

Editör

Prof. Dr. Ertaç HÜRDOĞAN

gece
kitaplığı

**Mühendislik
Alanında
Uluslararası
Araştırmalar ve
Değerlendirmeler**

**Ekim
2025**

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • Eda Altunel

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Gece Kitaplığı

Birinci Basım / First Edition • © Ekim 2025

ISBN • 978-625-388-818-3

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Gece Kitaplığı'na aittir.

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

Gece Kitaplığı / Gece Kitaplığı

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

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 0312 384 80 40

web: www.gecekitapligi.com

e-mail: gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 42488

MÜHENDİSLİK ALANINDA
ULUSLARARASI
ARAŞTIRMALAR VE
DEĞERLENDİRMELER

EDİTÖR

PROF. DR. ERTAÇ HÜRDOĞAN

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

Kalsit Mineralinin (CaCO₃) Mikronize Boyutlara Öğütülmesinde Diskli Değirmen Performansının Araştırılması

Metin UÇURUM — 1

Bölüm 2

Küresel İklim Değişikliği Bilincinin Tarihsel Evrimi ve Uluslararası Politik Süreçlerin Şekillenmesi

Nazan YALÇIN ERİK — 15

Bölüm 3

Sektörler Arası Enerji Entegrasyonu ve Hidrojenin Rolü: Karbonsuzlaştırma Stratejileri Bağlamında Yeni Yaklaşımlar

Nazan YALÇIN ERİK — 41

Bölüm 4

6831 sayılı Orman Kanun'unun Ek 16.ncı Maddesi Kapsamında Orman Sınırları Dışına Çıkartma İşlemlerine 6 İlişkin yapılan Çalışmalar: Nurdağı (Hisar mahallesi) Örneği

Fazıl NACAR — 63

Bölüm 5

Havacılık Mühendisliğinde Bakım Stratejileri ve Kestirimci Bakımın Geleceği

Hüseyin ŞAHİN — 81

Bölüm 6

Otomobillerde Ergonomi

Gülşah ÖNER — 103

Bölüm 7

Geotekstillerin Sınıflandırılması ve Özellikleri

Suat CANOĞLU, Ayberk ŞİT — 117

Bölüm 8

Kentsel Katı Atık Yönetiminde Yapay Zekâ ve Nesnelerin İnterneti ile Yeni Yaklaşımlar: Atık Toplama, Ayrıştırma ve Geri Dönüşüm İçin Akıllı Çözümler

Gökhan Önder ERGÜVEN, Bahar İKİZOĞLU — 145

Bölüm 1

KALSİT MİNERALİNİN (CaCO₃) MİKRONİZE BOYUTLARA ÖĞÜTÜLMESİNDE DİSKLİ DEĞİRMEN PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Metin UÇURUM¹

¹ Prof. Dr., Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,

ORCID-0000-0002-0725-9344

1. GİRİŞ

Endüstriyel hammaddeler, metalik mineraller (demir, kurşun, çinko, bakır vb.) ve enerji kaynakları (doğal gaz, kömür, petrol, vb) dışındaki doğal yapıların hepsini içine alan geniş bir aralığa sahip doğal oluşumlardır. Sanayi alanında çok kullanılan endüstriyel minerallere bor, fosfat, kalsit dolomit, grafit, mermer, pomza, perlit, talk, kuvars, jips, kaolin, pomza gibi mineralleri örnek vermek mümkündür. Bunlardan bazıları ocaktan çıkarıldıklarında direk kullanılabilirler gibi bazıları ise triyaj sonrası kırma, öğütme gibi boyut küçültme işlemi sonrasında sanayide kendine yer bulmaktadır. Çok azı ise bir zenginleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra endüstrinin hizmetine sunulmaktadır. Sözü edilen endüstriyel minerallerden kalsit (CaCO_3), son yıllarda dolgu minerali olarak ve sanayi ürünlerine ekstra özellikler kazandırılması amacı ile başta plastik, boya, kâğıt gibi sanayi dalları olmak üzere birçok alanında kullanımı yıllar geçtikçe artış kaydeden bir mineraldir. Bu endüstriyel hammaddenin sözü edilen alanlarda kullanılabilmesi için bazı özelliklere sahip olması istenmektedir. Bu özellikleri fiziksel, kimyasal ve fiziko-kimyasal olarak üç ana başlıkta toplamak mümkündür. Fiziksel özelliklerden mikronize boyutlara ($d_{50}=100-1\ \mu\text{m}$) öğütülmüş olması ve yüksek beyazlık derecesine (≥ 95 L değeri) sahip olması başta gelmektedir. Kimyasal özellikler olarak ise düşük oranlarda ($<1\%$) Fe_2O_3 ve SiO_2 gibi empürüte bileşiklerin olması ve yüksek (≥ 98) CaCO_3 içeriğidir. İstenilen fiziko-kimyasal özellik ise özellikle plastikte dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda mikronize boyuta öğütüldükten sonra bir yağ asidi ile hidrofil (su sever) yüzey yapısının hidrofob (su sevmez) hale getirilmesidir.

Kalsitin çok ince boyutlara (mikronize) öğütülmesi dolgu maddesi olarak kullanılabilmesinin ön şartıdır. Bu tane boyutu d_{50} bazında 100 mikrondan 1 mikrona kadar değişen geniş bir aralığı kapsamaktadır. Kalsitin ocaktan üretildikten sonra bir triyaj işlemini müteakip belli bir boyuta kırılarak değirmenlerde öğütülüp bir havalı seperatör yardımıyla sınıflandırılarak istenilen mikronize boyutlarda ürün elde edilmektedir. Bu öğütme ve sınıflandırma işlemi sonrası mikronize kalsit; seramik, kâğıt, boya gibi sanayi alanlarında direkt kullanılabilirliği gibi bir yüzey modifikasyonu prosesi sonrasında yüzeyinin hidrofob hale getirilmesi ile birlikte plastik endüstrisinde kullanımları sağlanmaktadır. Kalsitin, tane boyutunun ve yüzey özelliklerinin değiştirilmesi neticesinde işletmeler sanayiye onlarca farklı ürün sunma alternatifleri yakalayabilmektedir. Mikronize kalsitin $d_{50}=50-100\ \mu\text{m}$ aralığındaki ürünleri seramik sanayinde kullanım imkânı bulurken, $40\ \mu\text{m}$ kadar geniş bir aralıktaki ürünler boya sanayisinde, ultra-fine ürünler olarak isimlendirilen çok ince ($d_{50}\leq 5\ \mu\text{m}$) boyutlu mikronize kalsit ise direkt veya kaplandıktan sonra plastik sanayinde dolgu minerali olarak kendisine yer bulmaktadır.

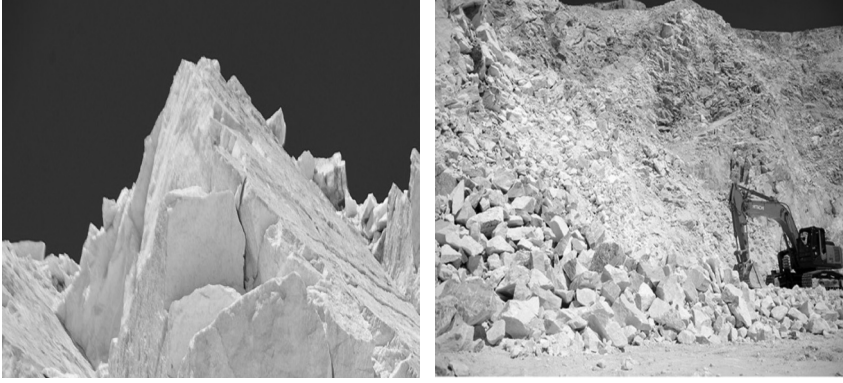
Endüstriyel ölçekte kalsitin mikronize boyutlarda öğütülmesinde kullanılan öğütme sistemlerine bakıldığında zaman, özellikle ülkemiz bazında ağırlıklı olarak konvansiyonel bilyeli değirmenlerin ağırlıkta olduğu görülmektedir. Son yıllarda ise karıştırmalı değirmenlerin (stirred mill) kalsitin çok ince boyutlara öğütmesinde tercih edilen bir diğer öğütme sistemi olduğuna şahit olmaktayız. Bunlarla birlikte titreşimli, valsli, yüksek basınçlı merdaneli ve jet değirmenler gibi teknolojiler de kendisine kalsit sektöründe kısmi yer bulmaktadır. Kalsitin mikronize boyutlara öğütülmesi kapsamında yatırım ve işletme maliyeti daha ucuz, pratik, yüksek verim ve kapasiteye sahip yeni öğütme teknolojilerin arayışı araştırmacıların gündeminden düşmemektedir. Bu kapsamda, diskli değirmenlerin kalsitin mikronize boyutlara öğütülmesinde kullanılabilirliğinin araştırılmasının faydalı olacağı değerlendirilerek söz konusu bu çalışmaya yer verilmiştir. Çalışma kapsamında, kalsit ve mikronize öğütme hakkında genel bilgiler verdikten sonra diskli değirmen tanıtılmış ve laboratuvar tipli bir diskli değirmende tüvanan kalsit cevherinin çeneli kırıcıdan geçirildikten sonra öğütülmeye tabi tutularak sonuçları paylaşılmıştır.

Prof. Dr., Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, OR-DID-0000-0002-0725-9344

2. KALSİT

Endüstriyel mineraller, son yıllarda kullanım alanları ve miktarları itibarıyla sanayide talebin önemli ölçüde artış kaydettiği doğal hammaddelerdir. Günlük yaşamımızda kullanılan yüzlerce madde arasında yer alan bu mineraller, inşaatlarda, endüstriyel tesislerde, gıdada ve daha sayısız alanda maliyetleri düşürmek amacıyla dolgu maddesi olarak, kimi zaman da ürünlere çeşitli özellikler kazandırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Küçük, 2010). Bu endüstriyel minerallerden birisi olan kalsit, kireçtaşının bileşeni olan, tane boyutları 1 mm ile 10 cm arasında değişen ve CaCO_3 kimyasal formülüne sahip yeryüzünde bol miktarda bulunan bir mineraldir. Söz konusu mineralin sertliği 3, özgül ağırlığı $2,7 \text{ g/cm}^3$, çözünürlüğü ise 25°C 'de $0,0015 \text{ g/cm}^3 \text{ H}_2\text{O}$ 'dur. Kolayca kırılır, camsı bir parlaklığa sahiptir. Çift kırılma önemli bir özelliği olup, saf olanlar bulundukları kaya ve minerallere bağlı olarak %56 CaO , %44 CO_2 ve az miktarda Mg, Fe, Si vb. elementler içerebilir (Şahin, 1978; Şahin, 1988). Ülkemiz kalsit cevheri açısından oldukça zengin olup bu oluşumlara Anadolu'nun hemen her bölgesinde rastlamak mümkündür. Kalsit cevherinin en önemli yaltaklanmalarından birisi Niğde bölgesi rezervleri olup (Şekil 1) bilinen toplam rezervler ise milyonlarca ton olarak ifade edilebilmektedir. Türkiye kalsit rezervlerinin en önemli özellikleri; yüksek CaCO_3 içeriği ve beyazlığı ile birlikte cevherinde empürite nite-

liğindeki oluşumlardan olan silis ve demirin çok düşük oranlarda olmasıdır (DPT, 2001).



Şekil 1. Ocakta tüvanan kalsit cevheri görünümü (www.mikrokal.com.tr)

Mikronize kalsitin temel kullanım alanının dolgu minerali olduğu sanayideki talebine bakıldığı zaman net bir şekilde görülmektedir. DIN 55943 standartlarına göre dolgu mineralleri tanım olarak kullanıldığı ortamda erimeyen-çözünmeyen hacim artışı sağlayan ve ürünün bazı mekanik, fiziksel ve optik özelliklerinde iyileşme sağlayan mikronize boyutlara sahip doğal ya da suni katkı maddeleri olarak tanımlanmaktadır. Aşağıda dolgu minerallerinin bazı özellikleri sıralanmıştır.

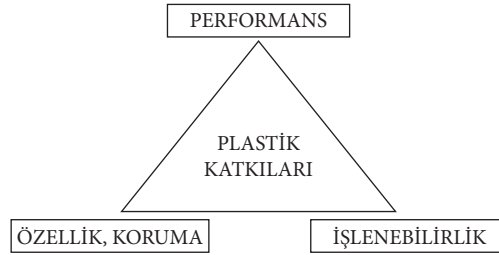
- kimyasal bir bileşime sahip
- belli bir tane şekli ve boyut dağılımı (PSD) olan
- yüksek özgül yüzey alanına sahip
- istenilen derecelerde beyazlık, parlaklık vb. renk özelliklerine sahip
- aşındırma derecesi düşük (Eren, 2019).

Kalsit mineralinin yukarıda verilen özelliklere ek olarak sanayide dolgu olarak kullanılabilmesi için belirli fiziksel, kimyasal ve fiziko-kimyasal özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bunlardan fiziksel özelliklerin başında mikronize boyutlara öğütülmüş olması gelmektedir. Bu değer genel olarak d_{50} bazında 1 mikrondan 100 mikrona kadar geniş bir aralığı ifade etmektedir. Fiziksel özelliklerden bir diğeri ise yüksek beyazlık derecesine sahip olması gerekliliği olup L^* bazında ≥ 95 olması istenmektedir. Kullanılacak kalsit ve ürünlerinde, istenilen kimyasal özelliklerin başında ise %95'den daha yüksek CaCO_3 içeriği ile birlikte Fe_2O_3 ve SiO_2 bileşiklerinin tenörlerinin ise %1'in altında olması gelmektedir. Mikronize kalsit ürünlerinde istenilen fiziko-kimyasal özellik özelliklerle

plastik sanayinde kullanımı durumunda mineral yüzey yapısının bir yağ asidi ile (genellikle stearik asit) kaplanmak sureti ile hidrofob (su sevmez) hale getirilmesidir.

Mikronize kalsitin bir yüzey modifikasyonu prosesi ile yüzeyinin hidrofob özellik kazandırılması ile birlikte plastik endüstrisinde dolgu minerali olarak daha fazla kullanımının yolu açılmıştır. Plastikte dolgu minerali kullanımı, plastik ürün maliyetlerini düşürmenin en yaygın yöntemlerinden biri olduğu bilimsel bir gerçektir. Organik menşeli polimerler ile inorganik kalsitin farklı yüzey gerilimlerine sahiptir olmaları sebebi ile proseslerde sorunlar oluşmaktadır. Bunun aşılması için ise mikronize kalsitin bir yağ asidi ile kaplanması yoluna gidilmektedir (Gema, 2009). Bu nedenle, mikronize kalsit işletmelerinin ana proseslerinden bir tanesi de yüzey modifikasyonu tesisleridir (Hao ve ark., 2007). Şekil 2 plastik endüstrisinde kullanılan katkılarının işlevlerini göstermektedir. Plastik endüstrisinde dolgu malzemesi olarak kullanılan kaplanmış mikronize kalsitin avantajlarından bazıları aşağıda sıralandığı gibidir;

- su sevmez (hidrofobik) yapı,
- küçük yüzey enerjisi,
- daha kolay dağılım (dispersiyon),
- yüksek homojenizasyon,
- kimyasal direnç,
- parlak ve pürüzsüz yüzeyler,
- az kalıp aşınması ve daha yüksek makine üretim verimliliği (Gema, 2009; www.hiscal.com.tr, Çayırılı, 2017).

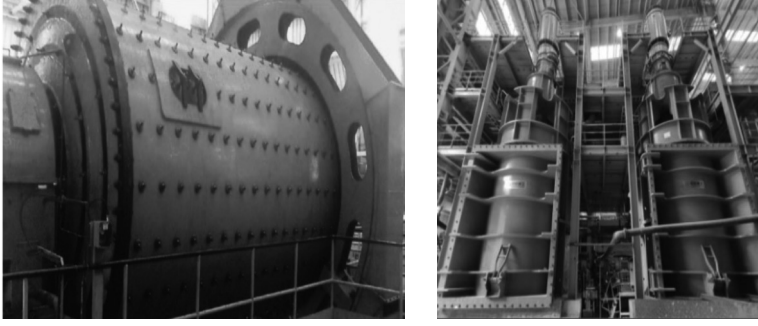


Şekil 2. Plastik katkılarının fonksiyonelliği (www.rdg.com.tr)

3. MİKRONİZE ÖĞÜTME

Uygulamada kalsiti mikronize boyutlara öğütülmesinde ağırlıklı olarak geleneksel bilyeli değirmenlerden ve karıştırılmalı (stirred mill) değirmenlerin yararlanılmaktadır (Şekil 3). Mikronize kalsit üretiminde özellikle ülkemizde bilyeli değirmenler daha fazla tercih edilmektedir. Bunun temel nedenleri arasında teknolojisinin iyi bilinmesi, yurt içinde üretilebilmesi ve üretim kapasitesinin yüksek olması sayılabilmektedir. Öğütme, yüksek enerji gerektiren bir işlem olmasından kaynaklı olarak kalsitin mikronize boyutlarda öğütülmesinde bu tüketim daha da artığı bilinmektedir. Bunun temel nedeni, geleneksel bilyeli değirmenlerin ince ve çok ince öğütme için uygun olmaması ve bilyeli değirmenlerin tecrübeyle dayalı olarak çalıştırılması ve çok ince partiküllerin sınıflandırılma verimlerinin düşük olmasıdır. Karıştırılmalı bilyeli değirmenler (stirred mill) birçok avantajı nedeniyle madencilikğin özellikle endüstriyel minerallerin mikronize öğütülmesi alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. İnce ve çok ince boyutlu minerallere olan talep artmaya devam ettikçe, karıştırılmalı bilyeli değirmenlerin diğer değirmenlere göre avantajlarından dolayı kullanımının mikronize sanayinde hızla artış kaydettiği görülmektedir. Geleneksel bilyeli değirmenlerde veya karıştırılmalı bilyeli değirmenlerde öğütülmüş kalsitin sınıflandırılması, kullanılan değirmenle birlikte kapalı devre çalışan mekanik bir seperatör aracılığı ile sağlanmaktadır (Mankosa, 1986; Stehr, 1988; Kwade, 1999; Toraman ve Sönmez, 2012; Uçurum, 2014; Çayırılı, 2017).

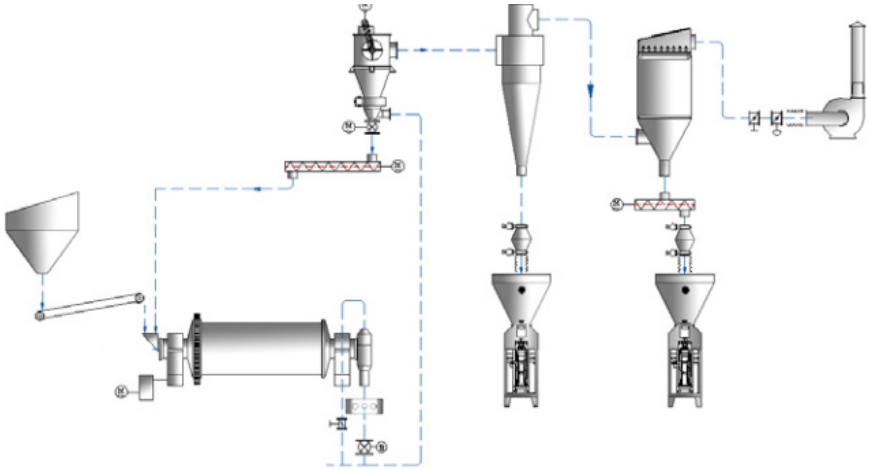
Kuru mikronize öğütme hattının tasarımında ve işletilmesinde en önemli ölçüt, değirmen ve sınıflandırıcının istenilen hedef tane boyutu üretim yeteneklerine uygunluğudur. Bu uyumu gözlemlerken öncelikle tesisin saat başına üretimine bakmak gerekir. Değirmen kapasitesi yüksek ve sınıflandırıcı kapasitesi düşük olduğu durumlarda sınıflandırıcı aşırı yüklenir ve verimsiz sınıflandırma yapmaya zorlanır. Daha sonra sisteme sınıflandırıcı eklenmesi birçok teknik ve mali zorluğu beraberinde getirir (Toraman ve Sönmez, 2012). Şekil 4’de bilyeli değirmen ile havalı sınıflandırıcının kapalı devre çalışma akım şeması verilmiştir. Öncelikle kalsit cevheri silodan bilyeli değirmene beslenerek öğütüldükten sonra havalı seperatörle verilmekte iri ürün (alt çıkış ürünü) değirmene geri beslenirken üst akım (ince ürün) bir siklona beslenmektedir. Siklonun üst ürünü filtreye verilmekte alt ürün ise siloya aktarılmaktadır.



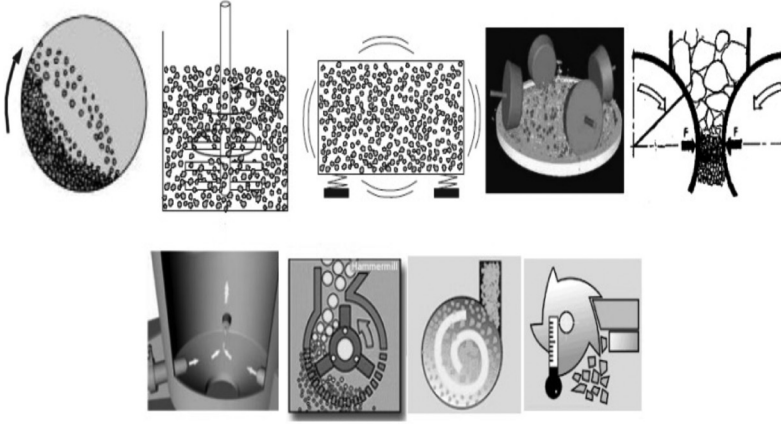
Şekil 3. Endüstriyel ölçekte bilyeli değirmen ve karıştırıcı değirmen (www.excelsource.co.in; www.citicheavyindustries.com)

4. DİSKLİ DEĞİRMEN

Öğütme proseslerinde kullanılmak üzere dizayn edilen değirmenler Şekil 5’de verilen öğütme metotları temel alınarak değişik şekil ve yapı-larda imal edilmektedirler. Madencilik sanayinde kullanılan değirmenler öğütme ortamı kullananlar (çubuklu, bilyeli ve titreşimli değirmen gibi) ve kullanmayanlar (otojen, valsli, yüksek basınçlı merdaneli, akışkan enerjili-jet, mekanik darbeli değirmenler gibi) olmak üzere iki ana kate-goriye ayrılmaktadır (Uçar, 2011).



Şekil 4. Bilyeli değirmende basit bir mikronize öğütme devresi (www.varlikma-kina.com)



Şekil 5. Öğütme metotları (Uçar, 2011)

Öğütme ortamına sahip olmayan öğütücülerden bir tanesi de diskli değirmenlerdir. İlk diskli değirmen Kingsland tarafından 1856'da icat edilmiştir. Değirmen, iki sabit plaka arasına yerleştirilmiş dönen bir diskten oluşmakta ve öğütme, sabit plakaların eksenel hareketiyle gerçekleşmektedir (Şekil 6). Daha gelişmiş bir öğütme aparatı Bertram diskli değirmenidir. Diskli değirmenler genellikle yatay olarak yapılandırılmakta olup böylece malzemenin öğütme alanında daha uzun süre kalması sağlanarak daha ince ürün eldesi söz konusu olabilmektedir. Modern diskli değirmenlerin ana avantajlarından biri hem ürün kalitesini artıran hem de iri boyutu azaltan yüksek hassasiyetleridir. Malzeme birbirlerine karşı dönen diskler tarafından öğütüldüğünden, disklerin birbirine olan mesafesi ayarlanmak sureti ile cevherin istenilen boyutlarda öğütülme imkânı sunmaktadır. Disk değirmeninin genel işlevselliği son 100 yıldır büyük ölçüde değişmedi, ancak kademeli değişiklikler zamanla onları yavaş yavaş iyileştirdi. Disk malzemeleri daha uzun ömürlü olacak şekilde imal edildi, daha fazla verimlilik için oluk desenleri geliştirildi, motorlar ve kontroller daha enerji verimli hale getirilmiştir. Söz konusu ekipmanın metal, cam, seramik gibi son derece sert veya aşındırıcı malzemeler için uygun olmayıp özellikle disklerde ileri derecede aşınmalara sebebiyet vermektedir (www.abmequipment.com).

Diskli değirmen de dönen ve sabit disk, numuneye basınç ve sürtünme uygulamak suretiyle öğütür. Malzeme öğütme haznesine girer girmez, disklerin kademeli dişleri önce malzemeyi ön ezmeye tabi tutarak ardından merkezkaç kuvvetinin yardımıyla malzemeyi ince öğütmenin gerçekleştiği disklerin dış bölgelerine taşır. Öğütülmüş malzeme, diskler arasındaki boşluktan geçerek bir alıcıya düşer. Diskli değirmenlerin bazı avantajları aşağıda verildiği gibidir;

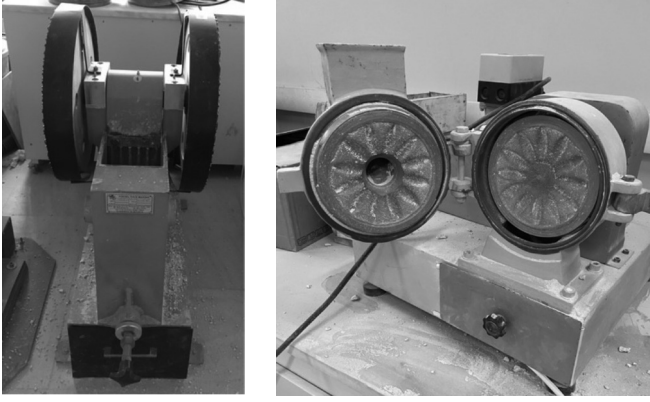
- kullanımı ve temizlemesi kolaydır,
- 20 mm'ye kadar numune besleme mümkündür,
- yüksek kapasitelidir,
- disk aralığı ayarı sürekli olarak yapılabilir,
- numunelerin hızlı öğütülmesi mümkündür,
- çeşitli malzemelerden yapılmış diskler mevcuttur ve aşınmış parçalar kolaylıkla değiştirilebilir ([www. caliskanlab.com](http://www.caliskanlab.com))



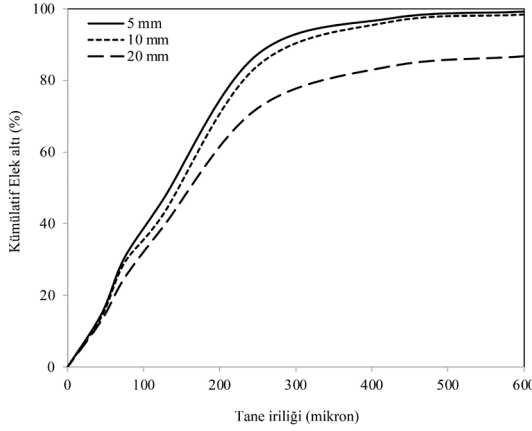
Şekil 6. Diskli değirmen (www.liyatest.com.tr)

5. UYGULAMA ÇALIŞMASI

Deneyde kullanılan kalsit cevheri Niğde bölgesinde faaliyet gösteren Nidaş A.Ş 'den temin edilmiş olup cevher %99,3 CaCO_3 içeriğine sahiptir (www.nidas.com.tr). Deneysel çalışmalarda laboratuvar tipli çeneli kırıcı ve diskli değirmen kullanılmıştır (Şekil 7). Kalsit cevheri öncelikle çeneli kırıcıda kırıldıktan sonra 5, 10 ve 20 mm'lik elekler kullanılarak -5,-10 ve -20 mm boyutlarında diskli değirmen için üç farklı besleme malı elde edilmiştir. Aynı şartlarda söz konusu besleme malları diskli değirmende öğütmeye tabi tutulduktan sonra elde edilen mikronize ürünler 600, 425, 250, 125, 63 ve 45 μm 'lik eleklerle yaş elemeye tabi tutularak sonuçlar kümülatif elek altı eğrisi şeklinde verilerek değerlendirilmiştir (Şekil 8).



Şekil 7. Deneylerde kullanılan çeneli kırıcı ve diskli değirmen



Şekil 8. Diskli değirmen ürünlerine ait kümülatif elek altı eğrileri

Diskli değirmen çıkış ürünlerinin boyut özelliklerinin ortaya konulmasında d_{50} ve d_{90} değerleri kullanılmıştır. Eş boyutluluk (üniform) özelliğinin hesaplanmasında ise OMYA firması tarafından geliştirilmiş olan iki farklı yaklaşımlarından yararlanılmıştır (Eşitlik 1, 2). Bu eşitliklerden 1'in sonucu '2'den küçük olduğu zaman eş boyutlu olarak kabul edilirken Eşitlik 2'nin sonucunun ise 40'dan büyük çıkması durumunda dik olarak yani üniform boyut dağılımının söz konusu olduğu kabul görmektedir (OMYA, 2000; Eren, 2019).

$$SF = d_{50} / d_{20} \quad (1)$$

$$SF = 100 \times d_{30} / d_{70} \quad (2)$$

DeneySEL çalışma sonrası üç farklı diskli değirmen ürünü için elde edilen boyut özellikleri ve SF hesaplama sonuçlar ise Tablo 2 ve 3 de sı-

rası ile sunulmuştur. -5, -10 ve -20 mm besleme mallarından elde edilen mikronize ürünlerin d_{50} değerleri sırası ile 135, 145 ve 160 μm ve d_{90} değerleri ise 260, 300 ve 600 μm 'dir. Bu ham veriler baz alındığında -5 ve -10 mm'lik besleme mallarının d_{50} ve d_{90} değerleri arasında çok büyük bir farkın olmadığı ortaya çıkmıştır. Bu sonuç diskli değirmen için bir avantaj olarak görülmüştür. Çünkü gerek ince besleme malı hazırlamasının (- 5 mm) daha maliyetli olması gerekse değirmen kapasitenin -10 mm besleme malı ile daha yüksek olacak olmasıdır. Aynı durum söz konusu iki besleme malının SF değerleri içinde geçerli olduğu Tablo 3'de görülmektedir. Bu bilgiler ışığında çalışılan bu üç farklı boyutu içinde diskli değirmen besleme malı boyutunun belirlenmesinde -10 mm'nin tercih edilebileceği anlaşılmaktadır.

Tablo 2. Diskli değirmen ürünlerine ait boyut ve değerleri

Besleme Malı	d_{20} (μm)	d_{30} (μm)	d_{50} (μm)	d_{70} (μm)	d_{80} (μm)	d_{90} (μm)
-5 mm	50	65	130	185	220	260
-10 mm	52	68	145	200	235	300
-20 mm	60	95	165	240	300	600

Tablo 3. Diskli değirmen ürünlerine SF değerleri

Besleme Malı	d_{50}/d_{20}	$100 \times d_{30}/d_{70}$
-5 mm	2,71	35,13
-10 mm	2,70	34,00
-20 mm	2,75	39,58

6. SONUÇLAR

Ülkemiz yüksek kaliteli kalsit rezervlerine (yüksek CaCO_3 içeriği ve beyazlık, düşük Fe_2O_3 ve SiO_2 oranı) sahip olması, bu mineralde dışa bağımlılığımızın söz konusu olmadığı anlamına gelmektedir. Buna ek olarak mikronize kalsit ihracatının da kayda değer oranlarda olması ülkemize katma değer sağlamaktadır. Kalsit mineralinin sanayide özellikle dolgu minerali olarak kullanılabilmesi için ocaktan kazanıldıktan sonra öğütme tesislerinde mikron mertebelerinde öğütülmesi gerekmektedir. Bu amaçla kalsit öğütme fabrikalarında başta konvansiyonel bilyeli de-

ğirmenler kullanılmakla birlikte son yıllarda karıştırmalı değirmenlerin de kullanıldığı gözlenmektedir. Ancak her iki öğütme makinesinin ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin yüksek olması mikronize kalsit üreticilerini zorlayan temel unsurlardır. Bu nedenle mikronize öğütme için daha ucuz ve kapasitesi yüksek teknoloji arayışları hız kazanmış durumdadır. Bu maksatla özellikle son elli yıl içerisinde gerek firmalar gerekse akademik camiada yeni yeni kırma+öğütme amaçlı birçok tasarım geliştirilerek bunlardan bir kısmı sanayide kendine yer bulmuş durumdadır. Bunlardan bir tanesi de diskli değirmenler olup iri besleme malı ile ince ürün elde etmeye fırsat tanıyan tasarımlardan birisidir.

Yapılan ön deneysel çalışma sonuçları irdelendiğinde söz konusu değirmenin bir havalı seperatörle kapalı devre çalıştırılması durumunda 100 μ m altı ürünün iri sayılacak bir besleme boyutu (1 cm) ile çok kalaylıkla elde edilebileceği açıkça görülmektedir. Burada dikkat çekici sonuçlardan bir tanesi de öğütülmüş ve sınıflandırılmış ürünlerde önemli bir özellik olarak kabul edilen üniform (eş boyutluluk) özelliğinin göstergesi olan SF (diklik faktörü) hesaplama sonuçlarının her üç besleme malı için kabul edilebilir değerlere çok yakın olduğudur. Diskli değirmen çıkışı olan ve sınıflandırma yapılmamış mikronize kalsit ürünlerinin $SF=d_{50}/d_{20}$ değerleri sırası ile 2,70-2,71 ve 2,75 olurken $SF=100 \times d_{30}/d_{70}$ için ise bu değer 35,13-34,00 ve 39,58 olduğu görülmektedir. $SF=d_{50}/d_{20}$ hesaplama sonuçlarının 2'den küçük olması durumu, $SF=100 \times d_{30}/d_{70}$ için ise 40'dan büyük olması durumu kabul görmekte olup söz konusu diskli değirmen ürünlerinin SF özelliklerinin istenilen değerlere yakın seyrettiğinin anlaşılmaktadır. Bundan çıkarılacak sonuç ise, diskli değirmenin öğütme mekanizmasının eş boyutlu ürün elde etme noktasında iyi bir öğütücü olduğu ve havalı bir seperatörle kapalı devre çalıştırılması durumunda ise ayırma veriminin daha yüksek ve daha az maliyetli olacağıdır. Bununla birlikte özellikle karıştırmalı bilyeli değirmen için besleme malı üretmek maksadı ile diskli değirmenin kullanılabileceği de elde edilen sonuçlar arasında olduğunun da görülmesinde fayda olacaktır.

KAYNAKLAR

- Çayırılı S. (2017). Kalsitin karıştırmalı bilyalı değirmende kuru mikronize öğütülmesinde bazı işlem parametrelerinin etkisinin araştırılması. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 6, Sayı 1, 166-173.
- DPT, (2001). Sekizinci beş yıllık kalkınma planı, madencilik raporu endüstriyel hammaddeler alt komisyonu genel endüstri mineralleri, (Asbest-Grafit-Kalsit-Fluorit-Titanyum Çalışma Grubu Raporu), 2618- ÖİK: 629, Ankara.
- Eren E. (2019). Kalsitin dikey karıştırmalı bilyalı değirmende kaplanması ve plastik kompozitte performansının araştırılması. Yüksek Lisans tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Niğde.
- Gema Elektro Plastik (2009), Kalsiyum karbonat (CaCO_3) dolgulu ürünler, Basım Yeri: Yunus Matbaacılık Ltd. Sti. İstanbul.
- Hao, D., Shou-Ci, L., Yan-Xi, D., Gao-xiang, D., (2007). Mechano-Activated surface modification of calcium carbonate in wet stirred mill and its properties. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 17, p.1100-110.
- Küçük, S. (2010). Kalsit madeninin ekonomik önemi, sektörün sorunları ve Niğde ili uygulaması. Y. Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Niğde.
- Kwade, A. (1999). Wet Comminution in stirred media mills-research and its practical application. Powder Technology, 105, 14-20.
- Mankosa, M.J., (1986). Investigation of operating conditions in stirred ball milling of coal. M.S. Thesis, Faculty of The Virginia, Polytechnic Institute And State University.
- Omya Development AG., (2000). Pigment composition for development in paper coating and coating composition and method employing the same. US patent, WO/2000/066510.
- Stehr, N., (1988). Recent Developments İn Stirred Ball Milling. International Journal of Mineral Processing, 22, 431-444.
- Şahin, N., (1978). Türkiye kalsit olanakları ve kalsitin endüstriyel hammadde olarak hazırlanması., Bitirme Çalışması, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Şahin, N., (1988). Kalsit hakkında bazı bilgiler. Madencilik Bülteni-Temmuz-Eylül, s.48-51.
- Uçar, A. (2011). Mineral endüstrisinde kullanılan değirmenlerin sınıflandırılması. 3. Maden Makinaları Sempozyumu, 05-06 Mayıs, 252-267 İzmir.
- Uçurum, M., (2014). Kaplı kalsit üretimi ve ürün özellikleri. MT Bilimsel Yer Altı Kaynakları Dergisi, 6, 110.
- Toraman, Ö.Y., Sönmez, A.S., (2012). Mikronize öğütmede havalı ayırıcıların tasarım değişkenleri. Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 1, Sayı 2.

- <http://www.mikrokal.com.tr/rezervler.php#prettyPhoto> (Erişim Tarihi 25.02.2025)
- <https://excelsource.co.in/ball-mill/> (Erişim Tarihi 25.02.2025)
- <https://citicheavyindustries.com/vertical-stirring-mill.html> (Erişim Tarihi 25.02.2025)
- <https://abmequipment.com/disc-mill-uses-pros-cons/> (Erişim Tarihi 25.02.2025)
- <https://www.liyatest.com.tr/urun/maden-ve-cevher-hazirlama-cihazlari/ogutucu/diskli-ogutucu-o-200-x-30-mm/> (Erişim Tarihi 25.02.2025)
- <https://www.nidas.com.tr/katalog/> (Erişim Tarihi 25.02.2025)
- <https://caliskanlab.com/diskli-ogutme-degirmeni-dp100?srsltid=AfmBOooV7sbdg0GgURjICh7elUKA1QX2-Mvm6qoGivJIjxTZtSMiM920> (Erişim Tarihi 22.08.2025)
- <https://www.hiscal.com.tr/tr/blog/kaplanmis-kalsitin-plastige-kazandirdiklari-nelerdir> (Erişim Tarihi 25.02.2025)
- <http://www.rdg.com.tr/pdf/plastik/plastik.malzemeler.pdf> (Erişim Tarihi 15.10.2014)
- <http://www.varlikmakina.com/kompletesisler> (Erişim Tarihi 15.02.2012)

Bölüm 2

KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BİLİNCİNİN TARİHSEL EVRİMİ VE ULUSLARARASI POLİTİK SÜREÇLERİN ŞEKİLLENMESİ

Nazan YALÇIN ERİK¹

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, ORCID: (0000-0001-7849-8660)

1. Giriş

İklim Değişikliğinin Toplumsal ve Politik Bir Fenomen Olarak Önemi

İklim değişikliği, 21. yüzyılın en çok boyutlu küresel sorunlarından biridir. Sadece bilimsel bir gerçeklik olmanın ötesinde, sosyolojik, ekonomik ve politik boyutları olan karmaşık bir olgudur (UNDP, 2020).

İklim değişikliği farkındalığının gelişimi, özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, doğrusal olmayan ve çok boyutlu bir seyir izlemiştir. Bu süreç, bilimsel keşiflerden politik eylemlere, medyanın rolünden sivil toplum hareketlerine kadar geniş bir yelpazede şekillenmiştir. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) ve Taraflar Konferansı (COP) süreçleri, bu artan farkındalığın en somut kurumsal yansımalarını oluşturmaktadır.

Bu çalışma, nitel bir araştırma yaklaşımıyla hazırlanmış tarihsel-analitik bir literatür incelemesidir. Amacı, küresel iklim değişikliğinin farkındalık, bilimsel gelişim ve uluslararası politika süreçleri açısından dönüşümünü bütüncül olarak ortaya koymaktır.

Bilimsel veriler ve politika belgeleri, Scopus ve Web of Science veritabanlarındaki hakemli makalelerden, IPCC Sentez Raporları'ndan (özellikle AR6, 2021–2023), UNEP Emisyon Açığı Raporları'ndan (2019–2023), OECD Yeşil Büyüme Göstergeleri'nden (2022), Dünya Bankası İklim Verileri'nden (2024) ve uluslararası anlaşma metinlerinden (Rio, Kyoto, Paris) derlenmiştir. Ayrıca, UNFCCC Sekreteryası'nın resmi kayıtlarından da yararlanılmıştır.

Literatür, aşağıdaki tarihsel dönemler şeklinde tematik bir analizle değerlendirilmiştir:

- Erken bilimsel farkındalık dönemi (19. yüzyıl–1960'lar),
- Çevre hareketlerinin yükselişi ve ilk politik yanıtlar (1970'ler–1980'ler),
- Küresel farkındalık ve uluslararası rejim oluşumu dönemi (1990'lar),
- Çok paydaşlı küresel eylem dönemi (2000'ler–günümüz).

Bu sınıflandırma, iklim değişikliğinin “bilimsel gözlemden uluslararası eyleme” olan tarihsel dönüşümünü açıklamayı amaçlamaktadır. Bulgular yalnızca kronolojik bir tanımlamayı aşmakta; iklim politikalarının başarısını ekonomik çıkar–çevre dengesi ve yönetim adaleti

perspektiflerinden analiz etmektedir. Böylece çalışma, iklim değişikliği farkındalığının evriminin arkasındaki sosyo-politik dinamikleri de ortaya koymaktadır.

2. Erken Bilimsel Farkındalık Dönemi: 19. Yüzyıl–1960’lar

2.1. Bilimsel Temellerin Oluşumu

İklim değişikliği kavramının bilimsel temelleri, 19. yüzyıla kadar uzanan derin tarihsel köklere sahiptir. Bu dönemin öncü çalışmaları, modern iklim biliminin teorik altyapısını oluşturmuştur.

Fransız matematikçi Joseph Fourier (1824), “Dünya ve Gezegenler Alanının Sıcaklığı Üzerine Genel Notlar” adlı çalışmasında, Dünya atmosferinin tuttuğu ısı miktarını hesaplamış ve böylece sera etkisi kavramının temellerini atmıştır (Fourier, 1824).

Daha sonra, İrlandalı fizikçi John Tyndall 1859’da bu teoriyi deneysel olarak doğrulamıştır. Tyndall, farklı gazların ısı emme kapasitelerini ölçerek, su buharı, karbondioksit ve metanın önemli miktarda ısıyı tutabileceğini keşfetmiştir (Tyndall, 1861).

İsveçli bilim insanı Svante Arrhenius, “Havadaki Karbonik Asidin Yer Sıcaklığı Üzerine Etkisi Üzerine” adlı öncü makalesinde tartışmaya niceliksel bir boyut kazandırmıştır (Arrhenius, 1896). Arrhenius, atmosferdeki karbondioksit konsantrasyonunun artışının küresel sıcaklıkları nasıl etkileyebileceğini matematiksel olarak tahmin etmiş ve Sanayi Devrimi sonrası fosil yakıt tüketimindeki artış nedeniyle CO₂ seviyeleri iki katına çıkarsa, küresel sıcaklıkların 5–6°C artabileceğini öngörmüştür.

Modern iklim modelleri, Arrhenius’un projeksiyonunun doğruluğunu büyük ölçüde doğrulamış ve bu çalışmanın günümüz iklim biliminin temel taşlarından biri olmaya devam ettiğini göstermiştir (IPCC, 2021).

2.2. Kamusal Algının Gelişimi

19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın başlarında, iklim değişikliği konusu sınırlı bir bilimsel topluluk dışında neredeyse hiç tartışılmamaktaydı. Kamu farkındalığının neredeyse yok denecek kadar az olmasının temel nedeni, konunun akademik dergilerle sınırlı kalması ve medyada neredeyse hiç yer almamasıdır (Weart, 2008). Bu dönemde Arrhenius’un teorileri, çoğunlukla spekülasyon olarak görülmüş ve bilim camiasında göz ardı edilmiştir; bunun başlıca nedeni, okyanusların karbonu çok daha fazla absorbe edebileceğine dair yaygın inançtır.

1930’larda İngiliz mühendis Guy Callendar’ın çalışmaları bir dönüm noktası olmuştur. Callendar, insan kaynaklı CO₂ emisyonlarının küresel ısınmaya yol açabileceğine dair ilk sistematik kanıtı sunmuştur. 1938 tarihli “Karbondiyoksit’in Yapay Üretimi ve İklim Üzerine Etkisi” adlı makalesinde, 19. yüzyılın sonlarından itibaren çeşitli bölgelerden alınan sıcaklık kayıtlarını analiz etmiş ve artan CO₂ konsantrasyonu ile yükselen küresel sıcaklıklar arasında istatistiksel bir ilişki kurmuştur (Callendar, 1938). Hesaplamalarına göre, Sanayi Devrimi’nden bu yana salınan CO₂’nin yaklaşık %75’i okyanuslar tarafından absorbe edilmiş, geri kalan ise gözlemlenen küresel sıcaklık artışına katkı sağlamıştır.

Ancak, Callendar’ın çığır açan bu çalışması büyük ölçüde göz ardı edilmiş ve bilim camiasında şüpheyle karşılanmıştır. Birçok bilim insanı, iklim değişikliklerini doğal döngülerle açıklamaya çalışmış, Callendar’ın verilerini yetersiz bulmuş ve iklimin insan etkisiyle bu kadar hızlı değişmeyeceğini savunmuştur (Fleming, 2007). Örneğin, İsveçli meteorolog Carl-Gustaf Rossby gibi etkili isimler, iklim değişikliğinin okyanus-atmosfer etkileşimleri gibi doğal süreçlerle açıklanabileceğini ileri sürmüştür.

O dönemdeki bilimsel direnç, teknolojik ilerlemeye duyulan sonsuz ihtiyaç, güven ve insanın doğaya zarar verme etkisinin genel olarak küçümsenmesine dayanmıştır. Ayrıca, 1940’larda gözlemlenen soğuma eğilimi, iklim değişikliği konusundaki bilimsel şüpheleri daha da derinleştirmiştir. Medyanın ilgisi minimal düzeyde kalmış; örneğin The Times, Callendar’ın teorisini sadece “ilginç bir hipotez” olarak nitelendirmiştir (Bowen, 2015).

3. Çevre Hareketlerinin Yükselişi ve İlk Politik Yanıtlar: 1970’ler–1980’ler

3.1. Küresel Bir Hareket Olarak Çevresel Farkındalığın Ortaya Çıkışı: 1960’ların Sonları–1970’ler

1960’ların sonları ve 1970’ler, çevre sorunlarının yerel kaygılardan küresel bir kitle hareketine ve ardından kurumsallaşmış bir diplomasi alanına evrildiği kritik bir dönemi temsil eder. Soğuk Savaş’ın nükleer tehdidi ve hızlı sanayileşmenin yol açtığı görünür ekolojik yıkım, bu dönemde kamuoyunun çevresel sorunlara karşı duyarlılığını önemli ölçüde artırmıştır.

Bu küresel uyanışın entelektüel ve toplumsal temelleri, Rachel Carson’un 1962 tarihli *Silent Spring* (Sessiz Bahar) adlı eseriyle atılmıştır. Carson, yalnızca pestisitlerin tehlikelerini göstermekle kalmamış, aynı zamanda insanlığın doğa üzerindeki kontrolsüz egemenliğini de sorgu-

layarak modern çevreciliğin bilimsel ve felsefi temellerini oluşturmuştur (Carson, 1962). Bunu takiben, büyüyen kitlesel hareket somut politik etkiye dönüşmüş ve 22 Nisan 1970'te ilk Dünya Günü kutlaması gerçekleştirilmiştir (Rome, 2013). Bu sosyal baskının doğrudan sonucu olarak, aynı yıl ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) kurulmuş ve Temiz Hava Yasası gibi temel yasalar yürürlüğe girmiştir; bu da çevre aktivizminin somut politika sonuçları doğurabileceğini göstermiştir.

Bu toplumsal dinamik entelektüel alanda da derin yankı bulmuştur. *The Limits to Growth* (Meadows ve ark., 1972) adlı öncü rapor, matematiksel modelleme kullanarak mevcut ekonomik büyüme ve nüfus artışı eğilimlerinin kaçınılmaz olarak gezegenin fiziksel sınırlarıyla çarpışacağını göstermiş ve sürdürülebilirlik kavramını küresel tartışmaların ön plana taşımıştır. İnsan faaliyetlerinin ekolojik sistemler üzerindeki birikimli baskılarını ele alarak, rapor, iklim değişikliği dahil küresel çevre krizleri konusundaki uyarı zincirinde kritik bir bilimsel bağlantı oluşturmuştur.

Aynı yıl, Stockholm'de düzenlenen Birleşmiş Milletler İnsan Çevresi Konferansı, çevresel kaygıları uluslararası diplomasının en yüksek seviyesine taşıyarak kalıcı bir kurumsal miras bırakmıştır. “*Sadece Bir Dünya*” sloganıyla toplanan konferans, çevresel sorunların ulusal sınırları aştığını ve küresel iş birliği gerektirdiğini vurgulamıştır. Konferansın en somut çıktısı, Birleşmiş Milletler Çevre Programı'nın (UNEP) kurulması olmuştur (UN, 1972).

Sonuç olarak, bu verimli dönem, çevre hareketinin bireysel kaygılardan kitlesel bir harekete ve ardından kalıcı bir küresel politika ve diplomasi alanına evrildiği tarihsel süreci temsil etmekte; günümüz iklim değişikliği mücadelesinin temel altyapısını oluşturmaktadır.

3.2. İlk Politik Yanıtlar: 1979–1987 Dönemi

1979 yılında, Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) tarafından Cenevre'de düzenlenen İlk Dünya İklim Konferansı, iklim değişikliğini küresel bir sorun olarak ele alan ilk büyük uluslararası toplantı olmuştur. Konferans, İnsan faaliyetlerinin iklim sistemi üzerinde önemli etkiler yaratabileceğine dair ilk resmi uyarıyı içeren Dünya İklim Bildirgesi'ni yayımlamıştır (WMO, 1979).

1980'ler boyunca bilimsel kanıtlar önemli ölçüde güçlenmiştir. 1985'te Avusturya'da düzenlenen Villach Konferansı, iklim değişikliği politikasında dönüm noktası olmuştur. Bu toplantıda, insan kaynaklı iklim değişikliğinin artık tespit edilebilir olduğu ve önümüzdeki yıllarda ciddi bir küresel sorun haline geleceği resmen kabul edilmiştir (Villach Konferan-

şı, 1985). Konferansın nihai bildirisi, hükümetleri sera gazı emisyonlarını sınırlayan küresel bir anlaşma için müzakerelere başlamaya çağırmıştır.

Aynı yıl, British Antarctic Survey tarafından yayımlanan ve Antarktika üzerinde ozon deliğinin keşfini ortaya koyan araştırma, insan faaliyetlerinin çevresel etkilerine ilişkin küresel endişeyi artırmıştır (Farman ve ark., 1985). Bu keşif, özellikle CFC'ler gibi insan yapımı kimyasalların gezegen ölçeğinde yıkıcı etkiler yaratabileceğine dair somut kanıt sağlamıştır.

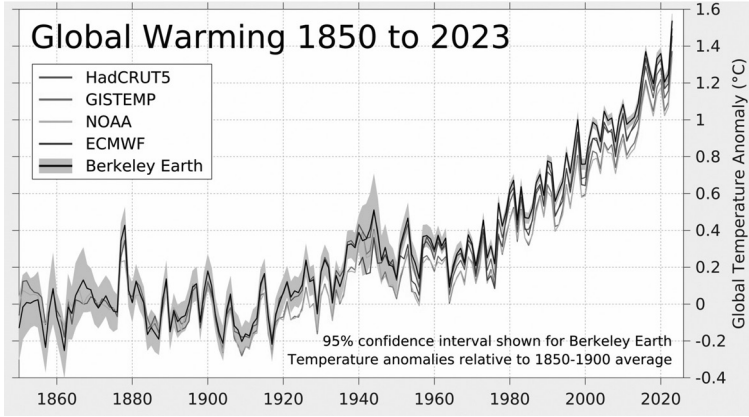
Bu bilimsel uyarılar, uluslararası topluluğun harekete geçmesini sağlamış ve 1985 Viyana Sözleşmesi ile 1987 Montreal Protokolü'nün imzalanmasına yol açmıştır; bunlar, başarılı ilk çok taraflı çevre anlaşmalarından ikisidir. Montreal Protokolü, ozon tabakasını incelten maddelerin kademeli olarak azaltılmasını öngörmüş ve neredeyse evrensel olarak onaylanan ilk çevre anlaşması olmuştur (UNEP, 1987).

NASA verilerine göre, 1988 yılı 1987'ye göre 0,34°C daha sıcak olmuştur; bu, dönemi için önemli bir sıcaklık artışıdır (NASA GISS verileri). Bu ölçülebilir değişim, medyanın ilgisini artırmış ve 1988 itibarıyla iklim değişikliği hem bilimsel hem de kamuoyunda somut bir gerçeklik haline gelmiştir.

4. Küresel Farkındalık ve Uluslararası İş Birliğinin Oluşumu: 1990'lar

4.1. Bilimsel Konsensüsün Oluşumu ve IPCC'nin Rolü

1990'lar, hem iklim değişikliği konusunda bilimsel konsensüsün sağlandığı hem de küresel kamu farkındalığının genişlemeye başladığı kritik bir on yılı temsil eder. Bu dönemin en önemli kurumsal gelişmesi, Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) ve Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) tarafından 1988 yılında kurulan Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) oluşturulmasıdır.



Şekil 1. 1850-2023 yılları arasında küresel ısınma sürecinin gelişim grafiği

IPCC'nin 1990'da yayımlanan Birinci Değerlendirme Raporu, insan faaliyetlerinin küresel iklim üzerinde önemli etkiler yarattığına dair güçlü kanıtlar sunmuştur (Şekil 1). Rapor, bilimsel verilerle, Sanayi Devrimi'nden bu yana atmosferik CO₂ konsantrasyonlarının %25 arttığını ve metan (CH₄) konsantrasyonlarının ise iki katına çıktığını göstermiştir (IPCC, 1990). Raporda, 21. yüzyılın sonuna kadar küresel sıcaklıkların 2°C ile 5°C arasında artabileceği öngörülmüştür.

4.1. İkinci Değerlendirme Raporu ve Bilimsel Konsensüsün Güçlenmesi

1995'te yayımlanan **İkinci Değerlendirme Raporu**, çok daha net bir ifade sunmuştur: "*Kanıtların dengesi, küresel iklim üzerinde kayda değer bir insan etkisinin olduğunu göstermektedir*" (IPCC, 1995). Bu sonuç, bilim camiasında önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilmekte ve insan faaliyetlerinin iklim sistemi üzerinde ölçülebilir etkiler yarattığının ilk resmi kabulünü temsil etmektedir.

1990'lar boyunca bu bulgular, giderek artan sayıda araştırma ile desteklenmiştir:

- **1993** tarihli bir çalışma, Grönland buz tabakasına ait çekirdek kayıtlarında sıcaklık ile atmosferik CO₂ konsantrasyonları arasında güçlü bir 160.000 yıllık korelasyon olduğunu göstermiştir.
- **1996** yılında Santer ve çalışma arkadaşlarının yaptığı analiz, gözlemlenen küresel sıcaklık artışının yalnızca doğal değişkenliklerle açıklanamayacağını, antropojenik sera gazı emisyonlarının belirgin katkı sağladığını istatistiksel olarak ortaya koymuştur (Santer ve ark., 1996).

- **1998** yılında Michael E. Mann, Raymond S. Bradley ve Malcolm K. Hughes tarafından yayımlanan ünlü “*hockey stick*” grafiği, son bin yılın sıcaklık eğilimlerini yeniden yapılandırarak 20. yüzyıldaki ısınmanın benzeri görülmemiş bir hızda gerçekleştiğini göstermiştir (Mann ve ark., 1998).

1999 yılında Mann, Bradley ve Hughes tarafından yürütülen paleoklimatik bir yeniden yapılandırma çalışması, son bin yılın sıcaklık eğilimini ortaya koymuş ve 20. yüzyılın son çeyreğinde sıcaklık artış hızının önceki bin yılın hiçbir döneminde görülmediğini göstermiştir (Mann ve ark., 1999).

Bu dönemde ayrıca, atmosferik CO₂ ve metan konsantrasyonlarının Sanayi Devrimi sonrası hızla arttığını gösteren buz çekirdek analizleri ile okyanus sıcaklıklarında ve deniz seviyesi yükselmesinde kaydedilen artışlar, IPCC’nin değerlendirmelerini daha da güçlendirmiştir. Böylece 1990’lar, iklim değişikliğine ilişkin bilimsel belirsizliğin büyük ölçüde ortadan kalktığı ve insan etkisinin artık niteliksel değil, niceliksel olarak da ölçülebildiği bir dönem olarak literatürde yerini almıştır.

IPCC’nin bu dönemdeki çalışmaları, 1992 Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) ve 1997 Kyoto Protokolü gibi büyük uluslararası anlaşmalar için bilimsel temeli sağlamıştır. 1995’te “insan etkisi” vurgusu, Kyoto Protokolü’ne giden müzakerelerin şekillenmesinde belirleyici bir rol oynamıştır.

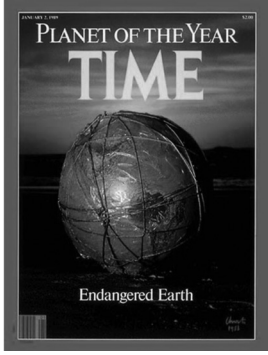
1990’ların sonlarına gelindiğinde, hakemli bilimsel makalelerin %80’den fazlası, insan kaynaklı iklim değişikliği konusundaki uzlaşırı vurgulamıştır. Bu on yıl, iklim değişikliğinin teorik bir kavram olmayı bıraktığı ve kanıta dayalı bilimsel bir gerçeklik olarak tanındığı dönem olarak tarihsel öneme sahiptir.

4.2. Medyanın Rolü ve Bilimsel Gerçeklerin İletilmesi

1988 yılı, iklim değişikliğine medyanın ilgisinin zirveye ulaştığı ve bilimsel bulguların geniş kamuoyuna aktarıldığı kritik bir dönüm noktasıdır. 23 Haziran 1988’de NASA Goddard Uzay Çalışmaları Enstitüsü Direktörü Dr. James Hansen, ABD Senatosu Enerji ve Doğal Kaynaklar Komitesi önünde tarihi bir tanıklık yapmış ve bilim camiası ile kamuoyu arasındaki boşluğu doldurmuştur.

“Sera etkisinin artık var olduğunu söyleme zamanı geldi. Küresel ısınma sinyali artık o kadar açıktır ki, bunu %99 güvenle insan etkisine atfedebiliriz.” (Hansen, 1988).

Hansen'in bu ifadesi, aynı yıl yaşanan şiddetli bir sıcak hava dalgası ve kuraklıkla çakışmış; 1988 yazı, o zamana kadarki en sıcak yaz olarak kayıtlara geçmiştir.



Bu olaylar nedeniyle medya ilgisi benzeri görülmemiş seviyelere ulaşmıştır. *The New York Times*'ta "Küresel Isınma: İnsan Etkisi Onaylandı" (Shabecoff, 1988) ve *Washington Post*'ta "Dünya Isınıyor, Uzmanlar Uyarıyor" başlıkları, iklim değişikliğinin ilk kez bu denli geniş kapsamlı bir şekilde ana akım medyanın ilgisini çektiğini göstermiştir. İçerik analizleri, 1988 yılında önde gelen ABD gazetelerinde iklim değişikliği konulu makale sayısının bir önceki yıla göre %350 arttığını ortaya koy-

muştur (Ungar, 1992).

Bu medya patlamasının arkasındaki bilimsel gelişmeler şunlardır:

- 1985 Viyana Sözleşmesi
- 1987 Montreal Protokolü
- 1988 IPCC'nin kurulması
- 1988 Toronto Değişen Atmosfer Konferansı

Hansen'in en büyük etkisi, iklim değişikliğini soyut bir bilimsel tartışmadan somut bir politika sorununa dönüştürmesidir. Bu değişim, *Time Magazine*'in 1989 tarihli kapağı "Yılın Gezegeni: Tehlikedeki Dünya" ile pekişmiş ve küresel kriz farkındalığını simgelemiştir.

4.3. Uluslararası Müzakerelerin Başlangıcı ve Rio Zirvesi'nin Dönüm Noktası

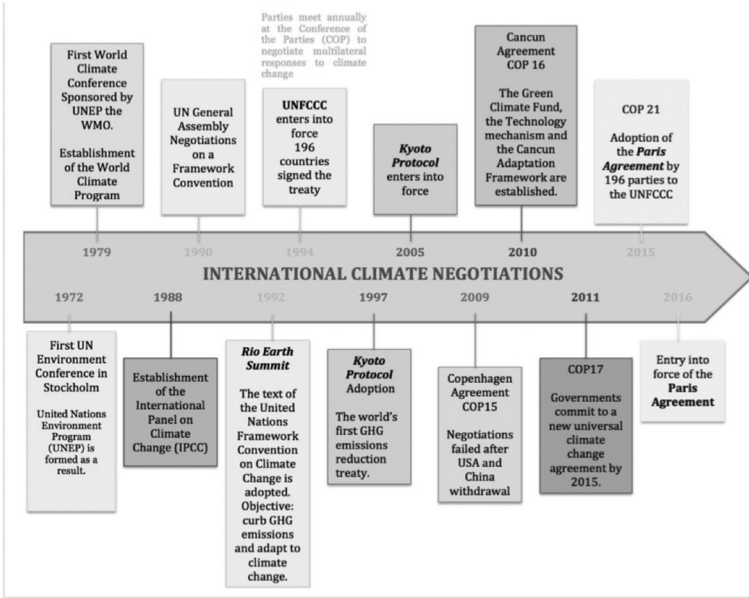
1992 Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı (UNCED)—genellikle Rio Dünya Zirvesi olarak bilinir—iklim değişikliği konusunda küresel iş birliğinin bilimsel kanıtlara dayandırıldığı tarihi bir dönüm noktasıdır. Zirveye 172 ülkeden temsilciler katılmış ve çevre koruma ile sürdürülebilir kalkınma arasındaki kritik bağlantıyı vurgulamıştır.

Zirvenin en somut çıktısı, 1994'te yürürlüğe giren Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin (UNFCCC) kabul edilmesidir. Sözleşme, "atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarını, iklim sistemine tehlikeli antropojenik müdahaleyi önleyecek bir seviyede istikrara kavuşturmayı" nihai hedef olarak belirlemiştir (UNFCCC, 1992, Madde 2). Bu

hedef, IPCC'nin 1990 Birinci Değerlendirme Raporu tarafından oluşturulan bilimsel temele dayanmaktadır.

Sözleşme'nin temel ilkelerinden biri olan “*ortak fakat farklılaşan sorumluluklar*”, emisyonlar ve ekonomik kapasiteler arasındaki tarihsel farkları kabul ederek ülkeler arasında adil yük paylaşımını sağlamayı amaçlamıştır. Buna göre:

- **Ek I Ülkeleri:** 41 sanayileşmiş ülke ve Avrupa Birliği'nden oluşur; 2000 yılına kadar emisyonlarını 1990 seviyelerine düşürmeyi taahhüt etmiştir.
- **Ek II Ülkeleri:** Ek I'deki 24 gelişmiş ülke, gelişmekte olan ülkelere mali ve teknolojik yardım sağlamayı yükümlenmiştir.



Şekil 2. Uluslararası iklim anlaşmalarının tarihsel gelişim süreci ve bazı önemli olaylar

- **Ek Dışı Ülkeler:** 154 gelişmekte olan ülkeden oluşur; ekonomik büyümeyi sürdürürken çevresel kaygıları kalkınma önceliklerine entegre etmeyi taahhüt etmiştir.

5.2. Yeni Aktörlerin Dahil Edilmesi

2000'li yılların başıyla birlikte iklim değişikliği eylemleri, yalnızca hükümetler arası müzakerelerin ötesine geçerek çok paydaşlı küresel bir harekete dönüşmüştür. Bu dönemde sivil toplum örgütleri, özel sektör, yerel yönetimler, akademik topluluk ve uluslararası finans kuruluşları

iklim değişikliğiyle mücadelede giderek daha aktif roller üstlenmeye başlamıştır.

Özel sektörde, 2000 yılında kurulan *Carbon Disclosure Project (CDP)* gibi girişimler, şirketleri iklimle ilgili risklerini raporlamaya teşvik etmiştir. 2005'te başlatılan *Clean Energy Investment Initiative (CERES)* ise kurumsal yatırımcıları sürdürülebilir finans alanında harekete geçirmiştir.

Yerel Yönetimler düzeyinde, 2005'te kurulan *C40 Cities Climate Leadership Group*, büyük küresel şehirlerin yerel iklim eylemlerini koordine etmeye başlaması açısından bir dönüm noktası olmuştur. Akademik alanda ise iklim değişikliği araştırmaları disiplinler arası hale gelmiş ve iklim ekonomisi, iklim psikolojisi ve iklim etiği gibi yeni alanlar ortaya çıkmıştır (Ay & Yalçın Erik, 2020; Ay & Yalçın Erik, 2025).

Kamu farkındalığı da önemli ölçüde artmıştır. Al Gore'un 2006 tarihli belgeseli "*An Inconvenient Truth*", iklim bilimini halka ulaştırmada çığır açıcı bir rol oynamış ve ABD'de o yıl iklim değişikliği konulu medya haberlerinde %50 artış sağlamıştır. Benzer şekilde, 2007'de düzenlenen *Live Earth* konserleri iki milyardan fazla izleyiciye ulaşarak iklim aktivizmini popüler kültürle birleştirmiştir.

Bu çok paydaşlı katılım, iklim değişikliği yönetimini devlet merkezli bir diplomasi anlayışından küresel bir sosyal harekete dönüştürmüş ve Paris Anlaşması'nın temellerini atmıştır.

5.3. Paris Anlaşması: Diplomatik Başarı, Uluslararası Tepkiler ve Sosyal Etki

Son elli yılda uluslararası toplum, küresel ısınmayı sınırlamak ve çevresel farkındalığı artırmak amacıyla çok sayıda anlaşma ve konferans geliştirmiştir (Şekil 2).

İlk dönüm noktaları arasında 1979'daki İlk Dünya İklim Konferansı ve 1987'de ozon tabakasının korunmasına yönelik Montreal Protokolü yer almaktadır. 1988'de Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) kurulması, küresel iklim politikası için bilimsel temeli sağlamıştır. Ardından, 1992 Rio Dünya Zirvesi, BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) kapsamında uluslararası iklim müzakerelerini kurumsallaştırmış; 1997 Kyoto Protokolü ise emisyon azaltım hedefleri için ilk yasal olarak bağlayıcı çerçeveyi oluşturmuştur.

Küresel iklim müzakerelerinde en güncel ve önemli dönüm noktası, 12 Aralık 2015'te COP21 kapsamında 196 ülke tarafından kabul edilen ve 4 Kasım 2016'da yürürlüğe giren Paris Anlaşması'dır. Anlaşmanın ama-

cı, küresel ortalama sıcaklık artışını sanayi öncesi seviyelerin 2°C üzerinde sınırlamak ve artırımını 1,5°C ile sınırlandırma çabası göstermektedir (UNFCCC, 2015).

Kyoto Protokolü'nün aksine, yalnızca Ek I (gelişmiş) ülkelere yasal olarak bağlayıcı hedefler dayatan Paris Anlaşması, tüm tarafların sunduğu *Ulusal Katkı Beyanları* (NDC) temelinde evrensel ve esnek bir çerçeve sunmuştur. Bu yaklaşım, ülkelerin yükümlülüklerini kendi kapasite ve önceliklerine göre tanımlamalarına imkân vererek merkezi veya zorlayıcı mekanizmalardan uzaklaşmayı sağlamıştır (Falkner, 2016).

Paris Anlaşması'nın 2.2. maddesi bu esnekliği açıkça yansıtmaktadır (UNFCCC, 2015):

“Bu Anlaşma, farklı ulusal koşullar dikkate alınarak, adalet ve ortak fakat farklılaşan sorumluluklar ile ilgili yeteneklerin ilkesini yansıtacak şekilde uygulanacaktır.”

Tarihsel emisyonlar ve mevcut eşitsizlikleri kabul ederek, anlaşma Çin, Hindistan ve Brezilya gibi yükselen ekonomileri küresel çerçeveye dahil ederken, gelişmiş ülkelere karşı da kapsayıcılığı sürdürmüştür (Falkner, 2016). Ayrıca Paris Anlaşması, şehirler, şirketler, finans kurumları ve sivil toplum örgütlerini ulusal ve küresel iklim hedefleriyle uyumlu hareket etmeye teşvik ederek ulusötesi iklim yönetişimi için bir katalizör görevi görmüştür (Jordan ve ark., 2018).

Eleştiriler ve Yapısal Eksiklikler

Paris Anlaşması'na yöneltilen başlıca eleştirilerden biri, Ulusal Katkı Beyanları'nın (NDC'ler) gönüllü niteliğidir. Yasal olarak bağlayıcı emisyon hedefleri veya yaptırım mekanizmaları bulunmadığından, ülkeler yükümlülüklerini geciktirme veya yerine getirmeme özgürlüğüne sahiptir (Roberts & Weikmans, 2017). Mevcut tüm NDC'ler tam olarak uygulanmış olsaydı bile, 2100'e kadar küresel sıcaklık artışının yaklaşık 2,5–2,9°C'ye ulaşması öngörülmektedir; bu, 1,5°C hedefinin oldukça üzerindedir (Climate Action Tracker, 2024).

Ayrıca, kayıp ve zarar finansmanı ilk anlaşmada anlamlı biçimde ele alınmamış; ancak COP27 gibi son konferanslarda *Loss and Damage Fund* kurulmasıyla ilerleme sağlanmıştır. Gelişmiş ülkelerden gelişmekte olan ülkelere iklim finansmanının yavaş aktarılması, eşitlik ve iyi niyet konularında hâlâ endişe yaratmaktadır (Roberts & Weikmans, 2017).

Buna karşın, Paris Anlaşması'nın en önemli sorunu, küresel emisyonların hâlâ artıyor olmasıdır. 2023'te küresel enerji kaynaklı CO₂ emisyonları 36,8 milyar ton ile rekor seviyeye ulaşmıştır (IEA, 2024). Mevcut tüm

NDC'ler tamamen yerine getirilse bile, bu taahhütlerin 2030 itibarıyla 2019 seviyelerine göre yalnızca %2'lik bir emisyon azaltımı sağlaması öngörülmektedir; bu, 1,5°C hedefine ulaşmak için gerekli %43'lük azaltımın çok altındadır (UNEP Emissions Gap Report, 2023).

Uluslararası Tepkiler

Paris Anlaşması, iş birliği, şeffaflık ve sürekli ilerleme kültürünü teşvik ederek küresel iklim diplomasisini dönüştürmüştür. Anlaşma, ülkelerin yalnızca kendi iklim hedeflerini belirlemelerini değil, aynı zamanda birbirlerinin çabalarını kolektif olarak değerlendirmelerini de teşvik ederek “yumuşak baskı” ve diplomatik hesap verebilirlik koşulları yaratmaktadır (Falkner, 2016; Jordan ve ark., 2018).

Jeopolitik gerilimlere rağmen—örneğin Trump yönetimi döneminde ABD'nin çekilmesi—Paris Anlaşması, dayanıklı, uyarlanabilir ve normatif olarak güçlü bir çerçeve olarak varlığını sürdürmüştür (Falkner, 2016). Etkisi, yalnızca emisyon hedefleriyle sınırlı kalmayıp, iklim diplomasisini uluslararası ilişkilerin kalıcı ve gelişen bir bileşeni hâline getirmiştir (Jordan ve ark., 2018).

Ülkelerin Anlaşmaya verdikleri tepkiler büyük farklılık göstermektedir. Bazı hükümetler bunu çevresel sorunlara yönelik ilerleme olarak değerlendirirken, bazıları kendi hedeflerinin gerisinde kalmıştır. Örneğin, Birleşik Krallık, Avrupa Birliği üyeliği sırasında 2020 emisyon azaltım hedefine ulaşmış ve 1990 seviyelerine kıyasla toplam sera gazı emisyonlarını yaklaşık %45 oranında azaltmıştır. Buna karşılık, son tahminler Avustralya'nın 2005 seviyelerine göre yalnızca %18 azaltım sağlayacağını ve %26–28 hedefinin oldukça altında kalacağını göstermektedir (McG-rath, 2021).

5.4. Gençlik Hareketleri ve Küresel Sosyal Eylemler

2018 yılında İsveçli öğrenci Greta Thunberg'in İsveç Parlamentosu önünde başlattığı *School Strike for Climate* (*Skolstrejk för klimatet*), hızla küresel bir gençlik ayaklanmasına dönüşmüştür. Thunberg, her Cuma “School Strike for Climate” pankartı ile protestoya katılmış ve sosyal medya aracılığıyla dünya çapında yayılan bir hareketin kıvılcımını ateşlemiştir.

Fridays for Future adı verilen hareket, Mart 2019'da tarihin en büyük iklim protestolarından birini örgütlemiş; 125'ten fazla ülkede 1,6 milyondan fazla öğrenci sokaklara çıkmıştır. Dikkat çekici bir şekilde, hareketin talepleri bilimsel kanıtlara dayanmaktadır; bunlar, IPCC'nin *Global Warming of 1.5°C* özel raporunun bulgularına dayandırılmıştır. Thunberg'in 2019 BM İklim Eylem Zirvesi'nde yaptığı konuşma, hareketin küresel etkisini daha da artırmıştır.

Hareketin en önemli etkilerinden biri, iklim değişikliği tartışmasını bilim çevrelerinden alıp ana akım kamuoyuna taşımış olmasıdır. Almanya’da, *Fridays for Future* hareketi 2019 yerel seçimlerinde Yeşiller Partisi’nin oy oranını %10’dan %25’e çıkarmasına katkı sağlarken; Birleşik Krallık “iklim acil durumu” ilan eden ilk ülke olmuştur. Hareket, iklim krizinden en çok etkilenen ülkelerdeki gençlerin sesini de güçlendirmiştir; bunlar arasında Vanuatu, Filipinler ve Pakistan öne çıkmaktadır.

Hareketten çıkan diğer önde gelen aktivistler arasında Vanessa Nakate (Uganda), Luisa Neubauer (Almanya) ve Anuna De Wever (Belçika) yer almakta ve bu kişiler yerel ve uluslararası düzeyde politika yapıcılarla doğrudan etkileşimde bulunmuştur. Bu aktivizmin sonucu olarak, birçok üniversite ve yatırım fonu fosil yakıtlardan el çekmiş ve Avrupa Birliği 2030 emisyon azaltım hedefini %40’tan %55’e yükseltmiştir.

Gençlik hareketi, iklim adaletini küresel gündemin merkezine yerleştirerek, iklim politikalarında kuşaklar arası eşitliğin önemini artırmıştır. Geleneksel aktivizmin aksine, bilimsel kanıtları etkin bir şekilde kullanarak iklim eyleminin ahlaki temelini güçlendirmiştir.

5.5. Küresel Anlaşmalardan Bölgesel ve Ulusal Eylemlere: Somut Politikaların Geliştirilmesi

Paris Anlaşması taahhütlerini somut politika eylemine dönüştürme çabalarının en kapsamlı örneği, 2019’da Avrupa Birliği (AB) tarafından ilan edilen *European Green Deal*’dir. Bu strateji, AB’yi 2050’ye kadar “dünyanın ilk iklim nötr kıtası” hâline getirmeyi ve 2030’a kadar emisyonları %55 azaltmayı hedeflemekte, iklim eylemini ekonomik kalkınmanın merkezine yerleştirmektedir.

Bu stratejiyi uygulamak için geliştirilen *Fit for 55* yasama paketi, küresel taahhütlerin pratik politika araçlarına nasıl dönüştürülebileceğine örnek teşkil etmektedir. Başlıca bileşenleri şunlardır:

- **Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) Reformu:** Mevcut sistemin daha iddialı hâle getirilmesi ve kapsamının yeni sektörlerle genişletilmesi.
- **Sosyal İklim Fonu:** Geçişin sosyal etkilerini hafifletmek için tasarlanmış finansal destek mekanizması.
- **Karbon Sınır Ayarlama Mekanizması (CBAM):** Emisyon yoğun malların ithalatına karbon fiyatlaması getirilerek karbon sızıntısının önlenmesi.
- **Araç Emisyon Standartları:** 2035’ten itibaren yeni benzinli ve dizel araç satışlarının yasaklanması.

Bu kapsamlı yaklaşım, iklim eyleminin yalnızca çevre bakanlıklarının alanını aşarak AB genelinde ekonomik, sanayi ve ticaret politikalarının merkezine yerleştiğini göstermektedir.

6. COP Süreçlerinin Evrimi: Kyoto'dan Paris'e

6.1. İlk COP Toplantıları: Uluslararası İklim Diplomasisinin Temellerini Atmak

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) kapsamında düzenlenen Taraflar Konferansı (COP) toplantıları, küresel iş birliğini şekillendirme açısından kritik bir rol oynamıştır. İlk COP, 1995 yılında Berlin'de gerçekleştirilmiştir.

- **COP1 (1995, Berlin) ve Berlin Yetkisi:** Berlin toplantısında, gelişmiş ülkelerin mevcut emisyon azaltım taahhütlerinin iklim değişikliğini etkili biçimde ele almak için yetersiz olduğu sonucuna varılmıştır. 1990–1994 yılları arasında Ek I ülkelerinin CO₂ emisyonları %3,5 artmış ve bu yetersizlik ampirik verilerle ortaya konmuştur (UNFCCC, 1995). Sonuç olarak, daha güçlü yükümlülükler belirlemek amacıyla yasal bağlayıcı bir protokol için müzakereleri başlatan Berlin Yetkisi kabul edilmiştir.
- **COP2 (1996, Cenevre):** İsviçre'nin Cenevre kentinde yapılan ikinci konferans, IPCC İkinci Değerlendirme Raporu'nun yayımlanmasının etkisi altında gerçekleşmiştir. Bu rapor, "iklim sistemi üzerinde insan etkisinin ayırt edilebilir olduğunu" bilimsel olarak ilk kez doğrulamıştır. COP2 bu bulguyu resmen kabul etmiş ve sera gazı emisyonlarını sınırlamak için yasal bağlayıcı bir protokol çağrısında bulunan Cenevre Bakanlar Deklarasyonu'nu yayımlamıştır. Bu kararlar, ertesi yıl Kyoto Protokolü müzakerelerinin önünü açarak COP2'yi bilimsel kanıt ile küresel iklim politikasını birbirine bağlayan kritik bir köprü hâline getirmiştir.
- **COP3 (1997, Kyoto): Tarihi Bir Dönüm Noktası:** Kyoto'daki COP3 toplantısı, küresel iklim eyleminde tarihi bir dönüm noktasıdır. Bu toplantının sonucunda ortaya çıkan Kyoto Protokolü, gelişmiş ülkeler için yasal olarak bağlayıcı emisyon azaltım hedefleri getiren ilk uluslararası anlaşma olmuştur. Protokol kapsamında, Ek I ülkeleri 2008–2012 döneminde sera gazı emisyonlarını 1990 seviyelerinin ortalama %5,2 altına düşürmeyi taahhüt etmiştir (Kyoto Protocol, 1997). Takip eden COP toplantıları düzenli olarak gerçekleştirilmiş ve bu temeli giderek güçlendirmiştir (Bkz. Tablo 1).

6.2. Paris Sonrası Dönem: Küresel İklim Eyleminin Uygulanması

Paris Anlaşması'nın kabulünden sonra düzenlenen COP toplantıları, teknik uygulama detaylarının belirlenmesi ve küresel iklim çabalarının hızlandırılması açısından kritik platformlar olmuştur. Bu dönemde, bilim temelli politika mekanizmaları geliştirilmiş ve ülkeler taahhütlerini kademeli olarak güçlendirmiştir.

- **COP24 (2018, Katowice) ve Paris Kural Kitabı:** Katowice'de düzenlenen COP24'te Paris Anlaşması Kural Kitabı kabul edilmiş ve uygulama için teknik çerçeve tamamlanmıştır. Kural kitabı, şeffaflık, NDC raporlaması ve küresel değerlendirme gibi temel mekanizmalar için operasyonel yönergeleri içermektedir (UNFCCC, 2018). Konferans ayrıca IPCC'nin *1,5°C Küresel Isınma Özel Raporu* bulgularını dikkate almış ve küresel sıcaklık artışının 1,5°C ile sınırlandırılmasının bilimsel gerekliliğini vurgulamıştır.
- **COP26 (2021, Glasgow) ve Küresel Eylem:** Glasgow'daki COP26, Paris sonrası dönemin en önemli toplantılarından biri olmuştur. Öne çıkan sonuçlar şunlardır:
 - o **Kömürün Aşamalı Azaltımı:** Fosil yakıtlar ilk kez bir COP kararında açıkça belirtilmiş ve kömür kullanımının azaltılması konusunda anlaşma sağlanmıştır. Bu, 2021'de küresel CO₂ emisyonlarının %30'unu oluşturan kömür bazlı elektrik üretimi bağlamında özellikle önemlidir (IEA, 2021).
 - o **Sıfır Emisyonlu Araçlar Deklarasyonu:** 2035'ten itibaren tüm yeni otomobil ve hafif ticari araçların sıfır emisyonlu olması hedeflenmiştir. Bu, ulaşım sektörünün küresel emisyonlardaki %24'lük katkısı ile uyumludur (IPCC, 2022).
 - o **Küresel Metan Taahhüdü:** 100'den fazla ülke, 2030'a kadar metan emisyonlarını %30 azaltmayı taahhüt etmiştir. Metanın 20 yıl boyunca CO₂'ye kıyasla 84 kat daha güçlü bir ısınma potansiyeli bulunması, bu taahhüdün önemini vurgulamaktadır (IPCC, 2021).

COP26'nın sonuçları, mevcut Ulusal Katkı Beyanlarının (NDC'ler) küresel sıcaklık artışını yaklaşık 2,4–2,6°C ile sınırlandırabileceğini göstermiştir (UNEP, 2021). Bu değer hâlâ 1,5°C hedefinin gerisinde kalmakla birlikte, önceki projeksiyonlarla karşılaştırıldığında ilerleme kaydedildiğini göstermektedir.

Tablo 1. Taraflar Konferansı (COP) Tarihsel Zaman Çizelgesi

COP No	Yıl	Şehir, Ülke	Öne Çıkan Özellik / Önemli Sonuç
COP1	1995	Berlin, Almanya	İlk COP. Berlin Yetkisi kabul edildi (Kyoto Protokolü müzakerelerinin başlangıcı).
COP2	1996	Cenevre, İsviçre	Cenevre Bildirisi; IPCC İkinci Değerlendirme Raporu bulguları benimsendi.
COP3	1997	Kyoto, Japonya	□ Tarihi öneme sahip: Kyoto Protokolü kabul edildi.
COP4	1998	Buenos Aires, Arjantin	Buenos Aires Eylem Planı oluşturuldu.
COP5	1999	Bonn, Almanya	Teknik görüşmeler yapıldı.
COP6	2000	Lahey, Hollanda	Müzakereler çıkmaza girdi ve ertelendi.
COP6 (devam)	2001	Bonn, Almanya	Bonn Anlaşması sağlandı.
COP7	2001	Marakeş, Fas	Kyoto Protokolü'nün uygulama kuralları (Marakeş Anlaşmaları) kabul edildi.
COP8	2002	Yeni Delhi, Hindistan	Delhi Deklarasyonu kabul edildi.
COP9	2003	Milano, İtalya	Teknik konular görüşüldü.
COP10	2004	Buenos Aires, Arjantin	Uyum ve farkındalık üzerine odaklanıldı.
COP11 / CMP1	2005	Montreal, Kanada	Kyoto Protokolü yürürlükteyken yapılan ilk toplantı.
COP12	2006	Nairobi, Kenya	Gelişmekte olan ülkelere uyum fonu vurgusu yapıldı.
COP13	2007	Bali, Endonezya	□ Paris Anlaşması'na giden yol: Bali Eylem Planı kabul edildi.
COP14	2008	Poznan, Polonya	Uyum Fonu operasyonelleştirildi.
COP15	2009	Kopenhag, Danimarka	Büyük beklentilerle girildi, ancak yasal bağlayıcılığı olan bir anlaşma sağlanamadı.
COP16	2010	Cancun, Meksika	Cancun Anlaşmaları Kopenhag hayal kırıklığını telafi etti; Yeşil İklim Fonu kuruldu.
COP17	2011	Durban, Güney Afrika	Durban Platformu kabul edildi (2020 sonrası yeni anlaşma müzakereleri başladı).
COP18	2012	Doha, Katar	Kyoto Protokolü'nün 2. taahhüt dönemi kabul edildi.
COP19	2013	Varşova, Polonya	“Kayıp ve Zarar” mekanizması oluşturuldu.
COP20	2014	Lima, Peru	Ülkelerin katkılarını (NDC'ler) sunmalarının önü açıldı.
COP21	2015	Paris, Fransa	□ Tarihi öneme sahip: Paris Anlaşması kabul edildi.
COP22	2016	Marakeş, Fas	“Eylem ve Uygulama COP'u” olarak anıldı.
COP23	2017	Bonn, Almanya	Fiji Başkanlığı altında düzenlendi.
COP24	2018	Katowice, Polonya	Paris Anlaşması uygulama kuralları (Paris Kural Kitabı) büyük ölçüde tamamlandı.
COP25	2019	Madrid, İspanya	Karbon piyasaları kuralları (Madde 6) üzerinde anlaşma sağlanamadı.
COP26	2021	Glasgow, İngiltere	Kömürün aşamalı azaltımı ilk kez bir metne girdi. Paris Kural Kitabı (Madde 6) tamamlandı.
COP27	2022	Şarm eş-Şeyh, Mısır	“Kayıp ve Zarar Fonu”nun kurulması kararlaştırıldı.
COP28	2023	Dubai, BAE	İlk kez “fosil yakıtlardan uzaklaşma” küresel mutabakat metnine dahil edildi.
COP29	2024	Bakü, Azerbaycan	Ana gündem: Yeni ve iddialı bir küresel iklim finansmanı hedefi belirlemek.
COP30	2025	Belém, Brezilya	Ana gündem: Ülkelerin yeni ve güçlendirilmiş NDC'lerini sunmaları bekleniyor.

COP28 (2023, Dubai): Fosil Yakıtlardan Geçiş Kararı

- Kayıp ve Zarar Fonu'nun İşletmeye Alınması
- 2030'a kadar küresel yenilenebilir enerji kapasitesinin üç katına çıkarılması ve enerji verimliliği iyileştirme oranlarının iki katına çıkarılması konusunda anlaşma
- Yeni iklim finansmanı hedefi için müzakerelerin başlatılması, Yeni Kolektif Nicel Hedef (NCQG) olarak adlandırılmaktadır

Buna karşın, “fosil yakıtlardan geçiş” ifadesinin bağlayıcı olmaması ve karbon yakalama ve depolama (CCS) gibi tartışmalı teknolojilere referans verilmesi bazı endişelere yol açmıştır; eleştirmenler, bunun gerçek karbonsuzlaştırma çabalarını geciktirebileceğini öne sürmektedir.

7. Güncel Durum ve Gelecek Perspektifi

7.1. Artan Kamu Bilinci ve Sosyal Hareketler

İklim değişikliği, küresel kamu gündeminin en acil meselelerinden biri haline gelmiş ve sosyal hareketlerin şekillenmesinde belirleyici bir rol oynamıştır. 2023 yılında 89 ülkede gerçekleştirilen Küresel İklim Endişesi Anketine göre, katılımcıların %72'si iklim değişikliğini “çok ciddi” bir tehdit olarak tanımlamıştır (Lee vd., 2023). Bu kaygı özellikle genç kuşaklarda belirgindir; 18–35 yaş arası bireylerin %68'i iklim değişikliğinin günlük yaşam kararlarını etkilediğini belirtmiştir (Ay & Yalçın Erik, 2020; Ay & Yalçın Erik, 2025).

Medyanın konuya ilgisi niceliksel ve niteliksel olarak değişim göstermiştir. 2022 yılında, küresel medya iklim değişikliği kapsamındaki haberleri, 2015 Paris Anlaşması öncesine kıyasla %340 oranında artış göstermiştir (Media Climate Network, 2023). Sosyal medyada iklimle ilgili içerik paylaşımı, 2020–2023 yılları arasında yıllık ortalama %45 artmıştır.

Dünya Ekonomik Forumu'nun 2023 Küresel Riskler Raporuna göre, önümüzdeki on yılın en büyük on riskinden dördü çevresel ve iklimle ilgilidir: iklim eyleminin başarısızlığı, aşırı hava olayları, biyolojik çeşitlilik kaybı ve doğal kaynak krizleri (WEF, 2023).

2023–2024 döneminde iklim değişikliğinin fiziksel etkileri her zamankinden daha görünür hale gelmiştir. 2023 yılı, kayıtlara geçen en sıcak yıl olmuş ve küresel ortalama sıcaklık, sanayi öncesi seviyelerin 1,48°C üzerine çıkmıştır (Copernicus Climate Change Service, 2024). Bu artış, Paris Anlaşması'nın belirlediği 1,5°C eşiğine tehlikeli şekilde yak-

laşmıştır. Aynı dönemde Kanada’da artan orman yangınları, Akdeniz’de yıkıcı seller ve ABD’de ardışık kasırgalar, iklim krizinin somut maliyetlerini gözler önüne sermiştir.

7.2. Siyasi Eyleme Yönelik Yapısal Engeller ve Çözüm Arayışları

İklim değişikliğiyle mücadele çabaları, çok katmanlı yapısal engellerle karşılaşmaktadır. Fosil yakıt endüstrisinin güçlü etkisi devam etmekte olup, 2022 yılında küresel fosil yakıt sübvansiyonları 1,2 trilyon USD seviyesinde gerçekleşmiş ve enerji geçişini yavaşlatan en önemli faktörlerden biri olmuştur (IEA, 2023). Kısa vadeli siyasi çıkarlar da ilerlemeyi engellemektedir; iklim politikaları sıklıkla seçim dönemlerinde geri planda kalmaktadır.

2022 küresel enerji krizinin ardından ortaya çıkan jeopolitik gerilimler, iklim eylemini daha da karmaşık hale getirmiştir. Bazı Avrupa ülkeleri, enerji güvenliği kaygıları nedeniyle geçici olarak kömür santrallerinin işletmesini yeniden başlatmış veya süreyi uzatmıştır. Bununla birlikte, temiz enerji yatırımları rekor seviyelere ulaşmış ve 2023 yılında 1,7 trilyon USD ile fosil yakıt yatırımlarını geçmiştir (IEA, 2024). Bu arada, Avrupa Birliği’nin Karbon Sınır Ayarlama Mekanizması (CBAM) gibi mekanizmalar 2023 yılında geçiş raporlama aşamasına başlamış ve küresel ticaret dinamiklerini şekillendirmiştir.

Uluslararası rekabet ve “karbon sızıntısı” kaygıları tek taraflı politika uygulamalarını zorlaştırsa da, CBAM gibi araçlar bu soruna yenilikçi çözümler sunmaktadır.

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasındaki tarihi sorumluluk ve iklim finansmanı tartışmaları, COP27’de kurulan Kayıp ve Zarar Fonu ile yeni bir aşamaya girmiştir. Örneğin Türkiye, küresel birikimli emisyonların yalnızca %0,7’sinden sorumlu olarak adil bir muamele talep etmeye devam etmektedir (Climate Analytics, 2023).

7.3. Gelecek Perspektifi: Entegre Çözümler ve Dönüşüm Fırsatları

İklim eyleminin geleceği, teknolojik yenilik, siyasi kararlılık ve sosyal dönüşümün entegrasyonuna bağlıdır.

- **Teknolojik Atılımlar:** Yenilenebilir enerji maliyetleri düşmeye devam etmekte, 2010–2022 arasında güneş enerjisi maliyetleri %89 azalmıştır (IRENA, 2023). Yeşil hidrojen, enerji depolama ve karbon yakalama teknolojileri ölçek ekonomisine yaklaşmaktadır.
- **Finansal Dönüşüm:** Küresel sürdürülebilir finans piyasası 2023’te 5,3 trilyon USD’ye ulaşmıştır (Global Sustainable Investment Al-

liance, 2023). Merkez bankaları iklim risklerini finansal istikrar değerlendirmelerine entegre etmeye başlamıştır.

- **Politika Evrimi:** Karbon fiyatlandırma mekanizmaları yaygınlaşmaktadır; 2023 itibarıyla 75 ülke ve bölge bu sistemleri uygulamaktadır (World Bank, 2023).

IPCC AR6 Sentez Raporu (2023), insan faaliyetlerinin küresel ısınmadan açıkça sorumlu olduğunu vurgulayan bir “son uyarı” niteliğindedir. 2011–2020 dönemi, sanayi öncesi ortalamanın 1,1°C üzerinde gerçekleşmiş ve mevcut emisyon trendleri 1,5°C sınırının 2030–2035 arasında aşılabileceğini göstermektedir. Bu sınıra uymak için emisyonlar 2025’te zirve yapmalı ve 2030’a kadar %43 azaltılmalıdır.

Bazı değişiklikler—örneğin Grönland buz tabakasının erimesi—artık geri dönüşsüzdür ve 2°C ısınmada kritik eşiklerin aşılma riski belirgin şekilde artmaktadır. 1,5°C’lik artışta bile birçok ekosistem ve topluluk adaptasyon kapasitesini aşacaktır. Ancak rapor, temiz teknoloji maliyetlerindeki hızlı düşüşlerin enerji geçişini teknik ve ekonomik olarak mümkün kıldığını vurgulamaktadır. Yol, hem iklimi hem de insan refahını koruyan “iklim dirençli kalkınma” modelindedir.

İklim Adaleti ve Direnç: Yerli toplulukların, gençlerin ve kadınların karar alma süreçlerine katılımı artmaktadır. İklim göçü ve kayıp-zarar konuları uluslararası gündemde merkezi önem taşımaktadır.

Yeşil geçiş artık sadece çevresel bir zorunluluk olarak görülmemekte, ekonomik rekabet ve enerji bağımsızlığı için anahtar olarak değerlendirilmektedir. 2023–2050 döneminde küresel temiz enerji yatırımlarının 130 trilyon USD’ye ulaşması öngörülmektedir (IEA, 2023).

8. İklim Adaleti ve Gelişmekte Olan Ülkelerin Konumu

Küresel iklim mücadelesi, tarihi sorumluluklar ile ülkelerin kalkınma ihtiyaçlarını dengelemeyi gerektirdiğinden derin bir adalet boyutuna sahiptir. Bu bağlamda gelişmekte olan ve en az gelişmiş ülkelerin konumu, uluslararası müzakerelerin en hassas ve belirleyici unsurlarından biridir.

8.1. Temel İkilem: Tarihi Sorumluluk ile Kalkınma Hakkının Dengelenmesi

İklim rejiminin merkezinde, sanayileşmiş ülkelerin tarihi sorumluluğu ile gelişmekte olan ülkelerin kalkınma hakkı arasındaki gerilimdir.

1850–2021 döneminde, ABD (%25) ve AB (%22) toplamda biriken CO₂ emisyonlarının %47’sinden sorumlu iken, Afrika kıtası yalnızca %3 kat-

kıda bulunmuştur (Carbon Brief, 2021). Buna rağmen küçük ada devletleri ve en az gelişmiş ülkeler, iklim değişikliğinin yıkıcı etkilerine en hassas durumda kalmıştır.

Paris Anlaşması sonrasında gelişmekte olan ülkelerin temiz kalkınma yollarını izleyebilmeleri için çeşitli destek mekanizmaları oluşturulmuştur:

- **İklim Finansmanı:** Gelişmiş ülkeler 2020'den itibaren yılda 100 milyar USD taahhüt etmiş, ancak 2022 itibarıyla bu hedef yalnızca yaklaşık 83 milyar USD ile sınırlı kalmıştır (OECD, 2023).
- **Teknoloji Transferi:** Teknoloji Yürütme Komitesi (TEC) ve İklim Teknoloji Merkezi ve Ağı (CTCN) gibi mekanizmalar, temiz enerji teknolojilerinin gelişmekte olan ülkelere transferini kolaylaştırmaktadır.
- **Kapsite Geliştirme:** Veri toplama, proje formülasyonu ve iklim eylemlerinin uygulanması alanlarında teknik destek programları yürütülmektedir.
- **Kayıp ve Zarar Mekanizması:** COP27'de (2022) kurulan bu mekanizma, kaçınılmaz iklim etkilerinden kaynaklanan kayıplar ve zararları telafi etmeyi amaçlamakta ve gelişmiş ülkelerin tarihi sorumluluğunu en somut şekilde tanımaktadır.

Türkiye, iklim adaleti perspektifinde özgün bir örnek teşkil etmektedir. OECD üyeliği nedeniyle, 1992 UNFCCC kapsamında "gelişmiş ülke" (Ek I) olarak sınıflandırılmıştır. Ancak kişi başına 6,1 ton CO₂ eşdeğeri ve toplam tarihi katkısı yalnızca %0,7 olduğu için konumu diğer Ek I ülkelerinden belirgin şekilde farklıdır (Climate Analytics, 2022). Bu sınıflandırma, Türkiye'nin Paris Anlaşması'nı yalnızca 2021'de, "adil statü" talebinin kabul edilmesinin ardından onaylamasına yol açmıştır.

9. Sonuçlar

Kamu bilincinin iklim değişikliği konusundaki evrimi, 19. yüzyıl bilimsel keşiflerinden 21. yüzyıl küresel hareketlerine uzanan, karmaşık ve çok boyutlu bir sosyo-politik süreçtir. Bu çalışma, söz konusu evrimin bilimsel bilgi, siyasi irade, ekonomik çıkarlar ve toplumsal talepler arasındaki dinamik etkileşimle şekillendiğini göstermiştir.

COP süreçleri, bu kolektif bilincin nasıl kurumsallaştığının somut örneklerini sunmaktadır. Kyoto Protokolü'nün yukarıdan aşağıya yaklaşımından, Paris Anlaşması'nın aşağıdan yukarı esnek modeline geçiş, küresel iklim yönetiminde önemli bir dönüşümü temsil etmektedir.

Bununla birlikte, mevcut Ulusal Katkı Beyanları'nın (NDC'ler) küresel sıcaklık artışını 1,5°C ile sınırlamak için yetersiz olduğu açıktır (IPCC, 2023).

Küresel iklim mücadelesinin etkinliği, adalet sorunu ile derin bir şekilde iç içe geçmiştir. Tarihsel olarak en yüksek emisyonlardan sorumlu gelişmiş ülkeler ile krizden en ağır biçimde etkilenen gelişmekte olan ülkeler arasındaki eşitsizlik, uluslararası iş birliğinin önündeki kritik bir engel olarak kalmaktadır. Bu nedenle, iklim finansmanı taahhütlerinin yerine getirilmesi, etkin teknoloji transferinin sağlanması ve Kayıp ve Zarar Mekanizmasının işletilmesi hayati önem taşımaktadır.

Küresel iklim diplomasisi yalnızca bilimsel aciliyetle değil, aynı zamanda jeopolitik, ekonomik ve tarihsel eşitsizliklerle de karşı karşıyadır. Paris Anlaşması evrensel bir çerçeve sunsa da, eksik emisyon raporlamaları ve eşit olmayan ulusal taahhütler nedeniyle etkinliği sınırlıdır. Güç, bilgi ve kaynaklardaki asimetriлер iş birliğini zayıflatmakta; finansmana ve teknolojiye sınırlı erişim, en az sorumlu ülkeleri iklim risklerine karşı en savunmasız hale getirmektedir. Bu durum, düşük gelirli, kırsal ve Küresel Güney topluluklarının iklim etkilerinin en ağır yükünü taşımasına yol açmaktadır.

Sonuç olarak, küresel iklim diplomasisinin hedeflerine ulaşabilmesi için yalnızca söylemsel taahhütleri aşması gerekmektedir. Etkili iklim eylemi, sanayi kaynaklı emisyonları azaltan, fosil yakıtlara bağımlılığı düşüren, piyasaları düzenleyen ve şirket liderlerini hesap verebilir kılan politikaları gerektirir.

Özetle, iklim değişikliğiyle mücadelede başarının temel koşulu, bilimsel bilgi, siyasi irade, ekonomik dönüşüm, toplumsal katılım ve gerçek bir küresel adalet anlayışı arasındaki sinerjik etkileşimdir. İklim krizi—insanlığın ortak sınavı—tarihsel sorumlulukların adil dağıtıldığı ve hiçbir ülkenin geride bırakılmadığı bir dayanışma modeliyle aşılabılır.

Kaynaklar

- Alvarez, R. A., et al. (2018). Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain. *Science*, 361(6398), 186–188.
- Arrhenius, S. (1896). On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41, 237–276.
- Ay, F. (2020). *Jeoloji tarihinde iklim, küresel ısınma ve etkileri*. Ankara: Akademisyen Kitabevi.
- Ay, F., & Yalçın Erik, N. (2020). Üniversite öğrencilerinin küresel ısınma ve iklim değişikliğine yönelik bilgi ve algı düzeyleri. *Cumhuriyet Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 44(2), 1–18.
- Birpınar, M. E. (2022). Küresel sorun iklim değişikliği: Gelişimi, uluslararası müzakereler ve Türkiye. *Çevre, Şehir ve İklim Dergisi*, 1(1), 20–36.
- Bowen, M. (2015). *Thin ice: Unlocking the secrets of climate in the world's highest mountains*. Henry Holt and Company.
- Callendar, G. S. (1938). The artificial production of carbon dioxide and its influence on climate. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 64(275), 223–240.
- Carbon Brief. (2021). *Historical responsibility for climate change*. London: Carbon Brief.
- Carson, R. (1962). *Silent spring*. Houghton Mifflin.
- Circular Economy Action Plan. (2020). COM(2020) 98 final. Brussels: European Commission.
- Climate Action Tracker. (2024). Paris Agreement implementation and global warming projections. Retrieved from <https://climateactiontracker.org>
- Climate Analytics. (2022). *Turkey's climate responsibility and fair share*. Berlin: Climate Analytics.
- Climate Analytics. (2023). *Historical responsibility and climate justice*. Berlin: Climate Analytics.
- Copernicus Climate Change Service. (2024). 2023 is the hottest year on record, with global temperatures close to the 1.5°C limit.
- European Climate Law. (2021). Regulation (EU) 2021/1119. Brussels: European Union.
- European Commission. (2019a). *The European Green Deal (COM(2019) 640 final)*. Brussels: European Commission.
- European Commission. (2019b). *Communication on the European Green Deal (COM(2019) 640 final)*. Brussels: European Commission.
- European Commission. (2020). *EU Biodiversity Strategy for 2030 (COM(2020) 380 final)*. Brussels: European Commission.
- European Commission. (2020). *EU Industrial Strategy (COM(2020) 102 final)*. Brussels: European Commission.

- European Commission. (2021). Fit for 55: Delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality (COM(2021) 550 final). Brussels: European Commission.
- Falkner, R. (2016). The Paris Agreement and the new logic of international climate politics. *International Affairs*, 92(5), 1107–1125. <https://doi.org/10.1111/1468-2346.12708>
- Fleming, J. R. (2007). *The Callendar effect: The life and work of Guy Stewart Callendar*. American Meteorological Society.
- Fourier, J. (1824). Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. *Annales de Chimie et de Physique*, 27, 136–167.
- Global Sustainable Investment Alliance. (2023). *Global sustainable investment review 2023*. Brussels: GSIA.
- Grubb, M. (2003). *The Kyoto Protocol: A guide and assessment*. Royal Institute of International Affairs.
- Hansen, J. (2009). *Storms of my grandchildren: The truth about the coming climate catastrophe and our last chance to save humanity*. Bloomsbury.
- IEA. (2021). *Coal 2021: Analysis and forecast to 2024*. International Energy Agency.
- IEA. (2023). *World energy outlook 2023*. International Energy Agency.
- IEA. (2024). *CO2 Emissions in 2023*. International Energy Agency.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (1995). *Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, & K. Maskell, Eds.). Cambridge University Press.
- IPCC. (1990). *First assessment report*. Cambridge University Press.
- IPCC. (1995). *Climate change 1995: The science of climate change. Second assessment report*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2007). *Fourth assessment report: Climate change 2007*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution to the Sixth Assessment Report*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IRENA. (2023). *Renewable power generation costs 2022*. International Renewable Energy Agency.

- Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dansgaard, W., Gundestrup, N. S., Hammer, C. U., Andersen, U., Andersen, K. K., Hvidberg, C. S., Dahl-Jensen, D., Steffensen, J. P., Shoji, H., White, J., Jouzel, J., Fisher, D., & Johnson, S. (1993). *Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core*. *Nature*, 359(6393), 311–313. <https://doi.org/10.1038/359311a0>
- Jordan, A., Huitema, D., Hildén, M., van Asselt, H., Rayner, T., & Berkhout, F. (2018). Governing climate change polycentrically. *Global Environmental Change*, 52, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.05.003>
- Kyoto Protocol. (1997). Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations.
- Lee, S., et al. (2023). Global climate concern survey. *Nature Climate Change*, 13(5), 480–492.
- Mann, M. E., Bradley, R. S., & Hughes, M. K. (1999). *Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations*. *Geophysical Research Letters*, 26(6), 759–762. <https://doi.org/10.1029/1999GL900070>
- McGrath, M. (2021). Australia's climate progress: Emissions targets and national performance. BBC News. Retrieved from <https://www.bbc.com/news/world-australia-58037409>
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. III. (1972). *The limits to growth*. Universe Books.
- Media Climate Network. (2023). Global media coverage analysis. MCN Research.
- OECD. (2023). Climate finance provided and mobilised by developed countries in 2021–2022. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Roberts, J. T., & Weikmans, R. (2017). Post-Paris climate finance: The challenges of accountability and adequacy. *Climate Policy*, 17(1), 1–13. <https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1248883>
- Rome, A. (2013). *The genius of Earth Day: How a 1970 teach-in unexpectedly made the first green generation*. Hill and Wang.
- Sabel, C. F., & Zeitlin, J. (2023). *Experimentalist governance*. Oxford University Press.
- Santer, B. D., Taylor, K. E., Wigley, T. M. L., Johns, T. C., Jones, P. D., Karoly, D. J., Mitchell, J. F. B., Oort, A. H., Penner, J. E., Ramaswamy, V., Schwarzkopf, M. D., Stouffer, R. J., Tett, S., & Wuebbles, D. J. (1996). *A search for human influences on the thermal structure of the atmosphere*. *Nature*, 382(6586), 39–46. <https://doi.org/10.1038/382039a0>
- Stern, N. (2006). *The economics of climate change: The Stern review*. Cambridge University Press.
- Thunberg, G. (2019). *No one is too small to make a difference*. Penguin Books.
- Tyndall, J. (1861). On the absorption and radiation of heat by gases and vapours. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 151, 1–36.
- UNDP. (2020). 30. insani gelişmişlik raporu. United Nations Development Programme.

- UNEP. (2021). Emissions gap report 2021. United Nations Environment Programme.
- UNEP. (2023). Emissions gap report 2023: Broken record. United Nations Environment Programme.
- UNFCCC. (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations.
- UNFCCC. (1995). Report of the Conference of the Parties on its first session (FCCC/CP/1995/7/Add.1). UNFCCC Secretariat.
- UNFCCC. (2015). Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change. Retrieved from <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- UNFCCC. (2018). Katowice climate package. UNFCCC Secretariat.
- UNFCCC. (2023). Decision -/CMA.5: Outcome of the first global stocktake.
- United Nations. (1972). Report of the United Nations Conference on the Human Environment. United Nations.
- Weart, S. R. (2008). The discovery of global warming. Harvard University Press.
- WEF. (2023). Global risks report 2023. World Economic Forum.
- World Bank. (2023a). State and trends of carbon pricing 2023. World Bank.
- World Bank. (2023b). Operationalization of the Loss and Damage Fund. World Bank.
- World Meteorological Organization. (1979). Proceedings of the World Climate Conference (WMO No. 537).
- Yalçın Erik, N. (2024). Yenilenebilir enerji ve küresel iklim değişikliği etkisindeki küresel petrol piyasalarında güncel durum ve geleceğe yönelik öngörüler. In *Proceedings of the 4th International Conference on Scientific and Academic Research (ICSAR 2024)* (Full text publication, oral presentation).

Bölüm 3

**SEKTÖRLER ARASI ENERJİ
ENTEGRASYONU VE HİDROJENİN ROLÜ:
KARBONSUZLAŞTIRMA STRATEJİLERİ
BAĞLAMINDA YENİ YAKLAŞIMLAR**

Nazan YALÇIN ERİK¹

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, ORCID: (0000-0001-7849-8660)

1. Giriş

21. Yüzyılın en temel küresel gündem maddelerinden biri, enerji sistemlerinin sürdürülebilir dönüşümüdür. Küresel iklim değişikliğinin etkilerinin giderek belirginleşmesi, enerji arz güvenliği endişeleri ve karbon nötr ekonomi hedefleri, fosil yakıt temelli enerji yapısından uzaklaşmayı zorunlu kılmakta ancak beraberinde sorular ve sorunları da taşımaktadır. 2015 Paris Anlaşması sonrasında bu dönüşüm süreci, yalnızca yenilenebilir enerji kapasitesinin artırılmasına yönelik bir girişim olmaktan çıkmış; enerji üretim, iletim ve tüketim zincirlerinin bütünlüklü, esnek ve düşük karbonlu bir yapıya kavuşturulmasını amaçlayan kapsamlı bir dönüşüme evrilmiştir (IEA, 2024).

Bu bağlamda, “**sektörler arası enerji entegrasyonu**” (*sector coupling*) kavramı, sürdürülebilir enerji sistemlerinin yeniden tasarımı merkezli bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Bu kavram, enerji sisteminin yalnızca elektrik üretimi ve tüketimini değil; ısı, ulaşım, gaz ve sanayi sektörleri gibi farklı enerji taşıyıcılarını da içeren bütüncül bir yapıyı ifade eder. Böylece, yenilenebilir enerji üretimindeki dalgalanmalar sistem genelinde dengelenebilmekte, enerji depolama ve esneklik kapasitesi artırılabilmektedir (Lund vd., 2024).

Avrupa Birliği’nin “**Fit for 55**” ve “**REPowerEU**” stratejileri, sektörler arası entegrasyonun politika düzeyindeki en somut örneklerini oluşturmaktadır. Bu politikalar kapsamında, yenilenebilir enerji üretim fazlasının farklı dönüşüm teknolojileri aracılığıyla diğer sektörlerle aktarılması hedeflenmektedir. Bu süreçler arasında elektriğin hidrojen üretiminde kullanılması (*power-to-gas*), ısıtma uygulamalarında değerlendirilmesi (*power-to-heat*) veya sentetik sıvı yakıt sentezine dönüştürülmesi (*power-to-liquid*) yer almaktadır (European Commission, 2023).

Bu dönüşümün merkezinde hidrojen yer almaktadır. Hidrojen, hem enerji taşıyıcısı hem de enerji sisteminin farklı bileşenleri arasında köprü görevi gören bir “bağlayıcı vektör” olarak kabul edilmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı’nın (IEA, 2024) *Global Hydrogen Review* raporuna göre, 2050 yılına kadar küresel hidrojen talebinin günümüz seviyesinin yaklaşık altı katına ulaşması beklenmektedir. Net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için hidrojenin nihai enerji tüketimindeki payının %10 düzeyine yükselmesi öngörülmektedir. Bununla birlikte, hidrojenin mevcut kullanımının büyük ölçüde rafinaj ve kimya sektörlerinde yoğunlaştığı; ulaşım, enerji depolama ve ağır sanayi uygulamalarındaki payının henüz sınırlı olduğu belirtilmektedir.

Hidrojen ekonomisinin gelişimi aynı zamanda altyapı, ticaret ve regülasyon alanlarında da yeni gereksinimleri ortaya çıkarmaktadır. Küresel

ölçekte 2035 yılına kadar yaklaşık 37.000 km uzunluğunda hidrojen boru hattı projesi planlanmış olmasına rağmen, bu projelerin yalnızca %6'sı nihai yatırım kararına ulaşmıştır (IEA, 2024). Bu durum, sermaye yoğun yatırımların önünde belirsizliklerin ve teknik zorlukların devam ettiğini göstermektedir.

Türkiye bağlamında değerlendirildiğinde, ülkenin yüksek güneşlenme süresi, geniş kara alanı ve artan yenilenebilir enerji yatırımları, yeşil hidrojen üretimi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi'nin (2021) hesaplamalarına göre, Türkiye'de yıllık 1,6 milyon ton yeşil hidrojen üretimi için yaklaşık 12 GW elektrolizör kapasitesi gerekmektedir. HYPAT (2023) raporunda ise, 2053 net sıfır vizyonu doğrultusunda 70 GW elektrolizör kapasitesi hedefi ve hidrojen üretim maliyetinin 2035 yılına kadar kg başına 2,4 USD'nin altına düşürülmesi öngörülmektedir.

Ancak bu dönüşüm sürecinin hayata geçirilebilmesi, teknik ve kurumsal altyapının güçlendirilmesini gerektirmektedir. Mevcut doğal gaz altyapısının hidrojenle uyumlu hâle getirilmesi, malzeme dayanımı, güvenlik standartları ve sızıntı kontrolü gibi mühendislik gereksinimlerinin yanı sıra, enerji piyasaları arasındaki düzenleyici uyumsuzlukların giderilmesi de büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, yatırım teşvik mekanizmalarının ve finansal destek araçlarının çeşitlendirilmesi, hidrojen ekonomisinin gelişimi açısından stratejik bir zorunluluktur.

Bu çalışma, sektörler arası enerji entegrasyonunun kavramsal ve teknolojik temellerini açıklamayı, hidrojenin bu sistemdeki rolünü analitik olarak incelemeyi ve Türkiye'nin karbonsuzlaşma süreci bağlamında politika odaklı öneriler geliştirmeyi amaçlamaktadır. Böylece çalışma, sürdürülebilir enerji dönüşümünde hidrojen temelli entegrasyonun ülke ölçeğindeki uygulanabilirliğine dair bilimsel ve stratejik bir değerlendirme sunmaktadır.

2. Sektörler Arası Enerji Entegrasyonu: Kavram ve Uygulamalar

2.1. Kavramsal Çerçeve

Enerji sistemlerinin sürdürülebilir dönüşümüne ilişkin literatür, son on yılda önemli bir paradigma değişimine tanıklık etmiştir. Bu değişim, enerji üretiminde yenilenebilir kaynakların artan payına paralel olarak, sistem esnekliği ve sektörler arası etkileşim kavramlarının ön plana çıkmasıyla şekillenmektedir.

Avrupa Birliği literatüründe, sektör entegrasyonunun enerji dönüşümündeki rolü özellikle 2020 sonrasında hızla artan bir ilgiyle ele alın-

mıştır. European Commission (2023) tarafından yayımlanan *EU Strategy for Energy System Integration* belgesinde, sektör entegrasyonunun enerji sistemlerinde maliyet etkinliğini artırdığı, karbon emisyonlarını azalttığı ve enerji güvenliğini güçlendirdiği belirtilmektedir. Benzer biçimde IEA (2024) raporları, entegre enerji sistemlerinin 2050 net sıfır emisyon senaryolarında merkezi bir rol oynayacağını vurgulamaktadır.

Akademik çalışmalarda, sektör entegrasyonunun etkileri genellikle sistem modellemesi ve senaryo analizi yöntemleriyle incelenmektedir. Zeyen vd. (2023), Avrupa enerji sistemine ilişkin bir model çalışmasında, hidrojen üretimi ve depolama altyapısının, yenilenebilir enerji payının %80'in üzerine çıktığı senaryolarda sistem maliyetlerini %15 oranında azaltılabileceğini göstermiştir. Glenk & Reichelstein (2022) ise, hidrojen üretiminde maliyet dinamiklerinin ölçek ekonomileri ve elektrolizör teknolojilerindeki ilerlemelere bağlı olarak hızla değiştiğini ve “öğrenme eğrisi” etkisinin sektör entegrasyonunu hızlandırabileceğini belirtmektedir.

Türkiye özelinde yapılan çalışmalar ise henüz sınırlı sayıdadır. SHURA (2021) tarafından yayımlanan *Ulusal Hidrojen Stratejisi Öncelikli Alanlar* raporu, Türkiye’de hidrojen üretimi, depolama ve taşımaya yönelik teknolojik altyapının geliştirilmesi gerektiğini ve bu alanda mevzuat uyumlaştırmasının önem taşıdığını vurgulamaktadır. Acaroğlu (2022) ve Demirbaş (2023) gibi araştırmacılar, Türkiye’nin hidrojen potansiyelinin özellikle güneş enerjisiyle desteklenen elektroliz sistemleri aracılığıyla değerlendirilebileceğini belirtmekte; ancak maliyet, altyapı uyumu ve enerji politikaları arasındaki koordinasyon eksikliğinin dönüşüm sürecini yavaşlattığını ifade etmektedirler.

Literatürde öne çıkan diğer bir eğilim, hidrojen ekonomisinin sosyo-teknik boyutları üzerine yoğunlaşmaktadır. Markard & Hoffmann (2016), hidrojenin yalnızca teknik bir çözüm değil, aynı zamanda enerji rejimlerinin yeniden yapılanmasını tetikleyen dönüştürücü bir unsur olduğunu öne sürmektedir. Bu bakış açısına göre, sektör entegrasyonu, teknolojik yeniliklerin yanı sıra, yönetim, yatırım, piyasa tasarımı ve toplumsal kabul gibi çok katmanlı etkenlerin bütüncül biçimde ele alınmasını gerektirmektedir.

Güncel literatürün genel eğilimi, sektörler arası entegrasyonun düşük karbonlu enerji sistemleri için kaçınılmaz olduğu yönündedir. Ancak özellikle gelişmekte olan ülkelerde, teknik altyapı eksiklikleri, finansal riskler ve düzenleyici belirsizlikler bu dönüşümün önündeki temel engeller olarak değerlendirilmektedir (IRENA, 2024; EPRI, 2023). Bu bağlamda Türkiye, hem enerji çeşitliliği hem de coğrafi konumu itibarıyla

hidrojen temelli sektör entegrasyonu stratejilerini uygulamaya en elverişli ülkelerden biri olarak görülmektedir.

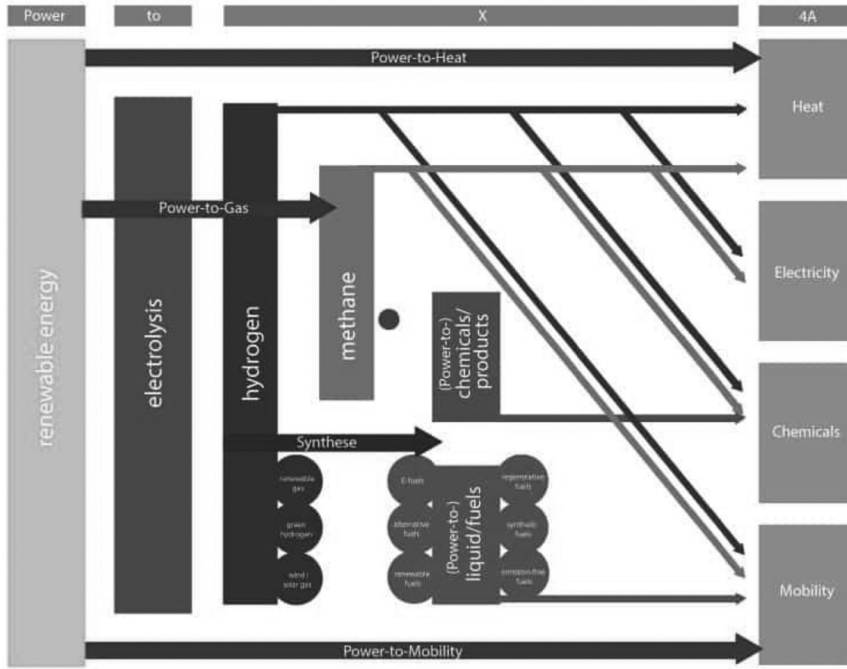
Dolayısıyla mevcut literatür, sektör entegrasyonunun küresel ölçekte kavramsal ve teknolojik çerçevesini ortaya koymakla birlikte, Türkiye özelinde ekonomik uygulanabilirlik, politika tasarımı ve bölgesel hidrojen altyapısına yönelik özgün çalışmaların sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu çalışma, literatürdeki bu boşluğu doldurmayı hedefleyerek, hidrojen merkezli sektör entegrasyonunun Türkiye enerji sistemine olası katkılarını analitik bir yaklaşımla irdelemeyi amaçlamaktadır.

Sektörler arası enerji entegrasyonu, elektrik, ısı, ulaşım, sanayi ve gaz sistemleri gibi farklı enerji bileşenlerinin birbirine bağlanarak sistem verimliliği, esneklik ve karbon azaltımının sağlanması olarak tanımlanır (IEA, 2024; Lund vd., 2024). Bu yaklaşım, özellikle yenilenebilir enerjinin değişken üretim karakterinden kaynaklanan denge sorunlarını çözmek amacıyla geliştirilmiştir.

Entegrasyonun temelini “power-to-X (P2X)” teknolojileri oluşturmaktadır (Şekil 1). Power-to-X (P2X ve P2Y olarak da bilinir), fazla yenilenebilir enerjinin elektrik dönüşümü, enerji depolanması ve tekrar dönüştürülmesi yollarını ifade eder.

Power-to-X dönüşüm teknolojileri, elektrik sektöründeki gücün, diğer sektörlerde (ulaşım veya kimyasallar gibi) kullanılmak üzere ayrıştırılmasına olanak tanır; bu sağlanan gücün kullanılması anlamına gelir. Bu kapsamda başlıca:

- Power-to-Gas (P2G)
- Power-to-Heat (P2H)
- Power-to-Liquid (P2L)
- Power-to-Mobility (P2M) sistemleri kullanılır.



Şekil 1. Entegrasyonun temelini oluşturan “power-to-X (P2X)” teknolojileri (<https://as-schneider.blog/2022/03/02/what-are-power-to-x-solutions/>)

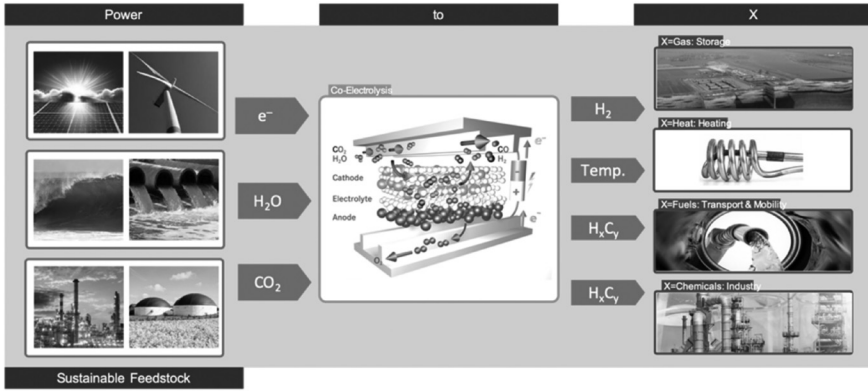
Sürdürülebilir P2X değer zincirlerinin amacı, yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektriği kullanarak, zaman içinde verimli ve esnek bir şekilde CO₂-nötr malzeme enerji kaynakları, sentetik yakıtlar ve CO₂-negatif temel kimyasallar üretmektir. Bunlar, enerji, ısı, kimyasallar ve ulaşım & trafik gibi öncü pazarlarda, iklime zararlı fosil kaynaklı enerji kaynaklarının yerini almak için kullanılabilir. Dolayısıyla, malzeme bazlı P2X ürünleri, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına önemli bir katkı sağlar ve böylece enerji dönüşümünün hedeflerine, kömürle çalışan enerji üretiminden çıkılması anlaşmasına ve uluslararası iklim anlaşmalarına ulaşılmasına yardımcı olur.

P2X, bu nedenle, sektör entegrasyonunun yanı sıra bir karbon döngüsel ekonomisi oluşturulması için de kilit bir teknoloji sağlamaktadır. Bu, “yeşil” geri dönüştürülebilir malzemelerin üretiminde, özellikle endüstriyel CO₂ nokta kaynaklarının sürdürülebilir bir P2X değer zincirinde yenilenebilir bir hammadde olarak kullanılmasıyla yeni iş alanlarının ortaya çıkmasını sağlayan büyük bir ekonomik potansiyel açar. Enerji dönüşümü ve linyit bazlı enerji üretiminden çıkış bağlamındaki endüstriyel dönüşüm süreçleriyle ilgili olarak, P2X, yapısal değişim ve sürdürülebilir

bir madencilik sonrası araziye doğru gelişim için merkezi bir teknoloji seçeneği olarak görülebilir.

P2X teknolojisi alanındaki temel bir zorluk, şu anda ölçeklenebilir ve uygun maliyetli elektrokimyasal süreçler ve proses teknolojilerinin geliştirilmesidir. Ayrıca, kullanılan malzeme ve bileşenlerin uzun çalışma ömürlerine sahip olması gerekmektedir.

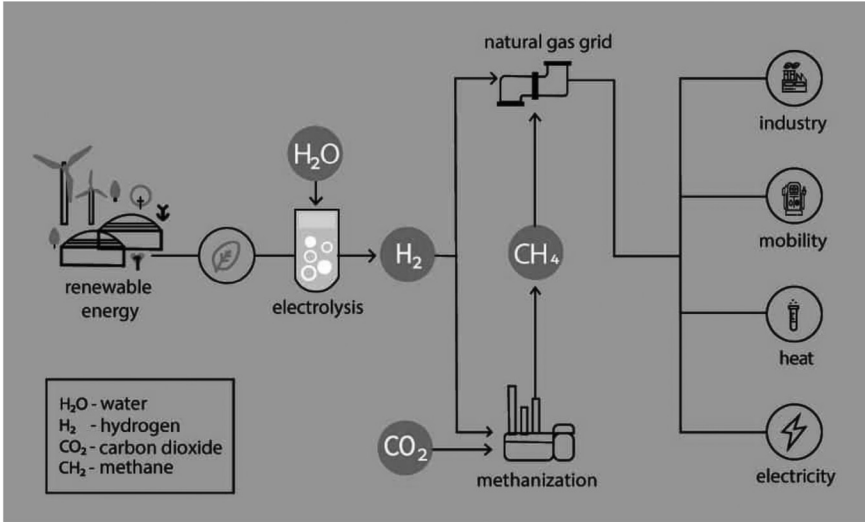
Power-to-X, “X”in gaz halindeki (güçten-gaza) veya sıvı haldeki (güçten-sıvılara) enerji taşıyıcılarını ve yakıtlar (güçten-yakıtlara) veya temel kimyasallar (güçten-kimyasallara) gibi değerli malzemeleri ifade edebildiği çeşitli enerji ve malzeme dönüşüm teknolojilerini ifade eder.



Şekil 2. Enerji, ısıtma, ulaştırma ve trafik ile kimya sanayi sektörlerinde sürdürülebilir ve CO₂ nötr endüstriyel süreçler için önemli bir teknoloji olarak Power-to-X (<https://www.fz-juelich.de/en/iet/iet-1/our-research/vision-mission/power-to-x-p2x>).

Sürdürülebilir P2X değer zincirlerinin başlangıç noktası, her zaman rüzgar, fotovoltaik veya biyogaz tesislerinden yenilenebilir kaynaklarla üretilen elektrik, (atık) su ve endüstriyel nokta kaynaklardan elde edilen CO₂ gibi yenilenebilir gaz halindeki karbon kaynaklarının yanı sıra havadan nitrojen veya biyojenik atık ürünlerdir (Şekil 2).

Power-to-Gas (P2G): Elektroliz yoluyla hidrojen veya metan üretimi. Power-to-Gas (P2G), yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisinin elektrokimyasal ve kimyasal süreçlerle gaz formunda depolanabilir enerji taşıyıcılarına dönüştürülmesini sağlayan ileri teknoloji sistemlerini kapsamaktadır (Şekil 3). Bu teknoloji, enerji sektörünün karbonsuzlaşmasında ve şebeke dengelenmesinde kilit rol oynamaktadır (IEA, 2023).



Şekil 3. Elektroliz yoluyla hidrojen veya metan üretimi (<https://as-schneider.blog/2022/03/02/what-are-power-to-x-solutions/>)

1. Elektroliz Yoluyla Hidrojen Üretimi:

Proton Değişim Membranı (PEM) Elektrolizörler: Yüksek akım yoğunluğu ve hızlı dinamik tepki süreleri (saniyeler mertebesinde) ile şebeke dengeleme hizmetlerinde etkin çözüm sunmaktadır. Güncel verilere göre, PEM elektrolizör verimliliği %60-70 (HHV) aralığına ulaşmış olup, stack ömrü 60.000-80.000 saat seviyelerindedir (Buttler & Spliethoff, 2018) (Şekil 3).

Alkalın Elektrolizörler: Geleneksel teknoloji olarak uzun ömür (90.000+ saat) ve düşük maliyet avantajı sunmakta, özellikle büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir.

Katı Oksit Elektrolizörler (SOEC): Yüksek sıcaklıkta çalışması (>700°C) sayesinde %80-90 (HHV) verimlilikle en yüksek performansı sunmakta, ancak ticari ölçekte yaygınlaşması devam etmektedir (Hauch vd., 2020).

2. Metanasyon Süreci:

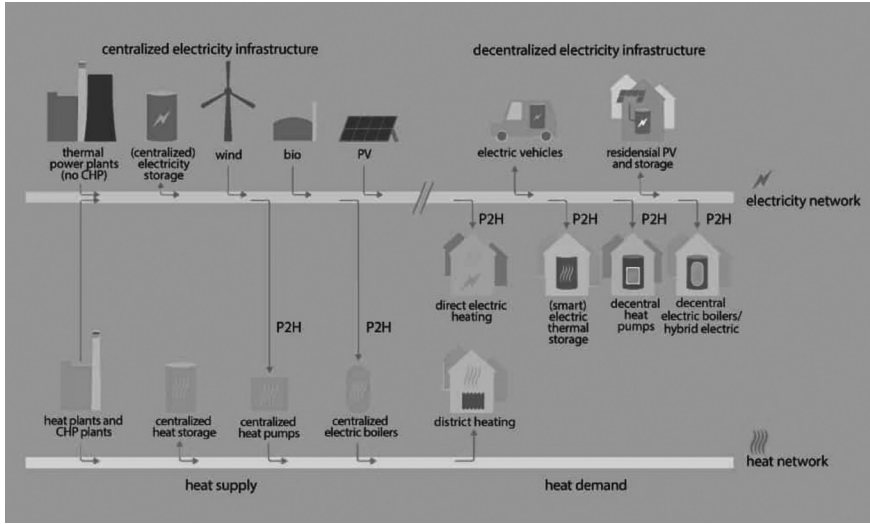
Elektrolizle üretilen hidrojenin karbon dioksit ile katalitik reaksiyona sokularak sentetik doğal gaz (SNG) üretimi gerçekleştirilmektedir (Şekil 3). Bu proses, mevcut doğal gaz altyapısının tamamen karbonsuz bir yakıtla kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Kimyasal Metanasyon: Sabit yatak reaktörlerde yüksek sıcaklık ve basınçta gerçekleştirilen ekzotermik reaksiyonlarla %95'in üzerinde metan verimi elde edilebilmektedir.

Biyolojik Metanasyon: Archaea bakterileri kullanılarak düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen proses, Almanya'daki "MicrobEnergy" pilot tesisinde başarıyla demonstrasyonu yapılmıştır.

Power-to-Heat (P2H) - Elektrikten Isıya Dönüşüm: Elektrikğin ısı pompaları veya dirençli ısıtıcılarla ısıl enerjiye dönüştürülmesi (Şekil 4). Isı sektörü, küresel nihai enerji tüketiminin yaklaşık %50'sini oluşturarak enerji dönüşümünde kritik bir rol oynamaktadır (IEA, 2023). Power-to-Heat teknolojileri, yenilenebilir elektrikğin ısı enerjisine dönüştürülmesini sağlayarak ısıtma ve proses ısısı ihtiyaçlarının karbonsuzlaştırılmasına katkıda bulunmaktadır. Bu kapsamda:

Isı Pompaları: Elektrikği, ortamdan çekilen ısıyı aktararak ısıl enerjiye dönüştüren ısı pompaları, yüksek verimlilikleri (COP değeri 3-5 arası) nedeniyle özellikle bina ve konut ısıtmasında giderek yaygınlaşmaktadır. Avrupa Isı Pompası Birliği (EHPA) verilerine göre, Avrupa'da 2023 yılında 3 milyon adet ısı pompası satılmış olup, bu sayının 2030'da yıllık 5 milyona çıkması beklenmektedir.



Şekil 4. Power-to-Heat (P2H)-Elektrikten Isıya Dönüşüm sistemi (<https://as-schneider.blog/2022/03/02/what-are-power-to-x-solutions/>)

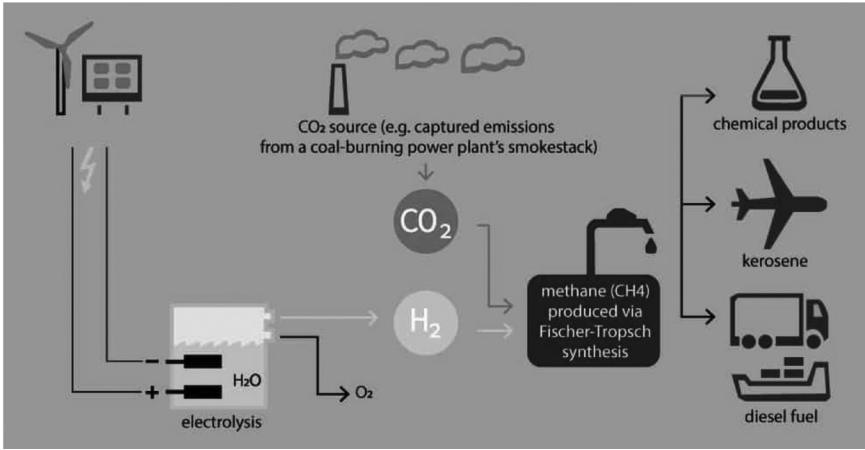
Dirençli Elektrikli Kazanlar ve Elektrot Kazanlar: Özellikle endüstriyel proses ısısı ve bölgesel ısıtma sistemlerinde kullanılan bu teknolojiler, yenilenebilir elektrik arzının bol olduğu dönemlerde şebeke dengelenmesine hizmet edebilmektedir. Almanya'daki "Future Energy Solution"

projesi, rüzgâr enerjisi fazlasını 40 MW kapasiteli elektrot kazanlarla bölgesel ısı ağına aktararak başarılı bir şebeke hizmeti sunmaktadır.

Power-to-Liquid (P2L) - Elektrikten Sıvı Yakıtı Dönüşüm: Hidrojen ve CO₂ kullanılarak sentetik sıvı yakıt üretimi (Şekil 5). Ulaştırma sektöründeki karbonsuzlaşmanın zorlu olduğu havacılık ve denizcilik gibi alanlar için Power-to-Liquid teknolojileri, sıfır karbonlu sıvı yakıtlar (SynFuels) üretimini sağlamaktadır. Bu süreç, temelde elektroliz yoluyla üretilen yeşil hidrojenin, karbon yakalama teknolojileriyle elde edilen CO₂ ile birleştirilerek sentetik yakıtlara (örneğin, metanol, sentetik dizel, jet yakıtı) dönüştürülmesini içerir.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), sürdürülebilir havacılık yakıtlarının (SAF) 2050'ye kadar küresel jet yakıtı talebinin %30'unu karşılaması gerektiğini öngörmektedir.

İskandinav ülkelerinde öne çıkan projelerden "Liquid Wind", İsveç'te karbonsuz metanol üretim tesisleri kurmayı hedeflemektedir. Benzer şekilde, Şili'deki "Haru Oni" pilot tesisi, rüzgâr enerjisinden üretilen yeşil hidrojen ve atmosferik CO₂ kullanarak sentetik benzin üretimine başlamıştır (2023).



Şekil 5. Power-to-Liquid (P2L) - Elektrikten Sıvı Yakıtı Dönüşüm sistemi (<https://as-schneider.blog/2022/03/02/what-are-power-to-x-solutions/>)

Power-to-Mobility (P2M) - Elektrikten Ulaştırmaya Dönüşüm: Elektrik veya hidrojenin ulaşım sektöründe kullanımı anlamına gelmektedir (IRENA, 2023). Power-to-Mobility, yenilenebilir elektriğin ulaşım sektörüne entegrasyonunun iki ana yolunu temsil eder (Şekil 6). Bunlar:

Doğrudan Elektrifikasyon (Batarya Elektrikli Araçlar - BEA'lar): Yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektriğin, batarya elektrikli araçlarda

Dijitalleşme de entegrasyon sürecinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Akıllı şebekeler, yapay zekâ tabanlı enerji yönetim sistemleri ve dijital ikiz teknolojileri, çok sektörlü sistemlerde optimizasyon ve kararlılığı artırmaktadır (IEA, 2023).

3. Hidrojenin Entegrasyon Sistemindeki Yeri

3.1. Bağlayıcı Bir Unsur Olarak Hidrojen

Hidrojen, enerji sistemleri entegrasyonunda benzersiz bir konuma sahip olup, hem enerji taşıyıcısı hem de endüstriyel hammadde işlevi görmesi nedeniyle sektörler arası geçişlerde köprü görevi üstlenmektedir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) tarafından yayımlanan “Küresel Hidrojen Ticareti 2024” raporuna göre, hidrojenin bu çift yönlü işlevi, onu enerji dönüşümünün en stratejik bileşenlerinden biri haline getirmektedir (IRENA, 2024).

Elektrik Sektörü Entegrasyonu: Yenilenebilir kaynaklardan üretilen “yeşil hidrojen”, elektrik şebekelerinin dengelenmesinde kritik rol oynamaktadır. Özellikle rüzgâr ve güneş enerjisinin değişken üretim karakteristiği, enerji depolama çözümlerini zorunlu kılmaktadır. Hidrojen, mevsimsel depolama kapasitesi sayesinde bu alandaki en umut verici teknolojilerden biri olarak öne çıkmaktadır. Fraunhofer ISE tarafından yapılan modelleme çalışmaları, Almanya örneğinde 2035 yılına kadar elektrik sektöründeki hidrojen talebinin 80-100 TWh seviyelerine ulaşabileceğini göstermektedir (Fraunhofer ISE, 2024).

Endüstriyel Uygulamalar: Demir-çelik sektörü, küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %7’sinden sorumlu olup, hidrojen bazlı doğrudan indirgeme teknolojileri bu sektörün karbonsuzlaştırılmasında en etkili yöntem olarak kabul edilmektedir. Avrupa Birliği’nin “Clean Steel Partnership” girişimi kapsamında, 2030 yılına kadar hidrojen bazlı çelik üretim kapasitesinin 5 milyon ton/yıl seviyesine çıkarılması hedeflenmektedir (European Commission, 2024).

Kimyasal Endüstri ve Enerji Taşıyıcıları: Hidrojen, amonyak ve metanol gibi yeşil kimyasalların üretiminde temel hammadde olarak kullanılmaktadır. Özellikle yeşil amonyak, hem gübre üretiminde hem de deniz taşımacılığında karbon içermeyen yakıt olarak büyük potansiyel taşımaktadır. Japonya’nın “Fuel Ammonia” programı kapsamında, 2030 yılına kadar termik santrallerde %20 amonyak eş zamanlı yakımı hedeflenmektedir (METI, 2024).

Enerji Güvenliği ve Altyapı Esnekliği: Mevcut doğal gaz şebekelerine %20’ye varan oranlarda hidrojen karıştırılabilmesi, altyapı dönüşüm ma-

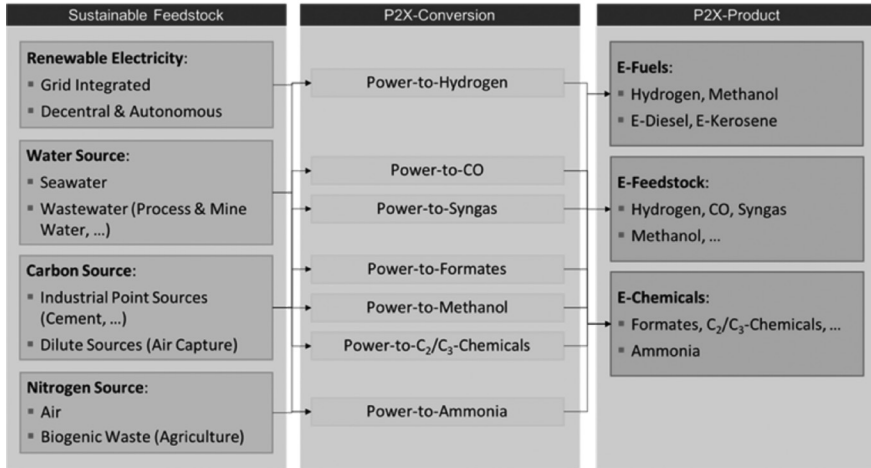
liyetlerini minimize ederken enerji güvenliğine katkı sağlamaktadır. İngiltere’de yürütülen “HyDeploy” projesi, mevcut gaz şebekelerinde %20 hidrojen karışımının teknik olarak güvenli ve uygulanabilir olduğunu kanıtlamıştır (HyDeploy, 2023).

3.2. Teknolojik Gelişmeler ve Maliyet Eğilimleri

Power-to-Hydrogen (P2H₂) teknolojisi, yenilenebilir elektriğin su elektrolizi yoluyla hidrojene dönüştürülmesini sağlayarak enerji dönüşümü ve sektör entegrasyonu için kritik bir araç haline gelmiştir (Şekil 7).

Son teknolojik gelişmeler başlıca üç elektrolizör türü üzerinde yoğunlaşmaktadır: Proton Değişim Membranı (PEM), Alkalın ve Katı Oksit Elektrolizörler (SOEC).

Son yıllarda yapılan araştırmalara göre, ticari elektrolizörlerin verimliliğinde önemli iyileşmeler kaydedilmiş olup PEM sistemleri %60-70, gelişmiş alkalın sistemler ise optimize edilmiş koşullarda %65-75 enerji verimliliğine ulaşmıştır (Buttler & Spliethoff, 2018; Shiva Kumar & Himabindu, 2019).



Şekil 7. Sürdürülebilir enerji sistemlerinin P2X teknolojileri ile ilişkisi (<https://www.fz-juelich.de/en/iet/iet-1/our-research/vision-mission/power-to-x-p2x>)

Elektroliz teknolojisinin maliyet değişimi ise kayda değer bir ilerleme göstermiştir. BloombergNEF (2024) verilerine göre, elektrolizör sermaye maliyetleri 2015’te 1.200-1.500 USD/kW seviyelerinden 2024’te yaklaşık 500 USD/kW seviyesine gerilemiş, böylece bir on yıl içinde yaklaşık %60-70’lik bir maliyet düşüşü gerçekleşmiştir. Bu maliyet azalışı, literatürde belgelenen çeşitli faktörlere bağlanmaktadır: üretimde ölçek büyümesi,

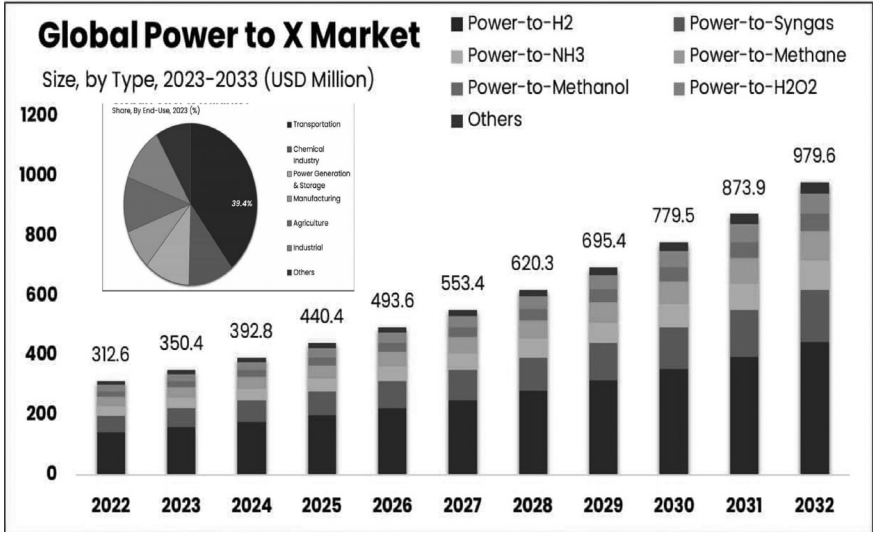
stack tasarımı ve malzemelerdeki teknolojik iyileştirmeler ve üretim süreçlerinde artan otomasyon (IRENA, 2023; Schmidt vd., 2020).

Teknolojik yenilikler performans iyileştirmeleri sağlamaya devam etmektedir. Yüksek sıcaklıklarda (700-850°C) çalışan Katı Oksit Elektrolizörler (SOEC), laboratuvar ortamında %70-80 gibi olağanüstü verimlilikler göstermiş olup, bu performansların ticari ölçekte doğrulandığı birçok pilot proje bulunmaktadır (Hauch vd., 2020). Ayrıca, PEM teknolojisindeki ilerlemeler, performansı ve dayanıklılığı korurken iridyum içeriğini azaltmaya odaklanan araştırmalarla birlikte, önceki katalizör yüklemeye ilgili sınırlamaların üstesinden gelmiştir (Babic vd., 2024).

Modern elektrolizörlerin operasyonel esnekliği de önemli ölçüde iyileşmiş olup, PEM sistemleri saniyeler içinde yük değişimlerine yanıt verebilmekte ve bu da onları kesintili yenilenebilir kaynaklarla entegrasyon için özellikle uygun kılmaktadır (IEA, 2024). Araştırmalar, yeni nesil elektrolizörlerin operasyonel ömür boyunca yüksek verimliliği korurken 80.000 saati aşan sistem ömrünü hedeflediğini göstermektedir (Falcao & Pinto, 2020).

Geleceğe bakıldığında, Uluslararası Enerji Ajansı, teknolojik yenilik ve üretim ölçeğinin büyümesi devam ettikçe elektrolizör maliyetlerinin 2030 yılına kadar 200-300 USD/kW seviyelerine kadar düşebileceğini öngörmektedir (IEA, 2023). Eşzamanlı olarak, verimlilik iyileştirmelerinin, hidrojen üretiminin seviyelendirilmiş maliyetini daha da azaltması, 2030 yılına kadar mükemmel yenilenebilir kaynaklara sahip bölgelerde yenilenebilir hidrojenin kg başına 1.5-2.5 USD'ye ulaşması beklenmektedir (Hydrogen Council, 2023).

Bu teknolojik ve ekonomik ilerlemeler, P_2H_2 'yi büyük ölçekli yenilenebilir enerji depolama, zorlanılan sektörlerin karbonsuzlaştırılması ve iklim hedeflerine ulaşmak için gerekli olan sektörler arası enerji sinerjilerinin yaratılması için giderek daha uygulanabilir bir çözüm haline getirmektedir (Şekil 8). Son kullanıma göre başlıca, Ulaşım, Kimya Endüstrisi, Güç Üretimi ve Depolama, Üretim, Tarım, Endüstriyel kullanım yer alır (Şekil 8).



Şekil 8: Türüne Göre Küresel P2X Enerji Pazarı, Bölgeye ve Şirketlere Göre - Endüstri Segmenti Görünümü, Pazar Değerlendirmesi, Rekabet Senaryosu, Trendler ve Tahmin 2024-2033 (<https://market.us/report/power-to-x-market/>)

3.3. Ulaşım ve Sanayide Kullanım

Küresel P2X pazarının büyüklüğünün, 2023'teki 312,6 milyon ABD dolarından 2033 yılına kadar yaklaşık 979,6 milyon ABD dolarına ulaşması ve 2023-2033 yılları arasındaki tahmin döneminde %12,1'lik bir beşlik yıllık büyüme oranıyla (CAGR) büyümesi beklenmektedir (<https://market.us/report/power-to-x-market/>).

1. Ulaşım Sektöründe Hidrojen Uygulamaları

Ulaşım sektörü, küresel karbon emisyonlarının yaklaşık %25'inden sorumlu olup, karbonsuzlaştırma çabalarında kritik bir öncelik alanıdır (IEA, 2023). Hidrojen teknolojileri, özellikle batarya elektrikli çözümlerin sınırlı kaldığı ağır hizmet araçları, deniz taşımacılığı ve uzun menzilli yük taşımacılığında stratejik bir alternatif sunmaktadır.

Son dönemde, yakıt hücreli elektrikli araçların (FCEV) küresel pazarındaki yayılımı dikkat çekicidir. Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre, 2023 sonu itibarıyla küresel FCEV filosu 72.000 adeti aşmış olup, bu sayının 2030'a kadar 1.5 milyona ulaşması öngörülmektedir (IEA, 2024). Japonya, "Temel Hidrojen Stratejisi" kapsamında 2030 yılına kadar 800.000 hidrojenli araç hedefini sürdürmekte ve hidrojen dolum altyapısını 1.000 istasyona çıkarmayı planlamaktadır (METI, 2024).

Avrupa Birliği'nde ise "Hidrojen Yakıt Hücreli Ortak Girişimi" tarafından desteklenen projeler VE ağır ticari araçlarda hidrojen kullanımını hızlandırmaktadır. Özellikle Almanya'nın "H2Global" inisiyatifi, yeşil hidrojenin ulaşım sektöründe rekabetçi fiyatlarla tedarik edilmesini sağlamayı amaçlamaktadır (European Commission, 2023).

Deniz taşımacılığında ise, Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün (IMO) 2050 karbon nötr hedefleri doğrultusunda, amonyak ve metanol gibi hidrojen türevli yakıtlara yönelik yatırımlar artmaktadır. "Hydrogen Europe" raporları, 2030'a kadar 150'den fazla hidrojen yakıtlı geminin hizmete gireceğini öngörmektedir (Hydrogen Europe, 2024).

2. Sanayi Sektöründe Hidrojen Entegrasyonu

Sanayi sektörü, küresel emisyonların yaklaşık %30'undan sorumlu olup, çelik, çimento ve kimya endüstrileri en zorlu karbonsuzlaştırma alanları arasında yer almaktadır (IRENA, 2023). Hidrojen teknolojileri, bu sektörlerde doğrudan indirgeme ve yüksek sıcaklıkta ısı üretimi gibi proseslerde fosil yakıtların yerini alma potansiyeli taşımaktadır.

Çelik sektöründe, hidrojen bazlı doğrudan indirgeme teknolojileri (DRI) devrim niteliğindedir. İsveç'teki HYBRIT (Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology) projesi, yeşil hidrojen kullanarak geleneksel yöntemlere kıyasla %90'a varan emisyon azaltımı sağlamayı başarmıştır (HYBRIT, 2023). Benzer şekilde, Almanya'daki "thyssenkrupp Steel" 2025 yılına kadar hidrojen bazlı çelik üretimine geçişi planlamakta ve yıllık 400.000 ton düşük karbonlu çelik üretim kapasitesi hedeflemektedir.

Çimento sektöründe ise, Heidelberg Materials'ın Norveç'teki "CCS ve Hidrojen Entegre" projesi, klinker üretiminde hidrojen kullanımıyla %50 emisyon azaltımı hedeflemektedir (Heidelberg Materials, 2024). Aynı şekilde, Türkiye'den OYAK Çimento'nun "Hidrojen Yakıtlı Klinker Üretimi" pilot projesi, sektörde öncü bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Kimya sanayinde, özellikle amonyak ve metanol üretiminde yeşil hidrojen kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. Yeni Zelanda'daki "Halcrow" projesi, %100 yenilenebilir hidrojen ile amonyak üretimi gerçekleştirirken, Suudi Arabistan'daki "NEOM" projesi yıllık 1.2 milyon ton yeşil amonyak üretim kapasitesi planlamaktadır (IRENA, 2024).

4. Küresel ve Bölgesel Politikalar

4.1. Avrupa Birliği

AB, 2020 yılında yayımladığı “EU Strategy for Energy System Integration” ile entegrasyon stratejisini resmileştirmiştir. 2030 yılına kadar 40 GW elektroliz kapasitesi ve 10 milyon ton yeşil hidrojen üretimi hedeflenmektedir (European Hydrogen Strategy, 2021) (Şekil 9).

4.2. Japonya

Japonya, 2017’de ilan ettiği “Basic Hydrogen Strategy” ile hidrojen toplumu vizyonunu benimsemiştir. Ülke, 160’tan fazla hidrojen dolum istasyonu ve 8.000’in üzerinde yakıt hücresi ile bu alanda öncü konumdadır (METI, 2024).

4.3. Amerika Birleşik Devletleri

ABD, 2022’de kabul edilen Inflation Reduction Act (IRA) kapsamında yeşil hidrojen üretimine kg başına 3 USD’ye varan vergi kredisi sağlamaktadır. Hydrogen Shot Initiative ile 2030’a kadar hidrojen maliyetinin 1 USD/kg’a düşürülmesi hedeflenmektedir (DOE, 2023).

4.4. Türkiye

Türkiye, 2023’te açıklanan “Ulusal Hidrojen Stratejisi ve Yol Haritası” ile 2035 yılına kadar 5 GW elektroliz kapasitesi ve 2 milyon ton yeşil hidrojen üretimini hedeflemektedir. Güneş ve rüzgâr potansiyeli, bu hedeflere ulaşmada önemli bir avantaj sağlamaktadır (ETKB, 2023). Bu kapsamda: TÜBİTAK MAM bünyesinde yakıt hücresi ağır ticari araç prototipleri geliştirilmekte, İSDEMİR ve ERDEMİR’de hidrojen bazlı çelik üretimi için fizibilite çalışmaları yürütülmekte, PETKİM’de yeşil amonyak üretim projeleri planlanmaktadır.

5. Politika, Finansman ve Teknoloji Dinamikleri

5.1. Politika ve Düzenleyici Çerçeve

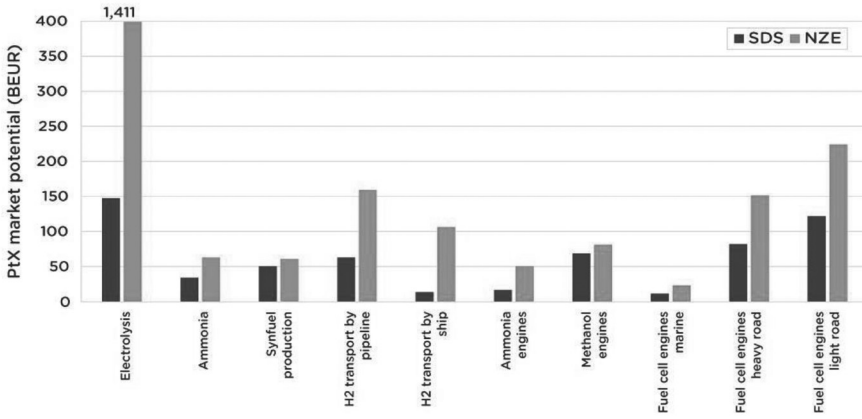
Karbon fiyatlandırma mekanizmaları ve emisyon ticaret sistemleri (ETS), entegrasyon projelerinin ekonomik olarak rekabetçi hale gelmesinde kritik rol oynamaktadır. AB ETS kapsamında karbon fiyatı 2024 itibarıyla 80-100 Euro/ton seviyelerindedir (EEX, 2024).

5.2. Finansman ve Yatırım

Avrupa Yatırım Bankası (EIB) ve Asya Kalkınma Bankası (ADB) gibi kuruluşlar, yeşil hidrojen ve P2X projelerine yönelik fonlama mekaniz-

maları oluşturmuştur. IPCEI programı kapsamında 10 milyar Euro'nun üzerinde yatırım planlanmaktadır (European Commission, 2024).

Küresel Power-to-X (P2X) pazarı, 2023-2033 yılları arasında %12,1 bileşik yıllık büyüme oranı (CAGR) ile önemli bir genişleme beklemekte olup, pazar büyüklüğünün 2033 yılına kadar 979,6 milyon ABD dolarına ulaşması öngörülmektedir (Şekil 9). Teknoloji bazında, 2023'te %44,6'lık pazar payıyla elektroliz baskın bir konumdadır ve uygulama alanları içinde Power-to-H₂ (Hidrojen) %45,3'ün üzerinde bir payla pazar liderliğini sürdürmektedir. Son kullanım sektörleri incelendiğinde, ulaşım sektörü 2023'te %39,4'lük payı ile en büyük pazar segmentini oluştururken; bölgesel dağılımda ise Avrupa, %42,1'lik pazar payı ile küresel P2X pazarındaki lider konumunu korumaktadır.



Şekil 9. Power-to-X'in 2035 yılı için küresel potansiyel pazarı, IEA'nın Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu (SDS) ve IEA'nın Net Sıfır Emisyon senaryosuna (NZE) göre tahmin edilmiştir. Kaynak: Danimarka Enerji Ajansı için 2021 yılında yapılan çalışma. (<https://www.ramboll.com/net-zero-explorers/power-to-x-explained>)

En büyük pazar potansiyeli, hem ağır hem de hafif karayolu taşımacılığında (hidrojenli kamyonlar ve otomobiller gibi) yakıt hücreli motorlarda gözlenmektedir. IEA tahminlerine göre, kamyonların karayolu taşımacılığındaki hidrojen talebinin %80'ini karşılayacağını, hafif karayolu taşıtlarının ise büyük olasılıkla elektrikli araçların hakimiyetinde olacağını tahmin ediyoruz. Deniz taşımacılığı ve deniz taşımacılığında, metanol motorları, 2035 projeksiyonlarında amonyak motorlarından ve doğrudan hidrojen yakıt hücrelerinden daha büyük bir pazar potansiyeline sahiptir.

5.3. Teknolojik Yenilik ve Dijitalleşme

Siemens Energy'nin "Smart Energy Hub" ve ABB'nin "Energy Manager" yazılımları gibi dijital çözümler, enerji akışlarının gerçek zamanlı optimizasyonunu sağlamaktadır (ABB, 2024).

6. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, sektörler arası entegrasyon ve hidrojen enerjisinin, enerji dönüşümünün birbirini tamamlayan iki temel bileşeni olduğunu vurgulamaktadır. Entegrasyon, sistem esnekliği ve güvenliği sağlarken; hidrojen, enerji taşıyıcısı ve depolama aracı olarak sektörler arasında köprü işlevi görmektedir.

Sektörler arası entegrasyon, enerji sistemlerinin karbonsuzlaştırılmasında yalnızca teknolojik bir gereklilik değil, aynı zamanda bir yönetim paradigmasıdır. Entegre sistemler, enerji güvenliğini artırır, dışa bağımlılığı azaltır ve yeni istihdam alanları yaratır.

Türkiye'nin mevcut doğal gaz altyapısı, kademeli hidrojen entegrasyonu için önemli bir potansiyel barındırmaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2023 yılında yayımladığı "Ulusal Hidrojen Stratejisi ve Yol Haritası"nda, 2035 yılına kadar doğal gaz şebekelerinde %20 hidrojen karışım oranı hedefi belirlenmiştir. Ayrıca, TÜBİTAK MAM tarafından yürütülen "Hidrojen Vadi" projesi, yerli elektrolizör teknolojisi geliştirilmesi ve sektörler arası entegrasyon çözümleri üzerine odaklanmaktadır (ETKB, 2023).

Sonuç olarak, hidrojenin çok yönlü karakteri, onu enerji sistemleri entegrasyonunun merkezine yerleştirmekte ve karbonsuzlaştırma hedeflerine ulaşmada vazgeçilmez bir enabler konumu kazandırmaktadır. Ancak bu potansiyelin gerçekleştirilebilmesi için altyapı yatırımları, düzenleyici çerçeveler ve Ar-Ge faaliyetlerinin koordineli bir şekilde yürütülmesi gerekmektedir.

Kaynakça

- ABB. (2024). Energy Management and Hydrogen Integration Solutions. ABB Publications.
- Acaroğlu, F. (2022). *Türkiye’de hidrojen potansiyeli ve enerji dönüşümü*. Enerji Politikaları Dergisi, 14(2), 45–63.
- BloombergNEF. (2024). Hydrogen Market Outlook 2024. BNEF.
- BMWK. (2023). Nationale Wasserstoffstrategie. German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action.
- BP. (2024). BP Energy Outlook 2024. BP Global Publications.
- Demirbaş, M. (2023). *Yenilenebilir enerji ve hidrojen entegrasyonu: Türkiye örneği*. Journal of Energy Systems, 19(1), 112–129.
- DOE. (2023). U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap. U.S. Department of Energy.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). Türkiye Ulusal Hidrojen Stratejisi ve Yol Haritası. Ankara.
- ETKB (2023). Türkiye Ulusal Hidrojen Stratejisi ve Yol Haritası
- European Commission. (2020). EU Strategy for Energy System Integration. Brussels.
- European Commission. (2023). *EU strategy for energy system integration*. Brussels: European Commission. https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/hydrogen_en
- European Commission. (2023). REPowerEU Plan. Brussels.
- European Commission (2024). Clean Steel Partnership Progress Report
- Fraunhofer ISE (2024). Sector Coupling and Hydrogen Integration Scenarios
- Fraunhofer ISE. (2024). Sector Coupling Demonstration Projects. Freiburg.
- Glenk, G., & Reichelstein, S. (2022). Economics of hydrogen production. *Nature Energy*, 7(2), 124–132. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00978-8>
- HyDeploy (2023). Hydrogen Blending Project Final Report
- Hydrogen Council. (2024). Global Hydrogen Report 2024.
- IEA. (2023). Renewables and Hydrogen Integration Report. Paris.
- IEA. (2024). World Energy Outlook 2024. Paris.
- International Energy Agency (IEA). (2024). *Global hydrogen review 2024*. Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/hydrogen-demand>
- International Energy Agency (IEA). (2024). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/an-updated-roadmap-to-net-zero-emissions-by-2050>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024). *Hydrogen: Technology outlook and policy pathways*. Abu Dhabi: IRENA.
- IRENA. (2023). Sector Coupling and Energy Transformation. Abu Dhabi.

- IRENA (2024). Global Hydrogen Trade: Outlook 2024
- IRENA. (2024). Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal. Abu Dhabi.
- Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., & Mathiesen, B. V. (2024). *Smart energy systems and sector coupling: The pathway to decarbonization*. Energy, 277, 125274. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.125274>
- Markard, J., & Hoffmann, V. H. (2016). Analysis of the research on hydrogen and fuel cell systems. *Energy Policy*, 98, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.08.024>
- METI (2024). Japan's Green Growth Strategy Through Achieving Carbon Neutrality
- METI. (2024). Basic Hydrogen Strategy Update. Tokyo.
- Robinius, M., Grube, T., Otto, A., et al. (2020). Power-to-X: Technology overview and system integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109626. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109626>
- Schmidt, O., Hawkes, A., Gambhir, A., & Staffell, I. (2019). The future cost of electrical energy storage based on experience rates. *Nature Energy*, 2(8), 17110. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.110>
- SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi. (2021). Öncelikli alanlar: Türkiye için ulusal hidrojen stratejisi. İstanbul: SHURA. <https://www.shura.org.tr>
- Zeyen, E., Brown, T., & Müller, B. (2023). Modeling hydrogen integration in European energy systems. *Applied Energy*, 334, 120834. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120834>

Bölüm 4

**6831 SAYILI ORMAN KANUN’UNUN
EK 16.NCI MADDESİ KAPSAMINDA
ORMAN SINIRLARI DIŞINA ÇIKARTMA
İŞLEMLERİNE 6 İLİŞKİN YAPILAN
ÇALIŞMALAR: NURDAĞI (HİSAR
MAHALLESİ) ÖRNEĞİ**

Doç. Dr. Nazım NACAR¹

¹ Doç. Dr. Fazıl NACAR, fazılncar@osmaniye.edu.tr, ORCID:0000-0001-8434-5038

1. GİRİŞ

Devletin hüküm ve tasarrufu altında bulunan ormanlar, özel yasa kurallarına bağlıdırlar (3402 sayılı Kadastro Yasası, Madde: 16/D). Ormanın hazine adına tapuya tescil edilmesi, herhangi bir harç, vergi veya resim ödenmeksizin (6831 sayılı Orman Kanunu, Madde 11), ormanla ilgili kuralları değiştirmez ve ormanın kamu malı olma özelliğini kaybetmesine neden olmaz. Ayrıca, yetkili kurum (Orman Genel Müdürlüğü) tarafından kamu malından çıkarılmadan, gerçek kişiler adına tapuya tescil edilmesi veya zamanaşımı yoluyla edinilmesi mümkün değildir. (Köktürk, E.(2024)

“Türkiye’de Genel Hayata Etkileyen Afetler Nedeniyle Alınacak Önlemler Yapılacak Yardımlara Dair Kanun”,(7269 sayı,1959 tarih) tabii afetler sonucu, umumî hayatı etkileyecek derecede yapı ve tesislerin hasar gördüğü veya hasar görme ihtimalinin bulunduğu yerlerde alınacak tedbirler ve yapılacak yardımlara ilişkin esasları belirlemektedir. Dolayısıyla afetten önce ve afetten sonra yapılacak yardım ve afete maruz kalanların yeniden iskânlarının sağlanmasını gerçekleştirmek üzere yetkilendirilen kamu idaresinin de görev ve yetkilerini belirlemektedir. İskân faaliyeti deyince haliyle afete maruz kalan kişi veya kurumların yeniden yerleştirileceği güvenli alanlar akla gelmektedir. Tam da burada ormanların kamu yararına konu olan barınma fonksiyonu ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda 7269 sayılı kanuna ilaveten 1999 yılında Ek 10. Madde eklenmiştir. Buna göre: “Orman Bakanlığınca, Orman sınırlarından çıkarılmış veya çıkarılacak olan, orman olarak korunması bilimsel ve teknik açıdan olanaksız olan ve tarımsal arazi olarak dönüşmesi olanaklı olmayan alanlar, kamu hayatını etkileyen doğal afet bölgelerinde devlet kurumları ile diğer afetzedelerin iskânını sağlamak üzere ilgili bakanlığa devredilebilir.” denilmektedir. (AFAD, 2015; Tolunay, A., Karahan, E., Türkoğlu, T. (2024).)

Öte yandan, henüz sınırlandırma ve tescil işlemleri tamamlanamamışken 1970 yılında 1255 Sayılı Kanun ile yapılan Anayasa değişikliği ve 1973 yılında 6831 Sayılı Orman Kanun’unda 1744 Sayılı Kanun ile yapılan değişikliklerle orman niteliğini kaybeden alanların orman rejimi dışına çıkarılması işlemleri başlatılmıştır (Türker, 2003). 2/B olarak bilinen bu uygulamalar ilerleyen yıllarda 2896 ve 3302 sayılı kanunlarla bazı değişikliklere uğrayarak günümüze kadar süre gelmiştir. İlk olarak 1744 sayılı kanunla; 15.10.1961 tarihinden önce bilim ve fen bakımından orman niteliğini tam olarak kaybetmiş yerlerin orman sınırı dışına çıkartılmasına olanak sağlanmıştır. Bu uygulamalar sonucunda 1.025,6 km² alan orman sınırı dışına çıkarılmıştır (Köktürk ve Köktürk, 2004). 2007; URL-2, 2005)

2/B uygulamaları sonucunda 3302 sayılı kanunla birlikte (3.438,29 km²) toplam 4.734,19 km² alan orman sınırları dışına çıkarılmıştır (Köktürk ve Köktürk, 2004). Öz bir ifadeyle, 2/B uygulamaları ile günümüze kadar orman varlığımızın yaklaşık %3'ü orman sınırları dışına çıkartılmıştır. Başlangıçtaki amacı, orman köylülerine yerleşim ve tarımsal etkinlikler için yer sağlayarak köylünün yaşam koşullarını iyileştirmek olarak belirlenebilen 2/B uygulamaları; günümüzde bütçeye önemli bir parasal kaynak sağlayıcı olarak görülmektedir.

1.369 adet birimde Orman yasası (6831) 2. Maddesinin b fıkrası çalışmaları bitirilmiş, 626 adet birimde ise Orman Kanun'una (6831) göre orman kadastro yapılan birliklerde teknik hataların düzeltilmesi ve tescile hazır hale getirilmesi işlemleri tamamlanmıştır. 2024 yılında; 3302 sayılı Kanunla değişik Orman yasası (6831) 2. Maddesinin b fıkrası kapsamında 12.000 hektar, - Orman yasasının (6831) Ek 16 ncı maddesi kapsamında 905,45 hektar, - Genel Hayata Etken Afetler Nedeniyle Alınacak Önlemlerle Yapılacak Yardımlar Hakkında Kanunun Ek 10 uncu maddesi kapsamında 905,45 hektar, 25,02 hektar – 6292 sayılı Orman Köylülerinin Kalkınmalarının Desteklenmesi ve Hazine Adına Orman Sınırları Dışına Çıkarılan Yerlerin Değerlendirilmesi ve Hazineye Ait Tarım Arazilerinin Satışı Hakkındaki Kanunun 4. maddesi kapsamında 24 hektar tahsis yapılmıştır. – Cumhurbaşkanlığı 6785 sayı ve 08/02/2023 tarihli Kararnamesi ile ilan edilen olağanüstü hal kapsamındaki illerde iskân ve yapılaşmaya ilişkin bazı tedbirlerin alınmasına dair 7452 sayılı Kanun kapsamında 975,13 hektar tahsis yapılmıştır. (ogm 2024 faaliyet raporu)

BÖLGE MÜDÜRLÜĞÜ	6831 SAYILI ORMAN KANUNU KAPSAMINDA YAPILAN 2/B UYGULAMASI			6831 SAYILI ORMAN KANUNUNA GÖRE ORMAN KADASTROSU YAPILAN BİRİMLERİN FENNİ HATALARININ GİDERİLEREK TESCİLE HAZIR HALE GETİRİLMESİ			UYGULAMA SONUCU	
	YIL SONU PROGRAM		UYGULAMA	YIL SONU PROGRAM		UYGULAMA		
	Adet/Birim	TL		Adet/Birim	TL		Adet/Birim	TL
1 ADANA	13	780.000	13	9	540.000	9	22	1.003.825
2 AMASYA	66	3.960.000	66	73	4.380.000	121	187	3.200.980
3 ANKARA	120	7.200.000	120	11	660.000	11	131	8.345.917
4 ANTALYA	11	660.000	11	18	1.080.000	29	40	882.952
5 ARTVİN	15	900.000	15	25	1.500.000	33	48	362.472
6 BALIKESİR	13	780.000	13	2	120.000	2	15	2.909.085
7 BOLU	77	4.620.000	77	3	180.000	3	80	3.092.714
8 BURSA	30	1.800.000	21	8	480.000	8	29	2.091.407
9 ÇANAKKALE	43	2.580.000	13	4	240.000	4	17	714.470
10 DENİZLİ	30	1.800.000	24	10	600.000	10	34	1.875.791
11 ELAZĞ	243	14.580.000	243	10	600.000	10	253	12.820.870
12 ERZURUM	96	5.760.000	87	14	840.000	12	99	4.054.428
13 ESKİŞEHİR	27	1.620.000	27	6	360.000	6	33	804.500
14 GİRESUN	48	2.880.000	46	80	4.800.000	103	149	1.411.879
15 HATAY	12	720.000	12	17	1.020.000	17	29	869.169
16 İSPARTA	21	1.260.000	21	5	300.000	5	26	2.827.420
17 İSTANBUL	59	3.540.000	38	5	300.000	5	43	3.247.650
18 İZMİR	47	2.820.000	42	12	720.000	12	54	1.501.370
19 KAHRAMANMARAŞ	38	2.280.000	24	4	240.000	4	28	2.993.573
20 KASTAMONU	37	2.220.000	35	21	1.260.000	21	56	1.277.083
21 KAYSERİ	13	780.000	8	18	1.080.000	18	26	1.625.156
22 KONYA	23	1.380.000	20	8	480.000	8	28	554.763
23 KÜTAHYA	37	2.220.000	32	9	540.000	9	41	2.112.977
24 MERSİN	36	2.160.000	36	4	240.000	4	40	786.641
25 MUĞLA	112	6.720.000	112	13	780.000	13	125	10.591.249
26 SAKARYA	51	3.060.000	38	9	540.000	9	47	3.878.855
27 SİNOP	12	720.000	12	15	900.000	15	27	315.709
28 ŞANLIURFA	108	6.480.000	101	2	120.000	2	103	4.299.747
29 TRABZON	49	2.940.000	49	22	1.320.000	22	71	1.608.318
30 ZONGULDAK	13	780.000	13	63	3.780.000	101	114	444.856
TOPLAM	1.500	90.000.000	1.349	500	30.000.000	626	1.995	82.705.827
MERKEZ					10.000.000			3.902.202
TAPU VE KADASTRO GENEL MÜDÜRLÜĞÜ								358.000.000
GENEL TOPLAM	1.500	90.000.000	1.349	500	40.000.000	626	1.995	444.688.829

Ek 4: Orman Kadastro Projesi Uygulama Sonuçlarının Orman Bölge Müdürlükleri Dağılımı, 2024

Şekil 1. Türkiye orman kadastro çalışmaları (URL.5)

OGM tarafından henüz 7269 Sayılı Kanun'un Ek 10. Maddesi Uygulama Yönetmeliği yayımlanmamış olsa da teamüller ve diğer ormandan çıkarma uygulamaları ışığında afetzedelere ormandan yer tahsisi yapılmaya devam etmektedir. Kapsamlı bir mevzuat çalışması yapılarak, çıkarılacak olan uygulama yönetmeliği ile afetzedelere ormandan yer tahsisi yapıldığı taktirde orman alanları üzerindeki insan baskısının ormana olan zararları da ortaya konulmalıdır. Ayrıca afetzedelerin iskânı için or-

mandan çıkarılan alanlara karşılık en az iki katı büyüklükte alan olmak koşulu ile tapuya kayıtlı Maliye Hazinesi arazilerinden ağaçlandırmaya uygun olan yerler tespit edilip ağaçlandırılmak üzere orman vasfıyla tescil edilmelidir. Hepsinden önemlisi; olası afet durumlarında yöre halkının yeniden iskâna tabi tutulacağı alanlar afet eylem planı ile önceden belirlenmeli, tapuda Maliye Hazinesi adına “Ham Toprak”, “Mera” ve “Orman” vasfıyla tescilli parsellerden yerleşime uygun alanlar belediyelerin ilgili yöneticileri ile muhtarların da görüşleri alınmak suretiyle tespit edilerek ilgili Bakanlıklar arasında yapılacak protokollerle rezerv alanı olarak ilan edilmelidir. İlan edilecek alanların tapu sicilinin beyanlar ve şerhler hanesinde hiçbir surette başka bir amaca tahsis edilemeyeceği ve afet sonrası iskân yeri rezerv alanı olduğu belirtilmelidir. Böylece afetin meydana geldiği yerlerde yöre halkının afet sonrası yerleştirilecekleri alanlarla ilgili iskâna uygun alanları tespit etmek ve yer seçimi yapmak için zaman kaybedilmemiş olacaktır (Tercan, 2020; Tolunay, A. ve ark. ,2024).

Orman sınırlarından çıkarma süreci, Nisan 2018’de torba yasa ile yürürlüğe giren Orman Kanunu’na 16. maddenin eklenmesiyle yeni bir boyut kazanmıştır ve Cumhurbaşkanı’na dilediği orman alanını orman rejiminden çıkarma yetkisi verilerek orman sınırlarından çıkarma süreci yeni bir boyut kazanmıştır. 2018 yılına kadar iskân edilmiş orman alanlarının orman sınırlarından çıkarılması mümkün hale gelmiştir. (Uysal, B., Birben, Ü. 2023.)

Gaziantep ilinin orman varlığı 2024 yılı itibarıyla 112.617 ha alana il yüzölçümünün %0,48 ine karşılık gelmektedir. Nurdağı ilçesinde 13949.9 ha verimli, 10860 ha verimsiz ve 47979,4 ha açık alan olmak üzere 72789,2 ha orman alan bulunmaktadır.

Bu çalışmada Nurdağı ilçesi sınırlarındaki ormanla iç içe olan Hisar mahallesinde Ek.16 madde kapsamında yapılan çalışmalar ve orman ve milli emlak teşkilatına yapılan başvurular örnekleriyle değerlendirilmiş ve yapılan hazırlık çalışmaları örnekleriyle açıklanmıştır.

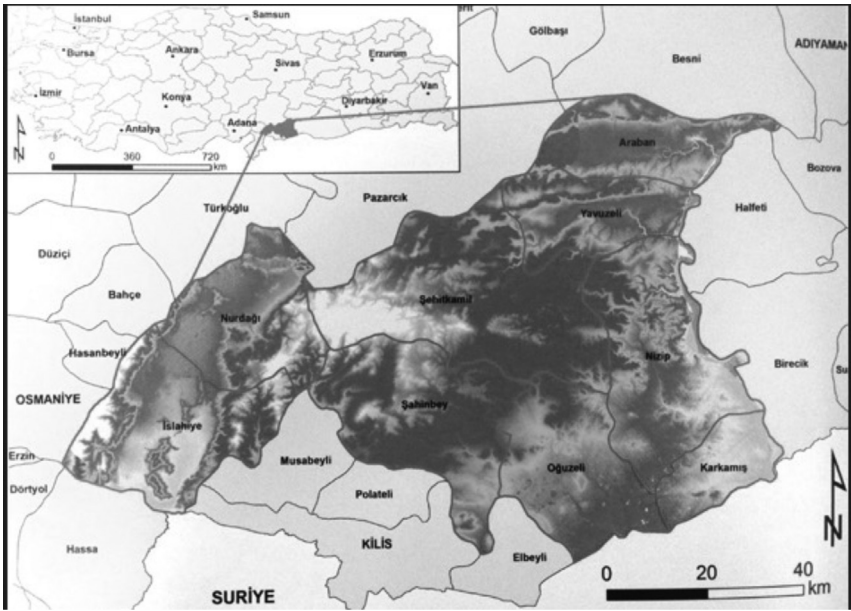
2. ÇALIŞMA ALANI

Nurdağı ilçesi Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinin kesişme noktasında yer alan bir komundadır. İlçenin doğusu Şahinbey ve Şehitkamil merkez ilçeleri (Gaziantep), batısı Bahçe ilçesi (Osmaniye), kuzeyi Türkoğlu ve Pazarcık ilçeleri (Kahramanmaraş), güneyi İslahiye ilçesi (Gaziantep) ile çevrilidir. (URL-1; URL-2). İlçenin TÜİK verilerine göre 2022 yılı nüfusu 41322 (URL-3). 2023 yılı nüfusu 39465 kişi (depremden sonra) olarak belirlenmiştir. Nurdağı ilçesinin konumu Şekil 2’de verilmiştir. 27 /02/1976 da belde olan Nurdağı, 1990 yılında ilçe olmuştur. (İçişleri Bakanlığı kararıyla)

Nurdağı ilçesi güneydoğu illerinin akdenize açılan kapısı durumundadır. Osmaniye, Gaziantep, K. maraş, Hatay, Gaziantep, Hatay ve Osmaniye K. maraş yollarının kesişim noktası, içerinden oto yolların, hızlı tren hattının geçtiği uzun demiryolu ve otoyol tünellerinin olduğu yüksek boyutlu viyadüklerin bulunduğu bir konumdadır.

Nurdağı ilçesi doğu Toroslarla birleşen Amanos dağlarının ovayla birleştiği yerdedir. İlçe 14 ü kentsel ve 36 kırsal mahalleden oluşmaktadır. Şehrin nüfusunun yarıya yakını kırsal mahallelerde yaşamaktadır. Kadastro sisteminde 45 mahalle varken, Maks sisteminde 50 mahalle bulunmaktadır.

Bu 50 mahallenin 13 ü orman içi ve 25'i de ormanla komşudur.



Şekil. 2 Nurdağı Fiziki haritası (URL. 4)

TABLO 1. Nurdağı ilçesi orman yada ormana komşu köy listesi.

NURDAĞI ORMAN İŞLETME ŞEFLİĞİ SINIRLARINDA KALAN ORMAN YADA KOMŞU KÖYLER

SIRA NO	İL	İLÇE	MAHALLE ADI	31. VE 32. MADDE	NÜFUS
1	GAZİANTEP	NURDAĞI	KATRANCI (TORUNLAR)	ORMAN İÇİ	142
2	GAZİANTEP	NURDAĞI	KARABURÇLU	ORMAN İÇİ	98
3	GAZİANTEP	NURDAĞI	ATMALI	ORMAN İÇİ	306
4	GAZİANTEP	NURDAĞI	BAŞPINAR	ORMAN İÇİ	498
5	GAZİANTEP	NURDAĞI	DURMUŞLAR	ORMAN İÇİ	240
6	GAZİANTEP	NURDAĞI	GÖKÇEDERE	ORMAN İÇİ	492
7	GAZİANTEP	NURDAĞI	HAMİDİYE	ORMAN İÇİ	388
8	GAZİANTEP	NURDAĞI	KIRKPINAR	ORMAN İÇİ	334
9	GAZİANTEP	NURDAĞI	BADEMLİ	ORMAN İÇİ	429
10	GAZİANTEP	NURDAĞI	KUZOLUK	ORMAN İÇİ	283
11	GAZİANTEP	NURDAĞI	KARTAL	ORMAN İÇİ	1784
12	GAZİANTEP	NURDAĞI	TANDIRLI	ORMAN İÇİ	111
13	GAZİANTEP	NURDAĞI	OLUCAK	ORMAN İÇİ	404
14	GAZİANTEP	NURDAĞI	BALIKALAN	ORMANA KOMŞU	184
15	GAZİANTEP	NURDAĞI	BELPINAR	ORMANA KOMŞU	145
16	GAZİANTEP	NURDAĞI	DEMİRLER	ORMANA KOMŞU	101
17	GAZİANTEP	NURDAĞI	EMİRLER	ORMANA KOMŞU	142
18	GAZİANTEP	NURDAĞI	GEDİKLİ	ORMANA KOMŞU	367
19	GAZİANTEP	NURDAĞI	GÖZLÜHÜYÜK	ORMANA KOMŞU	554
20	GAZİANTEP	NURDAĞI	İKİZKUYU	ORMANA KOMŞU	152
21	GAZİANTEP	NURDAĞI	İNCEGEDİK	ORMANA KOMŞU	191
22	GAZİANTEP	NURDAĞI	İNCİRLİ	ORMANA KOMŞU	512

23	GAZİANTEP	NURDAĞI	KÖMÜRLER	ORMANA KOMŞU	415
24	GAZİANTEP	NURDAĞI	KURUDERE	ORMANA KOMŞU	1203
25	GAZİANTEP	NURDAĞI	MESTHÜYÜK	ORMANA KOMŞU	173
26	GAZİANTEP	NURDAĞI	ÇİMLER	ORMANA KOMŞU	187
27	GAZİANTEP	NURDAĞI	NOGAYLAR	ORMANA KOMŞU	435
28	GAZİANTEP	NURDAĞI	TERKEN	ORMANA KOMŞU	654
29	GAZİANTEP	NURDAĞI	TOPLAMALAR (ALTINOVA)	ORMANA KOMŞU	290
30	GAZİANTEP	NURDAĞI	ATAKÖY	ORMANA KOMŞU	88
31	GAZİANTEP	NURDAĞI	ÇAKMAK	ORMANA KOMŞU	209
32	GAZİANTEP	NURDAĞI	İÇERİSU	ORMANA KOMŞU	470
33	GAZİANTEP	NURDAĞI	TÜLLÜCE	ORMANA KOMŞU	286
34	GAZİANTEP	NURDAĞI	YAYLACIK	ORMANA KOMŞU	92
35	GAZİANTEP	NURDAĞI	SAKÇAGÖZÜ	ORMANA KOMŞU	4621
36	GAZİANTEP	NURDAĞI	ŞATIRHÜYÜK	ORMANA KOMŞU	2658
37	GAZİANTEP	NURDAĞI	KIRIŞKAL	ORMANA KOMŞU	284
38	GAZİANTEP	NURDAĞI	ATALAR	ORMANA KOMŞU	2224

Tablo 1 de görüldüğü gibi Nurdağı ilçesinin 50 mahallesinin 13 ü orman içi mahalle ve 25'i de ormana komşu mahalle statüsündedir.

Nurdağı ilçesi kırsal mahallerinde ormanla ilişkili olan on (10) mahallede orman sınırı dışına çıkartma ile konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Orman yasasının Ek.16. maddesi gereği yapılan ve başka şehirlerde uygulamaları bulunan bu çalışma için sınırlandırma haritaları hazırlanarak müracaat da bulunulmuştur. (Tablo 2)

TABLO 2. Nurdağı ilçesi Ek.16 talebinde bulunulan köy listesi

Sıra no	Mahalle adı	Ev sayısı
1	ATMALI	4
2	BAŞPINAR	9
3	BELPINAR	10
4	HAMİDİYE	4
5	HİSAR	17
6	KARTAL	150
7	KURUDERE	10
8	KUZOLUK	8
9	OLUCAK	1
10	TERKEN	1

Çalışma yapılan kırsal mahallelerde 214 adet konut orman arazisinde kalmakta olup bu uygulama yapıldığında bu yapıların yıkılması durdurulmuş olacaktır. Arazi öncelikle maliye hazinesi adına tescil olacak ve sonrada kullanıcısına satışı yapılabilecektir.

Orman işletme şefliğinden alınan verilere göre Kartal şefliğinde 164 adet 2018 sonrası yapı için, 244 adet yapının da 2018 öncesi zaptı tutulmuştur. Ayrıca Nurdağı şefliğinin ise 76 adet yapı için 2018 öncesi ve 27 adet yapının zaptı ise 2018 sonrası tutulmuştur. Toplamda 511 yapının zaptı tutulmuştur. Bu yapıların 214 adedi Ek. 16 kapsamında orman sınırı dışına çıkarma kapsamında kalmaktadır.

3. UYGULAMA ALANI

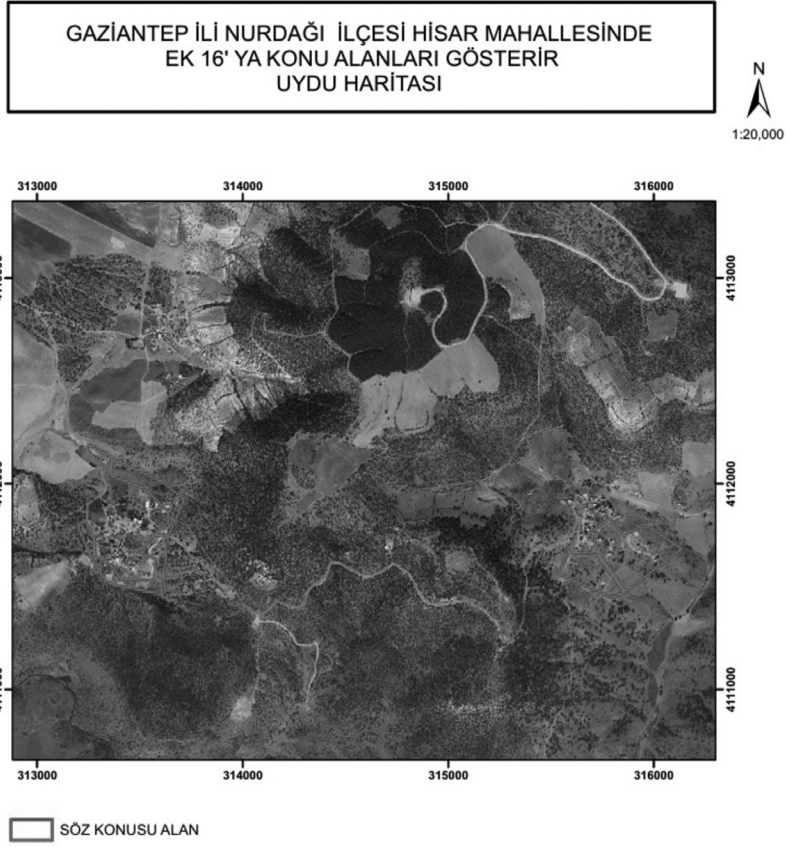
3.1 Hisar mahallesi Ek. 16 çalışmaları

Hisar mahallesi (köyü) Nurdağı ilçe merkezine 19 km mesafede orman içi ve en kalabalık bir yerleşim yeridir. Hisar köyünün nüfusu yaklaşık 660 kişidir.



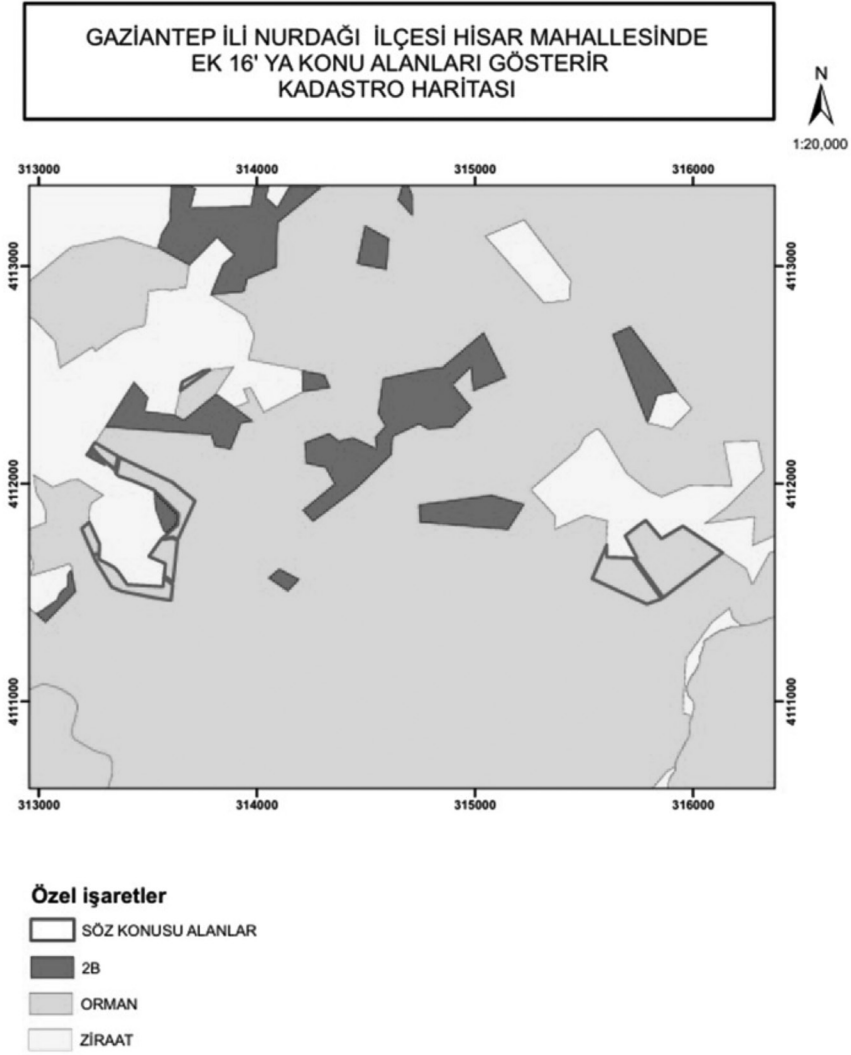
Şekil 3. Hisar mahallesi sınırı (parsel sorgu sistemi)

Hisar mahallesi 2300 hektarlık alansal büyüklüğü sahiptir. Bu alanın yüzde 300'i ormandan oluşmaktadır. Hisar mahallesinde 2018 sonrası 17 konut ormanda kalmakta olup bu konutların orman sınırı dışına çıkarılması için Nurdağı belediyesi tarafından milli emlak şefliğine müracaat da bulunulmuştur.



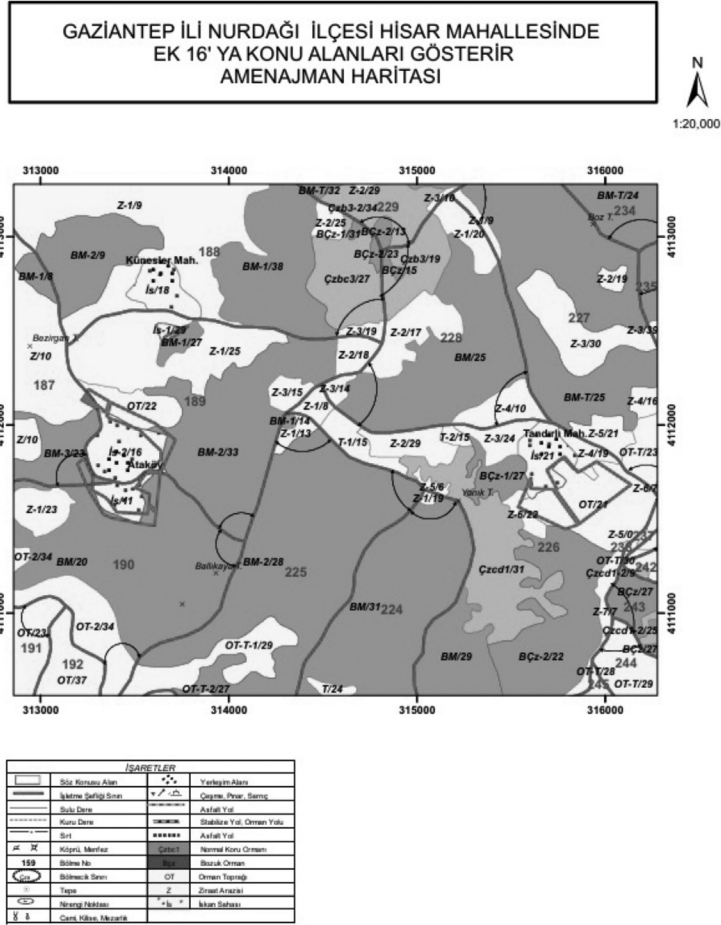
Şekil 4. Hisar mahallesi ek.16 sınırları

Şekil 4 de Hisar mahallesi ek.16 çalışması kapsamında orman sınırı dışına çıkarılması talep edilen alanlar gözükme(k)tir(a). Bu alan yaklaşık 123 ha kadardır. (b) de konutlar detaylı gözükme(k)tir.



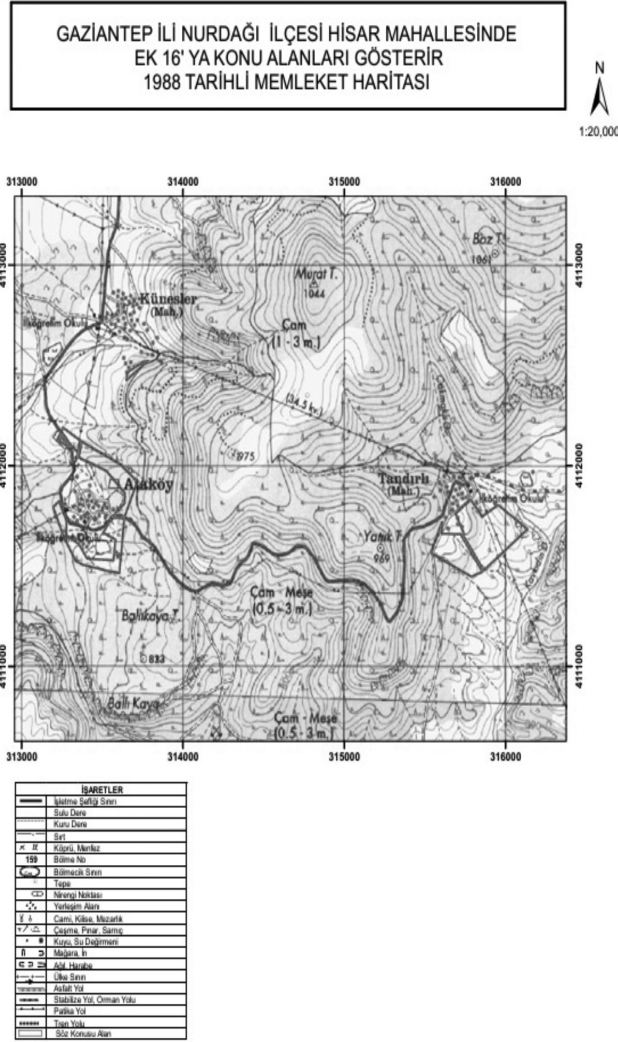
Şekil 5. Hisar mahallesi orman kadastro haritası

Şekilde hisar mahallesi orman arazi ve ek.16 için çalışma yapılan yerler gözükmemektedir. Orman kadastro haritasında sarı renkler ziraat arazisini, yeşil renkler orman arazisini göstermektedir. Yine Ek.16 ya göre orman sınırı dışına çıkarılacak arazide kırmızıyla çizilmiştir. Görüldüğü gibi araziler tamamen yeşil renkli alanda kalmaktadır. Yani orman arazisidir.



SIRA NO	İLCE	KOY	ALAN	X	Y						
1	NURDAĞI	HİSAR	A	313573.12	4111567.30	36	NURDAĞI	HİSAR	C	313570.35	4111742.95
2	NURDAĞI	HİSAR	A	313585.81	4111557.38	37	NURDAĞI	HİSAR	C	313571.16	4111742.86
3	NURDAĞI	HİSAR	A	313613.43	4111535.81	38	NURDAĞI	HİSAR	C	313573.97	4111743.02
4	NURDAĞI	HİSAR	A	313605.82	4111464.63	39	NURDAĞI	HİSAR	C	313574.48	4111743.10
5	NURDAĞI	HİSAR	A	313528.56	4111476.27	40	NURDAĞI	HİSAR	C	313584.58	4111745.84
6	NURDAĞI	HİSAR	A	313379.34	4111505.90	41	NURDAĞI	HİSAR	C	313594.13	4111747.50
7	NURDAĞI	HİSAR	A	313333.83	4111526.01	42	NURDAĞI	HİSAR	C	313601.93	4111749.09
8	NURDAĞI	HİSAR	A	313260.80	4111644.54	43	NURDAĞI	HİSAR	C	313613.41	4111750.15
9	NURDAĞI	HİSAR	A	313248.29	4111673.00	44	NURDAĞI	HİSAR	C	313616.00	4111748.29
10	NURDAĞI	HİSAR	A	313276.05	4111673.63	45	NURDAĞI	HİSAR	C	313616.21	4111748.16
11	NURDAĞI	HİSAR	A	313275.37	4111652.88	46	NURDAĞI	HİSAR	C	313616.44	4111748.04
12	NURDAĞI	HİSAR	A	313315.57	4111631.54	47	NURDAĞI	HİSAR	C	313624.33	4111744.53
13	NURDAĞI	HİSAR	A	313345.52	4111614.99	48	NURDAĞI	HİSAR	C	313632.35	4111741.22
14	NURDAĞI	HİSAR	A	313363.22	4111596.38	49	NURDAĞI	HİSAR	C	313635.24	4111739.90
15	NURDAĞI	HİSAR	A	313372.30	4111583.30	50	NURDAĞI	HİSAR	C	313614.68	4111547.52
16	NURDAĞI	HİSAR	A	313404.63	4111536.90	51	NURDAĞI	HİSAR	C	313591.97	4111565.26
17	NURDAĞI	HİSAR	A	313568.89	4111527.25	52	NURDAĞI	HİSAR	C	313574.36	4111579.03
18	NURDAĞI	HİSAR	A	313573.12	4111567.30	53	NURDAĞI	HİSAR	D	313276.19	4111677.63
19	NURDAĞI	HİSAR	B	315856.12	4111470.98	54	NURDAĞI	HİSAR	D	313246.55	4111676.96
20	NURDAĞI	HİSAR	B	315788.21	4111446.53	55	NURDAĞI	HİSAR	D	313195.19	4111793.77
21	NURDAĞI	HİSAR	B	315538.16	4111563.72	56	NURDAĞI	HİSAR	D	313231.14	4111823.26
22	NURDAĞI	HİSAR	B	315605.20	4111718.92	57	NURDAĞI	HİSAR	D	313277.70	4111723.27
23	NURDAĞI	HİSAR	B	315604.66	4111662.68	58	NURDAĞI	HİSAR	D	313276.19	4111677.63
24	NURDAĞI	HİSAR	B	315721.63	4111658.45	59	NURDAĞI	HİSAR	E	315783.26	4111831.33
25	NURDAĞI	HİSAR	B	315724.00	4111655.16	60	NURDAĞI	HİSAR	E	315855.43	4111747.39
26	NURDAĞI	HİSAR	B	315813.12	4111531.13	61	NURDAĞI	HİSAR	E	315953.68	4111805.02
27	NURDAĞI	HİSAR	B	315856.12	4111470.98	62	NURDAĞI	HİSAR	E	316118.38	4111695.26
28	NURDAĞI	HİSAR	C	313574.36	4111579.03	63	NURDAĞI	HİSAR	E	316136.12	4111683.44
29	NURDAĞI	HİSAR	C	313574.36	4111579.03	64	NURDAĞI	HİSAR	E	315864.12	4111476.97
30	NURDAĞI	HİSAR	C	313580.02	4111632.73	65	NURDAĞI	HİSAR	E	315821.24	4111536.96
31	NURDAĞI	HİSAR	C	313504.48	4111666.18	66	NURDAĞI	HİSAR	E	315734.27	4111657.99
32	NURDAĞI	HİSAR	C	313561.65	4111745.89	67	NURDAĞI	HİSAR	E	315734.27	4111657.99
33	NURDAĞI	HİSAR	C	313562.40	4111746.53	68	NURDAĞI	HİSAR	E	315744.33	4111657.63
						69	NURDAĞI	HİSAR	E	315689.89	4111760.85
						70	NURDAĞI	HİSAR	E	315749.31	4111807.67
						71	NURDAĞI	HİSAR	E	315783.26	4111831.33
						72	NURDAĞI	HİSAR	G	313293.76	4112098.57
						73	NURDAĞI	HİSAR	G	313299.70	4112089.43

Şekil 7. Hisar mahallesi koordinat listesi



Şekil 8. Hisar mahallesi koordinat listesi 1/25000'lik harita üzerindeki görünüşü

Şekilde Hisar mahallesinin Ek.16 çalışmalarının koordinatları gösterilmiştir. Ayrıca 1/25000 ölçekli memleket haritası üzerine kırmızı renkle çizilmiş ek.16 sınırları gözükmemektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

7139 Sayılı Orman Kanunu'nun Ek 16.ncı Maddesi Kapsamında orman olarak korunmasında fayda görülmeyen tarım alanına dönüşmesi mümkün olmayan arazilerin orman sınırı dışına çıkarılması ön görülmektedir. Bu arazilerin üzerinde 2018'den önce yerleşim yeri olması ya da

taşlık kayalık, verimsiz ve halen orman vasfında olmayan arazilerden olması şartı aranmaktadır. Hazine orman sınırı dışına çıkarılan yerlerin yüzölçümün iki katı kadarını orman için tahsis yapılmaktadır.

Bu olay görünüşte orman alanlarını küçülmesinin aksine büyümesini sağlıyor gibi gözükse de 2018'den önce yapılan orman tahribatına bir nevi af getirmektedir. 2-b çalışmalarıyla orman vasfını kaybeden araziler kullanıcılarına satılırken yeni düzenleme ile (ek.16) tarih daha da güncellenmiş olmaktadır. Ayrıca bu olay orman tahribatını artmasına neden olmaktadır.

Çalışma bölgemizin deprem bölgesi olması, depremin etkisiyle birçok orman alanı mücbir sebep gösterilerek olağan üstü hal kapsamında orman vasfını kaybederek arsa vasfına ve dolayısıyla yapılaşmaya açılmıştır. Depremin etkisinin çok geniş alanda ve büyük olması orman arazilerine konut yapımına (hızlı ve daha az maliyetli olduğu için) çaresiz olarak yol açmıştır.

Bu çalışmada Ek. 16 için yapılan teknik çalışmalardan örnekler sunulmuştur. Bu işlemlerden sonra milli emlak müdürlüğü, orman teşkilatına başvuracak, orman teşkilatı tarafından kurulan komisyonca arazide inceleme yapılacak ve uygun görülenler Cumhurbaşkanlığının onayı ile orman sınırı dışına çıkarılacaktır. Milli emlak adına tescil yapılacak ve milli emlak bu arazinin iki katı hazine arazisini orman için tahsis yapacaktır.

KAYNAKÇA

- AFAD (2015). Afet ve Acil Durumlara İlişkin Temel Mevzuat, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- KÖKTÜRK Erdal, (2004) Orman Kadastro, Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi
- Tercan, B. (2020). Afet bölgelerinde yeniden yerleştirme ve iskân politikaları: doğubayazıt depremi örneği. Türk Deprem Araştırma Dergisi, 2(1), 76-91. <https://doi.org/10.46464/tdad.737913>, 17.12.2023
- Tolunay, A. ve ark. (2024). Türkiye’de Umumi Hayata Müessir Afetler Dolayısıyla Orman Alanlarının Tahsisine Yönelik 7269 Sayılı Kanun Uygulamaları: Bingöl, Malatya Ve Ordu İlleri Örneği, Türkiye Mesleki ve Sosyal Bilimler Dergisi, Aralık 2024, Yıl:6, Sayı: 16, 25-37.
- Uysal, B., Birben, Ü. 2023. 6831 sayılı Orman Kanunu’nun 2/B maddesi uygulamaları ve sonuçları (Amasya ili örneği). Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi, 9(2), 90-100.
- URL-1. Nurdağı Tarihçe. <http://www.nurdağı.gov.tr/> Erişim tarihi: 24.01.2024
- URL-2. Gaziantep İl Afet Risk Azaltma Planı - İRAP. (2021) <https://gaziantep.afad.gov.tr/kurumlar/gaziantep.afad/E-Kutuphane/Il-Planlari/Gaziantep-IRAP.pdf> Erişim tarihi: 24.01.2024
- URL-3. Nurdağı Nüfus Verileri. <https://www.tuik.gov.tr/> Erişim tarihi: 24.01.2024
- URL4. <https://mefarmuhendislik.com/gaziantep-bolgesi-zemin-etut/>
- URL.5 <https://www.ogm.gov.tr/tr/e-kutuphane-sitesi/FaaliyetRaporu/2024%20-%20Orman%20Genel%20M%C3%BCd%C3%BCrl%C3%BC%C4%9F%C3%BC%20Faaliyet%20Raporu.pdf>

Bölüm 5

HAVACILIK MÜHENDİSLİĞİNDE BAKIM STRATEJİLERİ VE KESTİRİMCİ BAKIMIN GELECEĞİ

Dr. Hüseyin ŞAHİN¹

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0464-2644>

Havacılık mühendisliği, yüksek güvenlik standartları ve operasyonel mükemmellik gerektiren bir disiplin olarak, bakım stratejilerinin etkinliğine büyük ölçüde bağımlıdır. Uçak sistemlerinin karmaşıklığı ve görev kritikliği göz önüne alındığında, bakım uygulamaları yalnızca arızaların önlenmesiyle sınırlı kalmayıp aynı zamanda operasyonel sürekliliğin sağlanması, maliyetlerin kontrol altında tutulması ve uçuş güvenliğinin artırılması gibi çok boyutlu hedeflere hizmet etmektedir. Bu bağlamda, bakım stratejileri; önleyici bakım, duruma dayalı bakım ve kestirimci bakım olmak üzere üç temel yaklaşım etrafında şekillenmektedir(Gackowiec, 2019; Kıyak, 2012).

Önleyici bakım, belirli zaman aralıklarında veya uçuş saatlerine dayalı olarak planlanan müdahaleleri içerir ve sistem bileşenlerinin ömrünü uzatmayı, arıza olasılığını azaltmayı ve operasyonel aksaklıkları önlemeyi amaçlar. Ancak bu yaklaşım, sistemin gerçek zamanlı durumunu dikkate almadan yapılan müdahaleler nedeniyle zaman zaman gereksiz bakım faaliyetlerine ve kaynak israfına yol açabilmektedir(Kim vd., 2016). Duruma dayalı bakım ise, ekipman performansının sensörler aracılığıyla izlenmesi ve analiz edilmesi yoluyla yalnızca ihtiyaç duyulduğunda bakım yapılmasını sağlar. Bu yöntem, bakım kararlarının daha rasyonel temellere dayanmasını mümkün kılarak kaynakların daha etkin kullanılmasına olanak tanır(Quatrini vd., 2020).

Son yıllarda, dijital teknolojilerin hızlı gelişimiyle birlikte kestirimci bakım stratejileri ön plana çıkmıştır. Kestirimci bakım, yapay zekâ algoritmaları, makine öğrenimi modelleri ve nesnelerin interneti tabanlı veri toplama sistemleri aracılığıyla ekipman arızalarını önceden tahmin etmeyi hedeflemektedir(Guidotti vd., 2025). Bu yaklaşım, uçak sistemlerinden elde edilen büyük veri kümelerinin analiz edilmesiyle arıza olasılıklarını belirleyerek bakım faaliyetlerinin zamanlamasını optimize eder. Böylece, plansız bakım sürelerini minimize edilirken, uçuş güvenliği ve operasyonel verimlilik artırılır. Ayrıca, bu strateji sayesinde yedek parça yönetimi daha etkin hale gelir, stok maliyetleri düşer ve lojistik süreçler iyileşir.

Kestirimci bakımın havacılık sektöründe benimsenmesi, Endüstri 4.0 paradigmasıyla doğrudan ilişkilidir(Bousdekis vd., 2020). Bu paradigma, dijitalleşme, otomasyon ve veri analitiği gibi unsurların entegrasyonunu teşvik ederek bakım süreçlerinde devrim niteliğinde dönüşümler yaratmaktadır. Özellikle yapay zekâ destekli karar destek sistemleri, bakım mühendislerinin daha isabetli ve zamanında müdahalelerde bulunmasını sağlamakta; bu da uçakların görev sürekliliğini ve güvenilirliğini artırmaktadır. Bununla birlikte, bu teknolojilerin uygulanması, yüksek kaliteli veri yönetimi, sistem entegrasyonu ve teknik personelin dijital

yetkinliklerinin artırılması gibi çeşitli zorlukları da beraberinde getirmektedir.

Düzenleyici kurumların güvenlik ve doğrulama gereklilikleri, kestirimci bakım sistemlerinin havacılıkta uygulanabilirliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, geliştirilen algoritmaların doğruluğu, güvenilirliği ve şeffaflığı hem teknik hem de etik açıdan titizlikle değerlendirilmelidir. Ayrıca, yapay zekâ tabanlı sistemlerin karar alma süreçlerinde açıklanabilirlik ve izlenebilirlik gibi kriterlerin sağlanması, havacılık gibi yüksek riskli sektörlerde kritik önem taşımaktadır.

Geleceğe yönelik projeksiyonlar, kestirimci bakımın havacılık mühendisliğinde daha da yaygınlaşacağını ve bakım stratejilerinin dijitalleşme ekseninde yeniden şekilleneceğini göstermektedir. Gerçek zamanlı veri analitiği, uçuş operasyonlarının her aşamasında daha proaktif ve esnek bakım uygulamalarını mümkün kılarken, yapay zekâ destekli sistemler ile bakım kararları daha öngörülebilir ve sürdürülebilir hale gelmektedir. Bu dönüşüm, havacılık sektörünün artan güvenlik, verimlilik ve çevresel sürdürülebilirlik taleplerine yanıt vermede kritik bir rol oynayacaktır.

1. BAKIM STRATEJİSİ TÜRLERİ

Düzeltilici Bakım (Corrective Maintenance)

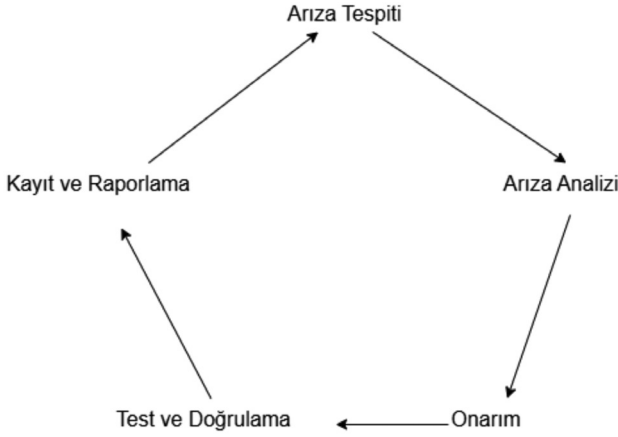
Düzeltilici bakım, bir ekipman veya sistemde meydana gelen arızanın tespit edilmesinin ardından, bu arızayı gidermek ve sistemi tekrar çalışır duruma getirmek amacıyla gerçekleştirilen bakım faaliyetlerini ifade eder (Barata vd., 2002). Bu yaklaşım, arıza gerçekleşmeden önce değil, arıza sonrası müdahaleye dayalıdır ve genellikle plansız bakım kategorisinde değerlendirilir. Ancak bazı durumlarda, belirli bir bileşenin ömrünün sonuna gelmesi beklendiğinde ve bu durum operasyonel risk oluşturmuyorsa, düzeltilici bakım planlı bir şekilde de uygulanabilir.

Havacılık mühendisliğinde düzeltilici bakım, uçuş güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Uçak sistemlerinde meydana gelen herhangi bir arıza, operasyonel sürekliliği doğrudan etkileyebileceği gibi, güvenlik risklerini de artırabilir. Bu nedenle, düzeltilici bakım faaliyetleri, arızanın hızlı ve doğru bir şekilde teşhis edilmesi, gerekli yedek parçaların temini ve onarım işlemlerinin standartlara uygun olarak gerçekleştirilmesi süreçlerini kapsar.

Düzeltilici bakım süreci genellikle şu adımlardan oluşur:

1. **Arıza Tespiti:** Arızanın pilot raporları, bakım ekibi gözlemleri veya otomatik teşhis sistemleri aracılığıyla belirlenmesi.

2. **Arıza Analizi:** Arızanın kök nedeninin tespit edilmesi ve olası tekrarların önlenmesi için gerekli teknik değerlendirmelerin yapılması.
3. **Onarım / Değişim:** Arızalı bileşenin onarılması veya yenisiyle değiştirilmesi.
4. **Test ve Doğrulama:** Onarım sonrası sistemin uçuşa elverişlilik standartlarına uygunluğunun test edilmesi.
5. Yapılan işlemlerin bakım kayıt sistemine işlenmesi ve düzenleyici otoritelerce talep edilen raporların hazırlanması.



Şekil 1. Düzeltilici Bakım Akış Şeması

Düzeltilici bakımın avantajı, yalnızca arıza meydana geldiğinde müdahale edilmesi nedeniyle gereksiz bakım maliyetlerinin önlenmesidir. Ancak bu yaklaşım, plansız bakım süreleri, operasyonel aksaklıklar ve acil yedek parça temini gibi maliyet ve zaman açısından olumsuz etkiler yaratabilir. Bu nedenle, havacılık sektöründe düzeltilici bakım genellikle önleyici veya kestirimci bakım stratejileriyle birlikte hibrit bir bakım programı içinde uygulanır.

Önleyici Bakım (Preventive Maintenance)

Önleyici bakım, havacılık mühendisliğinde uzun yıllardır uygulanan ve sistem güvenilirliğini artırmayı hedefleyen temel bakım stratejilerinden biridir. Bu yaklaşım, ekipman arızalarının meydana gelmesini beklemeden, belirli zaman aralıklarında veya kullanım süresine dayalı olarak planlanan bakım faaliyetlerini içerir. Uygulanan işlemler genellikle periyodik kontroller, parça değişimleri, sistem testleri ve yazılım güncellemeleri gibi rutin görevlerden oluşur. Temel amaç, uçak sistemlerinin optimum performans seviyelerinde çalışmasını sağlamak, operasyonel

sürekliliği korumak ve beklenmedik arızaların neden olabileceği güvenlik risklerini ve maliyetleri en aza indirmektir.(Joo & Min, 2011; Kabas-hkin vd., 2025)

Havacılıkta önleyici bakımın önemi, uçuş güvenliği ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle ticari havayolu operasyonlarında, uçakların yüksek görev temposu ve yoğun uçuş programları göz önüne alındığında, sistem arızalarının önceden engellenmesi kritik bir gereklilik haline gelmektedir. Bu bağlamda, önleyici bakım uygulamaları, uçakların uçuşa elverişlilik durumunu koruyarak hem yolcu güvenliğini hem de operasyonel verimliliği artırır. Ayrıca, bu strateji sayesinde ekipman ömrü uzatılır, yedek parça tüketimi optimize edilir ve bakım maliyetleri daha öngörülebilir hale gelir.

Ancak önleyici bakımın etkinliği, bakım sıklığının ve kapsamının doğru şekilde belirlenmesine bağlıdır. Aşırı sık bakım uygulamaları, gereksiz iş gücü ve kaynak tüketimine yol açabilirken; yetersiz bakım aralıkları ise arıza riskini artırabilir. Bu nedenle, bakım planlamasında sistemin kullanım profili, çevresel koşullar, üretici tavsiyeleri ve geçmiş arıza verileri gibi çok sayıda parametrenin dikkate alınması gerekmektedir. Özellikle modern uçaklarda yer alan dijital izleme sistemleri, bakım aralıklarının daha hassas şekilde belirlenmesine olanak tanımakta ve önleyici bakımın etkinliğini artırmaktadır.

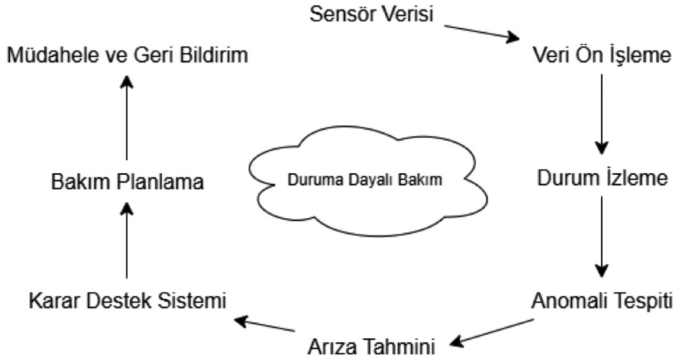
Ek olarak, önleyici bakımın kurumsal düzeyde uygulanması, bakım organizasyonlarının iş süreçlerini standartlaştırmasına ve kalite yönetim sistemleriyle entegrasyonuna katkı sağlar. Bu durum, havacılık otoriteleri tarafından belirlenen düzenleyici gerekliliklerin karşılanmasında da avantaj sunar. Uluslararası standartlara uygun olarak yürütülen önleyici bakım faaliyetleri hem uçak üreticileri hem de havayolu işletmeleri açısından güvenilirlik ve marka itibarı açısından stratejik bir değer taşır.



Şekil 2. Havacılıkta Önleyici Bakım Stratejisinin Baz Aldığı Kriterler

Duruma Dayalı Bakım (Condition-Based Maintenance – CBM)

Duruma Dayalı Bakım, bakım kararlarının ekipmanın gerçek zamanlı durum verilerine dayandırıldığı, proaktif ve veri odaklı bir bakım stratejisidir. Bu yaklaşım, bakım faaliyetlerinin sabit zaman aralıklarında veya uçuş saatlerine göre değil, ekipmanın mevcut performans göstergeleri ve sağlık durumu dikkate alınarak yalnızca gerektiğinde gerçekleştirilmesini öngörür. Böylece, hem gereksiz bakım uygulamalarının önüne geçilir hem de arıza riskleri en aza indirilir.



Şekil 3. Duruma Dayalı Bakım Akış Şeması

CBM, uçak sistemlerinin ve alt bileşenlerinin durumunu değerlendirmek amacıyla sensörler, veri toplama üniteleri, titreşim analiz cihazları, yağ analizi sistemleri, termal kameralar ve diğer teşhis araçlarından elde edilen gerçek zamanlı verileri kullanır. Bu veriler, uçuş sırasında veya yerde yapılan testler aracılığıyla toplanabilir ve gelişmiş veri analitiği yöntemleriyle işlenerek bakım gereksinimleri hakkında yüksek doğrulukta öngörüler sunar.

Havacılık mühendisliğinde CBM'nin önemi, özellikle yüksek maliyetli ve kritik görevli sistemlerde kendini göstermektedir. Uçak motorları, aviyonik sistemler, hidrolik ve iniş takımı bileşenleri gibi kritik parçaların duruma dayalı izlenmesi hem güvenlik hem de operasyonel süreklilik açısından stratejik bir avantaj sağlar. CBM sayesinde bakım faaliyetleri, sistemin gerçek ihtiyaçlarına göre zamanlandığından, bakım aralıkları optimize edilir, yedek parça stok yönetimi iyileştirilir ve bakım maliyetleri daha öngörülebilir hale gelir.

Bu stratejinin uygulanması, yalnızca teknik altyapı değil, aynı zamanda güçlü bir veri yönetim sistemi ve yetkin insan kaynağı gerektirir. Toplanan verilerin doğruluğu, güvenilirliği ve bütünlüğü, CBM'nin başarısında kritik rol oynar. Ayrıca, bakım mühendislerinin bu verileri

doğru yorumlayabilmesi için hem teknik bilgi hem de veri analitiği yetkinliklerine sahip olması gerekir.

CBM, Endüstri 4.0 teknolojileri ile birleştiğinde daha da güçlü bir hale gelmektedir. Yapay zekâ ve makine öğrenimi algoritmaları, sensör verilerinden elde edilen karmaşık örüntüleri tespit ederek arıza olasılıklarını önceden belirleyebilir. Bu sayede, bakım faaliyetleri yalnızca mevcut duruma değil, aynı zamanda gelecekteki potansiyel risklere göre de planlanabilir.

Sonuç olarak, Duruma Dayalı Bakım, havacılık sektöründe hem güvenlik hem de maliyet etkinliği açısından önemli bir paradigma değişimini temsil etmektedir. Doğru uygulandığında, CBM yalnızca bakım süreçlerini optimize etmekle kalmaz, aynı zamanda uçakların operasyonel ömrünü uzatarak havayolu işletmelerine rekabet avantajı sağlar.

Önleyici ve duruma dayalı bakım stratejileri temelde uçakların güvenilirliğini ve operasyonel sürekliliğini sağlama amacıyla olmasına rağmen yaklaşım biçimleri ve uygulama yöntemleri açısından oldukça farklıdır.

Kriter	Önleyici Bakım	Duruma Dayalı Bakım
Temel Yaklaşım	Zaman veya kullanım temelli planlı bakım. Belirli periyotlarda, arıza olup olmadığına bakılmaksızın uygulanır.	Ekipmanın mevcut durumunun izlenmesine dayalı olarak yalnızca gerektiğinde bakım yapılır.
Veri Kullanımı	Geçmiş arıza istatistikleri, üretici tavsiyeleri ve sabit bakım takvimleri esas alınır.	Sensörler, teşhis cihazları ve izleme sistemlerinden elde edilen gerçek zamanlı veriler kullanılır.
Amaç	Arızaları önceden engellemek, sistem ömrünü uzatmak, güvenilirliği artırmak.	Arızayı gerçekleşmeden önce tespit etmek, bakım zamanlamasını optimize etmek, gereksiz müdahaleleri önlemek.
Maliyet Etkisi	Gereksiz bakım yapılma riski nedeniyle uzun vadede maliyet artışı olabilir.	Gereksiz bakımın önüne geçerek maliyetleri düşürür, ancak başlangıçta sensör ve izleme altyapısı yatırımı gerektirir.

Teknoloji Gereksinimi	Düşük – Orta (temel bakım planlama yazılımları yeterli olabilir).	Orta – Yüksek (sensör altyapısı, veri toplama ve analiz sistemleri).
Esneklik	Düşük – bakım aralıkları önceden belirlenmiştir.	Yüksek – bakım kararları gerçek zamanlı duruma göre verilir.
Havacılıkta Kullanım Alanları	Motor, iniş takımı, gövde kontrolleri gibi düzenli bakım gerektiren alanlarda yaygın.	Motor performans izleme, aviyonik sistem analizi, hidrolik sistem izleme gibi kritik bileşenlerde giderek artan kullanım.
Avantajlar	Basit planlama, düzenleyici gerekliliklere uyum kolaylığı.	Daha az gereksiz bakım, optimize edilmiş kaynak kullanımı, arıza riskinin azaltılması.
Dezavantajlar	Gereksiz parça değişimi ve iş gücü kullanımı riski.	Yüksek başlangıç maliyeti, veri yönetimi ve analiz yetkinliği gereksinimi.

Tablo 1: Önleyici ve Duruma dayalı bakım stratejileri arasındaki farklar

Kısaca özetlemek gerekirse Önleyici bakım, ekipman arızalarını önlemek amacıyla belirli zaman aralıklarında veya kullanım süresine göre planlı olarak yapılan bakım faaliyetleridir. Arıza olup olmadığına bakılmaksızın uygulanır; bu sayede güvenilirlik artar ancak bazen gereksiz bakım ve maliyet oluşabilir. Duruma dayalı bakım, bakım kararlarını ekipmanın gerçek zamanlı durumu üzerinden verir. Sensörler ve teşhis sistemlerinden gelen veriler analiz edilerek yalnızca ihtiyaç olduğunda bakım yapılır; böylece gereksiz müdahaleler önlenir, kaynak kullanımı optimize edilir.

Kestirimci Bakım (Predictive Maintenance)

Kestirimci bakım, bakım faaliyetlerinin zamanlamasını ve kapsamını, ekipmanların gerçek zamanlı durum verilerine dayalı olarak belirleyen ileri düzey bir bakım stratejisidir(Wen vd., 2022). Bu yaklaşım, olası arızaları meydana gelmeden önce yüksek doğrulukla tahmin edebilmek amacıyla yapay zekâ (AI), makine öğrenimi (ML) ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi ileri teknolojilerden yararlanır(Carvalho vd., 2019). Kestirimci bakım, havacılık sistemlerinden toplanan sensör verilerini, titreşim analizlerini, sıcaklık ölçümlerini, yağ ve yakıt analizlerini, uçuş verilerini ve

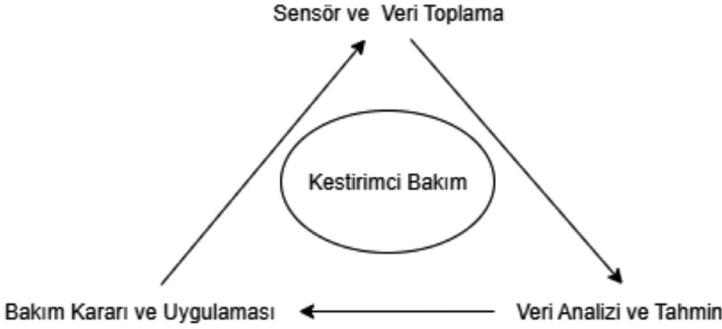
diğer operasyonel parametreleri sürekli olarak izleyerek, bakım kararlarının veri odaklı ve proaktif biçimde alınmasını sağlar.

Havacılık mühendisliğinde kestirimci bakımın en önemli katkılarından biri, bakım programlarının optimize edilmesidir. Geleneksel takvim tabanlı bakım yaklaşımlarının aksine, kestirimci bakım yalnızca gerekli olduğunda müdahale edilmesini sağlayarak operasyonel verimliliği artırır, plansız bakım sürelerini azaltır ve uçuş güvenliğini güçlendirir. Arıza olasılıklarının önceden belirlenmesi, bakım ekiplerinin zamanında ve hedefe yönelik müdahalelerde bulunmasına olanak tanır. Bu sayede, kritik bileşenlerde meydana gelebilecek beklenmedik arızalar önlenir ve uçakların görev sürekliliği korunur.

Ekonomik açıdan bakıldığında, kestirimci bakım planlanmamış bakım ihtiyacını en aza indirir, yedek parça envanter yönetimini optimize eder ve bakım maliyetlerini uzun vadede düşürür. Gereksiz parça değişimlerinin önüne geçilmesi hem malzeme hem de iş gücü açısından önemli tasarruflar sağlar. Ayrıca, bakım faaliyetlerinin daha öngörülebilir hale gelmesi, havayolu işletmelerinin filo yönetiminde stratejik planlama yapabilmesine imkân tanır.

Teknolojik boyutta, kestirimci bakımın başarısı büyük ölçüde yüksek kaliteli veri toplama altyapısına, gelişmiş veri analitiği yeteneklerine ve sistem entegrasyonuna bağlıdır. Sensör teknolojilerindeki gelişmeler, uçak bileşenlerinden elde edilen verilerin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırırken, yapay zekâ tabanlı algoritmalar bu verilerden anlamlı öngörüler üreterek bakım kararlarını destekler.

Havacılık sektöründe kestirimci bakım, Endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm trendleriyle uyumlu olarak, bakım uygulamalarında devrim niteliğinde iyileştirmeler sağlayabilecek geleceğe dönük bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Önümüzdeki yıllarda, gerçek zamanlı veri analitiği, bulut tabanlı bakım yönetim sistemleri ve özerk karar destek mekanizmaları ile kestirimci bakımın daha da gelişmesi ve yaygınlaşması beklenmektedir.



Şekil 4. Kestirimci bakım sürecinin temel adımları.

2. HAVACILIKTA BAKIMIN GELECEĞİ

Havacılıkta bakım stratejilerinin geleceği, önleyici bakım, kestirimci bakım ve güvenilirlik merkezli bakım unsurlarını bütünleştiren, daha bütünleşmiş ve proaktif yaklaşımlara doğru evrilmektedir. Gelecek yıllarda havacılık sistemlerinde dijital ikiz, makine öğrenimi ve ileri veri analitiği gibi teknolojilerin yaygınlaşması, kestirimci bakım yeteneklerini önemli ölçüde geliştirecektir (Moenck vd., 2024; Tyncherov & Rozkova, 2020). Dijital ikizler, uçak sistemlerinin sanal kopyalarını oluşturarak gerçek zamanlı performans izleme, senaryo simülasyonu ve arıza öngörüsü yapılmasına imkân tanır. Bu sayede bakım mühendisleri, olası arıza senaryolarını operasyonel risk oluşmadan önce değerlendirebilir ve bakım planlarını buna göre optimize edebilir. Bu sistemler kullanılarak, yalnızca bakım faaliyetlerinin zamanlamasını değil, aynı zamanda bakım kararlarının alınma biçimini ve operasyonel süreçlerin yönetimini de köklü biçimde değiştirmesi beklenmektedir.

Makine öğrenimi ve yapay zekâ tabanlı karar destek sistemleri, sensörlerden ve uçuş veri kayıt sistemlerinden elde edilen büyük veri kümelerini işleyerek, bakım gereksinimlerini yüksek doğrulukla tahmin edebilecek modeller geliştirilmeyi mümkün kılar. Bu modeller, yalnızca mevcut durumu analiz etmekle kalmaz, aynı zamanda gelecekteki performans trendlerini de öngörerek bakım stratejilerinin sistemin daha esnek ve uyarlanabilir hale gelmesini sağlar.

Endüstri geliştikçe, bakım stratejilerinin uyarlanabilirlik ve esneklik kabiliyetleri ön plana çıkacaktır. Özellikle karmaşık havacılık sistemlerinin bakımında, siber-fiziksel sistemler, bulut tabanlı bakım yönetim platformları ve blok zincir tabanlı bakım kayıt sistemleri gibi teknolojilerin entegrasyonu, veri güvenliğini ve izlenebilirliği artırılabilir. Bu gelişmeler, düzenleyici otoritelerin bakım süreçlerini daha şeffaf ve doğrulanabilir şekilde denetlemesine de olanak tanıyacaktır.

Ayrıca, sürdürülebilirlik ve çevresel etki faktörleri de gelecekte bakım stratejilerinin şekillenmesinde önemli bir rol oynayacaktır. Daha verimli bakım planlaması, gereksiz parça değişimlerinin ve malzeme israfının önlenmesi yoluyla karbon ayak izini azaltabilir. Bu bağlamda, bakım stratejilerinin yalnızca teknik ve ekonomik değil, aynı zamanda çevresel performans kriterleriyle de uyumlu hale gelmesi beklenmektedir.



Şekil 5. Havacılıkta bakım stratejilerinin geleceğini şekillendiren temel unsurlar

3. KESTİRİMCİ BAKIMDA YER ALAN TEKNOLOJİLER

Nesnelerin İnterneti (IoT)

Nesnelerin İnterneti (*Internet of Things – IoT*), havacılık sektöründe kestirimci bakım stratejilerinin temel yapı taşlarından biri haline gelmiştir. IoT, uçak üzerindeki sensörler, veri toplama modülleri ve kablosuz iletişim altyapıları aracılığıyla, farklı sistem ve bileşenlerden gerçek zamanlı veri toplanmasını sağlar. Bu veriler; motor performans parametreleri, titreşim seviyeleri, sıcaklık değerleri, yakıt tüketim oranları, hidrolik basınçlar ve aviyonik sistem çıktıları gibi çok çeşitli teknik göstergeleri kapsar.

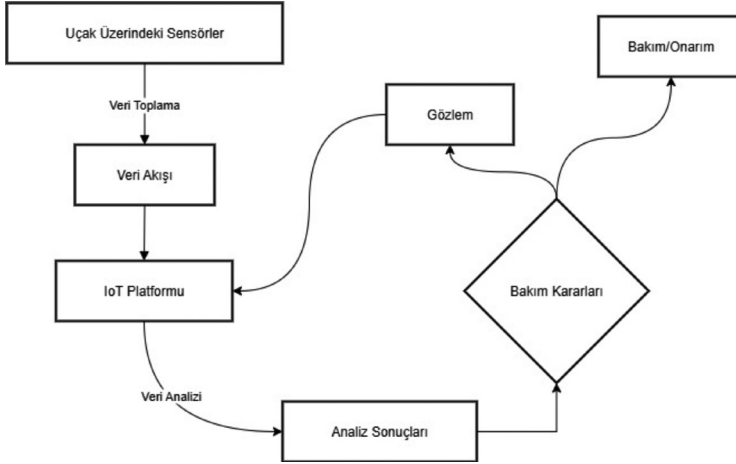
IoT tabanlı sistemler, havacılık sistemlerinin sağlık durumunu sürekli izleyerek olası arızaların erken tespitine imkân tanır. Bu sayede, bakım faaliyetleri yalnızca ihtiyaç duyulduğunda ve doğru zamanda gerçekleştirilir; gereksiz müdahaleler önlenir, operasyonel süreklilik korunur ve uçuş güvenliği artırılır. Ayrıca, IoT cihazlarının sağladığı sürekli veri akışı, gelişmiş veri analitiği ve makine öğrenimi algoritmalarıyla entegre edilerek, bakım kararlarının doğruluğunu ve öngörü gücünü yükseltir.

Havacılıkta IoT'nin sağladığı başlıca avantajlar şunlardır:

- Gerçek Zamanlı İzleme: Uçuş sırasında bile kritik sistemlerin anlık performans takibi.

- Erken Uyarı Mekanizmaları: Arıza belirtilerinin oluşmadan önce tespit edilmesi.
- Veri Tabanlı Karar Alma: Büyük veri kümelerinden elde edilen öngörülerle bakım planlarının optimize edilmesi.
- Envanter ve Lojistik Optimizasyonu: Yedek parça ihtiyaçlarının önceden belirlenmesi ve stok yönetiminin iyileştirilmesi.

Bununla birlikte, IoT tabanlı kestirimci bakım uygulamalarının başarısı, veri güvenliği, siber tehditlere karşı koruma, sensör kalibrasyonu ve sistem entegrasyonu gibi kritik faktörlere bağlıdır. Özellikle havacılık gibi yüksek güvenlik gerektiren sektörlerde, IoT altyapısının uluslararası havacılık standartlarına ve düzenleyici gerekliliklere uygun şekilde tasarlanması gerekmektedir.



Şekil 6. Havacılıkta IoT Tabanlı Kestirimci Bakım Veri Akışı

Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi

Yapay Zekâ (Artificial Intelligence – AI) ve Makine Öğrenimi (Machine Learning – ML), havacılık sektöründe kestirimci bakımın en kritik bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Bu teknolojiler, IoT cihazları, uçak üzerindeki sensörler ve uçuş veri kayıt sistemleri aracılığıyla toplanan büyük ve karmaşık veri kümelerinin işlenmesini ve anlamlandırılmasını sağlar. Elde edilen veriler; motor titreşim analizleri, sıcaklık ve basınç ölçümleri, yakıt tüketim trendleri, aviyonik sistem performans kayıtları ve çevresel koşullar gibi çok boyutlu parametreleri içerebilir.

AI ve ML tabanlı algoritmalar, bu veri setleri üzerinde anormallik tespiti, kestirimsel modelleme ve prognostik analiz (kalan faydalı ömür tahmini) gibi işlemleri gerçekleştirebilmektedir. Böylece, ekipman per-

formansındaki sapmalar erken aşamada belirlenir ve arıza olasılıkları yüksek doğrulukla tahmin edilebilir. Bu yaklaşım, bakım faaliyetlerinin yalnızca gerekli olduğunda ve doğru zamanda yapılmasını sağlayarak hem operasyonel sürekliliği hem de uçuş güvenliğini artırır.

Geleneksel bakım yaklaşımlarında kararlar çoğunlukla geçmiş deneyimlere, üretici tavsiyelerine veya sabit bakım takvimlerine dayanırken, AI ve ML destekli sistemler dinamik ve uyarlanabilir bir yapı sunar. Bu sayede, değişen operasyonel koşullara ve çevresel faktörlere hızla uyum sağlanabilir. Örneğin, makine öğrenimi algoritmaları, farklı uçuş rotaları, hava koşulları veya kullanım yoğunluğu gibi değişkenleri dikkate alarak bakım gereksinimlerini yeniden hesaplayabilir.

Havacılıkta AI ve ML'nin sağladığı başlıca avantajlar şunlardır:

- Yüksek Doğrulukta Tahmin: Arıza olasılıklarının istatistiksel ve olasılıksal modellerle desteklenmesi.
- Erken Müdahale İmkânı: Kritik bileşenlerde arıza oluşmadan önce bakım planlaması yapılabilmesi.
- Kaynak Optimizasyonu: Gereksiz bakım faaliyetlerinin azaltılması ve yedek parça stok yönetiminin iyileştirilmesi.
- Sürekli Öğrenme: Algoritmaların yeni verilerle kendini güncelleyerek tahmin performansını artırması.

Bununla birlikte, AI ve ML tabanlı kestirimci bakım uygulamalarının başarısı, veri kalitesi, etiketleme doğruluğu, model şeffaflığı ve düzenleyici gerekliliklere uyum gibi faktörlere bağlıdır. Özellikle havacılık gibi yüksek güvenlik gerektiren sektörlerde, algoritmaların karar verme süreçlerinin açıklanabilir ve izlenebilir olması kritik önemdedir.



Şekil 7. Yapay Zekâ ile Bakım Planlama Veri Akış Şeması

Sensör Teknolojisi

Gelişmiş sensör teknolojileri, modern havacılıkta kestirimci bakım uygulamalarının temelini oluşturan kritik bileşenlerdir. Yeni nesil uçak modellerinde kullanılan bu sensörler, uçuş sırasında ve yerde, sistem bileşenlerinin performansını ve sağlık durumunu sürekli olarak izleyerek yüksek çözünürlüklü, gerçek zamanlı veri sağlar. Toplanan bu veriler, makine öğrenimi ve yapay zekâ tabanlı algoritmalar için ham girdi nite-

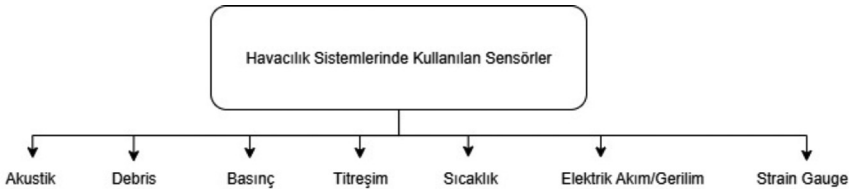
liğindedir ve hem teşhis hem de prognostik süreçlerin doğruluğunu doğrudan etkiler.

Havacılıkta kullanılan sensörler; titreşim sensörleri, sıcaklık ve basınç sensörleri, yağ ve yakıt analiz sensörleri, akustik emisyon sensörleri, optik ve kızılötesi sensörler gibi çok çeşitli türleri kapsar. Bu sensörler, motorlardan hidrolik sistemlere, aviyonik bileşenlerden iniş takımlarına kadar geniş bir yelpazede kritik veriler toplar. Örneğin:

- Titreşim sensörleri, rulman ve dişli kutusu gibi döner parçaların erken aşamadaki aşınma belirtilerini tespit eder.
- Sıcaklık sensörleri, motor ve elektronik bileşenlerde aşırı ısınma riskini izler.
- Basınç sensörleri, hidrolik ve yakıt sistemlerindeki anormal basınç değişimlerini belirler.
- Yağ analizi sensörleri, yağ içerisindeki metal partikül yoğunluğunu ölçerek aşınma kaynaklı arızaları öngörür.

Bu sensörlerden elde edilen kapsamlı veri setleri, uçak sistemlerinin mevcut durumunu doğru şekilde değerlendirmek ve olası arızaları önceden tahmin etmek için kritik öneme sahiptir. Sensör teknolojilerinin sağladığı sürekli ve güvenilir veri akışı, bakım mühendislerinin zamanında ve hedefe yönelik müdahaleler planlamasına olanak tanır. Böylece hem operasyonel süreklilik korunur hem de uçuş güvenliği en üst düzeye çıkarılır.

Bununla birlikte, sensör teknolojilerinin etkin kullanımı için kalibrasyon doğruluğu, veri bütünlüğü, çevresel koşullara dayanıklılık ve sistem entegrasyonu gibi faktörler büyük önem taşır. Ayrıca, sensörlerden elde edilen verilerin güvenli bir şekilde iletilmesi ve saklanması, havacılıkta siber güvenlik standartlarının karşılanmasını gerektirir.



Şekil 8. Kestirimci Bakımda Kullanılabilecek Sensör Verileri

Dijital İkiz Teknolojisi

Dijital ikiz, fiziksel bir varlığın, sistemin veya sürecin sanal bir kopyasının oluşturulması ve bu kopyanın gerçek zamanlı verilerle sürekli

olarak güncellenmesi prensibine dayanan ileri bir mühendislik teknolojisidir. Havacılıkta dijital ikizler, uçak gövdesi, motorlar, aviyonik sistemler veya hidrolik bileşenler gibi kritik unsurların dinamik, veri odaklı sanal modellerini temsil eder. Bu modeller, gerçek sistemlerden elde edilen sensör verileri, geçmiş bakım kayıtları ve mühendislik simülasyonları ile beslenerek, fiziksel varlığın anlık durumunu ve gelecekteki davranışını yüksek doğrulukla yansıtır (Kabashkin, 2024; Li vd., 2022).

Kestirimci bakım bağlamında dijital ikiz teknolojisi, şu temel işlevleri yerine getirir:

- Gerçek Zamanlı İzleme: Fiziksel sistemin performans parametreleri, sanal model üzerinde anlık olarak takip edilir.
- Senaryo Simülasyonu: Olası arıza senaryoları, sanal ortamda test edilerek bakım kararlarının risk ve maliyet açısından optimize edilmesi sağlanır.
- Prognostik Analiz: Makine öğrenimi ve veri analitiği ile entegre edilen dijital ikizler, bileşenlerin kalan kullanım ömrünü tahmin eder.
- Bakım Planlama: Tahmin edilen arıza zamanlarına göre bakım faaliyetleri önceden planlanır, böylece plansız bakım süreleri en aza indirilir.

Havacılıkta dijital ikizlerin kullanımı, özellikle motor performans yönetimi, uçuş kontrol sistemleri optimizasyonu ve yapısal sağlık izleme alanlarında öne çıkmaktadır. Örneğin, bir uçak motorunun dijital ikizi, farklı uçuş koşullarında motorun nasıl tepki vereceğini simüle edebilir; bu sayede bakım mühendisleri, gerçek motor üzerinde herhangi bir müdahalede bulunmadan olası sorunları önceden tespit edebilir.

Bu teknolojinin sağladığı başlıca avantajlar şunlardır:

- Yüksek Doğrulukta Tahmin: Gerçek zamanlı veri ve fiziksel modelleme birleşimi sayesinde arıza öngörülleri daha güvenilir hale gelir.
- Maliyet ve Zaman Tasarrufu: Gereksiz bakım faaliyetleri azaltılır, yedek parça ve iş gücü planlaması optimize edilir.
- Risk Azaltma: Kritik sistemlerde olası arızalar, operasyonel risk oluşmadan önce belirlenir.
- Sürekli İyileştirme: Dijital ikiz, yeni verilerle sürekli güncellenerek modelin doğruluğunu artırır.

Bununla birlikte, dijital ikiz uygulamalarının etkinliği; yüksek kaliteli veri toplama altyapısı, güçlü hesaplama kaynakları, model doğrulama süreçleri ve siber güvenlik önlemleri gibi faktörlere bağlıdır. Havacılık gibi yüksek güvenlik gerektiren sektörlerde, dijital ikizlerin doğruluğu ve güvenilirliği, düzenleyici otoriteler tarafından titizlikle denetlenmektedir.

4. KESTİRİMCİ BAKIMIN AVANTAJLARI

Kestirimci bakım, özellikle güvenilirlik ve emniyetin kritik öneme sahip olduğu havacılık mühendisliği alanında, bakım yönetiminde önemli bir paradigma değişimini temsil etmektedir. Bu strateji, uçak sistemlerinden elde edilen gerçek zamanlı verilerin gelişmiş analiz yöntemleriyle işlenmesi sayesinde, olası arızaların meydana gelmeden önce yüksek doğrulukla tahmin edilmesine olanak tanır.

Kestirimci bakımın en önemli avantajlarından biri, plansız bakım süreçlerinin azaltılmasıdır. Arıza olasılıklarının önceden belirlenmesi, bakım faaliyetlerinin yalnızca gerektiğinde ve doğru zamanda yapılmasını sağlar; böylece operasyonel verimlilik artar, uçuş programlarında aksama riski azalır. Bu proaktif yaklaşım, gereksiz onarımları önleyerek bakım maliyetlerini düşürür, aynı zamanda sorunların büyümeden çözülmesini sağlayarak uçak bileşenlerinin hizmet ömrünü uzatır.

Kestirimci bakım, IoT, AI ve ML gibi ileri teknolojilerin entegrasyonu ile daha da güçlenir. IoT tabanlı sensörler, uçak sistemlerinden sürekli veri akışı sağlar; AI ve ML algoritmaları ise bu verileri işleyerek arıza tahminlerinin doğruluğunu artırır ve bakım kararlarının zamanında alınmasına imkân tanır. Bu yetenek, yüksek güvenilirlik ve maliyet etkinliği gerektiren havacılık operasyonlarında stratejik bir avantaj sunar.

Kestirimci bakımın havacılık endüstrisinde benimsenmesi, yalnızca havayolu işletmeleri için değil, aynı zamanda teknoloji sağlayıcıları için de yeni fırsatlar yaratmaktadır. Gelişmiş yazılım platformları, sensör teknolojileri ve veri analitiği çözümlerine olan talep, bu alanda inovasyonu teşvik etmektedir. Ek olarak, kestirimci bakım stratejisi uygulayan kuruluşlar, Ortalama Arıza Süresi ve Arızalar Arasındaki Ortalama Süre gibi performans ve güvenilirlik göstergelerinde belirgin iyileşmeler elde eder. Bu metriklerdeki artış, daha iyi kaynak tahsisi, bakım planlaması ve filo yönetimi süreçlerine doğrudan katkı sağlar.

Avantaj Kategorisi	Açıklama	Havacılıkta Etkisi
Arıza Süresinin Azalması	Arızalar gerçekleşmeden önce tahmin edilerek plansız bakımlar en aza indirilir.	Uçuş programlarının aksamaması, operasyonel sürekliliğin korunması.
Maliyet Etkinliği	Gereksiz bakım ve parça değişimlerinin önlenmesiyle bakım maliyetleri düşer.	Yedek parça ve iş gücü kullanımında optimizasyon.
Bileşen Ömrünün Uzaması	Sorunlar büyümeden giderildiği için ekipman ömrü artar.	Motor, iniş takımı ve aviyonik sistemlerin kullanım süresinin uzaması.
Gelişmiş Karar Verme	Sorunlar büyümeden giderildiği için ekipman ömrü artar.	Daha doğru bakım zamanlaması ve hedefe yönelik müdahaleler.
Güvenilirlik ve Emniyet	Kritik sistemlerde arıza riskinin azaltılması.	Uçuş güvenliğinin ve filo güvenilirliğinin artması.
Kaynak Planlama	İki arıza arası ortalama sürelerde iyileşme ile daha iyi bakım planlaması.	İnsan kaynağı ve lojistik süreçlerin verimli yönetimi.
Teknoloji ve İnovasyon Fırsatları	Gelişmiş yazılım ve sensör teknolojilerine talep artışı.	Teknoloji sağlayıcıları için yeni iş alanları ve çözümler.

Tablo 2. Havacılıkta Kestirimci Bakım Stratejilerinin Avantajları Özet Tablosu

5. KESTİRİMCİ BAKIMIN UYGULANMASINDAKİ ZORLUKLAR

Havacılık ve uzay mühendisliğinde kestirimci bakım uygulamaları, sunduğu yüksek güvenilirlik, maliyet etkinliği ve operasyonel süreklilik potansiyeline sahip olmasına rağmen, hayata geçirilme sürecinde birçok zorluklarla karşı karşıyadır. Bu zorluklar, yalnızca teknik altyapı ve yazı-

lım geliştirme süreçlerini değil, aynı zamanda insan faktörlerini, düzenleyici çerçeve gereklilikleri ve kurum kültürü de kapsamaktadır.

Teknolojik Entegrasyonun Karmaşıklığı

Kestirimci bakımın etkin şekilde uygulanabilmesi için AI, ML ve IoT gibi ileri teknolojilerin mevcut bakım çerçevelerine entegre edilmesi gerekir. Bu entegrasyon, yalnızca yeni donanım ve yazılım eklemekten ibaret olmayıp, veri toplama, iletim, depolama ve analiz süreçlerinde köklü değişiklikler gerektirir. Özellikle gerçek zamanlı veri akışının sağlanması, yüksek bant genişliği, düşük gecikme süreleri ve güvenilir iletişim altyapısı gerektirmektedir.

Ölçeklenebilirlik Sorunları

Havacılık ve uzay gibi karmaşık operasyonel ortamlarda, kestirimci bakım stratejisi çözümlerinin bütün hava araçlarına uygulanabilir olması kritik önemdedir. Farklı uçak modelleri, motor tipleri ve operasyonel profiller için aynı sistemin uyarlanabilmesi hem yazılım mimarisi hem de veri işleme kapasitesi açısından önemli bir mühendislik problemidir. Büyük ölçekli filolarda, sensör sayısının ve veri hacminin artması, veri yönetimi ve analiz altyapısında ciddi yük oluşturabilir.

Veri Toplama ve Ön İşleme Zorlukları

Havacılık bağlamına özgü verilerin toplanması, filtrelenmesi ve ön işlenmesi, yüksek teknik uzmanlık ve kaynak gerektirir. Sensör verilerinin kalibrasyonu, gürültüden arındırılması ve eksik/veri kaybı durumlarının yönetilmesi, kestirimci modellerin doğruluğu açısından kritik önemdedir. Ayrıca, farklı üreticilerden gelen sistemlerin veri formatlarının uyumlaştırılması da önemli bir entegrasyon adımıdır.

Düzenleyici Gereklilikler ve Güvenlik Standartları

Havacılık sektörü, uluslararası sertifikasyon süreçleri ve uçuşa elverişlilik standartları açısından son derece sıkı düzenlemelere tabidir. Makine öğrenimi tabanlı kestirimci bakım çözümlerinin bu standartlara uyum sağlaması, algoritmaların doğrulanabilir, izlenebilir ve açıklanabilir olmasını gerektirir. Bu durum, sistem tasarımı ve test süreçlerinde ek mühendislik ve belgelendirme yükü oluşturmaktadır.

İnsan Faktörleri ve Eğitim İhtiyacı

Kestirimci bakım stratejilerinin başarısı, yalnızca teknolojik altyapıya değil, bakım personelinin bu sistemleri doğru şekilde kullanabilmesine de bağlıdır. Yetersiz eğitim, veri yorumlama hataları veya algoritma çıktı-

larının yanlış anlaşılması, kritik bakım hatalarına yol açabilir. Bu nedenle, bakım mühendisleri ve teknisyenler için sürekli eğitim programları ve karar destek sistemleri ile desteklenmiş kullanıcı arayüzleri geliştirilmelidir.

Kurumsal Kültür ve Değişim Yönetimi

Kestirimci bakıma geçiş, kuruluş içinde kültürel bir dönüşüm gerektirir. Geleneksel bakım yaklaşımlarına alışmış ekiplerin, veri odaklı ve proaktif bir modele uyum sağlaması zaman alabilir. Yönetimin bu dönüşümü desteklemesi, değişime karşı direnci azaltacak iletişim stratejileri geliştirmesi ve başarı hikâyeleri ile motivasyonu artırması gerekir.

Siber Güvenlik ve Veri Gizliliği

IoT tabanlı Kestirimci bakım sistemleri, sürekli veri iletimi ve bulut tabanlı analiz altyapıları kullandığından, siber güvenlik kritik bir konudur. Veri bütünlüğünün korunması, yetkisiz erişimlerin engellenmesi ve uçuş güvenliğini tehlikeye atabilecek siber saldırılara karşı önlemler alınması zorunludur.

6. SONUÇ

Bu çalışma, havacılık bakım sistemlerinin dönüşümünü çok boyutlu bir perspektifle ele alarak, özellikle kestirimci bakım stratejilerinin, akıllı teknolojilerin ve Endüstri 4.0 uygulamalarının havacılık sektörüne etkisini kapsamlı biçimde incelemiştir. Elde edilen bulgular, kestirimci bakımın yalnızca teknik bir yenilik değil, aynı zamanda operasyonel verimliliği ve sistem güvenilirliğini artıran stratejik bir araç olduğunu göstermektedir. Özellikle plansız bakım sürelerinin azaltılması, bileşen ömrünün uzatılması ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi gibi somut kazanımlar, bu yaklaşımın havacılık bakım yönetiminde giderek daha merkezi bir konuma yerleştiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, bakım planlamasında yapay zekâ destekli karar mekanizmalarının kullanımı, insan müdahalesine dayalı geleneksel yöntemlere kıyasla daha tutarlı ve öngörülebilir sonuçlar üretmektedir.

Mevcut literatürdeki genel eğilimlerle karşılaştırıldığında, kestirimci bakımın operasyonel faydalarının ötesinde, organizasyonel ve kültürel dönüşüm gerektiren bir paradigma değişimini temsil ettiğini göstermektedir. Literatürde sıklıkla teknik kazanımlar ön plana çıkarılırken, bu çalışma insan faktörü, çevresel etki ve kurumsal adaptasyon gibi daha az vurgulanan boyutları da kapsamlı biçimde değerlendirmiştir.

7. KAYNAKÇA

- Barata, J., Soares, C. G., Marseguerra, M., & Zio, E. (2002). Simulation modelling of repairable multi-component deteriorating systems for 'on condition' maintenance optimisation. *Reliability Engineering & System Safety*, 76(3), 255-264. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(02\)00017-0](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(02)00017-0)
- Bousdekis, A., Apostolou, D., & Mentzas, G. (2020). Predictive Maintenance in the 4th Industrial Revolution: Benefits, Business Opportunities, and Managerial Implications. *IEEE Engineering Management Review*, 48(1), 57-62. <https://doi.org/10.1109/EMR.2019.2958037>
- Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R. da P., Basto, J. P., & Alcalá, S. G. S. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2019.106024>
- Gackowiec, P. (2019). General overview of maintenance strategies – concepts and approaches. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, Vol. 2, Iss. 1(1), 126-139. <https://doi.org/10.2478/MAPE-2019-0013>
- Guidotti, D., Pandolfo, L., & Pulina, L. (2025). A Systematic Literature Review of Supervised Machine Learning Techniques for Predictive Maintenance in Industry 4.0. *IEEE Access*, 13, 102479-102504. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3578686>
- Joo, S. J., & Min, H. (2011). A multiple objective approach to scheduling the preventive maintenance of modular aircraft components. *International Journal of Services and Operations Management*, 9(1), 18-31. <https://doi.org/10.1504/IJSOM.2011.040319>
- Kabashkin, I. (2024). Digital Twin Framework for Aircraft Lifecycle Management Based on Data-Driven Models. *Mathematics* 2024, Vol. 12, Page 2979, 12(19), 2979. <https://doi.org/10.3390/MATH12192979>
- Kabashkin, I., Fedorov, R., & Perekrestov, V. (2025). Decision-Making Framework for Aviation Safety in Predictive Maintenance Strategies. *Applied Sciences* 2025, Vol. 15, Page 1626, 15(3), 1626. <https://doi.org/10.3390/APP15031626>
- Kim, J., Ahn, Y., & Yeo, H. (2016). A comparative study of time-based maintenance and condition-based maintenance for optimal choice of maintenance policy. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(12), 1525-1536. <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1149871>
- KIYAK, E. (2012). The Effects of Aircraft Preventive Maintenance on Reliability. İcinde *INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED MATHEMATICS AND INFORMATICS*. https://www.academia.edu/70099571/The_Effects_of_Aircraft_Preventive_Maintenance_on_Reliability
- Li, L., Aslam, S., Wileman, A., & Perinpanayagam, S. (2022). Digital Twin in Aerospace Industry: A Gentle Introduction. *IEEE Access*, 10, 9543-9562. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3136458>

- Moenck, K., Rath, J. E., Koch, J., Wendt, A., Kalscheuer, F., Schüppstuhl, T., & Schoepflin, D. (2024). Digital twins in aircraft production and MRO: challenges and opportunities. *CEAS Aeronautical Journal*, 15(4), 1051-1067. <https://doi.org/10.1007/S13272-024-00740-Y/FIGURES/10>
- Quatrini, E., Costantino, F., Di Gravio, G., & Patriarca, R. (2020). Condition-Based Maintenance—An Extensive Literature Review. *Machines* 2020, Vol. 8, Page 31, 8(2), 31. <https://doi.org/10.3390/MACHINES8020031>
- Tyncherov, T., & Rozkova, L. (2020). Aircraft Lifecycle Digital Twin for Defects Prediction Accuracy Improvement. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 117, 54-63. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44610-9_6
- Wen, Y., Fashiar Rahman, M., Xu, H., & Tseng, T. L. B. (2022). Recent advances and trends of predictive maintenance from data-driven machine prognostics perspective. *Measurement*, 187, 110276. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2021.110276>

Bölüm 6

OTOMOBİLLERDE ERGONOMİ

Doç. Dr. Gülşah ÖNER

1. GİRİŞ

Ergonomi, insanlar hakkında bilgi içeren alanları (örneğin psikoloji, makine biyomekanik, anatomi, fizyoloji, psikofizik) içeren çok disiplinli bir bilimdir. İnsan özelliklerini, yeteneklerini ve sınırlamalarını inceleyerek bu bilgileri insanların kullandığı ekipman ve sistemleri tasarlamak ve değerlendirmek için uygulamayı içerir. Ergonominin temel amacı, kullanıcılar (sürücüler) ile ekipman (araç) arasında mümkün olan en iyi uyumu sağlayacak ekipman tasarlamaktır; böylece kullanıcıların güvenliği (zarar, yaralanma ve kayıptan uzak), konforu, rahatlığı, performansı ve verimliliği (üretkenlik veya çıktı/girdi artışı) iyileştirilir. Ergonomi alanı aynı zamanda “insan mühendisliği”, “insan faktörleri mühendisliği”, “mühendislik psikolojisi”, “insan-makine sistemleri” veya “insan-makine arayüz tasarımı” olarak da adlandırılır. II. Dünya Savaşı’ndan sonra, insan faktörleri alanı, öncelikle insan bilgi işleme bakış açısından ekipman ve süreç tasarım problemlerini incelemek için Amerika Birleşik Devletleri’nde, özellikle psikologlar arasında ortaya çıktı (Bhise, 2012; Öksüz, 2019).

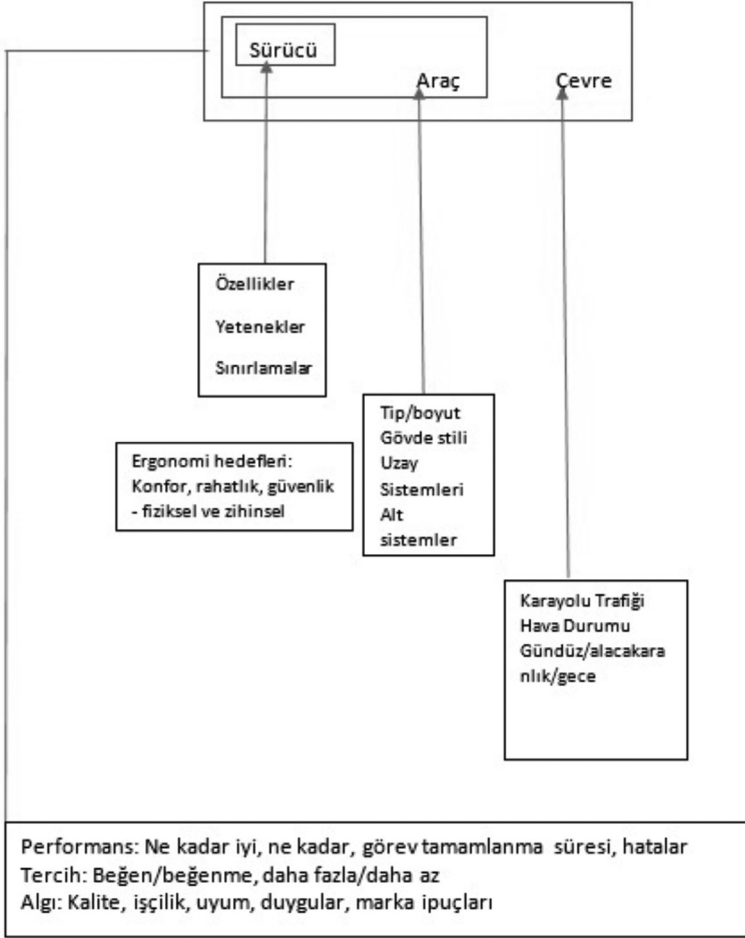
Ergonomi alanı, biyomekanik uygulamalara vurgu yaparak, endüstrilerdeki işyerlerini ve işleri iyileştirmek için 1949 civarında Avrupa ülkelerinde ortaya çıktı. İş yasaları bilimi (veya tasarım çalışmalarına doğal yasaları uygulama bilimi) olan “ergonomi” kelimesi, iki Yunanca kelimenin birleştirilmesiyle türetilmiştir: “ergon” (iş) ve “nomos” (yasalar). Son 25 yılda, hem fiziksel hem de bilgi işleme yönlerini kapsayan alan, daha çok “insan faktörleri mühendisliği” veya “ergonomi” olarak biliniyor ve alan için her iki ismin de kullanılması konusunda hemen hemen eşit tercih var. 1970’lerdeki yakıt ekonomisi krizinden sonra, ABD otomobil endüstrisi, müşterilerin enerji tasarrufu ve konfor/kolaylık ihtiyaçlarını karşılamak için hem aerodinamik hem de ergonomi alanlarına daha fazla vurgu yapmaya başladı. Aerodinamik ve ergonomi gibi biraz benzer sesli terimlerin kullanımı, ürünlerin pazarlanmasında bir şekilde çekici olarak algılandı (Bhise, 2012).

Ergonomi, “ekipmanı insanlara (veya kullanıcılara) uygun hale getirmeyi” içerir. Bu, ekipmanın, insanların (kullanıcı kitlesinin) ekipmana rahatça (doğal olarak) sığabileceği ve herhangi bir garip vücut duruşu, hareket veya hata olmadan ekipmanı kullanabileceği şekilde tasarlanması gerektiği anlamına gelir. Ergonominin, insanları ekipmana uygun hale getirmekle ilgili olmadığı unutulmamalıdır (yani, önce ekipman tasarlanmalı ve ardından insanlardan ekipmanı kullanmak için bir şekilde uyum sağlamaları veya zorla uyum sağlamaları istenmemelidir). Bazı durumlarda, ekipman yalnızca insanların ekipmanı kullanacağı şekilde tasarlanır (Bhise, 2012).

1.1. Ergonomi Yaklaşımı

Ergonomi, “en çok amaç için tasarım”ı (yani, ürünün hedeflenen kullanıcı kitlesindeki çoğu kullanıcının ürüne uyum sağlayabilmesini) içerir. “Ortalama için tasarım” veya “aşırı uçlar için tasarım” gibi diğer tasarım stratejilerini kullandığımızda, kullanıcı kitlesindeki yalnızca birkaç kişinin ürünü “tam olarak doğru” (veya çok iyi) bulacağı unutulmamalıdır. Dolayısıyla, en çok amaç için tasarım, tasarımcının kullanıcı kitlesinin kim olduğunu ve bu kitledeki bireylerin özellik dağılımlarını, yeteneklerini ve sınırlamalarını bilmesini içerir. Bir diğer önemli husus, “insanları bir sistem bileşeni olarak” ele almaktır. Bu, tasarımcının insanı, tasarlanan sistemin bir bileşeni olarak ele alması gerektiği anlamına gelir. Bir araç tasarlama süreci bu nedenle aşağıdaki temel bileşenlerin dikkate alınmasını içermelidir: (a) sürücü/kullanıcı, (b) araç ve (c) çevre (bkz. Şekil 1).

Araç tasarlanırken sistemdeki tüm bileşenlerin özellikleri dikkate alınmalıdır. Araç tasarımı, yalnızca uyumlu ve iyi çalışan tüm fiziksel bileşenlerin tasarlanmasını değil, aynı zamanda kullanıcının bir insan bileşeni olarak kabul edilmesini ve kullanıcının özelliklerinin bir araba veya kamyon tasarımında ölçülüp kullanılmasını da içermelidir; böylece aracın kullanıcıların konfor, rahatlık ve güvenlikle ilgili ihtiyaçlarını karşılaması sağlanır. Fiziksel bir ürünün tasarım sürecinde, mühendisin ürünün her bir parçasını tüm özelliklerine (örneğin boyutlar, malzeme, sertlik, renk, yüzey, diğer bileşenlerle nasıl uyum sağladığı/çalıştığı) dikkat ederek tasarladığı unutulmamalıdır. Benzer şekilde, insan bir operatör veya ürünün kullanıcısı olarak dahil olduğunda (örneğin bir araba veya kamyon), tüm ilgili insan özellikleri incelenmeli ve ürün tasarımında kullanılmalıdır. Bu nedenle, bir araç tasarlanırken, hedeflenen kullanıcı kitlesinin ve aracın çalışma ortamının (yol, trafik, hava durumu ve şafak, gündüz, alacakaranlık ve gece gibi çalışma koşullarından oluşan) kapsamlı bir şekilde anlaşılması gerekir. Şekil 1 bir sürücü/kullanıcının sürüş ortamında bir aracı çalıştırdığında, ergonomi mühendisinin sistemdeki tüm bileşenlerin özelliklerini göz önünde bulundurması ve bunları değerlendirmesi gerektiğini göstermektedir: (a) sürücü/kullanıcının çeşitli görevleri nasıl gerçekleştireceği; (b) sürücü/kullanıcının ürünü kullanma tercihleri; ve (c) kalite, işçilik, ürünün uyandırdığı duygular ve ortaya çıkan marka imajı gibi ürünü deneyimleyerek oluşturulan kayda değer algılar (Bhise, 2012).



Şekil 1. Ergonomi mühendisinin sürücü, araç ve çevrenin özellikleri ile bunların sürücü performansı, tercihi ve algısıyla ilişkisine ilişkin değerlendirmeleri (Bhise, 2012).

1.2. Mühendislik Antropometrisi ve Biyomekanik

Araç tasarım süreci, aracın boyutu ve türü ile aracın taşınması gereken yolcu sayısı üzerine bir tartışmayla başlar. Gerekli sayıda yolcunun taşınabilmesini sağlamak için tasarımcılar, sürücülerin ve yolcuların boyutlarını ve araç içindeki duruşlarını dikkate almalıdır.

Antropometri ve biyomekanik, her ikisinin de insanların boyutlarına ve insanların çalışırken veya araç kullanırken farklı duruşlar alma yeteneğine bağlı olması anlamında ilişkili alanlardır. Bu iki alan aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

Mühendislik antropometrisi, farklı popülasyonlardaki insan vücut boyutlarının ölçülmesi bilimidir. İskelet boyutları (cilt dokularına kıyasla daha az esnek olan kemiklerdeki belirli referans noktalarından ölçülür), şekil, konturlar, alan, hacimler, ağırlık merkezleri, ağırlıklar vb. ile ilgilenir. Mühendislik antropometrisi, antropometrik ölçüm verilerinin insanlara uygun ürünler tasarlamak ve değerlendirmek için uygulanmasını içerir.

Biyomekanik, öncelikle vücut segmentlerinin boyutları, bileşimi ve kütle özellikleri, vücut segmentlerini birbirine bağlayan eklemler, vücut hareketlerini üreten kaslar, eklemlerin hareketliliği, vücudun kuvvet alanlarına (örneğin statik ve dinamik kuvvet uygulamaları, titreşimler, darbeler) karşı mekanik tepkileri ve dış nesnelere (örneğin kumandalar, aletler, kulplar) kuvvet (tork, enerji/güç) uygularken istemli vücut hareketleriyle ilgilenir. Makine ve ekipmanları (veya araçları) çalıştırırken veya kullanırken insan vücudunun ve vücut parçalarının rahat (örneğin, iç kuvvetler mukavemet ve tolerans sınırlarının çok altında) ve güvenli (yaralanmalardan kaçınma) olup olmayacağını değerlendirmek için kullanılır (Bhise, 2012).

1.2.1. Araç Tasarımında Antropometrinin Kullanımı

Bir araç tasarlamamanın ilk adımı, kullanıcı kitlesini ve antropometrik ve biyomekanik özelliklerini belirlemektir. Kullanıcı kitlesinin antropometrik verileri, aracın birçok temel boyutunun belirlenmesine yardımcı olacaktır. Biyomekanik veriler, kullanıcıların tolerans veya konfor seviyelerinin üzerinde kuvvetler uygulamaması veya maruz kalmaması için aracın tasarlanmasına yardımcı olacaktır.

Şekil 2, ayakta ve oturma pozisyonlarındaki insanların bazı temel boyutlarını göstermektedir. Farklı ülkelerden ve farklı araç türlerinden çeşitli popülasyonlar ölçülmüştür (Pheasant ve Haslegrave, 2006 gibi birçok insan faktörleri kitabında mevcuttur). Bu tür veriler ayrıca otomotiv şirketleri tarafından yeni araç konseptlerini veya erken prototipleri değerlendirmek üzere pazar araştırma kliniklerine davet edilen katılımcıların boyutlarını ölçerek de elde edilmektedir. **Tablo 1**'de ABD'li yetişkinlerin, yolcuları ağırlamada ve iç mekanları ve boşlukları değerlendirmede faydalı olan boyutlara ilişkin antropometrik verilerini sunmaktadır. **Tablo 1**, farklı kaynaklardan derlenen kadın ve erkeklerin çeşitli antropometrik boyutlarının 5., 50. ve 95. yüzdelik değerlerini ve standart sapmalarını sunmaktadır. (Kroemer et al., 2001), (Pheasant & Haslegrave, 2006), (Jürgens et al., 1990) ve (McDowell et al., 2008) verileri, ABD'li sivil yetişkin nüfusu içindir. (Garrett JW, 1971) el parmak verileri ABD Hava Kuvvetleri uçuş personelinden, (Sanders, 1983) verileri ise ABD ağır

kamyon sürücülerinin ölçüm anketlerinden alınmıştır. **Tablo 2'**de Yedi Farklı Ülkeden Alınan Nüfusun Antropometrik Boyutları verilmiştir. Farklı kaynaklar tarafından sağlanan normal dağılım parametreleri de, boyutları ölçmek için kullanılan örneklemdeki (yaş, ırk, etnik köken, örneklerin ölçüldüğü yıl vb. farklılıklar) ve farklı kaynaklar tarafından kullanılan ölçüm sürecindeki farklılıklar nedeniyle bir miktar farklılık gösterecektir. Ayrıca, farklı pazar segmentleri için araç tasarlamak için gereken antropometrik veriler ABD sivil nüfusundan farklı olduğundan, çoğu otomotiv üreticisi farklı pazar segmentlerindeki müşteriler (örneğin, ekonomik binek otomobiller, lüks binek otomobiller, kamyonetler) hakkında antropometrik veritabanları tutmaktadır. İnsan antropometrik özelliklerinin çoğunun normal dağılım gösterdiği bulunmuştur. Bu nedenle, normal dağılım genellikle belirli bir araç boyutunun barındırabileceği popülasyonların yüzdelik değerlerini hesaplamak için kullanılır.

Bir rastgele değişken olan x 'in normal dağılımı aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$f_x = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2s^2}} \quad (1)$$

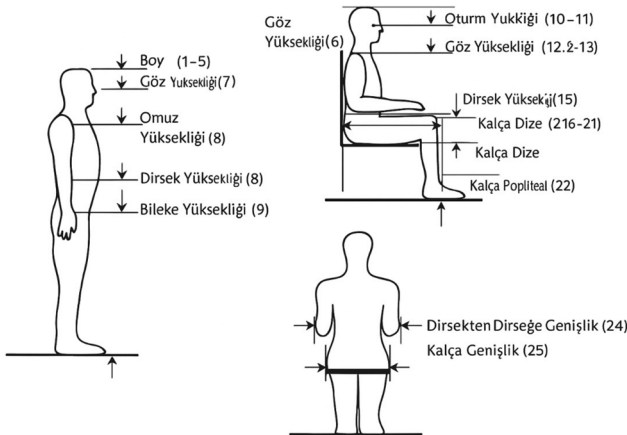
burada,

x = antropometrik boyut (örneğin, ayakta durma yüksekliği)

f_x = x 'in olasılık yoğunluk fonksiyonu

μ = x 'in normal dağılımının ortalaması

σ = x 'in dağılımının standart sapması



Şekil 2. Ayakta ve oturma pozisyonlarında statik antropometrik ölçümler. (Not: Parantez içindeki sayılar, Tablo 2.'de sunulan boyutları ifade eder.)

Tablo 1. Amerika Birleşik Devletleri Yetişkinlerinin Statik Vücut Ölçüleri (Değerler Milimetre Cinsindendir)

No	Ölçüm		5th	50th	95th	Standart Geliştirme	Kaynaklar
1	Boy:Zeminden tepe noktasına kadar olan dikey mesafe	Erkek Kadın	1647 1415	1756 1516	1855 1621	67 63	Kroemer et al., 1994
2	Boy:Zeminden tepe noktasına kadar olan dikey mesafe	Erkek Kadın	1640 1520	1755 1625	1870 1730	71 64	Pheasant and Haslegrave, 2006
3	Boy:Zeminden tepe noktasına kadar olan dikey mesafe	Erkek Kadın	1670 1540	1790 1650	1900 1760	70 67	Jurgens, Aune, and Pieper, 1990
4	Boy:Zeminden tepe noktasına kadar olan dikey mesafe	Erkek Kadın	1636 1507	1763 1622	1887 1731	76 68	McDowell et al., 2008
5	Boy:Zeminden tepe noktasına kadar olan dikey mesafe	Erkek Kadın	1665 1572	1756 1643	1880 1708	62 64	Sanders, 1983
6	Gözyüksekliği: Zeminden gözlere kadar olan dikey mesafe	Erkek Kadın	1528 1415	1634 1516	1743 1621	66 62	Kroemer et al., 1994
7	Omuzyüksekliği: Zeminden akromiyona kadar olan dikey mesafe	Erkek Kadın	1342 1241	1442 1334	1546 1432	62 58	Kroemer et al., 1994
8	Dirsekyüksekliği: zeminden radyal'e kadar olan dikey mesafe	Erkek Kadın	995 926	1072 998	1153 1074	48 45	Kroemer et al., 1994
9	Bilek yüksekliği: Zeminden bileğe kadar olan dikey mesafe	Erkek Kadın	778 728	846 790	915 855	41 39	Kroemer et al., 1994
10	Oturma yüksekliği: oturma yüzeyinden tepe noktasına kadar olan dikey mesafe	Erkek Kadın	854 795	914 852	972 910	36 25	Kroemer et al., 1994
11	Oturma yüksekliği: oturma yüzeyinden tepe noktasına kadar olan dikey mesafe	Erkek Kadın	855 800	915 860	975 920	36 36	Pheasant and Haslegrave, 2006
12	Otururken göz yüksekliği: Oturma yüzeyinden gözlere olan dikey mesafe	Erkek Kadın	735 685	792 739	848 794	34 33	Kroemer et al., 1994
13	Otururken göz yüksekliği: Oturma yüzeyinden gözlere olan dikey mesafe	Erkek Kadın	749 736	811 761	863 849	38 41	Sanders, 1983

14	Oturma omuz yüksekliği: oturma yüzeyinden akromiona kadar olan dikey mesafe	Erkek	548	598	646	30	Kroemer et al., 1994
		Kadın	509	555	604	29	
15	Oturma dirseği yüksekliği: Oturma yüzeyinden dirseğin alt kısmına kadar olan dikey mesafe	Erkek	184	232	274	27	Kroemer et al., 1994
		Kadın	176	220	264	27	
16	Uyluk yüksekliği: Oturma yüzeyinden uyluk yüzeyinin en üst noktasına kadar olan dikey mesafe	Erkek	149	168	190	13	Kroemer et al., 1994
		Kadın	140	159	180	12	
17	Otururken mide derinliği: gövdenin karın ekstansiyonu seviyesindeki yatay derinliği	Erkek	229	299	374	45	Sanders, 1983
		Kadın	195	247	309	48	
18	Diz yüksekliği (oturma): Yerden dizin üst yüzeyine kadar olan dikey mesafe	Erkek	514	559	606	28	Kroemer et al., 1994
		Kadın	474	515	560	26	
19	Popliteal yükseklik (oturma pozisyonu): Yerden dizin alt kısmına kadar olan dikey mesafe	Erkek	395	434	476	25	Kroemer et al., 1994
		Kadın	351	389	429	24	
20	Başparmak ucu ileri uzanımı: Omuz hizasında kaldırılmış kolla kürek kemiğinin arkasından başparmak ucuna kadar yatay mesafe	Erkek	739	801	867	39	Kroemer et al., 1994
		Kadın	677	735	797	36	
21	Kalça-diz mesafesi (oturma): sıkıştırılmamış kalçanın arkasından diz kapığının önüne kadar olan yatay mesafe	Erkek	596	616	667	30	Kroemer et al., 1994
		Kadın	542	589	640	30	
22	Kalça-popliteal mesafe (oturma): sıkıştırılmamış kalçanın arkasından dizin arkasına kadar olan yatay mesafe	Erkek	458	500	545	27	Kroemer et al., 1994
		Kadın	440	482	528	27	
23	Dirsek-parmak ucu mesafesi: Oturma pozisyonunda alt kol yatay konumdayken dirseğin arkasından orta parmak ucuna kadar olan yatay mesafe	Erkek	448	484	524	23	Kroemer et al., 1994
		Kadın	406	443	482	23	

24	Önkoldan önkola genişlik: Oturma pozisyonunda ön kolların en dış noktaları arasındaki yatay mesafe	Erkek Kadın	474 415	546 468	620 528	44 35	Kroemer et al., 1994
25	Kalça genişliği (oturma): Oturma pozisyonunda kalçalar arasındaki maksimum yatay mesafe	Erkek Kadın	329 342	367 384	412 432	25 27	Kroemer et al., 1994
26	Ayak uzunluğu: Uzunlamasına (ileri) ekseninde ölçülen, topuğun arkasından en uzun parmağın ucuna kadar olan mesafe	Erkek Kadın	249 224	270 244	292 264	13 12	Kroemer et al., 1994
27	Ayakkabı uzunluğu: topuğun arkasından tabanın ön kenarına kadar olan mesafe	Erkek Kadın	277 241	299 264	319 286	13 15	Sanders, 1983
28	Ayak genişliği: Ayak boyunca uzunlamasına eksene dik maksimum yatay genişlik	Erkek Kadın	92 82	101 90	109 98	53 49	Kroemer et al., 1994
29	Ayakkabı genişliği: Ayakkabı tabanının dış kenarlarındaki maksimum ayakkabı genişliği	Erkek Kadın	98 89	107 96	116 107	11 10	Sanders, 1983
30	El uzunluğu: El düz ve gergin tutulduğunda bilek kıvrımından orta parmağın ucuna kadar olan mesafe	Erkek Kadın	179 165	194 180	211 197	98 97	Kroemer et al., 1994
31	El uzunluğu: El düz ve gergin tutulduğunda bilek kıvrımından orta parmağın ucuna kadar olan mesafe	Erkek Kadın	183 165	197 179	212 193	9 9	Garrett, 1971
32	El genişliği: El ayası boyunca metakarpal kemiklerin distal uçlarında maksimum genişlik	Erkek Kadın	84 73	90 79	98 86	4 4	Kroemer et al., 1994
33	El genişliği: El ayası boyunca metakarpal kemiklerin distal uçlarında maksimum genişlik	Erkek Kadın	83 71	90 77	97 83	4 4	Garrett, 1971
34	El derinliği: thenar pedinde ölçüldü	Erkek Kadın	55 45	62 52	70 58	5 4	Garrett, 1971

35	El kalınlığı: metakarpale III'te ölçüldü	Erkek	30	33	36	2	Garrett,1971
		Kadın	25	28	30	2	
36	Başparmak genişliği: interfalangeal eklemde ölçülür	Erkek	22	24	26	4	Kroemer et al., 1994
		Kadın	19	21	23	1	
37	Başparmak genişliği: interfalangeal eklemde ölçülür	Erkek	21	23	25	4	Garrett,1971
		Kadın	17	19	21	1	
38	2. basamak genişliği: interfalangeal eklemde ölçülür	Erkek	17	18	20	1	Garrett,1971
		Kadın	14	15	17	1	
39	3. basamak genişliği: interfalangeal eklemde ölçülür	Erkek	17	18	20	1	Garrett,1971
		Kadın	14	15	17	1	
40	3. basamak derinliği: interfalangeal eklemde ölçüldü	Erkek	14	16	18	1	Garrett,1971
		Kadın	12	13	15	1	
41	1. Basamak (başparmak) uzunluğu: parmak ucundan kasık seviyesine kadar	Erkek	51	59	66	5	Garrett,1971
		Kadın	47	54	61	4	
42	2.rakam uzunluğu: parmak ucundan kasık seviyesine kadar	Erkek	68	75	82	5	Garrett,1971
		Kadın	61	69	78	5	
43	3.rakam uzunluğu: parmak ucundan kasık seviyesine kadar	Erkek	78	86	95	5	Garrett,1971
		Kadın	70	78	87	5	
44	Ağırlık (kg)	Erkek	58	79	99	13	Kroemer et al., 1994
		Kadın	39	62	85	14	
45	Weight (kg) (with shoes)	Erkek	69	92	120	17	Sanders,1983
		Kadın	53	72	90	19	

Dolayısıyla, ortalama (μ) ve standart sapma (σ), normal dağılımın iki parametresidir (yani, sırasıyla dağılımın konumunu ve yayılımını tanımlarlar). $f(x)$ 'in kümülatif dağılımı $F(x)$ olarak gösterilir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$F(x) = \int_{\{-\infty\}}^{\{x\}} f(x), dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\{-\infty\}}^{\{x\}} e^{-\{(x-\mu)^2/2\sigma^2\}} dx \quad (2)$$

Normal dağılım ortalamaya göre simetrik olduğundan, $F(x) = 0,5$, 50. yüzdelerik değeri tanımlar. Dolayısıyla, 50. yüzdelerik değeri, ortalamaya (μ) eşittir. Yüzdelerik değerler, belirli bir değişkene (x) göre uyumu değerlendirmek için kullanılır (yani, nüfusun ne kadarının antropometrik

bir değişken olan x 'in belirli bir değerine uyabileceği). Örneğin, x 'in 95. yüzdelik değeri $F(x) = 0,95$ olarak tanımlanacaktır. Dolayısıyla, x bireyle-
rin boyuysa, x 'in 95. yüzdelik değeri, o popülasyondaki bireylerin yalnız-
ca %5'inin bu değerden daha uzun olacağı anlamına gelir. Tablo 1, satır
1'den, erkeklerin boylarının 95. yüzdelik değeri 1855 mm'dir. Bu, ABD'li
yetişkin erkeklerin yalnızca %5'inin 1855 mm'den daha uzun olduğu an-
lamına gelir. Dolayısıyla, bir kapının (örneğin bir sınıf için) erkeklerin
%95'inin başlarını eğmeden kapı aralığından geçebileceği şekilde tasar-
lanması gerekiyorsa, kapı açıklığı yüksekliği en az 1855 mm olmalıdır.
Genellikle, ayakkabı ve şapkalardan kaynaklanan uyum yüksekliğindeki
artışı hesaba katmak için 50 ila 100 mm ek boşluk bırakılmıştır (Bhise,
2012).

Tablo 2. Yedi Farklı Ülkeden Alınan Nüfusun Antropometrik Boyut-
ları

Antropometrik Boyut	Yüzdelik Değer	Amerikalı Erkekler	Amerikalı Kadınlar	İngiliz Erkekler	İngiliz Kadınlar	Alman Erkekler	Alman Kadınlar	Fransız Erkekler	Fransız Kadınlar	Japon Erkekler	Japon Kadınlar	HongKong Erkekler	HongKong Kadınlar	Hindistan Erkekler	Hindistan Kadınlar
Boy (mm)	95	1870	1730	1855	1710	1845	1750	1830	1700	1750	1610	1775	1655	1745	1615
	50	1755	1625	1740	1610	1745	1635	1715	1600	1655	1530	1680	1555	1640	1515
	5	1640	1520	1625	1505	1645	1520	1600	1500	1560	1450	1585	1455	1535	1415
Oturma yüksekliği (mm)	95	975	920	965	910	975	930	970	910	950	890	955	900	905	850
	50	915	860	910	850	920	865	910	860	900	845	900	840	850	790
	5	855	800	850	795	865	800	850	810	850	800	845	780	795	730
Otururken göz yüksekliği (mm)	95	860	810	845	795	850	800	855	800	835	780	840	780	795	745
	50	800	750	790	740	800	740	795	750	785	735	780	720	740	690
	5	740	690	735	685	750	680	735	700	735	690	720	660	685	635
Oturma omuz yüksekliği (mm)	95	655	620	645	610	640	570	670	625	635	600	655	610	690	565
	50	600	565	595	555	595	525	620	580	590	555	605	560	640	515
	5	545	510	540	505	550	480	570	535	545	510	555	510	590	465
Omuz genişliği (bideloid) (mm)	95	515	440	510	435	505	445	515	470	475	425	470	435	455	390
	50	470	400	465	395	465	400	470	425	440	395	425	385	415	350
	5	425	360	420	355	425	355	425	380	405	365	380	335	375	310
Kalça genişliği (mm)	95	410	440	405	435	385	445	410	430	330	340	370	365	365	390
	50	360	375	360	370	350	375	370	380	305	305	335	330	320	330
	5	310	310	310	310	315	305	330	330	280	270	300	295	275	270
Kalça-Diz Uzunluğu (mm)	95	650	625	645	620	640	635	640	610	600	575	595	570	610	590
	50	600	575	595	570	600	580	595	565	550	530	550	520	560	540
	5	550	525	540	520	560	525	550	520	500	485	505	470	510	490
Diz yüksekliği (mm)	95	605	550	595	540	590	555	575	535	530	480	540	500	565	515
	50	550	505	545	500	545	505	530	495	490	450	495	455	515	470
	5	495	460	490	455	500	455	485	455	450	420	450	410	465	425
Omuzdan dirseğe uzunluk (mm)	95	400	365	395	360	395	365	395	360	365	330	370	340	370	340
	50	365	335	365	330	365	335	360	330	330	300	340	315	340	310
	5	330	305	330	300	335	305	325	300	295	270	310	290	310	280
Dirsek-parmak ucu uzunluğu (mm)	95	515	470	510	460	505	470	505	455	475	430	480	440	485	435
	50	480	435	475	430	475	435	470	425	440	400	445	400	450	405
	5	445	400	440	400	445	400	435	395	405	370	410	360	415	375

Not: Antropometrik boyutlar Stephen Pheasant'ın Bodyspace (2006) kitabından alınmıştır (Bhise, 2012).

SONUÇ

Ülkemizde ve Dünya’da karayolu ağlarının gelişmesi ve otomotiv kullanımının artmasıyla otomotiv içinde insanların geçirmiş olduğu süre geçmişe kıyasla daha da artmıştır. Otomotiv içinde geçirilen sürenin artması, kas ve iskelet sisteminde zorlanmaları da beraberinde getirmektedir. Literatür incelendiğinde, otomotiv firmaları ve akademisyenler tarafından yürütülen ürün ergonomilerinin geliştirilmesi ve yaşam kalitesinin yükseltilmesi için yapılan pek çok çalışmaya rastlanılmaktadır. Bu çalışmalar, otomotiv kullanımında oturuştaki konfor açılarının hesaplanmasını ve kullanıcıların trafikte yola daha iyi hakim olmalarını hedeflemektedir (Ülker et al., 2021).

KAYNAKLAR

- Bhise, V. D. (2012). *ERGONOMICS in the Automotive Design Process*. CRC Press Taylaro & Francis Group.
- Garrett JW. (1971). The Adult Human Hand: Some Anthropometric and Biomechanical Considerations. *Human Factors*, 13(2), 117–131. <https://doi.org/10.1177/001872087101300204>
- Jürgens, H. W., Aune, I. A., & Pieper, U. (1990). *International Data on Anthropometry*. International Labour Office.
- Kroemer, K. H. E., Kroemer, H. B., & Kroemer-Elbert, K. E. (2001). *Ergonomics: How to Design for Ease and Efficiency*. Michigan University.
- McDowell, M. A., Fryar, C. D., Ogden, C. L., & Flegal, K. M. (2008). *Anthropometric Reference Data for Children and Adults: United States, 2003–2006*. <https://www.cdc.gov/nchs/data/nhsr/nhsr010.pdf>
- Öksüz, A. (2019). Her Alanda Ergonomi. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 2(1), 3–24.
- Pheasant, S., & Haslegrave, C. M. (2006). *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work, Third Edition*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Sanders, M. S. (1983). *Truck Driver Anthropometric and Truck Work Space Data Survey. Report CRG/TR-83/002*.
- Ülker, O., Altın, A., Derafshi, M. H., Üniversitesi, E. T., Ve, M., Fakültesi, T., Bölümü, İ. M., Mimarlık, İ., Eskişehir, B., Kelimeler, A., Duruş Analizi Otomotiv, Ö., Ve, K., Sistemi, İ., Açıları, Z. K., Makalesi, A., Tarihi, B., Tarihi, K., & Yazar, S. (2021). Otomotiv Kullanıcılarında Görüntüleme Yöntemi Kullanılarak Konfor Açılarının Araştırılması - Investigation Of Comfort Angles By Using The Imaging Method. *Ergonomics*, 4(2), 97–106. <https://doi.org/10.33439/ergonomi.959077>

Bölüm 7

GEOTEKSTİLLERİN SINIFLANDIRILMASI VE ÖZELLİKLERİ

Suat CANOĞLU¹, Ayberk ŞİT²

1 Prof.Dr. Suat CANOĞLU, Marmara University, Faculty of Technology, Department of Textile Engineering, Recep Tayyip Erdoğan Campus, Istanbul / Türkiye scanoglu@marmara.edu.tr / ORCID: 0000-0002-1604-9875

2 Ayberk ŞİT, Marmara University, Faculty of Technology, Department of Textile Engineering, Recep Tayyip Erdoğan Campus, Istanbul / Türkiye ayberksit@marun.edu.tr / ORCID: 0009-0008-9116-9800

1. GİRİŞ

Geotekstiller, geoteknik ve inşaat mühendisliği kapsamında toprak altı uygulamalarında yer alan tekstil ürünleridir [1]. Geotekstilin tanımı, The Textile Institute tarafından yayınlanan Textile Terms and Definitions'da, "Toprak, kaya veya diğer yapı malzemelerinden oluşan inşaat mühendisliği yapılarının ayrılmaz bir parçası olarak filtrasyon, drenaj, ayırma, güçlendirme ve stabilizasyon amacıyla kullanılan her türlü geçirgen tekstil malzemesi" olarak yapılmaktadır [2].

Hem işverenler hem de müteahhitler geotekstillerin avantajlarını kısa sürede fark etmişlerdir. Örneğin, yumuşak zeminlerde yol yapımı daha kolay ve iklim koşullarından daha az etkilenir hale gelmiştir. Geotekstiller, yağmurlu hava koşullarında iş makinelerinin olumsuz yönde etkilenmesini önlemek için kullanılmıştır. Filtrasyon amacıyla geotekstillerden yararlanılması sayesinde maliyet ve süreden tasarruf sağlanmıştır. Bunun nedeni, geotekstil ürünü serilmesinin, granül filtreler kullanımına kıyasla daha pratik bir yol olmasıdır. Aynı zamanda, bu işlem sonucunda toprak işleri için gereken harcama azalmaktadır [3].

1950'lerde, sahillerde istinat duvarları ve erozyon kontrolü için kullanılan bloklarda geotekstillere yer verilmiştir [4]. 1958 yılında ABD'de zemin taşlarının alt kısmında sentetik dokuma kumaşlar kullanılmıştır [5]. Florida'da sahil erozyonunu önlemek amacıyla uygulanan geotekstiller yıllarca kullanımda kalmıştır. 1957-1980 seneleri aralığında Hollanda'da Delta Projesi çerçevesinde sel afetlerine karşı Nylon dokuma geotekstiller kullanılarak kum torbaları oluşturulmuştur [6]. Fransa'da geotekstillerin kullanımı 1960'larda artmıştır. Demiryolu balast tabakaları, kaplamasız yollar, şevler ve toprak dolgu barajları gibi alanlarda geotekstiller, ayırma ve güçlendirme için uygulanmıştır. 1970'lerde dünya çapında çok sayıda şirket tarafından geotekstil imalatına verilen önem sayesinde malzeme kalitesi konusunda belirgin gelişmeler kaydedilmiştir [4]. Geotekstillerin ilk önemli satış faaliyetleri 1970'lerin ilk yarısında gerçekleşmiş olup, bu dönemde satışlar giderek artmıştır [5]. İlerleyen dönemde geotekstil ürünlerinin kullanımı oldukça önemli hale gelmiştir [4].

Geotekstillerin uygulanması ile birlikte teorik açıdan göçmeye oldukça yaklaşmış olan bazı yapılar, pratikte göçmeden stabil halde durabilmektedir. Tekrarlı yükler altında kalan kaplamasız yollar veya benzeri yapılar için zemin tabakalarının geotekstil kullanılarak korunması durumunda hem yapının kullanım süresi uzar hem de dayanımı artar [7]. Geotekstiller, aşırı yoğun trafik ve ağır yükler nedeniyle yolların hasar görmesini önlemek için kullanılabilir [8]. Geotekstil ürünler maliyet açısından uygun, dayanıklı ve uygulaması kolay malzemeler olarak değer-

lendirilmektedir. Geotekstillerin geoteknik mühendisliğindeki kullanımı giderek daha da önem kazanmaktadır [9].

Bu çalışmanın amacı, geotekstillerin farklı şekillerde sınıflandırılması ve özelliklerinin değerlendirilmesidir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde geotekstillere, lif türüne ve üretim yöntemlerine göre incelenecektir. Ayrıca bu çalışmada, geotekstillerin fiziksel, mekanik, hidrolik, dayanıklılık ve bozunma özellikleri hakkında bilgi verilecektir.

2. GEOTEKSTİLLERİN SINIFLANDIRILMASI

2.1. LİF TÜRÜNE GÖRE GEOTEKSTİLLER

Bir tekstil lifinin geotekstil uygulamaları bakımından uygun olması için belirli özelliklere sahip olması gerekir. Geotekstillerin nihai özellikleri, elyaf özelliklerinden etkilenir [10]. Sentetik ve doğal liflerden elde edilen tekstil yapıları, geotekstil uygulamalarında kullanım alanı bulabilmektedir [1]. Sentetik malzemelerden elde edilen geotekstillere ticari pazarda baskın bir konuma sahiptir. Bununla birlikte, bazı uygulamalar kapsamında biyopolimerler, geleneksel malzemelere uygun bir alternatif olarak kullanılabilir [11].

2.1.1. SENTETİK LİFLERDEN ÜRETİLEN GEOTEKSTİLLER

Geotekstillere farklı polimerik malzemelerden elde edilebilmektedir. Bu malzemelerin hepsi çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bunların başlıcaları polipropilen, polyester, poliamid ve polietilen olarak belirtilebilir [4]. Bu polimer çeşitlerine bağlı olarak geotekstil özellikleri, Tablo 1'de verilmiştir.

Sentetik lifler, çeşitli türlerde geotekstillerin üretiminde kullanılan temel malzemelerdir [2]. Sentetik liflerin bu kadar popüler olmasının başlıca nedenleri maliyet ve özelleştirilmiş niteliklerdir. Sentetik lifler, genel olarak üniform dayanım, uzunluk ve renk sağlamak için petrokimyasallar kullanılarak seri halde üretilmektedir. Aynı zamanda belirli uygulamalarda kullanılmak üzere kolayca özelleştirilebilmektedirler [10]. Sentetik elyafın biyolojik olarak parçalanmaması, sürekli uygulamalar için kullanılmalarının temel nedenini oluşturmaktadır [1].

Sentetik elyaf kullanılarak üretilen geotekstillere, geosentetikler kategorisine aittir [1]. Geosentetikler, özellikle çekme dayanımı olmak üzere dikkat çekici mekanik özelliklere sahiptir. Bu durum, onları çeşitli geoteknik mühendisliği uygulamaları için oldukça uygun bir seçenek haline getirir [12]. Geosentetiklerin, kullanım amacına ve çevre koşullarına uygun bir şekilde tercih edilmesi gerekir [13]. Geosentetiklerin kullanım ömrü ve çalışma performansı, yapısında bulunan sentetik polimerlerin

kimyasal ve yapısal stabilitesi ile ilişkilidir [12]. Polimer tercihi geotekstillerin sahip olduğu özellikler açısından belirleyici bir rol oynasa da kumaş yapısı ve bitim işlemleri de dahil olmak üzere birçok unsurun, ürünlerin özelliklerine etki edebileceği unutulmamalıdır [2].

Polipropilen (PP): Polipropilenin en temel avantajı düşük ve orta konsantrasyonlardaki kimyasal maddelere karşı yüksek direncidir [6]. Bu malzeme, organik asitlerin oluşturduğu etkilere karşı yüksek derecede dayanıklılık gösterir ve pH değeri 13'e kadar çıkan alkali maddelere dirençlidir [14]. Polipropilen, oksidasyona karşı duyarlı bir malzemedir [15]. Maliyetinin ve yoğunluğunun düşük olması, gerilme özelliklerinin makul seviyede olması ve kimyasal inertliği sayesinde polipropilen, geotekstil üretim sürecinde en yaygın kullanılan polimerdir [1,2]. Polipropilenin olumsuz yönleri arasında UV ışınlarına ve yüksek sıcaklık koşullarına karşı hassasiyeti ile sünme ve mineral yağ direncinin zayıf olması bulunmaktadır [2]. Polipropilen, uzun süre ışığa ve yüksek sıcaklıklara tabi tutulduğunda bozunma meydana gelir. Bu bakımdan güneşle doğrudan temas halinde ek bir koruyucu malzeme kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır [14].

Polyester (PET): Polyester, sürtünmeye karşı dayanıklı bir malzemedir [6]. Bu malzeme, 200°C sıcaklığa dek mekanik özelliklerini korur [5]. Yüksek dayanım gerektiren ve geotekstilin yüksek sıcaklık koşullarına maruz kaldığı uygulamalarda polyester kullanılmaktadır [1,2]. Polyester, güneş ışığına ve dış çevre şartlarına dayanıklı yapıya sahip olup, asitlere ve deniz suyuna dirençli bir malzemedir [15,16]. Polyester lifi, mevsimsel değişikliklere bağlı sıcaklık farklarından veya asidik çevre şartlarından düşük seviyede etkilenen bir lif türüdür. Polyester lifinden üretilen geotekstillerin, kimyasal maddelere (organik asitler, organik çözücüler, petrol ve bitüm gibi) karşı direnci yüksektir. Polyester lifleri, alkali hidrolize karşı hassastır [2]. Polyester lifleri için alkali hidroliz, pH değerinin 10'un üzerine çıkması halinde meydana gelir ancak toprak ortamında pH seviyesi nadiren bu değeri aşar [2,17]. Buna karşın, kalsiyum iyonları bulunduğu, alkali hidroliz oranında ciddi bir yükselme görülür. Bu nedenle, sert su ortamında, polyester bazlı geotekstilin dayanımı hızlı bir şekilde azalır [2]. Polyester bazlı geotekstillerin, polipropilen bazlı geotekstillere kıyasla çekme dayanımı daha yüksektir, ayrıca yüksek sıcaklıklara ve güneş ışığına karşı direnci daha fazladır [18].

Polietilen (PE): Polietilen, orta ve düşük konsantrasyonlardaki kimyasal maddelere karşı direnci, hafifliği ve maliyet etkinliği sayesinde geotekstillerde kullanılan malzemeler arasında yer almaktadır. Ancak polietilen kolay tutuşabilen bir malzemedir [15]. Polietilen malzeme, uzun süre ışığa veya yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında kırılgan hale gelir

ve bozunur. Dolayısıyla polietilen ürünlerinin depolanması sırasında gerekli özen gösterilmelidir. Geotekstil imalatında iki farklı polietilen türü kullanılmaktadır. Bunlar, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve yüksek yoğunluklu polietilendir (HDPE) [5]. LDPE, yüksek esnekliğe sahip bir malzemedir [15]. HDPE, LDPE'ye göre daha sert ve rijit bir yapıya, aynı zamanda daha yüksek kimyasal dirence sahiptir [5].

Poliamid (PA): Poliamid, yüksek aşınma direnci sergiler ancak sulu ortamlara karşı hassastır. Poliamid ürünlerin mekanik özellikleri, uzun süre suda kalmaları sonucunda %20-30 oranında azalmaktadır. Poliamidin mekanik özelliklerinin, zeminin nem seviyesinden etkilendiği bilinmektedir. Geotekstil ürünlerinin imalatında PA 6 ve PA 6.6 kullanılmaktadır [5].

Tablo 1. Polimer çeşidine bağlı olarak geotekstil özellikleri [2,4,19]

Özellikler	Polimer Çeşidi			
	Polyester	Poliamid	Polipropilen	Polietilen
Dayanım	Yüksek	Orta	Düşük	Düşük
Elastisite Modülü	Yüksek	Orta	Düşük	Düşük
Sünme	Düşük	Orta	Yüksek	Yüksek
Birim ağırlık	Yüksek	Orta	Düşük	Düşük
Maliyet	Yüksek	Orta	Düşük	Düşük
UV Dayanımı (Stabilize)	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
UV Dayanımı (Stabilize edilmemiş)	Yüksek	Orta	Orta	Düşük
Alkalilere Dayanıklılık	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Mantar, Haşere ve Böceklere Dayanıklılık	Orta	Orta	Orta	Yüksek
Petrol Ürünlerine Dayanıklılık	Orta	Orta	Düşük	Düşük
Temizlik Ürünlerine Dayanıklılık	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek

2.1.2. DOĞAL LİFLERDEN ÜRETİLEN GEOTEKSTİLLER

Son yıllarda, polimer atıklarının çevresel etkisini azaltma ihtiyacı nedeniyle doğal liflerden elde edilen geotekstillere olan ilgi artmıştır [12]. Çevresel farkındalığın yanı sıra sürdürülebilirliğe yönelik endişeler, doğal liflerden elde edilen geosentetiklerin kullanımı ile bir alternatif oluşturulmasını sağlamıştır [20]. Geotekstillerin üretimi için doğal lifler tercih edilebilmektedir. Pamuk, keten, jüt, sisal, kenaf ve abaka gibi doğal lifler, geotekstillerin kısıtlı bir süre için görev yapması istenen yerlerde kullanılır. Hindistan cevizi elyafı çürümeye, çamura ve neme karşı

dirençlidir. Bu nedenle, bu liflerden elde edilen gözenekli dokunmamış kumaşlar, toprak erozyonunun önüne geçmek amacıyla kullanılabilir [1]. Doğal lifler biyolojik olarak parçalanabilir, yenilenebilir ve sağlık dostudur. Doğal malzemeler toprağa kolayca karışır ve toprağın organik içeriğini artırır. Bu sayede doğal malzemeler, bitkilerin büyümesi için uygun bir ortam oluşturur. Doğal elyafın sahip olduğu biyolojik olarak parçalanabilme özelliği, bu malzemelerin kısa vadeli geoteknik uygulamalarda yer almasına neden olmuştur [10].

Elyaf türü ve hangi koşullar altında kullanılacağı doğal liflerden üretilen kumaşların tasarım ömrünü belirler. Bitkisel liflerden üretilen geotekstiller, çeşitli sorunlara doğa dostu, sürdürülebilir ve maliyeti uygun geoteknik çözümler sunmaktadır [21].

2.2. ÜRETİM YÖNTEMİNE GÖRE GEOTEKSTİLLER

Günümüzde, üretimindeki prosesler doğrultusunda sınıflandırılan dört temel geotekstil çeşidi söz konusudur. Bunlar; dokunmamış, dokuma, örme ve kompozit geotekstillerdir [22].

Dokunmamış geotekstiller, en yaygın kullanılan geotekstil grubunu oluşturmaktadır. Bunun nedeni, çok çeşitli görevleri yerine getirebilmeleridir. Dokuma geotekstil malzemeleri, uygulamalarının daha dar kapsamlı olmasından dolayı en sık kullanılan ikinci geotekstil grubudur [22]. Dokuma kumaşların yapısında atkı ve çözgü iplikleri bulunur. Dolayısıyla dokuma kumaşlar, çok yüksek düzeyde mekanik uzamaya sahip değildir. Dokuma kumaşlar, toprak destekleme uygulamalarında üstünlük sağlar [1]. Dokuma tekniği ile üretilen sentetik geotekstillerin dayanımları, genellikle aynı birim alan kütesine ve polimer türüne sahip dokunmamış geotekstillere göre daha yüksektir. Buna ek olarak kopma uzamaları ise daha düşüktür [12]. Örme geotekstiller ise çok daha sınırlı bir kullanıma sahiptir. Bu malzemeler, yoğunlukla geleneksel dokuma veya dokunmamış yapıdaki geotekstillerin uygun maliyetle sağlayamadığı özellikler gerektiren belirli kullanımlar için niş pazarlarla sınırlıdır. Ayrıca, bu yöntemlerin birleştirildiği veya farklı ürünler ile bir araya getirildiği ürün grupları da bulunmaktadır. Bu tür çok katmandan oluşan ürünlere yoğunlukla kompozit geotekstiller adı verilir [22].

2.2.1. DOKUNMAMIŞ GEOTEKSTİLLER

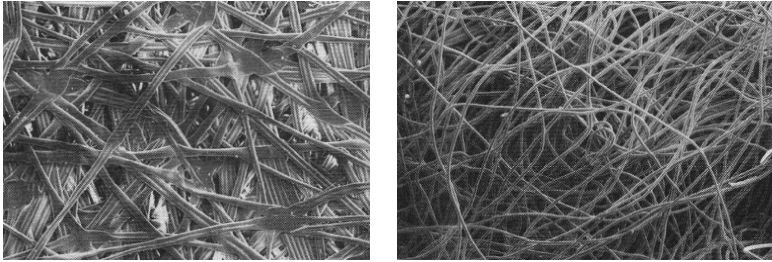
Dokunmamış kumaşların üretimi başlıca doku oluşturma ve lifleri çeşitli yöntemlerle bağlama adımlarından meydana gelir. Bu iki aşamalı süreç, dokunmamış kumaşların kategorize edilmesi için temel oluşturur [2]. Liflerin bağlanması için farklı mekanik, ısı veya kimyasal esaslı yön-

temler uygulanır. Bu yöntemler, ürünün sahip olması istenen özelliklere uygun olarak gerçekleştirilir [22].

Kimyasal bağlama işleminde, filament veya kesikli liflerin birbirine bağlanması amacıyla binder kullanılır. İğneleme işlemi, metal iğneler kullanılarak yapılır [2]. İğnelenmiş geotekstiller, iyi geçirgenlik ve düşük üretim maliyeti sağlar [12]. Isı ile bağlama işlemi sırasında, doku içerisindeki termoplastik bileşene ısı enerjisi verilir [2].

Dokunmamış geotekstil ürünlerinin piyasada yer bulması, geotekstil pazarındaki önemli gelişmeler arasındadır [23]. En yaygın kullanılan geotekstil grubu dokunmamış geotekstillerdir. Dokunmamış geotekstiller, kesikli lifler veya filamentler kullanılarak üretilir. Adından da anlaşılacağı üzere, bu tekstil malzemelerinin üretiminde iplik elde etme ve dokuma aşamalarına gerek duyulmamaktadır. Bu geotekstil grubunu üretmeye yönelik olarak uygulanan işlemler sonucunda diğer temel geotekstil gruplarına göre daha kalın malzemeler elde edilebilmektedir [22]. Geotekstiller alanında, dokunmamış yapılar genel olarak yol alt yapılarında, nehir yataklarında, yer altı drenaj sistemlerinde, havaalanlarının ve atletizm sahalarının zeminlerinde kullanım alanı bulmaktadır. Ayrıca, dokunmamış yapılar kanalizasyon sistemlerinin alt yüzeylerinde, toprak katmanlarının ayrılmasında, sürekli erozyon kontrolünde ve arazi dolgu uygulamalarında jeomembran kaplama malzemesi olarak kullanılır [1].

Dokunmamış geotekstiller filtrasyon, drenaj, ayırma ve koruma amacıyla kullanılır. Geotekstil, filtrasyon fonksiyonu ile su geçişine olanak sağlamakta olup, diğer yandan ince taneli zemin partiküllerinin geçişini engeller. İnce taneli zemin ile iri taneli zemin arasına yerleştirilen dokunmamış geotekstil, bu iki tabakanın karışmasını önler. Bu açıdan geotekstil, yol inşaatları için temel bir malzeme haline gelmiştir [15]. Dokunmamış geotekstil örnekleri, Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 1. Isı ile bağlanmış (solda), mekanik bağlanmış (sağda) dokunmamış geotekstiller [6]



Şekil 2. Dokunmamış geotekstiller [18]



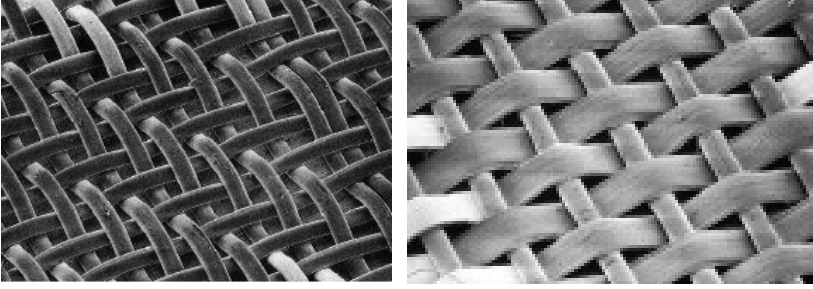
Şekil 3. Dokunmamış geotekstil örnekleri [24]

2.2.2. DOKUMA GEOTEKSTİLLER

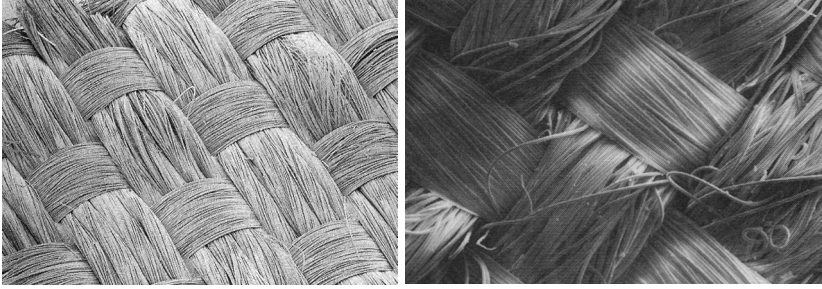
Dokuma geotekstiller, birbirine dik iki yönde iplik içerir [25]. Boyuna yöndeki iplikler çözgü iplikleri, enine yöndeki iplikler ise atkı iplikleri adını alır [2]. Dokuma geotekstiller genel olarak çekme dayanımının yüksek olması gereken durumlarda tercih edilir ve üç farklı geotekstil grubu arasında en kompakt yapıya sahip olanıdır [22,25]. Kullanılan malzeme ve iplik tipine bağlı olarak elde edilen farklı geotekstiller ile farklı mekanik, fiziksel ve hidrolik özellikler sağlanabilmektedir [25].

Dokuma geotekstiller güçlendirme ve ayırma amacıyla kullanım alanı bulmaktadır. Büyük yükler karşısında ince taneli zeminin iri taneli zeminle karışmasını önlemek için dokuma geotekstil uygulanabilir. Bu sayede, üst yapıdan aktarılan dinamik yükler nedeniyle malzemelerin karışması engellenmiş olur. Dokuma geotekstil kullanılarak yapılan zemin güçlendirmesi, zemin taşıma kapasitesini artırır ve deformasyon miktarını azaltır [15].

Monofilament dokuma geotekstiller, genel olarak polietilen ve polipropilen polimer türleri kullanılarak üretilmektedir. İplikler arasındaki aralık, zeminin tane büyüklüğüne uygun olarak belirlenmelidir. Multifilament geotekstiller ise çoğunlukla poliamid ve polyester tipi polimerlerden elde edilir [6]. Dokuma monofilament ve multifilament geotekstiller, sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te yer almaktadır.



Şekil 4. Dokuma monofilament geotekstiller [6,24]



Şekil 5. Dokuma multifilament geotekstiller [4,6]

Şerit tipi dokuma geotekstiller, monofilament dokuma geotekstillere benzer. Dokuma işleminde kullanılan malzeme, ince bir şerit formundadır. Şerit tipi dokuma yapılar, gözenek oranlarının düşük olması nedeniyle düşük geçirimsizlik sergiler. Bu durum, tıkanma riskini artırır [6].

2.2.3 ÖRME GEOTEKSTİLLER

Örme geotekstil malzemeler, ilmeklerin birbirlerine bağlanmasıyla elde edilir. Örme tekstil malzemeleri, bir veya daha fazla doğrultuda esneyebilme özelliğine sahiptir [22]. Geotekstil alanında örme kumaşların kullanımı, çoğunlukla özel olarak üretimi yapılan çözgülü örme tekstil malzemeleriyle sınırlı kalmaktadır [26]. Örme geotekstiller, günümüzde kullanılan geotekstillere yalnızca %5'ine karşılık gelmektedir [12].

2.2.4. KOMPOZİT GEOTEKSTİLLER

Kompozit geotekstiller, birden fazla kategoride ürün içerdikleri için sınıflandırılmaları güçtür. Kompozit geotekstiller, çok katmanlı geoteks-

tiller ve geotekstil esaslı çok katmanlı geosentetik malzemeler olmak üzere iki grup altında incelenebilir [22].

Çok katmanlı geotekstilller, iki veya daha fazla geotekstilin bir araya getirilmesi sonucu oluşan ve farklı katmanların birbirlerini tamamladığı yeni bir üründür. Bu farklı katmanlar, aynı geotekstil türünden veya farklı türlerden (dokunmamış, dokuma veya örme) olabilir. Farklı geotekstil katmanlarının bir araya getirilmesiyle, ürüne belirli özellikler kazandırılır. Bu özellikler, her bir katmanın kendi özelliklerine göre değişir [22].

Geotekstil esaslı çok katmanlı geosentetik malzemelerde, bir veya daha fazla geosentetik malzeme bir araya getirilir. Bunlardan en az bir tanesi geotekstildir. Bu ürünler, genel olarak drenaj amaçlı kullanılır. Geotekstillerin jeomembranlar ile veya geogridler ile bir araya getirildiği geokompozit ürünler bulunmaktadır [22].

3. GEOTEKSTİLLERİN ÖZELLİKLERİ

Üretim sürecinde geotekstil malzeme kullanımı söz konusu olduğunda, ilgili özelliklerin anlaşılması ve projelendirme aşamasında bu özelliklere uygun olarak işlem yapılması gerekmektedir [14].

3.1. GEOTEKSTİLLERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Geotekstilller, fiziksel özellikleri bakımından birbirlerinden farklılık gösterirler. Bunun nedeni, geotekstilleri üretmek için farklı malzemelerin kullanılması, çeşitli türlerde geotekstil gruplarının bulunması ve birçok farklı işlevi yerine getirmeleridir [27].

3.1.1. Yoğunluk

Geotekstillerin üretiminde çeşitli polimerik malzemeler kullanılmaktadır [14]. Geotekstilin yoğunluk değeri, kütlesinin boşluksuz hacmine oranlanmasıyla elde edilir [6]. Bazı polimerik malzemeler sudan daha düşük yoğunluğa sahip olduğu için su altı çalışmalarında bu durum göz önünde bulundurulmalıdır [5,27]. Geotekstil üretiminde kullanılan çeşitli polimerik malzemelerin yoğunlukları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Geotekstil polimerlerinin yoğunlukları [6]

Polimer	Yoğunluk (g/cm ³)
Polipropilen (PP)	0.90 – 0.91
Polyester (PET)	1.38
Poliamid (PA)	1.14
Polietilen (PE)	0.92 – 0.96

3.1.2. Birim Alan Başına Kütle

Birim alan başına düşen kütle değeri, belirli bir projede kullanılacak geotekstilin seçiminde büyük önem taşımaktadır [4]. Bir geotekstil malzemenin maliyeti, birim alan başına kütlesi ile bağlantılıdır. Bir geotekstil çekme ve yırtılma dayanımı, görünür boşluk boyutu ve delinme direnci gibi özellikleri, birim alan başına kütle değerinden etkilenebilir. Geotekstilin birim alan kütlesinin belirlenmesi ASTM D5261 standardına göre yapılır [27].

Dokunmamış geotekstillerin birim alan kütlesi 100 ile 1000 g/cm² arasındadır. Bununla birlikte, bu değer 100 ila 300 g/cm² arasında olduğu dokunmamış geotekstiller yaygın olarak kullanılmaktadır. Dokuma geotekstillerin birim alan kütlesi ise 100 ile 2000 g/cm² arasındadır. En yaygın olarak kullanılan dokuma geotekstiller ise 100 ila 200 g/cm² arasında birim alan başına kütle değerine sahip olanlardır [6].

Birim alan başına kütlesi düşük olan geotekstiller, genel olarak ayırma amacıyla kullanılır. Birim alan kütlesi yüksek olan dokunmamış geotekstiller, filtrasyon ve koruma uygulamaları için tercih edilmektedir. Birim alan başına kütlesi yüksek olan dokuma geotekstiller ise güçlendirme amaçlı uygulamalarda kullanılır [6].

3.1.3. Kalınlık

Geotekstillerin kalitesinin belirlenmesine yönelik yapılan başka bir temel test ise kalınlık testidir. Kalınlık, belirli bir basınç uygulandığında geotekstil malzemenin alt ve üst kısımları arasındaki mesafe olarak ifade edilir. Geotekstil kalınlığı; birim alan başına kütle, çekme dayanımı, yırtılma dayanımı ve delinme direnci gibi diğer özelliklere etki edebilir. Geotekstil kalınlığının ölçümü ASTM D5199 standardına göre yapılır [27]. Geotekstillerin kalınlığı, maruz kaldıkları yükler nedeniyle büyük değişim gösterir. Geotekstil kalınlığının ölçümü, belirli bir basınç yükü altında yapılır [6]. Genel olarak geotekstil malzemelerin kalınlık değerleri 0.2 – 10 mm aralığında değişiklik göstermektedir [25].

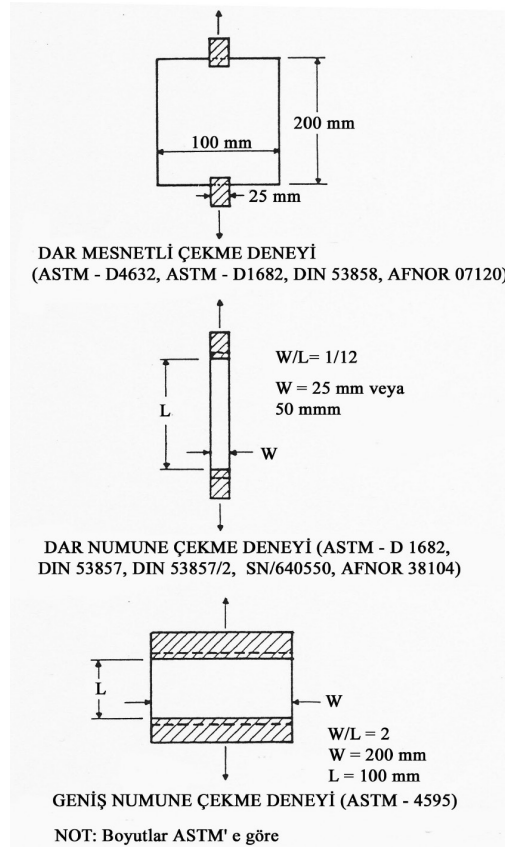
3.2. GEOTEKSTİLLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Mekanik testler geotekstiller üzerinde sıklıkla gerçekleştirilmektedir. Geotekstillerin yapısal bir görev üstlendiği veya kurulum sırasında meydana gelebilecek hasarlara ve bölgesel gerilimlere karşı dayanıklı olması gereken uygulamalarda, mekanik davranışları önemli bir rol oynamaktadır [28].

3.2.1. Çekme Dayanımı

Çekme dayanımı, geotekstil uygulamalarında dikkate alınan, geotekstillerin en önemli özelliklerinden biridir. Zemin güçlendirme uygulamalarında, zemine etki eden çekme gerilmeleri geotekstillere aktarılır. Bu nedenle kullanılan geotekstil malzemelerinin çekme dayanımı kritik öneme sahiptir. Çekme dayanımını tespit etmek için kullanılan farklı test yöntemleri bulunmaktadır [6].

Sıklıkla kullanılan geotekstil türleri olan dokuma ve dokunmamış geotekstillere, tek eksenli veya çift eksenli yükleme altında farklı davranışlar sergilerler. Genel olarak, dokunmamış malzemeler dokuma malzemelere göre daha düşük rijitliğe sahiptir. Bununla birlikte, dokunmamış malzemelerin daha yüksek uzama kabiliyetine sahip olmaları, onları belirli geotekstil uygulamalarında kullanım için uygun hale getirir. Dokunmamış geotekstillerin üretim yöntemi veya dokuma türü, geotekstillerin istenilen özellikleri karşılaması açısından önemlidir [2]. Çekme dayanımı test bilgileri, Şekil 6'da belirtilmiştir.



Şekil 6. Çekme dayanımı test bilgileri [14]

3.2.1.1. Dar Çeneli Çekme Testi

Dar çeneli çekme testi, geotekstillerin kalite kontrolü ve aynı tür geotekstillerin kıyaslanması için uygulanır. Geotekstil malzemenin sahada keskin agrega parçalarıyla temas etmesi sonucunda gerilmelere maruz kalacağı öngörülmektedir. Dar çeneli çekme testi, bu durumu temsil etmektedir. Dolayısıyla bu test, uygulamada serim işlemi sırasında gerekli olan mekanik dayanımı tespit etmek için kullanılan kriterler arasındadır [14]. Dar çeneli çekme testinde numunenin genişliği, test cihazındaki çenelerin genişliğinden çok daha büyüktür. Test şartları altında, düzlemsel şekil değiştirme koşullarının yaklaşık olarak sağlanması mümkün değildir. Bu nedenle dar çeneli çekme testi, zemin güçlendirme amacıyla kullanılan geotekstillerin değerlendirilmesi için uygun bir yöntem değildir [28].

3.2.1.2. Dar Numune Çekme Testi

Dar numune çekme testinin, tasarım için doğrudan kullanılabilir bir çekme dayanımı değeri sağlamadığı düşünülmektedir. Dar numune çekme testi, küçük boyutlara sahip numuneler kullanılarak çok sayıda ve hızlı bir şekilde test yapılmasına olanak tanır. Dolayısıyla, bu test, kalite kontrol ve kıyaslama için tercih edilir. Ek olarak, uzun bir kullanım süresinden sonra dayanım özelliklerindeki değişimi incelemek amacıyla üzerinde bulunan toprağın kaldırılmasıyla çıkarılan numunelere genellikle bu test uygulanır [14].

3.2.1.3. Geniş Numune Çekme Testi

Geniş numune çekme testinde, numuneler tüm genişlikleri boyunca (200 mm) tutularak çekilir. Çekme dayanımı için elde edilen sonuçlar, numunenin birim genişliği başına uygulanan yük olarak belirtilir. Geniş numune çekme testinde, numunenin genişliği ölçüm uzunluğundan daha büyüktür. Numune genişliğinin ölçüm uzunluğuna oranının artırılması, numunedeki gerilim konsantrasyonu etkilerini büyük miktarda azaltmaktadır [28]. Test sürecinde, numunenin tüm kenarı çenelere sıkıştırılır ve test gerçekleştirilir [6].

3.2.1.4. İki Eksenli Çekme Testi

Geotekstiller, uygulamalarında çoğunlukla iki eksenli yükler altında çalıştıkları için tek eksenli çekme testleri kullanılarak bulunan değerler çok uygun sonuçlar sağlamamaktadır [4]. İki eksenli çekme testinde, geotekstiller kullanım koşullarına benzer şekilde iki eksenle uygulanan yüklere maruz bırakılır. Bu testte, birbirlerine karşılıklı olarak yerleştirilmiş dört çene kullanılır ve geotekstil, dört kenarından çeneler aracılığıyla

ğıyla sıkıştırılır. Sonrasında, numunenin merkezi sabit kalacak biçimde, birbirine karşılıklı olan çeneler eşit hızlarda hareket ettirilir ve numune iki eksenli çekme testine tabi tutulur [6].

3.2.1.5. Sınırlandırılmış Çekme Testi

Sınırlandırılmış çekme testi, saha koşullarında olduğu gibi yanal etkiler dikkate alınarak numunenin çekme dayanımının belirlendiği bir test türüdür. Bu test kapsamında, geotekstil numune iki çene arasına sıkıştırılır ve geotekstilin alt ve üst yüzeylerine ince membran tabakaları yerleştirilir. Çekme testi, bu tabakalar ile malzeme arasına zemin tabakası konularak gerçekleştirilir [6]. Bu test ile geotekstillerin zemindeki davranış biçimine daha yakın sonuçlara ulaşılmaktadır [4].

3.2.2. Çekme Rijitliği

Geniş numune çekme testleri ile gerçek çekme dayanımı, dar numune çekme testlerine kıyasla daha doğru bir şekilde ölçülebilir. Test sonuçları, birim genişlik başına yük ile gerinim arasındaki ilişkiyi ifade eden bir eğri halinde verilir. Modül değerleri bu eğri kullanılarak elde edilebilir [28].

3.2.3. Enerji Absorpsiyonu

Enerji absorpsiyonu, bir çekme testinde numunenin belirli bir çekme gerilimi veya gerinimi değerine kadar uzatılması için yapılan iş olarak tanımlanır. Enerji absorpsiyonu, belirlenen noktaya dek gerilim-gerinim eğrisinin integrali ile elde edilir. Bu değer, kJ/m^2 cinsinden gösterilir. Enerji emilimi, iki özelliği (çekme dayanımı ve uzama) tek bir özellik altında bir araya getirir [28].

3.2.4. Dikiş Yeri Dayanımı

Çekme kuvvetinin kesintisiz olarak iletilebilmesi için geotekstil malzemelerinin başlangıç, bitiş ve kenar bölgelerinin uygun bir şekilde birleştirilmesi gerekir. Geotekstil katmanlarının birleştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri, ek yerlerinin dikilmesidir. Uygulamada çeşitli dikiş yöntemleri kullanılır ve dikiş yerlerinin yük aktarım kapasitesi önemli bir husustur. Dikiş yeri dayanımını tespit etmek için geniş enli çekme testi yapılır. Tek parça olarak ölçülen çekme dayanımı, çekme testi sonucunda elde edilen çekme dayanımı ile karşılaştırılır [6].

3.2.5. Yorulma Dayanımı

Yorulma dayanımının tespitine yönelik olarak döngüsel yükleme çekme testi yapılmaktadır. Bu test, metaller üzerinde sıklıkla gerçekleştirilir.

Bununla birlikte, döngüsel yükleme çekme testleri, polimerik malzemeler için rutin olarak yapılmamaktadır. Yüksek dayanıma sahip geotekstiller üzerinde gerçekleştirilen yorulma çekme testleri, toprak yapılarında geosentetik güçlendirme malzemelerinin aşırı dinamik yükleme karşısında dayanıklılıklarının tespit edilmesi açısından önemlidir [28].

3.2.6. Statik Delinme Dayanımı

Zemindeki çeşitli malzemeler (örneğin sivri taşlar, çeşitli kalıntılar, tahta parçaları), geotekstil uygulamalarında delinmelere yol açabilir [6,14]. CBR (California Bearing Ratio) testi, jeosentetik malzemelerin iki çelik halka arasında sıkıştırıldığı durumda, delinme dayanımını tespit etmek için bir yöntem sunar [28]. Klasik CBR testinde geotekstil numunesine, 50 mm yarıçapa sahip çelik çubuk kullanılarak kuvvet uygulanması söz konusudur. Geotekstil malzemeyi yerleştirirken, gerilme meydana gelmemesi için dikkatli olunmalıdır [6].

3.2.7. Dinamik Delinme Dayanımı

Geotekstile düşen agrega veya uygulama kapsamında yer alan çeşitli malzemelerin neden olduğu ani yükler, geotekstilde delik açılmasına yol açar [6]. Koni Düşüş Testinde, geotekstil test numunesi, 150 mm çapında bir halka içine sabitlenmiştir ve bu numunenin tam ortasına, 1 kg ağırlığında bir çelik koni 50 cm yükseklikten serbest düşme yoluyla çarptırılır. Penetrasyon seviyesi, açılan deliğin çapı ölçülerek bir ölçüm konisiyle tespit edilir. Deliğin büyüklüğü, üzerine sivri uçlu bir taş düştüğünde geotekstilin nasıl tepki vereceği hakkında bilgi verir. Bu test, esas olarak Avrupa'da uygulanmaktadır [28].

3.2.8. Yırtılma Dayanımı

Geotekstiller sahada kullanımları sırasında farklı etkilerden dolayı yırtılma kuvvetlerine maruz kalabilirler. Bu nedenle, geotekstiller yırtılmaya karşı belirli bir dirence sahip olmalıdır. Bu tip koşulların laboratuvar ortamında modellenmesi ve farklı testler aracılığıyla simüle edilmesi gerekir [14]. Geotekstilleri meydana getiren ipliklerde veya birleşim yerlerinde kopmalar gerçekleşebilir. İpliklerdeki kopmalar, geotekstilde yırtılmalara neden olabilir [6].

3.2.8.1. Trapezoidal Yırtılma Testi

Belirli bir açı ile gelen yırtılma kuvvetleri, dokuma yapısındaki ipliklerin kopmasına neden olur. Trapezoidal yırtılma dayanımı, ASTM D4533 testi ile belirlenebilir. Bu testte geotekstil, test cihazına diyagonal olarak konumlandırılır. Testi başlatmak için geotekstil malzemede 15 mm uzunluğunda bir kesim yapılır [14].

3.2.8.2. Düz Yırtılma Testi

Bu test, 75 mm x 200 mm boyutlarındaki geotekstil numunesinde 75 mm uzunluğunda bir başlangıç kesimi yapılarak gerçekleştirilir. Geotekstil, çenelere sabitlenerek test cihazına yerleştirilir. Geotekstil malzemeye, yırtılmanın başlangıç kesimi yönünde ilerleyebileceği şekilde artan bir çekme kuvveti uygulanır [14].

3.2.8.3. Elmendorf Yırtılma Testi

Elmendorf (ASTM D1424) testi, geotekstil malzemede önceden açılmış bir kesimin ilerleyebilmesini sağlamak için gereken kuvvetin hesaplanması esasına dayanır. Test öncesinde numune üzerinde kesik meydana getirilir. Daha sonra, belirli bir mesafeden ağırlık bırakılır ve böylece kesik ilerletilmeye çalışılır [14].

3.2.9. Sıkışabilirlik

Bir geotekstil malzemenin sıkışabilirliği, farklı normal yükler karşısında kalınlığındaki değişimdir. Geotekstillerin sıkışabilirliği çoğunlukla düşük düzeylerde olmaktadır. Bununla birlikte, mekanik olarak bağlanmış dokunmamış geotekstil malzemelerin sıkışabilirlik özelliği, diğer geotekstillere oranla önemli ölçüde yüksektir [4].

3.2.10. Darbe Direnci

Darbe hasarının simülasyonunda, kütlesi 1 kg olan çelik bir bilye kullanılır. Çelik bilye, 1 m yükseklikten düşürülmektedir. Bu test, geotekstil numunesinin darbeye karşı direncini incelemeyi amaçlar [28].

3.3. GEOTEKSTİLLERİN HİDROLİK ÖZELLİKLERİ

Geotekstil malzemelerin hidrolik özellikleri, bu malzemelerin filtre veya drenaj işlevi üstlendiği uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır. Bu tür durumlar için hidrolik gerekliliklerin yerine getirilmesi gerekir [29].

3.3.1 Porozite

Porozite, geotekstil malzemenin geçirgenlik derecesi şeklinde ifade edilebilir [6]. Porozite, boşluk hacminin toplam hacme oranı anlamına gelir ve aşağıdaki formül ile bulunur [29].

$$n_{GT} = 1 - \frac{m}{p_F t_G}$$

n_{GT} = geotekstil porozitesi (%)

m = birim alan başına kütle (g/m^2)

p_F = lif yoğunluğu (g/m^3)

t_G = geotekstil kalınlığı (m)

Geotekstiller genel olarak gözenekli bir yapıya sahiptir. Geotekstil malzemede yer alan gözenekler, hidrolik özellikleri belirgin bir şekilde etkilemektedir. Çünkü, ortam içindeki akışın gerçekleşebilmesi için bu gözeneklerin birbirine bağlı olması gerekir. Geotekstil malzemenin gözenekli bir yapıya sahip olması, özellikle filtrasyon, drenaj ve ayırma fonksiyonlarının yerine getirilmesinde büyük öneme sahiptir [2].

3.3.2. Permitivite

Geotekstil malzemenin, yüzey düzlemine dik yöndeki geçirimsizliğine permitivite denir. Geotekstiller, filtrasyon uygulamaları için yaygın olarak kullanıldığından, geotekstilin geçirimsizlik özellikleri büyük öneme sahiptir [6]. Permitivite değeri şu formül yardımıyla bulunur [29]:

$$\psi = \frac{k_n}{t_G}$$

ψ = permitivite (s^{-1})

k_n = düzlemler arası geçirgenlik (m/s)

t_G = geotekstil kalınlığı (m)

3.3.3. Transmisivite

Geotekstil malzemenin yüzey düzlemi boyunca sahip olduğu geçirimsizlik, transmisivite olarak adlandırılır. Bu değer, birim hidrolik eğim koşullarında birim sürede birim genişlikten akan su miktarı olarak da ifade edilebilir [6]. Drenaj çalışmalarında transmisivite, önemli bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Drenaj kavramı asıl olarak suyun düzlem içi akışını belirtir. Bu kapsamda drenaj, filtrasyon işlevinden farklılık gösterir. Filtrasyon, suyun düzlemler arası yönde akışını ifade eder. Transmisivite değeri, şu formül ile hesaplanır [29]:

$$\theta = k_p t_G$$

θ = transmisivite (m^2/s)

k_p = düzlem içi geçirgenlik (m/s)

t_g = geotekstil kalınlığı (m)

3.3.4. Görünen Boşluk Boyutu

Görünen boşluk boyutu, başlangıçta askeri mühendisler tarafından dokuma geotekstiller için geliştirilmiştir. Görünen boşluk boyutu değerini belirlemek amacıyla ASTM D4751 standardına dayanan bir test uygulanmaktadır. Bu test, çapları belirlenmiş cam boncuklar kullanılarak gerçekleştirilir ve standart kuru elek analizi yöntemiyle yapılır. Geotekstilin içinden geçen cam boncukların oranı %95'e ulaşana kadar, boncukların çapları ayarlanarak işlem sürdürülür ve en son %5'lik kısım kalacak şekilde elenir. Geotekstil üzerinde bulunan cam boncukların %5'inin kaldığı durumda, geotekstilden geçebilen en büyük tane çapı ile O_{95} değeri belirlenir [30].

3.3.5. Boşluk Alanı Yüzdesi

Bir geotekstil katman üzerindeki boşlukların toplam alanının, geotekstil katmanın toplam alanına yüzde olarak oranı, boşluk alanı yüzdesi ile ifade edilir. Boşluk alanı yüzdesi, dokuma geotekstiller söz konusu olduğunda bir tasarım kriteri olarak değerlendirilebilir. Boşluk alanı yüzdesi değerinin daha yüksek olması, geotekstil katman üzerinde birim alan başına daha yüksek miktarda boşluk olduğunu gösterir. Özellikle filtrasyon amaçlı olarak, geotekstil üzerinde bulunan gözeneklerde tıkanmayı engellemek ve hizmet süresini artırmak için boşluk alanı yüzdesi daha büyük olan malzemeler kullanılabilir [4].

3.4. GEOTEKSTİLLERİN DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİ

Geotekstil malzemeler kullanım sürelerinde birçok farklı etki ile karşı karşıya kalabilir. Bu etkiler, bulundukları çevre koşullarına ve çevre ile olan etkileşimlerine göre değişiklik göstermektedir. Sonuç olarak, geotekstillerin özellikle uzun vadede performanslarına karar vermek için dayanıklılık özelliklerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir [4].

Birçok farklı parametre geotekstilin dayanıklılık özelliğine etki eder. Bununla birlikte kullanım ömrü, uygulamanın amacına ulaşması açısından büyük önem taşır. Dayanıklılık konusunda kapsamlı bir değerlendirme yapabilmek için geotekstilin istenen kullanım ömrünün ve içinde bulunacağı çevresel koşulların iyi bir şekilde anlaşılması gerekmektedir [31].

3.4.1. Sünme Dayanımı

Polimer malzemeler sünmeye karşı hassastır. Sünme, polimerlerin değerlendirilmesi için büyük öneme sahiptir [14]. Polimer esaslı hammadde-lerden üretilen geotekstillerde sünme davranışı, hedeflenen kullanıma ve tasarım süresine göre istenmeyen bir özellik olabilmektedir. Geotekstil sünme davranışı malzeme türü, üretim yöntemi, maruz kalınan gerilme düzeyi, ortam sıcaklığı ve süre gibi faktörlerden etkilenir. Sünme dayanımını tespit etmek için geniş enli çekme testi kullanılır. Genel olarak malzemenin çekme dayanımı değerinin %20, %40, %60'ı numuneye uygulanır [6].

3.4.2. Aşınma Dayanımı

Aşınma, geotekstilin bir malzeme ile sürtünmesi nedeniyle yüzeyinden bir kısmının veya parçasının ayrılması ve geotekstilde incelmeye- gelmesi olarak ifade edilebilir [6]. Kıyı erozyonunun önlenmesine yönelik uygulamalar açısından geotekstillerin aşınması sıklıkla söz konusu olmaktadır. Bu uygulamalarda, geotekstiller veya geotekstil takviyeli yapılar üzerinde dalga hareket enerjisinden dolayı sürekli bir gerilim meydana gelir. Bir geotekstil malzemenin aşınma direncini belirlemek söz konusu olduğunda, standart bir aşındırıcı kullanılarak döngüsel aşındırma en sık uygulanan yöntemdir [31]. Yapılan testlerde, genel olarak sürtünmeden dolayı numunenin kütledeki veya dayanımındaki düşüş yüzde olarak tespit edilir [4].

3.4.3. Uzun Dönem Akış (Tıkanma) Testi

Bir geotekstilin su geçirgenliğini uzun vadede tıkanma olmadan korumak performans endişelerinden biridir. Tıkanma riskini değerlendirmek için geotekstillerin test edilmesi gerekir. En temel yöntem, zemin numunesi alıp, bunu test silindirisinin içinde bulunan geotekstilin üstüne yerleştirmektir. Ardından, bu silindire uzun bir süre boyunca sabit bir akış uygulanmaktadır. Test sırasında su akış süresi, granüler zeminlerde 10 saat, ince taneli zeminlerde ise 200 saat arasında değişmektedir. Eğrinin eğimi geçiş sürecinde sıfıra inerse, geotekstilin zeminle uyumlu olduğu tespit edilir. Ancak eğim negatif değerlere düşerse, bu durum geotekstilin tıkanıldığını ve dolayısıyla zemin için uygun olmadığına işaret eder. Bu test yönteminin en önemli dezavantajı, oldukça uzun bir zaman diliminde gerçekleştirilebilmesidir [30].

3.4.4. Eğim Oranı (Tıkanma) Testi

Bu test yöntemi, uzun süreli akış tıkanma testlerine göre daha kısa bir süre içinde tamamlanabilen bir testtir ve zemin-geotekstil sisteminin

hidrolik uyumluluğunu tespit etmeyi amaçlamaktadır. Bu test, ASTM D5101 test yöntemi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu testte, uzun süreli akış testlerine benzer bir akış düzeni meydana getirilir ancak akış oranları yerine, zemin-geotekstil sistemindeki farklı noktalarda hidrolik seviyeler ölçülür. Ölçülen seviyeler, hidrolik eğimlere çevrilir ve GR değeri (Eğim Oranı - Gradient Ratio) elde edilir. Yapılan testler sonucunda, eğim oranının 3.0 değerinden yüksek olması durumunda, zemin numunesi ile kullanılan geotekstilin uygun olmadığı sonucuna varılmıştır [30].

$$GR = \frac{\Delta h_{GT+25S}/t_{GT+25S}}{\Delta h_{50S}/t_{50}}$$

Δ_{GT+25S} = Geotekstilin altından geotekstilin üzerindeki zeminin 25 mm üzerine kadar olan seviye değişimi (mm)

t_{GT+25S} = Geotekstil kalınlığı + 25 mm zemin (mm)

Δh_{50S} = Geotekstilin 50 mm üzerindeki zemindeki seviye değişimi (mm)

t_{50} = 50 mm zemin kalınlığı (mm)

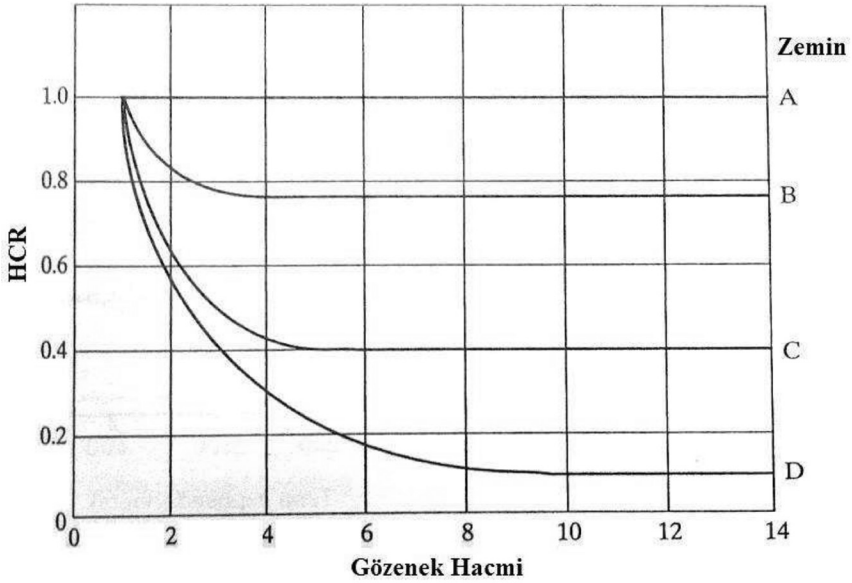
3.4.5. Hidrolik İletkenlik Oranı (Tıkanma) Testi

Bu deneyde, zemin kolonu ASTM D5084:2003 standardına göre oluşturulur ve geotekstil, zemin numunesinin üst yüzeyine konumlandırılır. Geoteknik mühendisliği prosedürlerine uygun şekilde, zeminin saha koşullarında karşılaştığı gerilmeler uygulanır ve test, zeminin sahadaki su miktarı dikkate alınarak yapılır [30].

İlk aşamada sıvı, yukarıdan geotekstilden geçer ve sonra zemin kolonundan ilerleyerek zeminin geçirgenliği belirlenir (k_s). Ardından akış yönü değiştirilir ve sıvı, zemin kolonundan yukarıya doğru geotekstile yönlendirilerek zemin-geotekstil geçirgenliği ölçülür (k_{sg}). Sonuç olarak, HCR (hidrolik iletkenlik oranı) değeri hesaplanır [30].

$$HCR = \frac{k_{sg}}{k_s} \quad (5)$$

Yüksek HCR oranı, zemin kayıplarına neden olurken, düşük HCR oranı ise aşırı tıkanmalara yol açar. HCR değerinin 0.4 ile 0.8 arasındaki orta seviyelerde olması, zemin-geotekstil dengesinin sağlandığını gösterir [30]. Şekil 7’de, hidrolik iletkenlik oranı diyagramı verilmiştir.



Şekil 7. Hidrolik iletkenlik oranı diyagramı [30]

3.5. GEOTEKSTİLLERİN BOZUNMA ÖZELLİKLERİ

Geotekstillerin mekanik özellikleri, zamanla uygulama koşullarına bağlı olarak farklılaşır ve bozunmalar ortaya çıkar. Bu bozunmalar, güneş ışığı, sıcaklık değişimleri, oksidasyon, hidroliz, kimyasal tepkimeler, radyoaktif etkiler ve biyolojik faktörler nedeniyle meydana gelebilmekte olup, geotekstillerin kopma esnasındaki uzama miktarı ve dayanım gibi özelliklerinde ortaya çıkar [30].

3.5.1. UV Bozunması

UV ışınları, geotekstil ürünlerin elde edilmesinde kullanılan polimer malzemeler için ciddi bir bozunma kaynağıdır. Yaz mevsiminden kış mevsimine geçişte güneş ışığının spektrumunda ve şiddetinde değişiklikler meydana gelir. Bunların en belirgin olanı ise kış mevsiminde kısa dalga boylu UV ışınlarının azalmasıdır. Ayrıca, polimer maddelerin UV bozunma sürecine coğrafi bölge, sıcaklık, bulut tabakası, rüzgâr, havadaki nem, atmosfer kirliliği ve ürünün konumu etki eder [32]. Tüm koşulların sahada canlandırılması zordur. Özel durumlar için geotekstil malzeme, uygulanacağı alanın şartlarına uygun olarak test edilmelidir [14].

Ksenon ark ve UV-floresan cihazları, laboratuvar hava koşulları test cihazları arasında yaygın bir şekilde kullanılan cihazlardır. Bu cihazlar, sırasıyla ASTM D4355 ve ASTM D7238 standartlarına uygun olarak yapılan testlerde kullanılır. Her iki cihaz da bozunmanın gerçekleştiği

UV-A ve UV-B bölgeleri için hassas ve doğru spektrumlar oluşturur. Laboratuvar ortamında yapılan hava koşulları testlerinin yanı sıra, ASTM D1435 standardı kapsamında plastiklerin dış ortamda hava koşullarına maruz kalması incelenmektedir. Bu test, karşılaştırmalı bir testtir ve belirli bir iklim, zaman, atmosfer şartları gibi faktörlere bağlı olarak yapılır. Test numunelerinin olabildiğince son uygulamadaki kullanım koşullarını canlandırması gerekir. Bir geotekstil malzeme dış ortam koşullarında aylarca veya yıllarca bekletilecekse ve bu malzemenin UV ışınlarından ne şekilde etkileneceği incelenmek isteniyorsa, dış ortam hava koşulları testleri dikkate alınmalıdır [32].

3.5.2. Oksidasyon Bozunması

Polimerler oksijen ile tepkimeye girerek kademeli bozunmaya uğrar. Bununla birlikte poliolefinler, genel olarak bu bozunmaya karşı en duyarlı polimerlerdir [32]. Poliolefinlerin oksidasyonunun önüne geçmek amacıyla geotekstilin yapısına anti-oksidasyon kimyasalları eklenir [6]. Sıcaklığın yükselmesi durumunda oksidatif bozunma hızı artar. Polipropilenin erime sıcaklığı 165°C, polietilenin erime sıcaklığı ise 125°C'dir. Bu tür yüksek sıcaklıklardan kaçınılması gerekmektedir [32].

3.5.3. Hidrolitik Bozunma

Hidroliz, liflerde iç veya dış reaksiyonlara neden olarak bozunmaya yol açabilir. Belirli reçineler ile üretilen geotekstil ürünleri, daldırıldıkları sıvının çok düşük veya çok yüksek pH seviyesine sahip olması durumunda etkilendir. Çok yüksek pH değerleri bazı polyesterler üzerinde etkili olabilirken, çok düşük pH değerleri bazı polyesterler ve poliamidler için zararlı olabilir [32]. Polyesterlerde hidroliz kaynaklı bir bozunmanın gerçekleşme olasılığı yüksektir [33].

3.5.4. Kimyasal Bozunma

Geotekstiller, kullanımları sırasında farklı çevresel koşullarla karşılaşılır. Ortamın kimyasal özelliklerinin etkisi, geotekstil tasarımı için dikkate alınması gereken önemli konulardan biridir. Bundan dolayı, çevre koşullarının geotekstil malzemenin performansına olan etkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Örnek olarak, çöp sahalarında, polipropilen liflerinden elde edilen dokunmamış geotekstiller, asidik veya alkali çözeltiler ile karşı karşıya gelmektedir. Dünyanın dört bir yanındaki ülkelerde belediye çöp sahalarında bulunan atıkların büyük bir kısmı ıslak gıdalardan ve sıvı atıklardan oluşmaktadır. Bunlar, çöp sahasında asidik ya da alkali özellik sergileyebilir [2]. Tropikal bölgelerde düşük pH değerlerine sahip (2'ye kadar düşen) yüksek derecede asidik turba topraklarında kullanılan tekstil malzemeleri de bu konuda başka bir örnektir [26].

ASTM Metodu D543, kimyasal bozunma konusunu ele almaktadır [32]. Geotekstil malzemenin dayanımında, kütlesinde, boyutunda veya görünümünde değişime neden olacak kimyasallar tespit edilir. Geotekstile belirli bir süre boyunca ve sabit bir sıcaklıkta kimyasal uygulanır. Kimyasaldan etkilenmiş ve etkilenmemiş geotekstil malzemelerin mekanik özellikleri karşılaştırılır. Geotekstil malzemelerin üretiminde, yapılarına belirli kimyasal maddeler ilave edilerek bozunmaları önlenmektedir [6].

Özellikle çöp sahaları, yığın liç alanları ve tarımsal atık tesislerinde kullanılan geotekstiller, standart sıvılardan farklı sıvılarla karşı karşıya kalmaktadır. Buradaki sıvılar sahaya özgü olup çok güçlü etki gösterebilir. Bu tür uygulamalarda, sıvı olarak esas sızıntı suyunun ya da bunun laboratuvar ortamında elde edilmiş bir örneğinin kullanılması gerekir [32].

3.5.5. Radyoaktif Bozunma

Geotekstil malzemelerin radyoaktif bozunması, genel olarak radyoaktif atıkların bertarafı ile ilgili olarak ele alınan bir konudur. Hastane giysileri, nükleer santral ekipmanları ve giysileri, ayrıca yerden yayılan radon gibi kaynaklardan gelen düşük düzeydeki radyoaktif etkinin, geosentetik malzemelerin polimer zincirlerinde parçalanmaya yol açacak kadar yüksek olmadığı düşünülmektedir ancak bu durum henüz kanıtlanmamıştır. Buna karşılık, yüksek seviyeli radyoaktif atıklar (kullanılmış nükleer yakıt çubukları gibi) ise şüpheli durumdadır. Bu atıklar, geotekstil malzemelerin yakın çevresinde bulunmaları halinde radyasyon kaynaklı bozunmaya yol açabilirler [32].

3.5.6. Biyolojik Bozunma

Bakteri veya mantar gibi çeşitli mikroorganizmaların, polimerleri bozundurma için ilk olarak lif veya iplik yüzeyine tutunmaları ve sonrasında polimeri besin kaynağı olarak kullanmaları gerekir. Yaygın olarak kullanılan polimerik reçineler için bu durum pek geçerli değildir. Tekstil alanında kullanılan reçineler yüksek molekül ağırlığına sahiptir. Bu reçineler, biyolojik bozunma sürecini başlatmak için yeterli zincir ucu içermezler [32].

3.5.7. Bozunma Üzerinde Sıcaklığın Etkisi

Plastik malzemelerin mekanik davranışları dikkate alındığında, düşük sıcaklıklarda sertleşme, yüksek sıcaklıklarda ise yumuşama meydana gelmesi beklenen bir durumdur [32]. Polimerler sıcaklığa bağlı olarak elastik-viskoplastik özellik gösterirler. Sıcaklık değişimi, geotekstil malzemelerin stabilitesine etki edebilir. Sıcaklığın çekme dayanımı ve uza-

ma üzerinde etkisi bulunmaktadır. Tasarım ömrü süresince geotekstil malzemenin uygun performans göstermesini sağlamak için, farklı termal iklim koşulları karşısında dayanım değişiminin ne kadar olacağını belirlemek amacıyla geotekstil malzeme üzerinde testler yapılmalıdır [27]. Yüksek sıcaklıklar, polimer malzemelerin bozunma sürecinin hızlanmasına neden olur [32]. Geotekstil üzerine yüksek sıcaklıktaki materyallerin uygulanması gerekiyorsa, geotekstil üretiminde kullanılan malzemenin bozunma sıcaklıkları dikkate alınmalıdır [14].

3.5.8. Yerleştirme Hasarları

Geotekstillerin sahada uygulanması sırasında, bu malzemeler yerleştirme nedeniyle farklı gerilmelere maruz kalmaktadır [14]. Geotekstil malzeme yerleştirilirken yeterince dikkat edilmemesi halinde, geotekstilde ciddi hasarlar oluşabilir [5]. Uygulama sırasında yanlış yerleştirmeden kaynaklanan hasarlar, geotekstil kullanımında karşılaşılan sorunlar arasında yer almaktadır [4]. Bazı durumlarda, uygulama aşamasındaki gerilmeler, geotekstil malzemenin kullanım ömrü içerisinde maruz kalabileceği gerilmelerden daha yüksek olabilmektedir [14]. Geotekstil, yerleştirme esnasında yüklerden veya darbelerden zarar görmemelidir [34]. Yerleştirme hasarı, geotekstilin fonksiyonlarını (drenaj ve güçlendirme gibi) yerine getirme kabiliyetini olumsuz yönde etkileyebilir. Hasar türü uygulamaya bağlı olarak değişir [31].

4. SONUÇ

Geotekstiller, günümüzde inşaat mühendisliğinde önemli bir kullanım alanı bulmuştur. Bu malzemeler, yapıların genel performansı üzerinde etkili olmakta ve sahip oldukları çeşitli özellikleriyle zemine ilişkin çok sayıda sorunun üstesinden gelinmesinde etkili sonuçlar sağlamaktadır. Geotekstil ürünlerinin kullanım yelpazesi, teknolojik gelişmelerle birlikte artmaktadır.

Yapılan çalışma kapsamında geotekstiller, lif türüne ve üretim yöntemine göre sınıflandırılmıştır. Doğal liflerden üretilen geotekstiller biyolojik olarak parçalanabilir ve bu nedenle kullanım ömürleri sınırlı olmaktadır. Ancak günümüzde yenilenebilir kaynakların kullanımı ve sürdürülebilirlik ile ilgili hususlar, doğal liflerden elde edilen geotekstilleri bir seçenek haline getirmektedir. Sentetik liflerden üretilen geotekstiller ise uzun ömürlü ve çürümeye karşı dirençli yapıdadır. Özellikle yüksek çekme dayanımı istendiğinde polyester lifleri kullanılırken, hafiflik ve kimyasal direnç özelliklerine ihtiyaç duyulduğunda polipropilen lifleri kullanılır. Dokuma geotekstiller yüksek çekme dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edilir ve bu malzemelerin geçirgenliği düşüktür. Örme geotekstiller ise yüksek esnekliğe sahip olup su ve hava geçişine

daha çok olanak sağlar. Dokunmamış geotekstiller incelendiğinde ise yüksek geçirgenliğe ve düşük çekme dayanımına sahip oldukları görülmektedir. Bu malzemeler, maliyet açısından uygundur.

Çalışmada, geotekstillerin fiziksel, mekanik, hidrolik, dayanıklılık ve bozunma özellikleri incelenmiştir. Geotekstiller suyun geçişine izin verir ancak toprak parçacıklarının taşınmasını engellemeye yardımcı olur. Geotekstillerin yük taşıma kapasitesi yüksek seviyede olmalıdır. Geotekstiller, sert yüzeylerle karşılaştığında zarar görmeden görevini yerine getirmelidir. Ayrıca bu malzemeler, kimyasal direnç ve UV dayanımı gibi özellikler sergilemelidir. Doğru ürünü seçmek için bu konuların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Yerleştirme sırasında geotekstillerin hasar görmemesi de oldukça önemlidir.

Geotekstillerin doğru ve verimli şekilde kullanılması, kayda değer teknik ve finansal avantajlar sağlamaktadır. Geotekstillerin kullanımını daha verimli hale getirmek için tasarımın, bölgenin zemin özelliklerine göre yapılması önemli bir yer tutmaktadır. Malzeme tercihi sırasında teknik özellikler, çevresel faktörler ve performans gereksinimleri dikkate alınmalıdır. Başarıya ulaşmak için çeşitli yönleri ele alan bir strateji izlemek ve güncel bilgilerden yararlanmak önemlidir. Geotekstil alanında yapılan bilimsel araştırmalar, var olan bilgi birikimini geliştirerek yeni bulgulara katkı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Mecit, D., Ilgaz, S., Duran, D., Başal, G., Gülümser, T., Tarakçıoğlu, I. (2007). Teknik Tekstiller ve Kullanım Alanları (Bölüm 2). Tekstil ve Konfeksiyon, 3, 154–161.
- [2] Rawal, A., Shah, T., Anand, S. (2010). Geotextiles: production, properties and performance. Textile Progress, 42(3), 181–226.
- [3] Döndüren, M.S. (2018). Geogrid ve Geotekstil Malzemelerinin Yığma Yapıların Güçlendirilmesinde Uygulanması. SETSCI Conference Proceedings, 3, 869–874.
- [4] Sağlam, R. (2009). Karayolu Yapımında Geotekstil Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [5] Benek, M.B. (2006). Geotekstiller Üzerine Bir İnceleme ve Uygulama Örnekleri. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [6] Şengül, E. (2016). Tarama Çamurlarının Anyonik Katkılar Kullanılarak Geotekstil Tüpler ile Susuzlaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [7] Arslan, S. (2017). Kil İçeriğinin Zemin-Geotekstil Arayüzündeki Kayma Parametrelerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [8] Muhmood, A.A., Khudhur, R.M. (2021). Using Geotextile to Reduce the Required Thickness of Sub Base Layer of the Road and Improvement in CBR Value. Journal of Physics Conference Series, 1973(1), 012120.
- [9] Wu, H., Yao, C., Li, C., Miao, M., Zhong, Y., Lu, Y., Liu, T. (2020). Review of Application and Innovation of Geotextiles in Geotechnical Engineering. Materials, 13, 1774.
- [10] Desai, A.N., Kant, R. (2016). Geotextiles made from natural fibres. Koerner, R.M. (ed.), Geotextiles: From Design to Applications. Elsevier.
- [11] Vé Wiewel, B., Lamoree, M. (2016). Geotextile composition, application and ecotoxicology—A review. Journal of Hazardous Materials, 317, 640–655.
- [12] Tanasă, F., Nechifor, M., Ignat, M.-E., Teacă, C.-A. (2022). Geotextiles—A Versatile Tool for Environmental Sensitive Applications in Geotechnical Engineering. Textiles, 2(2), 189–208.
- [13] Bayram, A. (2006). Hava Alanları Pist Dolgularının Geosentetik Malzemeler Kullanılarak Güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [14] Bağcı, F. (2007). Geosentetiklerle Projelendirme ve Zemin–Geosentetik Arayüzey Sürtünme Açılarının Değişik Geosentetik ve Zemin Türleri İçin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [15] Çetin Karagül, B. (2007). Yol Dolgularının Geogrid Kullanılarak İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [16] Ergül, E. (2012). Mekanik Olarak Stabilize Edilmiş Zemin Duvarlarının Statik Yükler Altındaki Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [17] Pelyk, L.V., Vasylechko, V.O., Kyrychenko, O.V. (2019). Influence of Biodestructors on the Wear Resistance of Polyester Geotextile Materials. *Colloids and Interfaces*, 3(1), 21.
- [18] Akten, S., Akten, M., Gül, A., Keleş, E. (2014). Jeotekstillerin Peyzaj Onarımında Kullanım Olanakları. Ulusal Mermer ve Taş Ocakları Onarım Teknikleri Sempozyumu.
- [19] Özko, O. (2006). Geosentetik Donatılı İstinat Yapılarının Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [20] Sebastain, S., Divya, P.V. (2024). Natural Fibres: A Sustainable Material for Geotextile Applications. *Indian Geotech Journal*, 54(11), 1056–1072.
- [21] Pritchard, M., Sarsby, R.W., Anand, S.C. (2000). Textiles in civil engineering. Part 2 – natural fibre geotextiles. Horrocks, A.R., Anand, S.C. (eds.) *Handbook of Technical Textiles*, Woodhead Publishing.
- [22] Bérubé, D., Saunier, P. (2016). Geotextiles made from natural fibres. Koerner, R.M. (ed.), *Geotextiles: From Design to Applications*. Elsevier.
- [23] Demirezen, B. (2005). Geosentetik Donatılı İstinat Duvarlarının Sismik Tasarımı Hakkında Bir İnceleme. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [24] Kocaer, M. (2011). Geosentetiklerin Karayolu Yapılarında Kullanımı: Türkiye Örnekleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [25] Ateş, B. (2013). Donatılı Kohezyonsuz Zeminlerde Gerilme Dağılışı. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [26] Rankilor, P.R. (2000). Textiles in civil engineering. Part 1 – geotextiles. Horrocks, A.R., Anand, S.C. (eds.) *Handbook of Technical Textiles*, Woodhead Publishing.
- [27] Torosian, G.T., Mac Millan, P.E.A. (2016). Physical properties, behavior, and testing of geotextiles. Koerner, R.M. (ed.), *Geotextiles: From Design to Applications*. Elsevier.
- [28] Zanzinger, H. (2016). Mechanical properties, behavior, and testing of geotextiles. Koerner, R.M. (ed.), *Geotextiles: From Design to Applications*. Elsevier.
- [29] Cazzuffi, D., Mandaglio, M.C., Moraci, N. (2016). Hydraulic properties, behavior, and testing of geotextiles. Koerner, R.M. (ed.), *Geotextiles: From Design to Applications*. Elsevier.

- [30] Aşkın, H. (2011). Kaplamasız Yolların Geotekstil ile Tasarımında Analitik Çözümle Basitleştirilmiş Yaklaşımların Karşılaştırılması ve Geotekstillerde Enerji Emilim Potansiyelinin Önemi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [31] Allen, S.R. (2016). Geotextile durability. Koerner, R.M. (ed.), Geotextiles: From Design to Applications. Elsevier.
- [32] Koerner, R.M. (2016). Long-term geotextile degradation mechanisms and exposed lifetime predictions. Koerner, R.M. (ed.), Geotextiles: From Design to Applications. Elsevier.
- [33] Prambauer, M., Wendeler, C., Weitzenböck, J., Burgstaller, C. (2019). Biodegradable geotextiles – An overview of existing and potential materials. Geotextiles and Geomembranes, 47, 48-59.
- [34] Uğur, D. (2011). Farklı Geotekstillerin İstinat Duvarı Arkasındaki Kumlu Zeminlerde Donatı Olarak Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bölüm 8

KENTSEL KATI ATIK YÖNETİMİNDE YAPAY ZEKÂ VE NESNELERİN İNTERNETİ İLE YENİ YAKLAŞIMLAR: ATIK TOPLAMA, AYRIŞTIRMA VE GERİ DÖNÜŞÜM İÇİN AKILLI ÇÖZÜMLER

Gökhan Önder ERGÜVEN¹, Bahar İKİZOĞLU²

1 Doç. Dr., Munzur University, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Siyaset Bilimi ve Kamu Yönetimi Bölümü, Çevre Sorunları ve Kentleşme ABD, Tunceli, Türkiye
ORCID: 0000-0003-1573-080X

2 Doç. Dr., Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye ORCID: 0000-0002-6654-7303

GİRİŞ

Sanayileşme ve nüfus artışı, dünya genelinde eşi benzeri görülmemiş düzeyde katı atık üretimine yol açmıştır (Ma ve diğ., 2025). Özellikle kentsel alanlar, nüfus yoğunluğunun artmasıyla oluşan büyük miktardaki katı atığın yönetiminde giderek artan çevresel ve halk sağlığıyla ilgili zorluklarla karşı karşıya kalmıştır (Li ve diğ., 2025). Dünya Bankası tarafından yayımlanan son rapora göre, şehirler her yıl 2 milyar tondan fazla belediye katı atığı (MSW) üretmektedir ve bu miktarın 2050 yılına kadar 3,4 milyar tona çıkması öngörülmektedir (Valavanidis, 2023). Bu atık üretimindeki artış, sınırlı çöp depolama alanları ve uygunsuz atık bertarafının çevresel sonuçlarıyla birleşince, belediye katı atıkları günümüzün en acil sorunlarından biri hâline gelmiştir (Kannan ve diğ., 2024). Daha önce periyodik toplama, manuel ayrıştırma ve çöp sahasına gönderme gibi yöntemlere dayanan geleneksel atık yönetim sistemleri, hızla artan atık miktarına ayak uydurmakta zorlanmaktadır (Anokye ve Mohammed, 2024). Bu sistemler genellikle sabit toplama programları ve temel ayrıştırma işlemleri uygular; bu da yoğun bölgelerde çöp kutularının taşmasına, gereksiz sera gazı emisyonlarına ve kaynakların verimsiz kullanımına neden olur. Araştırmalar, yetersiz atık yönetiminin çevresel ve toplumsal etkilerinin ciddi boyutlarda olduğunu doğrulamaktadır (Liu ve diğ., 2025); örneğin çöp sahaları, küresel ısınmaya önemli ölçüde katkıda bulunan güçlü bir sera gazı olan metanı büyük miktarlarda salmaktadır (Wan ve diğ., 2025). Metan, atmosferde ısıyı tutma açısından karbondioksitten bile daha etkilidir; bu da çöp sahalarından salınan küçük miktardaki metan artışlarının bile bölgesel ve küresel ölçekte ciddi iklim etkileri yaratabileceği anlamına gelir (Boucher ve diğ., 2009). Bu nedenle, belediye katı atık yönetimiyle ilgili sorunlar sadece çevresel kaygılarla sınırlı kalmayıp, sağlık, eşitlik ve ekonomik boyutları da kapsamaktadır (Bieda, 2010). Son yıllarda dijital teknolojilerin, özellikle yapay zekâ (YZ) ve Nesnelerin İnterneti'nin (IoT), gelişimi ve hızlı evrimi, ortaya çıkan bu sorunlara yeni çözümler sunmuştur (Bibri ve diğ., 2024). Günümüzde bu teknolojiler, şehirlerin atık toplama, ayrıştırma ve geri dönüşüm süreçlerini köklü bir şekilde dönüştürmektedir (Shennib ve diğ., 2024). Yapay zekâ, sistemlerin veriye dayalı olarak akıllı kararlar almasını mümkün kılmakta; bu da güzergâh planlama, atık ayrıştırma ve diğer belediye katı atık yönetimi alanlarında daha yüksek doğruluk ve verimlilik sağlamaktadır (Avinash ve Mishra, 2024).

Yapay zekâ ile birleştğinde Nesnelerin İnterneti (IoT) çok daha dönüştürücü bir hâl alır. Yapay zekâ algoritmaları, IoT tarafından üretilen verileri analiz ederek yalnızca kentsel ortamlarda atık oluşum eğilimlerini öngörmekle kalmaz, aynı zamanda toplama programlarını dinamik olarak ayarlayabilir ve kaynak tahsisini optimize edebilir. Ayrıca, yapay

zekâ destekli otomatik ayrıştırma sistemleri, atıkları yüksek doğrulukla sınıflandırarak geri dönüşüm verimliliğini artırabilir ve çöp sahalarına gönderilen atık miktarını önemli ölçüde azaltabilir. Yapay zekâ ve IoT'nin entegrasyonu, yalnızca atık toplama ve ayrıştırma süreçlerini geliştirmekle kalmaz, aynı zamanda geri dönüştürülebilir malzemelerin yaşam döngüsü boyunca izlenebilmesini sağlayarak daha fazla şeffaflık ve sürdürülebilirlik ile döngüsel ekonomiyi de teşvik eder. Yapay zekâ ve IoT'yi kullanan akıllı atık yönetimi çözümleri, dünya genelindeki birçok şehirde büyük potansiyelini şimdiden ortaya koymuştur (El Jaouhari ve diğ., 2025). Dahası, güzergâh optimizasyonu algoritmaları; trafik durumu, çöp kutusu doluluk seviyeleri ve yakıt kullanımı gibi verileri analiz ederek en verimli toplama güzergâhlarını ve zamanlarını belirleyebilir. Gereksiz seyahatlerin ortadan kaldırılması, yakıt tüketimini ve araç yıpranmasını azaltır ve böylece atık toplama faaliyetlerinin toplam karbon ayak izini düşürür.

Yapay zekâ destekli ayrıştırma sistemleri, atık malzemeleri yüksek hassasiyetle tanımlayıp kategorilere ayırabilir; hatta farklı plastik, metal ve diğer geri dönüştürülebilir maddeleri birbirinden ayırt edebilir. Ayrıştırma sürecinin otomatik hâle getirilmesiyle, yapay zekâ atıkların ayrıştırılma hızını ve doğruluğunu önemli ölçüde artırır; bu da geri dönüşüm oranlarını yükseltir ve çöp sahalarına gönderilen atık miktarını azaltır (Sutikno ve diğ., 2024). Toplama ve ayrıştırmanın ötesinde, yapay zekâ ve IoT, geri dönüşüm süreçlerini geliştirerek malzemelerin yaşam döngüsünün son aşamalarına kadar izlenmesini ve doğrulanmasını mümkün kılar. IoT ile birleştirilen blok zinciri (blockchain) teknolojisi, atıkların toplandığı andan işlenip geri dönüştürüldüğü ana kadar değiştirilemez bir kayıt oluşturabilir (Palagan ve diğ., 2025).

Vatandaşların ve paydaşların, atıkları ayırma çabalarının anlamlı çevresel sonuçlara katkı sağladığına dair güven duymaları gerekir; aksi takdirde bu tür programlara katılım göstermeyebilirler. Şehirler ve özel şirketler, atıklarını doğru bir şekilde ayrıştıran vatandaşları teşvik etmek amacıyla veri odaklı ödül programları uygulamaya başlamıştır. Bu tür programlar, sorumlu atık bertarafı kültürünü teşvik ederken döngüsel ekonomiyi geçişi de desteklemektedir.

Yapay zekâ ve Nesnelerin İnterneti (IoT), diğer sektörlerde yaygın şekilde tartışılmış olsa da, atık yönetimindeki uygulamaları yeterince ele alınmamıştır. Yapay zekâ ve IoT'nin belediye katı atık (MSW) yönetimindeki dönüştürücü potansiyeli, yalnızca bireysel yeteneklerinde değil, aynı zamanda bu teknolojilerin birbirini tamamlayıcı şekilde entegre edilmesinde yatmaktadır. Ancak bu bütüncül bakış açısı, mevcut literatürde yeterince araştırılmamıştır. Yüksek nüfus yoğunluğu, sınırlı kaynaklar ve

çevresel etkiler sürdürülebilir ve dinamik bir çözüm gerektirmektedir. Atık malzemelerin yaşam döngüsüne dair değiştirilemez kayıtların oluşturulmasıyla izlenebilirlik ve hesap verebilirlik önemli ölçüde artırılmaktadır.

Ayrıca, akıllı sözleşmelerden faydalanılarak bu yaklaşım, geri dönüşüm davranışlarını teşvik eden yenilikçi ödüllendirme mekanizmaları da sunmaktadır ve böylece döngüsel ekonomiye geçişi desteklemektedir. Bu kavramlar, şeffaflık ve paydaş güveni gibi, ilgili teknolojilerin yaygın şekilde benimsenmesi açısından kritik öneme sahip alanları ele aldıkları için, sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilmesinde büyük ölçüde başarı sağlamaktadır.

Bu yenilikçi çerçevelerin sentezlenmesi ve bunların pratik etkilerinin incelenmesi yoluyla, bu çalışma uygulanabilir içgörüler sunmakta ve gelecekteki araştırmalar için bir yol haritası ortaya koymaktadır. Böylece hem belediye katı atık (MSW) yönetiminin teknolojik hem de toplumsal boyutlarına hitap etmektedir. Bu katkılar, yapay zekâ (AI) ve Nesnelerin İnterneti'ni (IoT), kentsel sürdürülebilirliği, halk sağlığını ve toplum katılımını dönüştürebilecek araçlar olarak konumlandırmaktadır.

Aynı zamanda bu derleme, akıllı atık teknolojilerindeki son gelişmeleri sentezleyerek bu sistemlerin hem pratik uygulamalarına dair içgörüler sunmakta hem de bu teknolojilerin yaygın şekilde benimsenmesinin önündeki potansiyel engelleri ortaya koymaktadır. Son olarak, bu makale, dijital yeniliklerin atık yönetimini nasıl devrim niteliğinde dönüştürebileceğini anlamak için sağlam bir temel sunmakta ve sürdürülebilirlik ile operasyonel verimlilik arayışındaki şehirler için bir uygulama yol haritası önermektedir.

Vaka çalışmaları, karşılaştırmalı analizler ve gelecekteki araştırma fırsatlarının tartışıldığı bu çalışma, teknolojik ilerlemelerin içgörülerini; atık yönetimi uygulamalarını etkileyen sosyal, çevresel ve düzenleyici faktörlerin eleştirel bir değerlendirmesiyle birleştirmektedir. Nihayetinde bu çalışma, AI ve IoT'nin MSW yönetiminin çok yönlü zorluklarını nasıl ele alabileceğine dair ileriye dönük bir bakış açısı sunmayı ve akıllı atık çözümlerinin daha sürdürülebilir, verimli, adil, katılımcı ve dirençli şehirler yaratmadaki dönüştürücü potansiyelini vurgulamayı amaçlamaktadır.

TEKNOLOJİNİN ATIK TOPLAMADA YARATTIĞI AVANTAJLAR

Son yıllarda, yapay zekâ (AI) ve Nesnelerin İnterneti (IoT) alanındaki gelişmeler, belediye katı atık (MSW) yönetimini yeniden şekillendirmeye başlamış ve akıllı teknolojilerin daha verimli, sürdürülebilir ve çevre

dostu çözümlere doğru evrilmesini sağlamıştır (Zyoud ve Zyoud, 2024). Rutin toplama programlarına ve manuel ayrıştırılmaya büyük ölçüde dayanan geleneksel yaklaşımlar, artık gerçek zamanlı veriler ve akıllı karar alma süreçleri kullanılarak dönüştürülmektedir. AI ve IoT'nin atık yönetim sistemlerine entegrasyonu, şehirlerin toplama, ayrıştırma ve geri dönüşüm gibi karmaşık süreçleri eşi benzeri görülmemiş bir verimlilik ve doğrulukla yönetebilmesine olanak tanımaktadır.

En etkili yenilikler arasında; sensörlerle donatılmış akıllı çöp kutuları, yapay zekâ destekli güzergâh optimizasyon algoritmaları ve öngörücü analiz modelleri yer almakta olup, bu unsurlar birlikte giderek daha kentleşen bir dünyada kapsamlı bir atık yönetimi yaklaşımı sunmaktadır.

Akıllı çöp kutuları, dünya genelinde şehirlerde atık toplama yöntemlerini devrim niteliğinde değiştirmektedir (Zoumpoulis ve ark., 2024). Atık seviyelerini ölçebilen, kokuları algılayabilen ve kutu durumunu izleyebilen sensörlerle donatılmış, nesnelerin İnterneti destekli çöp kutuları, MSW yönetim sistemlerine gerçek zamanlı veri sağlamaktadır. Bu veriler, şehir genelindeki atık seviyelerini izleyen merkezi bir sisteme aktarılıyor ve kaynakların etkin planlanması ile tahsisini mümkün kılar. Sadece dolu kutuların toplanmasını sağlayarak, atık yönetim sistemleri gereksiz seferlerden kaçınılabilir; bu durum hem operasyonel maliyetleri azaltır hem de toplama araçlarının yol üzerindeki çevresel etkisini en aza indirir. Bu özellik, şehir merkezleri, parklar ve turistik alanlar gibi yüksek trafikli yerlerde özellikle değerlidir, çünkü temizlik hem yerel çevre hem de halk memnuniyeti için kritik önemdedir. Buna karşılık, IoT destekli çöp kutuları, gerçek atık seviyelerine yanıt veren dinamik toplama programları sunmaktadır. Bu yaklaşım, gereksiz toplama sıklığını önemli ölçüde azaltarak atık yönetim hizmetlerinin kaynaklarını daha verimli kullanmasını sağlar. Bazı bölgelerin diğerlerinden daha fazla atık ürettiği şehirlerde, akıllı çöp kutuları, toplama hizmetlerinin daha yoğun kullanılan alanlara odaklanmasını sağlarken, düşük atıklı bölgelere ayrılan kaynakları azaltır. Bu optimizasyon, belediyelerin bütçe kısıtlamalarıyla karşılaştığı durumlarda özellikle faydalı, çünkü yakıt tüketimini, araç aşınmasını ve işçilik maliyetlerini azaltır. Örneğin, akıllı çöp kutularından alınan gerçek zamanlı verilerle atık toplama güzergahlarının optimize edilmesi, araç yakıt tüketimini %30'a kadar azaltabilir. Yakıt kullanımındaki bu azalma, karbon dioksit emisyonlarını doğrudan düşürerek şehirlerin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine yaklaşmasına yardımcı olur. Aslında, atık yönetimi için IoT tabanlı sistemleri uygulayan şehirler, büyük ölçüde yakıt tüketimi ve araç aşınmasının azalmasıyla, genel operasyonel maliyetlerinde %25'e varan düşüşler elde edebilir. Akıllı atık yönetim sistemleri, toplam sürüş mesafesinde %20 azalma sağlayarak emisyonların azaltılmasına daha fazla katkıda bulunur.

Dolu seviyesinin ve koku izleme özelliklerinin yanı sıra, akıllı çöp kutuları, zaman içinde atık üretim kalıplarını analiz eden yapay zeka (YZ) algoritmalarıyla da entegre edilebilir. Farklı bölgelerde bırakılan atık türleri ve miktarları hakkında veri toplayarak, YZ destekli sistemler çeşitli demografik yapılar, lokasyonlar ve zaman dilimleri arasındaki atık üretim alışkanlıkları hakkında içgörüler geliştirebilir. Güzergâh optimizasyonu, YZ ve Nesnelerin İnterneti'nin (IoT) katı belediye atıkları (MSW) yönetiminde sağladığı bir diğer önemli ilerlemedir (Olawade ve ark., 2024). Ayrıca, sefer sayısını azaltarak ve güzergahları optimize ederek şehirler, atık toplama ile ilişkili karbon ayak izini önemli ölçüde düşürebilir. Genellikle dizel yakıt kullanan atık toplama kamyonlarının emisyonları, kentsel alanlarda hava kirliliğine ciddi katkıda bulunur. YZ destekli güzergâh optimizasyonu, yakıt tüketimini ve emisyonları azaltmakla kalmaz, aynı zamanda araçların aşınmasını ve yıpranmasını minimize ederek toplama araçlarının ömrünü uzatır. Bu da araç bakımı ve değiştirme sıklığını ve maliyetini düşürerek atık yönetim sistemleri için çevresel ve finansal faydalar sağlar (Wolniak ve Stecuta, 2024). Öngörücü analiz, YZ'nin genişleyen araç setindeki bir başka önemli araçtır. Güçlü veri işleme yetenekleri sayesinde şehirler, atık üretim kalıplarını şaşırtıcı bir doğrulukla tahmin edebilir. Tarihsel verileri mevsimsel trendler, etkinlik takvimleri ve topluluk demografileri gibi değişkenlerle birlikte analiz ederek, YZ sistemleri atık üretimindeki dalgalanmaları önceden tahmin eder ve toplama programlarını bu değişikliklere göre ayarlayabilir. Birçok şehirde, yılın belirli dönemleri, örneğin tatil sezonu veya yaz ayları, artan tüketim ve turizm nedeniyle daha yüksek atık seviyeleri görebilir. Bu mevsimsel trendler anlaşıncaya, MSW yönetim sistemleri önceden hazırlık yapabilir, yoğun dönemlerde ek kaynaklar konuşlandırabilir ve düşük atık dönemlerinde kaynak kullanımını azaltabilir. Ayrıca, YZ algoritmaları, artan geri dönüşüm oranları veya atık azaltma programlarının uygulanması gibi topluluk alışkanlıklarındaki ve politikalarındaki değişiklikleri de dikkate alarak toplama stratejilerinde sürekli ayarlamalar yapılmasını sağlar. Bu şekilde, öngörücü analiz daha duyarlı ve uyumlu bir atık yönetim yaklaşımını destekler, şehirlerin sürdürülebilirlik ve verimlilik hedeflerine ulaşmasına yardımcı olurken kamu temizliği standardını yüksek tutar. YZ ve IoT'nin atık yönetimine entegrasyonu, döngüsel ekonominin gelişimine katkı sağlayan gelişmiş geri dönüşüm uygulamaları için de fırsatlar yaratır (El jaouhari ve ark., 2025). Plastik, metal ve cam gibi malzemeleri atık bırakma noktasında tanımlayarak, akıllı çöp kutuları geri dönüşüm sürecini kolaylaştırır ve çöplüklere gönderilen atık hacmini azaltır.

Akıllı atık yönetimi teknolojilerinin uygulanması, aynı zamanda daha geniş sürdürülebilirlik hedefleriyle de uyum içerisindedir. Dünya

genelindeki şehirler, karbon ayak izlerini azaltma konusunda artan bir baskı altındadır ve YZ ile IoT tabanlı atık yönetim sistemleri bu konuda uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır (Hussain ve ark., 2024). Atık toplama sıklığını azaltarak, güzergahları optimize ederek ve gelişmiş geri dönüşüm sayesinde çöplük kullanımını minimize ederek, bu teknolojiler kentsel karbon emisyonlarının azaltılmasına önemli ölçüde katkı sağlar.

ATIK AYRIŞTIRMADA YAPAY ZEKA (YZ) VE NESNELERİN İNTERNETİ (IoT)

Otomatik atık ayrıştırma sistemleri, özellikle Yapay Zeka (YZ) ve makine öğrenimi entegrasyonu ile malzeme geri kazanım tesislerinin (MRF) verimliliğini ve doğruluğunu yeniden tanımlıyor. Bu teknolojiler, yalnızca manuel iş gücüne olan bağımlılığı azaltmakla kalmıyor, aynı zamanda atıkların ayrıştırılmasında eş benzeri görülmemiş bir doğruluk sağlıyor; bu da geri dönüşüm oranlarının artırılmasında ve atıkların çöplüklere gitmesinin önlenmesinde kritik bir rol oynuyor. Bu gelişmiş sistemler, atık malzemelerdeki ince farklılıkları tanımlamalarını sağlayan geniş veri setleri üzerinde eğitilmiştir ve böylece her bir öğenin doğru şekilde ayrıştırılarak uygun geri dönüşüm akışına gönderilmesini garanti eder. Bu görevlerin otomasyonu, insan müdahalesine duyulan ihtiyacı en aza indirirken, ayrıştırma verimliliğini artırarak MRF'lerin daha kısa sürede daha yüksek hacimde atık işlemlerini mümkün kılar.

Yapay zekâ destekli robotlar, tekrarlayan işlemler ve farklı atık malzemelere maruz kalma yoluyla doğruluklarını geliştirebilir ve ambalajda kullanılan yeni tür malzemeler gibi ortaya çıkan atık türlerine uyum sağlayabilir. Bilgisayarlı görme teknolojisi kullanarak, ayrıştırma tesisleri, konveyör bantlarını gerçek zamanlı tarayabilir; her bir öğenin şekli, rengi, boyutu ve dokusunu analiz ederek malzeme bileşimini belirler. Bu, öğelerin neredeyse anında sınıflandırılması ve uygun işleme alanlarına yönlendirilmesini sağlayarak son derece verimli bir ayrıştırma imkânı sunar (Solahuddin, 2022) ve diğer malzemeler için de geçerlidir. Bilgisayarlı görme sistemlerinin çalışma hızı, malzemelerin ayrıştırma hattı boyunca sürekli akışını sağlar, darboğazları azaltır ve işlem hacmini maksimize eder.

Atık bileşimi ve hacmi hakkında bilgi paylaşımı yaparak, paydaşlar kaynak tahsisi, geri dönüşüm programlarının geliştirilmesi ve atık üretimini azaltmaya yönelik halk bilgilendirme kampanyaları konusunda bilinçli kararlar alabilirler. Bu veri odaklı yaklaşım, kentsel topluluk içindeki belirli atık sorunlarına yönelik daha etkili ve hedeflenmiş müdahaleleri mümkün kılar. Atıkların manuel olarak ayrıştırılması yoğun iş gücü gerektirmekte ve çalışanları tehlikeli maddeler ile hijyenik olma-

yan koşullara maruz bırakılmaktadır. Robotik ve yapay zeka sistemleri, bu zorluklara uygulanabilir bir çözüm sunarak MRF'lerin (Malzeme Geri Kazanım Tesisleri) insan gücüne olan bağımlılığını azaltırken güvenli ve verimli çalışmasını sağlar. Ayrıca, YZ'nin sağladığı artırılmış ayrıştırma doğruluğu, daha yüksek kalitede geri dönüştürülmüş malzemeler anlamına gelir ve bu malzemeler piyasada daha değerli olur. MRF'lerden iyi ayrıştırılmış malzeme alan geri dönüşüm tesisleri, bu malzemeleri daha verimli ve düşük maliyetle işleyebilir, böylece geri dönüşüm ekonomik olarak daha sürdürülebilir hale gelir. Yüksek kaliteli geri dönüştürülmüş malzemeler, üreticilere primli fiyatlarla satılabilir; bu da atık yönetim sistemleri için olumlu bir gelir kaynağı yaratır ve geri dönüşüm altyapısına yapılan yatırımları teşvik eder. YZ'nin MRF'lerdeki rolü, malzemelerin tek kullanımlık olarak atılmak yerine sürekli tekrar kullanıldığı döngüsel ekonomi kavramını teşvik ederek sürdürülebilirliği destekler. Geri dönüştürülebilir malzemelerin atık akışından verimli şekilde ayrılarak üretim sürecine geri kazandırılmasıyla, YZ destekli ayrıştırma sistemleri birincil kaynaklara olan talebi azaltır, enerji tasarrufu sağlar ve yeni malzemelerin üretimiyle ilişkili sera gazı emisyonlarını düşürür. Böylece, MRF'lerde YZ ve IoT teknolojileri kaynak kullanımını kapatan döngünün tamamlanmasında ve daha sürdürülebilir bir ekonomiye geçişte kritik bir rol oynar. Geleceğe bakıldığında, YZ ve IoT'nin MRF'leri daha da dönüştürme potansiyeli büyüktür. Makine öğrenimi algoritmalarındaki gelecekteki gelişmeler, robotik ve sensör teknolojilerindeki iyileşmelerle birleştiğinde ayrıştırma hassasiyetini daha da artıracaktır. Bu gelişmeler, MRF'lerin çok daha geniş bir atık malzeme yelpazesini işlemelerine olanak tanıyacak, geri kazanım oranlarını yükseltecek ve çöplüklere giden atık miktarını daha da azaltacaktır.

AKILLI TEKNOLOJİLERLE GELİŞTİRİLMİŞ GERİ DÖNÜŞÜM

Blokszincir teknolojisi, IoT sensörleriyle entegre edildiğinde, geri dönüştürülebilir malzemelerin toplanmasından nihai işlenmesine kadar olan şeffaf ve izlenebilir yolculuğunu sağlayarak atık yönetimi sektöründe devrim yaratma potansiyeline sahiptir (Kumar ve ark., 2025). Bu sistem, her bir geri dönüştürülebilir atık parçasının takip edilmesini ve doğrulanmasını mümkün kılarak, malzemenin doğru işleme tesisine ulaştığını ve nihayetinde çöplüklere gitmek yerine geri dönüştürüldüğünü garanti eder. Tüketiciler için böyle bir şeffaflık, geri dönüşüm çabalarının somut sonuçlarını doğrulayabilmeleri nedeniyle güven oluşturur. Atık yönetim şirketleri ise artan kamu güveni ve hesap verebilirlikten faydalanarak sürdürülebilir uygulamalara olan bağlılıklarını pekiştirir. Geri dönüşüm süreci boyunca her bir ürünün yolculuğunun güvenli ve değiştirilemez bir kaydını sağlayarak blokszincir, izlenebilirliği artırır, sapma riskini azaltır ve geri dönüşüm düzenlemeleri ile hedeflerine uyumu sağlar.

Daha yüksek kalitede ayrıştırma, piyasada yüksek değerli uygulamalara daha uygun ve daha saf malzemeler üretir; böylece geri dönüştürülmüş malzemeler endüstri standartlarını karşılayabilir ve üretimde birincil hammaddelerin yerini alabilir. Sonuç olarak, yüksek kaliteli geri dönüş-türülebilir malzemelere olan talep artar, bu da üretimde geri dönüş-türülmüş içerik kullanımının yaygınlaşmasını destekler ve kaynak çıkarım ihtiyacını azaltır.

Gerçek zamanlı geri bildirim sağlayan ve aktif katılım için ödüller veya indirimler sunan bu platformlar, sorumlu atık bertarafını teşvik eder ve geri dönüşümü daha ilgi çekici ve ödüllendirici bir deneyim haline getirir. Vatandaşlar, geri dönüşüm hedeflerini gerçekleştirdiklerinde veya belirlenen noktalarda atıkları doğru şekilde ayırdıklarında, yerel hizmetlerde indirimler veya nakit ödüller gibi teşvikler kazanabilirler. Bu platformlar aracılığıyla toplanan veriler, şehirlerin ve şirketlerin geri dönüşüm kalıplarını daha iyi anlamasına, atık toplama programlarını optimize etmesine ve ek geri dönüşüm eğitiminin gerekli veya faydalı olabileceği alanlara odaklanmasına olanak tanır.

KARAR VERME SÜREÇLERİNDE ATIK VERİ ANALİZLERİ-NİN ENTEGRASYONU

Kentsel atık yönetiminde veri toplama ve analizler, belediyelerin atık desenleri, bertaraf alışkanlıkları ve toplama verimlilikleri hakkında ayrıntılı bilgi edinmelerini sağlayan dönüştürücü bir yaklaşımdır (Mim ve ark., 2025). Atık kutularına ve toplama araçlarına entegre edilen IoT cihazları, atık hacimleri, kutu kullanımı ve bertaraf sıklığı gibi verileri sürekli olarak toplar (Stankovic ve ark., 2024). Bu desenlerin anlaşılması sayesinde şehir yetkilileri, kaynakların optimal tahsisi konusunda bilinçli kararlar verebilir; atık toplamının etkinliğini artırırken bazı bölgelerin gereksiz yere aşırı hizmet almasını önler.

Öngörücü modellemenin sağlanması, atık yönetim sistemlerini güçlendirerek değişen kentsel taleplere karşı daha dayanıklı hale getirir. Yukarıda belirtilenlerden, IoT özellikli kutular ve toplama araçlarından toplanan verilerin operasyonel verimliliği önemli ölçüde artırabileceği açıktır. Bu veriler ayrıca belediyelerin karar verme süreçlerini destekleyen güçlü bir araç olarak işlev görür; şehir planlamacıları ve politika yapıcılar, atık yönetimi politikaları, altyapı yatırımları ve halk bilgilendirme programları tasarlarlarken daha bilinçli tercihler yapabilirler. Toplanan verilerden elde edilen bütünsel içgörüler, depolama alanlarına bağımlılığın azaltılması veya geri dönüşüm oranlarının artırılması gibi daha geniş çevresel hedeflerle uyumlu sürekli atık yönetim stratejilerinin geliştirilmesi için temel sağlar. Mevcut performans ve ilerleme hakkında net bir

görüşe sahip olan şehirler, atık yönetimi çabalarını bölgesel veya ulusal çevresel hedeflerle uyumlu hale getirerek hesap verebilirliği teşvik eder ve zaman içinde ölçülebilir iyileştirmeler sağlar.

Veri içgörülerinin kamuoyu ile paylaşılması, belediyelerin şeffaflığını artırır ve topluluk katılımını atık azaltma çabalarında teşvik eder. Örneğin, birçok şehir, sakinlerin atık toplama programları, geri dönüşüm oranları ve yerel çevre girişimleri hakkında gerçek zamanlı bilgi alabileceği uygulamalar veya çevrimiçi platformlar sunmuştur. Ayrıca, belediyeler bu veri içgörülerini hedefe yönelik halk bilgilendirme kampanyaları düzenlemek için kullanabilir. Bu hedeflenmiş kamu eğitimi yaklaşımı, kaynakların etkili bir şekilde tahsis edilmesini sağlar ve sürdürülebilir atık bertarafı konusunda en çok rehberliğe ihtiyaç duyan topluluklara ulaşır (Zyoud ve Zyoud, 2024).

Gelişmekte olan bir uygulama, sadece atık hacimlerini değil, aynı zamanda atık toplama alanlarındaki hava kalitesi veya sıcaklık gibi çevresel faktörleri de ölçebilen akıllı sensörlerin entegrasyonudur. Atık bertaraf desenleri ile çevresel koşullar arasındaki ilişkileri analiz ederek, şehirler özellikle yoğun nüfuslu kentsel alanlarda atık birikiminin neden olabileceği potansiyel sağlık risklerini belirleyip azaltabilir. Bu teknolojiler geliştikçe, veri toplamanın doğruluğu ve ayrıntı düzeyi artacak, şehirler atık kaynaklarını daha hassas şekilde tespit edebilecek ve atık sorunlarına katkıda bulunan spesifik davranışları hedefleyebilecektir. Örneğin, belirli türde işletmeler orantısız şekilde yüksek miktarda atık üretiyorsa, şehirler o sektörde atık azaltımını teşvik edecek politikalar veya teşvikler getirebilir. Bu tür hedeflenmiş müdahale stratejisi, atık yönetimi çabalarının etkili olmasını ve doğrudan atık üretim kaynaklarını ele almasını sağlayarak sürdürülebilirlik girişimlerinin etkisini maksimize eder. Yüksek tepki düzeyleri, kamusal temizlik seviyesini artırır ve toplanmamış atıkların çevresel zarar verme olasılığını azaltır.

Veri odaklı atık yönetiminin bir diğer kritik avantajı da döngüsel ekonomiyi desteklemesidir (Ling ve ark., 2025). Atık bileşimi desenlerinin belirlenmesi sayesinde, şehirler geri dönüşüm süreçlerini kolaylaştırabilir ve kaynak geri kazanım oranlarını iyileştirebilir. Örneğin, ilgili veriler belirli bölgelerde elektronik atıkların yaygın olduğunu gösteriyorsa, belediyeler bu tür atıkların toplanması veya geri dönüştürülmesi için özel programlar başlatabilir; böylece metal ve nadir toprak elementleri gibi değerli malzemeler geri kazanılır ve tekrar kullanılır (Firmansyah ve ark., 2024). Bu yaklaşım sadece çöplüklere bağımlılığı azaltmakla kalmaz, aynı zamanda yerel sanayileri güvenilir bir geri dönüştürülmüş malzeme kaynağı sağlayarak destekler.

Birçok kentsel alanda, piller, kimyasallar ve elektronik atıklar gibi tehlikeli maddelerin uygunsuz bertarafı önemli çevresel ve sağlık riskleri oluşturur (Ghulam ve Abushammale, 2023). Sensörler kullanılarak tehlikeli maddelerin tespiti ve sınıflandırılması sayesinde, MSW yönetim sistemleri bu maddelerin uygun şekilde işlenmesini sağlar ve genel atık akışını kirletmelerini önler. Bu yetenek, tehlikeli atık üretiminin daha yüksek olduğu sanayi bölgelerinde özellikle değerlidir; böylece şehirler uygun bertaraf uygulamalarını zorunlu kılarak halk sağlığını korur. Tehlikeli atık takibinden elde edilen veriler, daha sıkı düzenlemelerin getirilmesi veya yüksek riskli maddeler için bertaraf ücretlerinin artırılması gibi politika kararlarını bilgilendirebilir.

Özellikle üretim ve perakende sektörlerinde faaliyet gösteren birçok işletme önemli miktarda atık üretir ve bu nedenle belediye atık yönetimi stratejilerinde kilit paydaşlardır. Şirketler, belediyenin verilerini kendi atık yönetimi uygulamalarını optimize etmek, atık üretimini azaltmak ve maliyetleri düşürmek için kullanabilir. Bu ortaklıklar, şehirler ve işletmeler için sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu koordineli bir atık yönetimi yaklaşımı oluşturur. Zamanla, daha fazla şirket bu girişimlere katıldıkça, şehrin toplam atık seviyesi azalır ve belediye atık yönetim çabalarının etkinliği artar.

Sonuç olarak, IoT ve YZ destekli veri toplama ve analizlerin benimsenmesi, kentsel atık yönetiminde paradigmayı değiştiren bir yaklaşımdır. Şehirler artan atık sorunlarıyla mücadele ederken, veri odaklı stratejiler kaynak tahsisi, kamu katılımı ve uzun vadeli çevresel hedefler için hayati önemdedir. Bir diğer önemli hedef ise, geri dönüşüm programlarının başarı oranını artırmak için sakinleri sürdürülebilir uygulamalara dahil etmektir. Bu amaçla, şehirler gerçek zamanlı verileri kullanarak eğitim kampanyaları düzenleyebilir, geri dönüşüm teşvikleri sunabilir ve atık ayırma ile kompostlamayı teşvik edebilir. İnteraktif platformlar ve sosyal medya farkındalığı yayarken, oyunlaştırma ve topluluk etkinlikleri katılımı teşvik edebilir. Sorumluluk duygusunu pekiştirip sürdürülebilir davranışlar için ödüller sunarak, şehirler atık azaltımına aktif katılımı teşvik edebilir. Bu strateji, operasyonel verimliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda daha temiz, sağlıklı ve sürdürülebilir bir kentsel çevre yaratır ve yeni bir atık yönetim standardı belirler.

SINIRLAYICI FAKTÖRLER VE ZORLUKLAR

Belirgin faydalarına rağmen, YZ ve IoT sistemlerinin MSW uygulanması zorluklar içerebilir; özellikle yüksek başlangıç maliyetleri, gizlilik ve güvenlik kaygıları ile teknik sınırlamalar açısından (Fang ve ark., 2023). Ayrıca, şehirler kurulan sistemleri çalıştırmak ve bakımını yapmak üzere

personel eğitimi için de maliyetleri göz önünde bulundurmalıdır. Operasyonel verimliliklerde uzun vadeli tasarruflar ve azalan atık bertaraf maliyetleri bu ilk harcamaları dengeleyebilse de, başlangıçtaki yüksek finansal yük genellikle belediyeler için bir engel oluşturur.

Mali kaygıların yanı sıra, gizlilik ve güvenlik sorunları, MSW yönetimi için IoT cihazlarının devreye alınmasında kritik başka bir zorluktur. Bu cihazlar, sakinlerin atık bertaraf alışkanlıkları hakkında ayrıntılı veriler toplar ve bu durum istemeden kişisel gizliliğin ihlal edilmesine yol açabilir. Bazı insanlar, bertaraf davranışlarının izleniyor olmasından rahatsızlık duyabilir ve bu da uygulamaya karşı tepkiye neden olabilir. Şehirlerin toplanan veri türü, verilerin nasıl kullanılacağı ve kimlerin erişimi olacağı konusunda şeffaf olmaları gerekir. Güçlü korumalar olmadan, veri kötüye kullanımı riski bulunur; bu, veri ihlalleri veya yetkisiz üçüncü taraflarla paylaşım şeklinde olabilir. Kamuoyunun güvenini kazanmak için belediyelerin veri yönetimi uygulamaları konusunda proaktif iletişimde bulunmaları ve mevcut gizlilik düzenlemelerine uyumu sağlamaları önemlidir. Sorumluluk ve şeffaflık için bir çerçeve oluşturmak, sadece vatandaşların endişelerini gidermek için değil, aynı zamanda IoT ve YZ teknolojilerinin MSW yönetiminde daha geniş kabulünü kolaylaştıracak bir güven kültürü yaratmak için de gereklidir.

Teknik sınırlamalar, YZ ve IoT sistemlerinin uygulanmasında bir başka karmaşık katman oluşturur. Örneğin, malzeme tanımlamasındaki doğruluk sorunları, geri dönüştürülebilirlerin yanlış ayrılmasına yol açabilir ve böylece gelişmiş sistemlerin uygulanma amacını zayıflatır. Bu tür hatalar, makine öğrenimi algoritmalarındaki sınırlamalar veya sensör okumalarını engelleyen çevresel koşullar gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanabilir. Ayrıca, sensör arızaları veya bağlantı sorunları gibi teknik aksaklıklar, operasyonların aksamasına neden olabilir; bu da atık toplama gecikmeler ve taşma veya kirlenme risklerinin artması anlamına gelir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için şehirler, teknolojilerin ilk kuruluşu kadar sürekli bakım ve destek için de yatırım yapmalıdır. Bu, sorunları giderebilecek, düzenli bakım yapabilecek ve sistemlerin zaman içinde güvenilir şekilde çalışmasını sağlayacak nitelikli teknisyenlerin istihdamını da içermelidir.

GELECEK YÖNELİMLER VE ARAŞTIRMA OLANAKLARI

YZ ve IoT teknolojilerinin atık yönetimine entegrasyonu, özellikle atık üretiminin yüksek ve giderek arttığı kentsel ortamlarda daha sürdürülebilir uygulamalara doğru önemli bir dönüşümü temsil etmektedir. Bu dönüşüm, toplama ve ayrıştırma verimliliğinin artırılmasına odaklanırken, aynı zamanda atığın kaynağında önlenmesine vurgu yapmaktadır.

Öngörücü analizler kullanılarak, akıllı sistemler sürdürülebilir tüketim modellerini teşvik edebilir, aşırı atık üretimini azaltabilir ve daha döngüsel bir ekonomiye geçişi kolaylaştırabilir.

YZ destekli atık önleme, atık oluşmadan önce onu ele almayı amaçlayan yükselen bir odak alanıdır. Öngörücü analizler sayesinde belediyeler, kendilerine özgü tüketim kalıplarını anlayabilir ve atığın en aza indirilebileceği alanları belirleyebilir. Örneğin, marketler YZ algoritmalarını kullanarak satış verilerini analiz edebilir, talebi tahmin edebilir ve stok seviyelerini buna göre ayarlayabilir. Bu proaktif yaklaşım, gıda israfını azaltmaya yardımcı olurken aynı zamanda fazla stok bulundurma ihtiyacını da en aza indirerek perakendeciler için maliyet tasarrufu sağlar. Benzer şekilde, üreticiler YZ'yi üretim süreçlerini optimize etmek ve üretim sırasında malzeme israfını azaltmak için kullanabilir. Bu veri odaklı yaklaşım, Unilever'in aşırı üretim ve buna bağlı atıkları minimize etmesini sağlayarak sürdürülebilir uygulamalara olan bağlılığını güçlendirmektedir.

Ayrıca, atık ayrıştırma ileri robotik teknolojiler geri dönüşüm alanında devrim yaratmakta ve şehirlerin atığı benzeri görülmemiş ölçekte işlemelerine olanak tanımaktadır. Robotik otomasyon, ayırma doğruluğunu ve verimliliğini artırmak için Geri Kazanım Tesislerine (MRF) giderek daha fazla entegre edilmektedir. YZ destekli robotlar, şekil, boyut ve bileşime göre farklı malzemeleri hızlı ve hassas bir şekilde tanımlayarak, insan gücüne kıyasla geri dönüşüm oranlarını önemli ölçüde artırmakta ve şehirlerin iddialı sıfır atık hedeflerine ulaşmasına yardımcı olmaktadır.

Teknolojik ilerlemelerin yanı sıra, AI ve IoT teknolojilerinin Katı Atık Yönetiminde başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için etkili politika ve düzenleyici destekler büyük önem taşımaktadır. Hükümetler, akıllı atık yönetim sistemleri için net standartlar belirleyerek, kılavuzlar ve çerçeveler sağlayarak, şehirler arasında tutarlılık ve verimliliği garanti altına alarak ve kamu ile özel sektör arasında iş birliğini teşvik ederek yenilik için uygun bir ortam yaratabilirler. Kamu-özel sektör ortaklıkları, gelişmiş atık yönetimi çözümlerinin benimsenmesini kolaylaştırmada da önemli bir rol oynayabilir. Teknoloji sağlayıcılarıyla iş birliği yaparak, belediyeler atık toplama, ayırma ve geri dönüşüm süreçlerini iyileştiren yenilikçi sistemler geliştirmek için uzmanlık ve kaynaklardan faydalanabilirler. IoT sensörlerinin kullanımı sayesinde şehir, atık kutularının doluluk oranlarını gerçek zamanlı olarak izleyebilir, toplama güzergâhlarını optimize edebilir ve yakıt tüketimi ile iş gücü maliyetlerini azaltabilir. Bu iş birliği, kamu-özel sektör ortaklıklarının nasıl yeniliği teşvik edip atık yönetimi sonuçlarını iyileştirebileceğine güzel bir örnek teşkil etmektedir.

Ayrıca, AI ve IoT teknolojilerine yatırım yapmak isteyen şehirler için finansman olanakları kritik önemdedir. Hükümetler, akıllı atık yönetim çözümlerinin geliştirilmesini ve uygulanmasını desteklemek için kaynak ayırabilir, böylece belediyelerin ilk yatırım maliyetlerine bağlı finansal engelleri aşmaları mümkün olur. Şehirlere yenilikçi teknolojileri benimsemeleri için hibe veya teşvikler sağlayarak, yetkililer yaygın benimsemeyi teşvik edebilir ve sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarına geçişi hızlandırabilir.

Mali desteğin yanı sıra, halk bilinçlendirme kampanyaları da AI ve IoT teknolojilerinin atık yönetimine entegrasyonunun başarısını sağlamak için gereklidir. Vatandaşların akıllı atık sistemlerinin faydaları ve bunların sürdürülebilirliğe katkıları konusunda bilinçlendirilmesi, topluluk katılımını ve geri dönüşüm girişimlerini teşvik etmeye yardımcı olabilir. Şehirler, doğru atık bertaraf uygulamaları, geri dönüşümün önemi ve teknolojinin atık yönetimini iyileştirmedeki rolü hakkında farkındalık yaratmak için sosyal medya platformları ve topluluk etkinliklerinden yararlanabilirler.

Şehirler atık yönetimiyle ilgili zorluklarla mücadele etmeye devam ederken, AI ve IoT teknolojilerinin entegrasyonu sürdürülebilirlik ve verimlilik açısından umut vadeden bir yol sunmaktadır. Ancak, hükümetler, teknoloji sağlayıcıları ve halk arasında iş birliğinin sağlanması için belirli uygulanabilir stratejilerin devreye alınması gerekmektedir. Paralel olarak, yerel yönetimler, akıllı atık yönetiminin faydalarına odaklanan halk bilinçlendirme kampanyaları başlatmalı, vatandaşların ve işletmelerin sürdürülebilirlik çabalarına anlamlı katkılar sağlayabileceğini vurgulamalıdır. Bu, eğitim programları, topluluk atölyeleri ve atık azaltma ve geri dönüşüm çabalarını takip edip ödüllendiren dijital platformları içerebilir. Bu programlar, vatandaşların atık yönetimi alışkanlıklarını izleyebileceği, geri dönüşüm ipuçlarına erişebileceği ve sorumlu tüketim ile bertaraf için teşvik ve ödüller alabileceği AI destekli uygulamalarla entegre edilebilir.

Böylece, hükümetler politikaların yalnızca destekleyici değil, aynı zamanda uygulanabilir olmasını sağlayarak sürdürülebilir atık yönetimi hedeflerine yönelik tutarlı ilerlemeyi teşvik edebilirler. Bu stratejilerin politika çerçevelerine dahil edilmesi, AI ve IoT teknolojilerinin MSW yönetim sistemlerine entegrasyonunu güvence altına alacak net ve uygulanabilir bir iş birliği yolu oluşturulmasına yardımcı olacaktır. Hükümet kurumları, özel sektör yenilikçileri ve halk arasında yakın koordinasyon yoluyla belediyeler, bu teknolojileri atık üretimini azaltmak ve geri dönüşüm oranlarını artırmak için kullanabilir ve nihayetinde daha sürdürülebilir ve döngüsel bir kentsel ekonomi inşa edebilirler.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

AI ve IoT teknolojilerinin kentsel katı atık yönetimine entegrasyonu, hızla büyüyen şehirlerde artan atık bertarafı ve geri dönüşüm zorluklarına çözüm sunan dönüştürücü bir değişimi temsil etmektedir. Belediye nüfusları artıp tüketim alışkanlıkları evrildikçe, şehirler çevresel sürdürülebilirlik ve halk sağlığını tehdit eden önemli atık yönetimi sorunlarıyla karşı karşıya kalmaktadır. AI ve IoT teknolojileri, yalnızca operasyonel verimliliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda daha sürdürülebilir kentsel ekosistemler için sağlam bir temel oluşturacak yenilikçi çözümler sunar. Toplama, ayırma ve geri dönüşüm süreçlerinin optimize edilmesiyle bu teknolojiler, kentsel çevresel ayak izlerini en aza indirmede, döngüsel ekonomiyi desteklemede ve şehirlerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarında kritik bir rol oynar.

AI ve IoT'nin atık yönetimindeki faydaları, atık yaşam döngüsünün çeşitli aşamalarını kapsar. AI destekli öngörücü analizler, nüfus yoğunluğu, mevsimsel değişiklikler ve topluluk etkinlikleri gibi faktörlere bağlı olarak atık üretimini tahmin etmeye olanak tanıyarak atık yönetim sistemlerini güçlendirir. Makine öğrenimi algoritmaları, belediyelerin toplama programlarını optimize etmesini sağlar; böylece çöp kutuları taşmadan önce boşaltılır, bu da çevre kirliliği ve halk sağlığı risklerini azaltır. Bu proaktif yaklaşım, aynı zamanda sakinler için kullanım deneyimini iyileştirir ve toplumlarda sürdürülebilirlik kültürünü teşvik eder.

Şehirler iddialı geri dönüşüm hedeflerine ulaşmaya çalışırken, robotik ayırma sistemleri Malzeme Geri Kazanım Tesislerinin (MRF) verimliliğini ve etkinliğini büyük ölçüde artırır. Akıllı atık yönetim sistemleri, IoT cihazları aracılığıyla atık hacimleri, bertaraf sıklıkları ve kutu kullanımını gibi gerçek zamanlı veriler toplar; böylece belediyeler atık akış desenlerini analiz eder ve kaynakları daha etkili kullanabilir. IoT teknolojisi sayesinde şehirler yüksek atık üreten alanları belirleyebilir ve toplama programlarını buna göre ayarlayabilir. Bu yaklaşım, operasyonel verimliliği artırırken yakıt tüketimi ve iş gücü ile ilişkili maliyetleri azaltarak atık yönetimini ekonomik olarak daha uygulanabilir kılar.

AI ve IoT teknolojileri gelişmeye devam ettikçe, atık yönetimde devrim yaratma potansiyelleri daha da artacaktır. Politika yapıcılar, veri gizliliği standartları belirleyerek, teknolojiye adil erişimi sağlayarak ve belediyelerin bu yenilikleri uygulaması için finansman fırsatları sunarak akıllı atık yönetim çözümlerinin benimsenmesini kolaylaştıran düzenleyici bir ortam yaratmalıdır. Kamu-özel sektör ortaklıkları da kritik önemdedir; çünkü kaynaklar ve uzmanlık birleştirilerek en son teknoloji atık yönetim çözümlerinin geliştirilmesi ve uygulanması sağlanır.

Sosyal medya, yerel bilgilendirme faaliyetleri ve topluluk etkinlikleri, şehirler tarafından doğru atık bertarafı ve geri dönüşüm uygulamaları hakkında farkındalığı artırmak için kullanılabilir. Vatandaşlar bu girişimlere aktif katılım gösterdikçe, sürdürülebilir alışkanlıklar konusunda daha fazla sorumluluk üstlenir ve geri dönüşüm oranlarının artmasına katkıda bulunurlar.

Atık üretim desenlerine ilişkin verilerin analiz edilmesiyle şehirler, daha verimli altyapılar tasarlayabilir, yeni geri dönüşüm programları başlatabilir ve hedefli kamu bilgilendirme kampanyaları uygulayabilir; böylece politikaların en yüksek etki için kanıta dayalı olması sağlanır.

AI ve IoT'nin avantajlarına rağmen, yüksek başlangıç maliyetleri, gizlilik endişeleri ve teknik sınırlamalar gibi bazı zorluklar devam etmektedir. Bu engelleri aşmak için politika yapıcılar, şehirlerin bu teknolojilere yatırım yapmasını desteklemek üzere mali destek, hibeler ve teşvikler sunabilir. Hükûmetler ayrıca vatandaşların kişisel bilgilerini korumak ve IoT cihazlarının yalnızca atık yönetimi amaçlarıyla kullanılmasını sağlamak için güçlü veri gizliliği politikaları oluşturmalıdır. Bu kaygıların giderilmesi, güven inşa ederek kamu katılımını artırabilir. Şehirler, bu teknolojilerin güvenilirliği ve etkinliğini sağlamak için yatırım yapmalıdır. Ayrıca politika yapıcılar, AI ve IoT sistemlerinin farklı kentsel ortamlarda optimal şekilde çalışmasını güvence altına almak için teknik standartlar oluşturmalıdır.

Kentsel atık yönetiminde AI ve IoT'nin büyük potansiyelinin gerçekleştirilmesi için iş birliği ve yenilik, uygulama çabalarının ön saflarında yer almalıdır. İleri teknolojiye yapılan stratejik yatırımlar, halk bilinçlendirme kampanyaları ve sürdürülebilirlik kültürünün teşvik edilmesine yönelik kararlılıkla birlikte, çevresel zararları en aza indiren, kaynakları koruyan ve daha yeşil bir geleceğe katkı sağlayan dayanıklı, döngüsel bir kentsel sistem yaratılacaktır. Bu bütünleşik yaklaşım sayesinde şehirler yalnızca atık yönetiminin anlık zorluklarını ele almakla kalmayacak, aynı zamanda iklim değişikliğiyle mücadele ve çevresel adalet gibi daha geniş hedeflere katkıda bulunarak daha yaşanabilir kentsel ortamlar oluşturacaktır. Bu stratejileri benimseyen topluluklar, gelecek nesiller için daha temiz ve sürdürülebilir bir geleceğin yolunu açabilir.

Kaynakça

- Anokye K., Mohammed A.S. (2024). Indigenous traditional knowledge for cleaner waste systems and sustainable waste management system in Ghana, *Cleaner Waste Systems*, 9, 100165.
- Liu H., Shang H., Yu J. (2025). Why waste sorting implementation remains ineffective: A theoretical analysis based on the generation process of waste sorting behavior in China, *Waste Management*, 201, 114812.
- Wan L., Liu G., Su X. (2025). Global meta-analysis reveals different grazing management strategies change greenhouse gas emissions and global warming potential in grasslands, *Geography and Sustainability*, 6, 3, 100251.
- Bieda B. (2010). Decision support systems based on the economic feasibility assessment for Municipal Solid Waste (MSW) Management under Uncertainty using SimLab® toolpack, *Procedia- Social and Behavioral Sciences*, 2, 6, 7609-7610.
- Arteaga C., Silva J., Yarasca-Aybar C. (2023). Solid waste management and urban environmental quality of public space in Chiclayo, Peru. *City, Environ. Interact.* 20, 100112.
- Avinash L.S., Mishra A. (2024). Comparative evaluation of Artificial intelligence based models and kinetic studies in the prediction of biogas from anaerobic digestion of MSW, *Fuel*, 367, 131545.
- Palagan, C.A., Joe, S.S.A., Mary, S.J.J., Jijo, E.E. (2025). Predictive analysis-based sustainable waste management in smart cities using IoT edge computing and blockchain technology, *Computers in Industry*, 166, 104234.
- Zoumpoulis, P., Konstantinidis, F.K., Tsimiklis, G., Amditis, A. (2024). Smart bins for enhanced resource recovery and sustainable urban waste practices in smart cities: A systematic literature review, *Cities*, Volume 152, 105150,
- Mim, S.J., Richter, A., Gitifar, A., Chowdhury, R., Ng, K.T.W. (2025). The use of efficiency metrics for cross-jurisdictional assessment of household hazardous waste collection and recycling, *Journal of Cleaner Production*, 503, 145420,
- Ling, Z.S., Jaafar, M.H., Ismail, N. (2025). The knowledge, attitudes and practices in circular economy: A review of industrial waste management in China, *Cleaner Waste Systems*, 11, 100276.
- Kumar, N., Kumar, K., Aeron, A., Verre, F. (2025). Blockchain technology in supply chain management: Innovations, applications, and challenges, *Telematics and Informatics Reports*, 18, 100204.
- El jaouhari A., Samadhiya, A., Kumar, A., Mulat-weldemeskel, E., Luthra, S., Kumar, R. (2025). Turning trash into treasure: Exploring the potential of AI in municipal waste management. An in-depth review and future prospects, *Journal of Environmental Management*, 373, 123658.
- Shengbin, Ma, Zhongfu Li, Ruiyan Zheng. (2025). Evaluating the contribution of on-site industrialized construction technologies towards industrialization goals, *Journal of Building Engineering*, 109, 113022.

- Bibri, S.E., Krogstie, J., Kaboli, A., Alahi, A. (2024). Smarter eco-cities and their leading-edge artificial intelligence of things solutions for environmental sustainability: A comprehensive systematic review, *Environ. Sci. Ecotechnol.* 19, 100330.
- Boucher, O., Friedlingstein, P., Collins, B., Shine, K. (2009). The indirect global warming potential and global temperature change potential due to methane oxidation, *Environ. Res. Lett.* 4044007.
- Choudhary, M., Singh, D., Parihar, M., Choudhary, K.B., Nogia, M., Samal, S., Mishra, R. (2024). Impact of municipal solid waste on the environment, soil, and human health. *Waste Management for Sustainable and Restored Agricultural Soil*, Elsevier, January, pp. 33–58.
- Fang, B., Yu, J., Chen, Z., Osman, A.I., Farghali, M., Ihara, I., Hamza, E.H., Rooney, D. W. Yap, P.S. (2023). Artificial intelligence for waste management in smart cities: a review, *Environ. Chem. Lett.* 21 (4), 1959–1989.
- Ferronato, N., Torretta, V. (2019). Waste mismanagement in developing countries: a review of global issues, *Int. J. Environ. Res. Public Health* 16 (6).
- Firmansyah, M.L., Rizki, I.N., Amalina, I., Abdul Jalil, A., Ullah, N. (2024). Recovery of precious metals from mobile phone waste: studies on leaching and adsorption by functionalized activated carbon, *Results Eng.* 22, 102011.
- Ghulam, S.T., Abushammala, H. (2023). Challenges and opportunities in the management of electronic waste and its impact on human health and environment, *Sustainability* 15 (3), 1837.
- Li, Y., Chen, B., Yang, S., Jiao, Z., Zhang, M., Yang, Y., Gao, Y. (2025). Advances in environmental pollutant detection techniques: Enhancing public health monitoring and risk assessment, *Environment International*, 197, 109365.
- Holanda Filho, R., de Brito, W.A., Paiva, M.G., Klemensov, P.A.C., de Oliveira, L.S. (2024). A sustainable recycling ecosystem scheme based on IoT to promote social benefits, *Procedia Comput. Sci.* 238. 344–351.
- Hussain, I., Elomri, A., Kerbache, L., El Omri, A. (2024). Smart city solutions: Comparative analysis of waste management models in IoT-enabled environments using multiagent simulation, 103, *Sustainable Cities and Society*, 105247.
- Kannan, D., Khademolqorani, S., Janatyan, N., Alavi, S. (2024). Smart waste management 4.0: the transition from a systematic review to an integrated framework, *Waste Manage.* 174, 1–14.
- Lakhout, A., Shaban, M., Alatawi, A., Abbas, S.Y., Asiri, E., Al Juhni, T., Elsayy, M. (2023). Machine-learning approaches in geo-environmental engineering: exploring smart solid waste management, *J. Environ. Manage* 330, 117174.
- Li, C., Lee, T., Lau, S.S.Y. (2023). Enhancement of municipal solid waste management in hong kong through innovative solutions: a review, *Sustainability* 15, 3310.

- Olawade, D.B., Fapohunda, O., Wada, O.Z., Usman, S.O., Ige, A.O., Ajisafe, O., Oladapo, B.I. (2024). Smart waste management: a paradigm shift enabled by artificial intelligence, *Waste Manage. Bull.* 2, (2) 244-263.
- Ravindra, K., Sareen, A., Dogra, S., Mor, S. (2024). Emerging green technologies for bio- medical waste treatment and management: a systematic approach, *Water Air Soil Pollut.* 235 (10), 635.
- Shah, H.H., Amin, M., Pepe, F., Tregambi, C. (2024). Sustainable waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy through various waste management technologies, *Environmental Science and Pollution Research*. PMID: 38589589
- Shennib, F., Eicker, U., Schmitt, K. (2024). OpenWasteAI open data, IoT, and AI for circular economy and waste tracking in resource-constrained communities, *IEEE Technol. Soc. Mag.* 43 (1), 39–53.
- Shijina, B., Sooraj, P., Babu, S., Nainachan, A. Towards a Greener Future: IoT-Enabled Waste Management Systems, *Authorea Preprints*, 2024.
- Solahuddin, B.A. (2022). A comprehensive review on waste paper concrete, *Results Eng.* 16 (2022) 100740.
- Stankovic, S., Milutinovic, N., Ivanovic, M., Milenkovic, M. (2024). Integration of smart waste management solutions: a case study of QR code-based recyclable waste monitoring system, in: 2024 47th MIPRO ICT and Electronics Convention (MIPRO), IEEE, 2024, 1943–1948.
- Sutikno, T., Ardiansyah, A., Pujiyanta, A., Handayani, L. (2024). Artificial intelligence technologies in urban smart waste management, *High-Tech Innov. Ser.* 1, 55–66.
- Valavanidis, A. (2023). Global Municipal Solid Waste (MSW) in Crisis. Two billion tonnes of MSW every year, a worrying worldwide environmental problem, 1, 1-28.
- Wolniak, R., Stecula, K. (2024). Artificial Intelligence in Smart Cities Applications, Barriers, and Future Directions: A Review, *Smart Cities* 7 (3), 1346–1389.
- Zhang, Z., Chen, Z., Zhang, J., Liu, Y., Chen, L., Yang, M., Osman, A.I., Farghali, M., Liu, E., Hassan, D. (2024). Municipal solid waste management challenges in developing regions: A comprehensive review and future perspectives for Asia and Africa, *Sci. Total Environ.* 172794.
- Zyoud, S., Zyoud, A. (2024). Internet of things supporting sustainable solid waste management: global insights, hotspots, and research trends, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 1–30.

