşaltır. İnsan bulunmayan alanlarda kullanıldığında, yangın çok kısa sürede kontrol altına alınabilir.

Elektrik yangınlarında ayrıca termal kameralar ve izleme sistemleri de kullanılmaktadır. Bu sistemler, kablolardaki ısınmayı tespit ederek erken uyarı sağlar (ÇSB, 2020).

Gerçek Bir Örnek:

2022'de İstanbul'da bir veri merkezinde kısa devre sonucu çıkan yangın, otomatik Novec 1230 sisteminin devreye girmesiyle 30 saniyede söndürülmüştür. Sistem sayesinde milyonlarca dolar değerinde ekipman zarar görmeden korunmuştur (Alkoç,2018).

3.6 F Sınıfı Yangınlar

(Yağ ve Pişirme Yağı Kaynaklı Yangınlar)

F sınıfı yangınlar, yüksek sıcaklıkta ısınmış bitkisel veya hayvansal kökenli yağların tutuşması sonucu meydana gelen yangınlardır. Bu yangın türü özellikle endüstriyel mutfaklar, restoranlar, oteller, hastaneler, yemekhaneler ve gıda üretim tesislerinde yaygın olarak görülür. Kızartma yağları, pişirme yağları ve hayvansal yağlar bu sınıfa giren başlıca yanıcı maddelerdir.

F sınıfı yangınların en ayırt edici özelliği, yağların çok yüksek sıcaklıklara ulaşması ve yüzeyde alevli yanma göstermesidir. Bu tür yağlar tutuştuğunda, alevler kısa sürede yükselir ve yoğun ısı açığa çıkar. Yağın sıcaklığı çoğu zaman 300°C'nin üzerindedir, bu da söndürme işlemi son derece tehlikeli hâle getirir (AFAD, 2023).

F Sınıfı Yangınlarda Kullanılan Söndürme Maddeleri

F sınıfı yangınlar için özel olarak geliştirilmiş söndürme sistemleri kullanılmalıdır. Bu sistemlerin temel amacı, yağı hem soğutmak hem de yüzeyini kaplayarak oksijenle temasını kesmektir.

Islak Kimyasal Söndürücüler (Wet Chemical):

F sınıfı yangınlar için en etkili yöntemdir. Bu söndürücüler potasyum asetat, potasyum sitrat veya potasyum karbonat bazlı kimyasallar içerir. Yağın üzerine püskürtüldüğünde kimyasal reaksiyon (sabunlaşma) meydana gelir ve yağın yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşur. Bu tabaka, yeniden tutuşmayı önler ve yangını kalıcı olarak söndürür (TS EN 3-7, 2021).

Otomatik Davlumbaz Söndürme Sistemleri:

Endüstriyel mutfaklarda kullanılan bu sistemler, fritözler ve ocaklar üzerinde otomatik olarak devreye girer. Isıyı algılayan sensörler sayesinde yangın başladığında saniyeler içinde söndürme maddesi ortama püskürtülür. Aynı anda gaz ve elektrik akışı kesilerek ikincil riskler ortadan kaldırılır.

Köpük Sistemleri:

Sınırlı durumlarda kullanılabilir, ancak klasik köpükler F sınıfı yangınlar için yeterli değildir. Yalnızca yağ yangınlarına uygun özel formülasyonlar tercih edilmelidir.

Gerçek Bir Örnek:

AFAD ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan yangın güvenliği raporlarında, endüstriyel mutfaklarda meydana gelen yangınların önemli bir bölümünün kızartma yağlarının aşırı ısınmasından kaynaklandığı belirtilmektedir. Bu olayların büyük kısmında yangına ilk müdahalenin yanlış yapılması, alevlerin davlumbaz ve havalandırma sistemleri aracılığıyla yayılmasına neden olmuştur. Aynı raporlarda, ıslak kimyasal söndürme sistemlerinin kullanıldığı mutfaklarda yangının kısa sürede kontrol altına alındığı ve maddi hasarın önemli ölçüde azaldığı vurgulanmaktadır (AFAD, 2020; ÇSB, 2020).

4. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Yangın türlerinin doğru sınıflandırılması, yalnızca söndürme sürecinin değil, önleme ve planlama faaliyetlerinin de temelini oluşturur. Her yangın türü farklı davranış gösterdiği için, tüm risk yönetimi planları bu farklılıklara göre şekillendirilmelidir.

Yangınla mücadelede kullanılan maddelerin seçimi, olayın niteliğine göre yapılmalıdır. Yanlış seçilen bir söndürme maddesi, yangını büyütebilir ya da ikincil tehlikeler yaratabilir.

Örneğin;

- Sıvı yangınında su kullanımı, yangını yayabilir.
- Elektrik yangınında su veya köpük, can güvenliğini tehlikeye atar.
- Metal yangınında su, patlayıcı reaksiyon oluşturur.

Bu nedenle yangın eğitimi ve farkındalığı, teknik ekipman kadar önemlidir.

Yangın güvenliği kültürü oluşturulmadan, yalnızca ekipmanla korunmak mümkün değildir. Her kurumda, özellikle yüksek riskli tesislerde (hastaneler, sanayi alanları, laboratuvarlar, alışveriş merkezleri) düzenli tatbikatlar ve eğitimler yapılmalıdır (AFAD, 2020).

Son yıllarda teknolojik gelişmeler yangın güvenliği sistemlerinde önemli ilerlemeler sağlamıştır.

- Akıllı algılama sistemleri, dumanın partikül yoğunluğunu ölçerek erken uyarı sağlar.
- Otomatik sprinkler sistemleri, yangını büyümeden kontrol eder.
- Gazlı söndürme sistemleri, elektronik ortamlar için güvenli bir çözüm sunar.

- Uzaktan izleme teknolojileri, büyük tesislerde 24 saat yangın riskini takip eder.

Türkiye’deki Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (2024) ve TSE standartları, bu teknolojilerin zorunlu hale getirilmesini sağlamaktadır. Ancak uygulamada hâlâ eksikler mevcuttur. Özellikle küçük işletmelerde maliyet kaygısı nedeniyle yangın sistemleri güncel standartlara uygun kurulmamaktadır.

Sonuç olarak, yangın güvenliği yalnızca teknik bir konu değil, aynı zamanda yönetsel bir süreçtir. Acil durum planlaması, personel eğitimi, ekipman bakımı ve mevzuat takibi bu sürecin tamamlayıcı parçalarıdır. Yangın türleri ve söndürme maddeleri konusunda bilgi sahibi olmak, bir kurumun kriz yönetimi kapasitesini doğrudan artırır.

Bu nedenle bu derleme, yalnızca yangınla mücadeleyi değil, bütüncül bir acil durum yönetimi anlayışını desteklemeyi amaçlamaktadır.

KAYNAKÇA

- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024).Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik Kılavuzu. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/mesleki hizmetler/haberler/r2-b-nalarin-yangin-korunmasi-hakkinda-yonetmel-k-kilavuzu-etk-les-ml-20241221082232.pdf>
- AFAD – Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2023).Yangınla Mücadele Eğitim Rehberi. <https://www.afad.gov.tr/afadem/yangin>
- Türk Standartları Enstitüsü. (2018). TS 862 – Seyyar Yangın Söndürücüler Standardı. <https://intweb.tse.org.tr/standard/standard/Standard.aspx>
- Türk Standartları Enstitüsü. (2022). TS EN 1568-2 – Köpük Konsantreleri Standardı. <https://intweb.tse.org.tr/standard/standard/Standard.aspx>
- Türk Standartları Enstitüsü. (2021). TS EN 12845 – Sabit Yangın Söndürme Sistemleri. <https://intweb.tse.org.tr/standard/standard/Standard.aspx>
- Türk Standartları Enstitüsü. (2021). TS EN 15004 – Gazlı Söndürme Sistemleri Standardı. <https://intweb.tse.org.tr/standard/standard/Standard.aspx>
- Orman Genel Müdürlüğü. (2023). Orman Yangınlarıyla Mücadele Rehberi. <https://www.ormancilardernegi.org/YanginYayinFiles/22bfea55-e42b-43a5-8d9f-05102c6cb81a.pdf>
- Sağlık Bakanlığı HSSGM. (2022).Yangın Önleme ve Söndürme Yönergesi. https://www.hssgm.gov.tr/content/documents/yonergeler_genelgeler/Yang%C4%B1n%20%C3%96nleme%20ve%20S%C3%B6nd%C3%BCrme.pdf
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2020). Yangınla Mücadele ve Korunma Sistemleri Şartnamesi. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler/sartname-mgts-12-yanginla-mucadele-ve-korunma-sistemleri-20201026120557.pdf>
- Aile ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı. (2022).Kurumlarda Acil Durum ve Yangın Yönetimi Rehberi. <https://www.aile.gov.tr/media/116860/yangin-onleme-ve-sondurme-yonergesi-23092022.pdf>
- AFAD. (2020).Acil Durum ve Kriz Yönetimi Rehberi. https://erdemli.meb.gov.tr/meb_iys_dosyalar/2024_04/18102543_21114326_afet_ve_acil_durumlar_planlama_rehberi_mersin.pdf
- Karakulak, E., Eyigün, Y., (2022). Kent İçi Raylı Sistemlerde Ve Ana Hat Demiryollarında Acil Durumda Yolcu Tahliyesi Journal of Technology and Applied Sciences 4(2), 157-172. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1806890?utm_source=.com
- A. Alkoç ve F. Yılmaz, “İmalat Tesislerinde Yangın Tesisatlarından Kaynaklanan Risklerin Sıralama Yöntemi İle Analizi”, *kisgd*, c. 2, sy. 1, ss. 1–11, 2018, doi: 10.33720/kisgd.415363. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/497263?utm_source=.com

Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği / MMO. (2019). Kimyasal temiz gazlı söndürme sistemleri (teknik kılavuz / inceleme makalesi). *MMO teknik yayın PDF*. https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/011_11.pdf?utm_source=.com

Elektrik Mühendisleri Odası. (2023). Elektrik Panolarında Yangın Söndürme Uygulamaları. Ankara. https://www.emo.org.tr/ekler/c8ae2c220617ca6_ek.pdf?utm_source=.com

BÖLÜM 4

DEPREMLERE MÜDAHALE VE ARAMA-KURTARMA ÇALIŞMALARI: STRATEJİLER, KAPASİTE VE ULUSAL- ULUSLARARASI PERSPEKTİF

Yunus ÇİÇEK¹, Güven ÇANKAYA², Dilek ÖZTAŞ³

¹ P.Ütg. Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, KBRN Tehditleri Yönetimi, Ankara ORCID ID: 0009-0006-6061-9931

² Prof.Dr. Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara ORCID ID: 0000-0003-2932-1695

³ Prof.Dr. Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Halk Sağlığı Anabilim Dalı, Ankara ORCID ID: 0000-0002-8687-7238

1. GİRİŞ

Depremler, önceden tahmin edilemeyen ve ani etkileriyle ciddi can ve mal kayıplarına yol açan doğal afetlerdir (TMMOB, 2023). Özellikle büyük şehirlerde ve yoğun yapılaşmanın olduğu alanlarda, depremin yıkıcı etkileri ölümlere ve altyapı hasarına doğrudan yol açabilir (İçişleri Bakanlığı, 2024). Bu nedenle afet yönetiminin müdahale aşaması, felaketin etkilerini azaltmada kritik bir rol oynar. Enkaz altında kalan kişilerin hayatını kurtarmak, deprem sonrası en öncelikli görevlerden biridir. Araştırmalar, felaketin ilk 24-48 saatinin kazazedelerin hayatta kalma ihtimali açısından belirleyici olduğunu göstermektedir (Rom ve Kelman, 2020). Bu süreçte ekiplerin hızlı hareket etmesi ve doğru ekipman kullanması, kurtarma çalışmalarının etkinliğini büyük ölçüde artırır.

Son yıllarda yaşanan Elazığ-Sivrice ve Kahramanmaraş depremleri, Türkiye’de afet müdahalesinin bazı eksikliklerini gözler önüne sermiştir. Özellikle kritik iletişim kanallarının çökmesi, kurumlar arası koordinasyon eksiklikleri ve teknolojik araçların yeterince etkili kullanılamaması, kurtarma çalışmalarını zorlaştırmıştır. Bu deneyimler, gelecekteki müdahalelerin daha iyi planlanması ve kaynakların daha verimli kullanılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Geleceğe dönük olarak, afet ekiplerinin birbirleriyle uyum içinde çalışması, gerçek zamanlı bilgi sağlayan teknolojilerin kullanımı ve ekiplerin afet bölgelerine göre önceden planlanması, kurtarma operasyonlarının başarısı için kritik önemdedir (TÜBİTAK, 2025). Bu çalışma, depremlerde müdahale ve arama-kurtarma süreçlerinin mevcut durumunu incelemeyi ve bu süreçlerin verimliliğini artıracak çözüm önerilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

2- Türkiye’nin Depremselliği ve Afet Gerçeği

Türkiye, Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer alması sebebiyle dünyanın en yüksek sismik riske sahip ülkelerinden biridir. Kuzey Anadolu, Doğu Anadolu ve Batı Anadolu fay hatları boyunca sık sık yıkıcı depremler meydana gelmekte, bu durum ülkenin afet yönetim kapasitesini sürekli sınamaktadır. Son yıllarda art arda yaşanan büyük depremler, yalnızca yapı stokunun değil, müdahale mekanizmalarının da güçlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

Depremler, fiziksel yıkımların ötesinde sosyal, ekonomik ve yönetsel etkiler de doğurmaktadır. Kentleşme oranının yüksek olduğu Türkiye’de, nüfus yoğunluğu ve plansız yapılaşma, riskin büyümesine neden olmaktadır. Dolayısıyla deprem, yalnızca jeolojik bir olay değil; çok boyutlu bir kriz olarak ele alınmalı ve yönetsel yaklaşımlar bu gerçekliğe göre şekillendirilmelidir.

Afet yönetiminde başarının temel belirleyeni, yalnızca teknik kapasite değil; aynı zamanda yönetim, eğitim, toplumsal farkındalık ve mevzuat uyumudur. Bu nedenle, Türkiye’nin afet gerçeğiyle başa çıkabilmesi için mevcut yapısının, özellikle **KBRN riskleriyle entegre afet yönetimi perspektifi** doğrultusunda güçlendirilmesi gerekmektedir.

2.1. Depremlerin Toplumsal, Ekonomik ve Çevresel Etkileri

Depremler, büyük can kayıplarının yanı sıra, ekonomik üretim kapasitesinde ciddi düşüslere, işsizlik artışına ve sosyal istikrarsızlığa neden olmaktadır. Türkiye örneğinde, 1999 Marmara Depremi ve 2023 Kahramanmaraş Depremleri gibi olaylar, milli gelirde kalıcı etkiler yaratmış, devletin yeniden yapılanma sürecinde büyük kaynak harcamasını gerektirmiştir. Afet sonrası süreç, yalnızca fiziksel enkazın kaldırılmasıyla sınırlı kalmayıp, ekonomik ve sosyal rehabilitasyon çalışmalarını da kapsar.

Çevresel etkiler de göz ardı edilmemelidir. Depremler, su kaynaklarının kirlenmesi, toprağın yapısal bozulması ve kimyasal sızıntılar gibi ikincil çevre felaketlerine yol açabilir. Özellikle endüstriyel bölgelerde yaşanan sarsıntılar, kimyasal veya radyolojik sızıntı riskini beraberinde getirerek afetin

boyutunu büyütür. Bu nedenle çevresel güvenlik, afet yönetiminin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir.

En yakın örnek olarak 6 Şubat 2023'te meydana gelen Kahramanmaraş merkezli depremler, Türkiye'de son yıllarda yaşanan en büyük afetlerden biri olmuştur. Deprem, 11 ili etkileyerek konutlarda, altyapıda ve kamu hizmetlerinde ağır hasarlara yol açmıştır. Özellikle çok sayıda binanın yıkılması ya da oturulamayacak duruma gelmesi, milyonlarca insanı barınma sorunuyla karşı karşıya bırakmıştır.

Sanayi tesisleri ve iş yerlerinin zarar görmesi, üretimi ve istihdamı olumsuz etkilemiş; bölgesel ekonomilerde ciddi kayıplar yaşanmıştır. Eğitim kurumları ve sağlık tesislerinin devre dışı kalması, temel hizmetlerin aksamasına neden olmuştur. Deprem sonrası başlayan toparlanma süreci, yalnızca fiziksel onarımı değil, ekonomik ve sosyal yaşamın yeniden kurulmasını da gerektirmiştir.

Depremler, yalnızca fiziksel yapıları tahrip eden olaylar değil, aynı zamanda bireylerin duygusal dengesi ve toplumsal düzen üzerinde derin izler bırakan çok boyutlu krizlerdir. Bu tür afetlerde insanlar, güven duygularını yitirir; korku, çaresizlik ve belirsizlik hissi yaygınlaşır. Zamanla bu ruhsal sarsıntı, farklı psikolojik rahatsızlıkların ortaya çıkmasına neden olabilir. Deprem sonrasında sıkça görülen depresyon, anksiyete, uykusuzluk ve travma sonrası stres bozukluğu gibi sorunlar, toplumun genel refahını doğrudan etkiler. Özellikle çocuklar, yaşlı bireyler ve kadınlar gibi hassas gruplar, bu süreçten en fazla etkilenen kesimler arasında yer alır.

Afetlerden sonra toplumsal iyileşmenin sağlanabilmesi, bireylerin ve toplumun psikolojik dayanıklılığıyla yakından ilişkilidir. Dayanıklılık kavramı, kişilerin yaşadıkları kayıplara rağmen yeniden denge kurabilme ve yaşamını sürdürebilme gücünü ifade eder. Bu gücün artırılması, afet bilincinin geliştirilmesi, sosyal dayanışmanın teşvik edilmesi ve psikososyal destek ağlarının güçlendirilmesiyle mümkündür. Böylelikle hem bireysel hem de toplumsal düzeyde yaşanan travmaların etkisi azalır ve afet sonrası normale dönüş süreci hız kazanır.

Sağlık açısından bakıldığında, depremler sadece ruhsal değil, tıbbi ve kurumsal sorunlara da yol açar. Hastanelerin zarar görmesi, ilaç ve ekipman eksikliği ile sağlık personelinin aşırı yük altında kalması, acil müdahaleleri geciktirir. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinde birçok hastanenin hizmet dışı kalması, yaralıların tedavisinde aksamalara ve salgın hastalık riskinin artmasına neden olmuştur. Afet sonrası sağlık sisteminin yeniden işler hale getirilmesi, hem fiziksel iyileşme hem de toplumun genel refahı için büyük önem taşır.

2.2. Afet Yönetimi Kavramı ve Kapsamı

Afet yönetimi sadece enkazdan insan kurtarmak, yaralıları hastaneye taşımak veya yangını söndürmek değildir. Modern afet yönetimi, bu tür müdahalelere gerek kalmadan önce riskleri azaltmayı ve insanları tehlikelerden korumayı hedefler.

Afet yönetimi; afetlerin oluşmasını önlemek, zararlarını en aza indirmek, etkilenen topluluklar için güvenli yaşam alanları oluşturmak amacıyla yürütülen kapsamlı bir süreçtir. Bu süreçte kamu kurumları, sivil toplum kuruluşları ve bireyler iş birliği içinde çalışır.

Afet yönetiminde, **zarar azaltma** ve **hazırlık** aşamaları **risk yönetimi**, **müdahale** ve **iyileştirme** aşamaları ise **kriz yönetimi** olarak adlandırılır.

Afetlerle mücadele, öncelikle doğadaki tehlikeleri doğru tanımayı ve bu tehlikelerin oluşturabileceği riskleri en akılcı yöntemlerle azaltmayı gerektirir. Bu, yalnızca afet anında değil, afet meydana gelmeden önce başlatılması gereken kapsamlı bir süreçtir. Afetlerin yol açtığı zararları en aza indirmek için, afetler gerçekleşmeden önce yasal, idari ve teknik önlemler almak büyük önem taşır.

Bu nedenle afet yönetim sistemi, önleyici tedbirleri esas alan bir anlayışla planlanmalı ve uygulanmalıdır.

2.3. KBRN Tehlikelerinin Afet Yönetimindeki Yeri

Deprem sonrasında meydana gelebilecek kimyasal, biyolojik, radyolojik ve nükleer sızıntılar, afetin etkilerini katlayarak artıran ikincil risklerdir. Özellikle endüstri bölgeleri, enerji santralleri, hastaneler ve laboratuvarlar gibi alanlarda oluşabilecek yapısal hasarlar, tehlikeli maddelerin kontrolsüz biçimde çevreye yayılmasına neden olabilir. Bu durum hem kurtarma ekipleri hem de halk sağlığı açısından ciddi bir tehdit oluşturur.

KBRN farkındalığına dayalı afet yönetimi yaklaşımı, riskin yalnızca sismik etkilerle sınırlı olmadığını, kimyasal ve radyolojik faktörlerin de hesaba katılması gerektiğini vurgular. Deprem sonrası sahada görev yapan arama kurtarma ekiplerinin KBRN eğitimine sahip olması, kişisel koruyucu donanım kullanımı ve dekontaminasyon süreçlerini bilmesi yaşamsal önemdedir. Bu nedenle, afet yönetiminde KBRN entegrasyonu hem stratejik hem de operasyonel düzeyde zorunluluk haline gelmiştir.

3- DEPREM AFETLERİNDE MÜDAHALE YAKLAŞIMLARI

Müdahale aşaması, afetin hemen ardından başlayan ve yaşam kurtarmayı hedefleyen en kritik dönemdir. Bu süreçte arama-kurtarma ekiplerinin hızlı şekilde yönlendirilmesi, güvenli alanların belirlenmesi ve ilk yardım hizmetlerinin etkin biçimde organize edilmesi önceliklidir. Özellikle “altın saatler” olarak adlandırılan ilk 72 saatte, profesyonel koordinasyon ve zaman yönetimi doğrudan can kaybını etkiler.

Müdahale sırasında KBRN (Kimyasal, Biyolojik, Radyolojik ve Nükleer) risklerinin tespit edilmesi ve sahada güvenli çalışma koşullarının sağlanması da büyük önem taşır. Deprem sonrası yıkılan hastaneler, laboratuvarlar veya kimyasal depolarda oluşabilecek sızıntılar, arama-kurtarma operasyonlarını tehlikeye atabilir. Bu nedenle KBRN uzmanlarının operasyonlara entegre edilmesi, müdahale güvenliğinin temelini oluşturur.

Afet yönetimi döngüsü dört temel aşamadan oluşur: önleme, hazırlık, müdahale ve iyileştirme. Bu aşamalar birbirini tamamlayan ve süreklilik arz eden bir yapıya sahiptir. Etkili bir afet yönetimi, yalnızca müdahale sürecini değil, afet öncesi planlamadan afet sonrası yeniden yapılanmaya kadar tüm süreci bütüncül biçimde ele almayı gerektirir. Özellikle depremler gibi öngörülmesi zor afetlerde, her aşamanın bilimsel, kurumsal ve teknik altyapıya dayandırılması hayati önemdedir.

Bu döngünün temel amacı, afetin olumsuz etkilerini azaltmak ve toplumun dayanıklılığını artırmaktır. Türkiye’de afet yönetimi, 1999 Marmara Depremi sonrasında önemli bir ivme kazanmış ve AFAD’ın kuruluşuyla daha sistematik bir yapıya kavuşmuştur. Ancak uygulamada, döngü aşamaları arasındaki koordinasyon hâlen tam anlamıyla sağlanamamaktadır; bu nedenle her aşamanın kendi içinde değerlendirilmesi ve zayıf halkaların güçlendirilmesi gerekmektedir.

3.1. Depremlerde Müdahale Zinciri ve “Altın Saatler”

Deprem sonrası ilk 72 saat, enkaz altındaki canlılara ulaşmak açısından “altın saatler” olarak tanımlanır. Bu dönemde ekiplerin zaman kaybetmeden olay yerine ulaşması, doğru görev dağılımı yapması ve koordinasyonun sağlanması kritik öneme sahiptir. Müdahale zincirinde ilk halkayı erken uyarı ve bilgi toplama mekanizmaları, ikinci halkayı ise arama kurtarma ve sağlık ekipleri oluşturur.

Zincirin herhangi bir halkasında yaşanacak aksaklık, tüm operasyonun etkinliğini azaltabilir. Özellikle haberleşme sistemlerindeki kesintiler, lojistik yetersizlikler veya komuta karmaşası, kurtarma kapasitesini düşürür. Bu nedenle afet sonrası komuta kontrol sistemi ile süreç standartlaştırılmalı ve ekiplerin görev tanımları önceden belirlenmelidir.

3.2. Sivil-Askeri Koordinasyonun Önemi

Afet yönetiminde sivil ve askerî kurumlar arasındaki işbirliği, müdahalenin etkinliği ve hızı açısından kritik bir öneme sahiptir. Türk Silahlı Kuvvetleri, lojistik desteği, ulaşım olanakları, ağır araç ve ekipman kapasitesi ile afet bölgelerinde hayati bir rol üstlenirken; AFAD, UMKE, Jandarma Arama Kurtarma (JAK) ve itfaiye gibi sivil kurumlar, sahadaki operasyonel esnekliği ve hızlı karar alma kapasitesi ile süreci tamamlar. Bu işbirliği yalnızca müdahale sırasında değil, afet öncesi hazırlık ve tatbikat dönemlerinde de güçlendirilmelidir. Görev dağılımı, komuta zinciri ve iletişim protokollerinin önceden net bir şekilde belirlenmesi, sahada etkin koordinasyonu sağlar ve olası hataları minimize eder.

Askerî disiplin, operasyonlarda düzen ve hiyerarşik uyum sağlarken, sivil birimlerin esnek ve hızlı uyum yeteneği, değişen saha koşullarına çabuk adaptasyonu mümkün kılar. Örneğin, lojistik ve mühendislik destekleri TSK tarafından sağlanırken, arama-kurtarma ve sağlık hizmetleri sivil ekipler tarafından yürütülür; bu entegrasyon, afet alanındaki görevlerin birbirini tamamlamasını ve kaynakların verimli kullanılmasını garanti eder. Ayrıca, bilgi paylaşımı, ortak eğitimler ve senaryo bazlı tatbikatlar, sivil ve askerî birimler arasındaki güven ve koordinasyonu güçlendirir, kriz yönetiminde iletişim kopukluklarını azaltır.

Böyle bir yapıda, askerî ve sivil kapasitenin birbirini tamamlaması sayesinde müdahale süresi kısılır, riskler daha iyi yönetilir ve halkın güvenliği maksimize edilir. Bu bütüncül yaklaşım, afetlerin yarattığı yıkıcı etkileri azaltmak ve toplumun afet karşısındaki dayanıklılığını artırmak için hayati öneme sahiptir.

Kahramanmaraş depremleri sonrasında EMASYA protokolü tekrar gündeme gelmiştir. “Emniyet-Asayiş-Yardımlaşma” olarak adlandırılan protokol, 1997’de imzalanmış ve Valiliğin talebiyle TSK’nın sivil otoritenin kontrolünde hızlı müdahale etmesini sağlamıştır. İlk olarak 1999 Marmara Depremi’nde uygulanmış, binlerce kişinin kurtarılmasına katkı sağlamıştır. Protokol, çeşitli gerekçelerle yürürlükten kaldırılmış ve kısa süreli yeniden yürürlüğe konmuştur. Son depremlerde askerin arama-kurtarma faaliyetleri tartışma konusu olmuş, Bakan 3 bin 500 personelin çalışmalara katıldığını belirtmiştir.

3.3. Ulusal Afet Müdahale Planı (TAMP) ve Uygulama Süreci

Türkiye Afet Müdahale Planı (TAMP), Türkiye’nin afet yönetim sistemini geliştirmek amacıyla hazırlanmıştır. Plan; afet ve acil durumlarda görev alacak çalışma grupları ve koordinasyon birimlerinin sorumluluklarını belirler, müdahale planlamasının temel prensiplerini ortaya koyar.

AFAD, TAMP çalışmalarına 2012’de başlamış, 2013’te Afet ve Acil Durum Müdahale Hizmetleri Yönetmeliği’nin yayımlanmasının ardından, 2014’te TAMP Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. TAMP, AFAD’ın stratejik planlama yaklaşımının bir parçası ve 2011 Van Depremi sonrası başlatılan çalışmaların sonucudur.

TAMP’ın hedefleri şunlardır:

1. Hayat kurtarmak,
2. Kesintiye uğrayan yaşam ve faaliyetleri hızla normale döndürmek,

3. Müdahaleleri hızlı ve planlı gerçekleştirmek,
4. Afet bölgesi ve çevresinin güvenliğini sağlamak,
5. Halk sağlığını korumak,
6. Mülkiyet, çevre ve kültürel mirası korumak,
7. Ekonomik ve sosyal kayıpları azaltmak,
8. İkincil afetleri önlemek veya etkilerini azaltmak,
9. Halkı bilgilendirmek ve iletişimi sürdürmek,
10. Kaynakları etkin kullanmak.

TAMP'ta her kurumun görevleri ayrı ayrı belirtilmiştir ve olası afet durumunda tüm kurumların hazır bulunması öngörülmektedir. Kapsamı; bakanlıklar, kurumlar, özel kuruluşlar, STK'lar ve gerçek kişileri içerir. Plan, Van Depremi sonrası STK'lar ve ilgili tüzel kişilerin katkısıyla iki yıllık bir çalışmayla hazırlanmıştır. Afet müdahale planları; ulusal ve yerel olmak üzere iki düzeyde sınıflandırılmış ve afet türüne göre müdahale yöntemleri detaylandırılmıştır.¹

4.ARAMA VE KURTARMA FAALİYETLERİ

Ülkemizde arama ve kurtarma çalışmalarıyla ilgili ilk düzenlemeler 13.06.1958 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan 7126 sayılı Sivil Savunma Kanunu'nun çıkartılması ve bu kanun kapsamında İçişleri Bakanlığına bağlı oluşturulan Sivil Savunma Genel Müdürlüğü'nün kurulmasıyla başlamıştır (URL-2 1958). 1959-1986 yılları arasında afetlerde arama ve kurtarma çalışmaları, merkezde Sivil Savunma Genel Müdürlüğü personeli ile illerde yükümlülük esasına göre halktan oluşturulan ekiplerin valilerce afet bölgesine gönderilmesi ile yürütülmüştür.

Bu sistemle Varto (1976), Gediz (1970), Burdur-Bingöl (1971), Van Muradiye (1976), Lice (1977) ve Erzurum (1983) depremlerine müdahale edilmiştir. Ancak arama ve kurtarma hizmetlerinin yürütülmesinde kullanılan araç-gereçlerin teknolojik gelişmelere uygun olması ve bu araç gereçlerin profesyonel olarak yetiştirilmiş ekiplerce kullanılması gerekliliğinin kabul görmesiyle birlikte 1986 yılında ilk defa Sivil Savunma Genel Müdürlüğü bünyesinde Türk Silahlı Kuvvetleri'nden (TSK) temin edilen ihtiyaç fazlası erlerden "340 Kişilik Sivil Savunma Arama ve Kurtarma Birliği" oluşturulmuştur.

1992 yılında TSK'nın asker ihtiyacı nedeniyle birliğe asker verilmemiş ve birliğin kadrolu personelden oluşturulması çalışmaları başlamış olup; 1993 yılında Ankara'da (61 kişilik), 1996 yılında İstanbul'da (24 kişilik) ve yine aynı yıl içerisinde (1996) Erzurum'da (30 kişilik) Sivil Savunma Birlikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu üç birlik; ulusal düzeyde, Adana/Ceyhan Depremi (1998), Marmara ve Düzce Depremi (1999) ve çeşitli bölgelerde meydana gelen sel, heyelan ve çığ gibi afetler ile yurt dışında ise Yunanistan/Atina ile Taiwan'da (1999) ve El Salvador ve Hindistan'da (2001) arama ve kurtarma çalışmalarında bulunmuşlardır .(Türker 2017; URL-3 2019; URL-4 2019).

Ağustos Marmara ve 12 Kasım 1999 Düzce depremlerinden sonra; 27.12.1999 tarihinde yürürlüğe konulan 586 sayılı Kanun Hükmünde Kararname'nin 2. maddesi ile Adana, Afyon, Ankara, Bursa, Diyarbakır, Erzurum, İstanbul, İzmir, Sakarya, Samsun ve Van olmak üzere 11 ilde çağdaş araç ve gereçlerle donatılmış "Sivil Savunma Arama ve Kurtarma Birlik Müdürlükleri" kurulmuştur.²

Birliklerin kurulmadığı illerde, il sivil savunma birimleri çatısı altında arama ve kurtarma ekipleri ile ilçe düzeyinde sivil savunma birimleri ve yerel kuvvetler yapılandırılmıştır. 2009 yılında yürürlüğe giren 5902 sayılı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Teşkilat ve Görevleri Kanunu ile arama

¹ Yılmaz., H. & Gülüm, E. / Afet Acil Durum Yönetimi ve Afet Müdahale Planı Çerçevesinde Uygulamalar: Pazarcık – Elbistan Depremi

² <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/882484>

ve kurtarma faaliyetleri tek bir çatı altında toplanmış, Sivil Savunma Genel Müdürlüğü kaldırılarak illerde **Afet ve Acil Durum Müdürlükleri** oluşturulmuştur. Bu düzenleme ile daha önce mevcut olan bazı sivil savunma arama ve kurtarma birimleri yeni müdürlüklerin bünyesine dahil edilerek faaliyetlerini bu yapılar üzerinden sürdürmeye başlamıştır.

5. ULUSLARARASI UYGULAMALAR VE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ

Deprem risklerinin etkin bir şekilde yönetilebilmesi, yalnızca afet anındaki müdahale kapasitesine bağlı değildir; aynı zamanda hazırlık, önleme ve iyileştirme süreçlerinin bütüncül bir şekilde planlanmasını gerektirir. Bu nedenle, farklı ülkelerde uygulanan yapı güvenliği önlemleri, erken uyarı sistemleri ve toplum temelli hazırlık modelleri, Türkiye gibi yüksek sismik risk taşıyan ülkeler için önemli bir karşılaştırma ve öğrenme alanı sunmaktadır. Uluslararası deneyimler, hem teknolojik hem de kurumsal kapasitenin güçlendirilmesi açısından Türkiye'nin mevcut uygulamalarını değerlendirmek ve geliştirmek için yol gösterici olmaktadır.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) tarafından yayınlanan bir “Tools and Technologies for Earthquake Risk Management” başlıklı raporda, Japonya, Çin ve Güney Kore'nin altyapı dayanıklılığı, erken uyarı sistemleri ve toplum düzeyinde hazırlık modelleri açısından öne çıktığı vurgulanıyor.³

Japonya'da binlerce yıl boyunca biriken sismik tecrübeye dayalı olarak, hem yapı güvenliği yönetmelikleri (örneğin yalıtım sistemleri, sismik izolatörler) hem de halkın bilinç ve tatbikat hazır olma düzeyi oldukça yüksek durumda. Çin'de ve Japonya'da erken uyarı sistemlerinin (earthquake early warning, EEW) uygulanması ciddi bir hazırlık avantajı yaratıyor; bu sayede sarsıntı başlamadan saniyeler önce halk ve kurumlar uyarılabiliyor. Türkiye, yüksek sismik risk altında olan bir ülke olarak yukarıdaki modellerle karşılaştırıldığında, özellikle hazırlık/önleme aşamasında ve yapı güvenliği konusunda zayıf yönler göstermiştir. Örneğin, Kuzey-Asya modellerindeki erken uyarı sistemleri ve yapı izolasyon teknolojileri Türkiye'de tam kapasiteyle uygulanmamış olabilir.

Müdahale sürecinde dijital teknolojilerin kullanımı ve lojistik optimizasyonu alanında, özellikle Kahramanmaraş merkezli depremler sonrasında kamu kurumları, yerel yönetimler ve sivil toplum kuruluşları arasında artan bir farkındalık oluşmuştur. Afet bilgi sistemleri, mobil uygulamalar, insansız hava araçları (İHA) ve koordinasyon yazılımlarının kullanımı, müdahale süresini kısaltmak ve kaynak dağılımını daha etkin yönetmek açısından kritik öneme sahiptir. Ancak bu gelişmelere rağmen, özellikle sağlık altyapısının fiziksel ve işlevsel dayanıklılığı, yerel toplulukların afet öncesi hazırlık düzeyi ve sahadaki veri akışı yönetimi gibi konularda hâlen ciddi eksiklikler bulunmaktadır.

Uluslararası iyi uygulamalardan hareketle, Türkiye için geliştirilebilecek öncelikli stratejiler şunlardır:

1. Erken uyarı sistemlerinin yaygınlaştırılması – Japonya ve Güney Kore gibi ülkelerde başarıyla uygulanan sensör-temelli erken uyarı sistemleri, yalnızca büyükşehirlerde değil kırsal alanlara kadar genişletilmelidir.
2. Topluluk temelli hazırlık kapasitesinin artırılması – Afet anında ilk müdahalenin genellikle halk tarafından yapıldığı göz önüne alındığında, yerel gönüllü ağlarının kurulması, mahalle düzeyinde tatbikatların yapılması ve ilkyardım eğitimlerinin yaygınlaştırılması büyük önem taşımaktadır.
3. Sağlık tesislerinin deprem dirençli hâle getirilmesi – Hastane, aile sağlığı merkezi ve mobil sağlık üniteleri gibi tesislerin hem yapısal (mühendislik açısından) hem de fonksiyonel (altyapı sürekliliği, yedek güç sistemleri) açıdan güçlendirilmesi gerekmektedir.

³ https://www.undrr.org/publication/trilateral-best-practices-report-tools-and-technologies-earthquake-risk-management?utm_source=chatgpt.com

4. Lojistik ve saha bilgi sistemlerinin geliştirilmesi – Müdahale sürecinde gerçek zamanlı veri toplama, harita tabanlı kaynak yönetimi ve otomatik envanter takibi yapılabilen sistemlerin AFAD, UMKE ve yerel yönetimlerle entegre şekilde çalışması sağlanmalıdır.

Bu stratejik başlıkların, yalnızca afet sonrasına yönelik değil, afet öncesi planlama ve kapasite geliştirme süreçlerinin bir parçası olarak ele alınması gerekmektedir. Teknolojik çözümler, kurumsal koordinasyon ve toplumsal katılım birlikte değerlendirildiğinde, afet yönetiminde daha dirençli ve etkili bir sistem oluşturmak mümkün olacaktır.

SONUÇ

Sonuç olarak, Türkiye'nin deprem yönetim sistemi çok boyutlu ve bütüncül bir yaklaşımla yeniden yapılandırılmalıdır. Yapısal güvenlik, erken uyarı sistemleri, KBRN risk yönetimi, sağlık altyapısının dayanıklılığı ve sivil-askerî koordinasyon alanlarında eşgüdümlü bir reform süreci gerekmektedir. Afetlere müdahalede “altın saatler” içinde hızlı hareket edebilmek için, lojistik altyapının ve kriz iletişim sistemlerinin senaryo temelli tatbikatlarla test edilmesi ve sürekli güncellenmesi önem arz etmektedir.

Toplum tabanlı hazırlık kültürünün güçlendirilmesi, yalnızca teknik değil aynı zamanda sosyolojik bir öncelik olarak ele alınmalıdır. Özellikle afet riski altındaki bölgelerde yaşayan halkın afet bilinci, tahliye planları, ilkyardım eğitimi ve KBRN farkındalığı konularında eğitilmesi, müdahale kapasitesini yalnızca kurumlarla sınırlı kalmaksızın toplumsal düzeye taşır. Eğitim kurumları, medya ve sivil toplum kuruluşları bu süreçte temel aktörler olarak yer almalıdır.

Ayrıca, Japonya, Güney Kore ve Avrupa Birliği ülkelerinde olduğu gibi, afet yönetimi süreçlerinin merkezi bir sistemle dijitalleştirilmesi ve tüm kurumların entegre olabileceği bir Afet Bilgi Yönetim Sistemi kurulması önerilmektedir. Bu sistem, eş zamanlı veri akışı, kaynak dağılımı, saha takibi ve karar destek mekanizmalarını güçlendirecektir.

Türkiye'nin gelecekte karşılaşılabileceği yüksek şiddetli depremlerde can ve mal kayıplarını en aza indirebilmesi için, afet yönetimi politikalarının sadece müdahale odaklı değil, önleyici, hazırlıklı ve direnç odaklı bir çerçevede ele alınması gereklidir. Bu kapsamda oluşturulacak ulusal afet dayanıklılık stratejisi, risk azaltımı, müdahale planlaması, iyileştirme ve yeniden inşa süreçlerini bütüncül biçimde kapsamalıdır.

Son olarak, bölgesel ve küresel ölçekte bilgi paylaşımı ve teknik işbirliği (örneğin, NATO afet müdahale gücü, Birleşmiş Milletler OCHA sistemi) gibi platformlarla entegrasyon sağlanmalı, Türkiye'nin afet kapasitesi sadece ulusal değil, uluslararası standartlarla uyumlu hale getirilmelidir. Böylece, sadece afet anında değil, afet öncesi ve sonrası süreçlerde de sistematik, hızlı ve etkili bir yapı kurulabilir.

KAYNAKÇA

- AFAD. (2021). 2020 yılı doğa kaynaklı olay istatistikleri. Ankara: T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Yayınları.
- AFAD. (2022). Türkiye afet risk azaltma planı. Ankara: T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Planlama ve Risk Azaltma Dairesi.
- Arslankoç, S., Salduz Doruk, Ç., & Koçak, O. (2024). Deprem bölgesindeki psiko-sosyal hizmetlerin değerlendirilmesi. *Afet ve Risk Dergisi*.
- Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi. (2020). Derleme: Doğal afetler ve çevre. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*.
- Baş, K. (2025). Kahramanmaraş merkezli depremlerde profesyonel ekiplerle arama kurtarma çalışmasına katılanların deneyim ve görüşlerinin değerlendirilmesi. *Afet ve Risk Dergisi*.
- Dirimeşe, E. (2024). Madencilerin afetlerde arama kurtarma tecrübelerinin sosyolojik incelemesi: Afet yönetimi ve toplumsal refleksler. *Sosyal Mucit Academic Review*.
- Eren, T., & Akdaş, E. (2023). Afet ve acil durum yönetiminde arama kurtarma ekiplerinin oluşturulması. *Afet ve Risk Dergisi*.
- FAO. (2023). *Türkiye: Deprem müdahale ve iyileştirme planı, 2023–2026*. Roma: Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO).
- Gerdan, S. (2025). Türkiye afet yönetiminin 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli depremler özelinde değerlendirilmesi. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*.
- Güçlüer, D. E. (2023). Millî güvenlik meselesi olarak deprem. *Avrasya Dosyası*.
- İşçi, P. D. C. (2008). Deprem nedir ve nasıl korunuruz. *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*.
- Özdemir, M. (2024). Acil durum ve afet görevlilerinin deprem sonrası arama ve kurtarma çalışmaları sırasında karşılaşılabilecekleri iş sağlığı ve güvenliği riskleri. Efe Akademi Yayınları.
- Utku, A. (2024). Deprem seviye sınıflandırması için hibrit bir ConvLSTM modeli: Karşılaştırmalı bir analiz. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*.
- Yılmaz, A., & Öncü, M. E. (2025). Deprem etkisi altında yumuşak kat düzensizliğine sahip betonarme binaların hasar görülebilirlik analizi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(3), 1574–1590.
- Yılmaz, H., & Gülüm, E. (2024). Afet acil durum yönetimi ve afet müdahale planı çerçevesinde uygulamalar: Pazarcık – Elbistan depremi. *Akademik Yaklaşımlar Dergisi*.

BÖLÜM 5

GIDA ZEHİRLENMELERİ BOTULİZM; İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ AÇISINDAN ÖNEMİ

Erol ÖZCAN¹ , Dilek ÖZTAŞ² , Güven ÇANKAYA³

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt University, Institute of Science, CBRN (Chemical, Biological, Radiological and Nuclear) Threats and Management, ANKARA ORCID: 0009-0002-1575-0582

² Prof. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt University, Medical Faculty, Department of Public Health ANKARA ORCID: 0000-0002-8687-7238

³ Prof. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt University, Medical Faculty, Department of Metallurgy and Materials Engineering, ANKARA ORCID: 0000-0003-2932-1695

Botulinum, botulinum toksinleri içeren gıdaların tüketiminden sonra oluşan ciddi bir zehirlenme olan gıda kaynaklı botulizme neden olan patojenik bir bakteridir (WHO, 2018). Bu toksinler, gıda ürünlerinde botulinum sporlarının hayatta kalması ve büyümesiyle üretilebilir (Fleck-Derderian vd., 2018). Botulinum toksini bilinen en güçlü toksindir ve insanlarda ölüme neden olmak için gereken miktarın 0,1 - 1 µg arasında olduğu tahmin edilmektedir. Botulizm zehirlenmesi akuttur ve kalıcı değildir, ancak felç birkaç günden birkaç aya kadar sürebilir (Fleck-Derderian vd., 2018). Botulizmin gıda endüstrisi için önemi, bakterinin çevrede her yerde bulunmasından ve C. botulinum'un yaklaşık 2,5°C'den başlayan düşük sıcaklıklarda (proteolitik olmayan, psikrotolerant suşlar), pH değeri 4,6 kadar düşük asidik ortamlarda ve %10'a kadar tuz konsantrasyonlarında (proteolitik, mezofilik suşlar) üreyebilen ve toksin üretebilen oldukça dirençli endosporlar oluşturma yeteneğinden kaynaklanmaktadır (Johnson, 2019). Ancak, toksinler ısıya oldukça duyarlıdır ve inaktivasyonun 79°C'de 20 dakika veya 85°C'de 5 dakika ısıtma ile gerçekleştiği öne sürülmektedir ve bu nedenle, tüketimden önce herhangi bir ısıl işlemle geçmeyen hazır gıdaların botulizme neden olma olasılığı daha yüksektir.

Yukarıdakiler, taze, asgari düzeyde işlenmiş ve "temiz etiketli" gıdalara olan yüksek taleple (Taylor ve ark., 2021) birlikte, gıda sektörü için C. botulinum yönetimi konusunda bir zorluk yaratmaktadır. Gıda işletmecilerinin (FBO'lar) ve yetkililerin amacı, çiğ gıdalardaki C. botulinum varlığını sınırlamak ve insan tüketimine yönelik gıdalarda sporların üremesini ve buna bağlı toksin oluşumunu önlemektir (Johnson, 2019). C. botulinum yönetimi, gıda işleme sırasında iyi hijyen uygulamalarına (WHO, 2018) ve esas olarak tuz ve/veya nitrit ilavesine (ACMSF, 2020; Glass ve Johnson, 2019) dayanmaktadır. Ancak, tuz tüketiminin kardiyovasküler hastalıklarla olan bağlantıları (Alnoman, 2015) ve nitritlerin kanserojen olarak sınıflandırılması, C. botulinum'un kontrolü için yeni koruma yöntemlerine ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır.

Gıda ve İlaç Daireleri (FBO), tuz ve/veya nitrit miktarı azaltılmış yeni ürünlerde (Alnoman, 2015) C. botulinum'un büyüme potansiyelini değerlendirmek için depolama denemeleri ve meydan okuma testleri kullanabilir. Bu yöntem oldukça güvenilirdir, ancak çok zaman alıcı ve maliyetlidir ve yüksek eğitimli personel ve özel tesisler gerektirir. Bunun yerine, C. botulinum açısından güvenli ürünler formüle etmek için ürün özellikleri ve depolama koşullarının kombinasyonlarını belirlemek amacıyla öngörücü modeller kullanılabilir (Dalgaard ve Mejlholm, 2019). Öngörücü modellerin, aşırı tahminde bulunmadan doğru tahminler yapabilmesi için Büyüme tahminleri, her ürün kategorisi için geçerli olan ve antimikrobiyal etkiye sahip olabilecek tüm ilgili ürün özelliklerinin (örneğin tuz, pH, organik asitler, fosfat tuzları) ve depolama koşullarının (örneğin sıcaklık, ambalajdaki atmosfer) etkisini içermelidir. Bilimsel literatürde C. botulinum'un büyümesini ve/veya toksin oluşumunu tahmin eden modeller mevcuttur, ancak bu modellerin çoğunda bakterinin büyümesini etkileyen bir veya daha fazla faktör eksiktir ve bu tür modeller eksik kabul edilir (Ross ve ark., 2014a).

Bu yazının temel amacı, proteolitik ve proteolitik olmayan C. botulinum için iki üreme ve üreme sınırı matematiksel modeli geliştirmek. Her iki model de laboratuvar ortamında geliştirildi ve ilgili gıda ürünleri için kalibre edildi. Proteolitik olmayan C. botulinum'un yerine geçen proteolitik olmayan Clostridium sp.'nin büyümesi için sekiz çevresel faktörün etkisini içeren öngörücü model, deniz ürünlerinde kalibre edildi ve paketlenme atmosferinden veya tütsüleme işleminden bağımsız olarak deniz ürünleri ve kümes hayvanı ürünlerinde doğrulandı. Ayrıca, LAB'nin proteolitik olmayan C. botulinum büyümesi üzerindeki etkisi değerlendirildi. Proteolitik C. botulinum'un yerine geçen ve 11 çevresel faktörün etkisini içeren C. sporogenes'in büyümesi için bir tahmin modeli, işlenmiş peynir için kalibre edilmiş ve işlenmiş peynir ve et ürünlerinde doğrulanmıştır. Son olarak, model, bilimsel literatürden elde edilen toksin oluşum süresi (TTT) verileriyle değerlendirilmiş ve modelin performansı, proteolitik C. botulinum için mevcut diğer TTT modelleriyle karşılaştırılmıştır.

Bu makalenin ilk bölümünde *C. botulinum*'un özellikleri ve yaygınlığı hakkında bir giriş yapılmakta, ardından gıda kaynaklı botulizm salgınlarına genel bir bakış sunulmakta ve botulizm hastalığının ve yönetiminin önemi tartışılmaktadır.

2. CLOSTRIDIUM BOTULINUM

C. botulinum, Gram pozitif, çubuk şeklinde, endospor oluşturan ve kesinlikle anaerobik organizmaları içeren *Clostridium* cinsine aittir. Bu basit tanım, bu cinsi oldukça geniş bir gruba dönüştürür ve yaklaşık 300 türden oluşur (Euzéby, 2021). *C. botulinum*, ilk olarak Prevot ve Brygoo tarafından botulinum nörotoksinleri (BoNT'ler) üretebilen tüm organizmalar için tür sınıflandırması olarak tanımlanmıştır (Euzéby, 2021) (*botulinum* nörotoksinleri/BoNT'ler bu tez boyunca 'toksinler' olarak anılacaktır). Uzun yıllar boyunca, yalnızca *C. botulinum* suşlarının bu toksinleri üretebildiğine inanılıyordu; ancak daha sonra diğer *Clostridium* türlerinden (*C. argentinense*, *C. baratii* ve *C. butyricum*) suşların da aynı özelliğe sahip olduğu gözlemlendi (Bradshaw, 2010). Ayrıca, son çalışmalar (Brunt ve ark., 2020a; Weigand ve ark., 2015), *C. sporogenes* suşlarının da toksin üretebildiğini göstermiştir.

Yukarıda belirtilen farklı *Clostridium* sp. suşları tarafından üretilen toksinler, farelerde toksisitenin spesifik nötralizasyonu ile serolojik olarak yedi türe ayrılabilir: A, B, C, D, E, F ve G. Tüm bu toksinler yapısal ve farmakolojik olarak benzerdir (Euzéby, 2021) ve insanları ve hayvanları etkileyen ciddi ve genellikle ölümcül bir hastalık olan botulizmden sorumludur (Bölüm 3; Peck, 2009). Ancak G toksini, henüz insanlarda veya hayvanlarda bilinen herhangi bir botulizm vakasında rol oynamamıştır (Johnson, 2019). Toksin üreten *Clostridium* türleri dört gruba ayrılır; I-III grupları yalnızca *C. botulinum* suşlarından, IV grubu ise *C. argentinense*, *C. baratii* ve *C. butyricum* suşlarından oluşur. Grup I su ve II insan botulizminden, grup III hayvan botulizminden sorumludur ve grup IV suşları (*C. 3 butyricum* ve *C. baratii*) nadir durumlarda gıda kaynaklı botulizme neden olmuştur (Bradshaw, 2010).

2.1. Proteolitik C. Botulinum

C. botulinum'un proteolitik suşları, A, B ve/veya F serotiplerinin toksinlerini üretir ve sırasıyla minimum ve optimum büyüme sıcaklıkları 10 ve 35-40°C'dir. Bu durum, işlenmiş peynirler ve kürlenmiş etler de dahil olmak üzere ortam sıcaklıklarında depolanan ürünler için bu suşları bir zorluk haline getirir; çünkü bu gruptaki organizmalar jelatin, süt ve et proteinlerini sindirir ve büyümeleri için en çok ihtiyaç duyulan amino asitler arginin ve fenilalanindir (Johnson, 2019; Whitmer ve Johnson, 2019). Ayrıca, I. grup sporları yüksek ısı direncine sahiptir (D_{121°C} = 0,21 dk.) (Peck, 2009) ve gıdalardaki inaktivasyonları, sıvı ürünlerde uygulanabilen ultra yüksek sıcaklık işleme (UHT) (135-145°C'de 1-10 sn.) ile sağlanabilir (Chen vd., 2015). Ancak, pastörizasyon (30 dk. 63°C) veya yüksek sıcaklık, kısa süreli işlem (HTSH) (15 sn. 72°C) (Carter, 2016) gibi yaygın ısı işlemler, *C. botulinum*'un proteolitik sporlarının inaktivasyonu için yeterli değildir. Bu durum, proteolitik *C. botulinum*'u düşük asitli konserve gıdaların (Peck, 2009) ve diğer sıvı olmayan gıdaların güvenli üretimi için önemli bir endişe kaynağı haline getirir. Bu nedenle, konserve veya şişelenmiş gıdalardaki proteolitik *C. botulinum* sporlarının inaktivasyonu için gıda endüstrisinde 'Botulinum pişirme' (121°C/3 dk) yöntemi kullanılmaya başlanmıştır (Peck, 2009).

2. 2. Proteolitik Olmayan C. botulinum

C. botulinum'un proteolitik olmayan suşları, B, E ve/veya F serotiplerinin toksinlerini üretir ve sırasıyla 2,5 ve 18-25°C'lik minimum ve optimum büyüme sıcaklıklarına sahiptir. Bu da et, balık ve deniz ürünleri gibi buzdolabında saklanan gıdalar için ciddi bir tehlike oluşturur (Lindström vd., 2006). Bu grup, proteolitik suşlar gibi amino asitlere değil, şekerlere ihtiyaç duyar ve bu nedenle genellikle sakkarolitik olarak adlandırılırlar (Johnson, 2019; Peck, 2009). Proteolitik olmayan

sporların ısıya dayanıklılığı orta düzeydedir ($D_{85^{\circ}\text{C}} = 0,2 \text{ dk}$) (Lindström ve ark., 2006) ve sporlar 90°C 'de 10 dakika boyunca inaktive edilir (ACMSF, 2020).

3. GIDA KAYNAKLI BOTULİZM

Botulizm, *C. botulinum* ve *C. baratii*, *C. butyricum* ve *C. sporogenes*'in nadir suşları tarafından üretilen botulinum toksinlerine maruz kalmanın neden olduğu nadir, potansiyel olarak ölümcül bir nöroparalitik hastalıktır (Brunt ve ark., 2020a; Sobel, 200). Doğal olarak oluşan insan botulizminin dört türü vardır: gıda kaynaklı, bebek, yara ve yetişkin bağırsak kolonizasyonu (Luquez ve ark., 2021).

Doğal olmayan iki botulizm türü daha tanımlanmıştır: iatrojenik ve inhalasyon botulizmi (Sobel, 2005). Gıda kaynaklı botulizm, dünya çapında en yaygın türdür ve yukarıda bahsedilen altı tür arasında en şiddetli ve uzun süreli olanıdır (Harris ve ark., 2020; Johnson, 2019). Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO) göre, Kanada, Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde her yıl ortalama 475 gıda kaynaklı botulizm vakası meydana gelmektedir. Bu vakaların çoğu uzun süreli fiziksel sakatlığa, %15'i ise ölüme yol açmaktadır (Kirk ve ark., 2015).

Gıda kaynaklı botulizmin ortaya çıkması için dört koşulun karşılanması gerekir: i) Gıda, BoNT üreten *Clostridia*'nın sporlarını veya vejetatif hücrelerini içermelidir, ii) BoNT üreten *Clostridia*'nın sporları/hücreleri işleme sırasında inaktif hale getirilmemiş olmalıdır veya kontaminasyon işleme sonrasında meydana gelmiş olmalıdır, iii) Gıda, bakterinin büyümesini ve toksin oluşumunu desteklemelidir ve iv) Gıda, tüketime hazır (RTE) bir üründür veya toksinleri inaktif hale getirmek için yeterince pişirilmemiştir (Harris ve ark., 2020).

Gıda kaynaklı olanlar da dahil olmak üzere tüm botulizm türleri klinik olarak benzerdir ve istemli kasların inen simetrik gevşek felciyle birlikte simetrik kranial sinir felci gelişir ve bu durum solunum yetmezliğine ve sonunda ölüme yol açabilir. Botulizmin erken belirtileri bulanık görme, disfaji ve konuşma güçlüğü gibi görünmektedir. Bulantı, kusma, ishal veya kabızlık gibi daha hafif belirtiler de görülebilir (Johnson, 2019). Belirtiler tüm botulinum toksin türleri için benzerdir, ancak hastalığın şiddeti hastalar ve zehirlenme seviyeleri arasında önemli ölçüde değişebilir. Gıda kaynaklı botulizmin belirtileri, toksinin alınmasından 2 saat ila 14 gün sonra başlayabilir (Johnson, 2019). Botulizm sinirlere girdikten sonra bunun için mevcut bir panzehir yoktur (Johnson, 2019), ancak hızlı tanı, yoğun bakım, mekanik ventilasyon ve at antitoksini ile pasif bağışıklama tedavinin temelini oluşturur (Harris ve ark., 2020).

3. 1 *C. botulinum*'un Neden Olduğu Yaygınlık ve Salgınlar

C. botulinum doğada her yerde bulunur ve toprakta yaygın olarak bulunur (Dodds, 1993a). 80'lerin sonlarına kadar toprak ve tortuda *C. botulinum* görülme sıklığı üzerine yapılan çalışmalar Dodds (1993a) tarafından özetlenmiş ve Avrupa'da ortalama %38,5, Kuzey Amerika'da %27,8, Asya'da %22,1 ve dünyanın geri kalanında %18,4'lük bir görülme sıklığı ortaya koymuştur. Dodds (1993a) ayrıca dünya çapında balıklarda ve suda yaşayan hayvanlarda *C. botulinum* sporlarının görülme sıklığını da özetlemiş ve ortalama %19,6 olduğunu belirtmiştir. En yüksek görülme sıklığı (%100) İsveç sularında yaşayan balıklarda bulunmuş, ardından sırasıyla %64 ve %76'lık görülme sıklığıyla Danimarka sularından alabalık ve omurgasızlar gelmiştir. İlginç bir bulgu, kuzey bölgelerindeki balık ve suda yaşayan hayvanlarda bulunan *C. botulinum* sporlarının büyük çoğunluğunun E tipi olması, ekvatora daha yakın balık ve suda yaşayan hayvanlarda ise A, B veya C/D tipi sporların daha sık görülmesidir. Bununla birlikte, *C. botulinum* sporlarının bağırsakları çıkarılmış balıklarda veya işlenmiş deniz ürünlerinde görülme sıklığı, su ortamında test edilen balık ve suda yaşayan hayvanlara göre daha düşük olma eğilimindedir (Dodds, 1993b).

Örneğin, Hindistan'da perakende ticaretinde taze ve kürlenmiş balıklarda *C. botulinum* varlığını test eden Lalitha ve Surendran (2002), yaygınlığın sırasıyla %19 ve %10 olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, analiz edilen tuzla kurutulmuş karides örneklerinin neredeyse yarısının *C. botulinum* sporları içerdiğini bildirmişlerdir. Baker ve arkadaşları (1990a), perakende satıştan 15 farklı balık türünü temsil eden 54 taze fileto örneği kullanmış, filetoları vakumlu paketlenmeye koyup 3 gün boyunca 30°C'de inkübe etmiş ve örneklerin 36'sının (%66,7) toksin üretimine yol açtığını gözlemlemişlerdir. Bu pozitif örneklerin 18'inde *C. botulinum* tip A, sekizinde tip E, dördünde tip B (proteolitik olmayan), 2'sinde proteolitik tip B, 1'inde tip F (proteolitik olmayan) ve 3'ünde hem A hem de E tipi organizmalar bulunmuştur. Öte yandan, Heinitz ve Johnson (1998), ABD'den ve dünyanın dört bir yanındaki yabancı üreticilerden (Asya, Avrupa, Güney Amerika ve Yeni Zelanda dahil) elde edilen test edilen 201 vakumlu paketlenmiş (VP) tütülenmiş yüzgeçli balık ve kabuklu deniz ürünleri örneğinin hiçbirinde *C. botulinum* sporlarına rastlanmamıştır. Balık ve deniz ürünlerinde *C. botulinum* yaygınlığına ilişkin veriler çok sayıda olsa da, diğer gıda kategorileri için daha az veri bulunmaktadır. Et ve kümes hayvanlarında *C. botulinum* yaygınlığı, çiftlik ortamının sucul ortamlara kıyasla daha düşük kontaminasyon seviyeleri nedeniyle genellikle balık ve deniz ürünlerinden daha düşüktür (Dodds, 1993b). Birleşik Krallık'ta domuz pastırması içindeki *C. botulinum* yaygınlığına ilişkin bir çalışma, test edilen örneklerin %4,2'sinin A ve B tipleri için pozitif olduğunu, ancak *C. botulinum*'un 15, 20 veya 25°C'de hiçbir zaman üremediğini göstermiştir (Roberts ve Smart, Carlin ve arkadaşları (2004), Fransız perakendecisinden 143 et ve kümes hayvanı örneğini test etmiş ve bunların 12'sinde (%8,4) *C. botulinum* pozitif bulunmuştur. Öte yandan, meyve ve sebzelerin, özellikle topraktan hasat edilenlerin, çevresel kirlenme nedeniyle *C. botulinum* ile kirlenme olasılığı daha yüksektir (Dodds, 1993b). Yedi üreticiden alınan vejetaryen sosislerde *C. botulinum* A, B, E ve F tiplerinin (Pernu) oldukça yüksek bir yaygınlığı (%32) görüldü. Aksine, Lilly ve arkadaşları (1995), VP veya MAP sebzelerinde *C. botulinum* yaygınlığını test ettiklerinde yalnızca %0,36'lık bir insidans gözlemlemişlerdir; bunun nedeni belki de bu tür ürünlerin paketlenmeden önce bakterilerin uzaklaştırılması için mekanik yıkamaya tabi tutulmuş olmasıdır (Lilly ve arkadaşları, 1995; Ramos ve arkadaşları, 2013). Son olarak, süt ürünlerinde *C. botulinum* insidansı hakkında çok az çalışma mevcuttur. 60'lardan kalma iki mevcut çalışmada (Insalata ve arkadaşları,; Tacindio ve arkadaşları, çeşitli süt ürünlerinde *C. botulinum* sporlarına rastlanmamıştır. Aksine, Franciosa ve arkadaşları (1999), mascarpone ve diğer süt ürünlerinde sırasıyla %32,5 ve %2,7 oranında *C. botulinum* yaygınlığı bulmuşlardır. Ayrıca, *C. botulinum*'un doğal olarak kirlenmiş mascarpone örneklerinde 28°C'de üç günlük inkübasyondan sonra büyüyüp toksin üretebildiği görülmüştür.

Yukarıda tartışılan gıda kategorilerinin çoğunda *C. botulinum* görülme sıklığı nispeten yüksek olsa da, gıda kaynaklı botulizm salgınları oldukça nadirdir (WHO, 2018) ve çoğunlukla evde konserve veya diğer el yapımı ürünlerle ilişkilendirilir (Fleck-Derderian ve ark., 2018; Horowitz ve Horowitz, 2015). Eskiden "sosis zehirlenmesi" olarak adlandırılan ilk belgelenmiş salgınlar 18. yüzyılın sonlarına dayanmaktadır. O zamanlar, felç hastalığı yalnızca et tüketimiyle ilişkilendiriliyordu, ancak *C. botulinum* toksinleri bir tehlike olarak tanımlanmamıştı (Fleck-Derderian ve ark., 2018). Bu felçli hastalığın nedeninin ilk kez, mikrobiyolog Emile Pierre Marie Van Ermengem tarafından *Bacillus botulinus* adlı anaerobik bir mikroorganizmaya bağlanması, neredeyse bir asır sonra, 1895 yılında gerçekleşti. O tarihte 34 kişi turşu ve tütülenmiş jambon yedikten sonra hastalandı (Van Ermengem, 1897). "Botulinus" adı, Latince "botulus" kelimesinden türetilmiştir ve sosis anlamına gelir. Ancak 1904 yılında, konserve fasulye tüketiminden kaynaklanan bir salgın, botulizmin yalnızca et tüketimiyle ilişkili olduğu inancını değiştirdi. Fleck-Derderian ve ark. (2018), 1920 ile 2014 yılları arasında gıda kaynaklı botulizm salgınları (yani aynı gıda kaynağıyla bağlantılı en az iki vakanın bildirilmesi) üzerine sistematik bir inceleme gerçekleştirmiştir. Dünya çapında 1.367 vaka-hastayı içeren 197 salgın bildirilmiş olup, salgınların %58'inde (115) ölüm bildirilmiştir ve ölüm oranı %13-34'tür. Bu salgınların çoğunluğu (%55) ABD'de meydana gelmiş ve bildirilen tüm salgınların %34'ü A tipi toksin kaynaklı olup, bunu sırasıyla %17 ve %16 ile E ve B tipi toksin takip etmiştir. Ayrıca, en yaygın gıda taşıyıcısı (%42) ev yapımı konserve ürünler olmuş ve ticari gıdalar tüm salgınların

%26'sını oluşturmaktadır (Fleck-Derderian ve ark., 2018). Son 40 yılda çeşitli ticari gıdaların neden olduğu ve farklı coğrafi bölgelerde görülen botulizm salgınlarının bir kısmını özetlemektedir.

3. 2 C. botulinum Yönetimine İlişkin Kılavuzlar

C. botulinum halk sağlığı açısından tehlikeli kabul edilir ve botulizm salgınları halk sağlığı acil durumları olarak ele alınır (WHO, 2018). Ancak, insan tüketimine yönelik gıdalarda C. botulinum'un varlığı veya yönetimiyle ilgili özel bir düzenleme bulunmamaktadır. Örneğin, AB Mevzuatı, taze balık ve deniz ürünlerinin buzda saklanması zorunlu kılmaktadır (Brunt, 2020b). Ancak bunun proteolitik olmayan C. botulinum yönetimiyle ilişkili olup olmadığı belirtilmemiştir. WHO'ya (2018) göre, gıda kaynaklı botulizm, gıda hazırlamada ve en önemlisi ısıtma/sterilizasyon ve hijyen sırasında iyi uygulamaların uygulanmasıyla önlenir (WHO, 2018). Ancak, sucuk ortamlarında, toprakta ve hammaddelerde bakterinin yüksek yaygınlığı göz önüne alındığında, iyi hijyen uygulamaları C. botulinum yönetimi için yeterli değildir (Bölüm 3.1). Bu nedenle, çeşitli gıda türlerinde bakterinin büyümesini ve toksin oluşumunu yönetmek için ürün işleme ve formülasyonuna yönelik çeşitli kılavuzlar geliştirilmiştir.

Kanada Uygulama Kuralları, Amerikan önerileri ve sous vide ikram sistemleri uygulama kuralları (Brunt, 2020b), proteolitik olmayan C. botulinum'un yönetimi için depolama sıcaklıklarının 3-5°C'yi geçmemesi gerektiğini belirtmektedir. Birleşik Krallık'ta, Gıdaların Mikrobiyolojik Güvenliği Danışma Komitesi (ACMSF, 2020), VP ve MAP gıdalarda proteolitik olmayan C. botulinum'un yönetimi için kılavuzlar oluşturmuştur.

3.3. C. botulinum'un taşıyıcıları

Zorlama testleri, araştırma veya ürün geliştirme laboratuvarlarında ürünlerin mikrobiyal güvenliğini değerlendirmek, bazen de tahmin modellerinin kullanımını tamamlamak (Euzéby, J.P., 2021) veya bu tür modelleri geliştirmek/kalibre etmek/değerlendirmek (ACMSF, 2020) için yaygın olarak kullanılır.

"Zorlama testi" terimi, ürünlerin yapay olarak ilgili mikroorganizmalarla aşılandığı ve bunların büyüme/hayatta kalma/inaktivasyonlarının zaman içinde çeşitli koşullar altında değerlendirildiği çalışmaları ifade eder (ACMSF, 2020).

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Botulizm, nadir ancak potansiyel olarak ölümcül bir halk sağlığı sorunu olmaya devam etmektedir. Modern gıda endüstrisi standartları, gelişmiş tanı ve tedavi imkanları sayesinde mortalite oranları dramatik şekilde düşmüş olsa da, hastalık tamamen ortadan kalkmamıştır. Ev tipi gıda hazırlama, geleneksel beslenme alışkanlıkları ve küresel gıda ticareti, botulizm riskini canlı tutmaktadır. Gelecekte, çok sektörlü bir yaklaşım ve sürekli gelişen bilimsel bilgi ile botulizm kontrolünde daha fazla ilerleme sağlanabilir.

Bu kapsamlı incelemede, botulizmin tarihçesinden modern tedavi yaklaşımlarına, epidemiyolojiden önleme stratejilerine kadar geniş bir yelpazede bilgi sunulmuştur. Hastalığın karmaşık patogenezi, Clostridium botulinum'un çevresel direnci ve botulinum toksininin güçlü nörotoksik etkisi, multidisipliner bir kontrol stratejisini zorunlu kılmaktadır.

KAYNAKÇA

- ACMSF, Advisory Committee on the Microbiological Safety of Food, 2020. Subgroup on nonproteolytic *Clostridium botulinum* and vacuum and modified atmosphere packaged foods [WWW Document]. URL https://acmsf.food.gov.uk/sites/default/files/acmsf-vpmapsubgroup-report_1.pdf (accessed 20.08.21).
- Alnoman, M., Udornpijitkul, P., Paredes-Sabja, D., Sarker, M.R., 2015. The inhibitory effects of sorbate and benzoate against *Clostridium perfringens* type A isolates. Food Microbiol. 48, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.12.007>
- Diao, M.M., Andre, S., Membré, J.M., 2014. Meta-analysis of D-values of proteolytic *Clostridium botulinum* and its surrogate strain *Clostridium sporogenes* PA 3679. Int. J. Food Microbiol. 174, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.12.029>,
- Brunt, J., van Vliet, A.H.M., Stringer, S.C., Carter, A.T., Lindström, M., Peck, M.W., 2020b. Pan-genomic analysis of *Clostridium botulinum* group II (Non-proteolytic *C. botulinum*) associated with foodborne botulism and isolated from the environment. Toxins 12, 306. <https://doi.org/10.3390/toxins12050306>
- Carter, A.T., Austin, J.W., Weedmark, K.A., Corbett, C., Peck, M.W., 2014. Three classes of plasmid (47-63 kb) carry the type B neurotoxin gene cluster of group II *Clostridium botulinum*. Genome Biol. Evol. 6, 2076–2087. <https://doi.org/10.1093/gbe/evu164>
- Dalgaard, P., Mejlholm, O., 2019. Modelling growth of *Listeria monocytogenes* and lactic acid bacteria in food environments. In: Foodborne Bacterial Pathogens: Methods and Protocols, Methods in Molecular Biology, vol. 1918, Ed. Bridier, A. Springer Science + Business Media, p. 247–264. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9000-9_20.
- Daminelli, P., De Nadai, V., Bozzo, G., Finazzi, G., Oliverio, E., Losio, M.N., Bertasi, B., Boni, P., 2011. Two unlinked cases of foodborne botulism in Italy at the beginning of 2010. New Microbiol. 34, 287–290. <https://doi.org/10.1093/cid/cix846>
- Euzéby, J.P., 2021. List of Bacterial Names with Standing in Nomenclature: a Folder Available on the Internet. [WWW Document]. URL <https://lpsn.dsmz.de/genus/clostridium> (accessed 01.10.21).
- Dodds, K., 1993a. *Clostridium botulinum* in the environment. In: *Clostridium botulinum*.

Ecology and Control in Foods, Ed. Hauschild, A.H.W., Dodds, K.L., Marcel Dekker Inc., New York, NY., p. 21-51.

FDA (Food and Drug Administration), 2020. Fish and Fishery Products Hazards and Controls Guidance. Fourth edition, March 2020.

Fleck-Derderian, S., Shankar, M., Rao, A.K., Chatham-Stephens, K., Adjei, S., Sobel, J., Meltzer, M.I., Meaney-Delman, D., Pillai, S.K., 2018. The epidemiology of foodborne botulism outbreaks: a systematic review. Clin. Infect. Dis. 66, 79-81.

Glass, K.A., Mu, M., LeVine, B., Rossi, F., 2017. Inhibition of *Clostridium botulinum* in model reduced-sodium pasteurized prepared cheese products. J. Food. Prot. 80, 1478-1488.

<https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-17-027>

Harris, R.A., Anniballi, F., Austin J.W., 2020. Adult intestinal toxemia botulism. Toxins 12, 81.

<https://doi.org/10.3390/toxins12020081>

Johnson, E.A., 2019. *Clostridium botulinum*. In: Food Microbiology: Fundamentals and Frontiers, Ed. Doyle, M.P., Diez-Gonzales, F., Hill, C., ASM Press, Washington, DC, p. 487-512.

Luquez, C., Edwards, L., Griffin, C., Sobel, J., 2021. Foodborne botulism outbreaks in the United States, 2001–2017. Front. Microbiol. 12, 713101.

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.713101>

Peck, M.W., 2009. Biology and genomic analysis of *Clostridium botulinum*. Adv. Microb. Physiol. 55, 183-266. [https://doi.org/10.1016/S0065-2911\(09\)05503-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2911(09)05503-9)

Ross, T., Dalgaard, P., 2014. Secondary models. In: Modeling Microbial Responses in Foods, Ed. McKellar, R.C., Lu, X. CRC Press, Boca Raton, USA, p. 63-150.

Taylor, T.M., Doores, S.X., 2021. Organic acids. In: Antimicrobials in Food 4th Edition, Ed. Davidson, P.M., Taylor, T.M., Davidson, David, J.R.D., CRC Press, New York, NY, p. 133-189.

BÖLÜM 6

TİTANYUM ESASLI BİYOMALZEMELERDE AFM UYGULAMALARI İÇİN BİR DEĞERLENDİRME

Pınar UYAN¹

¹ Metalurji Programı, Meslek Yüksekokulu, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, 11210, Bilecik, Türkiye

Biyoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, 11230, Bilecik, Türkiye <https://orcid.org/0000-0003-0411-9773>

1. GİRİŞ

Biyomalzemelerde karakterizasyon yöntemleri önemli bir konu olup (Bose & Bandyopadhyay, 2013), bu alanda da, fiziksel, kimyasal, (Sampath Kumar, 2013a), yapısal, mekaniksel (Roy, Bandyopadhyay & Bose, 2013), yüzey incelemeleri (Wang & Chu, 2013), gibi genel malzeme karakterizasyon teknikleri önemli bir yer işgal etmektedir (Wu & Cao, 2013). Burada ise, biyomedikal alanlarda yaygın kullanılan titanyumun, atomik kuvvet mikroskopları ile karakterizasyonu değerlendirilmektedir.

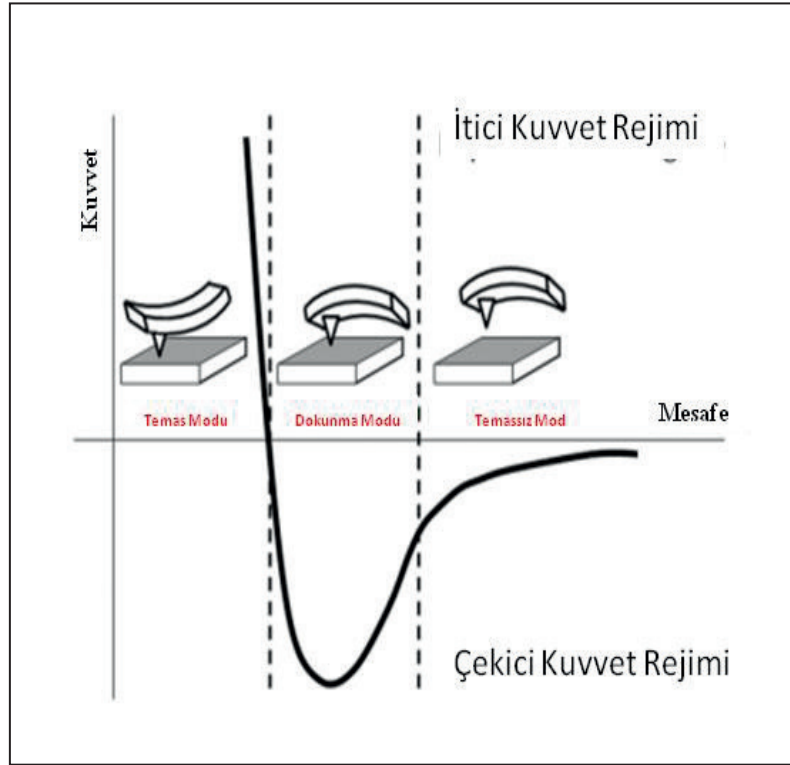
2. ATOMİK KUVVET MİKROSKOPU

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), bir tür taramalı prob mikroskobudur (SPM) ve elektronlar veya ışık demeti yerine bir yüzey üzerinde tarama yapmak için ince bir prob kullanır (Şekil 1). Atomik kuvvet mikroskopisi (AFM), yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için yüksek atomik çözünürlüğe sahip üç boyutlu bir topografik tekniktir (Vahabi, Salman & Javanmard, 2013).

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), biyolojik numunelerin görüntülenmesi için sıvı ortamlarda çalışabilmektedir. Bunun yanı sıra, iletken olmayan materyal yüzeylerini görüntüleyebilmektedir. AFM’de keskin bir uç kullanır ve bu ucun numunenin yüzeyi boyunca numuneyi taraması söz konusudur. Cihazda mevcut bu uç, yüzey üzerinde tarama yaparken ve ucun dikey hareketi kaydedilir. Yüzeyin topografik görüntüsü bu şekilde oluşturulur. Uygulanan kuvvet sabit tutulur. Şekil 2’deki kuvvet-mesafe eğrisinde gösterildiği gibi uç-yüzey etkileşimleri çekme veya itme şeklinde olabilir. Bu nedenle, AFM etkileşim mesafesine bağlı olarak çeşitli modlarda çalıştırılabilir. (Binnig & Quatte, 1986), (Kumar, 2013).



Şekil 1. Elastisite ölçümü için AFM (Vahabi, Salman & Javanmard, 2013).



Şekil 2. Kuvvet- prob mesafe eğrisi (Kumar, 2013)

AFM, ucunda birkaç nanometre çapında sivri bir uç bulunan esnek bir kantileverden oluşur. Numune yüzeyine yaklaştırılan uç ile yüzey arasındaki kuvvetler (kimyasal, elektrostatik vb.) kantileverin bükülmesine neden olur. Bu bükülme, lazer ve fotodedektör sistemi ile nanometre hassasiyetinde ölçülür. AFM, temasta (contact), temasız (non-contact) ve yarı temaslı (tapping) olmak üzere başlıca üç modda çalışabilir (Eaton & West, 2010).

Temas modu, yüksek çözünürlüklü topografik görüntüleme ve kuvvet spektroskopisi için uygundur. Ancak yumuşak biyolojik örneklerde hasar riski taşır. Yarı temaslı (tapping) mod ise numuneye daha az kuvvet uygulayarak, biyomalzeme ve polimer yüzeylerin hassas görüntülenmesinde altın standart haline gelmiştir. Kuvvet Spektroskopisi adı verilen teknikle, kantileverin numuneye yaklaşma ve uzaklaşma eğrileri kaydedilerek, yüzeyin yerel elastik modülü, adezyon kuvveti ölçülebilir (Butt, Cappella & Kappl, 2005).

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) , biyomalzeme araştırmaları için SEM, TEM, XRD gibi diğer tekniklerle elde edilemeyen çok boyutlu veriler sunar. Üç boyutlu nano topografyadan, yerel mekanik özelliklerin tespitine, sıvı ortamlarda ölçümlerden tutun ki bu nem içeren biyolojik numuneler için çok kritik bir konudur, hücrelerin adhezyon kuvvetlerini belirlemeyi de sağlayan yüzey kuvvetleri ve adhezyon verilerine kadar faydalı veriler eldesi için önemli bir araçtır. Biyomalzemelerde yüzey morfolojisi, gözeneklerin yapısı, kristalite oranı ve elbette pürüzlülük değerleri nicel olarak ölçülebilir. Hücrelerin, yüzey topografyasındaki nanometrik değişikliklere duyarlı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle üç boyutlu nanotopografya verileri için AFM önemlidir (Anselme Ploux & Ponche 2010).

AFM, geleneksel mikroskoplardan farklı olarak, ışık veya elektron demeti yerine fiziksel bir prob kullanarak numune yüzeyi ile prob arasındaki atomik kuvvetleri ölçer. Bu teknik, nanometre hatta atomik çözünürlükte üç boyutlu yüzey görüntüleme ve çeşitli fiziksel özelliklerin haritalanmasına

olanak tanır. Biyomalzeme araştırmalarında AFM'nin önemi, yüzey topografyası, pürüzlülük, mekanik özellikler (elastik modül, sertlik), adezyon kuvveti ve tribolojik davranış gibi kritik parametreleri sıvı ortamda ve biyolojik koşullara yakın şartlarda ölçebilmesinden kaynaklanır (Garcia, 2020). Özellikle biyouyumlu malzemelerin hücre-malzeme etkileşimleri, yüzeyin hücre adezyonu, yayılımı ve farklılaşması üzerindeki etkisi doğrudan bu yüzey özellikleriyle ilişkilidir. Bu nedenle AFM, biyomalzemelerin tasarımı, geliştirilmesi ve performans değerlendirmesinde vazgeçilmez bir karakterizasyon aracı haline gelmiştir.

Bir malzemenin biyomalzeme olarak kullanılabilmesi, biyouyumlu olmasına bağlı olup, biyouyumluluğu etkileyen en önemli faktörlerden biri de, malzemelerin sertlikleriyle hücre iskeletlerinin uyumlu olmasıdır. AFM, kuvvet spektroskopisiyle nano-mekanik haritalama yapılması mümkün olup, malzemelerin farklı bölgelerindeki elastik modül değerleri belirlenebilir. Bu bağlamda yerel mekanik ölçümlere olanak sağlayan AFM önemlidir (Guz et al., 2014).

3. TİTANYUM ESASLI BİYOMALZEMELERDE BAZI AFM UYGULAMALARI

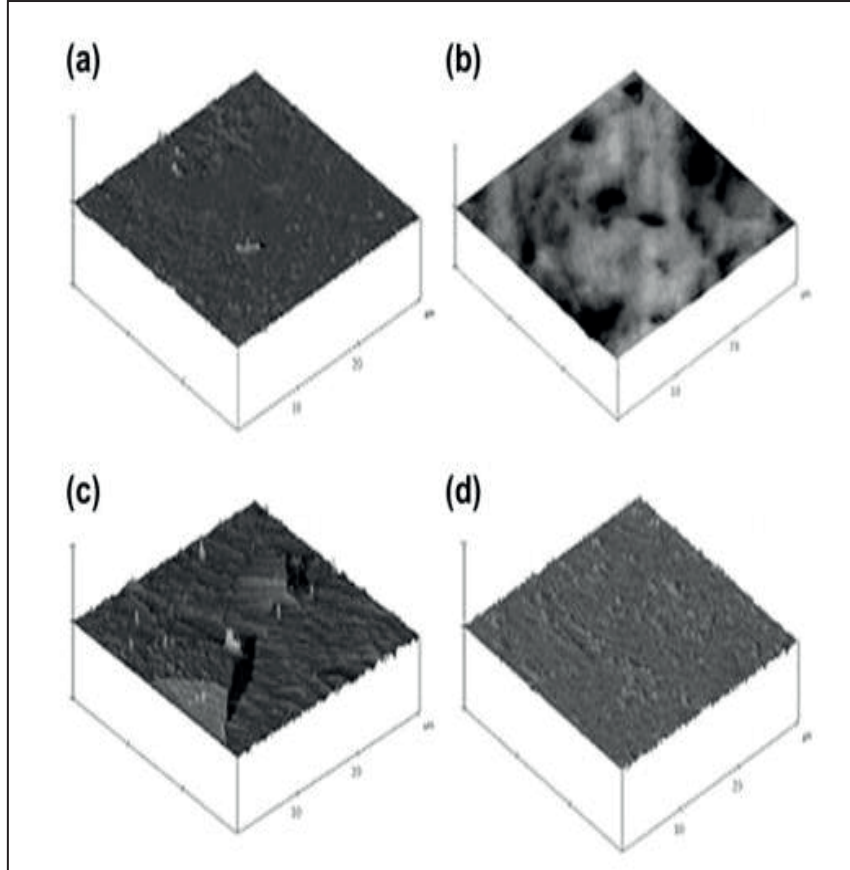
Titanyum (Ti) ve alaşımları, yüksek mukavemetleri, korozyon dirençlerinin çok iyi oluşu ve biyouyumlulukları nedeniyle ortopedik ve dental implantların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Jiang et al., 2023).

AFM, Ti esaslı malzemelerin geliştirilmesi çalışmalarında, yüzey modifikasyonlarının ve kaplamaların değerlendirilmesinde örneğin, titanyum implantların yüzeylerine çeşitli modifikasyonlarda (asitle dağlama, anodizasyon gibi) veya kaplamalarda (hidroksiapatit, titanyum nitrit, polimerik kaplamalar gibi) uygulanır. AFM, yukarıda sözü edilen bu iki işlemin neden olduğu nano topografik değişiklikleri (asitle dağlama sonrası oluşan mikro ve/veya nano çukurlar gibi) ve yüzey pürüzlülüğünü nicel olarak ortaya koyar. Literatürde, belirli bir pürüzlülük aralığının ($R_a \sim 1-2 \mu m$) osseointegrasyonu (kemikle bütünleşme) optimize ettiği gösterilmiştir (Wennerberg & Albrektsson, 2009). AFM, bu pürüzlülük değerlerinin hassas kontrolünde önemlidir. Farklı pürüzlülükteki titanyum yüzeylerde fibrinojen adsorpsiyonunun AFM ile haritalanması, pürüzlü yüzeylerde protein kümelenmesinin arttığını ortaya koymuştur (Lord, Foss & Besenbacher, 2010). İmplantların vücut sıvısı içindeki uzun vadeli stabilitesi korozyon direncine bağlıdır. Tribo-korozyon çalışmalarında da AFM, kullanılmaktadır. (Liu, Zhu & Gilbert, 2021). Hücre-malzeme etkileşimlerinin doğrudan izlenmesinde AFM, canlı osteoblast veya fibroblast gibi hücrelerin, modifiye edilmiş titanyum yüzeyler üzerindeki yayılımı, morfolojisi ve mekanik özellikleri hakkında bilgi verebilir ve hücrelerin, farklı nano topografyalara tepkisi zamanla izlenebilir. Ayrıca, AFM ucu biyo-fonksiyonalize edilerek (örneğin spesifik antikolar bağlanarak) hücre yüzeyindeki belirli reseptörlerin haritalanması da mümkündür (Müller & Dufrêne, 2011).

Biyomalzeme doku etkileşimleri, performansı etkileyeceğinden malzemelerin yüzey özellikleri ile biyolojik tepkiler arasında olumsuz bir etkileşim, implantların entegrasyonunu güçleştirir. Bu amaçla, titanyum yüzeyini değiştirmek için, hem biyoaktiviteyi arttırmak hem de kemik dokusunun büyümesine ve sabitlenmesine neden olan çeşitli yüzey uygulamalarıyla ilgili çalışmalarda, doku ile titanyum arası bağı güçlendirmek için kimyasal işlemlerle yüzey modifikasyonu yapılmaktadır. Bu kimyasal işlemlerden biri olan alkali işleminin prensibi, yapay vücut sıvılarında apatite dönüşen NaOH sulu çözeltisine maruz bırakılma sonucu yüzeyde sodyum titanat hidrojel tabakasının oluşmasıyla yüzey kimyasının değiştirilmesidir (Kumar, 2013).

Kimyasal işlem görmeyen, HNO_3 ile işlem gören, H_2SO_4 ve HCl çift asitle işlem gören ve NaOH alkali ile işlem gören titanyumun AFM görüntüleri Şekil 3'de gösterilmektedir. HNO_3

uygulandığında AFM ile elde edilen morfolojik görüntülerde oksit oluşumu görülmüştür (Şekil 3.b). Çift asit işlemi, titanyumun tane sınırlarını açığa çıkarır (Şekil 3.c). AFM görüntülerinden hesaplanan pürüzlülük değeri (R_a), asit uygulanmış numuneler için işlem görmemiş numuneye göre daha yüksek bulunmuştur. Alkali ile işlem görmüş numunede (Şekil 3.d) düşük miktar sodyum titanat fazı gösterilmiştir (Kumar, 2013). AFM'in sıvı ortamda çalışmaya olanak verme avantajı ile elde edilen bu gibi sonuçlar biyomalzeme çalışmalarına ışık tutan verileri içerir.



Şekil 3. (a) işlem görmemiş, (b) HNO_3 ile işlem görmüş, (c) çift asit ile işlem görmüş ve (d) NaOH ile işlem görmüş Ti numunelerinin atomik kuvvet mikroskobu görüntüleri (Kumar, 2013)

4. GENEL DEĞERLENDİRME

Biyomalzemeleri, bihassa yaygın metalik esaslılarından olan titanyum malzemeleri incelemede, karakterizasyon tekniklerinin kapsamının gelişmesi ve farklı tekniklerin olması, gerek yeni biyomalzemeler için araştırmaları, gerekse mevcut malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesini sağlayarak farklı bilgileri ortaya koyarak, daha çok veri çeşitliliği kazandırmaktadır. Bu kapsamda mikroyapı analizlerinde kullanılan karakterizasyon tekniklerinin bilinmesi yanında, uygulanma amacının da doğru saptanması önemlidir.

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), titanyum bazlı biyomalzemeler de dahil olmak üzere, tüm biyomalzeme araştırmalarında, yüzeyin nano-fiziksel ve nano-mekanik özellikleriyle ilgili geniş bir bakış açısı sunmaktadır. Bu teknik, malzeme bilimi ve mühendisliği ile biyoloji arasında adeta bir

köprü kurarak, biyo-uyumluluğu ve fonksiyonelliği belirleyen temel bilgieri anlamamıza yardımcı olur. Titanyum malzemelerin gerektirdiği hassas çalışma ortamını bize sağlar

Ve yine in-situ çalışmalara uygun, sıvı ortamlarda ölçüme olanak tanıyan AFM, tüm biyolojik sıvılar içinde bile çalışabilir. Tabi bu avantaj, biyo-malzemelerin gerçek kullanım şartlarına yakın ortamlardaki karakterizasyonuna ve hücre ile malzeme arası etkileşimlerin canlı izlenmesine olanak tanır.

Gelecekte, yüksek hıza sahip AFM sistemleri ile dinamik biyolojik süreçlerin gerçek zamanlı izlenmesi, çok fonksiyonlu problemlerin gelişimi ile elektriksel ve manyetik özelliklerin eşzamanlı haritalanması ve biyo-yazıcılarla üretilen kompozit yapıların karakterizasyonunda AFM'nin rolünün daha da artması ön görülebilen bir durumdur.

Titanyum implant üretim teknolojilerinde, kişiye özel ve akıllı yüzeylerin geliştirilmesinde, AFM'nin sağladığı nanometrik ölçekteki bilgiler biyomedikal alanda önemini koruyacaktır.

KAYNAKLAR

- Anselme, K., Ploux, L., & Ponche, A. (2010). Cell/Material Interfaces: Influence of Surface Chemistry and Surface Topography on Cell Adhesion. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24(5), 831–852.
- Binnig, G., Quate, C. F., Gerber, C. (1986). Atomic Force Microscope. *Physical Review Letters*, 56 (9), 930-933.
- Bose, S., & Bandyopadhyay, A. (2013). Introduction to Biomaterials. Characterization of Biomaterials, 1-9.
- Butt, H.-J., Cappella, B., Kappl, M. (2005). Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications. *Surface Science Reports*, 59(1–6), 1–152.
- Eaton, P., West, P. (2010). Atomic Force Microscopy. Oxford University Press.
- Garcia, R. (2020). Nanomechanical Mapping of Functional Materials by Atomic Force Microscopy. Springer.
- Guz, N., Dokukin, M., Kalaparthi, V., Sokolov, I. (2014). If Cell Mechanics Can Be Described by Elastic Modulus: Study of Different Models and Probes Used in Indentation Experiments. *Biophysical Journal*, 107(3), 564–575.
- Jiang, P., Zhang Y, Hu. R, Shi B, Zhang L., Huang Q, Yang Y., Tang P., Lin C., (2023), Advanced surface engineering of titanium materials for biomedical applications: From static modification to dynamic responsive regulation, *Bioactive Materials*, Vol 27, 15-57
- Kumar S.,. (2013). Physical and Chemical Characterization of Biomaterials. Characterization of Biomaterials, 11-47.
- Liu Y, Zhu D., Gilbert J.L. (2021) Sub-nano to nanometer wear and tribocorrosion of titanium oxide-metal surfaces by in situ atomic force microscopy, *Acta Biomaterialia*, Volume 126, ,477-484,
- Lord, M. S., Foss, M., & Besenbacher, F. (2010). Influence of nanoscale surface topography on protein adsorption and cellular response. *Nano Today*, 5(1), 66-78.
- Müller, D. J., Dufrêne, Y. F. (2011). Atomic force microscopy: a nanoscopic window on the cell surface. *Trends in Cell Biology*, 21(8), 461–469.
- Roy, M., Bandyopadhyay, A., & Bose, S. (2013). Mechanical Properties of Bioceramic Coatings on Medical Implants. Characterization of Biomaterials, 311-321.
- Vahabi S., Salman, N., Javanmard A., (2013), Atomic Force Microscopy Application in Biological Research: A Review Study, *IJMS* Vol 38, No 2, 76-83.
- Wang, H., & Chu, P. K. (2013). Surface Characterization of Biomaterials. Characterization of Biomaterials, 105-174. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415800-9.00004-8>

- Wennerberg, A., Albrektsson, T. (2009). Effects of titanium surface topography on bone integration: a systematic review. *Clinical Oral Implants Research*, 20(4), 172–184.
- Wu, M. H., & Cao, H. (2013). Characterization of Cardiovascular Implantable Devices. *Characterization of Biomaterials*, 355–417.

BÖLÜM 7

BİYOKÜTLEYE GENEL BAKIŞ

Betül ÇELİK¹ , Nesrin DURSUN²

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Ardahan Üniversitesi, LEE Çevre Sağlığı Ana Bilim Dalı, Ardahan, Türkiye E-posta: c_betus@hotmail.com

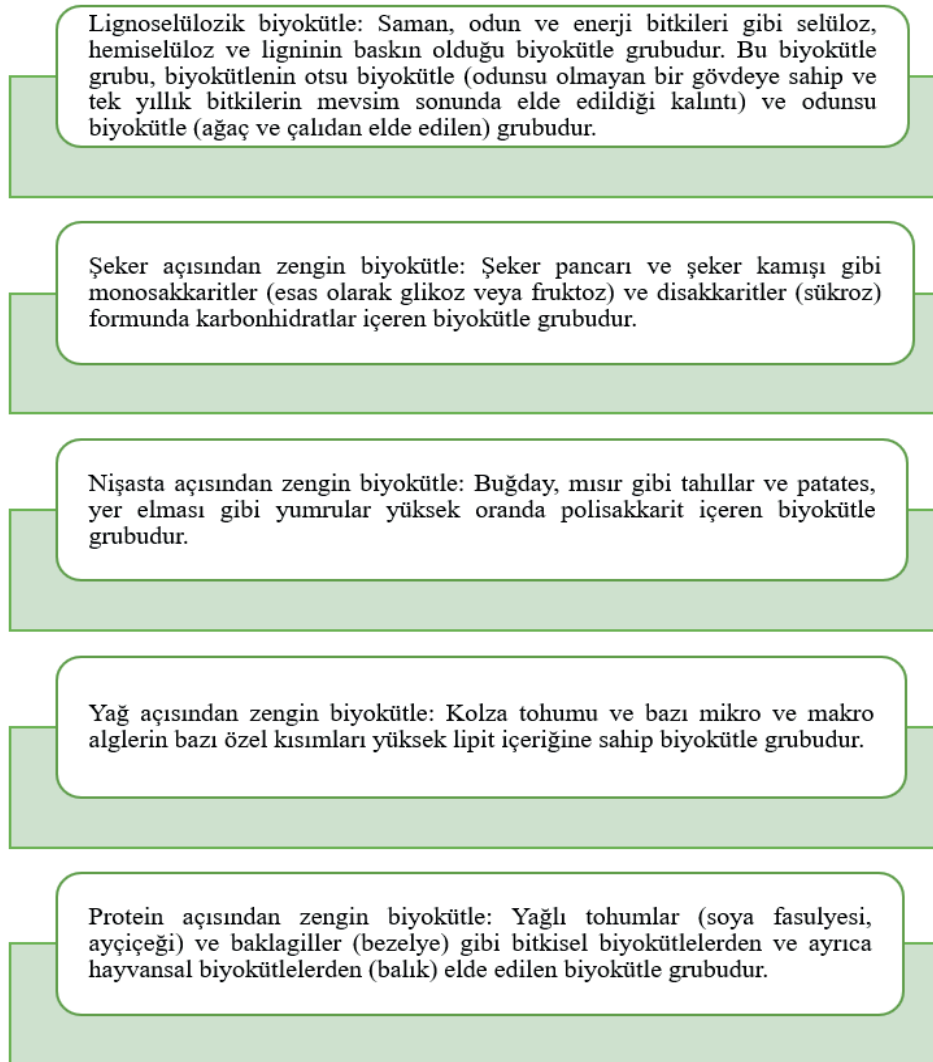
ORCID: 0009-0004-6316-5213

² Dr. Öğr. Üyesi, Ardahan Üniversitesi, LEE Çevre Sağlığı Ana Bilim Dalı, Ardahan, Türkiye

Dr. Öğr. Üyesi, Ardahan Üniversitesi, İnşaat Teknolojisi, Ardahan, Türkiye E-posta: nesrindursun@ardahan.edu.tr ORCID: 0000-0002-7463-1038

1. Giriş

Dünyada artan iklim değişikliği, tükenen doğal kaynaklar ve azalan fosil yakıt sorunları araştırmacılar ve kalkınma uygulayıcılar tarafından biyoyakıt alanında sürdürülebilir ve uygulanabilir çözümler bulmayı hızlandırmıştır. Sürdürülebilir yaklaşım temel alınarak, organik kaynaklar veya biyokütleden yeşil yakıt üretmek için teknolojik ilerlemeler aracılığıyla enerji geleceği güvence altına alınabilir. Biyokütle genel olarak gübre, ağaç, çimen ve kereste atıkları gibi biyolojik materyallerin çoğunu kapsamaktadır. Biyokütle ucuz, çok sayıda organik atığın varlığı ve biyoenerjinin sürdürülebilir kullanımı için oldukça etkili olduğundan hızla büyüyen bir sektör haline gelmiştir. Son yıllarda, biyoyakıt üretim teknolojisinde kayda değer gelişmelerin temeli biyokütleyle dayanmaktadır (Chakraborty vd., 2012). Biyokütle türleri, Şekil 1’de gruplandırılmıştır (Sánchez vd., 2019). Biyokütle biyoyakıtı dönüştürülerek elektrik üretmek, evleri ısıtmak ve endüstriyel tesisler için işlem ısısı sağlamak gibi çeşitli enerji ihtiyaçlarını karşılayabilmek için kullanılmaktadır. Biyokütle, genel olarak karbon, oksijen, hidrojen, azot ve daha küçük miktarda inorganik türlerden oluşan, bitkilerden veya hayvan gübresinden elde edilen malzeme olarak tanımlanabilir (Goyal vd., 2008). Biyokütle ısıtma hızı, sıcaklık gibi nedenlerle ayrışma bakımından farklılık gösteriyor olsa da ana bileşenleri selüloz, hemiselüloz ve lignindir. Bu kapsamda, bazı biyokütle tiplerinin bileşenleri Tablo 1’de verilmiştir (Abbasi & Abbasi, 2010).



Şekil 1. Biyokütle türleri gruplandırması

Tablo 1. Bazı biyokütle tiplerinin bileşenleri

Biyokütle	Selüloz (%)	Hemiselüloz (%)	Lignin (%)
Kâğıt	85-99	0	0-15
Yaprak	15-20	80-85	0
Buğday samanı	29-35	26-32	16-21
Arpa samanı	31-34	24-29	14-15
Pirinç samanı	32.1	24	18
Muz atığı	13.2	14.8	14
Yulaf samanı	31-37	27-38	16-19
Çavdar samanı	33-35	27-30	16-19
Bambu	26-43	15-26	21-31
Mısır koçanı	45	35	15

2. Biyokütlenin Yenilenebilir Enerji Kaynağı Olarak Potansiyeli

Biyokütle, çeşitli ürünlerin eldesi için kullanılabilen çok yönlü ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Biyokütle, çeşitli şekillerde kullanılmaktadır. Bu çerçevede, mısır ve şeker kamışı, ulaşımdan kaynaklı gaz emisyonlarını azaltmak amacıyla benzinle karıştırılabilen bir tür biyoyakıt olan etanolü üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Soya fasulyesi ve kanola gibi diğer mahsullerin de, farklı bir yenilenebilir biyoyakıt olan biyodizel üretmek için işlenebildiği rapor edilmiştir (Altınsoy, 2007). Kereste, kâğıt veya diğer orman endüstrisi ürünleri eldesinde, genellikle büyük miktarda atık malzeme kalmaktadır. Bu atıklar elektrik, ısı veya ulaşım yakıtları üretmek için kullanılabilen ağaç kabuğu ve talaşı içermektedir. Bazı orman kalıntıları, odun peleti yapmak için kullanılmaktadır. Ayrıca, gıda artıkları ve bahçe atıkları gibi evlerden ve iş yerlerinden gelen organik atıklar, elektrik veya ısı üretmek için kullanılabilen yenilenebilir bir yakıt olan biyogaz üretmek için işlenebilir. Bu durum, gaz emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olabilecek, depolama alanlarına giden atık miktarını da azaltmaktadır. Bununla beraber hayvansal atıklar da; elektrik veya ısı üretmek için biyogaz üretimi amacıyla kullanılabilir (Budak, 2017).

Biyokütle, doğal süreçlerle yenilenebilen organik malzemelerden türetildiği için sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır (Perea-Moreno vd., 2019). Buna ilaveten, enerji üretimi için biyokütle kullanımının sera gazı emisyonlarını azaltmaya ve iklim değişikliğini hafifletmeye yardımcı olduğu rapor edilmiştir (Furuvik vd., 2020). Ayrıca, orman kaybı ve toprak bozulması gibi olumsuz çevresel etkilerden kaçınmak için sürdürülebilir biyokütle yönetim uygulamaları gerekmektedir (Abt & Abt, 2013). Biyokütlenin hektar başına biyokütle enerji içeriği düşük olduğundan, biyokütlenin hasadı ve konsolidasyonu önemli bir ekonomik sorun olarak ortaya çıkmaktadır (Chundawat vd., 2011). Ancak biyokütle, göreceli olarak düşük fiyatı ve geniş kullanılabilirliği nedeniyle maliyet açısından etkili bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir (Kanevce vd., 2016). Endüstriyel atık ve tarımsal biyokütle, enerji üretimi için kolay erişilebilir kaynaktır (Perea-Moreno vd., 2019).

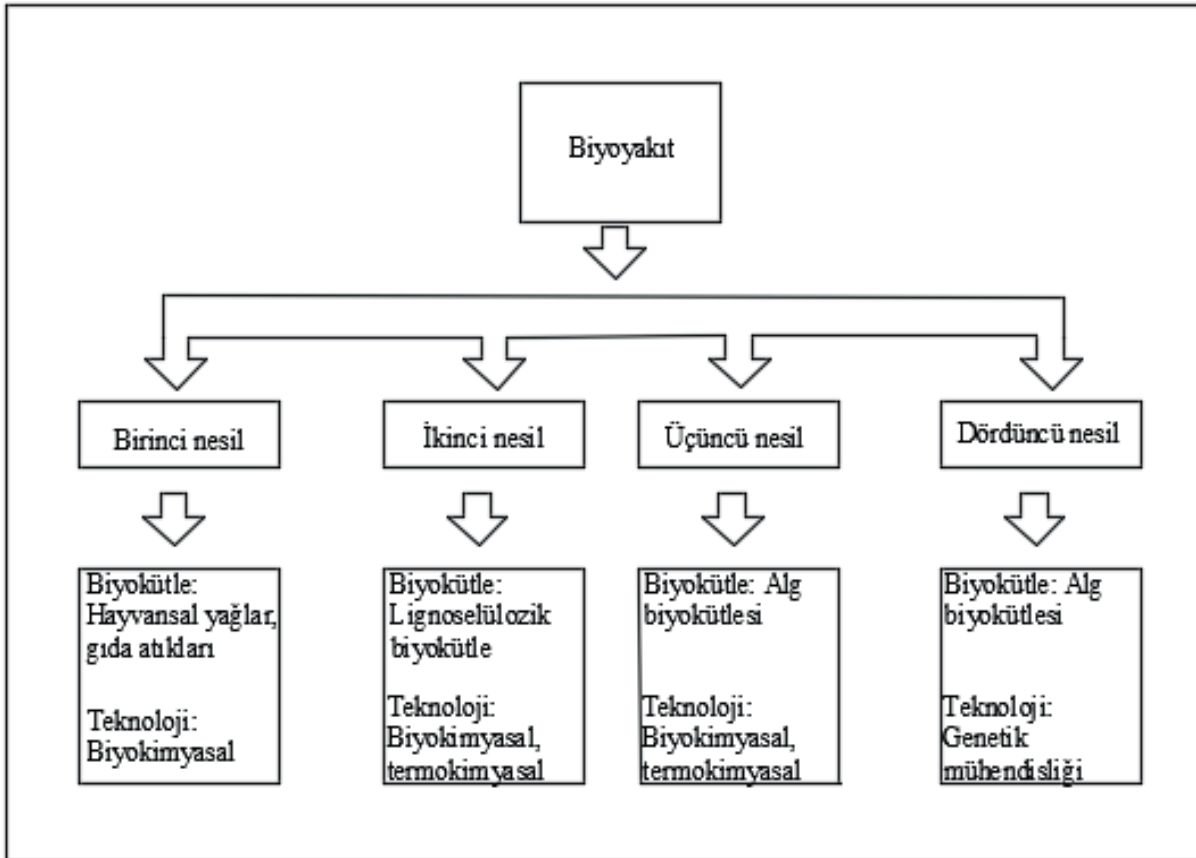
Biyokütle dönüşüm teknolojilerindeki ilerlemeler, biyokütleden enerji üretim verimliliğini ve etkinliğini önemli ölçüde arttırmıştır. Termokimyasal prosesler ile biyokütle, gaz ve sıvı yakıtlara dönüştürülmektedir (Wang vd., 2023). Biyokimyasal prosesler aracılığıyla da, biyokütleden biyogaz ve bioetanol üretilmektedir (Zhao vd., 2022).

Biyokütle, yenilenebilir enerji kaynağı olarak pek çok fayda sağlarken, kullanımının çevresel etkileri de olabilmektedir. Örneğin, enerji mahsulleri yetiştirmek için araziye müdahale edilmesi ormansızlaşmaya ve habitat kaybına neden olabilirken, yanlış yönetilen hayvansal atıklar su kirliliğine yol açabilmektedir. Biyokütlenin yönetimi, bu malzemelerin sürdürülebilir ve çevreye duyarlı şekilde kullanılması için gereklidir.

3. Biyokütle Kaynaklı Biyoyakıtlar

Biyokütle, sürdürülebilir enerji üretim potansiyeli ve geniş kullanılabilirliği nedeniyle artan bir öneme sahiptir (Perea-Moreno vd., 2019). Bitki ve hayvanlardan kaynaklı tarımsal artıklar, ormancılık kalıntıları ve enerji mahsulleri gibi atıkları içermektedir (Hadrović vd., 2020). Biyokütle, çeşitli dönüşüm prosesleriyle ısı, elektrik ve biyoyakıtlar gibi çeşitli formlara dönüştürülebilir (David vd., 2019).

Biyoyakıtlar biyokütle ham madde tipi, kullanılan teknoloji ve elde edilen yakıtı göre dört nesile ayrılmaktadır. Biyoyakıt nesilleri sınıflandırmasının yapılması çeşitli teknolojileri ve sürdürülebilirlik özelliklerini ayırt etmeye yardımcı olmaktadır. Birinci nesil, biyoetanol ve biyodizel gibi yakıtlar üreten şeker kamışı, mısır ve bitkisel yağlar gibi gıda kökenli ürünlerden elde edilmektedir. Bu biyoyakıtlar, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak için önemli rol üstlenmiş olsa da, gıda güvenliği ve arazi kullanımındaki değişikliklere yönelik sorunlar, ikinci nesil biyoyakıtlara geçişe yol açmıştır. İkinci nesil biyoyakıtlar tarımsal kökenli atıklar, odun ve enerji bitkileri gibi gıda dışı biyokütle kaynaklarından elde edilmektedir. Bu ham maddeleri, biyoyakıt tiplerine dönüştürmek için biyokimyasal ve termokimyasal prosesler gibi teknolojiler kullanılmaktadır. Bu sayede sürdürülebilirlik arttırılarak, gıda üretimiyle rekabet en aza indirilmektedir. Üçüncü nesil biyoyakıt eldesinde algler ham madde olarak kullanılarak, verimlilik ve karbon yakalama potansiyeli avantajı sunmaktadır. Üçüncü nesil biyoyakıtların, birinci ve ikinci nesil biyoyakıtlar ile ilişkili arazi kullanım zorluklarını giderebilme potansiyeli bulunmaktadır. Dördüncü nesil biyoyakıtlar ise, alglerin genetiği değiştirilerek üretilmektedir. Bu kapsamda, Şekil 2’de biyoyakıt nesilleri sunulmuştur (Mansy vd., 2025).



Şekil 2. Biyoyakıt nesilleri

4. Biyokütleden Biyoyakıt Üretimi Araştırmaları

Biyokömür çalışmaları

Çevresel ve tarımsal yönetim amacıyla üretilen biyokömür, oksijenin neredeyse tamamen yokluğunda lignoselülozik biyokütlenin ısıtılmasıyla elde edilen karbon (C) açısından zengin katı bir üründür. Biyokömür toprağın kimyasal, fiziksel ve biyolojik özelliklerini iyileştirerek, karbon sekestrasyon oranını artırarak ve sera gazı emisyonlarını azaltarak çevreyi olumlu yönde etkilemektedir (Brown vd., 2024). Bu kapsamda yapılan araştırmalar yeni olup, Nuryana vd. (2020) tarafından yapılmış çalışmada, mikrodalga destekli piroliz ile hindistan cevizi kabuğu biyokütlesi biyokömüre dönüştürülmüştür. Mikrodalga destekli piroliz farklı mikrodalga sürelerinde (15-25 dakika) ve farklı mikrodalga gücünde (550-650 W) gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, en iyi biyokömür verimlerinden ikisi 550 W'da elde edilmiş olup, sırasıyla 15 dakika ve 20 dakika bekleme sürelerinde elde edilmiştir. Buna göre, 15 dakika ve 20 dakika sürede elde edilmiş biyokömürde, biyokömürlerin adsorpsiyon verimlilikleri sırasıyla %55 ve %41.32 olarak tespit edilmiştir. Ali vd. (2020) tarafından yapılmış çalışmada da, yüzey ve yeraltı sularındaki Arsenik (As) kirliliği incelenmiştir. Arsenik (As) ile kirlenmiş sulu çözeltilerden As(III)/As(V)'nin giderilmesi için badem kabuğu (ALS) ve badem kabuğu biyokömürü (ASB) bazlı sorbentlerin sorpsiyon potansiyeli değerlendirilmiştir. 5 mg L⁻¹'lik başlangıç As konsantrasyonunda, pH ~ 7.2'de ve 0.6 g L⁻¹'lik sorbent dozunda, AS ve ASB'nin maksimum As(III) sorpsiyon kapasitesi sırasıyla 4.6 ve 4.86 mg g⁻¹ olarak bulunmuştur. Aynı koşullarda, As(V)'in maksimum sorpsiyon kapasiteleri ALS ve ASB tarafından sırasıyla 3.45 ve 3.6 mg g⁻¹ olarak bildirilmiştir. Çalışma sonucunda, badem kabuğu biyokömürünün badem kabuğuna kıyasla %10-25 daha fazla As(III)/As(V) gidermiş olduğu belirlenmiştir. Uslu vd. (2020) tarafından yapılmış çalışmada, toprağa biyokömür uygulamadan önce ön ekotoksikolojik değerlendirmesi yapılmıştır. Araştırmacılar, yem bitkileri (Triticale çeşidi, *Pisum sativum* sp. gibi) tohum çimlenmesi ve fidelerinin erken büyümesi üzerinde, altı ceviz kabuğu biyokömürü oranının (0, 10, 20, 40, 80 ve 120 Mg ha⁻¹) etkilerini değerlendirmek için bir petri kabında çimlenme testi yürütmüştür. Çalışmada, çimlenme oranının hem yüksek hem de düşük biyokömür uygulama oranlarında azaldığı saptanmış, çimlenme oranı ve büyüme indekslerinin bitki türlerine bağlı olduğu bildirilmiştir.

Biyodizel çalışmaları

Biyokütleden elde edilen biyodizel, fosil yakıtların yerini alabilecek sürdürülebilir ve çevre dostu bir alternatif olarak giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Wang vd. (2021) bitkisel yağlardan kimyasal katalizle biyodizel üretiminin endüstriyel üretimde yaygın olarak kullanıldığına dikkat çekmiştir. Ramos vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada da, biyodizelin taşımacılık sektöründe fosil dizelin yenilenebilir bir alternatifi olarak nasıl öne çıktığı detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Ayrıca, biyodizelin ana üreticisi olan Avrupa'nın çevresel politikalarının etkisi ve biyodizel üretiminde kullanılan ana ham madde kaynaklarına dair bilgiler sunulmuştur. Sindhu vd. (2019) ise, biyodizelin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen bir biyoyakıt olduğunu vurgulamıştır. Bu çalışma, biyodizelin çevre dostu bir yakıt olmasının yanı sıra enerji güvenliğine olan katkılarına da dikkat çekmektedir. Ancak, biyodizel üretiminin sürdürülebilirliği konusunda ham madde seçimi, üretim yöntemi ve coğrafi konum gibi faktörlerin de kritik öneme sahip olduğu belirtilmiştir.

Biyodizel üretiminde, çevreci yaklaşımla geri dönüştürmeye uygun olması nedeniyle çoğunlukla atık yemeklik yağ kullanılmaktadır. Küresel pazarda ham petrolün maliyetinin artması ve geleneksel yakıtların tükenme eğilimi, dünya da küresel olarak artan enerji taleplerini karşılamak için alternatif yakıtı ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Bu kapsamda, Suzihaque vd. (2022) tarafından, atık yemeklik yağı transesterifikasyon işlemiyle biyodizele dönüştürmek amacıyla araştırma yapılmıştır. Atık yemeklik yağın asit değeri, serbest yağ asidi yüzdesi %2'den fazla ise atık yemeklik yağın ön işlem sürecinden geçirilmesi gerektiği ve standart titrasyon yöntemi kullanılması gerektiği rapor edilmiştir. Transesterifikasyon işleminde, katalizör olarak sodyum hidroksit ve reaksiyona giren alkol olan metanol kullanılmaktadır. Çalışma sonucu elde edilen biyodizelin özellikleri test edilmiş ve

biyodizel standart spesifikasyonları olan ASTM D6751 ve EN 14214 ile karşılaştırılmıştır. Yapılmış deneylerden, biyodizel veriminin %90'ından fazlasının atık yemeklik yağdan elde edilebildiği tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, atık yağların bertaraf edilmesinde alternatiflerden birinin atık yağdan biyodizel üretimi olduğu bildirilmiştir. Gouran vd. (2021) tarafından, metanol ve modifiye buğday kepeği külü, katalizör olarak CaO kullanılarak atık yemeklik yağın transesterifikasyonu araştırılmıştır. Basit katı hal reaksiyonu, iyi öğütme altında ve karıştırma ile damıtma ünitesinden buğday kepeği külü ve su ölçeği, 4 saatlik havada kalsinasyon sırasında 700 °C'de katalizör hazırlamak için kullanılmıştır. Katalizörü karakterize etmek için X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu ve fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi kullanılmıştır. Çalışma deney sonuçlarına göre, XRD pikinin çoğunluğu CaO ile karakterize edilmiştir. %93.6'lık biyodizel saflığı, optimum koşullar altında, yani 1.46:1'lik metanol/yağ hacim oranı, %11.66 ağırlıkça katalizör içeriği ve 114.21 dakika boyunca 54.6 °C'lik bir sıcaklık altında elde edilmiştir. Bu nedenle, bir buğday işleme yan ürünü olarak, buğday kepeği külünün biyodizelin saflaştırılması için uygun bir seçenek olabileceği sonucuna varılmıştır. Odeto ve vd. (2021) yumurta kabuğu ve atık tavuk yağını, biyodizel üretiminde ucuz katalizör ve yağ kaynakları olarak değerlendirme potansiyeli nedeniyle biyodizel eldesi kapsamında incelemiştir. Çalışmada, atık tavuk yağın transesterifikasyonu için yumurta kabuğu atığı katalizörü araştırılmıştır. Transesterifikasyon deneylerinde katalizör konsantrasyonu ve reaksiyon süresi dikkate alınarak, yumurta kabuğunun 1000 °C'de kalsinasyonla hazırlanan heterojen katalizörü kullanılmıştır. Bu katalizörün SEM analizi, elde edilen yumurta kabuğu parçacıklarının şeklinin ve boyutunun kalsinasyondan sonra azaldığını göstermiştir. Gaz kromatografisi analizinde ise, en yüksek verimlilikle üretilen biyodizel olduğu doğrulanmıştır. Çalışmada, %2 katalizör ağırlığında ve 2 saatlik reaksiyon süresinde, maksimum %90.2 biyodizel verimine ulaşılmıştır. Kavitha vd. (2019) biyodizel üretimine ilişkin yapmış olduğu çalışmada, süt endüstrisinden oluşan C4-C18 yağ asitlerinin trigliseritlerini içeren atık köpük yağı, modifiye yumurta kabuğundan elde edilen nanokalsiyum oksit varlığında biyodizel üretimi için potansiyel bir ham madde olarak incelemiştir. Yumurta kabuğu atığı nanokalsiyum oksitin kolay sentezlenmesi amacıyla 800 °C'de kalsine edilmiş, X-ışını difraktometresi, fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi ve taramalı elektron mikroskobu ile karakterize etmiştir. Kalsine edilmiş yumurta kabuğunun kristalit boyutunun 16-22 nm aralığında değişen kalsit formunda çoğunlukla nanokalsiyum oksit (CaO) içerikli olduğu bildirilmiştir. Transesterifikasyon reaksiyonu kesikli reaktörde gerçekleştirilmiş ve katalizör yükleme, metanol:yağ mol oranı, reaksiyon sıcaklığı ve süresi gibi çalışma parametreleri optimize edilmiştir. Çalışmada 6:1 metanol/yağ mol oranı, %2.4 ağırlıkça katalizör miktarı ve 3 saat boyunca 65 °C reaksiyon sıcaklığı ile %96'lık maksimum biyodizel verimine ulaşılmıştır.

Biyoetanol çalışmaları

Biyokütleden biyoetanol üretimi, fosil yakıtların tükenmesi ve iklim değişikliği sorunlarına karşı sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak büyük ilgi görmüştür. Shah & Rehan (2014) bu alandaki çalışmalarında, biyokütlenin enerji üretimi için potansiyel bir kaynak olarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Buna ilaveten, biyoetanol üretim sürecinde ham madde seçiminin, ön işlem sürecinin ve fermantasyon için kullanılan mikroorganizmaların kritik öneme sahip olduğunu belirtmiştir. Ancak, biyokütlenin biyoetanol üretimi için kullanılmasının gıda arzını etkileyebileceği konusunda da uyarılarda bulunmuşlardır. Prasad & Ingle (2019) ise biyoetanolin, tarihsel olarak enerji kaynağı olarak kullanıldığını ve modern biyokütle enerjisi formlarının sıvı yakıtlar, gaz yakıtlar ve biyokütle gazlaştırmasından elektrik enerjisi üretimini içerdiğini belirtmiştir. Biyoetanolin sürdürülebilir kalkınmayı desteklemek için optimal kullanım seviyelerinin belirlenmesi gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca, biyokütle kaynaklı biyoetanolin taşımacılık amacıyla kullanıldığında ekonomik ve çevre dostu bir alternatif olabileceğini belirtmiştir. Fosil yakıtların kullanımıyla ilişkilendirilen çevresel sorunlar ve yakın gelecekte beklenen kıtlıklar, yenilenebilir kaynaklardan üretilen yeni alternatif yakıtların araştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, Kennes vd. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, biyoetanolin fermantasyon yoluyla biyokütle ve atıklardan elde edilebilen bir biyoyakıt olduğu belirtilmiştir. Hidrolitik ve termokimyasal olmak üzere iki yöntem, besin maddelerini fermente edilebilir substratlara dönüştürmeye izin vermektedir. Hidrolitik

yöntemde, besin maddesi ileri aşamada yapılacak hidrolitik işlemi kolaylaştırmayı amaçlayan bir ön işlem aşamasından geçmektedir. Lignoselülozik besin maddeleri esas olarak selüloz, hemiselüloz ve ligninden oluşmaktadır. Robak & Balcerek (2018) ikincil nesil biyoetanol üretiminin lignoselülozik biyokütle kullanımıyla birincil nesil ve sonraki nesil biyoyakıtlardan nasıl ayrıldığına dair genel bir bakış sunmuşlardır. Bu çalışmada, lignoselülozik biyokütlenin yapısal bileşenlerinin ön işlem, enzimatik hidroliz ve fermentasyon gibi teknolojik birim adımlarıyla nasıl işlendiği detaylandırılmıştır. Bu kapsamda, lignoselülozik biyokütlenin enzimatik hidroliz ve fermentasyon süreçlerinde nasıl işlendiği ve bu süreçlerin biyoetanol üretimi için nasıl optimize edildiği ele alınmıştır. Rezanian vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada da, lignoselülozik biyokütlenin dirençli yapısı nedeniyle biyoyakıtların üretiminde ön işlemin gerekli bir adım olduğu belirtilmiştir. Farklı ön işlem yöntemleri, yüksek verimli biyoyakıt üretmek için farklı mekanizmalarla uygulanmıştır. Bu çalışmada, lignoselülozik biyokütleden biyoetanol üretimi için çeşitli ön işlem tekniklerinin uygulanmasına ilişkin son bulgular gözden geçirilmiştir. Lignoselülozik biyokütle, tarım ve orman artıkları, enerji bitkileri ve selülozik atıklar olmak üzere dört ana kaynağa ayrılabilir. Buğday, mısır, pirinç ve şeker kamışı lignoselülozik biyokütleyi üretmek için kullanılan ana bitkilerdir.

Patates kabuğu atığının etanol ham maddesi olarak kullanmayı garanti altına alacak kadar yeterli miktarda nişasta, hemiselüloz, selüloz ve fermente edilebilir şeker içerdiği Arapoglou vd. (2010) tarafından rapor edilmiştir. Bu kapsamda, bir dizi patates kabuğu atığı çeşitli enzimler ve/veya asitle hidrolize edilmiş ve *Saccharomyces bayanus* ile fermente edilerek etanol üretimi belirlenmiştir. Üç enzimin kombinasyonu ile enzimatik hidrolizle, 18.5 g L⁻¹ indirgen şeker oluşmuştur. Fermentasyon sonrasında, 7.6 g L⁻¹ etanol elde edilmiştir. Sonuçlar, patates endüstrisinin bir yan ürünü olan patates kabuğu atığının etanol üretimi için yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Yoswathana vd. (2010) tarafından, pirinç samanından biyoetanol eldesinde, lignoselüloz malzemeyi şekerle dönüştürmek için farklı kimyasal (asit, alkali) ve fiziksel (kritik altı su, ultrason) yöntemler uygulanmıştır. 121 °C'de 15 dakika asit işlemi sonrası %21.45'e kadar şeker ölçülmüştür. Araştırmada, kimyasal ön işlem ve ardından enzim işlemi kombinasyonu şeker verimini önemli ölçüde arttırmıştır. Asit ve alkali ön işlem görmüş numuneler için sırasıyla %37 ve %28'e kadar şeker elde edilmiştir. Kritik altı su işleme yöntemi etkili bir fiziksel yöntemdir. 200 °C'de ve 10 dakika boyunca kritik altı su işlemi ve ardından enzim işlemi, %17'ye kadar şekerle sonuçlanmıştır. Enzim işleminden önce asit ön işleminin ultrasonik ile kombinasyonu lignoselülozların şekerle dönüşümünü arttırmıştır. Asit ve ultrasonik ön işlemin kombinasyonu ve ardından enzim işleminin kombinasyonundan sonra %44 orana kadar şeker verimi elde edilmiştir. Ön işlem uygulanmış pirinç samanı fermentasyonu, 3 günlük fermentasyon sonrası şekerin çoğunun (%55-65) biyoetanole dönüştürülebileceğini göstermiştir. Buna ilaveten kalan şekerin 6 günlük fermentasyon sonrasında etanole dönüştürülemediği rapor edilmiştir. Bu koşullar altında, maksimum etanol %1.69 (v/v) olarak belirlenmiştir. Kuttiraja vd. (2013) tarafından, Hindistan'da yaygın bulunan *Dendrocalamus* bambu çeşidi, bambu işleme endüstrilerinin yan ürünü olarak büyük miktarda üretilen biyokütle olduğu için enzimatik sakkarifikasyon ile biyoetanol üretimi kapsamında incelenmiştir. Biyokütleye seyreltik alkali ön işlem uygulanmış, ligninin etkili şekilde giderilmesiyle sonuçlanmış ve selüloz konsantrasyonu %46.7'den %63.1'e etkili şekilde artmıştır. Ön işlem uygulanmış biyokütlenin enzimatik sakkarifikasyonu, bir yanıt yüzey metodolojisi izlenerek optimize edilmiş ve maksimum sakkarifikasyon için optimum parametre seti oluşturulmuştur. Ön işlem yöntemi toplam şeker polimerlerinin %64.31'ini geri kazanabilmiş ve %82.36 oranında hidroliz verimliliği elde edilmiştir. Ham biyokütleden etanole kadar tüm süreç için malzeme dengeleri hesaplanmış ve genel süreç verimliliği %43 olarak saptanmıştır. Choi vd. (2013) tarafından, mandalina (*Citrus unshiu*) kabuğu atığından etanol üretmek için, ateşli bir brülör ve bir eksen üzerinde dönen yatay bir silindir kullanan biyokütle patlatma ön işlemi sistemi tasarlanmıştır. Patlatma ön işlemi, kimyasal işlem yapılmadan 150 °C'de 10 dakikada gerçekleştirilmiştir. Patlatma ön işlemi, parçacık boyutu 1 mm'den daha küçük hale getirilmiştir. Ön işlem görmüş mandalina (*Citrus unshiu*) kabuğunun enzimatik hidrolizi, 50 mM sodyum asetat tamponunda (pH 4.8) 45 °C'de 6 saatte gerçekleştirilmiştir. Vakumlu buharlaştırma işlemi, fermente edilebilir şeker konsantrasyonunu %10'a (fruktoz %2.9 ve glikoz %7.1) çıkarmıştır. Çalışmada, 30 °C'de pH 5.0'de

12 saat boyunca laboratuvar biyoreaktöründe yapılan fermentasyonun, 36 saatte ham mandalina (*Citrus unshiu*) kabuğundan elde edilen etanol verimini %78'e kıyasla %90.6'ya çıkardığı tespit edilmiştir. Tenkolu vd. (2024) tarafından, atık patates kullanılarak biyoetanol üretiminde fermentasyon koşullarının optimizasyonu araştırılmıştır. Kompozisyon analizi yapılmış, %39.7 nişasta, %5.82 kül, %9.46 protein, %7.33 yağ ve %34.7 nem içeriği saptanmıştır. pH, sıcaklık ve inkübasyon süresi gibi fermentasyon koşullarının etanol verimini etkilediği belirlenmiştir. Sıcaklık, pH ve fermentasyon süresi gibi en önemli parametrelerin optimizasyonu Box-Behnken deney tasarımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonuçları 32.2 °C'lik optimum sıcaklık, 4.07 pH ve 72.1 saatlik inkübasyon süresiyle %34.5 (v/v) maksimum etanol verimi göstermiştir.

Biyometanol çalışmaları

Biyometanol, metanolün biyolojik olarak üretilen bir formudur ve fosil yakıtların yerine geçebilecek sürdürülebilir bir alternatif olarak görülmektedir. Bu alanda yapılmış araştırmalar diğer biyoyakıtlara göre daha sınırlıdır. Bu kapsamda, Shamsul vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada, biyometanolün benzersiz özellikleri ve potansiyel enerji kaynağı avantajları olduğu vurgulanmıştır. Gautam vd. (2020) tarafından yapılan bir incelemede de, atık biyokütleden sürdürülebilir biyometanol üretimi için araştırılan çeşitli termokimyasal ve biyokimyasal yolların genel bir bakışı sunulmuştur. Araştırmada, çeşitli (sıcaklık ve basınç) koşullar altında metanol üretimi için biyokatalizörler olarak mikroorganizmaları kullanan biyokimyasal dönüşüm yoluna odaklanılmıştır. Başka bir çalışmada da, atık su arıtma tesislerinde metanol gibi organik bileşiklerin atık sular için izin verilen seviyeleri karşılamak için yaygın olarak kullanıldığı rapor edilmiştir. Su vd. (2019) tarafından, atık su arıtma tesislerinde, aktif çamur kullanılarak metandan metanol üretimi için sürekli proses geliştirilmiştir. Hidroksilamin'in elektron verici olarak kullanıldığı maksimum amonyak oksitleyen bakterilerin (AOB) özgül metanol üretim hızı, sırasıyla 7.5 saat ve 2 saat hidrolik bekleme süreleri (HRT) için 1.61 ± 0.15 ve 1.27 ± 0.15 mg-KOI-CH₃OH/(mg-KOI-AOB*g) olarak tespit edilmiştir. Elektron vericisi olarak amonyak kullanıldığında, 2 saat hidrolik bekleme süresine karşılık gelen üretim hızı 0.31 ± 0.08 mg-KOI-CH₃OH/(mg-KOI-AOB*g) olarak saptanmıştır. Araştırma sonuçları, sürekli akışlı bir sistemde nitrifikasyon aracılığıyla metanol üretiminin, denitrifikasyon için biyometanolün dahili üretimi yoluyla atık su arıtma tesislerinin verimliliğini arttırabileceğini göstermiştir. Kasmuri vd. (2016) tarafından da, maksimum biyometanol verimi, parçacık boyutları ve enerji verimliliği bakımından incelenmiştir. Bu kapsamda şeker kamışı küspesi, talaş, kök odunu ve gövde odunu biyometanol dönüşümü için kullanılmıştır. Araştırmada, piroliz işleminin ileri aşamalarında şeker kamışı küspesi seçilerek, 5 ila 10 mm biyokütle parçacık boyutunda %6 enerji verimliliği ile ağırlıkça %2.41 biyometanol verimine ulaşılmıştır.

Biyohidrojen ve Biyometan çalışmaları

Biyohidrojen ve biyometan, fosil yakıtlara en iyi alternatif sürdürülebilir gaz yakıtlardır. Bu yakıtların toksik olmadığı, çevre dostu yakıt olup, 142 kJ/g'dan oluşan petrole göre yaklaşık 3.5 kat daha yüksek enerji içerikli olduğu bildirilmiştir (Trchounian & Trchounian, 2015; Mahmoodi-Eshkaftaki & Mockaitis, 2022). Bu kapsamda, Hai vd. (2023) tarafından immobilize *Bacillus anthracis* bakteri suşu ile, mezofilik koşullar altında evsel mutfak gıda atığı ve palmye yağı değirmeni atığı birlikte kullanılarak, biyolojik hidrojen üretim potansiyeli araştırılmıştır. Çalışmada, pH değerinin 4.0'dan 5.0'a yükseltmenin hidrojen üretimini önemli ölçüde arttırdığı, pH değerinin 5.0'ın üzerine çıkmasının da verimliliği azalttığı rapor edilmiştir. Buna ilaveten, çalışma sıcaklığının 25 °C'den 35 °C'ye yükseltmenin hidrojen üretim hızını 67 mL/saat'e kadar arttırdığı saptanmıştır. Çalışma, hidrojen üretiminin pH ve sıcaklığa bağlı olduğunu göstermiştir. Jokhio vd. (2023) tarafından, muz atığı ve kanalizasyon çamuru birlikte kullanılarak, biyometan ve biyohidrojen verimi incelenmiştir. Bu kapsamda, ilk aşamada aşı olarak kullanılan kanalizasyon çamurunun ortama alışması, sürekli karıştırılmalı tank reaktörde gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, altı farklı muz atığı/kanalizasyon çamuru oranı optimize edilmiş ve 40 gün boyunca manuel metan potansiyeli test kurulumunda inkübe edilmiştir. Araştırmada, en iyi biyometan ve biyohidrojen verimleri %60 muz

atığı+%40 kanalizasyon çamuru olan çalışmada elde edilmiştir. Üçüncü aşamada, en iyi elde edilen muz atığı ve kanalizasyon çamuru oranı, daha sonra alkali ön işlem olarak farklı dozlarda NaOH ile işlenmiştir. Buna göre, optimum biyometana 620.8 N mL/gün olarak 0.75 mol NaOH olan çalışmadan ulaşılmıştır. Çalışma, muz atığının kanalizasyon çamuru ile birlikte kullanımının biyohidrojen ve biyometan üretiminin artırılması açısından ümit verici bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Ghasemian vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, pamuk bitkisi atıklarından (sap ve tohum kabuğu) biyometan ve biyohidrojen üretimi araştırılmıştır. Çalışma 10, 30 ve 60 dakika boyunca 0 ve 100 °C’de %8 (w/w) konsantrasyonda sodyum hidroksit çözeltisi, 6 ve 12 saat boyunca 40 ve 80 °C’de %4 ve %8 (w/w) konsantrasyonlarda amonyak çözeltisi ile alkali ön işlem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Biyogaz maksimum üretimi sırasıyla 246 ve 219 mL/g uçucu katı olup, 100 °C’de 10 dakika boyunca %8 (w/w) sodyum hidroksit çözeltisi ile ön işleme tabi tutulan tohum kabuğu ve 80 °C’de 12 saat boyunca %4 (w/w) amonyak çözeltisi ile ön işleme tabi tutulan sapta elde edilmiştir. Buna ilaveten, sodyum hidroksit ile ön işlemden geçirilmiş tohum kabuğu ve amonyak çözeltisi ile ön işlemden geçirilmiş sap, maksimum metan üretimine yol açan koşullara benzer koşullar altında, sırasıyla 17 ve 15.2 mL/g VS maksimum hidrojen üretimiyle sonuçlanmıştır.

5. Sonuç

Dünyada enerji talebi artışı ve sera gazı emisyonlarını azaltma ihtiyacı, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artmasına neden olmuştur. Enerji kaynağı olarak kullanılabilen biyokütle, fosil yakıtlara alternatif olabilecek en umut verici malzemedir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynağı olarak önemli bir potansiyele sahiptir. Biyoyakıtın geniş kullanılabilirliği, maliyet etkinliği ve çevresel sürdürülebilirliği, biyoyakıtı fosil yakıtlara cazip bir alternatif yapmaktadır. Ancak, biyokütle enerji üretiminin ekonomik olması, verimli hasat ve konsolidasyon yöntemlerine bağlıdır. Biyokütleden biyoyakıt üretimi, son yıllarda sera gazı emisyonlarını azaltma, enerji güvenliğini artırma ve kırsal alanlarda ekonomik fırsatlar yaratma bakımından büyük ilgi görmüştür. Bu çerçevede biyoyakıtlar; tarımsal artıklar, enerji bitkileri, hayvansal atıklar ve ormancılık atıkları gibi biyokütlenin fermantasyonu veya kimyasal dönüşümünden elde edilmektedir. Bu yakıtlar ulaşım, ısınma ve elektrik üretiminde benzin gibi petrol bazlı yakıtların yerine kullanılabilir.

Kaynakça

- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2010). Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 919–937.
- Abt, R. C., & Abt, K. L. (2013). Potential impact of bioenergy demand on the sustainability of the Southern forest resource. *Journal of Sustainable Forestry*, 32(1-2), 175-194.
- Ali, S., Rizwan, M., Shakoor, M. B., Jilani, A., & Anjum, R. (2020). High sorption efficiency for As(III) and As(V) from aqueous solutions using novel almond shell biochar. *Chemosphere*, 243, 125330.
- Altınsoy, A. S. (2007). Biyodizel üretimi, motorlarda kullanımı ve Türkiye'deki kaynakların incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arapoglou, D., Varzakas, Th., Vlyssides, A., & Israilides, C. (2010). Ethanol production from potato peel waste (PPW). *Waste Management*, 30, 1898-1902.
- Brown, R. C., Bakshi, S., & Mašek, O. (2024). Fundamentals of biochar production. Lehmann, J., Joseph, S. (Edt), Biochar for Environmental Management Science Technology and Implementation. Routledge, London. ISBN 9781003297673.
- Budak, M. S. (2017). Biyokütleden hızlı piroliz yöntemi ile biyoyakıt eldesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Chakraborty, S., Aggarwal, V., Mukherjee, D., & Andras, K. (2012). Biomass to biofuel: a review on production technology. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 7(3), S254–S262.
- Choi, I. S., Kim, J-H., Wi, S. G., Kim, K. H., & Bae, H-J. (2013). Bioethanol production from mandarin (*Citrus unshiu*) peel waste using popping pretreatment. *Applied Energy*, 102, 204-210.
- Chundawat, S. P. S., Beckham, G. T., Himmel, M. E., & Dale, B. E. (2011). Deconstruction of lignocellulosic biomass to fuels and chemicals. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 2, 121-145.
- David, E., Kopac, J., Armeanu, A., Niculescu, V., Sandru, C., & Badescu, V. (2019). Biomass-alternative renewable energy source and its conversion for hydrogen rich gas production. E3S Web of Conferences, 122, 01001.
- Furuvik, N. C. I. S., Jaiswal, R., Thapa, R. K., & Moldestad, B. M. E. (2020). CPFD model for prediction of flow behavior in an agglomerated fluidized bed gasifier. *International Journal of Energy Production and Management*, 25-34.
- Gautam, P., Neha., Upadhyay, S. N., & Dubey, S. K. (2020). Bio-methanol as a renewable fuel from waste biomass: Current trends and future perspective. *Fuel*, 273, 117783.
- Ghasemian, M., Zilouei, H., & Asadinezhad, A. (2016). Enhanced biogas and biohydrogen production from cotton plant wastes using alkaline pretreatment. *Energy & Fuels*, 30(12), 10484-10493.
- Gouran, A., Aghel, B., & Nasirmanesh, F. (2021). Biodiesel production from waste cooking oil using wheat bran ash as a sustainable biomass. *Fuel*, 295, 120542.
- Goyal, H. B., Seal, D., & Saxena, R. C. (2008). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 504–517.

- Hadrović, S., Rakonjac, L., Ćirković-Mitrović, T., Marković, M., & Jović, Đ. (2020). The value of biomass energy: the case study of "crni vrh-deževski" in the gornjeibarsko forest area. *Sustainable Forestry: Collection*, 81-82, 109-120.
- Hai, T., Mishra, P., Zain, J. M., Saini, K., Kumar, N. M., & Wahid, Z. A. (2023). Co-digestion of domestic kitchen food waste and palm oil mill effluent for biohydrogen production. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55, 102965.
- Jokhio, I., Qureshi, S. S., Sahito, A. R., Qureshi, M-N., Lashari, I. A., Mubarak, N. M., Tripathi, M., Al-Mohaimed, A. M., & S. elshikh, M. (2023). Enhanced bio-methane and bio-hydrogen production using banana plant waste and sewage sludge through anaerobic co-digestion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(56), 21360-21371.
- Kanevce, G., Dedinec, A., & Dedinec, A. (2016). Optimal usage of biomass for energy purposes toward sustainable development-A case of Macedonia. *Thermal Science*, 20(1), 77-91.
- Kasmuri, N. H., Kamarudin, S. K., Abdullah, S. R. S., Hasan, H. A., & Som, A. Md. (2016). Potential of Biomass for Biomethanol Production. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(19), 10016-10019.
- Kavitha, V., Geetha, V., & Jacqueline, P. J. (2019). Production of biodiesel from dairy waste scum using eggshell waste. *Process Safety and Environmental Protection*, 125, 279-287.
- Kennes, D., Abubackar, H. N., Diaz, M., Veiga, M. C., & Kennes, C. (2016). Bioethanol production from biomass: carbohydrate vs syngas fermentation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 91(2), 304-317.
- Kuttiraja, M., Sindhu, R., Varghese, P. E., Sandhya, S. V., Binod, P., Vani, S., Pandey, A., & Sukumaran, R. K. (2013). Bioethanol production from bamboo (*Dendrocalamus* sp.) process waste. *Biomass and Bioenergy*, 59, 142-150.
- Mahmoodi-Eshkaftaki, M., & Mockaitis, G. (2022). Structural optimization of biohydrogen production: Impact of pretreatments on volatile fatty acids and biogas parameters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(11), 7072–7081.
- Mansy, A. E., Daniel, S., Monguen, C. K. F., Wang, H., Osman, A. I., & Tian, Z-Y. (2025). Catalytic production of aviation jet biofuels from biomass: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 23, 419–461.
- Nuryana, D., Alim, M. F. R., Yahayu, M., Ahmad, M. A., Sulong, R. S. R., Aziz, M. F. S. A., Prasetiawan, H., Zakaria, Z. A., & Kusumaningtyas, R. D. (2020). Methylene Blue removal using Coconut shell biochar synthesized through microwave-assisted pyrolysis. *Jurnal Teknologi*, 82(5), 31-41.
- Odetoye, T. E., Agu, J. O., & Ajala, E. O. (2021). Biodiesel production from poultry wastes: Waste chicken fat and eggshell. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, 105654.
- Perea-Moreno, M-A., Samerón-Manzano, E., & Perea-Moreno, A-J. (2019). Biomass as renewable energy: Worldwide research trends. *Sustainability*, 11(3), 863.
- Prasad, S., & Ingle, A. P. (2019). Impacts of sustainable biofuels production from biomass. *Sustainable Bioenergy*, 327-346.
- Ramos, M., Soares Dias, A. P., Puna, J. F., Gomes, J., & Bordado, J. C. (2019). Biodiesel production processes and sustainable raw materials. *Energies*, 12(23), 4408.

- Rezania, S., Oryani, B., Cho, J., Talaiekhosani, A., Sabbagh, F., Hashemi, B., Rupani, P. F., & Mohammadi, A. A. (2020). Different pretreatment technologies of lignocellulosic biomass for bioethanol production: An overview. *Energy*, 199, 117457.
- Robak, K., & Balcerek, M. (2018). Review of second generation bioethanol production from residual biomass. *Food Technology and Biotechnology*, 56(2), 174-187.
- Sánchez, J., Curt, M. D., Robert, N., & Fernández, J. (2019). Biomass Resources. *The Role of Bioenergy in the Bioeconomy*. 25-111.
- Shah, N., & Rehan, T. (2014). Bioethanol Production from Biomass. *Journal of Chemistry and Biochemistry*, 2(2), 161-167.
- Shamsul, N. S., Kamarudin, S. K., Rahman, N. A., & Kofli, N. T. (2014). An overview on the production of bio-methanol as potential renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 578-588.
- Sindhu, R., Binod, P., Pandey, A., Ankaram, S., Duan, Y., & Awasthi, M. K. (2019). Biofuel production from biomass: Toward sustainable development. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, 79-92.
- Su, Y-C., Sathyamoorthy, S., & Chandran, K. (2019). Bioaugmented methanol production using ammonia oxidizing bacteria in a continuous flow process. *Bioresource Technology*, 279, 101-107.
- Suzihaque, M. U. H., Syazwina, N., Alwi, H., Ibrahim, U. K., Abdullah, S., & Haron, N. (2022). A sustainability study of the processing of kitchen waste as a potential source of biofuel: Biodiesel production from waste cooking oil (WCO). *Materials Today: Proceedings*, 63, S484-S489.
- Tenkolu, G. A., Kuffi, K. D., & Gindaba, G. T. (2024). Optimization of fermentation condition in bioethanol production from waste potato and product characterization. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 5205-5223.
- Trchounian, K., & Trchounian, A. (2015). Hydrogen production from glycerol by *Escherichia coli* and other bacteria: An overview and perspectives. *Applied Energy*, 156, 174–184.
- Wang, H., Peng, X., Zhang, H., Yang, S., & Li, H. (2021). Microorganisms-promoted biodiesel production from biomass: A review. *Energy Conversion and Management: X*, 12, 100137.
- Wang, R., He, X., Lin, L., Flores-Betancourt, A., Lee, K., Dunning, T., & Qu, J. (2023). Investigation of biomass fouling on screw feeder in preconversion of pyrolysis. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(13), 4934-4942.
- Uslu, O. S., Babur, E., Alma, M. H., & Solaiman, Z. M. (2020). Walnut shell biochar increases seed germination and early growth of seedlings of fodder crops. *Agriculture*, 10, 427.
- Yoswathana, N., Phuriphipat, P., Treyawutthiwat, P., & Eshtiaghi, M. N. (2010). Bioethanol production from rice straw. *Energy Research Journal*, 1(1), 26-31.
- Zhao, C., Ma, Z., Huang, C., Wen, J., & Hassan, M. (2022). From biomass to bio-energy and bio-chemicals: Pretreatment, thermochemical conversion, biochemical conversion and its bio-based applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 975171.

BÖLÜM 8

21. YÜZYILIN EN BÜYÜK TEHDİDİ: İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ

Abdullah YİNANÇ¹

¹ Doç, Dr. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, ayinanc@nku.edu.tr ORCID: 0000-0002-8144-8266

GİRİŞ

Küresel ısınma, günümüzde karşılaşılan en ciddi çevresel tehditlerden biri olarak tanımlanmakta olup, başta fosil yakıt tüketimi, sanayileşme, enerji üretimi ve ormansızlaşma gibi insan faaliyetlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu süreç, ekonomik büyüme ve nüfus artışı ile daha da hızlanmakta ve çevresel baskıyı artırmaktadır (Spence, 2007).

İklim değişikliğinin etkileri, ekosistemlerin dengesinden insan sağlığına, su kaynaklarının sürdürülebilirliğinden tarım üretimine, ekonomik yapılardan altyapı sistemlerine kadar geniş bir yelpazede ciddi sonuçlar doğurmakta ve bu durum, küresel ölçekte müdahaleleri ve sürdürülebilirlik odaklı stratejilerin geliştirilmesini kaçınılmaz kılmaktadır (Weiskopf vd., 2020).

İklim değişikliği, günümüzde çevresel sorunların artmasıyla birlikte küresel ölçekte önemini koruyan bir mesele haline gelmiştir. Çevreye duyarlılık konusunda bireylerin sergilemiş olduğu tutumlar göz önüne alınınca çevre merkezli anlayıştan insan merkezli anlayışa yönelim olduğu görülmektedir (Mercan ve Çetin, 2022: 120). Bilim insanları bu konuda yoğun araştırmalar yaparak iklimdeki değişimleri ve etkilerini incelemektedir. Mevsimsel sıcaklıkların değişmesi, buzulların erimesi, tatlı su kaynaklarının azalması ve bu durumların canlı yaşamını tehdit etmesi, doğrudan insan faaliyetleriyle bağlantılıdır. Fosil yakıt tüketimi, hızlı nüfus artışı, sanayileşme, ormanların yok edilmesi, tarım ve hayvancılık faaliyetleri ekolojik dengeyi bozarak iklim sisteminde değişikliklere neden olmaktadır. Bu süreç, iklim değişikliğinin giderek tehlikeli boyutlara ulaşmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla, temiz enerjiye geçiş, sürdürülebilir üretim ve tarım yöntemlerinin benimsenmesi gibi önlemler alınması büyük önem taşımaktadır (Dam, 2014: 5).

1. İKLİM VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ KAVRAMI

İklim, bir bölgenin veya gezegenin genel hava koşullarını uzun vadede temsil eden bir sistem olarak ele alınır (Noguer vd.,2001). Dünya üzerinde çeşitli iklim tipleri bulunmaktadır ve bu iklimler genellikle sıcaklık, yağış miktarı ve mevsimsel değişkenlik gibi kriterlere göre sınıflandırılmaktadır. Genel anlamda başlıca iklim tipleri; ekvatorial, savan, çöl, Akdeniz, muson, step, okyanusal, sert karasal, tundra ve kutup iklimleri olarak sıralanabilir. Bu iklimler, yeryüzünde farklı bölgelerde yoğunlaşmıştır. Örneğin, ekvatorial iklim, ekvator çevresinde, çöl iklimi ise dönenceler çevresinde yaygındır. Bu farklılaşma, yeryüzünün coğrafi özelliklerine ve atmosferik dolaşım sistemlerine dayanmaktadır (Bağcı, 2023). İklim dünyanın var oluşundan bu yana doğal bir değişim eğilimi göstermektedir (Binboğa, 2014: 5732-5759).

İklim Değişikliği: Kaynağı ne olursa olsun, küresel ölçekte yayılmaya başlayan ve yerel ya da bölgesel düzeyde önemli etkiler yaratan, uzun vadeli ve aşamalı bir şekilde gelişen değişimler olarak tanımlanabilir (Türkeş, 2020). Yeryüzünün varoluşundan itibaren, iklim her zaman diliminde değişiklik göstermiş olup Sanayi Devrimi itibarıyla bu değişiklikler insan kaynaklı nedenlerle ortaya çıkmaya başlamıştır (Sezgin, 2024: 1).

İklim değişikliği kavramı, 19. yüzyılda nobel ödüllü Svante A. Arrhenius'un karbondioksit artışının küresel sıcaklıkları etkileyebileceğini ortaya koymasıyla literatüre girmiştir. 1958'de atmosferdeki karbondioksit miktarlarının düzenli ölçülmesiyle bu çalışmalar daha somut hale gelmiştir. Sanayi Devrimi'nden sonra fosil yakıt kullanımı, ormansızlaşma, arazi kullanımındaki değişiklikler, tarımda makineleşme ve sanayileşme süreci, iklim değişikliğini hızlandıran başlıca faktörler olmuştur. 19. yüzyılın sonlarında başlayan küresel ısınma eğilimi, özellikle 1980'lerden itibaren daha belirgin hale gelmiş, insan faaliyetleri bu sürecin en önemli belirleyicisi olmuştur (Kılıç, 2009: 20-21). İklim değişikliği, sıcaklık, yağış, kar yağışı ve rüzgar modellerini içeren ancak bunlarla sınırlı olmayan çeşitli abiyotik faktörlerde bir dizi uzun vadeli dönüşüm olarak kapsamlı bir şekilde tanımlanabilir (Yücel Batmaz vd., 2022).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), iklim değişikliğini "doğal değişimler ya da insan faaliyetleri neticesinde zaman içinde ortaya çıkan iklimsel değişiklikler" olarak tanımlamakta, bu tanım bilimsel bir temele dayanmaktadır (IPCC, 2007). Dünya Doğayı Koruma Vakfı (WWF), iklim değişikliğini "doğal sistemlerin dengesini bozan ve biyoçeşitlilik üzerinde olumsuz etkileri olan insan kaynaklı değişiklikler" olarak açıklamaktadır (WWF, 2007). Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı (UNDP), iklim değişikliğini "iklimin ekosistemlere, hava durumuna ve iklim olaylarına olan uzun vadeli değişiklikler" olarak tanımlayarak, bu değişikliklerin insani yaşamı etkilediğine vurgu yapmaktadır (UNDP, 2007). Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çevre Sözleşmesi (UNFCCC), iklim değişikliğini "karşılaştırılabilir zaman dilimlerinde gözlenen doğal iklim değişikliğine ek olarak, doğrudan veya dolaylı olarak küresel atmosferin bileşimini bozan insan faaliyetleri sonucunda iklimde oluşan bir değişiklik" olarak ifade etmektedir (UNFCCC, 2011). Dünya Sağlık Örgütü (WHO), iklim değişikliğini "hava koşullarında ve iklim örüntülerinde meydana gelen uzun vadeli değişiklikler" olarak belirleyerek, bu değişikliklerin insan sağlığı üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır (WHO, 2016).

İklim sisteminin karmaşık doğası, uzun süreli meteorolojik süreçlerin tüm yönleriyle kavranmasını güçleştirse de, bu süreçlere dair unsurların titizlikle ele alınması, iklim değişikliği gibi kritik meseleler üzerinde daha isabetli tahminler yapılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Kadıoğlu, 2008). 21.yüzyılda karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, birbirine son derece bağlı iki olgu olan küresel ısınma ve iklim değişikliğidir. İklim değişiklikleri, esasen küresel ısınmanın bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Küresel ısınma, dünya genelindeki sıcaklık artışını ifade ederken iklim değişikliği, yalnızca sıcaklıkla ilgili değil, aynı zamanda atmosferdeki diğer doğal olaylar ve olayların değişimini de kapsayan geniş bir olgudur (Widiyawati, 2020).

Uluslararası İklim Değişimi Paneli'ne (IIPC, 2007) göre artık iklimde gerçekleşen değişimler gözlemlenebilir hale gelmiştir. Bu durum doğanın dengesini değiştirebilecek çizgisel olmayan tepkilere neden olarak ülkelerin sosyo-ekonomik yapısını etkileyebilecek ekstrem hava olaylarına ve doğal afetlere sebep olabilmektedir. İklim değişiminin oluşmasında çeşitli nedenler etkili olsa da bilim insanları, Sanayi devriminden başlayarak bugüne kadar geçen sürede, iklim değişiminin oluşmasına neden olan en büyük etkeninin insan faaliyetleri olduğunda hem fikirlerdir (Thomas, 2010). IPCC (2007) raporuna göre sanayi devriminden bu yana dünyanın ortalama sıcaklığı yaklaşık 1° C artmıştır ve iklim değişikliğine yönelik önlem alınmazsa 21. Yüzyılın sonlarına kadar 5° artması beklenmektedir. Erken alınan önlemlerle iklim değişimi yoğunluğu ve etkisi azaltılarak negatif etkisi en aza indirilebilir (Bardslay ve Bardslay, 2007).

2. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN NEDENLERİ

Özellikle 18. yüzyılda sanayi devrimi ile başlayan endüstrileşme sürecinde üretimin artması ile birlikte enerjiye olan ihtiyaç artmıştır. Enerji ihtiyacının karşılanması için yenilenemeyen kaynak olan petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtlar yakılarak kullanılmaya başlanmıştır. Fosil yakıtlar içerisinde yer alan doğalgaz, petrol ve kömür gibi yakıtlar yandıklarında içermiş oldukları karbonun oksijenle birleşmesi sonucu CO₂ emisyonu oluşturmaktadır (Şenocak vd. 56-57). Sanayi kaynaklı çevre kirliliği ile meydana gelen zararlı gazların atmosfere yayılması sonucu küresel ısınmaya yol açan sera gazların artması iklimsel değişikliğine sebep olmaktadır. Petrol, kömür, doğal gaz, nükleer, güneş, rüzgâr, odun, akarsu, biyokütle, jeotermal gibi kaynakların işlenmemiş ve dönüştürülmemiş orijinal hali birincil sınıf enerji kaynaklarındandır. Birincil sınıf enerji kaynaklarının işlenmesi ve dönüştürülmesi ile ikincil sınıf enerji kaynakları ortaya çıkmaktadır. En yüksek oranda kullanılan ikincil sınıf enerji türü, elektrik enerjisi ve ısı enerjisi olmuştur. Enerji kaynaklarının üretilmesi, taşınması, ticaret hareketi, dönüşümü, iletim hattı ile dağıtımı, tüketimi, güvenliği ve bunlara bağlı bilgi sistemlerinin tamamı enerji ile ilgilidir. Enerjinin insanlık için vazgeçilmez olduğu gerçeğinin yanında insanlığı olumsuz ve zararlı yönde etkileyen bir tarafı da söz konusudur. Fosil kaynaklı enerji kaynaklarının yakılarak kullanımı sonucunda ortaya çıkan gazların sebebiyet verdiği sera etkisi

küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine neden olmaktadır (Erdoğan, 2020: 278). Dünya, iklim değişikliğinden biyolojik çeşitliliğin kaybına kadar artan ve birbirine bağlı sürdürülebilirlik zorluklarıyla karşı karşıya kalırken, savunucuları, stratejik olarak uygulanan Endüstri 4.0 teknolojilerinin daha çevresel olarak sorumlu, sosyal olarak eşitlikçi ve ekonomik olarak uygulanabilir bir endüstriyel paradigmaya giden yolu açabileceğini düşünmektedir (Mercan, 2025: 461). Günümüzde yaşanan iklim değişikliğine neden olduğu konusunda büyük oranda mutabakat sağlanan insan kaynaklı faaliyetler yüksek düzeyde sera gazı salımına yol açarak atmosferin bileşiminde bozulmalar meydana getirmektedir. Bu bozulmalarda karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), diazot monoksit (N₂O) gibi gazları açığa çıkaran fosil yakıtların kullanımı ve bu gazların etkisini azaltacak yutak alanların (ormanlar, sulak alanlar vb.) yok edilmesi değişikliğin en temel gerekçesidir. Bunların dışında sera gazlarının atmosferdeki birikimini artırarak iklim değişikliğine neden olan insan faaliyetlerine bakıldığında sanayileşme, kentleşme, ormansızlaştırma, tarım ve hayvancılık, madencilik, ulaştırma/taşımacılık, nüfus artışı, atık yönetimi gibi çok çeşitli etkenlerden bahsedilebilir (Uncu, 2019: 11).

Geçmişten günümüze bilim çevrelerinde tartışılan birçok araştırma iklim değişikliğinin açıklanmasında tek bir nedenin dikkate alınamayacağını ortaya koymuştur. Çok sayıda neden ileri sürülmekle birlikte bunların büyük bir çoğunluğunun temelinde yer alan iklim sistemini oluşturan bileşenler arasındaki enerji bilançosunun bozulması, iklim değişikliğinin esas nedenidir (Archer ve Rahmstorf, 2013: 17).

İklim değişikliğinin başlıca nedenlerinden biri olan fosil yakıtların kullanımı, enerji üretimi ve ulaşım sektöründe yaygın olarak kullanılan kömür, petrol ve doğal gaz gibi kaynaklardan kaynaklanmaktadır (Erdoğan ve Uşak, 2009). Dijital teknolojiler sayesinde aşırı üretim, enerji tüketimini ve israfı etkin bir şekilde yönetilerek çevre dostu endüstriler yaratılabilmektedir (Mercan ve Atalay, 2024:9). Ormansızlaşma bir diğer iklim değişikliği yaratan etkidir. Çünkü ormanlar büyük miktarda karbonu tutar, Küresel olarak, orman kaybı atmosfere büyük miktarda karbon salmakla kalmaz, aynı zamanda gelecekte uzun vadede karbon giderimi için önemli bir yolu da önemli ölçüde azaltmaktadır (Lawrence vd. 2022: 2). . Tarım faaliyetleri de iklim değişikliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Tarımsal faaliyetlerde kullanılan kimyasallar ve gübreler, atmosfere nitrojen oksit (N₂O) gibi güçlü sera gazlarının salınmasına neden olur. Bu gazlar, karbondioksitten çok daha güçlü bir sera etkisi yaratır ve küresel ısınmayı daha da hızlandırır (Yıldırım, 2018).

İklim sisteminin enerji dengesi üzerinde bir değişiklik yaratmasa da iklim değişikliğine yol açan bir diğer doğal neden levha hareketleri kaynaklı kıtasal yer değişimleridir. Bu durum sıcak akıntıların hâkimiyet alanlarını kaybetmesi ve soğuk akıntıların yeni coğrafyalara yayılması ile deniz suyu sıcaklıklarında düşüşleri beraberinde getirmiştir (DeConto, 2009: 789-790). Kentleşme de bu süreci hızlandıran en önemli faktörlerden biri olarak önümüze çıkmaktadır (Yıldırım, 2018).

EPA (2024), iklim değişikliğine sebep olan insan kaynaklı ve doğal faktörleri genel olarak tablo 1'deki gibi özetlemektedir:

Tablo 1. İklim Değişikliğine Sebep Olan Faktörler

Kaynak Türü	Faktörler
İnsan Kaynaklı Faktörler	Sera gazı emisyonları
	Güneş enerjisinin yansıtılması veya emilmesi
Doğal Kaynaklı Faktörler	Dünya'nın yörüngesindeki ve dönüşündeki değişiklikler
	Güneş aktivitesindeki değişimler
	Dünya'nın yansıtıcılığındaki değişimler
	Volkanik aktivite
	Doğal olarak oluşan karbondioksit konsantrasyonlarındaki değişimler

Kaynak: (EPA, 2024)

3. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN ÖNEMİ

İklim Bilimciler ortalama küresel sıcaklıktaki mevcut artışa insan kaynaklı etkinliklerin neden olduğu konusunda hemfikirdir. Ancak, iklim değişikliği geçmişte de yaşanmıştır. İnsanlar dünyayı değiştirmeye başlamadan önce, hatta insanlar daha dünyada yoklarken dahi. Değişimlerin nedenleri Dünya'nın Güneş çevresindeki yörüngesini etkileyen doğal döngüler, güneş ışınımının düzeylerindeki farklılıklar ve çok büyük yanardağ patlamaları gibi yıkıcı doğa olaylarıydı. Bu değişimlerin bazıları, muhtemelen etkilerini çarpıcı şekilde artıran bazı pozitif geri beslemeleri tetiklemiştir (Woodward, 2019: 14).

İklim değişikliğine yönelik gündemde olan tartışmaların temel çerçevesini IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) yani Hükümetler Arası İklim Değişikliği'nin yayınladığı raporlar oluşturmaktadır. İlk olarak dünyanın ısındığını ve bu ısınmanın insan kaynaklı bir sorun olduğunu, 1990 yılında yayınladığı iklim modellerinin tahminleri ve doğal iklim değişikliği ile ilgili raporlar ile ortaya koymuştur. 2014 yılında yayınladığı 5. raporunda ise, sera gazı emisyonlarının tarih boyunca atmosfere salınan emisyon oranlarından çok daha yüksek olduğunu, bu artışın temel sebebinin insandan kaynaklandığını açıkça belirtmiştir (Yergin, 2022: 383- 384).

İklim değişikliğiyle ilgili gerekli önlemler alınmaz, ilerlemeler sağlanmaz ve insan faaliyetleri mevcut hızında devam ederse, 2030 ile 2052 yılları arasında 1,5°C'lik sıcaklık artışı eşiğinin aşılması ve bunun sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin temel unsurları üzerinde olumsuz etkiler yaratması öngörülmektedir (IPCC, 2018). Ragab ve Prudhomme (2002), iklim değişikliğinin sıcaklıklardaki artış ve küresel ısınma olarak düşünülse de, iklim değişikliği kaynaklı etkilerin en önemlisinin yağış rejiminin değişmesi nedeniyle gerçekleşecek etkiler olduğunu ileri sürmektedir.

4. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN ETKİLERİ

Avrupa Çevre Ajansı (EEA) 'na göre iklim riskinin doğrudan olmasa dahi, sağlık, gıda, ekosistem, yapılı çevre ve ekonomi üzerinde etkileri bulunmaktadır (EEA, 2024).

İklim değişikliğinin olası etkileri, çevresel, sosyal ve ekonomik boyutlarıyla geniş bir çerçevede değerlendirilmektedir (Hendrix vd., 2023; Leal-Filho, 2023; Tourani vd., 2022); Öncelikle sıcaklık artışı ve atmosferik değişimler, iklim değişikliğinin en belirgin göstergelerinden biridir. Küresel ısınmaya bağlı olarak aşırı hava olaylarının (kasırga, tayfun, sel vb.) sayısı ve şiddeti artmakta; bu durum can ve mal kayıplarına, altyapı hasarına ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. İkinci olarak, deniz seviyesindeki yükselme, buzulların erimesi ve okyanus sıcaklıklarının artmasıyla birlikte kıyı ekosistemlerini, tarım alanlarını ve yerleşim bölgelerini tehdit etmektedir. 2100 yılına kadar deniz seviyesinin 0,5–1 metre arasında yükseleceği öngörülmekte ve bu durum ekosistem dengesini tehdit etmekte ve tarım ile orman ekosistemleri üzerinden gıda güvenliğini riske atmaktadır. Son olarak, sosyal ve ekonomik etkiler ön plana çıkmaktadır. Tarımsal verimlilikteki düşüş, su kaynaklarının azalması, doğal afetlerden kaynaklanan kayıplar ve artan göç hareketleri toplumları ekonomik ve sosyal açıdan zor durumda bırakmaktadır. Tüm bu gelişmeler, iklim değişikliğinin yalnızca bir çevresel sorun değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik, kalkınma, güvenlik ve toplumsal refah açısından da kritik bir mesele olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, iklim değişikliğiyle mücadele için ulusal ve uluslararası düzeyde alınacak önlemler, sadece çevresel değil, çok boyutlu ve disiplinler arası yaklaşımları gerekli kılmaktadır. İklim değişikliğinin olumsuz etkileri, belirli bir bölge ile sınırlandırılmayacak olup dünyanın her yerini etkileyebilecek niteliktedir ve iklim değişikliğinin etkilerinin bir bölgeden başka bir bölgeye kademeli olarak yayılabileceği bilinmektedir (EEA, 2024). İklim değişikliğinin etkileri çevresel, sosyal ve ekonomik olarak üç başlıkta ifade edilmektedir.

4.1.İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİ

Küresel ısınma, şiddetli yağışlar, fırtınalar, seller, kuraklık ve sıcak hava dalgaları gibi aşırı hava olaylarının sıklığını ve etkisini artırmaktadır (Aydoğdu, 2024). 1950’lerden bu yana soğuk günlerin azalması, sıcak günlerin artması ve özellikle Avrupa, Asya ve Avustralya’da sıcak hava dalgalarının yaygınlaşması dikkat çekicidir (Gönençgil, 2017). Günümüzde rekor sıcaklıklar, ani yağışlar, orman yangınları ve tayfunlar, iklim krizinin boyutlarını gözler önüne sermekte; ekosistem dengesizlikleri, gıda ve su krizleri ile can kayıplarına yol açmaktadır (Öztürk ve Gürsoy, 2022).

İklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki en önemli etkilerinden birisi de deniz suyu seviyesinde artışa neden olmasıdır. 2000-2019 yılları arasında dünyadaki buzul alanlarında yaşanan kütle kaybına bakıldığında Alaska’da %25, Grönland’da %13, Arktik deniz buzunda %20, Antarktika’da %8, Himalayalarda %8 ve And Dağlarında %8 olduğu tespit edilmiştir. Bu oranlar önceki 20 yıla (1980-2000) göre buzul tabakalarındaki erimenin iki katına çıktığını da göstermektedir (Hugonnet vd., 2021: 728).

Yalnızca ekosistemler üzerinde yarattığı tahribattan dolayı değil aynı zamanda sera etkisini kuvvetlendirmesine olan katkısı nedeniyle de orman yangınları iklim değişikliğinin önemli sorun alanlarından bir diğeridir. Ormanlık alanlardaki yangın olasılığı ile iklim koşulları arasında dikkate değer bir ilişki vardır. Karbondioksit gazının soğurulmasıyla atmosferdeki birikimini engelleyen önemli yutak alanları arasında sayılan ormanların yok olmasında iklim değişikliği kaynaklı şiddetli sıcak hava dalgaları ve kuraklık etkisiyle oluşan yangınların da rolü vardır (MGM, 2022).

Yer altı su kaynakları açısından, deniz seviyesinde yaşanan yükselme kıyı alanlardaki yer altı sularının tuzluluk oranlarını artırarak su kalitesini bozma riskini de barındırmaktadır. Bunun yanı sıra iklim değişikliğinin tatlı su kaynaklarından olan yer altı sularına asıl etkisi yağışlardaki değişim ile ortaya çıkmaktadır. Kurak bölgelerde azalan yağış miktarı hayati öneme sahip olan yer altı sularında azalmaya ve hatta kurumaya yol açarken, yoğun yağışın görüldüğü yerlerde akış hızının yükselmesiyle yeraltına geçen su miktarında azalma yaşanabilmektedir (Taylor vd., 2013: 322-323).

4.2.İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN SOSYAL ETKİLERİ

İklim değişikliğine bağlı olarak aşırı hava olaylarının yaşanması, insanların yüksek sıcaklığa ya da aşırı soğuğa maruz kalması insan sağlığı üzerinde birçok olumsuz etki yaratmaktadır. Hava sıcaklıklarındaki aşırı artışa bağlı olarak hastalık ve ölümlerde artışlar görülebilmektedir. Kasım 2022 tarihinde yayımladığı raporda, Avrupa’da sıcak hava dalgalarının neden olduğu ölümlerin, iklim ve hava olayları kaynaklı ölümler arasında ilk sırada yer aldığı belirtilmiştir (EEA, 2022: 6). İklim değişikliğine bağlı olarak çevresel koşullarda yaşanan bozulmaların bir diğer önemli sonucu, sosyal yapıyı etkileyen iklim göçüne yol açmasıdır. Sanayileşmenin neden olduğu çevresel tahribatın etkisiyle kuraklık, sel ve ormansızlaşma gibi olaylar sonucunda yer değiştirmek zorunda kalan insanlar, çevresel mülteciler (environmental refugees) olarak tanımlanmaktadır (Castles ve Müller, 1998: 8)

Doğal kaynaklar, çeşitli ekosistemler ve yapıları çevre üzerinde yarattığı etkinin yanı sıra iklim değişikliği, insan sağlığı üzerinde de doğrudan ve dolaylı şekillerde ortaya çıkan önemli etkilere neden olmaktadır. Doğrudan etkiler, aşırı soğuk ve sıcaklarda artış ile sel, fırtına, orman yangınları ve kuraklık gibi afetlerin neticesinde ortaya çıkan ölüm, yaralanma ve ruhsal/fiziksel çeşitli hastalıklar iken dolaylı etkiler, iklim değişikliğinin kaliteli hava, su ve gıdaya erişimi engellemesi sonucundaki enfeksiyonlar ile vektörel ve salgın hastalıklardır (Çelik vd., 2008: 10). Ekstrem sıcaklıkların ve yüksek nemin uzun süre devam etmesi, vektör kaynaklı hastalıkların artmasına neden olmaktadır. Sivrisinek, kene ve benzeri canlılar aracılığıyla bulaşan bu hastalıklar, sıcaklık ve nem artışıyla hızla çoğalmakta ve yeni coğrafyalara yayılabilmektedir. Kuş gribi, sıtma, kene kaynaklı hastalıklar, batı nil virüsü, ebola ve dang humması bu duruma örnektir. Özellikle soğuk iklim bölgelerinde bağışıklık yetersizliği nedeniyle bu hastalıkların daha büyük hayati risk oluşturacağı öngörülmektedir (Haines vd., 2006: 589-590). İklim değişikliğinin en temel nedenleri arasında sayılan fosil yakıt tüketimi hava kirliliğine yol açarak insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler meydana getirmektedir. Değişen iklimle birlikte atmosferdeki yoğunluğu artan sera gazlarının birçok hastalığa neden olduğu gibi var olan hastalıkları da şiddetlendirerek ölüm oranlarını artırdığı görülmektedir. Bu hastalıklar arasında iskemik kalp hastalığı, astım, kalp-damar hastalıkları, KOAH, alt solunum yolu enfeksiyonları, akciğer kanseri gibi hastalıklar sayılabilir (Health Effects Institute, 2019: 11).

4.3.İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN EKONOMİK ETKİLERİ

İklim değişikliği yatırım kararlarını doğrudan etkilemektedir. Üretim sürecinde olumsuz etkiler beklendiğinde yatırımlar azalmakta, kalıcı etkiler ise sermaye yatırımlarında yeni düzenlemeleri zorunlu kılmaktadır. Ayrıca kaynaklar, yeni yatırımlardan çok iklim değişikliği ile mücadele stratejilerine yönelmekte, bu da diğer verimli yatırımları dışlayarak büyüme ve verimlilik üzerinde olumsuz sonuçlar doğurmaktadır (Fankhauser ve Tol, 2005; Hallegatte, 2012).

İklim değişikliği, yoksul ve kırılgan toplulukları daha ağır şekilde etkileyerek mevcut ekonomik eşitsizlikleri derinleştirmektedir. Gelişmekte olan ülkeler, adaptasyon için yeterli mali kaynağa sahip olmadığından, iklim değişikliğinin etkileriyle başa çıkmakta zorlanmaktadır (Lee ve Baumgartner, 2022). İklim değişikliği, emek ve istihdam üzerinde bölgesel ve sektörel farklılıklar gösteren ciddi etkiler yaratmaktadır. Aşırı hava olayları ve yüksek sıcaklıklar özellikle açık havada çalışanların verimliliğini düşürmekte, Güneydoğu Asya, Güney Amerika ve Kuzey Avustralya’da işgücü kapasitesinin sıcaklık stresi nedeniyle bazı aylarda %90 oranında azaldığı tahmin edilmektedir (Dunne vd., 2013: 563-565).

Doğal kaynaklar ve fiziki sermaye, üretim sürecinde kullanılan önemli girdiler arasında yer almaktadır. Bu sebeple çevresel etik değerler, hem işletmeler hem de tüketiciler için giderek daha önemli hale gelmiştir (Ozkan-Pir ve Karaduman; 2017). Ancak iklim değişikliği, bu girdiler üzerinde de ekonomik etkiler yaratmaktadır. Özellikle altyapı tesisleri ve fiziki sermaye, iklim değişikliğine bağlı olarak ortaya çıkan aşırı hava olaylarından zarar görebilmektedir. Yüksek sıcaklıklar, sel, taşkın

ve fırtına gibi hava olayları, fiziki sermayenin kullanım ömrünü kısaltabilmektedir (Bretschger ve Valente, 2011: 826). İklim değişikliği yatırım kararlarını doğrudan etkilemektedir. Üretim sürecinde olumsuz etkiler beklendiğinde yatırımlar azalmakta, kalıcı etkiler ise sermaye yatırımlarında yeni düzenlemeleri zorunlu kılmaktadır. Ayrıca kaynaklar, yeni yatırımlardan çok iklim değişikliği ile mücadele stratejilerine yönelmekte, bu da diğer verimli yatırımları dışlayarak (crowding-out) büyüme ve verimlilik üzerinde olumsuz sonuçlar doğurmaktadır (Fankhauser ve Tol, 2005; Hallegatte, 2012).

Tablo 2. İklim Değişkenliği ve Aşırı İklim Olaylarının Öngörülen Etkileriyle İlgili Örnekler

Öngörülen Değişiklikler	Öngörülen Etkiler
Karasal alanlardaki yüksek sıcaklıklar ve sıcak hava dalgaları	Yaşlılar ve yoksulların hastalık ve ölümler Çiftlik ve vahşi hayvanlarda oluşan sıcak stresi Tarım ürünlerinin zarar görmesi Soğutma ihtiyacı
Karasal alanlardaki düşük sıcaklıklar; soğuk ve donlu gün sayısı ile soğuk hava dalgalarında azalma	Soğuktan kaynaklı hastalıklar ve ölümler Tarım ürünlerinin zarar görmesi Tarım zararlılarının hastalık taşıyan canlıların kışın hayatta kalması Isınma enerjisi talebi
Şiddetli yağışlar	Toprak kayması, erozyon ve su taşkınları Toprak kaybı ve su göçü Sellerle birlikte ekinlerin tahrip olması veya ağaç fidelerinin dolması Sel kaynaklı sigorta ödemeleri ve afet yardımlarına ihtiyaç
Orta enlemlerde yer alan iç bölgelerin çoğunda yazların kuraklaşması ve bununla ilgili kuraklık riski	Tarım ürünleri verim kaybı Orman yangınlarının artması ve temizlenmelerinin zorlaşması Su kaynaklarının miktarı ve kalitesi
Tropikal siklon rüzgar hızında; ortalama ve en fazla yüz günlük yağış miktarlarında artış	Kıyı erozyonu; Kıyı taşkınları ve altyapılara zarar Mercan kaynaklı gelir ve ekosistemlerin uğradığı zarar
El Nino bağlantılı kuraklık ve şiddetli seller	Su ve sel baskınlarıyla birlikte zarar gören tarım ve mera alanları Tarım ürünlerinde verim kaybı
Asya yaz musonlarının hali hazırdaki yağış dağılımı değişirken şiddetlenmesi	Tarım ürünlerinin zarar görmesi Sel ve toprak kayması riski Su taşkınları ve can kayıpları Altyapı ve mülk kayıpları
Orta enlemlerdeki kuvvetli fırtınalar	Altyapı ve mülk kayıpları Kıyı ekosistemlerinin zarar görmesi

Kaynak: UNFCCC, 2003: 6, https://unfccc.int/resource/docs/publications/caring_trk.pdf

5. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİYLE MÜCADELE YÖNTEMLERİ VE STRATEJİLERİ

Uluslararası alanda iklim değişikliği ile mücadelede, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, Kyoto Protokolü ve Paris Anlaşması yapı taşı niteliğindeki anlaşmalardır.

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS);

İklim değişikliği ile ilgili en önemli küresel uzlaşmalardan sayılan ve aynı zamanda da Kyoto Protokolü ve Paris Anlaşması'nın da temellerini oluşturan temel anlaşma BMİDÇS'dir. Çerçeve sözleşmesi 1980'lerin sonunda Hükümetlerarası Konferanslarda uzunca tartışılarak, 1992'de Rio kentinde imzaya açılmıştır. Sözleşmenin temelinde taraf ülkelerin taahhütleri dayanmaktadır.

Sözleşmenin temel özelliği “Ortak Fakat Farklılaştırılmış Sorumluluklar ve Göreli Yeterlikler İlkesi”ni benimsemesidir (United Nations, 1992). Burada sözleşmenin tarafları EK-1 ve EK-2 olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. EK-2’de yer alan ülkeler gelişmiş ülkeleri kapsarken EK-1 ise gelişmekte olan ülkelerle birlikte geçiş ekonomilerini de içermektedir. Ülkelerin bu kategorilere ayrılması Rusya’nın kendisini gelişmiş ülke grubunda görmek istememesi ile ilgilidir (İklim Değişikliği Başkanlığı, 2022).

Kyoto Protokolü;

1995’de IPCC’nin iklim değişikliği probleminin insan kaynaklı olduğunu açıklamasından sonra 1997’de Japonya’nın Kyoto kentinde düzenlenen üçüncü taraflar konferansında (COP3) Kyoto Protokolü kabul edilmiştir. Kyoto protokolü ile birlikte 2012 yılına kadar gelişmiş ülkeler sera gazları emisyonlarını 1990’a oranla % 5 düşürme kararı almıştır. Devam eden uzun müzakereler sonucunda Kyoto Protokolü 2005’de yürürlüğe girmiştir. Protokol çerçevesinde 2008-2012 ve 2013-2020 tarihleri arasında iki 26 yükümlülük/uygulama dönemi belirlenmiştir. ABD anlaşmada yer almazken, Çin gibi gelişmekte olan ülkeler hedef belirlememiştir (İğci ve Çobanoğlu, 2019). Küresel anlamda iklim politikalarına yön veren önemli bir uluslararası anlaşmadır. İklim değişikliğinin ve olumsuz etkilerinin durdurulması ve giderilmesi için oluşturulan amaçların gerçekleştirilmesi için Protokol Ek-I ‘da listelenen ülkelere sera emisyon kısıtlaması ve bağlayıcı yükümlülükler getirmiştir (Karakaya, 2008).

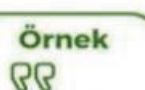
Paris Anlaşması;

Paris Anlaşması, iklim değişikliği konusunda yasal olarak bağlayıcı bir uluslararası anlaşma olması sebebiyle modern iklim değişikliği ile mücadele politikasının ana uygulama aracı olarak nitelendirilebilir. Paris İklim Anlaşması, BMİDÇS’nin uygulama aracı olup çerçeve sözleşme tarafından düzenlenen ve dünya genelinde küresel iklim değişikliklerine karşı mücadelede tüm ülkelerin iş birliği yapması amaçlanan bir anlaşma niteliğindedir. 12 Aralık 2015’te Paris’te düzenlenen COP 21’de 196 Taraf tarafından kabul edilmiş ve 4 Kasım 2016’da yürürlüğe girmiştir (Karakaya, 2016). Anlaşmanın temel amacı, küresel ısınmayı sanayi devrimi öncesi seviyelere kıyasla 2 °C’nin çok altında, tercihen 1,5 °C ile sınırlamaktır. Bu amaca ulaşmanın temel yöntemi fosil yakıt (petrol, kömür) kullanımının tedricen azaltılarak, yenilenebilir enerjiye geçişin başarılmasına bağlı olmaktadır (Matsumoto vd., 2019: 10).

İklim değişikliği ile mücadele; iklim değişikliği, yalnızca çevresel bir sorun olarak ele alınmamakta, aynı zamanda düşük karbonlu ekonomiye küresel geçiş sürecinde ülkelerin ekonomik büyüme stratejileri, enerji ve sağlık politikaları, tarım politikaları, gıda güvenliği ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri üzerinde de belirleyici bir etkiye sahip olmaktadır (T.C. Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı, 2024). Bu kapsamda, kentlerde iklim değişikliğiyle mücadele; sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik politikalar (azaltım/mitigasyon) ile iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı direnç oluşturmayı hedefleyen politikalar (uyum/adaptasyon) çerçevesinde şekillenmektedir (İklim Araştırmaları Derneği, 2024). Bu süreçte, azaltım ve uyum politikalarının uygulanması sırasında toplumsal eşitsizliklerin derinleşmemesi ve tüm kesimler için adaletin sağlanarak istihdam fırsatlarının korunması, adil bir geçiş sürecinin temel unsurları arasında yer almaktadır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024: 214).

Uyum, doğal kaynakların daha sürdürülebilir kullanılması, altyapının güçlendirilmesi ve toplulukların değişen koşullara hazırlanması gibi uygulamaları kapsamaktadır (Adger vd., 2003: 191; Adger vd., 2005: 80). Örneğin, kıyı bölgelerinde deniz seviyesinin yükselmesine karşı savunma sistemleri kurulması veya kuraklık riskine karşı su yönetimi projeleri bu stratejiye örnek teşkil etmektedir (IPCC, 2022: 5). **Azaltma** ise fosil yakıt tüketiminin düşürülmesi, yenilenebilir enerjiye geçiş ve enerji verimliliğinin artırılması gibi uygulamaları içerir (Mikhaylov vd., 2020: 2903). Bu kapsamda, sürdürülebilir ulaşım ağları, enerji tasarruflu binaların yapılması ve yeşil enerji projeleri

gibi politikalar, karbon ayak izini küçültmeye yönelik önemli adımlardır (Shivanna, 2022: 163). Uzman görüşleri, uyum ve azaltma stratejilerinin birbirine alternatif değil, birbirini tamamlayıcı olduğuna işaret etmektedir. Zira iklim değişikliği halihazırda başlamış olup önümüzdeki on yıllarda da devam edecektir. Bu nedenle uyum zorunlu olmakla birlikte, azaltma çabalarıyla iklim değişikliği sınırlandırılmazsa toplumların ve ekosistemlerin uyum kapasitesi yetersiz kalacaktır (Archer ve Rahmstorf, 2010: 185–186).

	Azaltım	Uyum
Ne demek? 	Sera gazı emisyonlarını azaltma ve yutakları geliştirme eylemidir.	İklim değişikliğinin beklenen ve gerçekleşen etkilerine uyum sağlama sürecidir.
Ne yapar? 	Temel sebepleri ele alır.	Etkileri ele alır.
Amaçları 	İklim değişikliğinin olumsuz etkilerinden kaçınma	Riskin azaltılması ve olumsuz iklim olaylarına hazırlanma
Odak 	Küresel bazdaki etkilerle ilgilenir.	Yerle özel durumlarla ilgilenir.
Örnek 	• Temiz enerji • Enerji verimliliği • Atık yönetimi	• Afet yönetimi • Erken uyarı sistemleri • Altyapı iyileştirmeleri

Şekil 1. Azaltım ve Uyum Eylemlerinin Birbiriyle İlişkisi

Kaynak: Yeşil Büyüme, 2023.

Şekil 1’de iklim değişikliğiyle mücadelede kullanılan azaltım ve uyum stratejilerini görsel olarak karşılaştırmalı biçimde açıklanmıştır. Uyum stratejileri, azaltım stratejilerine yönelebilmek için yeterli kaynakların bulunmaması nedeniyle, özellikle az gelişmiş ülkeler, iklim değişikliğine karşı hassas olan küçük ada devletleri ve Afrika gibi, ekonomik faaliyetleri büyük ölçüde iklime bağımlı olan bölgeler için daha yüksek öncelik taşımaktadır (Ayers ve Huq, 2009).

SONUÇ

İklim değişikliğinin etkilerini azaltmak ve önleyici tedbirler almak büyük bir öncelik taşımaktadır. Küresel ölçekte bir iklim krizine karşı mücadele etmek için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmek ve sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde düşürmek gerekmektedir. Bu hedeflere ulaşılabilmesi ise ancak uluslararası düzeyde sağlanacak iş birliği ve koordineli eylemlerle mümkün olabilir (Nandy ve Martens, 2006). İklim değişikliğinin etkilerini hafifletmek için sera gazı emisyonlarını azaltmak ve uyum politikaları geliştirmek gerekmektedir. Sera gazı emisyonlarını azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş yapmak, enerji verimliliğini artırmak ve ormanları korumak gibi adımlar atılmalıdır. Uyum politikaları ise deniz seviyesinin yükselmesine karşı kıyı bölgelerini korumak, kuraklığa dayanıklı tarım ürünlerinin geliştirilmesi ve afetlere karşı erken uyarı sistemleri kurmak gibi önlemleri içerebilmektedir (Koyuncu ve Akgün, 2018).

Küresel ısınmaya bağlı olarak meydana gelen iklim değişikliği, yağışlar, su seviyesi, orman yangınları, çölleşme, kuraklık ve erozyon gibi çevresel, tarımsal üretim potansiyeli ve bulaşıcı hastalıklar gibi sosyo-ekonomik ve çevresel kaynaklı faktörler üzerinde belirleyici rol oynayarak ülkelerin sürdürülebilir kalkınma çabalarını olumsuz yönde etkilemektedir. Ülkelerin hem çevresel hem de sosyo-ekonomik faktörlerini etkileyerek sürdürülebilir kalkınma hedefleri üzerinde belirleyici rol oynayan iklim değişikliği kavramı, son yıllarda yaşanan büyük çaplı ve her ülkeyi yakından ilgilendiren küresel bir sorun haline gelmiştir. İnsan etkisi ile sera gazı emisyonunda yaşanan yükselişler gözlemlendiğinde, sera gazı emisyonunun azaltılması (Kılıç, 2009: 20), çevresel, ekonomik ve sosyal sorumluluk bilincinin de geliştirilmesi konusu sürdürülebilir kalkınma açısından son derece önemlidir (Aktan ve Börü, 2007; Yılmaz, 2018).

İklim değişikliğinin su kaynaklarına etkisi modelleme yapılarak incelenmeli, farklı senaryolar altında uyum ihtiyaçları ve maliyetler belirlenmeli ve bu bilgiler uzun vadeli su planlarına dahil edilmelidir. Su kaynaklarının yönetimi çerçevesinde, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini en aza indirmek için gerekli önlemler alınmalıdır. Bu önlemler kapsamında, ilk adım olarak havza bazında mevcut verilerin modellenmesiyle bir su bütçesi oluşturulmalıdır. İklim değişikliğinin havza üzerindeki etkilerinin incelenmesi, içme, sulama ve enerji üretimi gibi projelerde kullanılan su kaynaklarıyla ilgili olarak ileriye yönelik tahmin yapılabilmesi için modelleme yapılması gerektiği ifade edilmiştir (Karaman ve Gökalt, 2010).

İklim değişikliği ve yarattığı olumsuz etkileri, tüm dünyayı ilgilendirmesi sebebi ile küresel bir sorun olarak ele alınması gerekliliğini doğurmuştur. Evrendeki her bir canlının yaşam alanını tehdit eden iklim değişikliği konusunda, ortak çevre bilinci oluşturularak iş birliği içinde hareket edilmesi gerekmektedir. İklim değişikliğinin olumsuz etkilerini önlemek amacıyla alınacak tedbirleri belirlemek ve buna ek olarak gelecek nesillere sürdürülebilir bir dünya bırakmak, uluslararası alanda kolektif uzlaşa ile sağlanabilir (Sadioğlu ve Ağralan, 2020). İklim değişikliğinin bireylere ve topluma yönelik zararlı sonuçlarını önlemek için hem bireylerden hem de özel/kamu sektöründen stratejik eylem gereklidir. Gelişmekte olan ülkelerde uyum, kırılganlık ve başa çıkma ile ilgili sorunların ele alınmasına acil ihtiyaç vardır, çünkü bunlar dünyanın kentsel nüfusunun çoğuna, yüksek riskli kentsel alanlara ve uyum kapasitesindeki en büyük eksikliklere sahiptir (Pandve vd., 2011: 109). Bu bağlamda, söz konusu sorunların azaltılmasında ve sürdürülebilir bir direnç mekanizmasının oluşturulmasında en önemli adımlardan birisi endüstriyel değişimdir (Yılmaz, 2020: 381).

İklim değişikliğini yönetmek için azaltım ve uyum politikaları birlikte, eşgüdümlü uygulanmalıdır. Azaltım tarafında fosil yakıtlardan kademeli çıkış, enerji verimliliği ve yenilenebilir geçişi; uyum tarafında su yönetimi, afet risk azaltımı, erken uyarı ve iklim-dayanıklı altyapı önceliklidir. “Paris hedefleriyle uyumlu uluslararası iş birliği, finansman ve teknoloji transferi olmadan gerekli ölçek yakalanamaz. Bilim temelli hedefler ve şeffaf izleme-raporlama ile paydaş katılımı, sürdürülebilir refah için bu dönüşümün yönetim temeli oluşturulmaktadır.

KAYNAKÇA

- Adger, W. N., Arnell, N. W., & Tompkins, E. L. (2005). Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, 15(2), 77–86.
- Adger, W. N., Huq, S., Brown, K., Conway, D., & Hulme, M. (2003). Adaptation to climate change in the developing world. *Progress in Development Studies*, 3(3), 179–195.
- Aktan, C. C. ve Börü, D. (2007). Kurumsal sosyal sorumluluk, İşletmeler ve sosyal sorumluluk, İstanbul: İgiad yayınları.
- Archer, D., & Pierrehumbert, R. (2011). *The scientific foundation for the climate change forecast*. Oxford, UK: Blackwell Publishing.
- Archer, D., & Rahmstorf, S. (2010). *The climate crisis: An introductory guide to climate change*. New York, NY: Cambridge University Press.
- Aydoğdu, M. H. (2024). İklim değişikliği: Sorunlar ve bunlar yönetilebilir mi? *Social Science Development Journal*, 9(46), 79–91.
- Ayers, J. M., & Huq, S. (2009). Supporting adaptation to climate change: What role for official development assistance? *Development Policy Review*, 27(6), 675–692.
- Bağcı, H. R. (2023). Büyük iklim tipleri. Erişim tarihi: 12 Mart 2024, Erişim adresi: <https://www.cografyaninkodlari.com/tyt/tyt-cografya-buyuk-iklim-tipleri-pdf2023/>
- Bardsley, D. K., & Bardsley, A. M. (2007). A constructivist approach to climate change teaching and learning. *Geographical Research*, 45(4), 329–339.
- Binboğa, G. (2014). Uluslararası karbon ticareti ve Türkiye. *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, 9(34), 5732–5759.
- Bretschger, L., & Valente, S. (2011). Climate change and uneven development. *The Scandinavian Journal of Economics*, 113(4), 825–845.
- Castles, S., & Miller, M. J. (1998). *The age of migration*. London, UK: Macmillan Press.
- Çelik, S., Bacanlı, H., & Görgeç, H. (2008). *Küresel iklim değişikliği ve insan sağlığına etkileri*. Ankara: MGM Yayınları.
- Dam, M. M. (2014). *Sera gazı emisyonlarının makroekonomik değişkenlerle ilişkisi: OECD ülkeleri için panel veri analizi* (Yayımlanmamış doktora tezi). Adnan Menderes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Aydın.
- DeConto, R. M. (2009). Plate tectonics and climate change. In *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments* (pp. 784–798). Dordrecht: Springer.
- Dunne, J. P., Stouffer, R. J., & John, J. G. (2013). Reduction in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nature Climate Change*, 3, 563–566.
- Erdoğan, M., & Uşak, M. (2009). Fen ve teknoloji öğretmenlerinin iklim değişikliği konusundaki farkındalıkları. *Eğitim ve Bilim*, 34(151), 134–145.
- Erdoğan, S. (2020). Enerji, çevre ve sera gazları. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(1), 277–303.
- European Environment Agency (EEA). (n.d.). Climate change mitigation: Reducing emissions. Erişim tarihi: 23 Ocak 2024, Erişim adresi: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/indepth/climate-change-mitigation-reducing-emissions>

- Fankhauser, S., & Tol, R. S. J. (2005). On climate change and economic growth. *Resource and Energy Economics*, 27, 1–17.
- Gönençgil, B. (2017). Küresel iklim değişikliği ve atmosferik afetler. *Coğrafya Lisans Programı*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Açık ve Uzaktan Eğitim Fakültesi.
- Hallegatte, S. (2012). A framework to investigate the economic growth impact of sea level rise. *Environmental Research Letters*, 7(1).
- Health Effects Institute. (2019). *State of global air 2019: A special report on global exposure to air pollution and its disease burden*. Boston, MA: Health Effects Institute.
- Hendrix, C. S., Koubi, V., Selby, J., Siddiqi, A., & von Uexkull, N. (2023). Climate change and conflict. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(3), 144–148.
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Nuth, C., & Girod, L. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592, 726–731.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007a). *Climate change 2007: Synthesis report (Fourth Assessment Report)*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global warming of 1.5°C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- İğci, T., & Çobanoğlu, N. (2019). İklim değişikliğinin ve iklim değişikliğiyle ilgili küresel anlaşmaların çevre etiği bakımından değerlendirilmesi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 7(2), 130–146.
- İklim Araştırmaları Derneği. (2024). İklim değişikliğine uyum. Erişim tarihi: 19 Ağustos 2025, Erişim adresi: <https://www.iklim.org.tr/calisma-alanlarimiz/iklim-degisikligine-uyum/>
- Kadioğlu, M. (2008). Günümüzden 2100 yılına küresel iklim değişimi. In *TMMOB İklim Değişimi Sempozyumu bildiriler kitabı* (ss. 25–45).
- Karakaya, E. (2008). Proje temelli esneklik mekanizmaları: Temiz kalkınma mekanizması ve ortak yürütme. In E. Karakaya (Ed.), *Küresel ısınma ve Kyoto Protokolü: İklim değişikliğinin bilimsel, ekonomik ve politik analizi* (ss. 169–196). Ankara: Bağlam.
- Karakaya, E. (2016). Paris İklim Anlaşması: İçeriği ve Türkiye üzerine bir değerlendirme. *Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 3(1), 1–12. <https://doi.org/10.30803/adusobed.188842>
- Karaman, S., & Gökalp, Z. (2010). Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin su kaynakları üzerine etkileri. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 3(1), 59–66.
- Kılıç, C. (2009). Küresel iklim değişikliği çerçevesinde sürdürülebilir kalkınma çabaları ve Türkiye. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 10(2), 19–41.
- Koyuncu, M., & Akgün, H. (2018). Çiftlik hayvanları ve küresel iklim değişikliği arasındaki etkileşim. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 32(1), 151–164.

- Lawrence, D., Coe, M., Walker, W., Verchot, L., & Vandecar, K. (2022). The unseen effects of deforestation: Biophysical effects on climate. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 756115.
- Leal-Filho, W., Nagy, G. J., Setti, A. F. F., Sharifi, A., Donkor, F. K., Batista, K., & Djekic, I. (2023). Handling the impacts of climate change on soil biodiversity. *Science of the Total Environment*, 869, 47–55.
- Lee, S., & Baumgartner, L. (2022). *How just transition can help deliver the Paris Agreement*. New York, NY: UNDP. Erişim: 25 Mayıs 2025, https://climatepromise.undp.org/sites/default/files/research_report_document/UNDP-Just-Transition-Report.pdf
- Matsumoto, T., Allain-Dupré, D., Crook, J., & Robert, A. (2019). *An integrated approach to the Paris Climate Agreement: The role of regions and cities*. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/96b5676d-en>
- Mercan, T. (2025). Sosyal Bilimlerde Bilimsel ve Uygulamaları Çalışmalar, Ed: Ravanoğlu, G.A. ve Çoker, E. içinde “Üretim Süreçlerinde Sürdürülebilirlik ve Otonom Robot Teknolojisi”, Duvar Yayınevi.
- Mercan, T. ve Atalay, M. (2024). Endüstri 4.0 Dijital Teknolojiler Üretimde Dijital Dönüşüm, Çizgi Kitabevi.
- Mercan, Y. ve Çetin, O. (2022). Sosyal ve Beşerî Bilimlerde Teori ve Araştırmalar, Ed: Ceylan, A. Ç., İyit, N. ve Akyıldız, Y. içinde “Çevresel Eğilimlerin Tedarik Zincirine Etkisi”, Serüven Yayınevi.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM). (2022b). *Orman Yangınları Meteorolojik Erken Uyarı Sistemi (MEUS)*. Ankara: MGM Yayınları.
- Mikheylov, A., Moiseev, N., Aleshin, K., & Burkhardt, T. (2020). Global climate change and greenhouse effect. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(4), 2897–2913.
- Nandy, D., & Martens, P. C. H. (2006). Unraveling long-term solar variability and its impact on space climate: The Stars as Suns project. In *Proceedings of the ILWS Workshop* (p. 158).
- Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., & Johnson, C. A. (2001). *Climate change 2001: The scientific basis*. In J. T. Houghton, Y. Ding, & D. J. Griggs (Eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Ozkan-Pir, E., & Karaduman, İ. (2017). Environmental consciousness, environmental education, conspicuous consumption and re-buying decisions on network marketing in Turkey. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 13(8), 5531-5542.
- Öztürk, T., & Gürsoy, F. (2022). Küresel iklim değişikliğinin Arktik Okyanusu’na jeopolitik etkisi. *Akdeniz İİBF Dergisi*, 22(1), 117–131.
- Pandve, H. T., Chawla, P. S., Fernandez, K., Singru, S. A., Khismatrao, D., & Pawar, S. (2011). Assessment of awareness regarding climate change in an urban community. *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 15(3), 109–112.
- Ragab, R., & Prudhomme, C. (2002). SW—Soil and Water: Climate change and water resources management in arid and semi-arid regions: Prospective and challenges for the 21st century. *Biosystems Engineering*, 81(1), 3–34.

- Sadioğlu, U., & Ağıralan, E. (2020). İklim değişikliği çerçevesinde 25. Taraflar Konferansı (COP 25). *Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11(Ek Sayı-1), 361–385.
- Sezgin, S. (2024). Türkiye’de vatandaşların iklim değişikliği anksiyetesinin değerlendirilmesi. *Kent Akademisi*, 17(1), 1–21.
- Shivanna, K. R. (2022). Climate change and its impact on biodiversity and human welfare. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 88(2), 160–171.
- Spence, C. (2007). *Küresel ısınma* (S. Gönen & S. Agar, Çev.). İstanbul: Pegasus Yayınları.
- Şenocak, K., Eser, L. Y., & Genç, M. C. (2022). Maliye yazıları teori – iktisat– politika (Ed. Arkan Yusufoglu ve Muharrem Çakır). Ankara: Gazi Kitabevi.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). *İklim değişikliğine uyum stratejisi ve eylem planı*. Erişim adresi: <https://iklim.gov.tr/db/turkce/icerikler/files/Iklim%20Degisikligine%20Uyum%20Stratejisi%20ve%20Eylem%20Plan%C4%B1.pdf> (Erişim tarihi: 21.08.2025).
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024). *İklim değişikliği ve uluslararası müzakereler*. Erişim adresi: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-iklim-degisikligive-uluslararası-muzakereler> (Erişim tarihi: 18.08.2025).
- Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Beek, R., & Wada, Y. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 25, 322–329.
- Tourani, M., Çağlayan, A., Işık, V., & Saber, R. (2022). İran’da iklim değişikliğinin klimatolojik, meteorolojik ve hidrolojik afetlere etkisi. *Türk Coğrafya Dergisi*, 80, 97–114.
- Türkeş, M. (2020). İklim değişikliğinin fiziksel bilim temeli-II: Dünyada ve Türkiye’de gözlenen ve öngörülen iklim değişiklikleri ve değişkenliği. *Toplum ve Hekim*, 35(1), 3–31.
- Uncu, B. A. (2019). *İklim için kentler: Yerel yönetimlerde iklim eylem planı*. İstanbul: 350 Türkiye.
- UNFCCC. (2003). *Caring for climate* (Türkçe baskı). Erişim adresi: https://unfccc.int/resource/docs/publications/caring_trk.pdf (Erişim tarihi: 29.09.2025).
- Weiskopf, S. R., Rubenstein, M. A., Crozier, L. G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J. E., ... & Whyte, K. P. (2020). Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of the Total Environment*, 733, 137782.
- Widiyawati, Y. (2020, April). Global warming & climate change: Integration of socio-scientific issues to enhance scientific literacy. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1511, No. 1, p. 012071). IOP Publishing.
- Woodward, J. (2019). *Yakından tanıyın iklim değişimi* (D. Candaş, Çev.). Ankara: Tübitak Yayınları.
- Yergin, D. (2022). *Yeni harita: Enerji, iklim ve uluslar çatışması* (O. Özaltın, Çev.). İstanbul: Nora Yayınevi.
- Yeşil Büyüme. (2023). İklim değişikliğine karşı iki yöntem: Azaltma ve uyum. Erişim adresi: https://www.linkedin.com/posts/yesilbuyume_iklimde%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Fi-s%C3%BCrd%C3%BCr%C3%BClebilirlik-azalt%C4%B1m-activity-7085130054019473409-MaH2/?originalSubdomain=tr (Erişim tarihi: 25.12.2024).

- Yıldırım, B. (2018). İklim değışikliğı farkındalığı ve eğitim. *Çevre Eğitimi Dergisi*, 5(2), 45–52.
- Yılmaz, F. (2018). Corporate social responsibility. In K. Özdaş lı, et al. (Eds.), *Innovative Approaches in Social, Human and Administrative Science*, Ankara: Gece Akademi.
- Yılmaz, F. (2020). Dijital insan kaynakları yönetimi. In H. T. Uysal, C. Aksoy, & F. Yılmaz (Eds.), *Dijital Yönetim içinde* (s. 381-404). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Yücel Batmaz, N., Bayraktar, S., & Aktürk Çetin, B. (2022). İklim değışikliğı ile ortaya çıkan su sorununa bir çözüm önerisi: Sünger kent. *Çağdaş Yerel Yönetimler*, 31(2), 67–88.

BÖLÜM 9

DEPREM SONRASI TOPLANMA ALANLARININ TOPSIS YÖNTEMİ İLE SIRALANMASI

Seda ERBAYRAK¹, Duygu TUYLU²

¹ Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Gelisim Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-6423>.

² Arş. Gör., İstanbul Gelisim Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1486-6414>

1-Giriş

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de afet yönetimi hakkında çalışmalar gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Ülkemizin jeolojik yapısı gereği deprem kaçınılmaz doğal afetlerin başında gelmektedir. Olası Marmara bölgesinde yaşanacak bir depremin tüm ülkeyi derinden etkileyecektir. Bu sebeple deprem sonrası risklerin en aza indirilmesi ve güvenli alanların oluşturulması büyük önem taşımaktadır. Deprem sonrasında oluşabilecek kargaşanın azaltılması ve temel ihtiyaçların yerine getirilmesi açısından toplanma alanlarının belirlenmesi gerekmektedir. (Maral vd., 2015). Bu çalışmada, çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden TOPSIS kullanılarak toplanma yerleri arasından seçim yapılacaktır. Uygulama bölgesi olarak İstanbul da olası riskin yüksek olduğu Beylikdüzü ilçesi seçilmiştir. Beylikdüzü ilçesinde, Büyükşehir mahallesinde eski binaların daha yoğun olmasından dolayı, olası riskin daha fazla olacağı kanısına varılmış ve uygulama bu bölge özeline indirgenmiştir. (Şekil 1)



Şekil 1. Büyükşehir/Beylikdüzü Google Earth Görünümü

İstanbul, Beylikdüzü belediyesinin belirlemiş olduğu toplanma alanları alternatif olarak belirlenmiştir. Alternatiflerin isimleri Tablo 1 de sunulmuştur.

Tablo 1. Toplanma Alanları

Alternatif	Toplanma Alanları	Adres
1	Sezen Aksu Parkı	Büyükşehir, Sezen Aksu Parkı İçi Yolu, 34520 Beylikdüzü/İstanbul
2	Kahraman Sokak Parkı	Büyükşehir, 34520 Beylikdüzü/İstanbul
3	Etkinlik Alanı	Büyükşehir, Cumhuriyet Cd. No:11, 34520 Beylikdüzü/İstanbul
4	Atrium Parkı	Büyükşehir, Atrium Parkı İçi Yolu, 34520 Beylikdüzü/İstanbul
5	Mehmetçik Parkı	Büyükşehir, 34520 Beylikdüzü/İstanbul
6	Mehmet Akif Ersoy Parkı	Büyükşehir, 34520 Beylikdüzü/İstanbul
7	Atatürk Parkı	Büyükşehir, 34520 Beylikdüzü/İstanbul
8	Barış Manço Parkı	Büyükşehir, 34520 Beylikdüzü/İstanbul

Toplanma alanlarının seçimi için literatürde en sık kullanılan kriterler incelenmiş olup hem uzman görüşleri hem de literatürde ki çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Kriterler belirlenirken afet sonrasında ilk olarak temel ihtiyaçların karşılanabilmesi için 5 ana kriter üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Belirlenen kriterler aşağıda verilmiştir.

- Kapasite ve Fiziksel Özellikler
- Ulaşılabilirlik
- Altyapı ve Donanım
- Güvenlik
- Çevresel ve Sosyal Uyum

Yapılan çalışmada her bir kriterin önem derecelerinin belirlenmesi için öncelikle AHP kullanılarak kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. Sonrasında elde edilen değerlerin tutarlı olup olmadığı tutarlılık analizi ile test edilmiş ve nihai ağırlıklar belirlenmiştir. Çalışmanın devamında belirlenen toplama alanları her bir kriter için değerlendirilmiş ve çok kriterli karar verme yöntemlerinden TOPSIS yöntemi kullanılarak alternatif toplanma alanları sıralanmıştır.

2-Kriter ağırlıklarının hesaplanması

Yapılan çalışmada, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yönteminin temel adımları izlenerek kriter ağırlıkları elde edilmiştir. AHP yöntemi ikili karşılaştırma matrisleri temel alınarak uygulanmaktadır. İkili karşılaştırmalar literatürde Saaty (2008) tarafından önerilen 1-9 aralığında değerler ile ifade edilen bir skala kullanılarak yapılmaktadır.

- Önem Derecesi: 1 (İki kriterin önem derecesi aynıdır.)
- Önem Derecesi: 3 (İlk kriter diğer kritere göre biraz daha önemli)
- Önem Derecesi: 5 (İlk kriter diğer kritere göre fazla önemli)
- Önem Derecesi: 7 (İlk kriter diğer kritere göre çok fazla önemli)
- Önem Derecesi: 9 (İlk kriter diğer kritere göre aşırı derecede önemli)
- Önem Derecesi: 8,6,4,2 (Ara değerler)

Kriterlerin birbirlerine göre ikili karşılaştırma matrisi uzman görüşü alınarak oluşturulmuş ve Tablo 2’de verilmiştir. İkili karşılaştırma matrisinde Köşegen değerleri 1 değerini alır. Köşegenin üzerinde kalan değerler a_{ij} ile gösterilirken köşegen altında kalan değerler $a_{ji} = (1 / a_{ij})$ şeklinde gösterilir.

Tablo 2. İkili Karşılaştırma Matrisi

Kriterler	Kapasite ve Fiziksel Özellikler	Ulaşılabilirlik	Altyapı ve Donanım	Güvenlik	Çevresel ve Sosyal Uyum
Kapasite ve Fiziksel Özellikler	1	3	4	1/3	5
Ulaşılabilirlik	1/3	1	3	1/5	4
Altyapı ve Donanım	1/4	1/3	1	1/7	3
Güvenlik	3	5	7	1	6
Çevresel ve Sosyal Uyum	1/5	1/4	1/3	1/6	1

Kriterlerin ikili karşılaştırıldığı karşılaştırma matrisi Denklem (1) kullanılarak normalize edilir ve normalize matris oluşturulur. (Bknz: Tablo 3)

$$c_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n c_{ij}} \quad (1)$$

Tablo 3. Normalize Matris

Kriterler	Kapasite ve Fiziksel Özellikler	Ulaşılabilirlik	Altyapı ve Donanım	Güvenlik	Çevresel ve Sosyal Uyum
Kapasite ve Fiziksel Özellikler	0,209059	0,313043	0,260870	0,180879	0,263158
Ulaşılabilirlik	0,069686	0,104348	0,195652	0,108527	0,210526
Altyapı ve Donanım	0,052265	0,034783	0,065217	0,077519	0,157895
Güvenlik	0,627178	0,521739	0,456522	0,542636	0,315789
Çevresel ve Sosyal Uyum	0,041812	0,026087	0,021739	0,090439	0,052632

Her bir kriter için satır toplamaları ve kriter ağırlıkları Denklem (2) kullanılarak Kapasite ve Fiziksel Özellikler, Ulaşılabilirlik, Altyapı ve Donanım, Güvenlik ve Çevresel ve Sosyal Uyum kriterleri için sırası ile 0.245402, 0.137748, 0.077536, 0.492773 ve 0.046542 olarak bulunmuştur.

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij} \quad (2)$$

İkili karşılaştırmalar öznel yargılara dayalı olması sebebi ile tutarlı bir şekilde yapıp yapılmadığının test edilmesi gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda tutarlılık oranı hesaplanır ve bu oran 0.10 dan küçük ise yapılan karşılaştırmaların tutarlı olduğu söylenebilir. (Öner ve Ülengin, 1995)

Tutarlılık analizinde ilk olarak $\lambda_i = \frac{v_i}{w_i}$ kullanılarak öncelik vektörü ve $\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n}$ ile Eigenvalue λ_{max} değeri hesaplanmış ve aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4. Maksimum Eigenvalue

	$\lambda_i = \frac{v_i}{w_i}$
Kapasite ve Fiziksel Özellikler	5,565384915
Ulaşılabilirlik	5,349461618
Altyapı ve Donanım	5,092146691
Güvenlik	5,559802016
Çevresel ve Sosyal Uyum	5,114399685
λ_{max}	5,336238985

Tutarlılık İndeksi (CI) Denklem (3) kullanılarak 0,08406 olarak hesaplanır:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

Denklemden λ_{max} matristeki en büyük özdeğeri, n kriter sayısını göstermektedir. Tutarlılık oranı (CR) ise tutarlılık indeksinin aynı boyuttaki matrise karşılık gelen rastgele indekse(RI) oranlanmasıyla elde edilir. (Kecek ve Yüksel, 2016)

Rastgele tutarsızlık indeksi (RI) değeri kriter sayısına bağlıdır. Tablo 4’deki n değerine karşılık gelen değer seçilerek belirlenir. (Golden ve Wang,1990)

Tablo 4. Rassal Indeks Değerleri (Golden ve Wang,1990)

N	RI
1	0,0000
2	0,0000
3	0,5799
4	0,8921
5	1,1159
6	1,2358
7	1,3322
8	1,3952
9	1,4537
10	1,4882

CI ve RI değerleri hesaplandıktan sonra Denklem (4) kullanılarak tutarlılık oranı 0.072528 olarak hesaplanır.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

Sonuç olarak bulunan değer 0.10 dan küçük olduğu için tutarlı bir değerlendirme yapıldığı görülmektedir.

Yapılan analiz sonucunda nihali kriter ağırlıkları Tablo 5 de verilmiştir.

Tablo 5. Kriter Ağırlıkları

Kriterler	Kriter Ağırlıkları
Kapasite ve Fiziksel Özellikler	0,245402
Ulaşılabilirlik	0,137748
Altyapı ve Donanım	0,077536
Güvenlik	0,492773
Çevresel ve Sosyal Uyum	0,046542

Ağırlıklar incelendiğinde toplanma alanlarının seçimi için belirlenen kriterlerin önem sıralaması Güvenlik, Kapasite ve Fiziksel Özellikler, Ulaşılabilirlik, Alt yapı ve Donanım ve Çevresel-Sosyal uyum olarak belirlenmiştir. Bu sonuçtan da görebileceğimiz gibi deprem sonrasında insanların ilk ihtiyaç duydukları kriter güvenlik kriteri olmasıdır.

3-TOPSIS yöntemi

Literatürde en çok kullanılan yöntemlerden bir tanesi TOPSIS yöntemidir. Bu yöntem temelinde pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüm üzerine kuruludur. Yani, yöntemde ideal çözüme hangi alternatifin seçileceğine karar verilir. Temel olarak seçilen alternatifin ideal çözüme olan uzaklığını optimize etmeyi amaçlar. (Ömürgönülşen ve Menten, 2021)

Toplanma alanları Beylikdüzü belediyesinin belirlemiş olduğu ve internet sitelerinde kamuoyuyla paylaştığı, Büyükşehir mahallesinde yer alan Sezen Aksu Parkı, Kahraman Sokak Parkı, Etkinlik Alanı, Atrium Parkı, Mehmetcik Parkı, Mehmet Akif Ersoy parkı, Atatürk Parkı ve Barış Manço Parkı olmak üzere 7 toplanma alanı belirlenmiş ve kriterlere göre değerlendirilmiştir. İlk olarak karar matrisi oluşturulmuş ve her bir alternatifin kriterlere göre değeri bulunmuştur. Oluşturulan karar matrisi Tablo 6 da verilmiştir.

Tablo 6. Karar Matrisi

	Kapasite ve Fiziksel Özellikler	Ulaşılabilirlik	Altyapı ve Donanım	Güvenlik	Çevresel ve Sosyal Uyum
Sezen Aksu Parkı	9296	590	6	6	9
Kahraman Sokak Parkı	3987	650	2	2	3
Etkinlik Alanı	7693	690	9	8	2
Atrium Parkı	15107	840	4	4	4
Mehmetçik Parkı	8028	930	3	3	5
Mehmet Akif Ersoy Parkı	6056	990	5	5	6
Atatürk Parkı	8557	1100	8	9	7
Barış Manço Parkı	5925	1200	7	7	8

Her bir toplama alanının metre kare cinsinden değeri Google Earth yardımı ile hesaplanarak kapasite olarak kabul edilmiş ve tabloda ilk kriter değeri olarak belirtilmiştir. Ulaşılabilirlik kriteri ise merkeze olan uzaklıkları baz alınarak tabloya metre cinsinden eklenmiştir. Altyapı ve donanım kriteri ise elektrik, aydınlatma, su erişimi gibi temel ihtiyaçlar düşünülerek karar verici tarafından değerlendirilmiştir. Aynı şekilde Güvenlik ve Risk kriteri ise görünürlük, çevresel açıklık gibi koşullar göz önünde bulundurularak karar verici tarafından belirlenmiştir. Son kriter olarak çevresel ve sosyal uyum ise, geçici barınma olarak seçim yapılma durumu göz önünde bulundurularak karar verici tarafından belirlenmiştir.

Oluşturulan Karar matrisi Denklem (5) kullanılarak normalize edilir ve normalize matris oluşturulur. (Bknz: Tablo 7)

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n a_{ij}^2}} \quad (5)$$

Tablo 7. Normalize Matris

	Kapasite ve Fiziksel Özellikler	Ulaşılabilirlik	Altyapı ve Donanım	Güvenlik	Çevresel ve Sosyal Uyum
Sezen Aksu Parkı	0,379771239	0,23236091	0,356034497	0,3560345	0,53405175
Kahraman Sokak Parkı	0,162881662	0,25599084	0,118678166	0,11867817	0,17801725
Etkinlik Alanı	0,314283578	0,27174412	0,534051746	0,47471266	0,11867817
Atrium Parkı	0,617169117	0,33081893	0,237356332	0,23735633	0,23735633
Mehmetçik Parkı	0,327969396	0,36626381	0,178017249	0,17801725	0,29669541
Mehmet Akif Ersoy Parkı	0,247406909	0,38989373	0,296695415	0,29669541	0,3560345
Atatürk Parkı	0,349580733	0,43321526	0,474712663	0,53405175	0,41537358
Barış Manço Parkı	0,242055141	0,47259846	0,41537358	0,41537358	0,47471266

TOPSIS yönteminde AHP den elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak ağırlıklı matris V_{ij} elde edilir. Her bir kriter ağırlığı ilgili alternatif değeri ile çarpılarak oluşturulur. (bkz Tablo 8.)

Tablo 8. Ağırlıklı Matris

	Kapasite ve Fiziksel Özellikler	Ulaşılabilirlik	Altyapı ve Donanım	Güvenlik	Çevresel ve Sosyal Uyum
Sezen Aksu Parkı	0,093196525	0,03200724	0,027605414	0,1754441	0,02485571
Kahraman Sokak Parkı	0,039971444	0,03526222	0,009201805	0,05848137	0,00828524
Etkinlik Alanı	0,077125738	0,0374322	0,041408121	0,23392546	0,00552349
Atrium Parkı	0,151454378	0,04556964	0,01840361	0,11696273	0,01104698
Mehmetçik Parkı	0,080484262	0,0504521	0,013802707	0,08772205	0,01380873
Mehmet Akif Ersoy Parkı	0,060714087	0,05370707	0,023004512	0,14620341	0,01657047
Atatürk Parkı	0,085787722	0,05967452	0,036807219	0,26316614	0,01933222
Barış Manço Parkı	0,059400754	0,06509948	0,032206317	0,20468478	0,02209396

Elde edilen matriste her bir kriter için ideal pozitif A^* ve negatif A^- çözüm değerleri bulunur. İdeal çözüm kriterin fayda veya maliyet kriteri olmasına göre değişkenlik göstermektedir. Kullanılan kapasite ve Fiziksel Özellikler, Alt yapı ve Donanım, Güvenlik ve Çevresel sosyal uyum kriterleri fayda kriteridir. Ancak ulaşılabilirlik kriterini merkeze olan uzaklık olarak değerlendirdiğimiz için uzaklığın minimum olmasını isteriz bu sebeple ilgili kriter maliyet kriteri olarak değerlendirilmiştir. (Bknz Tablo 9)

Tablo 9. İdeal Çözüm Değerleri

	Kapasite ve Fiziksel Özellikler (Fayda)	Ulaşılabilirlik (Maaliyet)	Altyapı ve Donanım (Fayda)	Güvenlik (Fayda)	Çevresel ve Sosyal Uyum (Fayda)
Sezen Aksu Parkı	0,093196525	0,03200724	0,027605414	0,1754441	0,02485571
Kahraman Sokak Parkı	0,039971444	0,03526222	0,009201805	0,05848137	0,00828524
Etkinlik Alanı	0,077125738	0,0374322	0,041408121	0,23392546	0,00552349
Atrium Parkı	0,151454378	0,04556964	0,01840361	0,11696273	0,01104698
Mehmetçik Parkı	0,080484262	0,0504521	0,013802707	0,08772205	0,01380873
Mehmet Akif Ersoy Parkı	0,060714087	0,05370707	0,023004512	0,14620341	0,01657047
Atatürk Parkı	0,085787722	0,05967452	0,036807219	0,26316614	0,01933222
Barış Manço Parkı	0,059400754	0,06509948	0,032206317	0,20468478	0,02209396
A*	0,151454378	0,03200724	0,041408121	0,26316614	0,02485571
A-	0,039971444	0,06509948	0,009201805	0,05848137	0,00552349

Her bir alternatif için, ideal pozitif ve ideal negatif çözüme olan uzaklık değerleri aşağıdaki Denklem 6-7-8 kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 10 da verilmiştir.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2}, j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2}, j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$P_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (8)$$

Tablo 10. Sonuç tablosu

	S_i^*	S_i^-	Performans Değeri	Sıralama
Sezen Aksu Parkı	0,106206	0,200931	0,654207	4
Kahraman Sokak Parkı	0,235896	0,247318	0,511819	8
Etkinlik Alanı	0,082359	0,244493	0,748024	2
Atrium Parkı	0,149262	0,191664	0,562186	6
Mehmetçik Parkı	0,192462	0,214122	0,526637	7
Mehmet Akif Ersoy Parkı	0,150971	0,208906	0,580492	5
Atatürk Parkı	0,071619	0,267559	0,788846	1
Barış Manço Parkı	0,114374	0,230433	0,668296	3

4- SONUÇ

Ülkemizin deprem kuşağında olması ve deprem sonrası yönetimsel süreçlerin mümkün olduğu kadar daha önceden planlanarak yaşanan doğa olayından sonra devreye girmesi riskleri büyük miktarda azaltılacağı bilinmektedir. Özellikle Maraş depreminden sonra ülkemiz deprem gerçeği ile yeniden yüzleşmiştir. İstanbul da yaşanacak herhangi depremde oluşabilecek zararların en aza indirilmesi çok büyük önem arz etmektedir. İnsanların güvenli bir alanda toplanma alanlarının yer alması ve bu toplanma alanlarının kriterlere göre değerlendirilip kamuoyuyla paylaşılması sonraki süreçleri daha yürütebilir hale getirmektedir.

Bu sebeple, özellikle deprem olduktan sonra İstanbul da oluşabilecek kargaşanın azaltılması için Beylikdüzü ilçesinde, daha çok eski yönetmeliğe göre yapıların sayıca fazla olması sebebi ile Büyükşehir mahallesi baz alınarak toplanma alanları çok kriterli karar verme teknikleri kullanılarak sıralanmıştır.

Yapılan çalışmadan ilk olarak; deprem sonrasında ilk akla gelebilecek temel ihtiyaçları içeren ana kriterler ele alınmış ve Kapasite ve Fiziksel Özellikler, Ulaşılabilirlik, Altyapı ve Donanım, Güvenlik ve Çevresel-Sosyal Uyum olmak üzere 5 kriter belirlenmiştir. Kriterler AHP yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmış ve en önemli kriterin Güvenlik olduğu görülmektedir. Elde edilen ağırlıkların subjektif veriler içermesinden kaynaklı olmak üzere tutarlılık analizi yapılmıştır. Tutarlılık oranı 0.072528 olarak bulunmuştur. İlgili oran 0.10 dan küçük bir değer olduğu için yapılan tüm karşılaştırmaların tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışmanın 2. Aşamasında TOPSIS yöntemi kullanılarak 8 alternatif toplanma alanı belirlenen kriterlere göre değerlendirilmiştir. Oluşturulan karar matrisindeki değerler öncelikle normalize edilmiş ve sonrasında kriter ağırlıkları ile çarpılarak ağırlıklı karar matrisi oluşturulmuştur. Topsis yöntemi ideal çözüme uzaklık değerleri baz alarak uygulanmış ve 8 alternatif sıralanmış ve sıralama sonucunda en iyi alternatifin Atatürk Parkı olduğu görülmüştür.

5- REFERANSLAR

- Öner, A. & Ülengin, F. (1995). Silah Seçiminde AHP Yaklaşımı. Kara Harp Okulu, I. Sistem Mühendisliği ve Savunma Uygulamaları Sempozyumu, Bildiriler-II, 1109-1122.
- Keçek, G., & Yüksel, R. (2016). Analitik Hiyerarşi Süreci (Ahp) Ve Promethee Teknikleriyle Akıllı Telefon Seçimi. Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi(49), 46-62.
- Golden, B. L. & Wang, Q. (1990). An Alternative Measure of Consistency. In: B. L. Golden, A. Wasil & P.T. Harker (eds.) Analytic Hierarchy Process: Applications and Studies, 68-81, New-York: Springer Verlag.
- Beylikdüzü Belediyesi. (2025). *Toplanma alanları*. [https://hazir.beylikduzu.istanbul/toplanma-
alanlari](https://hazir.beylikduzu.istanbul/toplanma-
alanlari)
- Ömürgönülşen, M., & Menten, C. (2021). **Bulanık TOPSIS yöntemi ile Ankara ili için olası afet sonrası geçici barınma alanlarının seçimi**. Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 7(1): 159-175
- Thomas L. Saaty, (2008) “The Analytic Hierarchy and Analytic Network Measurement Processes: Applications to Decisions Under Risk”, European Journal of Pure and Applied Mathematics, Vol 1, No 1, s. 125

BÖLÜM 10

ARM TABANLI MİKRODENETLEYİCİ İLE ULTRASONİK SENSÖR DESTEKLİ OTONOM ENGELDEN KAÇMA YETENEĞİNE SAHİP QUADCOPTER İNSANSIZ HAVA ARACININ TASARIMI VE KONTROLÜ

Mustafa BİLİM¹, Beytullah BOZALI²

¹ Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı, Düzce, Türkiye. mustafabilim2000@gmail.com, Orcid ID: 0009-0008-1730-0188

² Dr. Öğr. Üyesi, Düzce Üniversitesi, Düzce Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Düzce, Türkiye. beytullahbozali@duzce.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-3633-5780

1. GİRİŞ

İnsansız hava araçları (İHA), günümüzde arama ve kurtarma operasyonlarından çevre izlemeye, afet yönetiminden tarım ve lojistik uygulamalarına kadar oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptirler (Shakhatreh et al., 2018). Görev çeşitliliğinin artmasının İHA'ların uçuş sırasında karşılaştıkları engelleri güvenli ve kararlı biçimde aşabilmeleri gerekir. Şehir içi koridorlar, kapalı alanlar veya GPS sinyalinin zayıfladığı bölgeler, çarpışma riskinin belirgin şekilde yükseldiği ortamlarda kullanılmaktadır (Kim & Lee, 2022; Pham et al., 2015). Bu tip ortamlar görev başarısını doğrudan etkilediği için otonom kaçınma sistemlerinin geliştirilmesi önemli araştırma konusu olmuştur. Engelden kaçınan otonom yapılar üç farklı özelliğe sahiptir. Bunlar Algılama, karar verme ve manevralardır işlemleridir (Popescu et al., 2018). Birinci aşamada, sensörler çevreyi tarama işlemi yapmaktadır. İkinci aşamada elde edilen veriler analiz edilerek olası tehlikelerin değerlendirilmesi işlemi yapılmaktadır. Üçüncü aşamada ise araç güvenli rotayı korumak için gerekli manevrayı gerçekleştirme işlemi yapmaktadır. Modüllerin performansı, kullanılan sensörün tepki süresi ile doğruluğuna ve kontrol algoritmasının işlem kapasitesine bağlı olarak değişmektedir (Debnath et al., 2024). Engellerin tespitinde yararlanılan teknolojiler çok çeşitlidir. Bu çeşitlikler LIDAR, lazer tabanlı sistemler, stereo kameralar, kızılötesi sensörler, radar çözümleri ve ultrasonik ölçüm birimleri bu çeşitliklerden bazılarıdır (Merei et al., 2025). LIDAR ve stereo kameralar yüksek çözünürlüklü veri sağlayabilir. LIDAR ve stereo kameralar, ancak hem maliyet hem de enerji tüketimi açısından küçük ölçekli İHA platformlarında sınırlayıcı olduğu söylenebilir. Bu yüzden düşük maliyetli, hafif ve entegrasyonu kolay sensörlere ihtiyaç duyulan mikro sınıf İHA'larda ultrasonik sensörler daha uygun bir seçenek hâline geldiğini belirtmişlerdir (Kushwaha & Bojewar, 2019). Belirli bir frekansta ultrasonik sensörler ses dalgaları göndermektedirler. Daha sonra geri dönüş süresini ölçerek mesafe hesaplamaktadırlar. Ultrasonik sensörlerin çalışma prensibi $d = (v \cdot t / 2)$ şeklindedir. Burada v ses hızı, t ise dalga'nın gidiş ve dönüş süresini belirtmektedir. Yaygın kullanılan HC-SR04 modellerin 2 cm ile 400 cm arasındaki ölçüm aralığı ve yaklaşık 3 mm çözünürlüğüyle mikro-İHA'larda oldukça işlevseldirler (Kaur et al., 2015). Yüzey eğimi, ortam sıcaklığı, malzemenin yapısı ve çoklu yansıma gibi etkenlerden sensör performansının etkilenmektedir (Sze et al., 2022). Hem sensör temelli hem de algoritmik kaçınma yöntemlerini inceleyen literatür çalışmalar mevcuttur. İHA'larda çarpışma kaçınma mekanizmalarını Gageik ve arkadaşları değerlendirmişlerdir. Algılama ile manevra aşamalarının güvenli uçuş açısından belirleyici olmakta olduğunu ifade etmektedirler (Gageik et al., 2015). Diğer bir çalışmada, düşük maliyetli sensörlerle etkili kaçınma sistemlerinin geliştirilebileceğini belirtmişlerdir. Mobil kullanıcı hareketlerinin tahmini, gerçek zamanlı yeniden güzergâh planlaması ve güvenilir iletişimin modern İHA ağlarının sürdürülebilir performansı için kritiktir (Mannan et al., 2025). Pekiştirmeli öğrenme tabanlı yönlendirme yaklaşımları, spektral kümelenme, yoğun ve değişken ağ koşullarında daha kararlı iletişim sağlayabilmektedir (Ullah et al., 2025). Birçok uygulama alanlarında İHA'lar kullanılır. Multispektral görüntüler ile biyofiziksel parametrelerin bütünleştirilmesinin derin öğrenme modelleriyle birleştirildiğinde yüksek doğrulukla biyokütle tahmini gibi literatürde tarım alanında bazı çalışmalar bulunmaktadır (Dlamini et al., 2025). Akıllı ulaşım sistemlerinde UAV-VANET entegrasyonu üzerine yapılan çalışmalar, ağın kapsama alanı ve güvenilirliğini artırmanın önemli olduğunu belirtmektedirler (Ashraf et al., 2024). İHA kullanılarak yapılan püskürtme, konvansiyonel yöntemlere kıyasla daha fazla ilaç sürüklenmesine yol açabilir. Bu durumu çevresel açıdan dikkatle değerlendirilmesi gerektiği ifade etmektedirler (Chen et al., 2025). Türkiye'deki İHA teknolojilerine yönelik çalışmalar, ülkenin son yıllardaki kurumsal, teknolojik ve ekonomik dönüşümünün uluslararası literatürde giderek daha fazla görülmektedir. Özellikle ihracat kapasitesinin dikkat çekmektedir (Koçyiğit et al., 2025).

Bu çalışmada amacı, düşük maliyetli donanım bileşenleri sahip, engel algılama ve engelden kaçınma yeteneğine sahip bir quadcopter sisteminin geliştirmektir. Tasarımda dört yönlü HC-SR04 ultrasonik sensörler ve ARM tabanlı bir mikrodenetleyici kullanılmıştır. Sensör verilerinin işlenmesinde kesme (interrupt) tabanlı hızlı tepki veren mekanizmadan yararlanılmıştır. Bu sayede, engel tespit edildiğinde quadcopter gecikmeye neden olmayan bir kontrol döngüsüyle uygun manevra komutlarını üretebilmesine imkân tanımaktadır. Geleneksel tarama (polling) yaklaşımına kıyasla daha düşük tepki süresi elde edilmiştir. Bu durumda quadcopter sisteminin, özellikle dar ya da karmaşık ortamlarda güvenilirliğini artırır. Araştırma ve eğitim amaçlı bu çalışma kullanılabilir. Ayrıca kolayca yeniden üretilebilen bir İHA platformu sunmaktadır. Bu yapıda gelecekte sensör füzyonu ya da yapay zekâ temelli yönlendirme algoritmalarıyla genişletilebilmesine uygun bir altyapı imkânı sağlayabilir.

2. MATERYAL VE METOD

Geliştirilen engelden kaçınma yeteneğine sahip quadcopter sisteminin tasarımında kullanılan elektronik, mekanik ve yazılımsal bileşenleri bütüncül bir bakışla ele alınmıştır. Quadcopter sisteminin donanım altyapısı, sensör konumlandırması, veri işleme süreci ve gerçekleştirilen test adımları ayrıntılı biçimde ele alınmıştır.

Arduino Uno tarafından, quadcopter sisteminin dört farklı yönüne yerleştirilmiş HC-SR04 ultrasonik mesafe sensörlerinden elde edilen verileri işlemektedir. Mikrodenetleyici, sensörlerden aldığı ölçümleri *interrupt* temelli bir yapı ile değerlendirerek çevredeki herhangi bir engeli tespit ettiğinde uygun motor komutlarını APM 2.8 uçuş kontrol kartına iletmektedir. Quadcopter sistemine pilot müdahalesi gerekmeden, engellerden kaçınarak güvenli bir uçuş sağlar.

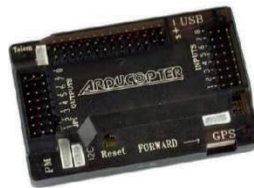
Donanım bileşenleri olarak, A2212 1000 KV fırçasız motorlar, 30 A ESC hız kontrol birimleri, 11.1 V 3S Li-Po batarya, Ublox NEO-M8N GPS modülü ve FlySky FS-i6 kumanda alıcı seti kullanılmıştır. Yazılım ArduPilot Mega altyapısı kullanılmış ve sensör verilerinin anlık işlenebilmesi için kesme tabanlı ölçüm yöntemi uygulanmaktadır.

2.1. Donanım Bileşenleri

Çalışmada ele alınan sistemin donanım altyapısı; uçuş kontrol birimleri, sensörler, güç yönetimi bileşenleri, haberleşme modülleri ve mikrodenetleyici katmanından oluşmaktadır. Kullanılan donanımların seçiminde, açık kaynak platformlarla uyumluluk, düşük maliyet temel alınmıştır.

2.1.1. Uçuş Kontrol Kartı (APM 2.8 ArduPilot Mega)

APM 2.8 uçuş kontrol kartı, Atmel ATmega2560 mikrodenetleyici tabanlı bir açık kaynak kontrol birimidir (ArduPilot Documentation, 2023). Aşağıda Şekil 1’de çalışmamızda kullanılmakta olan APM kart görseli verilmektedir.



Şekil 1. APM Uçuş Kartı (Robotistan, 2024)

2.1.2. Fırçasız Motor (A2212 1000 KV)

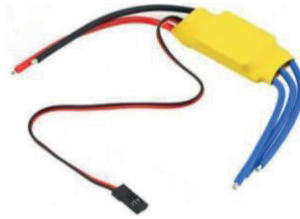
Fırçasız motorlar (BLDC), yüksek verimlilikleri ve uzun ömürleri nedeniyle hava araçlarında standart haline gelmiştir. Motorlar, quadcopter gövdesine *X* şeklinde yerleştirilmiş olup, bu düzen her bir motorun ürettiği momenti karşı motorun dengelemesine olanak tanıyarak kararlı bir uçuş performansı sağlamaktadır. Quadcopter tasarımında kullanılan pervaneler karbon fiber takviyeli naylon malzemeden üretilmektedir. Üretici teknik dokümanlarında da motorun tork ve hız karakteristiğiyle uyumlu olması nedeniyle bu boyutlandırma önermektedir (Rhydolabz Robotics, 2018). Quadcopter tasarımında kullanılan A2212 1000 KV motorun görseli Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. A2212 1000 KV Motor (Direnc.net, 2024)

2.1.3. Elektronik Hız Kontrol Ünitesi (ESC 30 A)

Motorlara iletilen gücü ve hızı düzenleyen bileşen ESC (Electronic Speed Controller) dir. 30 A BEC destekli elektronik hız kontrolcüler (ESC) çalışmamızda seçilmiştir. Kalibrasyon süreci ise Mission Planner yazılımı üzerinden “ESC Calibration” arayüzü kullanılarak gerçekleştirilmiştir (ArduPilot.org, 2023). Quadcopter tasarımında kullanılan 30 A ESC’nin görseli Şekil 3’te verilmektedir.



Şekil 3. 30A ESC (Robolink Market, 2025)

2.1.4. Kumanda ve Alıcı Sistemi (FlySky FS-i6)

Uçuş sırasında manuel kontrol veya acil durum müdahalesi için FlySky FS-i6 uzaktan kumanda sistemi tercih edilmektedir. Quadcopter tasarımında kullanılan APM kartı ile çalışmamızın kumanda iletişim kurulmaktadır. CH1–CH4 kanalları yön ve hız, CH5–CH6 ise uçuş modları için atanmıştır (ArduPilot.org, 2023). Quadcopter tasarımında kullanılan Flysky kumanda görseli Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. Flysky Kumanda (Robocombo, 2024)

2.1.5. GPS Modülü (Ublox NEO-M8N)

Ublox NEO-M8N modülü, yüksek hassasiyetli bir GNSS alıcı olup, GPS, GLONASS ve Galileo uydularını eşzamanlı takip edebilme özelliğine sahiptir. GPS modülü, UART protokolü üzerinden APM 2.8 kartına bağlanmıştır (ArduPilot.org, 2023). Quadcopter tasarımında kullanılan Ublox NEO-M8N GPS modül görseli Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 5. Ublox NEO-M8N GPS Modülü (Robotistan, 2024)

2.1.6. Ultrasonik Sensör (HC-SR04)

Engel algılama sisteminin temel bileşeni HC-SR04 ultrasonik mesafe sensörüdür. Bu sensör, 40 kHz frekansta ses dalgaları göndererek yansımayı algılar ve yankı süresine göre mesafe hesaplar. HC-SR04 ultrasonik mesafe sensörünün çalışma prensip formülü Denklem (1)’de verilmektedir.

$$d = \left(\frac{v \cdot t}{2} \right) \quad (1)$$

Denklem 1’de d ölçülen mesafeyi (metre), v ses hızını (343 m/s, 20 °C’de) ve t yankı süresini (saniye) temsil eder. 2–400 cm mesafe aralığında sensörler ölçüm yapabilmektedir. Sensörler yaklaşık ± 3 mm düzeyinde bir hassasiyetle çalışabilir (Kaur et al., 2015). Çalışmamızda dört adet sensör kullanılmıştır. Bunlar quadcopter ön, arka, sağ ve sol yönlerine yerleştirilmiş. Çevreyi 360° kapsamlı biçimde algılanması sağlamaktadırlar.



Şekil 6. HC-SR04 Ultrasonik Sensör (ElectronComponents, 2024)

Şekil 6’da çalışmamızda kullanılan HC-SR04 ultrasonik sensör görseli verilmektedir. Her sensör için ayrı interrupt atanmaktadır. Bu yöntem, pulseIn() komutuna kıyasla %30 daha hızlı tepki süresi sağlamıştır (Sze et al., 2022).

2.1.7. Mikrodenetleyici (Arduino Uno R3)

Arduino Uno, sistemin temel işlem birimi olarak görev yapmaktadır. ATmega328P mimarisi kullanılmaktadır. Bu kart, ultrasonik sensörlerden gelen mesafe verilerini işlemektedir. Daha sonra APM uçuş kontrol kartına iletilen uygun PWM sinyalleri üretmektedir (Arduino Uno Rev3, 2021). Arduino ile uçuş kontrolcüsü arasındaki senkronizasyon UART üzerinden sağlanmaktadır. Dört ultrasonik sensörden alınan ölçümler geliştirilen yazılım sayesinde sürekli izlenir. Mesafe 80 cm’nin altına herhangi bir yönde düştüğünde, o yöne karşılık gelen motorun hızı otomatik olarak azalır.

Arduino'nun tercih edilme nedeni, açık kaynak yapısının yanı sıra ArduPilot tabanlı sistemlerle, özellikle Mission Planner ile, uyumlu veri iletişimi sağlayabilmektedir (ArduPilot.org, 2023). Quadcopter tasarımında kullanılan Arduino Uno R3'ün görseli Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Arduino Uno R3 (Direnc.net, 2024)

2.1.8. Güç Kaynağı (Li-Po Batarya)

Sistemin enerji ihtiyacı, 11.1 V 3S 3300 mAh Li-Po batarya ile karşılanmıştır. Li-Po bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu ve düşük iç dirençleri sayesinde kısa süreli yüksek akım çekimlerine uygundur (Gens Ace / Tattu Battery Division, 2020)

Batarya, ESC'ler aracılığıyla motorlara doğrudan güç sağlar. 5V BEC çıkış üzerinden Arduino ve APM kartları beslenir. Uçuş süresi ortalama 25 dakikadır. Bataryanın nominal deşarj oranı 60 C'dir. Quadcopter tasarımında kullanılan Li-Po batarya görseli Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Li-Po Batarya (Cyphobi, 2025)

2.1.9. Gövde Yapısı (F450 Frame)

Sistemin mekanik iskeleti DJI F450 quadcopter Frame yapısı üzerine kurulmaktadır. Gövde 450 mm eksen açıklığına sahiptir. Dört karbon fiber kol ile merkez plakalardan meydana gelmektedir. quadcopter gövde malzemesi ABS ve kompozit karışımından oluşmaktadır. Bu da quadcopterin titreşim sönümlleme açısından olumludur. Çalışmamızda kullanılan F450 frame görseli Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. F450 Frame (Robocombo, 2025)

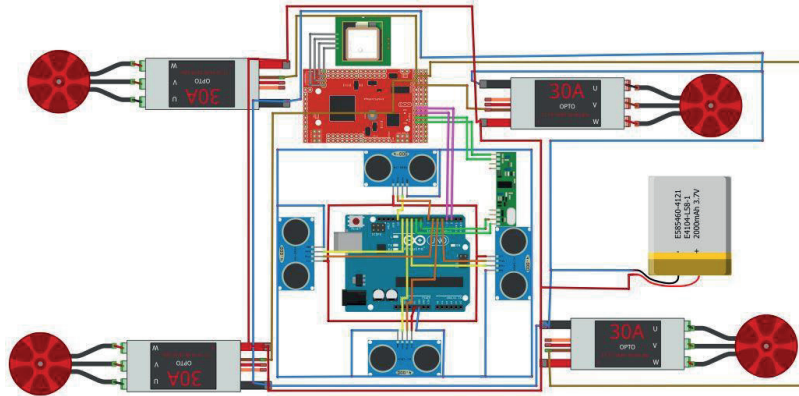
3. GERÇEKLEŞTİRİLEN MODELLEME, SİMÜLASYON VE DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

3.1. Elektronik Bağlantılar ve Sistem Mimarisi

Geliştirilen engelden kaçınma yetenekli quadcopter sisteminde elektronik bileşenlerin yerleşimi ve sensör katmanından uçuş kontrol kartına kadar hiyerarşik bir yapı içinde düzenlenmektedir. 5 V ile 12 V aralığında sabit gerilim seviyeleri ile sistemin kararlı çalışması sağlanır.

3.1.1. Genel Mimarinin Tanımı

Sistemin yapısı beş katmandan oluşmaktadır. Çevredeki engelleri algılayan ultrasonik sensörler algılama düzeyini oluşturur. Sensörlerden elde edilen verilerin işlenmesi Arduino Uno mikrodenetleyici tarafından yapılmaktadır. APM 2.8 kontrol kartı uçuşla ilgili karar mekanizmasını çalıştırmaktadır. ESC motor yapısı aracılığıyla verilen komutlar uygulanmaktadır. Tüm bu birimler 11.1 V Li-Po batarya ile beslenmektedir. Algılama katmanından gelen bilgiler mikrodenetleyici tarafından değerlendirilir. Belirlenen mesafe eşiğinin altındaki engeller tespit edildiğinde kontrol katmanına aktarılan komutlarla motor hızlarında gerekli düzenlemeler yapılır. Quadcopter tasarımında kullanılan genel mimari ilişkin görsel Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 10. Genel Mimari Görünümü

HC-SR04 ultrasonik sensörlerin TRIG ve ECHO pinleri sırasıyla Arduino’nun D6–D9 çıkış pinlerine ve D2–D5 giriş pinlerine bağlanmaktadır. Arduino, bu pinler üzerinden attachInterrupt() fonksiyonlarını kullanarak sensörlerden dönen yankı sinyallerini aynı anda okuyabilmektedir (Kaur et al., 2015). Okuma yaklaşımı geleneksel ardışık ölçüm yöntemine göre tepki süresini yaklaşık 15–20 ms düzeyine kadar düşebilmektedir. Her sensörden elde edilen mesafe ölçümleri bir dizi içinde saklanır. Daha sonra belirli aralıklarla da karar algoritmasına aktarılmaktadır.

3.1.2. Arduino – APM 2.8 Arayüzü

Arduino, engel algılama sonucunda oluşturduğu kontrol sinyallerini APM 2.8 uçuş kontrol kartının INPUT 1–2 girişlerine PWM formatında aktarır. Bu sinyaller APM üzerindeki PID tabanlı kontrolcü tarafından işlenerek motorlara gerekli dengeleme komutları üretmektedir. Kullanılan bağlantı yapısının 5V PWM seviyesinde olması nedeniyle ek bir seviye dönüştürücüye ihtiyaç duymamaktadır. Ayrıca Arduino’nun toprak hattı, APM’in GND hattıyla doğrudan birleştirilerek sistem içinde ortak bir referans noktası oluşturulmaktadır (EMAX Robotics, 2020). Mission Planner ara yüzünün görüntüsü Şekil 11’de verilmektedir.



Şekil 11. Mission Planner Arayüzü

3.1.3. ESC–Motor Bağlantısı

Her motor, kendisine bağlı ESC üzerinden kontrol edilmektedir. ESC'nin PWM sinyal hattı APM uçuş kontrol kartındaki MOTOR1 – MOTOR4 pinlerine bağlanmaktadır. Güç hattı (VCC) doğrudan Li-Po bataryadan beslenmektedir. 400 Hz PWM frekansında ESC birimleri çalışır. ESC üzerlerindeki BEC sayesinde hem Arduino hem de APM kartı için 5 V'luk bir besleme çıkışı sağlamaktadır (Robu Technologies, 2018).

3.1.4. Güç Dağıtım ve Topraklama Yapısı

Bataryadan sağlanan güç, PDB üzerinden ESC'lere paralel biçimde dağıtılmaktadır. Pozitif hat ESC'lerin kırmızı girişine bağlanırken, negatif hat ise tüm bileşenlerin ortak toprak hattına bağlanır. Topraklama hatları arasındaki olası direnç farklarını azaltmak amacıyla bağlantı düzeni yıldız topolojisi kullanılmaktadır (Holybro Technologies, 2020).

3.1.5. Haberleşme ve Kalibrasyon Bağlantıları

Sistemde kullanılan iletişim hatları belirli bir işlevsel düzen içinde yapılmıştır. USB–UART arayüzü üzerinden Arduino'nun programlanması ve Mission Planner yazılımına bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Telemetri verilerinin aktarımı için uçuş sırasında 433 MHz haberleşme modülü kullanılmaktadır. FlySky FS-i6 alıcısından gelen kontrol sinyalleri, PPM Encoder aracılığıyla tek hat halinde APM'e yönlendirilmekte ve böylece daha güvenilir bir kumanda iletişimi sağlanılmaktadır. GPS ve pusula modülleri, APM kartına I²C hattı üzerinden bağlanarak konum ve yönelim bilgilerinin senkronize edilmektedir. Sistemin tüm bağlantılar yapıldıktan sonra Mission Planner üzerinde ESC ve kumanda kalibrasyonları yapılmıştır.

3.1.6. Elektronik Mimari Özeti

Sistemde sensör verisi, Arduino tarafından okunup değerlendirildikten sonra uçuş kartına aktarılmıştır. Motor hızını APM, PID kontrol yapısıyla düzenlemektedir. Bu sayede veri akışı tek yönlü olması ve olası geri besleme döngülerini engellenmesi sağlanır.

3.2. Yazılım ve Sensör Testleri

Geliştirilen engelden kaçınma yeteneğine sahip quadcopter sisteminin yazılım mimarisi ile sensör verilerinin işleme süreci ve doğrulama aşamaları verilmektedir. Yazılım geliştirme sürecinde C/C++ tabanlı Arduino IDE ortamında kullanılmıştır. Sensör verilerinin kod yapısı modüler bir düzenle okumaktadır. quadcopter sisteminin yazılım mimarisi, karar mekanizmasının işletilmesi ve motor kontrolünün sağlanması bileşenlerinden oluşur. Buda sistemin kararlılığını artırırken gerçek zamanlı veri işleme performansının da sürdürülebilir olmasına sağlar (Arduino Uno Rev3, 2021).

3.2.1. Yazılım Mimarisinin Genel Yapısı

Programın yapısı temelde iki ana fonksiyona dayanmaktadır: *setup()* ve *loop()*. *setup()* bölümü, giriş-çıkış pinlerinin yapılandırıldığı, seri haberleşmenin başlatıldığı ve sensörlerin ilk kalibrasyonlarının gerçekleştirildiği aşamadır. Sistem çalışmaya başladıktan sonra döngüsel olarak işleyen *loop()* fonksiyonu devreye girmektedir. Burada sensörlerden alınan veriler sürekli olarak değerlendirilmektedir. PWM sinyalleri engel algılandığında uygun üretilerek motorlara iletilmektedir.

Sensör okumaları, Arduino'nun dijital pinleri üzerinden *interrupt* (kesme) tabanlı bir yöntemle yapılmaktadır. Bu yaklaşım, *pulseIn()* komutuna göre daha hızlı tepki verdiği gibi zamanlama hatalarına karşı da daha güvenilir bir çözüm sunmaktadır. Her bir sensör, *attachInterrupt()* fonksiyonu aracılığıyla bağımsız biçimde izlenmektedir ve dört sensör aynı anda ölçüm yapması imkân tanır. Şekil 12'de kaçınma algoritmasının temel işleyişini gösteren kod yapısı bir kısmı verilmektedir.

```
if (distanceFront < 80) {
    motorLeftSpeed = HIGH;
    motorRightSpeed = LOW;
}
else if (distanceRight < 80) {
    motorFrontSpeed = HIGH;
    motorBackSpeed = LOW;
}
else {
    maintainStableFlight();
}
```

Şekil 12. Kaçınma Algoritması

Bu algoritma, 80 cm güvenli mesafe eşiğini kullanarak engelin yönüne göre ters yöndeki motorları hızlandırmaktadır. Literatürde çalışmalarda tanımlanan mesafe tabanlı kaçınma algoritmalarıyla benzerlik gösterir (Gageik et al., 2015).

3.2.2. Sensör Kalibrasyonu ve Tekli Test

Sensörlerin doğruluk performansını belirlemek amacıyla her bir HC-SR04 modülü bağımsız olarak test edilmektedir. 10 cm ile 200 cm arasındaki farklı uzaklıklarda onar ölçüm alınmaktadır. Ortalama hata payı yaklaşık ± 2.6 mm olarak belirlenmektedir. Ölçüm sürecinde elde edilen veriler, Mission Planner yazılımı üzerinden eşzamanlı olarak izlenmektedir. Analiz aşamasında, ideal mesafe dt ile sensörün raporladığı mesafe dm arasındaki farktan türetilen hata fonksiyonu $e = |dt - dm|$ kullanılmıştır. Ortalama hata oranı denklemi Denklem (2)'de verilmektedir.

$$E_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |dt - dm| \quad (2)$$

Bu değer 5 mm'nin altında kaldığında sensör “kalibre edilmiş” olarak kabul edilmiştir (Sze et al., 2022).

3.2.3. Çoklu Sensör Testleri ve Veri Senkronizasyonu

Sensörler aynı anda çalıştırıldığında yankı sinyallerinin birbiriyle çakışma olasılığı değerlendirilmektedir. Önlem amacıyla her bir sensör için ölçüm süre 5 ms aralıklarla başlatılmaktadır. Bu durumda zaman çakışmaları ortadan kaldırılarak, okuma kararlılığı yaklaşık %98'e yükselir. Yapılan testler 1 metreye kadar olan ölçümlerde maksimum hata ± 4 mm belirlenmektedir. 3 metre uzaklıkta ise ± 9 mm olarak belirlenmiştir. Quadcopter sisteminde kullanılan dört sensörün kalibrasyon sonuçları Tablo 1'de verilmektedir. Bu sonuçlar engel tespiti için güvenli eşik mesafesinin (60–100 cm) belirlenmesinde temel alınmaktadır (Kaur et al., 2015).

Tablo 1. Mesafe Sensörü Kalibrasyon Sonuçları

Sensör Konumu	Ortalama Hata (mm)	Standart Sapma	Ölçüm Aralığı (cm)
Ön	2.6	0.7	5-200
Arka	3.1	0.9	5–180
Sağ	2.9	1.0	5–190
Sol	2.8	0.8	5–190

Son testte sistem, 80 cm mesafe altındaki engelleri %100 oranında algılamış, daha uzak mesafelerde doğruluk oranı %95 seviyesinde kaldığı belirlenmektedir.

3.3. Engelden Kaçınma Algoritması

quadcopterin çevresindeki engelleri algılayarak güvenli bir şekilde yön değiştirmesini sağlayan karar verme yapısını ele almaktadır. Geliştirilen engelden kaçınma algoritması ultrasonik sensörlerden elde edilen mesafe verileri dikkate alınmıştır. Hesaplama gereksiniminin düşük olması ve gerçek zamanlı çalışmaya uygunluğu nedeniyle bu yaklaşım mobil robotik uygulamalarda sıklıkla tercih edildiğini ifade etmektedirler (Shakhatreh et al., 2018).

3.3.1. Algoritmanın Temel Yapısı

Algoritmanın temel işlevi, drone çevresindeki herhangi bir nesneye 80 cm'den daha fazla yaklaşmasını önlemektir. Bu kapsamda ölçülen mesafe (d), HC-SR04 sensörünün gönderdiği ses dalgasının gidip dönme süresi (t) esas alınarak Denklem (1) yardımıyla hesaplanmaktadır. Hesaplama kullanılan ses hızı değeri $v=343$ m/s olarak kabul edilmektedir (Kaur et al., 2015). Drone'un ön, arka, sağ ve sol olmak üzere dört farklı yönünde yerleştirilen sensörlerden gelen veriler sırasıyla *distanceFront*, *distanceRight*, *distanceLeft* ve *distanceBack* değişkenlerinde toplanmaktadır. Daha sonra toplanan tüm bilgiler karar mekanizmasına gönderilir.

3.3.2. Karar Kuralları ve Motor Kontrolü

Algoritma, sensörlerden elde edilen ölçümlere dayanarak belirli karar kurallarını uygular. Ön taraftaki sensör 80 cm'nin altında bir mesafe algıladığında drone geriye doğru hareket edecek şekilde motor hızını düzenler. Ön motorların hızı azaltılarak arka motorların daha yüksek hızda çalıştırılmasına imkân sağlanır. Sağ taraftaki mesafe eşik değerin altına düştüğünde araç sola yönelir. Sol tarafta bir engel algılandığı zaman dron sağa doğru manevra yapmaktadır. Arka sensörler bir nesne tespit ettiğinde ise sistem ileri hareket moduna geçer. Engellerin bulunmadığı durumlarda ise araç mevcut dengesini koruyarak standart uçuş modunda kalmaktadır. Motorlara gönderilen PWM sinyalleri 1000 ile 2000 μ s aralığında değişim göstermektedir. Bu sinyaller APM üzerinde yer alan

PID kontrolcüsü tarafından işlenerek motorlara uygun hız komutları üretmektedirler. Motor kontrol algoritmasının temel karar yapısını gösteren kod bölümünün bir kısmı Şekil 13’te verilmektedir.

```
if (distanceFront < 80) {
    setPitch(-20); // arkaya kaç
}
else if (distanceRight < 80) {
    setRoll(-20); // sola kaç
}
else if (distanceLeft < 80) {
    setRoll(20); // sağa kaç
}
else if (distanceBack < 80) {
    setPitch(20); // öne kaç
}
else {
    maintainStableFlight();
}
```

Şekil 13. Motor Kontrol Algoritması

Literatürde “distance-based reactive control” olarak bilinen modelin uygulanmış hâlidir (Gageik et al., 2015). Sistemin gerçek zamanlı çalışmasına izin vermektedir. 20–30 ms tepki süresiyle kararlı bir kaçınma davranışı sergilemektedir (Sze et al., 2022).

3.3.3. Hata Toleransı ve Gürültü Filtreleme

Sensör gürültüsünü azaltmak amacıyla her ölçüm için 3 tekrar alınarak ortalaması kullanılmıştır. Denklem (3)’te ortalama denklemi formülü verilmiştir.

$$d_{avg} = \frac{d1+d2+d3}{3} \quad (3)$$

Bu yöntem, ölçüm hatasını yaklaşık %18 oranında azaltmaktadır. Engelin eğimli yüzeylere sahip olması durumunda yansıma zayıflayabileceğinden, 60 cm altında alınan değerler “kritik seviye” olarak işaretlenmiş ve daha hızlı tepki vermektedir (Kushwaha & Bojewar, 2019).

3.4. Simülasyon ve Modelleme

Bu bölüm, quadcopter sisteminin fiziksel tasarımının ve elektronik devre yapısının simülasyon ortamında doğrulanmasını kapsamaktadır. İki farklı yazılım tasarımın doğrulaması için çalışmamızda kullanılmıştır.

1. SolidWorks – 3D mekanik modelleme, ağırlık merkezi hesaplaması.
2. Proteus Design & Fritzing – elektronik bağlantıların devre simülasyonu.

3.4.1. SolidWorks ile Mekanik Modelleme

Quadcopterin mekanik tasarımı DJI F450 frame ölçülerini temel alan bir SolidWorks modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Quadcopterin mekanik tasarım yapısı Şekil 14’te verilmektedir.

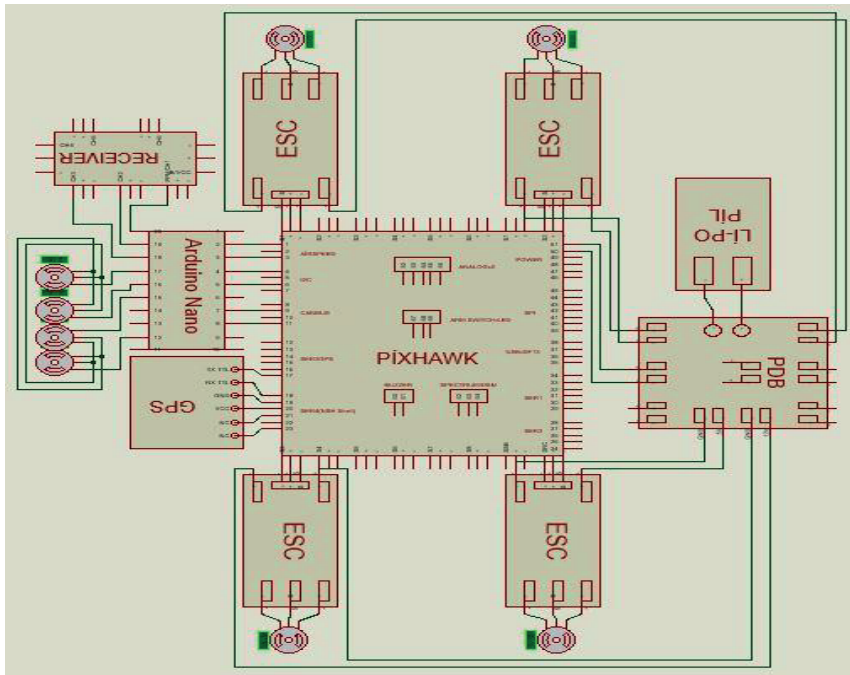


Şekil 14. Frame Yapısı

Yapılan simülasyon sonucunda, tüm bileşenler yerleştirildiğinde sistemin toplam kütlesi 1,72 kg, itki/ ağırlık oranı ise $> 2,1$ olarak hesaplanmıştır.

3.4.2. Elektronik Devre Simülasyonu

Elektronik devrenin doğrulanması aşamasında, tasarımın hem şematik düzeyde hem de gerçek devre düzeninde doğru çalıştığını göstermek amacıyla iki farklı araçtan yararlanılmıştır. Bunlar, Proteus Design Suite gerçek zamanlı sinyal akışı sağlamaktadır. Diğer PWM kontrolü ve güç dağıtımına ilişkin davranışların ayrıntılı olarak simüle edilmesine imkân sağlamaktadır. Şekil 15'te, Proteus ortamında Arduino Uno, HC-SR04 sensörleri, ESC sinyal hatları ve güç dağıtım devresi içeren model oluşturulmuş görseli verilmiştir.



Şekil 15. Proteus Devre Şeması

Test sürecinde ultrasonik sensörlerin TRIG-ECHO hatlarındaki zamanlama davranışı incelenmiş ve mikrodenetleyicinin algılayabileceği doğrulukta çalıştıkları doğrulanmıştır. Sensörlerin 40 kHz ultrasonik frekansta kararlı biçimde çalıştığı, yankı sürelerinin ise milisaniye düzeyinde tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür (Kaur et al., 2015).

Arduino'dan ESC birimlerine iletilen PWM sinyalleri 1000-2000 μ s aralığında olup olmadığını test etmektedir. Bu sinyalleri ESC modülleri hatasız şekilde analiz etmektedir. Quadcopterin mekanik tasarım sistemi 30 A'lık motor sürme gereksinimini doğru şekilde karşılayabildiğini göstermektedir.

Güç dağıtımı ve topraklama yapısı da Proteus ortamında değerlendirilmiştir. 11.1 V Li-Po bataryadan gelen hattın ESC ve Arduino arasında kararlı bir voltaj akışı sağlamaktadır.

Fritzing aracılığı ile Fiziksel devre düzeni oluşturulmuştur. Arduino Uno R3, dört yönlü HC-SR04 sensörleri, APM 2.8 uçuş kontrol kartı giriş pinleri, ESC sinyal hatları (M1–M4), 5 V BEC hattı ve GND dağıtım noktaları gerçek donanımdaki düzeni temel alarak modellenmektedir.

Proteus ve Fritzing'in birlikte kullanılması, sistemin hem sinyal akışı hem de kablolama yerleşimi açısından iyidir. Böylece hem teorik devre tasarımı hem de fiziksel montaj aşamalarında herhangi bir uyumsuzlukla karşılaşılmamaktadır.

3.5. Test Uygulaması ve Doğrulama

Geliştirilen engelden kaçınma sistemi, performans değerlendirmesi kapsamında ağırlıklı olarak kapalı alan koşullarında test edilmiştir. Bu tercih nedeni, kullanılan ultrasonik sensörlerin iç mekânda daha tutarlı sonuç verdiğinden dolayıdır. Ayrıca kapalı alanlar, rüzgâr, ışık yansımaları gibi dış etkenlerden minimum düzeyde etkilenir. Quadcopterin mekanik tasarım sistemi kapalı alan testlerinde ise hedeflenen kullanım senaryolarıyla da uygundur. Kaçınma algoritmaları genellikle depo ve raf arası hareket, bina içi keşif görevleri, fabrika içi otonom taşıyıcılarından oluşmaktadır. Çalışmamızda dar koridorlarda yön bulma gibi iç mekâna özgü uygulamalarda da kullanılmaktadır. Yapılan deneylerde sensör tepki süreleri, engel algılama hassasiyeti ve motor kontrol algoritmasının birlikte çalışmaktadır. Sensör tepki sürelerinin doğruluğu hem açık hem de kapalı ortamda ayrıntılı olarak incelenmektedir. Quadcopterin sisteminin açık alan testleri, sistemin temel prensiplerinin geniş hacimli ortamlarda da sağlıklı biçimde uygulanıp uygulanmayacağı için yapılmıştır.

3.5.1. Test Ortamı ve Uygulama Senaryoları

Testler iki farklı ortamda yürütülmüştür.

1. Kapalı Alan Testi (Laboratuvar)

- Engel olarak 30×60 cm köpük bloklar kullanılmıştır.
- Yerden 50–70 cm yükseklikte drone sabit hızda ilerlemiştir.
- Aydınlatma sabit tutulmuştur.



Şekil 16. Engelden Kaçan Drone Kapalı Alan Testi

2. Açık Alan Testi

- Yol kenarı ve açık arazi üzerinde uygulanmıştır.
- Rüzgâr hızı 0–6 km/h aralığında ölçülmektedir.
- Engel olarak plastik bidon, ahşap panel ve karton kutu kullanılmaktadır.

Quadcopterin mekanik sisteminin tasarlanmış hali ve test ortamlarındaki görüntüleri Şekil 16 ve Şekil 17’de verilmektedir.



Şekil 17. Engelden Kaçan Drone Fiziksel Yapısı ve Açık Alan Testi

3.5.2. Sensör Tepki Süresi ve Kaçınma Performansı

Testler sırasında ultrasonik sensörlerin genel olarak istikrarlı biçimde çalışmaktadır. Sensörün ön kısımdaki ortalama tepki süresi yaklaşık 23 ms dır. Sağ ve sol sensörlerde bu süre 27–30 ms aralığında değişmekte olduğu belirlenmiştir. 80 cm’nin altına düşen mesafeleri tüm sensörler güvenilir biçimde algılamaktadır.

Kapalı alanda sistemin kaçınma performansı %100 ölçülmüştür. Açık alanda ise %94 olarak ölçülmektedir. Açık alandaki sapmalar ultrasonik sinyalin 3 metreyi aşan mesafelerde zayıflamasından kaynaklanır. Eğimli yüzeylerde sensör geri bildiriminde yaklaşık %4 oranında gecikme göstermekte olduğu ölçülmüştür. Bu durum literatürde ultrasonik sensörlerin karakteristik davranışlarından biri olarak tanımlanmaktadır (Kushwaha & Bojewar, 2019).

3.5.3. Motor ve PWM Tepki Analizi

APM 2.8 uçuş kontrol kartı, Arduino tarafından üretilen PWM sinyallerine sorunsuz bir biçimde yanıt vererek motor hızlarını gerekli şekilde düzenlenmektedir. Sensörlerin ortalama tepki süresi yaklaşık olarak 25 ms dır. Hız değişimine ESC motor sisteminin verdiği yanıt 80–100 ms aralığındadır. Engelden kaçınmak için ihtiyaç duyulan toplam süre yaklaşık 120 ms dır. Ölçülen bu değer küçük ölçekli drone sınıfı için oldukça iyidir. 150–200 ms düzeyindeki literatürde yer alan standart kaçınma sürelerinden daha iyi bir performans göstermektedir (Gageik et al., 2015).

3.5.4. Enerji Tüketimi ve Uçuş Süresi

Test uçuşlarında ortalama güç tüketimi 8.4–10.2 A aralığında ölçülmüştür. 3S, 3300 mAh batarya ile beklenen uçuş süresi Denklem (4)’te hesaplanmaktadır.

$$t = \frac{3.3Ah}{9.2A} = 0.358 h \approx 21.5 dk \quad (4)$$

Gerçek uçuş denemelerinde ortalama süre 20–22 dakika olarak kaydedilmiştir. Sistemin engelden kaçınma algoritmasını gerçek ortam testlerinin başarıyla uyguladığını gösterir. Bu test sonuçları, tasarlanan sistemin düşük maliyetli otonom kaçınma senaryolarında kullanılabilir olduğunu kanıtlamaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ultrasonik sensörlere dayalı bir engelden kaçınma mekanizmasıyla donatılmış otonom bir drone geliştirilmiştir. Quadcopter sistemi, donanım ve yazılım bileşenleri bir araya getirilerek tasarlanmıştır. Quadcopter sistemi tasarımı, HC-SR04 sensörleri, Arduino Uno mikrodenetleyicisi, APM 2.8 uçuş kontrol kartı ve ESC motor bileşenleri kullanılmaktadır. Sistem sensörlerden alınan mesafe verileri gerçek zamanlı olarak işlemektedir. Mesafe belirlenen eşik değerin altındaki engeller için uygun kaçınma manevralarıyla başarı göstermiştir.

Yapılan testlerde özellikle kapalı alan koşullarında quadcopter sistemi kararlı çalışmaktadır. Motorların PWM sinyallerine verdiği yanıt, APM kartının PID tabanlı dengeleme yapısı beraber değerlendirilmektedir.

Ultrasonik sensörlerin GPS erişiminin olmadığı ortamlarda dahi kararlı çalışmakta olduğu belirlenmiştir. Bu sonuca göre, dronun depo içi taşımacılık, dar koridorlarda otonom uçuş, bina içi keşif gibi senaryolarda kullanılabilir olduğu söylenebilir.

Quadcopter sistemini, enerji tüketimine dair yapılan değerlendirmelerde sistemin uygulamaya dönük olarak kullanılabilir olduğu belirlenmiştir. Ortalama 9–10 A akım çekişiyle çalışan quadcopter, 3S 3300 mAh batarya ile yaklaşık 20–22 dakikalık uçuş sürelerine ulaşmıştır. Bu süre, engelden kaçınma işlevi aktifken gerçekleştirilecek görevler için yeterlidir.

Sonuç olarak geliştirilen Quadcopter, engelden kaçınma sistemi, düşük maliyetli, açık kaynaklı kontrol altyapısı sahiptir. Ayrıca gerçek zamanlı işleme yeteneği sayesinde, güvenilir ve uygulanabilir. Kapalı mekânlarda çalışma özellikle otonom uygulamalar için sistemin etkin biçimde kullanılabileceğini göstermektedir. Gelecek çalışmalarda ise ultrasonik sensörlere ek olarak LİDAR veya stereo kamera gibi daha hassas algılama yöntemlerinin sisteme entegre edilebilir.

Teşekkür:

Test uçuşlarının gerçekleştirilmesi ve sistem doğrulamasının yapılabilmesi için gerekli altyapıyı sağlayan Bilimtech Elektronik Yazılım ve Danışmanlık Şirketine, sunduğu çalışma alanı, donanım imkanları ve laboratuvar koşulları için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Arduino Uno Rev3. (2021). *Arduino Uno Rev3 – Technical Datasheet*. Arduino S.r.l. [ddocs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf](https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf)
- ArduPilot Documentation. (2023). *ESC Calibration – ArduPilot Documentation*. ArduPilot.Org. <https://ardupilot.org/copter/docs/esc-calibration.html>
- ArduPilot Documentation. (2023). *M8N GPS Module – ArduPilot Documentation*. ArduPilot.Org. <https://ardupilot.org/copter/docs/common-positioning-landing-page.html>
- ArduPilot Documentation. (2023). *RC Systems*. ArduPilot.Org. <https://ardupilot.org/copter/docs/common-rc-systems.html>
- ArduPilot Documentation Team. (2023). *APM 2.8 Hardware Overview*. ArduPilot.Org. <https://www.robotus.net/apm-28-ardupilot-ucus-kontrol-karti>
- ArduPilot.org. (2023). <https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-installation.html>. <https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-installation.html>
- Ashraf, M. M., Boudjit, S., Zeadally, S., Bahloul, N. E. H., & Bashir, N. (2024). Integrating Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Vehicular Ad-hoc NETworks (VANETs): Architectures, applications, opportunities. *Computer Networks*, 255(110873), 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110873>
- Chen, X., Wang, C., Zhao, M., Zhu, Z., Zhu, T., Gao, J., Wu, J., Han, J., Zhao, F., & Wang, K. (2025). Pesticide spray drift and risk assessment using unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer and traditional electric knapsack sprayer (EKS). *Science of the Total Environment*, 1005(180866), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180866>
- Cyphobi. (2025). *DXF Power 3S 11.1V 3300mAh 50C Li-Po Batarya*. Cyphobi RC Products. https://cyphobi.com/dxf-power-3s-11v-3300mah-50c-lipo-batarya?srltid=AfmBOorlWlbP88X_u-1QgmwkQ_jkHdzDpaXZVJoS2na5QJD_ey3UEVVbU
- Debnath, D., Vanegas, F., Sandino, J., Hawary, A. F., & Gonzalez, F. (2024). A Review of UAV Path-Planning Algorithms and Obstacle Avoidance Methods for Remote Sensing Applications. In *Remote Sensing* (Vol. 16, Issue 21). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/rs16214019>
- Direnc.net. (2024). *Arduino Uno R3 SMD*. Direnc.Net Elektronik. <https://www.direnc.net/arduino-uno-r3-smd>
- Direnc.net Teknik Ekibi. (2024). *A2212 Quadcopter 1000KV Fırçasız Motor – Ürün Sayfası*. Direnc.Net Elektronik. <https://www.direnc.net/a2212-quadcopter-1000kv-fircasiz-motor>
- Dlamini, C. M., Odindi, J., Matongera, T. N., & Mutanga, O. (2025). The use of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) remotely sensed data and biophysical variables to predict maize Above-Ground Biomass (AGB) in small-scale farming systems. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 39(101706), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101706>
- ElectronComponents. (2024). *HC-SR04 Ultrasonic Sensor Module – Ürün Sayfası*. ElectronComponents. https://www.electroncomponents.com/Ultrasonic-Sensor-Module?srltid=AfmBOoriFINyuddYyEb6lDriwWhtUoBZJ0EdA9poz53KHD_RiS8rWF7P
- EMAX Robotics. (2020). *APM 2.8 Flight Controller Setup & User Guide*. https://docs.emaxmodel.com/download/pdf/APM_2.8_Quadcopter_User_Guide.pdf

- Gageik, N., Benz, P., & Montenegro, S. (2015). Obstacle detection and collision avoidance for a UAV with complementary low-cost sensors. *IEEE Access*, 3, 599–609. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2432455>
- Gens Ace / Tattu Battery Division. (2020). <https://www.tattu.com/media/wysiwyg/tattu/datasheet/Tattu-3S>.
<https://www.tattu.com/media/wysiwyg/tattu/datasheet/Tattu-3S-3300mAh.pdf>
- Holybro Technologies. (2020). *Drone Power Distribution Board (12 V 5 V BEC) Datasheet*. https://holybro.com/datasheet/Power_Distribution_Board_Manual.pdf
- Kaur, M., Pal, J., & Tech Student, M. (2015). Distance Measurement of Object by Ultrasonic Sensor HC-SR04. In *IJSRD-International Journal for Scientific Research & Development* (Vol. 3). www.ijsrd.com
- Kim, T., & Lee, S. (2022). *A survey of collision avoidance systems for autonomous unmanned aerial vehicle*.
- Koçyiğit, K. (2025). Türkiye' nin İnsansız Hava Aracı (İHA) Teknolojisindeki Gelişimi : 1980 Sonrasından Günümüze Tarihsel Bir İnceleme. *Journal of Aerospace Science and Management*, 3(1), 42–63.
- Kushwaha, V., & Bojewar, S. (2019). A Survey of Ultrasonic Sensors and their Applications. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 8(11). <https://doi.org/10.17148/IJARCCCE.2019.81120>
- Mannan, A., Kahtan, H., Mustafa, M. B., Ahmad, R., Abdulhak, M., & Atiquzzaman, M. (2025). Mobility challenges and issues in unmanned aerial vehicle (UAV) path planning: A systematic review. *Computer Networks*, 273(111766), 1–34. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2025.111766>
- Merei, A., Mcheick, H., Ghaddar, A., & Rebaine, D. (2025). A Survey on Obstacle Detection and Avoidance Methods for UAVs. In *Drones* (Vol. 9, Issue 3). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/drones9030203>
- Pham, H., Smolka, S. A., Stoller, S. D., Phan, D., & Yang, J. (2015). *A Survey on Unmanned Aerial Vehicle Collision Avoidance Systems*. https://www.researchgate.net/publication/281427677_A_survey_on_unmanned_aerial_vehicle_collision_avoidance_systems/citations
- Popescu, D., Stoican, F., Stamatescu, G., Chenaru, O., & Ichim, L. (2018). A Survey of Collaborative UAV-WSN Systems for Efficient Monitoring. In *Sensors* (Vol. 18). www.mdpi.com/journal/sensors
- Rhydolabz Robotics. (2018). *A2212/13T 1000KV Brushless DC Motor Datasheet*. Rhydolabz Robotics. https://www.rhydolabz.com/documents/26/BLDC_A2212_13T.pdf?srsId=AfmBOop7U3byF-EAxiZpVKQxWoFjoIgzAgr5Gpky0M9VJ86uyRLp2QJ7
- Robocombo. (2024). *FlySky FS-i6X 2.4GHz 10 Kanallı Uzaktan Kumanda – Ürün Sayfası*. Robocombo. <https://www.robocombo.com/flysky-fs-i6x-2.4ghz-10-kanalli-uzaktan-kumanda-se-2799?srsId=AfmBOorw0E9czbaPTlc-CKW8PLZMOEGmH-yBgTh00O5ozVjXvrQHI73>
- Robocombo. (2025). *F450 Drone Frame*. Robocombo. https://www.robocombo.com/f450-drone-frame-inis-takimi-dahil-degildir-2529?srsId=AfmBOooPSniNolReZ7J5tFSSJNKncQ17wve_se3g3bq487iweBTPOzJ1rSk
- Robolink Market Teknik Ekibi. (2025). *30A ESC Fırçasız Motor Sürücü – Ürün Sayfası*. Robolink Market. <https://www.robolinkmarket.com/30a-esc-fircasiz-motor->

surucu?srsId=AfmBOoqoJwLFyWYALTeBHiLYMqVe4b4UUgVBsIj1gfCn_czHbIFjv07b

- Robotistan. (2024). *APM 2.6 ArduPilot Mega Uçuş Kontrol Kartı – Ürün Sayfası*. Robotistan Robotik Teknolojiler. <https://www.robotistan.com/apm26-ardupilot-mega26-ucus-kontrol-karti>
- Robotistan. (2024). *Pixhawk M8N / 8M GPS Modülü – Ürün Sayfası*. Robotistan Robotik Teknolojiler. <https://www.robotistan.com/pixhawk-m8n-8m-gps-modulu>
- Robu Technologies. (2018). *30A Electronic Speed Controller (ESC) User Manual*. <https://robu.in/wp-content/uploads/2018/01/30A-ESC-User-Manual.pdf>
- Shakhatreh, H., Sawalmeh, A., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N. S., Khreishah, A., & Guizani, M. (2018). *Unmanned Aerial Vehicles: A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
- Sze, E., Hindarto, D., Wirayasa, I. K. A., & Haryono, H. (2022). Performance Comparison of Ultrasonic Sensor Accuracy in Measuring Distance. *Sinkron*, 7(4), 2556–2562. <https://doi.org/10.33395/sinkron.v7i4.11883>
- Ullah, S., Hussain, K., Faheem, M., & Memon, N. A. (2025). Spectral reinforcement learning based dynamic routing for unmanned aerial vehicle (UAV) networks. *Computer Networks*, 273(111787), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2025.111787>